bhv

SolidWorks

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ИНЖЕНЕРНОЙ ПРАКТИКЕ

Прочность, устойчивость, колебания
COSMOSWorks, COSMOSDesignSTAR

Аэрогидродинамика и теплопередача
COSMOSFloWorks, EFD.Lab

Кинематика и динамика механических систем
COSMOSMotion

Оптимизация конструкций
COSMOSWorks Optimization

Разработка изделий из листового металла
SolidWorks, BlankWorks

Проектирование типовых элементов механических систем
SolidWorks Toolbox, GearTrax

Светотехнический анализ и проектирование
TracePro, ReflectorCAD



МАСТЕР

+CD-ROM

SolidWorks

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ИНЖЕНЕРНОЙ ПРАКТИКЕ

Санкт-Петербург
«БХВ-Петербург»
2005

УДК 681.3.06
ББК 32.973.26-018.2
А60

Алямовский А. А. и др.

А60 SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / Авторы: Алямовский А. А., Собачкин А. А., Одинцов Е. В., Харитонович А. И., Пономарев Н. Б. — СПб.: БХВ-Петербург, 2005. — 800 с.: ил.

ISBN 5-94157-558-0

Рассматриваются программы для инженерного анализа в совокупности с системой графического моделирования пакета SolidWorks. Описываются методики расчетов на прочность, устойчивость и колебания в приложениях COSMOSWorks, COSMOSDesignSTAR, аэродинамики, гидродинамики и теплопередачи на основе программ COSMOSFloWorks, EFD.Lab, кинематики и динамики механических систем посредством COSMOSMotion. Показана оптимизация конструкций с помощью COSMOSWorks Optimization. Дана методика разработки изделий из листового металла с использованием приложений SolidWorks, BlankWorks. Уделено внимание проектированию типовых элементов механических систем в программах SolidWorks Toolbox, GearTrax, светотехническому анализу и проектированию в приложениях TracePro, ReflectorCAD. Все методики проиллюстрированы реальными инженерными расчетами. На компакт-диске содержатся полноцветные версии иллюстраций и готовые примеры расчетов.

Для инженеров, студентов, аспирантов и преподавателей вузов

УДК 681.3.06
ББК 32.973.26-018.2

Группа подготовки издания:

Главный редактор	*Екатерина Кондукова*
Зам. главного редактора	*Игорь Рыбинский*
Зав. редакцией	*Григорий Добин*
Редактор	*Татьяна Лапина*
Компьютерная верстка	*Ольги Сергиенко*
Корректор	*Зинаида Дмитриева*
Дизайн серии	*Инны Тачиной*
Оформление обложки	*Игоря Цырульникова*
Зав. производством	*Николай Тверских*

Лицензия ИД № 02429 от 24.07.00. Подписано в печать 25.02.05.
Формат 70×100 1/16. Печать офсетная. Усл. печ. л. 64,5.
Тираж 3000 экз. Заказ №
"БХВ-Петербург", 194354, Санкт-Петербург, ул. Есенина, 5Б.

Санитарно-эпидемиологическое заключение на продукцию
№ 77.99.02.953.Д.006421.11.04 от 11.11.2004 г. выдано Федеральной службой
по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека.

Отпечатано с готовых диапозитивов
в ГУП "Типография "Наука"
199034, Санкт-Петербург, 9 линия, 12

ISBN 5-94157-558-0

© Алямовский А. А. и др., 2005
© Оформление, издательство "БХВ-Петербург", 2005

Оглавление

Об авторах **8**

Введение **9**

Аудитория 10
Предназначение 11
Соглашения 12
Благодарности 13
Контактная информация 13

Глава 1. SolidWorks как база для инженерных приложений **14**

1.1. Интегрированные CAD/CAE-системы 14
1.2. Твердотельное моделирование 16
1.3. Поверхностное и гибридное моделирование 17
1.4. Работа в сборке 18
1.5. Работа в режиме чертежа 20
1.6. Обмен графической информацией 20

Глава 2. Методы решения уравнений физики в механических САПР **22**

2.1. Основы метода конечных элементов 22
2.1.1. Понятие конечного элемента 23
2.1.2. Построение программы МКЭ 26
2.1.3. Учет нелинейности в процедурах МКЭ 28
2.2. Метод конечных объемов 32
2.3. Методы оптимизации в инженерном анализе 38
2.3.1. Параметрические системы проектирования как элемент систем оптимизации 39
2.3.2. Базовые понятия нелинейного программирования 40
2.3.3. Алгоритм метода комплексов 45
2.3.4. Использование процедур оптимизации в САПР 49
2.4. Методы построения оптических моделей и расчета изображений 52

Глава 3. Структурная механика — линейная задача (COSMOSWorks) **57**

3.1. Назначение 58
3.2. Теоретическая база 59
3.3. Интерфейс 60
3.4. Функциональные возможности 69
3.4.1. Базовые возможности анализа 69
3.4.2. Последовательность расчета 70
3.4.3. Свойства материалов 71
3.4.4. Граничные условия 71
3.4.5. Генерация сетки 72

3.4.6. Контактная задача ... 72
3.4.7. Решатели ... 72
3.4.8. Постпроцессор ... 72
3.4.9. Интерфейсы ... 73
3.4.10. Возможности версии 2005 года ... 73
3.5. Проектирование и расчет емкости ... 76
3.5.1. Постановка задачи ... 76
3.5.2. Подготовка геометрической твердотельной модели ... 77
3.5.3. Построение поверхностной модели ... 78
3.5.4. Анализ ... 79
3.5.5. Решение ... 80
3.6. Моделирование резьбового соединения ... 88
3.6.1. Постановка задачи ... 88
3.6.2. Анализ ... 88
3.6.3. Решение ... 89
3.6.4. Упрощенная модель резьбового соединения ... 94
3.6.5. Имитация затяжки болта ... 97
3.7. Проектирование фланца ... 104
3.7.1. Постановка задачи ... 104
3.7.2. Анализ ... 105
3.7.3. Решение ... 106
3.7.4. Модификация конструкции ... 115
3.8. Расчет трубопроводных конструкций ... 118
3.8.1. Постановка задачи ... 118
3.8.2. Подготовка геометрической твердотельной модели ... 120
3.8.3. Построение поверхностной модели ... 122
3.8.4. Анализ ... 123
3.8.5. Решение ... 124
3.9. Выводы ... 129

Глава 4. Структурная механика — нелинейная задача (COSMOSDesignSTAR, COSMOSWorks) ... 131

4.1. Назначение ... 132
4.2. Теоретическая база ... 133
4.3. Интерфейс ... 134
4.4. Функциональные возможности ... 134
4.4.1. Базовые возможности анализа ... 135
4.4.2. Последовательность расчета ... 135
4.4.3. Свойства материалов ... 136
4.4.4. Генерация сетки ... 137
4.4.5. Граничные условия ... 137
4.4.6. Контактная задача ... 137
4.4.7. Постпроцессор ... 137
4.4.8. Решатели ... 138
4.4.9. Интерфейсы ... 138
4.5. Восстановление геометрии трубных заготовок ... 139
4.5.1. Постановка задачи ... 139
4.5.2. Анализ ... 141
4.5.3. Решение ... 142

4.5.4. Анализ технологического процесса ... 153
4.5.5. Оценка влияния модификации на характеристики и прогноз функциональности ... 156
4.6. Выводы ... 162

Глава 5. Аэрогидродинамика и теплопередача ... 163

5.1. COSMOSFloWorks, EFD.Lab, EFD.V5 ... 163
5.2. Кому и зачем нужны эти расчеты? ... 165
5.3. Возможности COSMOSFloWorks ... 169
5.3.1. Математическое моделирование физических процессов ... 170
5.3.2. Решение поставленной математической задачи ... 184
5.4. Взаимодействие с SolidWorks ... 191
5.4.1. Твердое тело и область, занятая текучей средой ... 193
5.4.2. Проект и конфигурация ... 205
5.4.3. Визуализация результатов в среде SolidWorks ... 207
5.4.4. Интерфейс COSMOSFloWorks ... 214
5.5. Решение задачи ... 222
5.5.1. Возможность решения задачи ... 222
5.5.2. Модификация модели SolidWorks ... 223
5.5.3. Создание проекта COSMOSFloWorks ... 225
5.5.4. Физические особенности ... 254
5.5.5. Задание граничных и начальных условий ... 261
5.5.6. Постановка целей проекта ... 296
5.5.7. Регулирование расчетной сетки ... 297
5.5.8. Управление процессом расчета ... 310
5.5.9. Просмотр результатов ... 327
5.5.10. Инструменты COSMOSFloWorks ... 357
5.5.11. Определение точности полученного решения ... 360
5.6. Стратегия решения задачи ... 366
5.6.1. Рекомендации по просмотру результатов ... 368
5.6.2. Основные ошибки пользователей ... 370
5.7. Вместо заключения ... 373

Глава 6. Проектирование элементов механических систем ... 377

6.1. Кулачки ... 377
6.1.1. Функциональные возможности и ограничения ... 378
6.1.2. Интерфейс ... 379
6.1.3. Практика использования ... 379
6.2. Проектирование и расчет балок ... 398
6.2.1. Функциональные возможности и ограничения ... 398
6.2.2. Интерфейс ... 399
6.2.3. Практика использования ... 399
6.3. Расчет подшипника ... 411
6.4. Toolbox Browser ... 413
6.5. GearTrax ... 416
Функциональные возможности и ограничения ... 417
Интерфейс ... 420
Практика использования ... 430
6.6. Выводы ... 453

Глава 7. Кинематика и динамика (COSMOSMotion) 455

7.1. Назначение 456
7.2. Теоретическая база 456
7.3. Интерфейс 457
7.4. Функциональные возможности 461
7.4.1. Возможности версии 2005 года 462
7.4.2. Команды программы 462
7.4.3. Интерфейс с COSMOSWorks 471
7.5. Моделирование кулачкового механизма 474
7.5.1. Постановка задачи 474
7.5.2. Анализ 475
7.5.3. Решение 476
7.5.4. Рассмотрение результатов 496
7.5.5. Модифицирование конструкции 501
7.6. Выводы 508

Глава 8. Листовой металл — развертки и заготовки (SolidWorks, BlankWorks) 510

8.1. Назначение 511
8.2. Теоретическая база 512
8.2.1. Развертки в SolidWorks 512
8.2.2. Развертки в BlankWorks 518
8.3. Функциональные возможности и ограничения 519
8.3.1. Листовой металл в SolidWorks 519
8.3.2. BlankWorks 528
8.4. Получение заготовки рычага 532
8.4.1. Постановка задачи 532
8.4.2. Анализ 533
8.4.3. Подготовка поверхностной модели 534
8.4.4. Решение 538
8.4.5. Выводы 540
8.5. Выводы 540

Глава 9. Светотехнический анализ и проектирование (TracePro, ReflectorCAD) 542

9.1. Назначение 542
9.2. Теоретическая база 544
9.3. Интерфейс 549
9.3.1. Дерево проекта 549
9.3.2. Меню 551
9.3.3. Панели инструментов 551
9.4. Функциональные возможности 557
9.4.1. Меню *File* 557
9.4.2. Меню *Edit* 560
9.4.3. Меню *View* 564
9.4.4. Меню *Insert* 572
9.4.5. Меню *Define* 588

9.4.6. Меню *Analysis* ... 632
9.4.7. Меню *Reports* ... 655
9.4.8. Меню *Tools* ... 657
9.4.9. Меню *Macros* ... 660
9.4.10. Меню *Window* ... 660
9.4.11. Меню *Help* ... 661
9.5. Последовательность анализа ... 662
9.5.1. Подготовка геометрической модели ... 662
9.5.2. Назначение оптических характеристик ... 668
9.5.3. Назначение источников света ... 669
9.5.4. Параметры вычислительного процесса ... 669
9.5.5. Представление результатов ... 671
9.6. Практика использования ... 683
9.6.1. Проектирование осветительных приборов ... 683
9.6.2. Оптимизация освещенности плоской поверхности ... 697
9.6.3. Модификация конструкции с учетом светотехнических параметров ... 710
9.6.4. Автоматизация проектирования и расстановки осветительных устройств ... 733
9.7. Выводы ... 771

Глава 10. Оптимизация работы механических САПР ... 772

10.1. Рекомендации по повышению производительности CAD-систем ... 772
10.1.1. Аппаратное обеспечение ... 772
10.1.2. Настройки операционной системы ... 776
10.1.3. Настройки SolidWorks ... 777
10.1.4. Специальные манипуляции ... 782
10.1.5. Использование сетевых дисков ... 782
10.2. Рекомендации по повышению производительности CAE-систем ... 782
10.2.1. Аппаратное обеспечение ... 783
10.2.2. Настройки операционной системы ... 783
10.2.3. Настройки расчетных программ ... 783
10.2.4. Использование сетевых дисков ... 784
10.3. Оптимальный выбор аппаратного обеспечения ... 784
10.3.1. Процессор и материнская плата ... 784
10.3.2. Оперативная память ... 786
10.3.3. Видеокарта ... 787
10.3.4. Жесткий диск ... 790
10.3.5. Монитор ... 790
10.4. Выводы ... 791

Приложение. Описание компакт-диска ... 792

Список литературы ... 793

Предметный указатель ... 795

Об авторах



Алямовский Андрей Александрович

Кандидат технических наук, доцент. Работал в Московском авиационном технологическом институте им. К. Э. Циолковского, специалист в области численных методов в механике композитов и конструкций.

В настоящее время руководитель направления CAD/CAE ЗАО "Системы комплексных решений".



Одинцов Евгений Владимирович

Руководитель отдела разработки программных продуктов ООО "НИКА Софтвер". Руководитель группы разработки генератора сеток.



Пономарев Николай Борисович

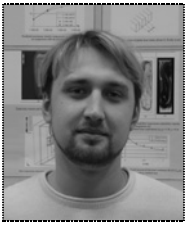
Кандидат технических наук по специальности "Механика жидкости, газа и плазмы". Специалист в области прикладной математики, газовой динамики и теплообмена.

Начальник сектора в ФГУП "Исследовательский Центр им. М. В. Келдыша" Федерального Космического Агентства.



Собачкин Александр Александрович

Кандидат физико-математических наук по специальности "Механика жидкости, газа и плазмы". Руководитель разработки программных продуктов фирмы ООО "НИКА Софтвер".



Харитонович Алексей Игоревич

Руководитель отдела технической документации в ООО "НИКА Софтвер".

Введение

Сейчас нет необходимости убеждать кого-либо в том, что компьютерное моделирование является необходимым инструментом создания современных технических объектов. Все более широкий круг предметов и явлений становятся объектами компьютерной симуляции. Она внедрилась практически во все сферы инженерной деятельности. Другая тенденция — расширение круга пользователей CAE (Computer Aided Engineering)-продуктов. Практически до конца 1990-х годов их эксплуатация была уделом узкого круга профессионалов, своего рода "гуру" в соответствующих вопросах. Но расширение области применения высокотехнологичных инструментов (бытовая техника, электроника, индустрия автомобильных компонентов, товары для спорта и отдыха, бытовая светотехника и т. д.) потребовало создания таких программ, которые были бы доступны квалифицированному инженеру и стали атрибутом стандартного рабочего места.

Несколько иная ситуация характерна для отечественной промышленности. Несмотря на солидный "объем производства" инженеров, квалифицированный персонал весьма непросто сначала подобрать, а потом обеспечить работой, требующей специальных навыков и способствующей их развитию. Технологический уровень российской промышленности, а также система организации производства таковы, что почва для процветания продуктов high-end не слишком подходящая. В то же время, налицо некоторое развитие (а точнее, восстановление) интереса к CAE-программам. База для этого — массовое распространение геометрических CAD (Computer Aided Design)-систем. Значительная доля предприятий использует технологию пространственного моделирования, для некоторых она является основным инструментом разработки конструкторской документации и — нередко — технологических процессов (характерный пример — создание программ для УЧПУ). Естественным является переход на следующий уровень — компьютерный анализ и проектирование. Здесь существуют два источника развития: потребности производства и нормальный человеческий интерес. Надо сказать, что второе может быть доминирующим. Наиболее логичный путь — освоение интегрированных приложений, сопровождаемое (нередко) овладением соответствующей теоретической базой.

Все программы, о которых пойдет речь в книге, являются так называемыми партнерскими приложениями к системе SolidWorks. Подробнее об этом речь пойдет ниже. Здесь же отметим, что это никоим образом не ограничивает круг объектов, которые исследуются программами, и, соответственно, контингент возможных читателей. Для наиболее популярных геометрических САПР разработаны соответствующие модификации расчетных модулей.

Среди авторов присутствуют разработчики программного обеспечения на базе SolidWorks, а также реселлеры упомянутых в книге продуктов. Ни та ни другая сфера деятельности не существуют в отрыве от инженерной практики, задач производства. Поэтому, декларируя определенную заинтересованность в продвижении упомянутых систем, мы постараемся на примере конкретных проблем показать их достоинства, не утаивая ограничений.

Аудитория

Прежде всего, авторы рассчитывают, что издание будет полезно инженерам-практикам, которые, имея дело с геометрическими САПР, сталкиваются с необходимостью выполнения анализа. В книге они найдут описание апробированных инструментов, информацию о соответствующих расчетных методиках.

Изрядная доля задач, иллюстрирующих программы, содержит элементы поиска. Эти аспекты могут заинтересовать аспирантов, специализирующихся в инженерных дисциплинах. Как сами по себе программы (в тех рамках, в которых они будут описаны), так и процесс их эксплуатации, строго говоря, не могут быть объектом исследования. Однако уровень их функциональности более чем достаточен для проверки гипотез, сопровождающих научные изыскания в технике. Более того, для рассмотрения выбраны продукты, ставшие в некотором смысле стандартами в соответствующих сферах применения. Соответственно, их изучение может стать своеобразным стимулом для собственных разработок.

Авторы надеются, что, попав в руки студента, книга окажется источником познавательной информации и средством расширить эрудицию. Тем более что компания SolidWorks-Russia в рамках программы содействия вузам SWR-Академия на специальных льготных условиях поставляет программное обеспечение (SolidWorks, COSMOSWorks, COSMOSFloWorks, COSMOSMotion и ряд других приложений SolidWorks) с целью поддержки процесса профессиональной подготовки студентов с использованием САПР и PDM. Данная программа охватывает учебные заведения России, стран СНГ, Средней Азии и Прибалтики. На момент сдачи рукописи в печать к программе SWR-Академия присоединилось уже более 20 организаций. Среди них: МГТУ им. Н. Э. Баумана, Московский государственный авиационный институт, Московский государственный энергетический институт, Омский ГТУ, Ханты-Мансийский институт дизайна и технологий, Каунасский технический университет, Донецкая государственная машиностроительная академия и многие другие.

Издание не претендует на роль источника фундаментальных знаний, ограничиваясь прикладными целями. В то же время большинство описанных методик вполне доступно студентам старших курсов и могут быть применены для выполнения дипломных работ. Польза возрастет многократно, если чтение данного текста будет сопровождаться изучением литературы, содержащей полноценную теоретическую базу.

Предназначение

Если непредвзято посмотреть на ситуацию с отечественной литературой в области компьютерного моделирования и анализа, можно сделать несколько выводов. Один из них связан с тем, что широкий пласт проблем в большей или меньшей степени исключен из рассмотрения. Это, в частности, задачи вычислительной аэрогидродинамики и теплопередачи, имитации технологических процессов, проектирования светотехники и оптических устройств. Данная тенденция в значительной степени противоречит тому, что происходит в продвинутых сообществах — использование соответствующих программных продуктов стало одной из составляющих технического прогресса.

В более же популярных сферах — геометрическом моделировании, структурной механике, расчете механических систем публикации группируются возле двух полюсов: с одной стороны — фундаментальные теоретические руководства, с другой — альтернатива в виде не слишком критических описаний с выраженным рекламным подтекстом. Последним грешит периодика. Более популярные журналы, имея бюджет, основанный на рекламе, не слишком заинтересованы в аналитических материалах. Круг же читателей специализированных изданий, по большей части ведомственных, вполне соответствует их тиражу. Есть и другие источники информации. Документация, сопровождающая программы, нередко содержит весьма показательные примеры. Но, по очевидным причинам, они стопроцентно успешны. Редкий разработчик адекватно опишет проблемы и ограничения. Кроме того, примеры нечасто выходят за рамки канонических задач, что, в общем-то, и неплохо. Именно они есть база для изучения явлений, не допускающих строгого решения. В последнее время многие фирмы — как производители, так и реселлеры — организовали соответствующие интернет-ресурсы, где помещена информация о конкретных задачах. Несмотря на ясную цель — рекламу и поиск заказчика, там можно найти заслуживающие внимания образцы исследований. Не менее очевидно и то, что все, находящееся между двумя моментами: формулировкой задачи и описанием решения удостаивается, в лучшем случае, только краткого упоминания.

В данной книге авторы постарались сопроводить описание программ примерами, иллюстрирующими вполне реальные инженерные задачи или этапы этих задач. Помимо этого процесс решения сопровождается более или менее подробным описанием методической стороны вопроса, что, надеемся, найдет понимание заинтересованного читателя. Эти рассуждения могут показаться тривиальными, однако моменты, очевидные при использовании аналитических методов, не всегда так однозначны, применительно к алгоритмам вычислительного анализа.

Описанные программы решают различные задачи, однако их рассмотрение в одном издании (помимо того, что почти все они, как упоминалось, обладают статусом партнерского приложения SolidWorks) оправдано рядом аргументов. Большинство из них базируется на методах вычислительной математики. Это порождает схожесть методик подготовки геометрических моделей, назначения исходных данных и интерпретации результатов. Многие программы имеют интерфейс между собой (минуя SolidWorks или другие конструкторские пакеты), а

множества типов задач для некоторых — пересекаются. Это, например, расчет на прочность на базе аналитических и численных методов, решение тепловой задачи посредством различных численных аппроксимаций. Одним из принципов отбора программ был принцип ориентированности на их использование конструктором. Инструменты технолога не рассматривались. Несомненно, в реальном производстве имеют место различные схемы организации труда, но вопросы сугубо технологического характера — они касаются процессов обработки материала — можно вычленить и отделить вполне уверенно.

Поскольку книга претендует на определенную системность описания программ и методик их использования, несомненно, что степень подробности в освещении функциональности продуктов не может быть равноценна. Здесь авторы придерживались ориентации на тщательное изложение наиболее актуальных аспектов, а менее популярные вопросы только формулируются и не сопровождаются примерами. Например, среди задач аэрогидродинамики и теплопередачи жизненность вопроса расчета тепловых режимов электротехнических устройств относительно проблемы сверхзвукового течения несопоставима (по крайней мере, для отечественной промышленности). Между тем, обе они решаются одной и той же программой. Похожий пример — проектирование светотехники и моделирование процессов волновой оптики. Первая — предмет повседневной деятельности многих инженеров, вторая — возникает только эпизодически. Инструмент же для них тождественен.

На отбор рассматриваемых вопросов наложили отпечаток личные пристрастия авторов, наличие подходящих примеров, а также, не скроем, желание посредством данной книги сформировать спрос на описанные программы. В то же время, абсолютное большинство сведений являются вполне инвариантными относительно сопоставимых программных решений.

Еще одно замечание касается объема и степени детализации теоретической базы рассматриваемых методов. Руководствуясь названием книги и здравым смыслом, изложение теории ограничивается основами, которые необходимы для эксплуатации программ: формализации задачи, обеспечения эффективного вычислительного процесса, интерпретации результатов. Фундаментальные знания следует получать из специальных источников.

В книге также затронуты вопросы подбора компьютерной техники для эксплуатации CAD/CAE-продуктов. Мы надеемся, что приведенные рекомендации будут полезны в профессиональной деятельности читателей.

Соглашения

Для SolidWorks имеется русскоязычная версия. Поскольку именно ее традиционно используют в России, то за редким исключением команды и меню SolidWorks приводятся на русском языке.

Для COSMOSWorks также есть русскоязычная версия. Однако она содержит ряд некорректно переведенных терминов. По этой причине в России используется

также англоязычная версия программы. Поэтому практически всегда мы будем сопровождать русские термины их оригинальным вариантом, который дается в скобках. Кроме того, некоторые серьезные неточности перевода будут исправлены в замечаниях, расположенных в тексте.

Другие программы пока не имеют русскоязычного интерфейса и фирменного перевода технической документации. Поэтому команды, пункты меню и термины, встречающиеся в них, приведены на английском языке, а русский перевод дается в скобках при первом упоминании той или иной команды, а впоследствии — в случаях, когда это облегчает понимание описываемых процессов. При решении прикладных задач перевод иногда не приводится. Некоторые технические термины, имеющие установившиеся аналоги в русском языке, после перевода используются только в русскоязычном варианте.

Расчеты выполняются для геометрических моделей, построенных посредством SolidWorks. Предполагая, что читатель, по крайней мере, в общих чертах, знаком с этой программой (надо сказать, что для чтения вполне хватит первичных познаний), мы не будем рассматривать элементарные построения. Однако в ситуациях, когда геометрия "управляет" расчетом, является результатом расчета или же получена посредством специфических приемов, процесс ее формирования будет приведен достаточно подробно.

При описании работы с мышью слова "щелчок" ("щелкнуть") и "двойной щелчок" ("дважды щелкнуть") подразумевают нажатие левой кнопки мыши.

Благодарности

Авторы благодарны своим коллегам — сотрудникам фирм ЗАО "СИКОР" (Москва) и ООО "NIKA Software" (Москва) — за помощь в реализации проекта. Отдельное спасибо персоналу фирмы SolidWorks-Russia за консультации по вопросам, связанным с SolidWorks.

Некоторые геометрические модели изделий, а также их расчеты, рассматриваемые в книге, выполнены в процессе взаимодействия с фирмами и предприятиями. Авторы выражают признательность сотрудникам этих организаций за помощь. Если используется информация, представляющая существенный интерес, мы упоминаем эти случаи.

Контактная информация

Авторы будут благодарны читателям за пожелания и замечания по данной книге и по теме CAD/CAE. Направляйте ваши письма в адрес редакции (**mail@bhv.ru**) и по рабочим адресам авторов (**sikor@sikor.ru**, **alex@nika.sokol.ru**). Для менее формальных комментариев и общения можно использовать личные почтовые ящики авторов (А. А. Алямовский — **a_a_a@rbcmail.ru**, Н. Б. Пономарев, А. И. Харитонович — **alharit@nika.sokol.ru**). Информация об обновлениях программных продуктов, примеры решения задач, другие вопросы, связанные с темой CAD/CAE, доступны на Web-сайтах **http://www.sikor.ru, http://www.nika.biz**.

ГЛАВА 1



SolidWorks как база для инженерных приложений

В этой главе мы кратко рассмотрим особенности использования системы SolidWorks как основы построения интегрированной среды моделирования и анализа.

1.1. Интегрированные CAD/CAE-системы

В последнее время четко обозначилась тенденция группирования инструментов геометрического моделирования и расчетных программ в интегрированные системы. Одной из фирм, положивших начало этому процессу, была PTC (Parametric Technology Corporation), внедрившая в продукт Pro/Engineer модули расчета на прочность методом конечных элементов, процедуры кинематического и динамического анализа. Однако поскольку PTC помещала "внешние" продукты в базовую систему под своей торговой маркой (покупая авторские права или же на основе партнерских соглашений), ограничивая при этом доступ к интерфейсу разработки приложений (API) для "свободных" разработчиков, то номенклатура приложений практически не расширялась. Фирма Dassault Systems также внедрила в Catia V4 модуль расчета на прочность методом конечных элементов, причем его функциональность позволяла решать широкий круг задач и была на момент начала девяностых годов сравнима с той, которую имели универсальные пакеты конечно-элементного анализа. Однако сторонние разработчики не могли получить доступ к процедурам программирования без согласия владельца базового пакета, требовалось также приобретение лицензий на работу с процедурами API. Кроме того, развитие прикладных приложений сдерживалось дороговизной как самой CAD-системы, так и аппаратных средств — графических рабочих станций на базе RISC-процессоров.

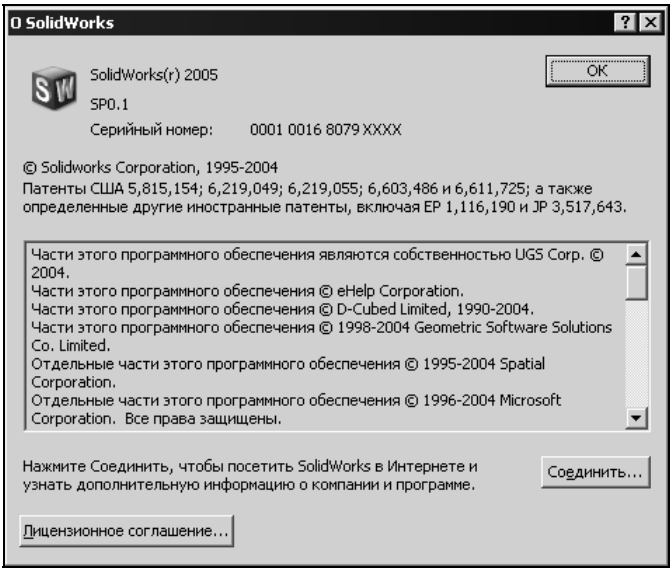


Рис. 1.1. Информационная панель SolidWorks

Ситуация изменилась с появлением системы SolidWorks (информационная панель программы показана на рис. 1.1), которая практически с момента рождения имела открытый API. На первом этапе это стимулировало разработчиков, которые создавали новые продукты или развивали уже существующие, но имеющие примитивный интерфейс пользователя. Функциональная графическая среда и доступ к математическому аппарату для обработки геометрии радикально ускоряли создание коммерческих программ. При этом разработчики не были обязаны, по крайней мере до этапа коммерческой реализации, вступать в какие-либо официальные отношения с фирмой SolidWorks (за исключением, разумеется, приобретения лицензии на программу). С начала нового тысячелетия развитие интегрированных систем пошло в режиме самовозбуждения. SolidWorks стал крайне популярен, вовлекая в свою орбиту тысячи новых пользователей. В то же время, "самостоятельные" CAE-системы подошли к некоему "порогу насыщения" рынка, когда практически все профессиональные расчетчики уже обзавелись какой-либо программой. Поэтому фирмы-производители стали рекрутировать новых потребителей из среды инженеров-проектировщиков, внедряясь в массовые системы проектирования через создание "сопутствующих" инструментов. Сейчас остались считанные единицы расчетных программ, которые не имели бы в большей или меньшей степени усеченного (или, если более корректно, адаптированного) варианта, функционирующего как приложение SolidWorks или какой-либо другой CAD-системы. Последняя, очевидно, должна иметь достойную внимания пользовательскую базу. Процесс зашел настолько глубоко, что

сначала в SolidWorks 2003 появились "бесплатные" модуль COSMOSXPress, являющийся инструментом расчета на прочность начального уровня, и модуль Физическая динамика, предназначенный для "оживления" сборок. Версия 2005 года обогатилась процедурой MoldflowXpress, выполняющей элементарную оценку проливаемости форм при изготовлении тонкостенных деталей из термопластов. Можно, конечно, дискутировать о степени адекватности результатов, получаемых подобными фрагментами "больших" систем, однако маркетинговая эффективность несомненна и взаимна: SolidWorks приобретает имидж всеохватывающего орудия, а пользователь ненавязчиво втягивается в сферу влияния производителей инженерных программ.

Тем не менее работа в интегрированной среде проектирования и расчета, помимо потенциального улучшения результата, является весьма увлекательным занятием. Это требует новых навыков, связанных с организацией рационального взаимодействия нескольких инструментов. Рассмотрим некоторые возможности SolidWorks, обеспечивающие эффективное использование расчетных приложений.

1.2. Твердотельное моделирование

SolidWorks изначально создавалась как система твердотельного параметрического моделирования. Программа содержит всю необходимую номенклатуру инструментов, причем некоторые возможности крайне эффективны для разработки объектов, ориентированных на последующее использование программ расчета. Это проектирование изделий из листового материала, сварные детали. Они позволяют получить модели, весьма близкие к требованиям данных инструментов. Подмножество функций, ориентированных на работу с криволинейными объектами: инструменты сплайнов, команды создания тел, имеющих криволинейные поверхности, процедуры обеспечения гладкости, построения сопряжений, позволяют — в абсолютном большинстве случаев — с приемлемой точностью готовить модели для аэрогидродинамического анализа или светотехники (в задачах расчета на прочность качество представления поверхности несколько менее принципиальный фактор).

Начиная с версии 2003 года, в SolidWorks появился многотельный режим. Он существенно расширил возможности пользователя при создании геометрических моделей. Однако далеко не все расчетные системы поддерживают эту функциональность. Например, COSMOSMotion обрабатывает многотельные детали, начиная с версии 2005 года. COSMOSWorks 2005 не в состоянии рассчитывать такие объекты ни в режиме детали, ни при анализе сборок.

SolidWorks позволяет создавать конфигурации объектов. Интегрированные модули в абсолютном большинстве адекватно обрабатывают эту функциональность, позволяя рассчитывать разнообразные исполнения расчетных мо-

делей, а, например, COSMOSWorks 2005 способен одновременно отображать результаты нескольких расчетов. Кроме того, параметрическое представление геометрии в CAD-системе позволило органично включить в COSMOSWorks модуль параметрической оптимизации, а также инструмент сценариев проектирования. Последние предназначены для изучения того, как влияет изменение формы, граничных условий, типов материалов и т. д. на свойства конструкции. Упомянув о материалах, отметим, что одно из направлений развития SolidWorks, связанное с более полным учетом "визуальных" свойств материалов, нашло логическое продолжение в интегральной базе данных, включающей как информацию о цвете, прозрачности, текстуре, так и плотности, характеристиках упругости и прочности (в версии продуктов 2005 года общим является подмножество характеристик, описывающих упругие свойства).

Даже перечислить все возможности SolidWorks, которые могут быть полезны при создании расчетных моделей, очень трудно. Мы рекомендуем обратиться к документации программы, поскольку квалифицированная работа с приложениями требует уверенного владения базовой функциональностью.

1.3. Поверхностное и гибридное моделирование

По сравнению с системами аналогичного уровня SolidWorks имеет наиболее развитые возможности для создания и редактирования поверхностей, а также совместной обработки поверхностей и твердых тел. Поверхностное представление геометрии активно используется в COSMOSWorks для создания на этой базе оболочечных расчетных моделей. Также присутствуют функции для автоматизированного вычленения срединной поверхности для твердотельных объектов, которые целесообразно рассчитывать по оболочечной модели. SolidWorks обладает всеми необходимыми инструментами для доводки получившихся результатов согласно условностям расчетных программ. Кроме того, сам COSMOSWorks в состоянии генерировать сетку оболочечных элементов на базе срединных поверхностей. Эта функция — плод совместной деятельности фирм SRAC и SolidWorks. Разумеется, при создании исходного проекта должны соблюдаться определенные условия для ее эффективного функционирования. Также интеграция программ подразумевает передачу части работы, связанной с подготовительными операциями при создании сетки конечных элементов, на SolidWorks. Именно его функции следует задействовать для модификации поверхностей с целью создания корректных сеток из оболочечных элементов.

В детали SolidWorks может присутствовать как твердотельная, так и поверхностная информация. Интегрированные расчетные модули естественным об-

разом учитывают это обстоятельство. Некоторые, например, COSMOSWorks могут обрабатывать в одной расчетной модели только один тип геометрии, однако то, что для построения, например поверхности, использовались твердые тела, для программы абсолютно безразлично.

То же можно сказать про приложение BlankWorks, где источником информации может быть как совокупность поверхностей, так и грани тел. Весьма простой интерфейс данной программы подразумевает активное использование функциональности SolidWorks для подготовки подходящей исходной информации. Если, например, в COSMOSWorks и COSMOSFloWorks для создания сеток присутствует функциональность, позволяющая в той или иной степени управлять этим процессом, то BlankWorks полностью "полагается" на результат работы SolidWorks.

Гибридные геометрические модели активно используются в задачах светотехнического анализа и проектирования. Здесь разделение функций следующее. Если объект является отражателем, причем имеет при этом сложную форму, как, например, сегментная фара, то как для оператора при ее проектировании (с точки зрения светотехнических характеристик), так и для программы расчета более рационально иметь поверхностное представление. После удовлетворения функциональных требований на его базе можно построить объемную модель, которая будет использоваться для компоновки, разработки оснастки и т. д. При сохранении ассоциативной связи между разными представлениями одного и того же изделия процесс модификации не вызывает затруднений. Нередко возникает обратная задача: расчет готового изделия с целью дальнейшего использования результатов (например, если создается осветительная система с несколькими одинаковыми источниками света). Тогда для упрощения анализа можно вычленить рабочие поверхности и именно их передавать в расчетную программу. Нередки случаи, когда вся сборка светотехнического устройства формируется в файле единственной детали, а затем транслируется в программу светотехнического расчета. Не всегда это оправданно, но возможности программ такой образ действий не отвергают.

1.4. Работа в сборке

SolidWorks обладает самыми разнообразными возможностями для создания и модификации сборок. Расчетные приложения, соответственно, эту функциональность учитывают. Как и для моделей твердотельных и поверхностных деталей, ответственность за корректную подготовку исходных данных для сборок в подавляющей части возлагается на CAD-систему. Это значит, что взаимное положение деталей как в смысле геометрии, так и в том, что касается назначения параметров их взаимодействия в физической модели, должно

определяться посредством сопряжений. В явном виде они ни в одну программу, за исключением COSMOSMotion, не транслируются. Расчетные модули имеют дело исключительно с геометрией, но не с семантикой. COSMOSMotion в данном ряду является исключением. Его математический аппарат допускает отсутствие в модели сборки связи между деталями, но при этом операции, по сути идентичные тем, которые выполняются в SolidWorks, придется производить в процессе формирования механизма.

Визуализацию кинематики сборки можно получить в SolidWorks, не прибегая к дополнительным инструментам. Приводить ее в движение можно мышью или же посредством функции Физическая динамика. Доступны команды для проверки интерференции как в статическом, так и в динамическом состоянии, а также возможность визуализации движения, сопровождаемого входом деталей в контакт и выходом из контакта. Поэтому рекомендуется подвергнуть сборку проверке инструментами SolidWorks, а уже затем использовать расчетные процедуры. Все они весьма чувствительны к присутствию интерференции деталей.

Последние версии SolidWorks обладают развитым набором команд для преобразования детали в сборку. Оно может осуществляться в режиме автоматизированного расчленения одного тела, а также базироваться на многотельном представлении. Такая схема построения исходных данных позволяет строить расчетную модель сборки, ассоциативно связанную с единственной деталью. Это весьма удобно, когда расчетная механическая модель предполагает контактное взаимодействие деталей с одинаковыми или различными физическими свойствами или же выполняется тепловой расчет с различными теплофизическими характеристиками материалов. Разумеется, можно изначально строить и рассчитывать сборку из "самостоятельных" деталей, однако, например, сварные конструкции иногда проектируются в режиме детали с последующей трансформацией в сборку.

COSMOSWorks и COSMOSFloWorks имеют набор опций для визуализации сборки в состоянии расчленения или в частично прозрачном состоянии с одновременным наложением диаграмм результатов. Эти команды также реализованы на базе возможностей SolidWorks.

Актуальным является вопрос о моделировании сборок, содержащих большое число деталей. Здесь следует выделить два аспекта. Первый связан с базовой функциональностью SolidWorks для построения геометрической модели. Здесь возможности программы непрерывно наращиваются, и в настоящее время большинство проблем в сборках с несколькими тысячами несложных деталей вполне решаемы при наличии адекватного аппаратного обеспечения. Кроме того, можно редактировать модели в режиме сокращенной сборки. Второй аспект связан с расчетом конструкций, состоящих из большого числа деталей. Здесь могут пригодиться возможности SolidWorks, позволяющие

создавать специальные расчетные конфигурации сборок, в которых "нефункциональные" объекты отсутствуют (погашены), а оставшиеся специальным образом модифицированы с целью упрощения их геометрии. Более подробные рекомендации по увеличению производительности при использовании CAD/CAE-систем приведены в *главе 10*.

1.5. Работа в режиме чертежа

Ни одна из рассматриваемых программ не работает с чертежами. Однако некоторые технологические приложения, например, программы оптимального раскроя, создания программ УЧПУ для резки листового металла, в качестве исходной информации могут использовать как данные о развертке детали из листа, так и непосредственно чертежи. Кстати говоря, одной из новых возможностей SolidWorks 2005 является наличие прямого редактора DWGEditor для обработки DXF/DWG-файлов. Подчеркнем, что SolidWorks обладает всеми возможностями для оформления чертежей во многих системах стандартов, включая ЕСКД.

1.6. Обмен графической информацией

Один из источников быстрого распространения SolidWorks среди пользователей состоял в том, что программа имела широкий выбор трансляторов из популярных CAD-систем, а также универсальных графических форматов. Затем их число расширялось за счет новых интерфейсов, а для имеющихся инструментов выполнялась актуализация. Полная номенклатура входных форматов показана на рис. 1.2. Здесь обратим внимание, что возможность считывания файлов, созданных прикладными программами, зависит от их версии. Кроме того, файлы, созданные Catia V5 (они имеют расширение cgr), несут исключительно иллюстративную информацию и непригодны для их модификации или использования в составе сборки (трансляторы, которые осуществляют подобный перенос информации, существуют, однако в данной книге не рассматриваются). Для Mechanical Desktop и Pro/Engineer возможно полное или частичное (в зависимости от того, какие инструменты базовой системы были использованы) воссоздание дерева построения модели. Отметим, что импорт с семантикой реализован, как правило, для не слишком свежих версий программ-источников. В то же время аппарат обработки нейтральных форматов построен на последних релизах соответствующих продуктов, причем обновления версий графических файлов отслеживаются в пакетах обновлений (Service Packs) SolidWorks.

Побочным, но, как оказалось, очень важным следствием наличия развитых возможностей обмена графическими файлами, явилась простота (разумеется,

относительная) организации интерфейса между прикладными программами и SolidWorks. Те из разработчиков программ, которые имеют достаточно ресурсов или же не имеют собственной графической оболочки, идут по пути интеграции своего математического аппарата и SolidWorks, используя, разумеется, процедуры API. Другой вариант, когда организуется скрытый от пользователя конвертор, позволяющий преобразовывать пространственную модель из Parasolid в формат прикладной программы напрямую или же через промежуточную модель, имеющую, например, формат STEP. В подавляющем числе случаев эти преобразования осуществляются посредством математики, имеющейся в SolidWorks.

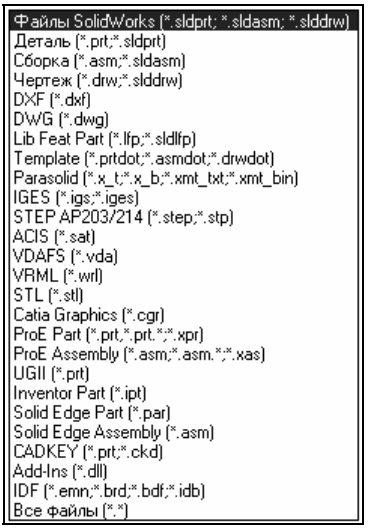


Рис. 1.2. Форматы графических файлов, доступные для импортирования

Несколько у́же круг возможностей для передачи результатов геометрии или результатов расчета из прикладной программы в SolidWorks. В числе рассмотренных в данной книге продуктов этой функциональностью обладает TracePro, которая имеет собственный графический редактор, позволяющий создать геометрическую модель "с нуля" или же модифицировать объект, импортированный в эту программу. Также — и это более интересный случай — можно восстанавливать в SolidWorks траектории лучей, рассчитанных в TracePro и записанных в одном из нейтральных форматов. Описанная в книге программа ReflectorCAD имеет целью создание поверхностной модели сегментного отражателя с последующей передачей ее в геометрический редактор или программу расчета. SolidWorks с его возможностями обмена графикой, а также инструментами редактирования, используется как "посредник" между программами.



ГЛАВА 2

Методы решения уравнений физики в механических САПР

Физические процессы, характеризующие напряженно-деформированное состояние твердых тел, движение и теплообмен текучей среды, моделируются рассмотренными в данной книге программами с помощью уравнений, описанных соответственно в *главах 3*, *4* и *5*. В данной главе, с общетеоретической точки зрения, т. е. без описания конкретного применения для решения этих уравнений, рассмотрены используемые методы решения этих уравнений: метод конечных элементов *(см. разд. 2.1)* и метод конечных объемов *(см. разд. 2.2)*. Эти методы используются достаточно широко для решения различных уравнений при математическом моделировании различных физических процессов. В рассматриваемых в данной книге программах эти методы, после необходимой конкретизации, используются соответственно для решения уравнений напряженно-деформированного состояния твердых тел — в COSMOSWorks *(см. главы 3, 4)* и для решения уравнений движения и теплообмена текучей среды — в COSMOSFloWorks *(см. главу 5)*.

Также будут приведены базовые сведения об алгоритмах параметрической оптимизации и обзор понятий, касающихся светотехнического анализа.

2.1. Основы метода конечных элементов

Метод конечных элементов (МКЭ) в настоящее время является стандартом при решении задач механики твердого тела посредством численных алгоритмов. Популярный в свое время метод конечных разностей, а также претендовавший на универсальность метод граничных элементов (граничных интегральных уравнений) сейчас занимают достаточно узкие ниши, ограниченные исследовательскими или специальными задачами. МКЭ занял лидирующее

положение благодаря возможности моделировать широкий круг объектов и явлений. Абсолютное большинство конструктивных элементов, узлов и конструкций, изготовленных из самых разнообразных материалов, имеющих различную природу, могут быть рассчитаны посредством МКЭ. При этом, разумеется, нужно учитывать неизбежные при любой численной аппроксимации условности и погрешности. Поэтому вопрос соответствия между расчетной моделью и реальностью является, пожалуй, основным при использовании программ анализа. Несмотря на то, что такие программы имеют более или менее подробную документацию, они все равно остаются в определенной степени черными ящиками. Это означает определенную непредсказуемость результатов, а также некоторый произвол в их интерпретации. Следовательно, качество заключений, принимаемых на основе результатов, всецело зависит от квалификации, а также, применительно к расчету на прочность, принципиального знакомства с основами МКЭ. На эту тему опубликовано немалое число книг, например [3], полезна также документация к программам [16, 18]. В данном разделе мы будем рассматривать этот метод применительно к задачам механики деформируемого твердого тела.

2.1.1. Понятие конечного элемента

В основе метода лежит дискретизация объекта с целью решения уравнений механики сплошной среды в предположении, что эти соотношения выполняются в пределах каждой из элементарных областей. Эти области называются конечными элементами. Они могут соответствовать реальной части пространства, как, например, пространственные элементы (рис. 2.1, 2.2), или же быть математической абстракцией, как элементы стержней, балок, пластин или оболочек (рис. 2.3). В пределах конечного элемента назначаются свойства ограничиваемого им участка объекта (это могут быть, например, характеристики жесткости и прочности материала, плотность и т. д.) и описываются поля интересующих величин (применительно к механике твердого тела это перемещения, деформации, напряжения и т. д.). Параметры из второй группы назначаются в узлах элемента, а затем вводятся интерполирующие функции, посредством которых соответствующие значения можно вычислить в любой точке внутри элемента или на его границе. Задача математического описания элемента сводится к тому, чтобы связать действующие в узлах факторы. В механике сплошной среды это, как правило, перемещения и усилия. Рассмотрим прямой метод построения уравнений, связывающих эти факторы в пределах конечного элемента, в предположении линейной постановки.

1. Поле перемещений Δ в пределах элемента (для пространственной задачи $\Delta = [u, v, w]^T$) посредством интерполяционных функций (в так называемых изопараметрических конечных элементах, используемых, в частности,

в COSMOSWorks, они идентичны функциям формы), собранных в матрицу $[N]$, выражается через узловые перемещения $\{\Delta\}$. Смысл интерполяционных функций состоит в том, чтобы, зная величины, например, перемещений в узлах, получить их значения в любой точке элемента в зависимости от координат. В матричном виде соотношения имеют вид:

$$\mathbf{\Delta} = \mathbf{N} \cdot \{\Delta\}.$$

Для пространственной задачи $\{\Delta\} = [u_1, v_1, w_1, u_2, v_2, w_2, ..., u_k, v_k, w_k]^T$, где k — число узлов конечного элемента.

2. Поле деформаций ε выражается через степени свободы $\{\Delta\}$ посредством дифференцирования поля перемещений (а фактически интерполяционных функций) согласно соотношениям, собранным в матрицу $[D]$ и связывающим деформации с перемещениями:

$$\varepsilon = [D] \cdot \{\Delta\}.$$

3. С учетом уравнений состояния, в основе которых лежит закон Гука и коэффициенты которых образуют матрицу $[E]$, устанавливается связь сначала между полем напряжений и полем деформаций:

$$\sigma = [E] \cdot \varepsilon,$$

а затем и между напряжениями и степенями свободы в узлах:

$$\sigma = [E] \cdot [D] \cdot \{\Delta\}.$$

4. Формулируются выражения для сил $\{F\}$, действующих в вершинах элемента, в зависимости от поля напряжений σ, для чего используется матрица преобразования напряжений в узловые силы $[A]$:

$$\{F\} = [A] \cdot \{\sigma\}.$$

5. Связываются выражения для узловых сил и перемещений в узлах:

$$\{F\} = [k] \cdot \{\Delta\},$$

где $[k] = [A] \cdot [E] \cdot [D]$ — *матрица жесткости* конечного элемента.

6. Для придания матрице $[k]$ свойства симметрии добиваемся замены матрицы преобразования жесткости матрицей, транспонированной к матрице преобразования перемещений в деформации $[D]$. Тогда:

$$[k] = [D]^T \cdot [E] \cdot [D].$$

Перечисленные зависимости позволяют, зная перемещения в узлах, получить величины сил, а также решить обратную задачу: по силам найти перемещения, затем деформации и напряжения в пределах конечного элемента.

Прямая формулировка, как правило, используется для получения матриц жесткости конечных элементов стержней, балок и пластин, а также для описания процесса теплопроводности.

Для получения матриц жесткости пространственных элементов наиболее часто используются вариационные принципы, например, принцип минимума потенциальной энергии. Полученная таким образом матрица жесткости из пункта 6 здесь будет вычисляться как:

$$[k] = \left[\int_V [D]^T [E][D] \, dxdydz \right].$$

Проблема интегрирования по объему тела сложной формы или же, в случае оболочечных элементов, — по криволинейной поверхности решается за счет того, что выражения записываются в локальной системе координат, связанной с элементом ξ, ψ, η, причем координаты изменяются в интервале [–1, +1]. При этом выражение для элементарного объема приобретает вид:

$$dxdydz = |J| d\xi d\psi d\eta,$$

где $|J|$ — определитель *матрицы Якоби*, или *якобиан* преобразования. Тогда:

$$[k] = \left[\int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} [D]^T [E][D] \det[J] \, d\xi d\psi d\eta \right].$$

Аналитический расчет интегралов в выражении для матрицы жесткости невозможен даже для треугольников с криволинейными сторонами. Поэтому прибегают к численному интегрированию. Оно заключается в замене интеграла суммой произведений подынтегральных выражений, вычисленных в точках Гаусса или в некоторой другой системе точек на соответствующие весовые коэффициенты. Этот процесс сопровождается расчетом величины определителя якобиана. Отрицательная величина является следствием вырожденности данного конечного элемента. Как правило, информация о данном обстоятельстве помещается в диагностические сообщения программ.

Примеры конечных элементов, присутствующих в COSMOSWorks, приведены на иллюстрациях: объемный тетраэдральный с линейным полем перемещений в пределах ограничиваемой им области (и, соответственно, постоянной деформацией) — на рис. 2.1, объемный тетраэдральный с параболическим полем перемещений (линейным распределением деформаций) — на рис. 2.2, треугольный элемент оболочки с параболическим полем перемеще-

ний и углов поворота — на рис. 2.3. На рисунках также обозначены локальная система координат элемента ξ,ψ,η, глобальная система координат тела X,Y,Z, перемещения в локальной: u,v,w, для оболочечного также углы поворота относительно локальных осей в узле $\Theta_\xi,\Theta_\psi,\Theta_\eta$ и в глобальной: U,V,W системах координат.

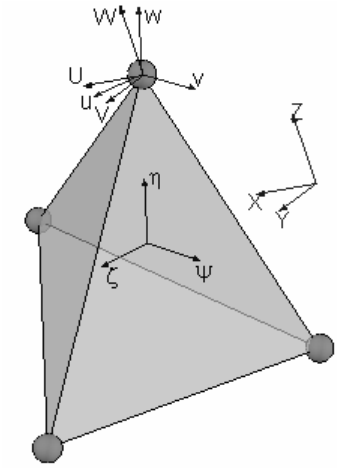


Рис. 2.1. Объемный линейный конечный элемент

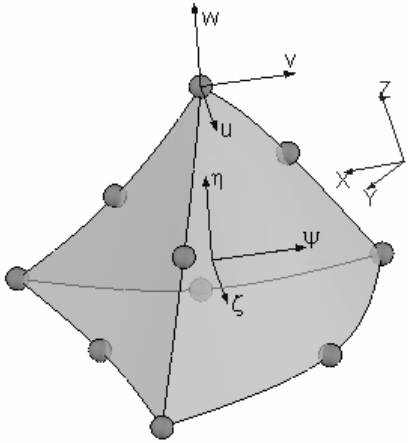


Рис. 2.2. Объемный параболический конечный элемент

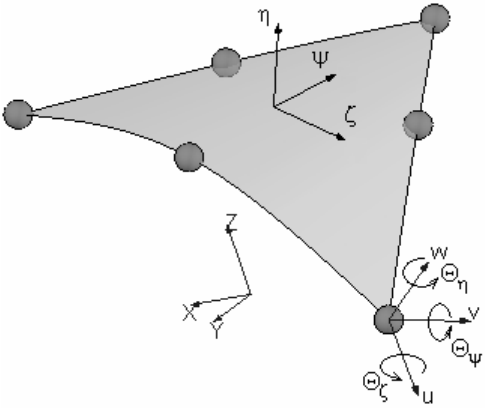


Рис. 2.3. Параболический конечный элемент поверхности

2.1.2. Построение программы МКЭ

Имея математический аппарат для получения матриц жесткости конечных элементов, приведения нагрузок, приложенных к поверхности или в объеме

элемента к усилиям в узлах, а также решения обратных задач: вычисления полей деформаций и напряжений в объеме элемента на базе перемещений в узлах, можно построить алгоритм МКЭ. Мы приведем один из его вариантов для решения задач в линейной постановке. Конкретные реализации могут существенно отличаться от данной схемы.

1. Производится дискретизация объема, занимаемого деталью или сборкой на элементы, или, как говорят, строится сетка конечных элементов. Для объемного тела область разбивается (в рамках функциональности COSMOSWorks) на тетраэдры с гранями, аппроксимируемыми линейными (линейная зависимость от координат) или параболическими функциями координат. Для поверхностных моделей — на плоские (линейная) или криволинейные (параболическая зависимость) треугольники.
2. Для пространственных конечных элементов степенями свободы являются перемещения в направлении осей локальной системы координат элемента. Для конечных элементов оболочек к трем перемещениям в каждом узле добавляются по три угла поворота нормали к срединной поверхности области, аппроксимируемой элементом, относительно тех же осей.
3. Определяются зависимости для преобразования перемещений и углов поворота в узлах к глобальной системе координат.
4. Вычисляются матрицы жесткости конечных элементов. В формулы для расчета компонентов матриц жесткости конечных элементов помимо координат узлов входят модули упругости и коэффициенты Пуассона материалов. То есть если анализируется сборка, то в зависимости от принадлежности элемента детали при расчете матриц жесткости элементов используются соответствующие характеристики жесткости материала.
5. Полученные матрицы жесткости с использованием зависимостей для перехода от локальных систем координат элемента в глобальные преобразуются в глобальную систему координат.
6. Матрицы жесткости, представленные в глобальных координатах, объединяются в глобальную матрицу жесткости $[K]$.
7. Назначенные пользователем граничные условия, статические и кинематические, приводятся к нагрузкам и перемещениям в узлах, выраженным в глобальной системе координат, и включаются в столбец усилий $[F]$.
8. Полученная линейная система уравнений вида $[K]\cdot[\Delta]=[F]$ решается относительно столбца перемещений. Это наиболее трудоемкий этап расчета. Для решения используются итерационные или прямые методы. Матрица жесткости, как правило, хранится в компактной форме, структура которой определяется до этапа ее заполнения матрицами жесткости элементов.

9. Для каждого конечного элемента, имея перемещения (углы поворота) в узлах и аппроксимирующие функции, рассчитываются деформации. Если элементы линейные — деформации в пределах элементов постоянные, если элементы параболические — деформации изменяются линейно. На основе деформаций вычисляются напряжения в элементах. При необходимости (функция программы) напряжения в узлах смежных элементов осредняются (это также весьма ответственный этап, по-разному решаемый в различных программах) с последующим пересчетом напряжений в пределах каждого элемента.
10. На основе компонентов напряженно-деформированного состояния и параметров прочности материала (материалов) производится вычисление *эквивалентных напряжений* по какому-либо *критерию прочности*.

2.1.3. Учет нелинейности в процедурах МКЭ

Весьма часто модули нелинейного анализа в программах МКЭ являются надстройкой над базовой частью, отвечающей за упругий статический расчет. Рассмотрим некоторые аспекты реализации этих процедур в свете информации, изложенной в [6, 8, 17].

Нелинейные задачи характеризуются нелинейной зависимостью между действующими факторами и реакцией на них системы. Кроме того, нередко граничные условия (приложенные нагрузки и перемещения) изменяются во времени. Для учета этого явления вводится понятие *кривая времени* (в COSMOSWorks — Time curve). Смысл ее в том, что вводится параметр, имеющий размерность времени и, в зависимости от его величины, назначаются определяемые им условия. То есть фактически строятся графики, в которых абсцисса — это время, а ордината — сила, напряжение, перемещение и т. д. Если рассчитываемый объект содержит материал, характеристики которого могут зависеть от времени, то параметр соответствует физическому времени. В противном случае — это абстрактная величина, масштаб которой выбирается из соображений удобства представления кривых (реальное время фигурирует также в задачах динамики, однако функциональность COSMOSWorks не предусматривает их решения). Главным требованием в ходе описания внешних факторов является синхронность их действия. Например, если на объект, изготовленный из материала, который обладает свойством физической нелинейности, сначала действует одна сила, а затем, после того как ее действие прекращается, другая, то первый фактор размещается в одном интервале, а второй — в следующем. Длительность этих интервалов может быть различна. И наоборот, если силы в реальности прикладываются одновременно, то размещать их следует в одном и том же отрезке времени.

Следующая процедура, необходимая для модификации алгоритма МКЭ применительно к решению нелинейных задач, — управление сохранением сис-

темой состояния равновесия. В большинстве прикладных программ присутствуют три метода, используемых для различных классов задач.

- *Метод сил* (Force Control) (рис. 2.4), когда после увеличения нагрузок в соответствии с кривой времени на величину некоторого шага определяются перемещения, удовлетворяющие уравнениям равновесия. Как правило, метод сил применяется для задач с физической нелинейностью материалов. Алгоритм непригоден для моделирования разупрочняющихся систем (т. е. когда на некотором этапе увеличение перемещений происходит без прироста силовых факторов).

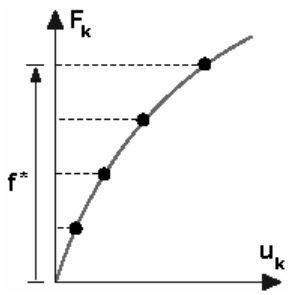


Рис. 2.4. Силовые факторы как управляющий параметр

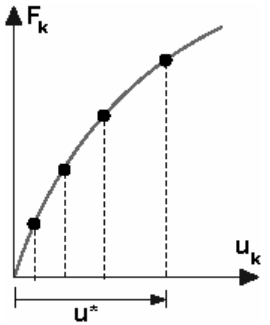


Рис. 2.5. Перемещения как управляющие параметры

- *Метод перемещений* (Displacement Control) (рис. 2.5), когда для назначенного приращения перемещений (для этого нужно в явном виде назначить контролируемые степени свободы в конкретных узлах) подбирается параметр времени, определяющий действующие в этот момент силовые факторы. Данный алгоритм следует использовать в ситуациях, когда возможна геометрическая нелинейность поведения конструкции. Алгоритм непригоден для расчетных схем, когда деформация конструкции под действием приложенных в виде граничных условий перемещений на некотором этапе сопровождается уменьшением порождаемых этими перемещениями сил. Один из вариантов этого явления — прощелкивание тонкостенных объектов в ходе потери устойчивости.
- *Метод длины дуги* (Arc Length Method) (рис. 2.6), известный в отечественной литературе как метод продолжения по наилучшему параметру. Программа автоматически вводит некоторый параметр, называемый параметром продолжения, который входит в дополнительное уравнение, включаемое в уравнения равновесия. Метод основан на идее продвижения вдоль множества возможных решений с учетом на каждом шаге информации о решениях, полученных на предыдущих шагах. Данный алгоритм следует

применять для анализа закритического поведения конструкций, когда после потери устойчивости происходит прощелкивание, и система переходит в новое состояние равновесия.

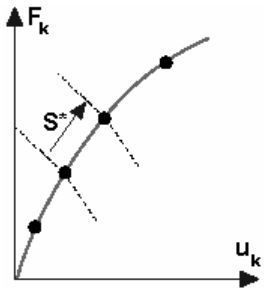


Рис. 2.6. Метод длины дуги

При решении задач, содержащих нелинейности, необходимо определить итерационный алгоритм для решения системы нелинейных уравнений в процессе приложения нагрузки. Его функция состоит в корректировке параметров, описывающих состояние системы, после каждого шага увеличения нагрузки. Если приложить дополнительную нагрузку и на основе параметров жесткости, соответствующих уровню деформаций, диагностированных на предыдущем шаге, рассчитать усилия в узлах, то можно вычислить неувязку между усилиями, приложенными и усилиями полученными. Далее нужно предпринять действия для минимизации этой неувязки. Наиболее популярны два алгоритма.

- *Ньютона — Рафсона* (Newton — Raphson) (рис. 2.7), когда касательная матрица жесткости строится на каждой итерации в пределах любого шага приращения нагрузки. Сам по себе алгоритм имеет квадратичную скорость сходимости и обладает высокой устойчивостью. Однако необходимость строить и разлагать матрицу жесткости требует значительных вычислительных ресурсов. Поэтому данный алгоритм следует использовать, если альтернативные варианты потерпели неудачу.
- *Модифицированный метод Ньютона — Рафсона* (Modified Newton-Raphson) (рис. 2.8), в котором касательная матрица жесткости на каждом шаге приращения нагрузки строится один раз, а затем используется на всех субитерациях в пределах шага. Этот алгоритм требует бóльшего числа итераций, однако время экономится за счет сокращения операций с матрицей жесткости.

Еще одна группа алгоритмов, отличающих нелинейный расчет от линейного — те, которые определяют момент окончания итераций как в пределах шага приращения нагрузки, так и в момент окончания этих приращений (поскольку

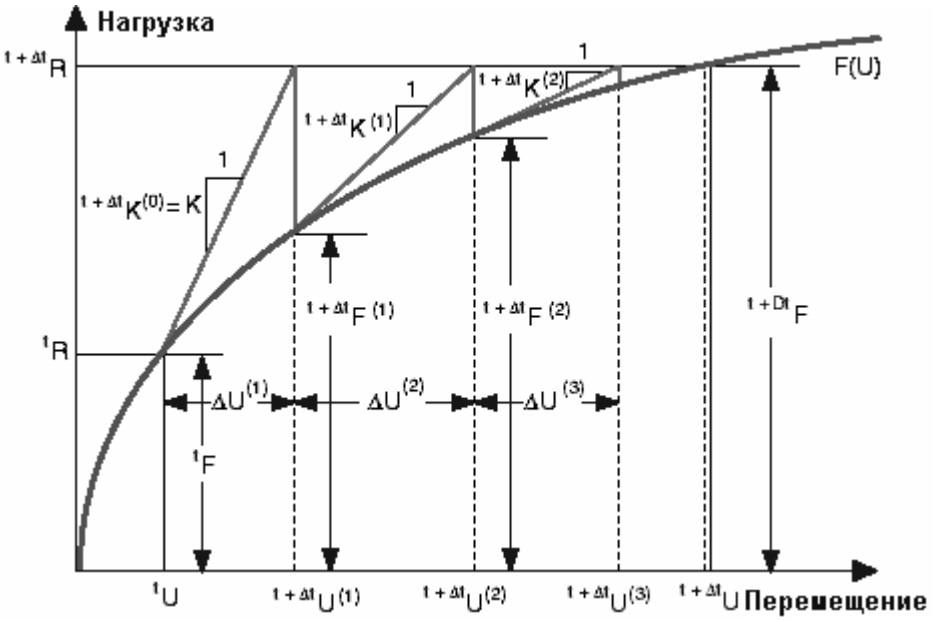


Рис. 2.7. Схема итерационного метода Ньютона — Рафсона в сочетании с методом сил

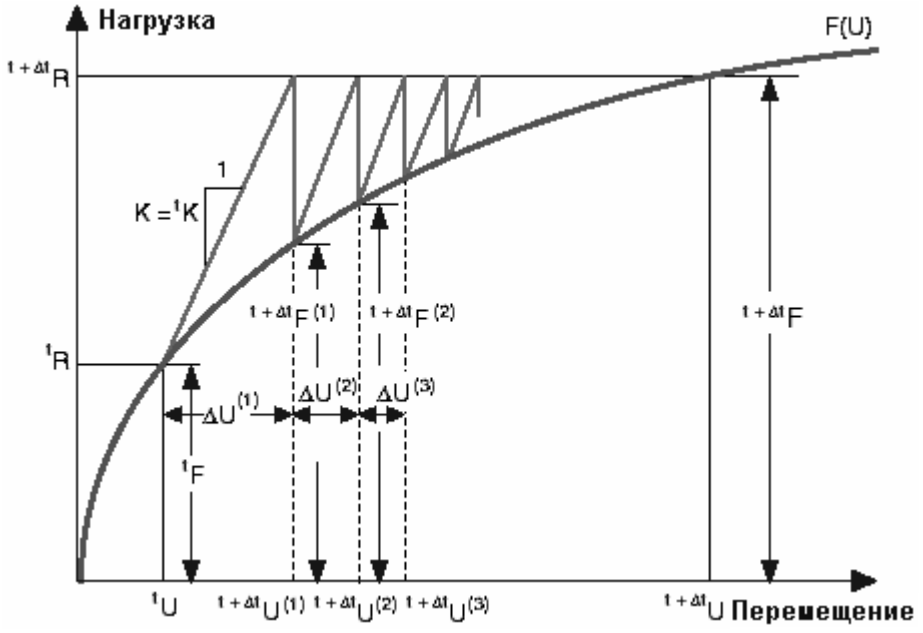


Рис. 2.8. Схема модифицированного итерационного метода Ньютона — Рафсона в сочетании с методом сил

этот шаг может адаптивно подбираться программой). Это весьма специфический вопрос, и поэтому — на данном уровне изложения — можно порекомендовать пользователю при определении соответствующих параметров решить его опытным путем. Отметим, что в зависимости от применяемого алгоритма управления итерационным процессом (метод сил, перемещений, длины дуги) используются критерии сходимости по перемещениям, величине неуравновешенных нагрузок, балансе энергии.

2.2. Метод конечных объемов

После того как составлена система дифференциальных и/или интегральных уравнений, описывающая с математической точки зрения движение и теплообмен текучей среды или теплопередачу в омываемых данной текучей средой твердых телах (если решается сопряженная задача теплообмена), следующий шаг — решение данной системы уравнений. Поскольку, в общем случае, эти уравнения нелинейные и не имеют аналитического решения, то решать их приходится численно, находя вместо непрерывного решения дискретный набор его значений в определенных точках (или ячейках) пространства и для определенных моментов времени (если решаются нестационарные уравнения, т. е. с временем, как одной из независимых переменных). При этом, исходя из соображений достижения возможной максимальной точности решения, выбирается также способ представления этих дискретных значений в соответствующих этой дискретизации алгебраических аналогах исходных уравнений. В результате, математическая задача решения системы дифференциальных и/или интегральных уравнений сводится к математической задаче решения системы алгебраических (обычно нелинейных) уравнений.

Соответственно, метод дискретизации непрерывного решения, преобразования уравнений в алгебраические и решения полученной системы алгебраических уравнений является методом решения математической задачи, поставленной в математической модели рассматриваемых физических процессов.

Рассматривая разработанные методы решения дифференциальных и/или интегральных уравнений движения и теплообмена текучей среды, можно, следуя, например, фундаментальной монографии [23], выделить три основных подхода к решению этих уравнений:

- Метод конечных разностей для решения дифференциальных уравнений, являющийся, по существу, прямым следствием определения производной в используемой системе координат на соответствующей ей координатной расчетной сетке, впервые примененный Эйлером около 240 лет назад и успешно используемый в некоторых приложениях до настоящего времени.
- Метод конечных элементов, разработанный в 40...60-х годах прошлого века для решения интегродифференциальных уравнений напряженно-де-

формированного состояния твердых материалов в задачах структурной механики, в частности при определении упругой и пластичной деформации и прочности конструкций, и впоследствии примененный также для расчета различных течений, см., например, [23, 16]. Основной его особенностью является дискретизация пространства (твердого тела или области, занятой текучей средой) разбиением на неправильные (в общем случае) многогранники (4-, 5-, 6-гранники), представление решения в этих многогранниках набором интерполяционных функций, и, обычно, использованием метода Галеркина для нахождения такого решения.

- Метод конечных объемов, различные варианты которого были впервые разработаны в России в 50...70-х годах (метод Годунова [2,5], интегро-интерполяционные методы [12]) и за рубежом в начале 1970-х годов прошлого века ([25, 27], см. также обзор в [23]), краткое описание которого, необходимое для понимания *главы 6*, дано в настоящем разделе.

Метод конечных объемов имеет следующие особенности.

- Используется произвольная расчетная сетка, не обязательно связанная с какой-либо (например, используемой) системой координат и не обязательно регулярная, при этом возможны два варианта дискретизации решения:
  - по узлам расчетной сетки;
  - по ячейкам расчетной сетки, причем в пределах ячейки решение считается постоянным, т. е. не привязанным к какой-либо конкретной точке.
- Для нахождения этого решения используется дискретизация записанных в интегральной форме законов сохранения массы, импульса, энергии текучей среды по поверхности контрольного объема, в качестве которого выбирается:
  - если решение дискретизируется по узлам расчетной сетки, — поверхность, "натянутая" на узлы расчетной сетки, лежащие по соседству с рассматриваемым узлом;
  - если решение дискретизируется по ячейкам расчетной сетки, — поверхность рассматриваемой ячейки расчетной сетки.

Несложно показать [23], что метод конечных объемов является частным, причем более простым, а следовательно, более быстродействующим, случаем (вариантом) метода конечных элементов (хотя разработчики метода конечных объемов его таковым не считали, он был разработан как альтернатива методу конечных разностей, а применение метода конечных элементов для газогидродинамических расчетов было разработано позднее), а консервативные схемы метода конечных разностей являются частными случаями (вариантами) метода конечных объемов на регулярной расчетной сетке, связанной с используемой системой координат.

Именно указанные особенности метода конечных элементов были руководящими идеями его разработки. Причем у отечественных разработчиков первоначальной идеей была разработка интегродифференциального метода, основанного на дискретизации записанных в интегральной форме законов сохранения массы, импульса, энергии текучей среды, который позволил бы достаточно надежно и правильно рассчитывать сверхзвуковые течения газа с волнами разрежения и скачками сжатия (в связи с этим использовались интегральные соотношения на этих неоднородностях со скачкообразным изменением параметров), а расчетная сетка, в основном, по крайней мере в практических приложениях, была координатной (т. е. структурированной по терминологии [23]), хотя и не обязательно декартовой (при этом возможность использования произвольной расчетной сетки не отрицалась). У зарубежных разработчиков метода конечных объемов [25, 27] первоначальной идеей была разработка интегродифференциального метода, основанного на использовании расчетной сетки произвольной формы, с 3-, 4-гранными ячейками не обязательно правильной формы (т. е. неструктурированной по терминологии [23]), что позволяло рассчитывать течения в каналах очень сложной формы без привязки расчетной сетки к используемой системе координат, что было удобно, например, при расчете течений в газовых турбинах, естественно, с попутным требованием выполнения законов сохранения в дискретной форме. Именно они, явно по аналогии с методом конечных элементов, в котором также используется расчетная сетка произвольной формы, обычно с 3-, 4-гранными расчетными ячейками в трехмерном пространстве и дали разработанному ими методу используемое здесь название — метод конечных элементов. После краткого исторического экскурса рассмотрим метод конечных объемов подробнее.

Согласно этому методу, к способу дискретизации пространства расчетной области никаких особенных требований, за исключением естественного требования достаточного разрешения особенностей течения и геометрии поверхностей твердых тел (особенно в областях их нелинейного изменения), не предъявляется, т. е. расчетная сетка может быть любой:

- *структурированной*, т. е. образованной, как в методе конечных разностей, координатными линиями (система координат может быть любой: декартовой, криволинейной), так что узлы этой сетки могут быть пронумерованы с помощью целочисленных векторов, размерность которых зависит от размерности системы координат;
- *неструктурированной*, т. е. совершенно произвольной, как в методе конечных элементов, например, состоящей из неправильных тетраэдров (пирамид) и/или гексаэдров (6-гранников) в трехмерном случае, система узлов граней которых никак не связана с системой координат, т. е. с коорди-

натными линиями, так что узлы этой сетки могут быть пронумерованы лишь с помощью сквозной нумерации (т. е. все подряд).

Очевидно, что одно из преимуществ структурированных расчетных сеток (о других их преимуществах см. далее) состоит в том, что с ними легче работать при проведении расчетов, а преимущество неструктурированных расчетных сеток состоит в том, что они позволяют лучше разрешать сложные геометрии поверхностей твердых тел, проточных областей и областей нелинейного изменения параметров течения.

После того как дискретизация пространства выполнена, возникает вопрос, где именно определять дискретное решение задачи. В методе конечных разностей такой вопрос не возникает — там он решается однозначно: естественно, в узлах расчетной сетки — это основа метода конечных разностей. В методе конечных объемов возможны два варианта определения местоположения искомого дискретного решения задачи (значений независимых переменных уравнений):

- в узлах расчетной сетки, т. е. как в методе конечных разностей;
- в ячейках расчетной сетки, т. е. как среднее по ячейке, без строгого определения той точки, к которой это решение может быть приписано (для дальнейшего получения непрерывного решения из дискретного с помощью интерполяции, т. е. аналогично тому, как это делается в случае определения дискретного решения в узлах расчетной сетки: полученное дискретное решение приписывают к центру ячейки, что, строго говоря, весьма условно) — этот способ является частным вариантом используемого в методе конечных элементов способа, согласно которому решение внутри ячейки представляется с помощью набора базисных функций от решений в узлах.

Оба эти способа имеют свои преимущества и недостатки, о которых будет сказано после рассмотрения вопроса о способе нахождения искомого дискретного решения.

Как и в большинстве расчетных методов, в методе конечных объемов используется подход Эйлера, т. е. рассматривается течение в выделенной области пространства, — в отличие от подхода Лагранжа, согласно которому рассматривается движение в пространстве выделенной области (массы) текучей среды (этот подход часто используется для расчета движения инородных частиц в текучей среде). Если задача нестационарная, то соответственно рассматривается эволюция (изменение во времени) течения в выделенной области пространства. Основные уравнения нестационарной газогидродинамики, т. е. уравнения сохранения массы, импульса и энергии текучей среды в некоторой выделенной замкнутой области, имеющей объем Ω и площадь поверх-

ности S, могут быть представлены в следующей интегродифференциальной форме:

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_{\Omega} U d\omega = -\oint_{S} \vec{F}\cdot d\vec{S} + \int_{\Omega} Q d\omega, \qquad (2.2.1)$$

где t — время, U — вектор (по числу уравнений) скалярных независимых переменных течения, определенных внутри данной выделенной области пространства, $\vec{F}$ — вектор потоков физических величин через поверхность данной выделенной области пространства S, элементы которой в этом уравнении под интегралом представлены как векторы $d\vec{S}$, направленные наружу области по нормали к этой поверхности, Q — источники, расположенные внутри данной выделенной области пространства и влияющие на изменение физических параметров в данной области. Уравнение (2.2.1) (точнее, система уравнений, число которых равно числу законов сохранения, т. е. 3, плюс число измерений пространства, учитываемых свыше одного, т. е. 2, итого 5 в пространственном случае), показывает, что эволюция независимых физических параметров с течением времени в данной выделенной области пространства определяется физическими потоками, проходящими внутрь этой области через ее поверхность, а также источниками, находящимися внутри этой области. Рассматривая природу этих потоков и источников более подробно, можно заметить, что потоки бывают конвективными и диффузионными, а источники — объемными и поверхностными.

Чтобы привести систему уравнений (2.2.1) к дискретному, т. е. алгебраическому виду, она записывается для контрольных объемов, окружающих местоположения дискретного решения:

- если дискретное решение определяется в узлах расчетной сетки, то контрольный объем "натягивается" на узлы расчетной сетки, или, что не исключается, на расположенные между ними точки, окружающие каждый рассматриваемый узел (контрольный объем может быть определен достаточно произвольно, но он обязательно должен окружать рассматриваемый узел расчетной сетки), например, как показанные на рис. 2.9 в двумерном пространстве контрольные объемы ABCDEFGHA (или BDFH) и ABCDEA для узла J;
- если дискретное решение определяется в ячейках расчетной сетки (как среднее по ячейке), то контрольным объемом однозначно является сама ячейка, т. е. как показанные на рис. 2.10 в трехмерном пространстве контрольные объемы ABCDEFGH и EFGHKLMN для ячеек Ω_1 и Ω_2, совпадающие с их гранями.

В результате для дискретного решения U_j, определенного в узле или ячейке j, система уравнений (2.2.1) приобретает следующий алгебраический вид

(здесь дискретизация по времени не указана, но, естественно, предполагается):

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(U_j\Omega_j\right) = -\sum_{i=1}^{N}\left(\vec{F}_i \cdot \vec{S}_i\right) + Q_j\Omega_j, \qquad (2.2.2)$$

где Ω_j — объем окружающего местоположение U_j контрольного объема, S_i — площадь i-й грани данного контрольного объема, $\vec{F}_i$ — поток через i-ю грань, N — число граней контрольного объема, Q_j — величина источника в данном контрольном объеме. При этом способ вычисления $\vec{F}_i$ должен быть одинаковым для всех ячеек, так что величины $\vec{F}_i \cdot \vec{S}_i$, вычисленные на гранях, разделяющих две соседние ячейки (например, грань EFGH, являющаяся общей для ячеек Ω_1 и Ω_2 на рис. 2.10 и, соответственно, разделяющая их), будут с разными знаками, но одинаковыми по абсолютной величине. Как видно, главной особенностью такой дискретизации является ее консервативность, т. е. автоматическое выполнение законов сохранения, описываемых интегродифференциальными уравнениями исходной системы (2.2.1). Так, очевидно, если на рис. 2.10 вместо двух ячеек Ω_1 и Ω_2 рассматривать одну,

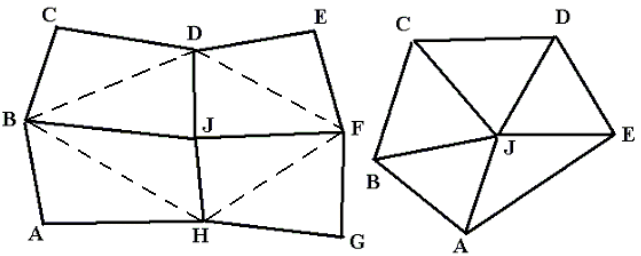


Рис. 2.9. Определение контрольных объемов (ABCDEFGHA или BDFH, и ABCDEA) для узла J расчетной сетки

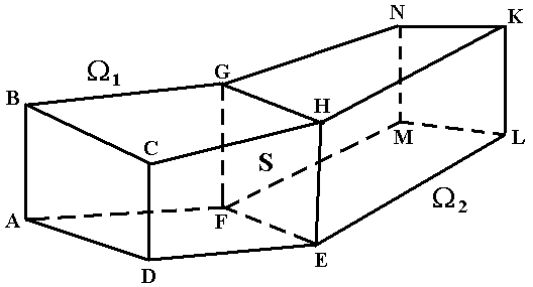


Рис. 2.10. Определение контрольных объемов (ABCDEFGH и EFGHKLMN) для ячейки Ω_1 и соседней с ней ячейки Ω_2

их объединяющую, то сумма потоков в правой части уравнения (2.2.2) не изменится, т. к. при суммировании по этим двум ячейкам их потоки $\vec{F}_{\mathrm{EFGH}}$ через эту грань взаимосократятся.

Как видно из системы уравнений (2.2.2), основная проблема в методе конечных объемов состоит в определении потоков $\vec{F}_i$ через грани ячеек (очевидно, что трудности определения Ω_j и S_i также могут иметь место, но они преодолеваются легче и, самое главное, однозначно). Очевидно, что чем более "экзотическую" форму имеют ячейки (например, неравномерно вытянутую у разных ячеек), тем ниже точность определения этих потоков, особенно в случае определения дискретного решения в узлах расчетной сетки (несмотря на всевозможные ухищрения в оптимизации формы контрольного объема), поэтому более предпочтительными для обеспечения высокой точности определения $\vec{F}_i$ являются равномерные структурированные сетки с дискретизацией решения по ячейкам (а не по узлам), что и сделано в программе COSMOSFloWorks, рассматриваемой в этой книге.

2.3. Методы оптимизации в инженерном анализе

Очевидной целью инженерной деятельности является создание "наилучших" конструкций. Она достигается, вообще говоря, посредством нескольких инструментов. Первый — следование определенным нормативам и стандартам, в которых заложен опыт "предыдущих поколений". Эти источники создавались различными путями: систематизацией опыта, экспериментальной отработкой, не исключены и случаи, когда аргументы разработчиков стандартов не слишком легко понять. Тем не менее в подавляющем большинстве ситуаций соблюдение нормативов есть наиболее надежный путь. Также конструкторы используют инженерную интуицию, практические навыки, опыт предыдущих разработок. Иногда этот путь дает неплохие результаты, особенно когда решаются концептуальные вопросы — алгоритмы генерации новых знаний, несмотря на определенный прогресс в деталях, до сих пор неизвестны. Еще один способ создания "лучших" изделий — использование алгоритмов оптимального проектирования. Понятно, что наиболее подходящим вариантом является совместное использование всех средств. В последующих главах приведены две задачи, демонстрирующие эти возможности. Вопросы оптимизации шлицевого соединения рассмотрены в *разд. 6.5.3*. Решение выполнялось посредством модуля оптимизации COSMOSWorks. В *разд. 9.6.1* описан процесс поиска формы отражателя, обеспечивающего заданное распределение света (если более конкретно — позволяющего приблизиться к назначенному закону распределения). Для этого использовался один из попу-

лярных алгоритмов оптимизации, который был реализован авторами. Мы опишем его далее.

Оптимальное проектирование, возникнув как средство решения прикладных задач, достаточно давно перестало быть схоластической наукой, превратившись в повседневный инструмент, используемый на всех уровнях проектирования: от концепции до, по сути, отдельной детали. Для тех, кто хочет приобрести систематические знания в данной области, порекомендуем книги [4, 9]. Первая содержит лаконичное изложение теоретических постулатов, а также алгоритмы решения задач нелинейного программирования. Второе издание также включает ряд примеров.

2.3.1. Параметрические системы проектирования как элемент систем оптимизации

Известно укрупненное деление алгоритмов оптимизации на параметрические и те, которые связаны с анализом чувствительности. Цель первых — подбор переменных, описывающих геометрию (это наиболее распространенный случай), характеристик материалов, параметров армирования материалов и т. д. Анализ чувствительности предполагает получение формы тела, удовлетворяющей заданным требованиям. Одним из различий между методами является то, что *параметрическая оптимизация* предполагает описание формы (или изменяемых ее участков) тела через некоторые параметры. Затем эти параметры учитываются при построении объекта. Далее строится геометрическая модель, после чего для нее выполняются необходимые расчеты. При этом информация о параметрах проектирования необходима только на этапах поиска оптимума и формирования модели. В прикладных же расчетах она не участвует (при этом использование для расчета МКЭ или другого численного алгоритма совсем не обязательно). Методы анализа чувствительности предполагают, что объектом поиска является форма объекта. Например, если анализируется пластина при изгибе, то это толщины всех конечных элементов, на которые она разбита. Если проектируется ферма, то это параметры сечений всех (или большинства) стержней, образующих расчетную модель. Алгоритмы анализа чувствительности встроены в специальные конечно-элементные программы и являются достаточно сложными для эксплуатации.

С инженерной точки зрения *параметрическая оптимизация* более естественна. Здесь поиск производится в ограниченном пространстве, границы для параметров могут быть назначены исходя из практических соображений, да и последующая подгонка размеров к нормальному ряду чисел, как правило, только незначительно ухудшает проект. Основой для ее широкого использования стали параметрические системы геометрического моделирования. Например, SolidWorks, имея отработанные алгоритмы описания и изменения

формы, инструменты конфигураций (исполнений), аппарат уравнений, процедуры контроля геометрической реализуемости, позволил естественным образом связать с ним средства оптимизации COSMOSWorks. При этом размеры являются переменными проектирования.

Еще одно обстоятельство, оказавшееся принципиальным для объединения методов численного анализа и оптимизации, — это развитие препроцессоров в программах численного анализа. На препроцессор возлагается задача автоматизированного построения сетки, а также реализации граничных условий. Кроме того, производительность как программных, так и аппаратных средств сейчас такова, что методы численного анализа могут использоваться совместно с алгоритмами оптимизации, в то время как раньше использовались, в основном, аналитические решения.

2.3.2. Базовые понятия нелинейного программирования

Сформулируем задачу *нелинейного программирования* следующего вида:

минимизировать *целевую функцию* $f(\mathbf{x})$, где $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, ..., x_N)$ — N-мерный вектор, компоненты которого являются действительными числами, называются *переменными проектирования* и изменяются (варьируются) в интервалах:

$$x_i^{(L)} \le x_i \le x_i^{(U)}; i = 1, 2, 3, ..., N .$$

при условии соблюдения *ограничений-неравенств*:

$$g_j(\mathbf{x}) \ge 0; j = 1, 2, 3, ..., J$$

и *ограничений-неравенств* :

$$h_k(\mathbf{x}) = 0; k = 1, 2, 3, ..., K .$$

Эта проблема также называется задачей *условной оптимизации*. Слово "условная" обозначает, что на переменные проектирования наложены некие ограничения. Если ограничений, в том числе и на диапазон изменения переменных проектирования, нет, то оптимизация называется *безусловной*.

Соответствующая иллюстрация приведена на рис. 2.11. В задаче имеются две степени свободы: x_1 и x_2. Целевая функция — она показана поверхностью — состоит из трех участков. Они образуют зону, в которой функция является *негладкой*, а также имеет *разрыв*. Эти обстоятельства важны для дальнейшего изложения. Там же показаны три типа ограничений-неравенств:

- первая группа — те, которые определяют интервалы изменения переменных. На рис. 2.11 это вертикальные стенки, имеющие в основании прямоугольник;

- вторая группа состоит из единственного линейного ограничения;
- третий вид также представлен единственным нелинейным ограничением, причем оно привело к тому, что *допустимая область* стала *невыпуклой*.

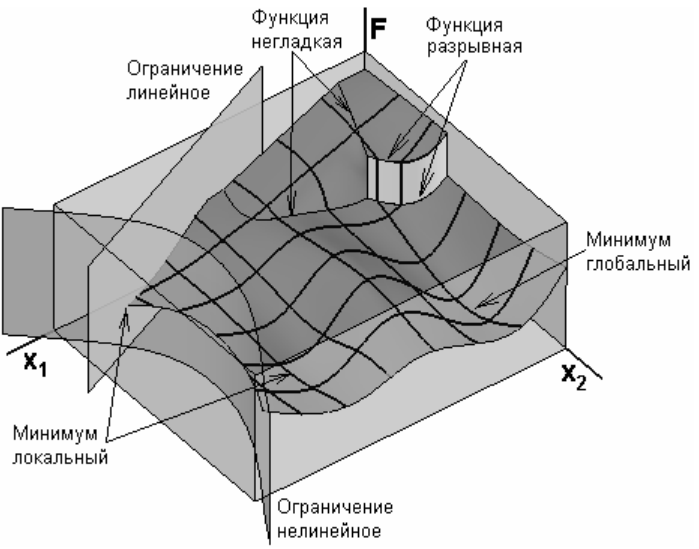


Рис. 2.11. Постановка задачи минимизации

На иллюстрации, разумеется, невозможно отобразить ограничения, наложенные на параметры, которые являются результатами численных расчетов. Формально они выглядят так же, как и ограничения, связывающие переменные проектирования, однако в явном виде зависимости для них отсутствуют.

Линии на поверхности, моделирующей целевую функцию, являются ее сечениями. Они показаны исключительно для наглядности и функционального значения не имеют.

В пределах допустимой области функция имеет несколько минимумов. Тот, где функция имеет наименьшее значение, естественно, *глобальный*. Остальные минимумы являются *локальными*. При этом один из них расположен на границе допустимой области в месте пересечения двух ограничений.

На рис. 2.12 та же модель представлена с отображенными линиями уровня. Видно, что в гладкой части функции имеется зона перегиба — это следствие того, что функция является знакопеременной по второй производной, т. е. имеет как выпуклые, так и вогнутые участки. Вид функции сверху показан на рис. 2.13. Это "каноническая" картина для задачи оптимизации.

На данных иллюстрациях вполне преднамеренно не представлены ограничения-равенства, фигурирующие в общей постановке задачи минимизации. По-

пытка задать их в программе существенно усложняет как сам алгоритм, так и процесс его эксплуатации. Поэтому этот тип ограничений стараются исключить через, например, преобразование задачи с уменьшением числа независимых переменных проектирования.

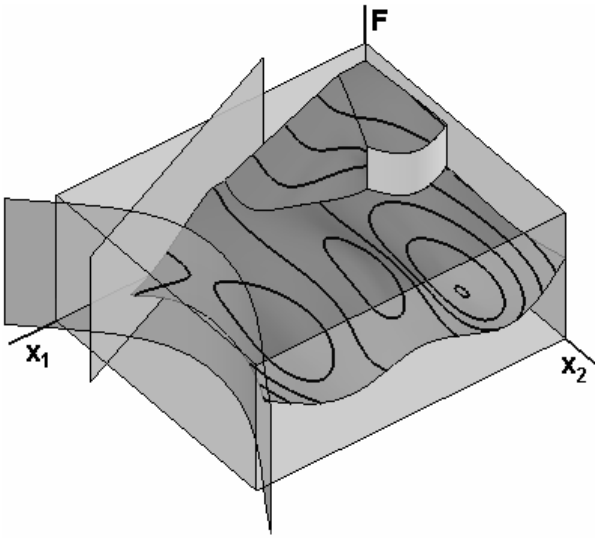


Рис. 2.12. Линии уровня целевой функции

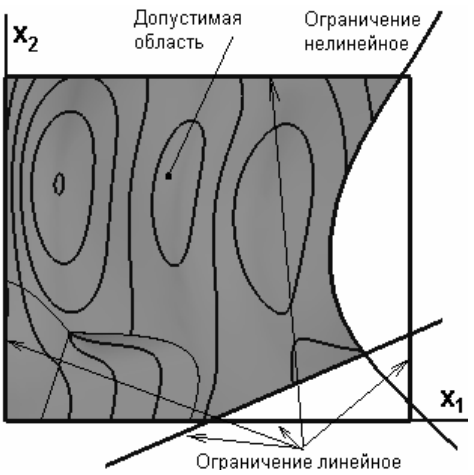


Рис. 2.13. Функция двух переменных — вид сверху

Известно большое число алгоритмов решения задачи нелинейного программирования. Для нелинейной целевой функции с линейными или нелинейны-

ми ограничениями абсолютное большинство из них входит в две группы: это методы *прямого поиска* (мы будем рассматривать только эту разновидность как наиболее актуальную для инженерных расчетов) и процедуры, использующие производные. Несмотря на не слишком высокую по сравнению с градиентными алгоритмами эффективность при решении модельных задач, они оказываются наиболее практичными для использования совместно с алгоритмами численного анализа, например, методом конечных элементов. Дело в том, что порождаемые МКЭ и другими сеточными процедурами результаты: напряжения, перемещения, собственные частоты, величины критической силы и т. д. приводят к негладкости или, более того, разрывности как целевой функции, так и ограничений. Ограничения могут накладываться не только на геометрические параметры, но на компоненты напряжений, перемещений или на критические силы, т. е. то, что прямо или косвенно связано с результатами. Негладкость или разрывность могут быть результатом особенностей формулировки задачи оптимизации или же являться следствием свойств физической модели. Также при использовании численных методов возникает проблема неоднозначности и локальной неустойчивости решения. Это значит, что малое изменение параметров (геометрии модели, настроек сетки, решателей и т. д.) приводит к результату, "существенно" отличному от исходного варианта. В связи с этим процесс вычисления производных целевой функции и ограничений по переменным проектирования является крайне чувствительным к особенностям задачи и, более того, становится зависим от пользовательских предпочтений (сколько пользователей, столько и вариантов сетки конечных элементов, столько и результатов). Добиться сходимости в таких обстоятельствах очень трудно и, как следствие, применение градиентных методов в оптимизационных процедурах как в смысле программирования, так и при эксплуатации, является своего рода искусством.

Методы же прямого поиска в меньшей степени чувствительны к локальной негладкости и разрывности целевой функции и ограничений. Поэтому вывод следующий. "Продвинутые" алгоритмы, если использовать их для решения строго очерченного круга задач, гипотетически более производительны, они также основаны на строгих критериях оптимальности и позволяют получить "точное" решение. Однако есть вероятность, что, в силу ряда обстоятельств, процедура, если ее использовать совместно с МКЭ или родственным решателем, просто не "заработает". В то же время методы, не требующие вычисления производных, позволят получить, пусть и не оптимальный, но "лучший" по сравнению с исходным вариант. Степень "улучшения" для одной и той же задачи зависит как от математической основы алгоритма, так и от субъекта, управляющего процессом.

Изрядная часть алгоритмов условной оптимизации базируется на методах оптимизации безусловной. Как правило, для этого используется замена зада-

чи. В целевую функцию вводится добавка, характеризующая "степень" нарушения ограничений. Эти алгоритмы получили название методов *барьерных и штрафных функций*. В первом случае увеличение функции происходит при приближении к ограничению изнутри допустимой области, достигая на активном ограничении бесконечной величины. Во втором варианте внутри и на границе допустимой области "добавка" равна нулю, а затем, при выходе за границу допустимой зоны, она начинает возрастать. Для задач с потенциально негладкой целевой функцией и нелинейными ограничениями наиболее эффективны недифференцируемые *штрафные функции*. Первый вариант: постоянная штрафная функция, являющаяся, по сути, бесконечным барьером (рис. 2.14). При попытке попадания пробной точки в недопустимую область функция принимает "бесконечное" значение (в программных реализациях, разумеется, для этого некоторой переменной присваивается соответствующий признак), после чего принимается решение о том, как действовать дальше. Недостатком этого алгоритма является невозможность "участия" недопустимых точек в последующем анализе и, соответственно, склонность алгоритмов к зацикливанию (это формальное описание, реальная ситуация более сложна), если минимум лежит на границе.

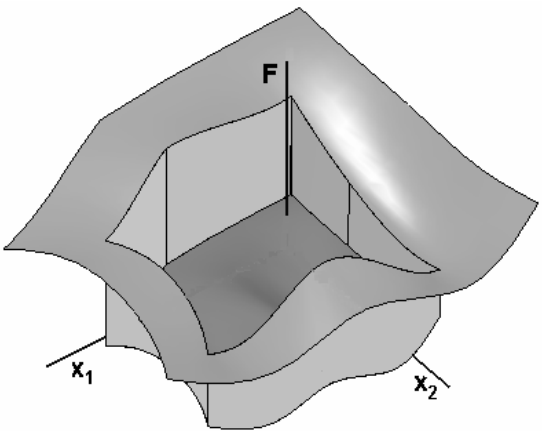


Рис. 2.14. Постоянная штрафная функция — бесконечный барьер

Второй вариант — использование абсолютной функции штрафа — показан на рис. 2.15, где поверхность, образованная участками пирамиды и конуса общего вида и которая теоретически уходит в бесконечность, обрезана. По сути, данный вид штрафа — это сумма абсолютных величин невязок нарушенных ограничений. Выражение для результирующей функции приобретает вид:

$$f(\mathbf{x}, \rho) = f_0(\mathbf{x}) + \rho \sum_{i \in I} \left| c_i(\mathbf{x}) \right| .$$

Здесь:

f_0 — исходное значение целевой функции;

f — функция с учетом штрафа;

ρ — параметр штрафа;

$c(\mathbf{x})$ — вектор нарушенных в точке x ограничений;

I — число нарушенных ограничений.

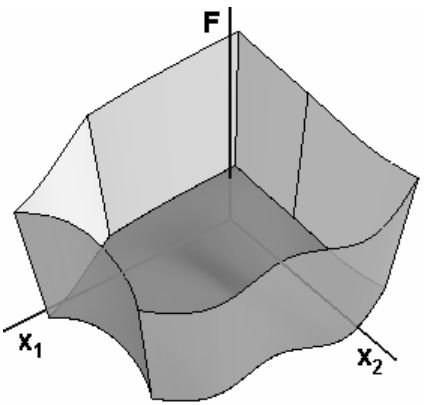


Рис. 2.15. Абсолютная штрафная функция

Естественным является вопрос, какой параметр штрафа нужно использовать. Теоретически он должен зависеть от поведения исходной целевой функции. Если, например, она "быстро" убывает в точке на линии ограничения, то "малый" штраф не сможет компенсировать это убывание, и программа продолжит поиск за пределами допустимой области. Если же штраф "слишком" большой, то возникают проблемы, присущие абсолютным штрафам. Таким образом, использование методов прямого поиска вкупе с внешними штрафными функциями также связано с определенным субъективизмом, а получаемые результаты не всегда соответствуют ожиданиям. Например, в основе модуля оптимизации COSMOSWorks, как мы предполагаем, лежит описанный далее алгоритм. Поэтому в ситуациях, когда обнаруженный программой условный оптимум лежит на одном или нескольких ограничениях, возможен "небольшой" выход за границы допустимой области.

2.3.3. Алгоритм метода комплексов

Договорившись, что задача оптимизации условной преобразована к оптимизации безусловной посредством алгоритма абсолютной штрафной функции, рассмотрим получившийся алгоритм. В качестве базы принят метод *комплек-*

сов (он еще известен как метод *многогранника*). Смысл его в том, что на базе некоторой исходной точки, которая должна быть допустимой (комментарии см. в *разд. 2.3.4*), методом случайного поиска строятся еще несколько, так, чтобы их число было равно числу варьируемых параметров плюс один (иногда число точек увеличивают на одну). В пространстве точки образуют многогранник. Среди всех вершин выделяется наихудшая. Это точка, где модифицированная (т. е. с учетом штрафа) целевая функция имеет максимальное значение. После этого новая пробная точка ищется отражением наихудшей относительно центра тяжести остальных. Для этого используется коэффициент отражения α, традиционно принимаемый равным 1,3. Если пробная вершина нарушает ограничения, наложенные на интервалы изменения переменных, то она выводится на ближайшее к центру тяжести остальных вершин ограничение. Если и после этого она нарушает какое-либо другое ограничение (в случае наличия таковых), то коэффициент отражения уменьшается в два раза. Так же коэффициент отражения уменьшается, если новая пробная точка остается хуже тех, которые остались от предыдущей итерации. В ходе работы происходит уменьшение размеров комплекса, а также его деформирование. В частности, длительное взаимодействие с ограничениями способно приводить к потере комплексом размерности и, как следствие, к невозможности продвигаться в "перспективных" направлениях после того, как определенная часть пути вдоль активного ограничения пройдена, а ограничение "искривилось". Некоторые этапы функционирования метода показаны на рис. 2.16. Приведем формализованное описание алгоритма в соответствии с [9]. В него внесены некоторые коррективы, которые, с одной стороны, исправляют явные опечатки или неточности перевода, а с другой, делают его более понятным.

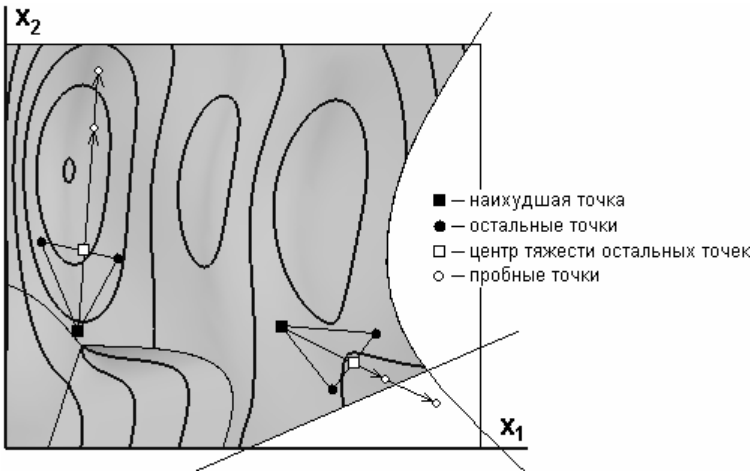


Рис. 2.16. Поиск лучшей точки внутри допустимой области и на ее границе

Итак, имеем допустимую начальную точку $\mathbf{x}^0$, интервалы изменения переменных $\left[x_i^{(L)}, x_i^{(U)}\right]$, коэффициент отражения α и параметры окончания вычислений ε и δ.

Шаг 1. Построение начального комплекса, состоящего из P допустимых точек. Для каждой точки $p = 1, ..., P-1$:

1. Случайным образом определить координаты x_i^p в интервале между $x_i^{(L)}$ и $x_i^{(U)}$.
2. Если $\mathbf{x}^p$ — недопустимая точка, найти центр тяжести $\mathbf{X}$ уже найденных точек и положить
$$\mathbf{x}^p = \mathbf{x}^p + 1/2 \cdot (\mathbf{X} - \mathbf{x}^p),$$
повторять процедуру до тех пор, пока $\mathbf{x}^p$ не станет допустимой.
3. Если $\mathbf{x}^p$ — допустимая точка, повторять пункт 1 до тех пор, пока $p = P-1$.
4. Вычислить $f(\mathbf{x}^p)$ для $p = P-1$.

Шаг 2. Отражение комплекса:

1. Среди всех вершин комплекса выбрать наихудшую точку $\mathbf{x}^R$, для которой
$$f(\mathbf{x}^R) = \max f(\mathbf{x}^p),$$
и присвоить переменной $F_{макс} = f(\mathbf{x}^R)$.
2. Найти центр тяжести $\mathbf{X}$ остальных точек и новую пробную точку:
$$\mathbf{x}^m = \mathbf{X} + \alpha \cdot (\mathbf{X} - \mathbf{x}^R).$$

Далее возможны следующие варианты:

- если $\mathbf{x}^m$ — допустимая точка и $f(\mathbf{x}^m) \geq F_{макс}$, то уменьшить в два раза расстояние между $\mathbf{x}^m$ и центром тяжести $\mathbf{X}$ и продолжать поиск, пока
$$f(\mathbf{x}^m) < F_{макс};$$
- если $\mathbf{x}^m$ — допустимая точка и $f(\mathbf{x}^m) < F_{макс}$, перейти к шагу 4;
- если $\mathbf{x}^m$ — недопустимая точка, перейти к шагу 3.

Шаг 3. Корректировка комплекса для обеспечения попадания вершины в допустимую область.

1. Если $x_i^m < x_i^{(L)}$, положить $x_i^m = x_i^{(L)}$, если $x_i^m > x_i^{(U)}$, положить $x_i^m = x_i^{(U)}$, причем при уменьшении или увеличении одной из координат пробной точки, другие должны уменьшиться или увеличиться пропорционально.
2. Если $\mathbf{x}^m$ — недопустимая точка, уменьшить в два раза расстояние от пробной точки до центра тяжести и продолжать так до тех пор, пока $\mathbf{x}^m$ не попадет в допустимую область.

Шаг 4. Проверка условий окончания вычислений:

1. Положить $\boldsymbol{F} = \frac{1}{P}\sum_p f(\mathbf{x}^p)$ и $\mathbf{X} = \frac{1}{P}\sum_p \mathbf{x}^p$.
2. Если $\sum_p \left(f(\mathbf{x}^p) - \boldsymbol{F}\right)^2 \le \varepsilon$ и $\sum_p \left(\mathbf{x}^p - \mathbf{X}\right)^2 \le \delta$, вычисления прекратить и считать, что оптимум найден; в противном случае перейти к пункту 1 шага 2.

Конец алгоритма.

В некоторых реализациях алгоритма пункт 2 шага 2 (это соответствует ситуации, когда пробная точка оказалась лучше наихудшей) выглядит следующим образом:

Если $\mathbf{x}^m$ — допустимая точка и $f(\mathbf{x}^m) < F_{макс}$, то:

- среди всех вершин комплекса выбрать наилучшую точку $\mathbf{x}^W$, для которой
$$f(\mathbf{x}^W) = \min f(\mathbf{x}^p),$$
и присвоить переменной $F_{мин} = f(\mathbf{x}^W)$;
- если $f(\mathbf{x}^m) \ge F_{мин}$, т. е. новая точка не стала лучшей, то перейти к шагу 4;
- если $f(\mathbf{x}^m) < F_{мин}$, т. е. $\mathbf{x}^m$ оказалась новой лучшей точкой, то направление признается "удачным", после чего следует дополнительно растянуть многогранник;
- найти "улучшенную" пробную точку $\mathbf{x}^e = \mathbf{X} + \beta \cdot (\mathbf{x}^R - \mathbf{X})$, где $\beta(\beta > 1)$ — коэффициент растяжения;
- если $f(\mathbf{x}^e) < f(\mathbf{x}^m)$, т. е. растяжение увенчалось успехом, присвоить $\mathbf{x}^m = \mathbf{x}^e$;
- перейти к п. 1 шага 4.

Замечание

В приведенном алгоритме верхний индекс имеет смысл номера вершины комплекса, а не показателя степени. Условие прекращения вычислений при достижении предельного числа итераций не включено.

Подчеркнем, что мы привели только вариант одного из алгоритмов, который, судя по диагностике программы, реализован в COSMOSWorks.

2.3.4. Использование процедур оптимизации в САПР

Остановимся на особенностях описанного алгоритма, которые являются существенными при использовании его в расчетных программах. Это тем более важно, что конкретные реализации, например, в COSMOSWorks, являются, по сути, черными ящиками, а документация не содержит никакой информации о методических вопросах, сопровождающих данные алгоритмы.

В ходе формирования исходного комплекса точки "разбрасываются" в пределах всей допустимой области. Это влечет за собой два следствия. Начнем с позитивного. "Глобальный" охват допустимой области повышает вероятность выделения глобального оптимума при наличии нескольких локальных минимумов, в частности, сосредоточенных внутри области. Обратная сторона медали состоит в том, что если вершины комплекса расположены по разные стороны от седловой поверхности или, как на рис. 2.11, слева и справа от вертикальной линии перегиба, то алгоритм, подобно человеку, у которого между ног оказалась высокая стенка, будет не в состоянии через нее переместиться. Схожие симптомы (однако на совсем другой почве) способен вызвать случай, когда невыпуклое ограничение на некотором этапе оказывается внутри комплекса. В этой ситуации попытки системы его уменьшить приведут к остановке алгоритма.

Как видно из описания алгоритма, критерий достижения оптимума (условие *Куна — Таккера*) применить к методу комплексов невозможно. Встает вопрос подбора параметров окончания вычислений, определяющих степень малости изменения целевой функции и шага поиска. "Слишком" грубые параметры приведут к тому, что алгоритм, выйдя на некое ограничение или попав в зону оврага целевой функции, остановится раньше времени. При малом шаге может случиться так, что составляющие, обусловленные упомянутыми выше негладкостью или разрывностью целевой функции, окажутся сопоставимы с разностью величин функции в вершинах комплекса. В этой ситуации алгоритм может работать бесконечно (если, конечно, не ограничить число шагов расчета) и, в общем, безрезультатно.

Иногда недостатки метода штрафных функций, связанные с возможностью алгоритма выходить за границы допустимой области в область недопустимых

значений, бывают полезны. Так, в COSMOSWorks при попытке стартовать из недопустимой точки (существуют случаи, когда это вполне оправданно) решение может быть получено. Комплекс "скатывается" в допустимую область, после чего начинает перемещаться по ней вполне успешно.

Имея алгоритм условной оптимизации, а также расчетную программу, приведем алгоритм их объединения в прикладном пакете. Пункты алгоритма будем давать в расширенном виде, сопровождая операции программы информацией о соответствующих им действиях пользователя. Описание построено на примере COSMOSWorks, рассматриваемого в совокупности с имеющимся в нем модулем оптимизации.

Шаг 1. Создать геометрическую модель SolidWorks.

Убедиться, что система размеров сформирована так, чтобы те, которые будут являться переменными проектирования, являлись управляющими. При наличии уравнений проследить, чтобы не происходило уменьшения числа независимых размеров, которые войдут в число переменных проектирования. Проверить возможность перестроения модели при изменении каждого из этих размеров.

Шаг 2. Создать расчетную модель COSMOSWorks, содержащую необходимое число Упражнений. Одно из них будет "источником" целевой функции, остальные предоставят информацию для ограничений (при этом ограничения могут порождаться результатами и первого Упражнения).

Проверить возможность построения сетки для исходного варианта геометрии, а также при изменении размеров, которые будут ассоциироваться с переменными проектирования.

Шаг 3. Выполнить расчет всех Упражнений, которые будут задействованы в оптимизационном расчете для геометрии, соответствующей исходному проекту.

Отобразить результаты Упражнений, которые будут связаны с ограничениями. Оценить гипотетические интервалы их изменения.

Шаг 4. Создать Упражнение с типом Оптимизация.

1. Определить целевую функцию.
2. Назначить переменные проектирования из числа параметризованных размеров геометрической модели.
3. Определить интервалы изменения переменных проектирования. Проследить, чтобы исходная точка находилась внутри соответствующих интервалов. Не рекомендуется располагать исходную точку на границе допустимой области.

4. Сформулировать ограничения, требующие выполнения Упражнений, сделав это так, чтобы в исходной точке все они были неактивны. Как и в предыдущем пункте, нежелательно, чтобы исходный проект лежал на одном или нескольких ограничениях.
5. Задать параметры, определяющие процесс окончания вычислений. Назначить реалистичную величину максимального числа итераций.

Шаг 5. Выполнение оптимизационного цикла (происходит без участия пользователя).

1. Если цикл выполняется первый раз, то переход к пункту 7 данного шага.
2. Обновление геометрии и перестроение сетки.
3. Выполнение всех Упражнений, которые участвуют в формировании ограничений и расчете целевой функции.
4. Выделение активных ограничений, расчет невязок активных ограничений.
5. Расчет целевой функции.
6. Если проект допустимый и сходимость достигнута, то переход к шагу 6.
7. Выполнение прогноза новых значений переменных проектирования.
8. Переход к пункту 2 данного шага.

Шаг 6. Улучшенный проект получен. Конец оптимизационного цикла.

Используя графики зависимости переменных проектирования, целевой функции и ограничений от номера итерации, кривые тренда (графики зависимости целевой функции от переменных проектирования), а также здравый смысл, оценить, является ли вариант конструкции условно-оптимальным или же останов алгоритма был вызван другими причинами.

Данный алгоритм является предельно схематичным относительно конкретных программных реализаций. Например, вопрос об удовлетворении ограничений рассматривается уже после того, как была построена сетка, выполнены расчеты и получены необходимые результаты. В то же время часть ограничений, наложенных на переменные проектирования или их комбинации, не требует упомянутых действий. Время на выполнение этих операций ничтожно. Поэтому выполнять дальнейшие операции, требующие в сотни и тысячи раз больше ресурсов, нерационально и лучше сразу приступить к поиску лучшего варианта. Можно пойти дальше. Неплохая особенность COSMOSWorks состоит в том, что для формирования ограничений могут быть использованы результаты нескольких анализов как одного типа, так и различных видов. Например, минимизируя массу, можно ограничить сверху максимальное эквивалентное напряжение, а снизу — минимальную критическую силу. Возникает естественное предложение: зачем решать весьма трудоемкую задачу соб-

ственных значений, если, допустим, статический расчет показал, что предлагаемый на данном шаге оптимизации вариант не лучше уже имеющихся?

В заключение не удержимся от искушения предоставить на обозрение маленькую ложку дегтя. Дело в том, что в механике твердого тела, да и в инженерной деятельности, задача оптимизации традиционно формулируется в двух принципиальных вариантах. Первый — минимизировать массу при ограничениях на максимальные напряжения (их компоненты или комбинации), деформации, перемещения, минимальные собственные частоты или минимальные нагрузки потери устойчивости и, разумеется, параметры геометрии. Или, если использовать повседневную лексику, нужно получить максимально легкую конструкцию, удовлетворяющую заданным требованиям. В этом аспекте у имеющегося в COSMOSWorks алгоритма оптимизации все более-менее в порядке. Это касается декларированной функциональности, а также ее практического воплощения. Есть, однако, еще один фундаментальный класс проблем, где требуется минимизировать максимальные напряжения (диагностируемые, разумеется, во всем объеме модели) при ограничениях на потолок массы и на какие-либо размеры. Под напряжениями, как правило, понимаются эквивалентные напряжения. Аналогично формулируется задача, где критерием выступают деформации и, весьма часто, — перемещения. В обыденном смысле это есть пожелание создать "наипрочнейшее" или, допустим, "самое жесткое" изделие при наличии конструктивных ограничений. Решение этой проблемы в COSMOSWorks, если не прибегать к некоторым косвенным и не всегда воспроизводимым приемам, невозможно. Это тем более странно, что программа предоставляет возможность управлять резонансными характеристиками и нагрузками потери устойчивости. Однако накладывать ограничения на массу или объем нельзя ни при каких условиях.

Ряд практических примеров решения задач оптимизации посредством COSMOSWorks и рекомендации по этому поводу применительно к разнообразным возможностям программы, в том числе и недокументированным, приведены в [1].

2.4. Методы построения оптических моделей и расчета изображений

Ниже будет рассмотрена программа моделирования оптических процессов TracePro, а также инструмент для проектирования фар — ReflectorCAD. Для того чтобы правильно позиционировать описываемые программные средства и, соответственно, выделить круг задач, для которых они наиболее эффективны, кратко рассмотрим историю развития программ, связанных с моделированием оптических явлений. Моделирование изображений стало одним из

наиболее востребованных приложений в компьютерном моделировании. Первоначальная цель состояла в расчете освещенности искусственных сцен. При этом главным критерием была визуальная достоверность полученной сцены. Реальные оптические процессы тогда мало интересовали разработчиков. Одной из первых стала локальная модель освещения, в которой учитывались эффекты зеркального и — на примитивном уровне — диффузного отражения. Кроме того, вводилось так называемое фоновое освещение, учитывающее наличие излучения, порождаемого "неформализуемыми" источниками. Следующим шагом было появление модели локального затенения, одной из особенностей которого является интерполяция освещенности по поверхности объектов, а также наличие ряда моделей характеристик поверхности.

Важным этапом стало появление метода Ray tracing (Трассировка лучей), который заключается в отслеживании траекторий лучей и моделировании того, как каждый луч взаимодействует со встречающимися на его пути телами и поверхностями. Этот подход позволяет ввести в рассмотрение эффекты преломления, затенения, многократного зеркального отражения. Исторически первым был метод Forward ray tracing (Прямая трассировка), когда лучи, как это и происходит в реальности, испускаются источником света, а затем последовательно взаимодействуют с объектами сцены. Именно этот алгоритм стал базой для развития светотехнических программ, и именно тогда произошло их выделение в самостоятельную ветвь программного обеспечения. Программные продукты для "эстетической" визуализации (рендеринга) стали развиваться отдельно. Взаимодействие между этими направлениями происходило практически только на уровне идей, но предназначение программ и, что немаловажно, клиентская база были различны.

Замечание

Далее мы будем писать сочетание Ray tracing и производные от него слитно — так, как это происходит в документации TracePro.

Круг алгоритмов, которые используются в обеих группах программ, включает в себя метод Distribute raytracing (Распределенная трассировка лучей) или, в терминах TracePro — Ray splitting (Расщепление луча). Смысл его в том, что при взаимодействии с поверхностью или средой луч может расщепляться на несколько, причем отдельные лучи несут зеркально отраженные, рассеянные, преломленные и другие компоненты светового потока. Этот является базой для корректного описания эффектов диффузного отражения и рассеяния в материале.

Еще одной общей идеей стал алгоритм Backward ray tracing (Обратная трассировка лучей) или, как он называется в TracePro, Reverse raytracing. Он базируется на том, что лучи испускаются объектами, освещенность которых

интересует наблюдателя, после чего прослеживаются их пути к источнику. Отметим, что в TracePro этот алгоритм появился только в 2004 году.

Упомянем еще несколько особенностей алгоритмов, основанных на трассировке лучей. Число трассируемых лучей является ключевым параметром, влияющим на точность анализа. В методе прямой трассировки лучи испускаются источниками света, которые в рассматриваемом программном обеспечении могут быть поверхностными или же назначаться на сетке. В первом случае, независимо от того, какой тип распределения лучей в пространстве выбирается пользователем, координаты точек, из которых испускается луч, выбираются программой случайным образом. Если используется пространственное распределение, которое не является равномерным, то направления также случайны (хотя, разумеется, подчиняются некоторой функции распределения). Этими процессами управляет *метод Монте-Карло*, функция которого в данной ситуации генерировать точки старта и направления. Если же алгоритм трассировки имитирует рассеяние света при взаимодействии с поверхностью или в объеме, то здесь также используется генератор случайных чисел. В первой ситуации, в зависимости от соотношения между долями отраженного, прошедшего и рассеянного света, формируется луч, который может имитировать как отраженный, преломленный, так и рассеянный свет. В последнем случае направление луча назначается программой, исходя из заданного закона распределения рассеянной энергии, сформулированного с позиции теории вероятности. При описании объемного рассеяния используемые модели (она описаны в главе, посвященной программам оптического анализа) подразумевают изменение направления луча (направление выбирается статистически, исходя из назначенного закона распределения) при прохождении им некоторого расстояния. Здесь также может имитироваться расщепление луча на несколько других, причем направление и доля энергии, несомой каждым из этих лучей, также недетерминирована.

В качестве источников света может назначаться совокупность лучей, исходящих из вершин некоторой сетки. Она может быть равномерной (прямоугольной или круговой), а может быть назначена статистически или с учетом статистического отклонения от "правильной" формы. Возникает вопрос: для чего введены эти усложнения. Во-первых, взаимодействие света со средой имеет статистическую природу, поскольку оптические характеристики среды также имеют вероятностный характер: параметры шероховатости поверхности, а также отклонения ее формы, оптическая неоднородность прозрачной среды, например, локальная анизотропия пластмасс, наличие включений и т. д. Реальная атмосфера в силу различия температуры, запыленности, движения потоков с отличающейся плотностью не является оптически-однородной. Поэтому идеализацию оптических характеристик объектов необходимо компенсировать вводом статистического компонента в законы излуче-

ния и распространения света. Кроме того, вывод изображения на экран монитора, представляющий собой совокупность пикселов, также порождает Aliasing (Алиасинг) — зубчатый характер контуров, а также сопровождается появлением повторяющихся структур на однородном или плавно изменяющемся в действительности изображении.

Алгоритм рекурсивной *вокселизации*, предназначенный для ускоренной идентификации объектов, встречающихся на пути луча, также является общим для двух типов программ. В TracePro он был введен в 2003 году. В то же время простая вокселизация — разбиение пространства на виртуальные параллелепипеды с установлением связи между объектами сцены и параллелепипедами, в которые они могут входить, в этой программе существовало изначально.

Алгоритм, который не используется в программах светотехники, но является вполне традиционным для процедур рендеринга — метод Radiosity (Метод излучательности), предполагающий разбиение поверхностей на участки с последующим анализом взаимодействия участков, описывающих все объекты сцены, между собой. Многие идеи данного алгоритма перекликаются с методом конечных элементов. Надо сказать, что теоретическая база для моделирования теплопереноса излучением, использованная в МКЭ, имеет много общего с данным алгоритмом. Последние реализации программ рендеринга содержат опции, позволяющие в какой-то степени объединять два алгоритма: радиосети и трассировки. Эти гибридные алгоритмы носят название Photon Maps (Метод фотонных карт).

Для увеличения визуального правдоподобия в алгоритмах рендеринга, основанных на трассировке лучей, в дополнение к используемым функциям *BRDF* и *BTDF*, описывающим процесс рассеяния при отражении и прохождении через поверхность (подробную информацию см. в *главе 9*), разработан метод BSSRDF (Bidirectional Surface Scattering Reflection Distribution Function — Двунаправленная функция распределения отражения рассеянного света). Эта модель описывает поведение луча, попавшего на поверхность тела, обладающего объемным рассеянием. При этом часть светового потока в силу объемного рассеяния возвращается обратно к поверхности, а затем — в среду, из которой этот луч вышел. То есть, по сути, объединяются эффекты, которые в TracePro обрабатываются принципиально различными инструментами. Для имитации сцены, когда преследуется цель повысить визуальное правдоподобие, объединение эффектов объемного и поверхностного рассеяния более результативно, по крайней мере, с точки зрения производительности вычислений (возможность прохождения света через тело с такой поверхностью отсутствует в принципе).

Как видно из краткого обзора, имеется достаточное число точек соприкосновения двух направлений компьютерного моделирования при визуализации.

Собственно, последние релизы TracePro, а также других конкурирующих продуктов включают в себя модули рендеринга (они поставляются опционно и в данной книге не рассматриваются). Суть соответствующего приложения TracePro в том, что в качестве исходной информации оно использует результаты расчета базовой программы, после чего изображение формируется с учетом условностей, которые порождают ощущение визуального правдоподобия.

Для интересующихся историей вопроса можно предложить материал [13], в котором история развития алгоритмов рендеринга описана достаточно подробно.

И, кстати, самое важное отличие программ светотехнического анализа от программ визуализации. TracePro и родственные продукты — полноценные члены семейства CAD/CAE. В качестве геометрического ядра они имеют одну из известных систем: ACIS (TracePro), Parasolid, математику Catia V5 и т. д. Соответственно доступны (иногда за дополнительную плату) интерфейсы через форматы STEP и IGES, в то время как организация взаимодействия программ "эстетического" рендеринга и CAD-систем — весьма щекотливый вопрос.

Упомянем еще два типа программ, оперирующих с оптическими явлениями. Первый — программы детерминированной оптики, т. е. не предполагающие статистического характера распределения света. Эти продукты предназначены для проектирования оптических приборов: объективов, телескопов и т. д. Примером данной программы является OSLO, которая так же, как и TracePro, разрабатывается фирмой Lambda Research. Второй тип программ — инструменты проектирования, но на сей раз в светотехнике. Одна из них — ReflectorCAD — будет рассмотрена далее. Известен также пакет LucidShape, предназначенный для синтеза светотехнических устройств, в частности автомобильных.

ГЛАВА 3

Структурная механика — линейная задача (COSMOSWorks)

COSMOSWorks — это программное обеспечение для решения задач расчета на статическую прочность и устойчивость в линейной и нелинейной постановке, выделения собственных частот, оптимизации формы деталей и сборок в линейной постановке, анализа усталости и поведения конструкции при ударе (рис. 3.1).

Замечание

Описание программы будет достаточно кратким. Это связано с тем, что имеется достаточно подробное руководство по данному продукту [1]. В этой главе мы рассмотрим только ту часть функциональности, которая необходима для решения задач в линейной постановке. Примеры, требующие нелинейного анализа, будут разобраны в следующей главе.

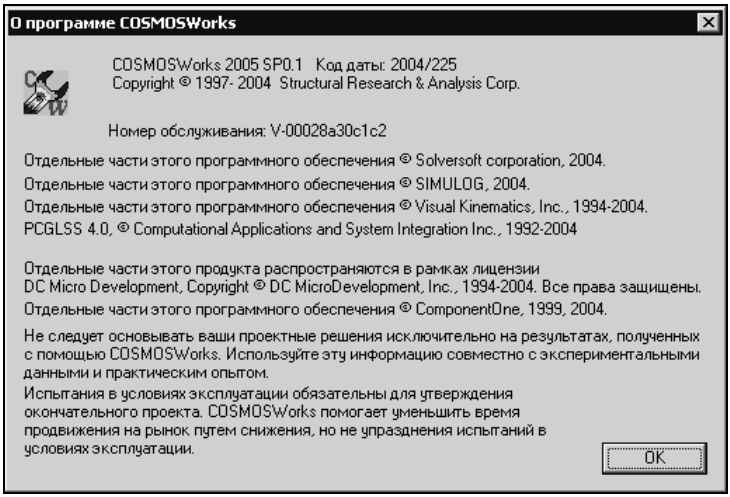


Рис. 3.1. Информационная панель COSMOSWorks

Замечание

Для построения геометрических моделей и численного анализа использованы версии продуктов SolidWorks и COSMOSWorks 2004 года. Для описания функциональности использованы версии продуктов 2005 года.

3.1. Назначение

COSMOSWorks — приложение к SolidWorks, предназначенное для решения задач механики деформируемого твердого тела методом конечных элементов. Продукт разработан фирмой Structural Research and Analysis Corporation *(SRAC)*, США (**http://www.cosmosm.com**), которая в настоящий момент является подразделением фирмы SolidWorks. Программа использует геометрическую модель детали или сборки SolidWorks для формирования расчетной модели. Интеграция с SolidWorks дает возможность минимизировать операции, связанные со специфическими особенностями конечно-элементной аппроксимации. Назначение граничных условий производится в привязке к геометрической модели. Такими же особенностями обладают и процедуры представления результатов. Развитие программы происходит как в направлении увеличения вычислительных возможностей, так и, в значительной степени, за счет расширения функциональности, связанной с имитацией расчетных ситуаций, возникающих в повседневной инженерной практике. К настоящему времени образовался "пакет" из трех продуктов: COSMOSWorks, COSMOSFloWorks и COSMOSMotion, использующих в качестве ядра геометрический моделировщик SolidWorks. В этой связи COSMOSWorks способен принимать результаты аэрогидродинамического или теплового расчетов, выполненных в COSMOSFloWorks, а также нагрузки движения, полученные в результате динамического анализа в COSMOSMotion.

COSMOSWorks позиционируется как инструмент "инженерного" анализа, т. е. предполагается, что для специалиста-расчетчика нужны более "серьезные" средства. Однако, как показывает практика использования программы, подавляющая часть повседневных задач отечественного машиностроения (в той их части, которая в принципе "подходит" для программ численного анализа), может быть решена посредством данной программы. Более того, рациональный интерфейс и разумно ограниченная функциональность дают инженеру возможность сосредоточиться на проектировании, не отвлекаясь на присущие "универсальным" пакетам подробности. Как правило, залогом создания удачной конструкции является квалификация исполнителя, а расчетные программы используются для проверки того, что получилось, а также поставляют материал для дальнейших проб. В этом случае применение инструментов, интегрированных в конструкторские программы, позволяет перебирать варианты с минимальными потерями времени на выполнение рутинных операций.

3.2. Теоретическая база

COSMOSWorks построен на базе метода конечных элементов. Теоретические основы метода изложены в *главе 2*. Здесь мы отметим ряд особенностей его реализации в данной программе. Они относятся к вопросам, которые весьма часто возникают на практике.

- В COSMOSWorks используются два типа конечных элементов: объемные изопараметрические тетраэдры и треугольные элементы оболочек. Оба этих типа могут иметь линейное или параболическое поле перемещений (постоянную деформацию или линейное поле деформаций). Тетраэдры содержат, соответственно, 4 или 10 узлов, а оболочки — 3 или 6. Никаких других типов элементов: балок, стрежней, контактных элементов и т. д. в программе нет.
- Программа не допускает сосуществование в одной модели твердотельных и оболочечных конечных элементов. Это серьезное, в принципе, ограничение в какой-то степени компенсируется тем, что в универсальных пакетах МКЭ методика сопряжения элементов различных типов также неоднозначна.
- Контактные конечные элементы, по крайней мере в явном виде, в программе отсутствуют. На основе косвенных наблюдений можно утверждать, что учет соответствующих граничных условий осуществляется изменением глобальной матрицы жесткости системы.
- Другие типы кинематических граничных условий реализуются непосредственным изменением матрицы жесткости системы (в ранних версиях программы для этого использовались штрафные функции — фактически "очень" жесткие вспомогательные элементы, что приводило к ошибкам программы).
- Сочетание в пределах одной сборки контактных граничных условий типа входа в контакт и выхода из контакта возможно, но получающиеся результаты иногда неадекватны ситуации.
- Для расчета сборок в программе реализованы граничные условия, такие как **Дистанционная нагрузка** (Remote Load), **Точно** (Rigid), **Шпилька** (Pin). Реализация этих условий (или некоторых их разновидностей) предполагает такие изменения матрицы жесткости системы (нам неизвестно, осуществляются они через непосредственную ее модификацию или же посредством ввода вспомогательных "жестких" конечных элементов), которые фактически приводят к появлению в модели абсолютно жесткого объекта (виртуального). Как следствие, в месте, где этот объект взаимодействует с "реальными" деталями сборки (фактически, в зоне приложения

описанных граничных условий), возможно появление теоретически бесконечных деформаций (напряжений). На практике это выражается в отсутствии сходимости решения при уплотнении сетки и, скорее всего, некорректным результатам.

- В COSMOSWorks присутствует *p-адаптивный метод* построения сетки конечных элементов. Это значит, что в зонах с высоким градиентом энергии деформации программа увеличивает порядок полинома, аппроксимирующего поле перемещений в конечном элементе. При некорректной постановке кинематических граничных условий возможно появление *особенностей* (теоретически бесконечных деформаций и напряжений). Применение данной опции для таких расчетных моделей приводит к абсурдным результатам.
- В рамках упругого анализа возможно использование ортотропных материалов. Доступны ортогонально-ортотропные и, как частный их случай (он не выделяется отдельно), трансверсально-изотропные материалы. Возможно назначение цилиндрической ортотропии. Криволинейная ортотропия отсутствует. Присвоение свойств анизотропии неплоским оболочкам формально возможно, но получающийся результат неудовлетворителен (для версий программы до 2005 года).
- При оценке прочности сборок посредством функции COSMOSWorks **Проверка прочности** (Design Check Wizard) для всех материалов используется один и тот же тип критерия прочности. Таким образом, применение этой функции для анализа сборок, содержащих детали из хрупких и вязких материалов, проблематично.
- Встроенный с COSMOSWorks модуль оптимизации, как предполагается, основан на методе прямого поиска с внешней штрафной функцией (более подробно он описан в *главе 2*). Это делает вероятной сходимость к точке, которая находится вне допустимой области вблизи одного или нескольких ограничений. Оптимизация по критерию минимума/максимума эквивалентного напряжения в COSMOSWorks невозможна. По причине, описанной выше (невозможность одновременного использования различных критериев прочности), оптимизация сборок, детали из которых изготовлены из различных типов материалов, в присутствии ограничений на допустимые эквивалентные напряжения проблематична.

3.3. Интерфейс

COSMOSWorks имеет стандартный интерфейс приложения SolidWorks. После активизации COSMOSWorks в меню SolidWorks возникает соответствующий пункт, за которым скрывается меню программы. Справа в окне

SolidWorks появляется *Менеджер* COSMOSWorks, представляющий собой дерево. В нем присутствуют позиции, характеризующие проект в целом (пиктограмма с названием детали или сборки и пиктограмма **Параметры** (Parameters)), а также пиктограммы с **Упражнениями** (Studies), появляющимися после их создания пользователем. Упражнения являются ветвями, объединяющими информацию о некотором расчете: материалы, сетка, граничные условия, результаты, отчеты. Каждой пиктограмме соответствует контекстное меню, содержимое которого изменяется в зависимости от текущего состояния расчетной модели.

Мы не будем подробно расшифровывать содержимое пунктов меню, ограничившись рассмотрением панелей инструментов (табл. 3.1—3.7, рис. 3.2—3.8). Те команды или возможности, которые появились в версии 2005 года, будут описаны несколько более подробно.

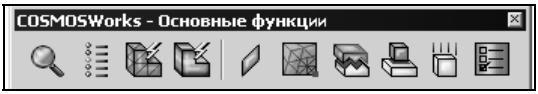


Рис. 3.2. Панель **Основные функции**

Таблица 3.1. *Кнопки панели* ***Основные функции***

Кнопка	Ярлык		Функция
	**Упражнение**	Study	Создание нового **Упражнения**, изменение параметров или удаление имеющегося
	**Применить материал ко всем**	Apply Material to All	Назначение материала или изменение характеристик уже назначенного для всех элементов папки **Твердотельные** (Solids) или **Оболочки** (Shells)
	**Сетка**	Mesh	Конечно-элементное разбиение модели применительно к активному **Упражнению** (Study). Перед построением сетки рекомендуется проверить действующие **Настройки** (Mesh Preferences), **Элементы управления сеткой** (Mesh Control), **Контакт/Зазоры** (Contact Conditions) (последнее — только для **Упражнения** с типом анализа **Статический**)
	**Выполнить**	Run	Расчет для активного **Упражнения**
	**Оболочка**	Shell using surfaces	Построение сетки на базе выделенных граней или поверхностей. Допускается иметь в списке выбора оба типа объектов, однако сетка будет, скорее всего, несшитой

Таблица 3.1 *(окончание)*

Кнопка	Ярлык		Функция
	**Применить элемент управления**	Apply Mesh Control	Назначение для объектов детали или сборки параметров плотности сетки, связанных с вершинами, кромками, гранями или — для сборки — деталями. В сборке плотность можно назначать изолированно для детали или привязывать ее к плотности, которую программа использовала бы для изолированной детали. Управление плотностью в зависимости от направления не допускается
	**Установить глобальный контакт**	Set Global Contact	Назначение контактных граничных условий "по умолчанию". Допускаются совместное перемещение, независимое перемещение и контакт в исходном состоянии с возможностью отрыва. Последний тип граничных условий следует использовать, если детали могут проскальзывать. Команда доступна только при работе в сборке для линейного упругого анализа или для решения задач с физической нелинейностью материалов. Она также частично функциональна при тепловом расчете. Для расчетов на устойчивость, при выделении собственных частот и в случае нелинейного анализа допускается только совместное перемещение деталей
	**Определить набор соприкасания**	Define a Contact Set	Назначение для пар взаимодействующих объектов, а также для выделенных деталей контактных граничных условий отличных от тех, которые приняты по умолчанию. В дополнение к граничным условиям, названным в предыдущем пункте, можно для пар граней назначать условие вхождения в контакт
	**Настройка испытания на ударную нагрузку**	Drop Test Setup	Назначение параметров моделирования процесса падения. Допускается выбор высоты падения или скорости. Назначается ориентация плоскости, на которую падает объект и коэффициент трения. Полупространство, на которое "падает" модель, считается абсолютно жестким. Анализ сопровождается решением контактной задачи с переменной границей
	**Параметры результатов**	Result Options	Настройка параметров отображения результатов выбранного **Упражнения**. Команда доступна только после его расчета

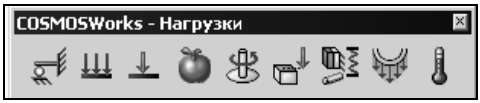


Рис. 3.3. Панель **Нагрузки**

Таблица 3.2. *Кнопки панели* ***Нагрузки***

Кнопка	Ярлык		Функция
	**Ограничения**	Restraints	Назначение граничных условий на выбранных элементах модели для активного механического (типы анализа **Статический**, **Собственные частоты**, **Устойчивость**, **Нелинейный**) **Упражнения**
	**Сжатие**	Pressure	Приложение давления к выбранным граням для активного механического **Упражнения**
	**Сила**	Force	Приложение силы, крутящего или изгибающего момента на выбранных объектах модели для активного механического **Упражнения**. Заданное усилие прикладывается на каждом из выбранных объектов
	**Сила тяжести**	Gravity	Задание гравитационных (шире — инерционных) нагрузок для активного механического **Упражнения**
	**Центробежная сила**	Centrifugal Force	Задание центробежной силы для активного механического **Упражнения**
	**Дистанционная нагрузка**	Remote Load	Приложение удаленных нагрузок для активного механического **Упражнения**
	**Жесткая связь**	Connectors	Ввод виртуальных объектов, имитирующих соединительные элементы. • **Точно** (Rigid) — ввод абсолютно жесткого тела, соединяющего грани двух деталей. • **Пружина** (Spring) — включение "распределенной" пружины растяжения-сжатия или сдвига, возможно предварительно напряженной, между плоскими гранями двух деталей. • **Шпилька** (Pin) — включение абсолютно жесткого штифта, соединяющего концентрические цилиндрические отверстия двух деталей. Штифт может обеспечивать поворот или осевое смещение деталей с назначенной жесткостью.

Таблица 3.2 *(окончание)*

Кнопка	Ярлык		Функция
			• **Поддержка упругости** (Elastic Support) — имитация податливого основания, ограничивающего подвижность заданных граней детали (деталей). Основание может иметь нормальную и сдвиговую жесткость. • **Болт** (Bolt) — ввод податливого объекта, воспроизводящего действие болта с предварительной затяжкой. Последняя задается осевой силой или крутящим моментом. В последнем случае необходим коэффициент трения для расчета силы. Болт может сопрягаться с соединяемой деталью через виртуальную резьбу и (или) через имитацию шайбы
	Контактная сила	Bearing Load	Приложение контактных опорных нагрузок на выбранных гранях для активного механического **Упражнения**
	Температура	Temperature	Назначение температуры на выбранных объектах для активного **Упражнения** с типом анализа **Тепловой** или **Статический**

Замечание

Здесь имеет место неправильный перевод термина Connectors — Элементы соединений.



Рис. 3.4. Панель **Термические нагрузки**

Таблица 3.3. *Кнопки панели* ***Термические нагрузки***

Кнопка	Ярлык		Функция
	Температура	Temperature	Назначение температуры на выбранных объектах для активного **Упражнения** с типом анализа **Тепловой** или **Статический**
	Конвекция	Convection	Приложение конвекции на выбранных гранях для активного **Упражнения** с типом анализа **Тепловой**

Таблица 3.3 *(окончание)*

Кнопка	Ярлык		Функция
	**Тепловой поток**	Heat Flux	Приложение теплового потока на выбранных гранях для активного **Упражнения** с типом анализа **Тепловой**
	**Тепловая мощность**	Heat Power	Приложение тепловой мощности на выбранных гранях для активного **Упражнения** с типом анализа **Тепловой**. Эта величина назначается для каждой из выбранных граней
	**Излучение**	Radiation	Назначение излучения выбранными гранями для активного **Упражнения** с типом анализа **Тепловой**

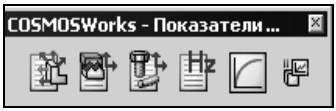


Рис. 3.5. Панель **Показатели**

Таблица 3.4. *Кнопки панели* ***Показатели***

Кнопка	Ярлык		Функция
	**Сила реакции**	Reaction Force	Вывод интегральной величины усилия, приложенного к некоторому геометрическому элементу детали, детали в сборке или сборки в целом
	**Контактная сила**	Contact Force	Вывод численных характеристик контактного усилия между деталями в сборке на поверхности соприкосновения. Выводится также величина силы, вызванной трением
	**Сила шпильки/ болта**	Pin/Bolt Force	Вывод осевого и сдвигового компонентов усилия, возникающего в болтовом соединении, а также крутящего момента. Компоненты, вызванные предварительным натягом, также включаются в отображаемые значения
	**Режимы**	List Modes	Отображение величин собственных частот для расчета на резонанс
	**График ответа**	Response Graph	Формирование *кривой отклика* в нелинейной задаче

Таблица 3.4 *(окончание)*

Кнопка	Ярлык		Функция
	**Интерфейс ударной нагрузки**	Time History Graph	Определение графиков зависимости параметров в узле сетки конечных элементов от времени для расчета на ударную нагрузку

Замечание

Панель **Показатели** в меню именуется как **Инструменты результатов** (List Result Tools).

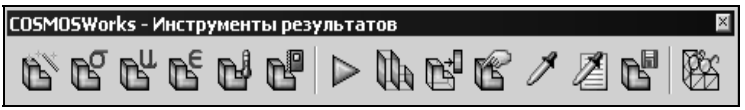


Рис. 3.6. Панель **Инструменты результатов**

Таблица 3.5. *Кнопки панели* ***Инструменты результатов***

Кнопка	Ярлык		Функция
	**Проверка прочности**	Design Check Wizard	Активизация **Помощника для проверки проектирования** для активного статического **Упражнения**. Он осуществляет сравнение результатов расчета напряжений с выбранным критерием прочности
	**Напряжение**	Stress	Визуализация диаграмм напряжений: компонентов относительно глобальной или локальной системы координат, эквивалентных напряжений по Мизесу, а также оценки ошибки вычисления напряжений
	**Перемещение**	Displacement	Визуализация диаграмм перемещений относительно глобальной или локальной системы координат, силы реакции и ее компонентов
	**Деформация**	Strain	Визуализация диаграмм деформации относительно глобальной или локальной системы координат, эквивалентных деформаций, а также плотности энергии деформирования
	**Термическая**	Thermal	Визуализация диаграмм температур, градиентов температуры относительно глобальной или локальной системы координат, теплового потока и его градиентов

Таблица 3.5 *(окончание)*

Кнопка	Ярлык		Функция
	**Отчет**	Report	Генерация отчета, содержащего результаты текущего активного **Упражнения**
	**Анимировать**	Animate	Анимация отображаемой картинки с результатами
	**Ограничение**	Clipping	Активизация окна **Отсечение**. Оно предназначено для управления сечениями активного вида или построения изоповерхностей
	**Отображение цвета**	Color Map	Активизация меню **Карта цветов**. Оно предназначено для задания цветовой палитры активной картинки с результатами
	**Параметры**	Settings	Настройка параметров отображения активной диаграммы с результатами: способа визуализации сетки или границ, окружающих деталей в сборке, масштаба деформированного вида и т. д.
	**Зондирование**	Probe	Вывод числового значения отображаемого результата в месте, указанном щелчком мыши на поверхности модели или в сечении. Отображается величина результата в ближайшем к указанной точке узле
	**Выбранный список**	List Selected	Вывод числовых значений отображаемого результата в узлах, принадлежащих заданным (одному или нескольким) объектам модели. Вычисление суммы и среднего, а также корня из квадрата среднего. Возможно отображение графика, где абсциссой являются указанные точки, причем располагаются они равномерно. Это, пожалуй, единственный инструмент для формирования эпюр полей в привычном для сопротивления материалов виде
	**Сохранить как**	Save As	Запись активной картинки в файл
	**Отобразить/ скрыть сетку**	Show/Hide Mesh	Отобразить/скрыть сетку. Если визуализируются какие-либо результаты, то нажатие этой кнопки приведет к отображению "нормального" вида модели SolidWorks

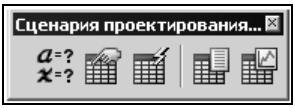


Рис. 3.7. Панель **Сценарий проектирования**

Таблица 3.6. *Кнопки панели* ***Сценарий проектирования***

Кнопка	Ярлык		Функция
	**Параметры**	Parameters	Формирование таблицы параметров, содержащей характеристики, а также их комбинации, которые будут изменяться в ходе выполнения **Сценария проектирования** (Design Scenario)
	**Сценарий проектирования**	Design Scenario	Назначение одной или нескольких совокупностей параметров (они заимствуются из числа **Параметров**, для которых будет исследоваться поведение конструкции)
	**Выполнить**	Run Design Scenario	Выполнение **Сценария проектирования**
	**Отобразить сводку**	Show Summary	Вывод результатов выполнения **Сценария проектирования**
	**Определить график**	Define Graph	Формирование графиков, отображающих зависимости результатов от параметров, включенных в **Сценарий проектирования**



Рис. 3.8. Панель **Оптимизация**

Таблица 3.7. *Кнопки панели* ***Оптимизация***

Кнопка	Ярлык		Функция
	**Цель**	Objective	Назначение *целевой функции* для активного **Упражнения** с типом анализа **Оптимизация**
	**Расчетные параметры**	Design Variable	Задание *переменных проектирования* для **Упражнения** с типом анализа **Оптимизация**

Таблица 3.7 *(окончание)*

Кнопка	Ярлык		Функция
	**Ограничения**	Constraint	Задание ограничений для **Упражнения** с типом анализа **Оптимизация**
	**Результаты этапов проектирования**	Design Cycle Result	Отображение модели на заданном шаге итерации после успешного оптимизационного анализа
	**График этапов проектирования**	Design History Graph	Отображение графиков зависимости переменных проектирования, целевой функции и ограничений от номера итерации после успешного оптимизационного анализа
	**График локальной тенденции**	Local Trend Graph	Вывод *Кривых тренда* — графиков зависимости переменных проектирования от целевой функции и ограничений

3.4. Функциональные возможности

При создании COSMOSWorks разработчиками в качестве базы была взята универсальная конечно-элементная программа COSMOSM, у которой были заимствованы математика пре- и постпроцессора, алгоритмы формирования матрицы жесткости и линейные решатели. Расчетная функциональность изначально была ограничена рамками тетраэдральных конечных элементов применительно к единственной детали или сборки с монолитной связью деталей. Интерфейс (пользовательский и внутренняя его часть, касающаяся взаимодействия с базовой CAD-программой) был переписан на базе SolidWorks API. Дальнейшее развитие программы происходило уже в связи с SolidWorks и заключалось во внедрении функций, необходимых для типовых расчетных ситуаций.

3.4.1. Базовые возможности анализа

COSMOSWorks позволяет выполнять следующие виды моделирования:

- статический анализ в упругой постановке с расчетом отдельных деталей по пространственной или оболочечной модели, а также сборок в трехмерной постановке с учетом взаимодействия деталей;
- расчет *собственных частот* и соответствующих им *форм* для деталей в твердотельном или оболочечном представлении, а также сборок с неподвижными деталями;

- расчет величин критических нагрузок потери устойчивости и соответствующих им форм для деталей в твердотельном или оболочечном представлении, а также сборок с неподвижными деталями;
- тепловой расчет с учетом явлений теплопроводности, конвекции, излучения, но без учета движения сред;
- термоупругий анализ на базе результатов теплового расчета;
- *параметрическая оптимизация* по критерию минимизации/максимизации массы, объема, собственных частот и критической силы;
- имитация деформирования конструкции с учетом физической и геометрической нелинейности, а также в виду изменения нагрузок и температуры во времени;
- моделирование эффекта падения конструкции на жесткую поверхность;
- *усталостный расчет* с учетом кривых усталости, формы кривой нагрузки, а также линейной гипотезы суммирования повреждений.

Все эти типы анализа могут быть связаны с одним и тем же объектом SolidWorks.

3.4.2. Последовательность расчета

COSMOSWorks требует соблюдения базовой канвы алгоритма метода конечных элементов, предоставляя внутри каждого этапа определенную свободу в последовательности шагов подготовки модели и рассмотрения результатов. Для расчета в упругой постановке предполагаемая цепочка событий описана ниже.

1. Создание анализа определенного типа и определение его настроек. Последние могут быть изменены в любой момент перед выполнением расчета.
2. Заполнение, если необходимо, таблицы параметров, определяющей набор величин, которые могут изменяться (конкретно — для которых могут назначаться списки значений) в ходе расчета.
3. Подготовка исходных данных внутри заданного анализа:
   - назначение материала детали или деталям;
   - назначение кинематических граничных условий;
   - назначение статических граничных условий;
   - создание сетки.
4. Связывание, в случае необходимости, параметров из таблицы параметров с соответствующими анализами.

5. Выполнение расчета.
6. Обработка результатов:
   - создание необходимых диаграмм;
   - анализ диаграмм;
   - экспорт результатов.

Процедура оптимизации базируется на результатах расчетов в линейной постановке (статического анализа, расчета на собственные частоты и на устойчивость). Усталостный анализ требует также выполнения статического расчета.

3.4.3. Свойства материалов

Линейный расчет может выполняться с использованием *изотропных* и *ортотропных* (ортогонально и цилиндрически) материалов. Расчет на падение может быть выполнен для деталей из пластичных материалов с изотропным упрочнением. В пределах одной детали может быть назначен только единственный материал (многотельный режим не поддерживается), любой из деталей сборки может быть присвоен произвольный материал. В оболочечной модели при ее создании на базе поверхностей или граней материал (равно как и толщина) назначается независимо для каждой из граней оболочки. Если сетка оболочечных элементов строится на базе срединных поверхностей, то материал присваивается детали в целом.

При создании нового Упражнения материал назначается эквивалентным тому, который был присвоен детали при работе в SolidWorks. Пользователь может создавать собственные материалы и группы материалов.

3.4.4. Граничные условия

COSMOSWorks поддерживает разнообразные типы граничных условий. Для расчетов в упругой постановке граничные условия не изменяются во времени. В нестационарной тепловой задаче могут имитироваться тепловые датчики, управляющие переключением источников тепла.

В программе предусмотрены имитаторы соединений, упругого основания, связи между несоприкасающимися деталями сборки, а также граничные условия, действующие на удалении.

Нагрузки и перемещения могут быть ориентированы относительно глобальной системы координат, справочных систем координат, объектов справочной геометрии: плоскостей, граней, кромок, осей, а также относительно цилиндрических и сферических объектов.

3.4.5. Генерация сетки

Построение сетки осуществляется автоматически без возможности последующей корректировки. Предусмотрены инструменты управления плотностью сетки, однако назначение переменной плотности в зависимости от направления невозможно. Адаптивная сетка предполагает изменение порядка конечных элементов в зонах значительного градиента плотности энергии деформирования.

Создание сетки применительно к контактным задачам происходит автоматически после назначения пользователем (по умолчанию или в явном виде) типа контактных граничных условий.

3.4.6. Контактная задача

Расчетная модель сборки в статическом анализе может содержать *контактные граничные условия* следующих типов:

- ❒ совместное перемещение;
- ❒ независимое перемещение;
- ❒ проскальзывание и выход из контакта;
- ❒ вход в контакт;
- ❒ наличие контакта для малых зазоров;
- ❒ имитацию *горячей посадки* для цилиндрических тел.

В пределах одного анализа для сборки могут сосуществовать контактные граничные условия различных типов. Никакие другие типы контактных условий, кроме совместного и независимого перемещения, в расчетах на собственные значения не реализуются.

3.4.7. Решатели

Для решения разрешающей системы линейных уравнений, а также для задачи собственных значений предлагается до трех типов решателей: два итерационных и один прямой.

3.4.8. Постпроцессор

Программа предлагает разнообразные способы отображения диаграмм с результатами: закраской, изолиниями, сечениями, в деформированном виде, с наложением на исходную модель, в расчлененном состоянии для сборок, получение результатов в численном виде в конкретной точке и т. д.

3.4.9. Интерфейсы

COSMOSWorks может воспринимать нагрузки движения, полученные в расчетах сборок посредством COSMOSMotion, и преобразовывать их в инерционные нагрузки для отдельных деталей. Также программа способна импортировать информацию о распределении температуры и давления из приложения COSMOSFloWorks.

COSMOSWorks может экспортировать информацию о сетке и, в некоторых случаях, о граничных условиях в универсальные конечно-элементные пакеты.

3.4.10. Возможности версии 2005 года

В июне 2004 года анонсирована версия COSMOSWorks 2005. Она содержит ряд более и менее принципиальных новинок. К первым относится включение в программу возможности нелинейного анализа, появление функциональности, связанной с имитацией падения объекта, а также включение виртуальных предварительно затянутых болтовых соединений. Кроме того, в новой версии сетка строится персонально для каждого **Упражнения** (Study), что дает возможность сохранять результаты всех необходимых расчетов. Более подробный список следует далее.

- Общие усовершенствования:
  - **Упражнения** (Studies), связанные с конфигурациями SolidWorks;
  - поддержка использования оперативной памяти более 2 Гбайт;
  - улучшение производительности при загрузке больших сборок;
  - увеличение числа команд, вынесенных в панели инструментов;
  - изменение эстетики Менеджера (COSMOSWorks Manager).
- Документация:
  - контекстно-зависимые **Быстрые советы** (Quick Tips);
  - загрузка файлов примеров из Руководства пользователя;
  - пример по болтовому соединению;
  - руководство по нелинейному анализу;
  - руководство по моделированию падения объекта.
- Материалы:
  - физически-нелинейные материалы: *нелинейно-упругие*; *пластичные*; *гиперэластичные*; *вязкоэластичные*; *ползучие*;
  - создание библиотек пользователя;

- температурозависимые характеристики жесткости, теплопроводности, удельной теплоемкости, излучательной способности и т. д.

❒ Начальные и граничные условия:

- прямой интерфейс с COSMOSMotion при передаче нагрузок движения с передачей нагрузок движения непосредственно в **Упражнение** (Study), связанное с деталью;
- *кривая времени* для имитации статических и тепловых граничных условий;
- назначение различной начальной температуры для компонентов сборки в тепловом анализе;
- использование кромок и граней модели для управления ориентацией граничных условий;
- контекстно-зависимое меню, появляющееся при нажатии правой кнопки мыши в графической области;
- виртуальное болтовое соединение с гайкой и без нее; с осевым натягом или нагруженное крутящим моментом;
- предварительно нагруженные виртуальные пружины;
- упрощенное назначение *условий симметрии* для твердых тел и оболочек;
- назначение начальной температуры на гранях, кромках и вершинах в нестационарном тепловом расчете;
- управление размерами символов граничных условий;
- поддержка множественных граней в виртуальном штифтовом соединении;
- поддержка больших поворотов для сборок со штифтовыми соединениями;
- доступ к величинам нагрузок, воспринимаемых штифтами.

❒ Сетка:

- доступ к информации об узлах и элементах;
- назначение контактных граничных условий для вершин и кромок;
- улучшенная диагностика отказа при построении сетки. Идентификация объектов SolidWorks, для которых произошел отказ;
- независимые сетки и контактные граничные условия для различных Упражнений;
- при использовании команды **Зондирование** (Probe) диагностируются узлы, на базе которых вычисляется результат;

- улучшение производительности при визуализации сетки;
- отчет о генерации сетки с выводом оценки качества конечных элементов.

❒ Типы анализа:

- учет физической и геометрической нелинейности;
- учет физической нелинейности в совокупности с контактной задачей с переменной границей контакта;
- усталостный расчет;
- имитация падения детали или сборки на жесткое основание с отслеживанием процесса в течение заданного интервала времени;
- распространение действия опции **Большие перемещения** на модели с виртуальными пружинами, упругими основаниями и нагрузками на удалении;
- доступ к величинам усилий, передаваемых нагрузками на удалении;
- термоупругий расчет сборок с виртуальными соединениями;
- поддержка стабилизирующих "податливых пружин" при решении контактной задачи;
- поддержка теплопередачи излучением для оболочечных моделей.

❒ Решатели:

- поддержка многопроцессорных вычислений для итерационного FFEPlus-решателя;
- поддержка многопроцессорных вычислений при расчете с неизвестными **Коэффициентами проецирования** (View Factors).

❒ Визуализация результатов:

- отображение контактного давления;
- корректное осреднение напряжений на границе контакта;
- использование Менеджера свойств (Property Manager) для управления отображением результатов;
- постановка маркера предела текучести на шкале результатов;
- отображение части объема модели, напряжения в котором больше заданной величины;
- вывод коэффициентов участия массы (Mass participation factors) для анализа на собственные частоты;
- усовершенствованные инструменты управления сечениями и изоповерхностями;

- одновременная визуализация результатов нескольких Упражнений;
- доступ к нагрузкам, воспринимаемым виртуальными болтовыми и штифтовыми соединениями;
- сравнение в одной таблице результатов различных Упражнений между собой или с данными, полученными из эксперимента.

3.5. Проектирование и расчет емкости

Данный раздел посвящен комплексному рассмотрению вопросов, возникающих в ходе проектирования и расчета типового изделия: тонкостенного бака для жидкости, находящейся под давлением. Примем установку на использование для расчета конструкторской модели, которая будет модифицироваться применительно к используемой программе.

3.5.1. Постановка задачи

Сборочная модель бака показана на рис. 3.9. Он состоит из тонкостенного сварного сосуда, фланцев, крышки с прокладкой и крепежа. По причине невозможности присутствия в модели пространственных и оболочечных конечных элементов, COSMOSWorks не позволяет корректно рассчитывать подобные объекты "в целом". Поэтому следует разделить модель на узлы, которые могут аппроксимироваться одним типом элементов. Мы остановимся на двух составляющих конструкции: собственно баке и крышке с фланцем. Это

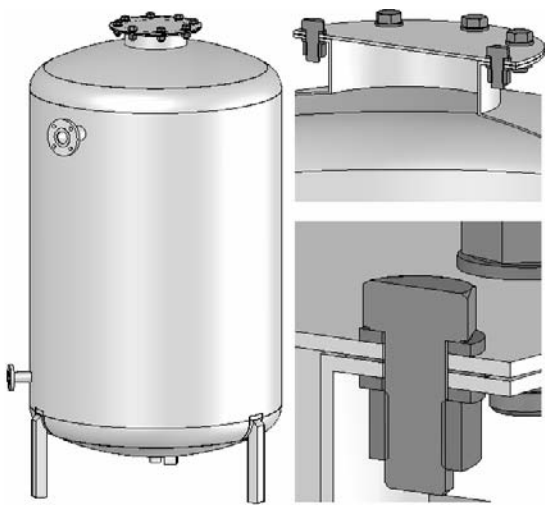


Рис. 3.9. Модель сборки бака

принципиально различные проблемы, поэтому раздельное их рассмотрение — при соблюдении определенной техники — более эффективно. В этом разделе мы подробно рассмотрим процесс расчета бака как тонкостенной оболочки, заполненной жидкостью под давлением с учетом влияния опор. Нас будет интересовать статическая прочность конструкции, а также оценка возможной утраты несущей способности в связи с потерей устойчивости под действием собственного веса и веса жидкости.

3.5.2. Подготовка геометрической твердотельной модели

На рис. 3.10 показана твердотельная модель бака. Она была построена на базе эскиза рис. 3.11. Толщина стенки, а также сечений опор — 3 мм. Являясь одной из деталей сборки, бак в твердотельном представлении был подготовлен соответствующим образом. Он включает все элементы конструкции и пригоден для оформления конструкторской документации. Модель, однако, малопригодна для расчета методом конечных элементов. Причина понятна: твердое тело подразумевает аппроксимацию пространственными элементами. Отношение же размеров оболочки к ее толщине существенно больше (максимально приемлемой для "пролета" является величина 10—20), чтобы использовать пространственные элементы. Возможно, правда, наложение элементов оболочек на поверхность или формирование сетки на базе срединной поверхности, автоматически выделяемой программой. Первый вариант в данной задаче приведет к некорректной аппроксимации в зоне опор. Для автоматической же генерации оболочек на срединных поверхностях функциональность программы недостаточна (этого следует ожидать, поскольку при

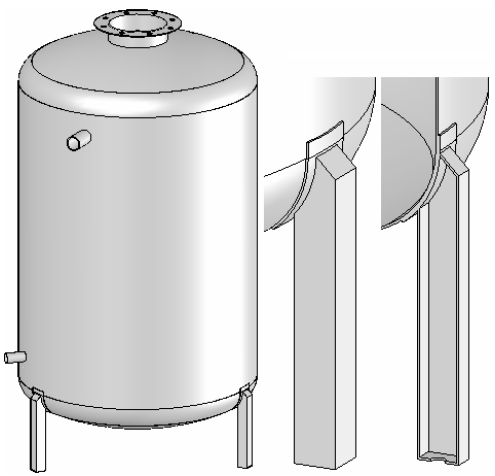


Рис. 3.10. Модель бака в виде детали

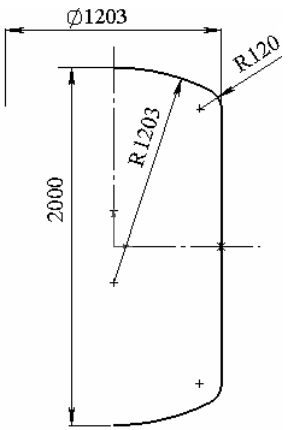


Рис. 3.11. Профиль бака

дискретном изменении толщины примыкающих пластин решение неоднозначно). Поэтому место примыкания опор к баку в зоне утолщений является источником проблем для автоматизированных алгоритмов.

3.5.3. Построение поверхностной модели

В свете сказанного расчет возможен исключительно на базе полноценной поверхностной модели. Сформировать ее "с нуля" было бы самым простым. Затем, после анализа, можно было бы на базе поверхностей получить "привычную" форму. Эта последовательность наименее трудоемка, однако ситуация, когда анализ выполняется для уже готовых проектов, вполне реалистична.

Методика преобразования "твердое тело → поверхность" достаточно чувствительна к способу представления исходных данных, в частности, аппроксимирована ли деталь единственным телом или, как в нашем случае, сформирована из нескольких тел. Причина, по которой это было сделано, — желание использовать функциональность SolidWorks для создания ферменных конструкций, а также оптимизировать переход от детали к сборке. Последняя и есть источник для оформления конструкторской документации. Как правило, наилучшим "сырьем" является деталь, представленная единственным телом (оно получается командой SolidWorks **Скомбинировать тела**). Неудача в его формировании свидетельствует о наличии зазоров между исходными объектами. Помимо, разумеется, сознательного выбора конструктора, это может быть следствием дефектов модели. К единственному телу можно попытаться применить команду **Промежуточная поверхность**. Попытка использовать опцию **Найти грани по парам** терпит неудачу. Поэтому нужно в явном виде выделять пары граней, формируя такие группы, чтобы полученные поверхности могли быть сшиты. Однако результат будет не слишком впечатляющим. Если собственно сосуд получается вполне приемлемым, то опоры будут иметь дефекты. Пойдем по более простому пути: посредством команды **Эквидистанта к поверхности** получим копии наружных граней опор. Понятно, что величина смещения должна быть равна половине толщины профиля, образующего опоры. В зоне утолщения приемлемую аппроксимацию на базе твердого тела построить невозможно, поэтому заполняем прямоугольное отверстие набором поверхностей (команда **Поверхность | По сечениям**) (рис. 3.12). Следует проконтролировать наличие куска оболочки внутри опоры. Следующий шаг — сшивка участков заплаты и размножение их посредством команды **Переместить/Копировать** с вращением относительно вертикальной оси. Тем самым будут получены три опоры и три места стыка. Можно (но необязательно) сшить заплатки с оболочкой. Опоры же присоединить не удастся (Т-образный сшитый объект недопустим).

Сформированная поверхностная модель показана на рис. 3.13. Фрагментами выделены участки, требующие специального внимания. Характерные замеча-

ния здесь таковы. Узел, состоящий из крышки бака, фланца и крепежа, не может быть корректно описан оболочечной моделью, по крайней мере, в зоне стыка деталей. Эту зону имитируем кольцом, которому в конечно-элементной модели будет присвоена толщина, равная сумме толщин листов, из которых изготовлены эти детали. Отношение толщины объекта к габаритам таково, что наиболее приемлемой является модель толстых оболочек (следует активизировать опцию **Утолщенные** (Thick) в панели **Определение оболочки** (Shell Definition)). Вторая особенность присутствует в зонах патрубков. Поскольку будет решаться задача с приложением внутреннего давления, необходимо эти патрубки заглушить. В противном случае это приведет к появлению неуравновешенных нагрузок (возникает своего рода реактивный двигатель), нехарактерных для подобных задач. Последняя из выделенных зон — утолщение, к которому приварена опора. Здесь мы имеем визуальное отклонение от исходного состояния, которое, с точки зрения расчета, можно признать несущественным.

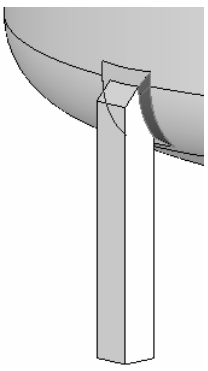


Рис. 3.12. Заполнение отверстия между опорой и баком

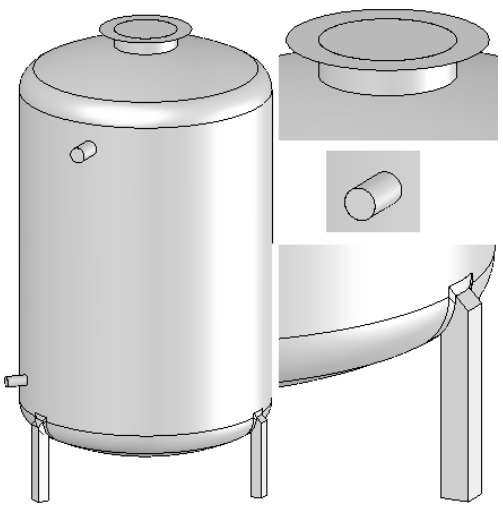


Рис. 3.13. Представление бака в виде поверхности

3.5.4. Анализ

В ходе предыдущих построений получена геометрия, пригодная для расчета по оболочечной модели. Для нее будет выполняться статический анализ и расчет на устойчивость. Последний делает невозможным сокращение размерности за счет учета осевой симметрии. Такая модель была бы сектором, составляющим 1/6 полной окружности (ликвидация некоторых патрубков,

сопровождающая эту операцию, повлияла бы на результат крайне незначительно). Отдельный вопрос — аппроксимация в расчете сварных соединений между элементами конструкции. Понятно, что оболочечная модель не способна полноценно имитировать утолщение материала в зоне стыка, а также концентрацию напряжений в углах, образуемых в месте утолщения. Поэтому единственная рекомендация здесь — уплотнить сетку в местах примыкания опор к баку.

3.5.5. Решение

Подготовка исходных данных о свойствах материалов. Материалом конструкции является сталь, а напряженно-деформированное состояние определяется исключительно модулем упругости и коэффициентом Пуассона, поэтому можно из библиотеки выбрать практически любую марку стали.

Подготовка расчетной модели. Перед созданием сетки следует ввести **Элементы управления** (Mesh Controls), позволяющие уменьшить размер конечных элементов в зонах стыка, а также там, где происходит изменение кривизны: в месте перехода цилиндрической поверхности в торовую, а затем — из тора в сферу. В процессе подбора плотности сетки, отработки граничных условий можно использовать конечные элементы первого порядка, однако результаты для отчета категорически рекомендуется получать на сетке с параболическими элементами. После создания сетки следует проконтролировать качество разбиения. Программа не позволяет выделять вырожденные конечные элементы по их номеру или расположению: диагностика ограничивается выводом сообщения о самом факте их наличия. Критерием является величина Якобиана преобразования. Он рассчитывается в точках, число которых назначается посредством опции **Настройки** | **Сетка** | **Проверка Якобиана** (Preferences | Mesh | Jacobian check). В такой ситуации визуальная проверка очень полезна. Пример показан на рис. 3.14. Слева — результат дискретизации днища для модели в исходном ее состоянии. Топология сетки неприемлема: в пределах зоны, предполагающей равенство размеров элементов в окружном направлении, получена сетка, в которой элементы не только различны, но и обладают низким (с точки зрения расчета) качеством. Это выражается в наличии элементов с острыми углами (и соответственно значительным соотношением длины большей и меньшей сторон), элементов с вогнутыми ребрами. Уплотнение сетки на днище позитивных перемен не дает. Следует упомянуть, что этот результат получен на версии COSMOSWorks 2004 притом, что в версии 2003 было декларировано существенное улучшение работы генератора сетки именно для гладких симметричных поверхностей. Для пользователя единственная возможность "помочь" алгоритму — это избавиться от круглой непрерывной грани. Осуществляем это посредством команды **Линия разъема** (ее следует подать два раза). Здесь

тоже есть особенность, разбивая сферическую часть, нужно одновременно сделать то же самое с торовой гранью. Если эту операцию игнорировать, то велик шанс получить сетку, состоящую из нескольких несвязанных подмножеств элементов: после приложения нагрузок модель конструкции "развалится". Модифицированная модель показана на рис. 3.15, а соответствующая ей сетка — на рис. 3.14, справа. Качество сетки повысилось радикально.

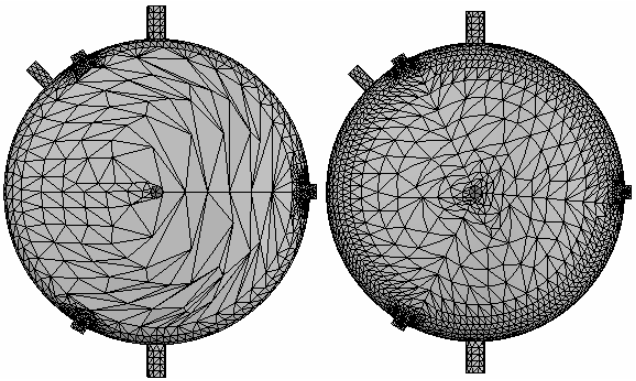


Рис. 3.14. Дискретизация днища с непрерывной поверхностью и при разбиении ее на части

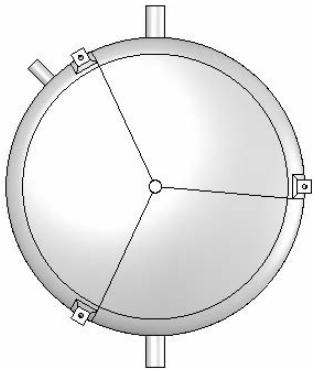


Рис. 3.15. Модифицированная геометрическая модель

Замечание

В SolidWorks 2005 функциональность команды **Линия разъема** применительно к построению моделей для прочностного расчета радикально улучшена. Это произошло благодаря введению опции **Пересечение**. Она используется в ситуации, когда некоторая поверхность примыкает к гладкой грани другой поверхности. В результате грань делится на участки таким образом, что это гарантирует построение корректной сшитой сетки оболочечных элементов.

На рис. 3.16 показана результирующая сетка конечных элементов. После ее генерации программой, ориентация нормалей на смежных гранях может не совпадать. Это делает некорректным осреднение напряжений на кромках, соединяющих такие грани. По сути, на них будут осредняться напряжения на внутренней и внешней поверхностях оболочки. Визуально такая ситуация соответствует чередованию на сетке областей с цветами, соответствующими "верхней" и "нижней" граням оболочки (рис. 3.17). Первый из цветов изменять нельзя, второй — настраивается в поле **Настройка** | **Сетка** | **Визуальные параметры** | **Цвет нижней грани оболочки** (Preferences | Mesh | Visual settings | Shell bottom face color). Изменение ориентации нормалей выполняем командой **Отразить элементы оболочки** (Flip Shell Elements), вызываемой после активизации соответствующей грани из контекстного меню пиктограммы **Сетка** (Mesh).

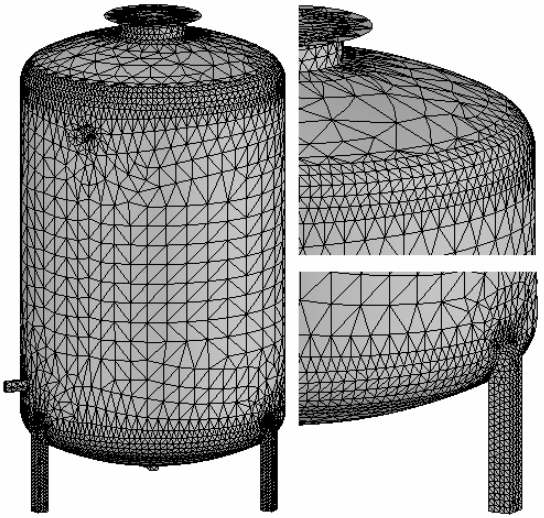


Рис. 3.16. Сетка конечных элементов

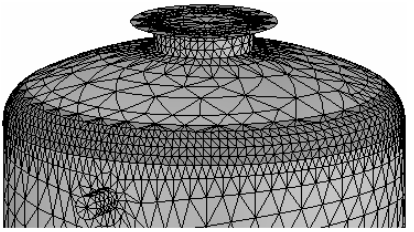


Рис. 3.17. Сетка конечных элементов до выравнивания нормалей

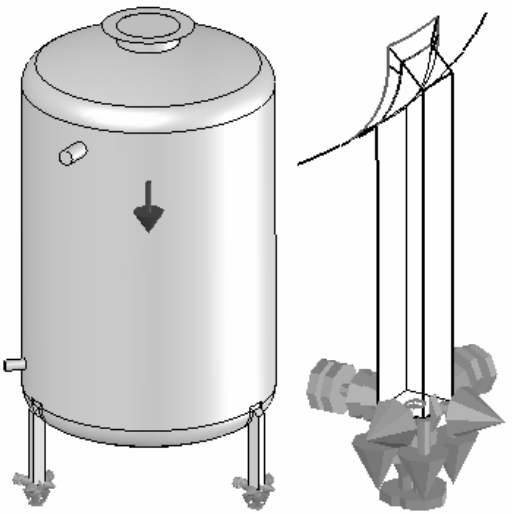


Рис. 3.18. Кинематические и статические граничные условия

Кинематические граничные условия показаны на рис. 3.18. Они воспроизводят установку конструкции на жесткое основание с последующим привинчиванием к нему болтами. Первое имитируется ограничением подвижности узлов на нижних гранях опор в направлении нормали: тип — **На плоской грани** (On flat face), направление — **Перпендикулярно грани** (Normal to face), второе условие представляет собой равенство нулю всех перемещений и углов поворота на кромках отверстий — тип **Зафиксированная** (Fixed).

Статические граничные условия (рис. 3.18) имитируют действие гравитационной нагрузки на конструкцию (собственный вес), для чего следует назначить ускорение равное ускорению свободного падения в направлении оси бака, а также вес жидкости. Последнее моделируется действием переменного давления на стенки. Предположив, что бак заполнен до верхней кромки цилиндра, создаем в SolidWorks локальную систему координат (**Вставка** | **Справочная геометрия** | **Система координат**) с началом на оси на уровне упомянутой кромки и направленной вниз осью X. Если в качестве единиц длины в SolidWorks установлены миллиметры, а плотность воды — 1000 кг/м^3, то изменение давления должно изменяться в соответствии с формулой:

$$p = 9{,}81 \cdot 1000 \cdot \mathrm{X},\ \text{Н/м}^2.$$

Эта зависимость реализуется в панели для нагрузки **Сжатие** (Pressure) после активизации опции **Неравномерное распределение** (Nonuniform Distribution) (рис. 3.19). Отрицательное значение обозначает действие сжимающих нагрузок. Давление следует приложить ко всем поверхностям бака, лежащим ниже кромки, включая патрубки и их заглушки.

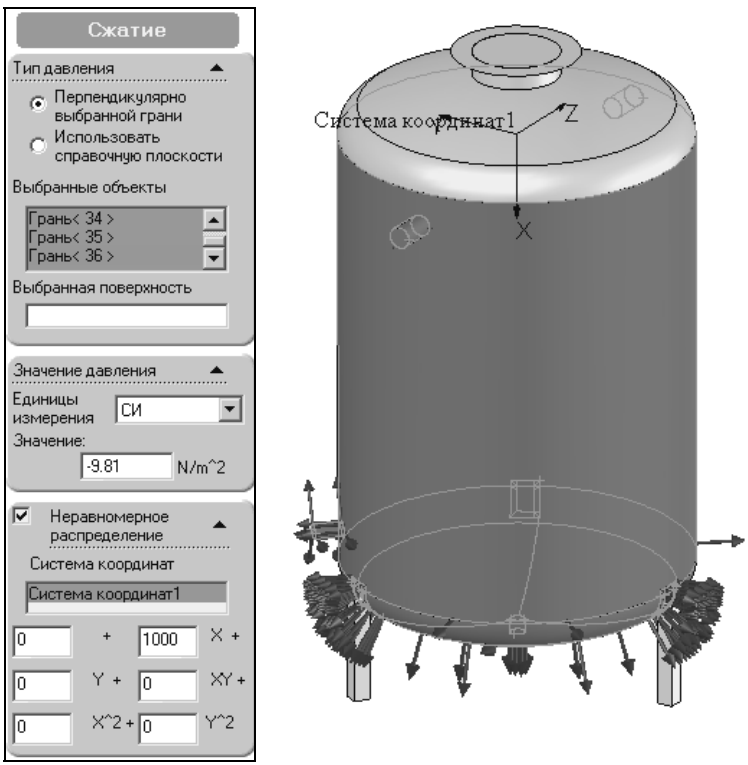


Рис. 3.19. Назначение линейно изменяющегося давления

Статический анализ и интерпретация результатов. Вычислительных проблем данная задача не может иметь за исключением случая, когда присутствуют вырожденные конечные элементы. Потенциальная возможность их появления (может быть, не последняя) была ликвидирована модификацией сферического днища. Первым шагом пусть будет анализ действия собственного веса конструкции. Картина эквивалентных напряжений на наружной поверхности (поле **Грань** на вкладке **Отображение** имеет значение Сверху), совмещенная с деформированным видом, показана на рис. 3.20. Видно, что наиболее опасным местом является зона на опоре, примыкающая к баку, а также край бака в месте сварки с утолщением. Очевидно, что одним из наиболее значимых компонентов напряжений являются касательные напряжения в опоре в плоскости листа. Для опоры, лежащей в плоскости XY, они совпадают с компонентом напряжений XY в глобальной системе координат. Соответствующие диаграммы показаны на рис. 3.21.

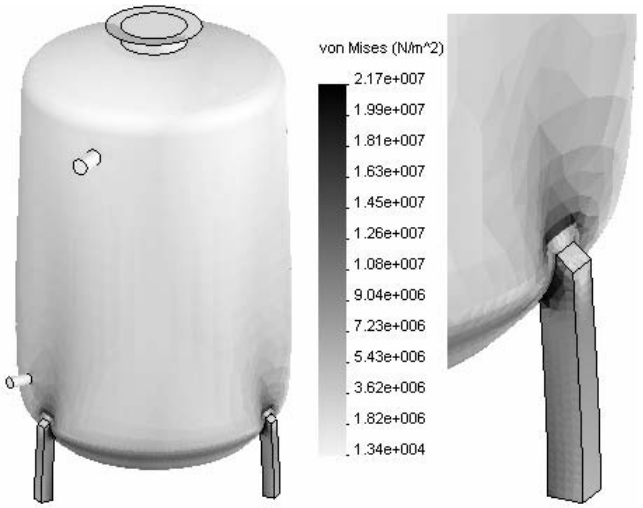


Рис. 3.20. Эквивалентные напряжения на наружной поверхности на фоне деформированного вида

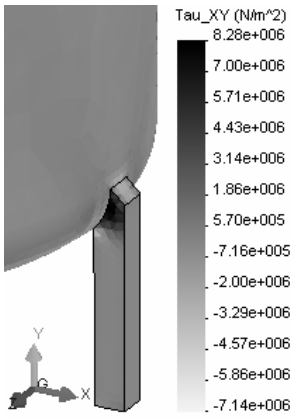


Рис. 3.21. Касательные напряжения на наружной поверхности в плоскости XY

Имея в виду эти результаты, увеличим утолщение в месте присоединения опор с 6 до 9 мм. Картина эквивалентных напряжений показана на рис. 3.22, слева. Видно, что максимум не уменьшился, однако по краю накладки произошло их снижение. При этом более значительной стала концентрация напряжений в ее углах. Этот фактор становится еще более очевидным, если также увеличить толщину листа опор с 3 до 6 мм. Максимум переместился на бак в зону угла (рис. 3.22, справа). Здесь мы имеем дело с типичной концен-

трацией напряжений возле угла. Можно предположить, что дальнейшее утолщение накладки может только усугубить проблему. Решением проблемы, как представляется, может стать изменение формы накладки — ввод скруглений на углах, увеличение размеров, а также (этот эффект менее очевиден при расчете по оболочечной модели) плавное изменение толщины накладки в месте стыка с оболочкой.

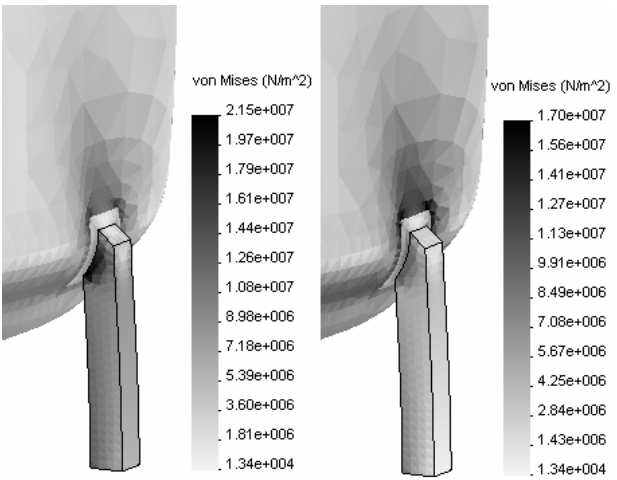


Рис. 3.22. Эквивалентные напряжения при утолщении накладки (слева), а также опор (справа)

Проанализируем вопрос о влиянии заделок в опорах на напряженное состояние. Если на всех опорах, кроме одной, ликвидировать фиксацию на краях отверстия, т. е. разрешить их основаниям скользить по полу без трения, то максимальные эквивалентные напряжения увеличатся с 2.17e7 до 2.30e7 Па.

В дополнение к действующим силовым факторам введем действие внутреннего давления 0,1 МПа. Учитывая, что внутреннее давление, независимо от наличия в баке жидкости, передается на все внутренние поверхности, вводим новое статическое граничное условие. В COSMOSWorks усилия, в отличие от перемещений, аддитивны. Соответствующие эквивалентные напряжения показаны на рис. 3.23. Слева — те, которые действуют на наружной поверхности бака, справа — на внутренней. Налицо существенная разница величин, в частности, в зоне наибольшей концентрации. Она переместилась из зоны опор на торовые участки оболочки.

Одним из критериев применимости реализованного в программе линейного анализа является величина максимального прогиба оболочки. При данных нагрузках наибольшее перемещение равно 0,42 мм. Прогиб, соответственно, еще меньше.

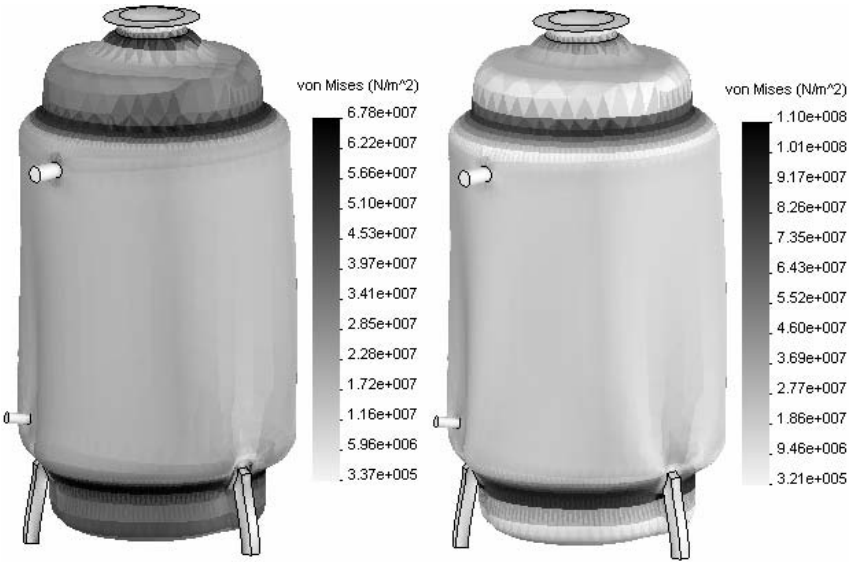


Рис. 3.23. Эквивалентные напряжения на наружной и внутренних поверхностях оболочки

И последнее. Все напряжения были визуализированы в режиме поэлементного осреднения. Это связано с тем, что в месте примыкания опор к баку осреднение на общих кромках некорректно из-за наличия Т-образного стыка.

Расчет на устойчивость. Если попытаться определить критические нагрузки потери устойчивости для конструкции под действием как собственного веса, так и веса жидкости, то результат будет неутешителен. Система выводит отрицательные величины коэффициентов нагрузки. Физический смысл этого следующий: конструкция потеряет устойчивость под влиянием усилий, действующих в противоположном направлении, которые в соответствующее число раз больше тех, которые назначены. То есть программа предлагает решение для бака при сжатии. Оно нас, по понятным причинам, не интересует. Список коэффициентов нагрузки, начинаясь с наибольшего по модулю отрицательного числа, содержит далее увеличивающиеся величины. А поскольку программа допускает расчет только первых двадцати собственных форм, то достичь положительной величины не удается. Попытаемся исключить из рассмотрения давление, оставив собственный вес бака. Получим набор критических сил, наименьшая из которых (соответствующий ей **Коэффициент нагрузки** (Load Factor) равен 795) порождает форму потери устойчивости, показанную на рис. 3.24. Как и в случае со статическим анализом, слабым местом является контур утолщения. Однако большая величина коэффициента говорит о том, что потеря несущей способности будет обусловлена разрушением материала в зоне сварного соединения без потери устойчивости.



Рис. 3.24. Форма потери устойчивости, соответствующая минимальной критической силе

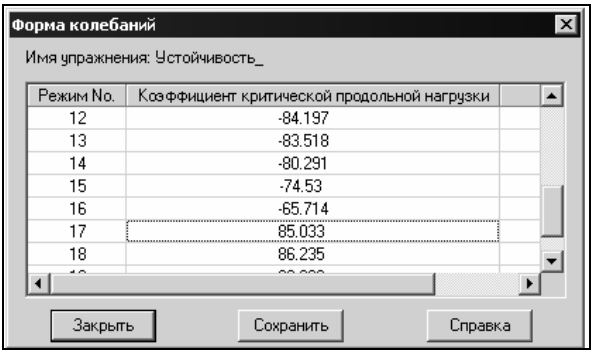


Рис. 3.25. Список множителей нагрузки

В качестве паллиативного решения, позволяющего получить оценку устойчивости для бака с жидкостью, можно попробовать ограничить зону приложения давления днищем бака и зоной его перехода в цилиндр (не отказываясь, конечно, от действия собственного веса конструкции). Эти граничные условия приведены на рис. 3.19. Там же показана форма потери устойчивости, соответствующая наименьшему из положительных коэффициентов нагрузки. Его можно идентифицировать в таблице **Форма колебаний** (Mode Shape), доступ к которой обеспечивается по команде **Список форм колебаний** (List Mode Shape) из контекстного меню пиктограммы **Деформация** (Deformation). Фрагмент таблицы показан на рис. 3.25.

Замечание

Здесь имеет место некорректный перевод терминов: Mode Shape — Форма моды, List Mode Shape — Список мод.

К полученному результату нужно относиться с достаточной осторожностью: использовав упрощение в виде ликвидации переменного давления на стенки бака, мы внесли принципиальные изменения в модель объекта. Как известно, наличие внутреннего давления значительно увеличивает несущую способность тонкостенных конструкций по критерию потери устойчивости. Поэтому величину критической силы, вычисленную посредством коэффициента из таблицы **Форма колебаний**, можно считать нижней ее оценкой.

3.6. Моделирование резьбового соединения

В ходе расчета бака был выделен узел, состоящий из фланца, крышки и крепежа. Его расчет по оболочечной модели мало приемлем. Здесь имеет место трехмерное напряженное состояние, сопровождаемое весьма широким кругом явлений. Попытка справиться с ними прямой имитацией всех факторов — геометрических, статических, кинематических — весьма малопродуктивна, а для несколько более сложных конструкций — неосуществима. Последовательно рассмотрим компоненты проблемы, чтобы в конце выйти на интегральное решение.

3.6.1. Постановка задачи

Проектирование и расчет узлов с резьбовыми соединениями — предмет повседневной деятельности конструктора. При переходе к использованию численных методов анализа проблемы адекватного моделирования и интерпретации результатов не снимаются автоматически и, более того, возникают весьма специфические моменты, требующие пристального внимания. Назначим стратегическую цель — моделирование узла с резьбовым соединением. Оно состоит из соединяемых деталей: фланца и крышки, прокладки между ними и крепежа. В конкретной ситуации крышка воспринимает внутреннее давление, обеспечивая герметичность изделия. Договоримся, что в соединении будет присутствовать весь спектр значимых условий: контактная задача с переменной границей контакта, предварительная затяжка крепежа, разнообразные варианты нагружения. Постараемся также увидеть эти факторы в рафинированном виде, т. е. расчленив задачу (и, разумеется, методику) на составляющие. Это будет оправданно при наличии в конструкции нескольких соединений, когда расчет "в лоб" с попыткой одновременно и "реалистично" воспроизвести все аспекты задачи наталкиваются на непреодолимые вычислительные ограничения.

3.6.2. Анализ

На первом этапе рассмотрим резьбовое соединение при растяжении. Первая из условностей — пусть резьба будет образована не винтовыми поверхностями, а массивом колец с сечением, эквивалентным профилю резьбы. С учетом достаточно малого угла подъема винтовой линии эта аппроксимация не слишком сильно влияет на прочность и еще меньше — на жесткость. Рассматривать будем необходимый минимум деталей: болт (ограничившись его стержнем), гайку (пусть она будет круглой — на фоне остальных условностей и упрощений это, скажем прямо, не самое серьезное) и пластину (рис. 3.26). Учитывая осевую симметрию, оставим для рассмотрения сектор, к граням

которого (для каждой из деталей) приложим граничное условие — скольжение (равенство нулю нормального перемещения). Высота гайки взята достаточно высокой, чтобы иметь более полную информацию о распределении нагрузки по виткам. На результат будет существенно влиять толщина соединяемых деталей, поэтому не будем трактовать полученные результаты как окончательные. В то же время размеры пластины в плане принимаем достаточно большими, чтобы отсечь зону влияния краевых эффектов. Также, подобно всем задачам данной главы, расчет будет производиться в предположении линейной упругости материалов. Мы акцентируем внимание на этом факте, поскольку концентрация напряжений во впадинах резьбы такова, что при действии рабочих нагрузок там могут возникать локальные пластические деформации. Факт их наличия не будет учитываться в расчете. Более того, вопрос о том, что происходит в зоне впадин, заслуживает специального рассмотрения. В данной же задаче мы сосредоточимся на анализе соединения применительно к последующему расчету узлов.

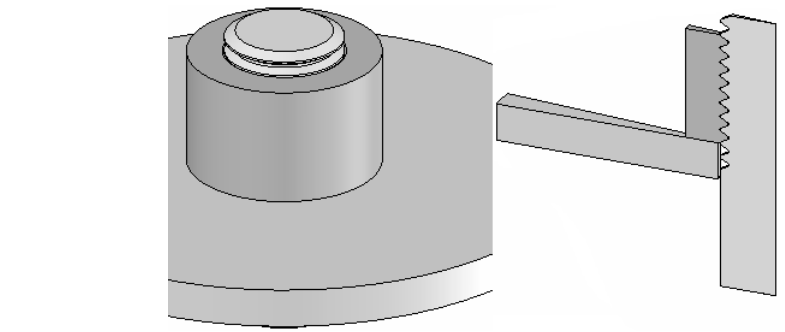


Рис. 3.26. Геометрическая модель соединения и расчетная область

3.6.3. Решение

Подготовка исходных данных о свойствах материалов. Если материал крепежа и присоединяемой детали один и тот же, то результат (распределение напряжений в крепеже) зависит исключительно от коэффициента Пуассона. Поэтому можно в качестве исходных данных взять характеристики любой стали.

Подготовка расчетной модели. Геометрическая модель является сектором от целого объема, имеющего периметром полную окружность. Угловой размер сектора выбран достаточно малым, чтобы обеспечить минимальное число конечных элементов в окружном направлении. В то же время, чем он меньше, тем больше степень вырождения элементов, примыкающих к оси и тем ниже вычислительная устойчивость процедуры решения. Сетка конечных

элементов показана на рис. 3.27. Введены **Элементы управления** (Mesh Control), позволяющие уплотнить сетку вблизи впадин резьбы. Для получения адекватной картины напряжений в этих зонах такой плотности, вообще говоря, недостаточно (ее следовало бы, например, увеличить в зоне первого, самого нагруженного витка резьбы). Однако, имея в виду использование результатов, прежде всего, для оценки податливости узла, сетку уплотняем на всех витках одинаково.

Граничные условия, имитирующие симметрию, как упоминалось, заключаются в равенстве нулю нормальных перемещений на плоскостях, проходящих через ось симметрии. Подвижность в осевом направлении фиксируется назначением скольжения на нижней грани присоединяемой детали (рис. 3.28). В качестве нагрузки будем прикладывать равномерно распределенное усилие 120 МПа на нижней части стержня болта нормально поверхности. Этот способ выбран потому, что если потребуется изменить угол сектора, то общая нагрузка (без учета симметрии) изменится пропорционально. Кроме того, в большинстве методик принято нормировать усилие затяжки болта (в предположении однородного растяжения вне пределов резьбы) относительно предела текучести материала. При таком способе приложения нагрузки сделать это нетрудно.

Замечание

В COSMOSWorks 2005 введен специальный тип кинематических граничных условий **Симметрия**. Однако ни на математическую модель, ни на результат это никак не влияет.

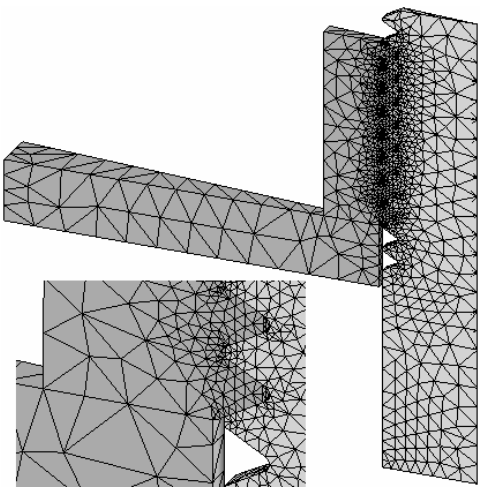


Рис. 3.27. Сетка конечных элементов и ее фрагмент в зоне резьбы

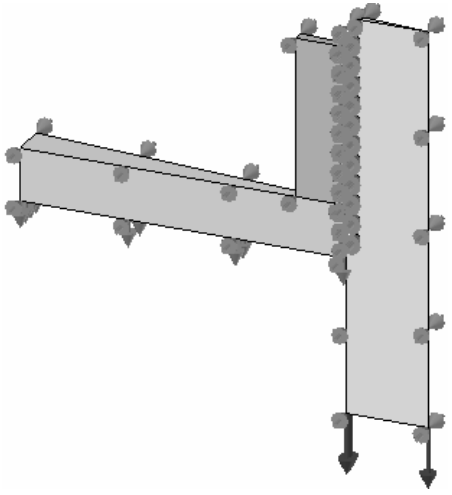


Рис. 3.28. Кинематические граничные условия на присоединяемой детали и нагрузка

Граничные условия в зоне соприкосновения резьбовых поверхностей — скольжение с потенциальным выходом из контакта. Такая же ситуация в зоне контакта гайки и пластины. Поэтому назначаем контактное граничное условие **Узел к узлу** (Node to Node) условием по умолчанию. Еще один фактор, требующий внимания, — наличие трения в конструкции. В связи с меньшей вычислительной трудоемкостью, на первом этапе будем выполнять расчет без трения.

Вычисления и интерпретация результатов. Картина эквивалентных напряжений на фоне деформированного вида (перемещения масштабированы) показана на рис. 3.29. Осевые напряжения приведены на рис. 3.30. На этой иллюстрации отображен не весь диапазон величин.

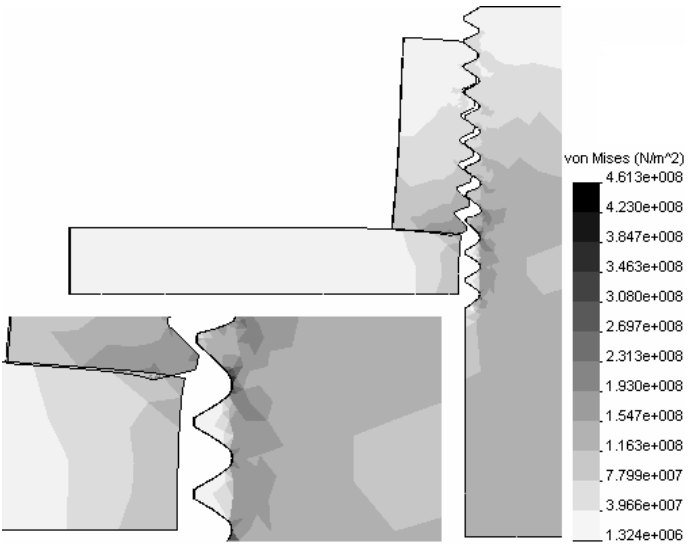


Рис. 3.29. Эквивалентные напряжения на фоне деформированного вида

Попытаемся представить информацию о распределении напряжений по виткам резьбы в более традиционном виде. Для этого нужно иметь доступ к силе реакции на контактных поверхностях. Получить величину контактной силы в направлении можно командой **Сила контакта/трения** (Contact/Friction Force). Она подается из контекстного меню пиктограммы **Напряжение** (Stress). В появившейся панели (рис. 3.31) следует выбрать, что будет отображаться (нормальная сила или сила трения), активизировать интересующую грань, после чего нажать кнопку **Обновить** (Update). Данная операция возможна, только если перед расчетом была активизирована опция **Сохранить временные базы данных** (Keep temporary database files) из вкладки **Результаты** (Results) панели **Настройки** (Preferences). Следует учитывать, что

эти базы имеют значительный размер и, помимо данной ситуации, бесполезны.

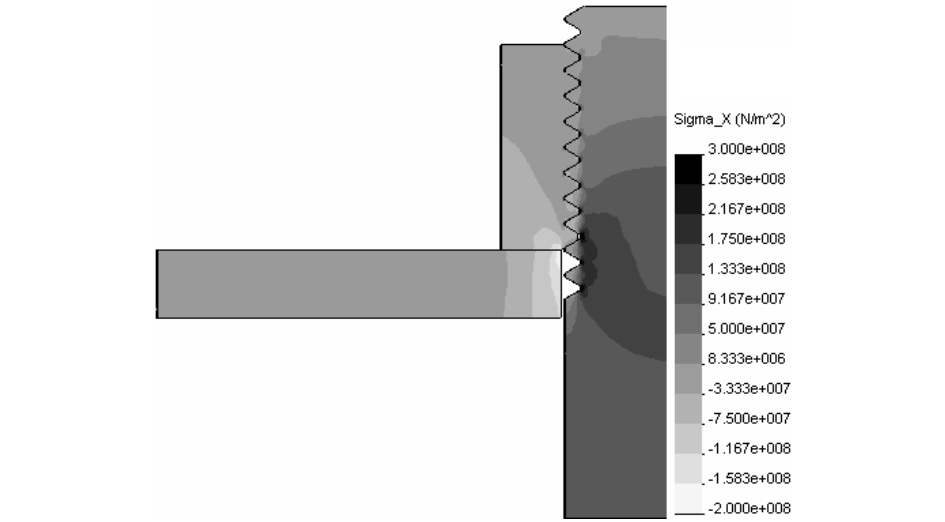


Рис. 3.30. Осевые напряжения в выделенном интервале

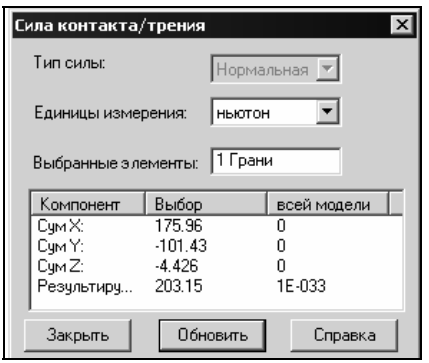


Рис. 3.31. Панель **Сила контакта/трения**

Последовательно отображая величину силы контакта для витков, перенесем ее значения (они соответствуют параметру Сум X) на графике рис. 3.32. В процессе переноса промасштабируем значения относительно результирующей силы (ее можно получить на нижнем торце стержня) и умножим на 100 %. В результате получим график распределения нагрузки по виткам резьбы в традиционном его виде. Внешне результат вполне правдоподобен. Попытаемся его сравнить с известной по учебникам Деталей машин кривой Жуковского. Налицо определенное различие, заключающееся в том, что первые витки в аналитическом решении воспринимают больше нагрузки. Можно

предположить, что основная причина этого — неучет податливости тела гайки в решении по формулам. Есть и еще ряд принципиальных моментов, которые численная модель воспроизводит, а приближенная аналитическая — игнорирует: имитация скольжения деталей по поверхностям витков, неоднородное распределение деформаций по диаметру стержня и т. д. Поэтому численная модель дает более корректные результаты.

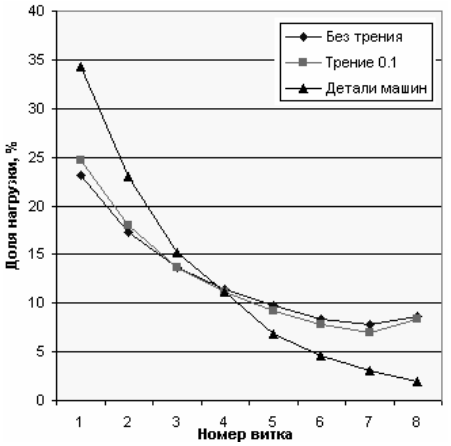


Рис. 3.32. Распределение нагрузки по виткам

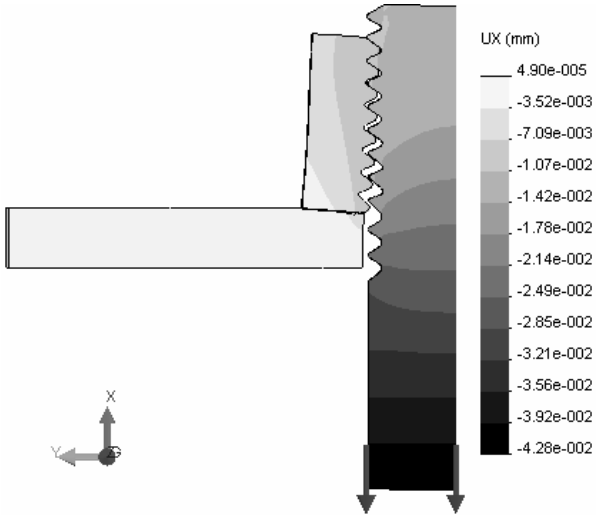


Рис. 3.33. Вертикальное смещение

Исследуем еще один фактор, влияющий на состояние объекта, — трение в резьбе. На иллюстрации приведены две кривых: без трения и с трением при

коэффициенте трения 0,1. Налицо перераспределение усилий в сторону увеличения доли первых витков. К сожалению, увеличение коэффициента трения порождает ухудшение сходимости решения, и никакие ухищрения типа смены решателя, активизация опции **Использовать податливую пружину для стабилизации модели** (Use soft spring to stabilize model) и т. д. не приносят желаемого результата.

Для последующего анализа нам, собственно, нужна только одна величина — вертикальное смещение стержня болта в нагруженном сечении. Соответствующая иллюстрация приведена на рис. 3.33. Для конкретной конфигурации вертикальное перемещение нижнего торца составляет 4.28e-2 мм.

3.6.4. Упрощенная модель резьбового соединения

Использованная на предыдущем этапе численная модель не обладает абсолютной полнотой, но и при такой степени подробности требует определенных вычислительных ресурсов. Понятно, что даже для нескольких болтов при отсутствии симметрии объем задачи при решении на персональном компьютере становится неприемлемым. Необходимо создать упрощенную модель резьбового соединения, не требующую решения контактной задачи (по крайней мере, в резьбе). Один из вариантов — имитация резьбы сплошной податливой втулкой, образующей с гайкой и стержнем монолитную систему. Основанием для этого является, во-первых, практически линейная зависимость перемещения торца от нагрузки, а во-вторых, достаточно малая величина перемещений (все это, разумеется, в реалистичном диапазоне нагрузок). Модель такого соединения представлена на рис. 3.34. На ней показаны и граничные условия (та их часть, которая не связана с имитацией симметрии), которые эквивалентны модели с "подлинной" резьбой.

Определенная степень свободы состоит в определении толщины и длины втулки. Мы принимаем, что толщина ограничена вершинами впадин резьбы. По длине же втулка равна длине резьбы. Последнее упрощение вносит определенную погрешность, порождая несколько более жесткую конструкцию, чем если бы втулка присутствовала только на общей части резьбы, а на других ее (резьбы) участках материал был бы просто удален. Более корректная прочностная аппроксимация, однако, отклоняет модель расчетную от модели конструкторской, в то время как втулка, "заполняющая" резьбу, вполне пристойно выглядит на конструкторской документации. Дополнительным оправданием является то, что данная модель имеет феноменологический характер, т. е. параметры подбираются на основе анализа интегральных характеристик — перемещений вне области резьбы.

Будем подбирать жесткость материала втулки так, чтобы вертикальные перемещения на конце резьбового стержня были равны тем, которые получены

для модели с резьбой. Для этого последовательно и пропорционально уменьшаем модули и упругости. Здесь можно было бы вникнуть в подробности, касающиеся того, какой материал "ближе" воспроизводит жесткость резьбы: изотропный или, может быть, цилиндрически ортотропный? Мы ограничимся анализом в рамках изотропии. Если уменьшить жесткость материала в 10 раз (рис. 3.35), то можно добиться принципиального сходства картины перемещений. Она показана на рис. 3.36 справа. Диаграмма слева отображает ситуацию, когда материалы крепежа и втулки эквивалентны. Усилия, соответственно, равны тем, которые прикладывались к узлу с резьбой. Налицо принципиальное отличие картины перемещений в крепеже и существенная разница максимальных перемещений (а это, фактически, показатель различия жесткости системы).

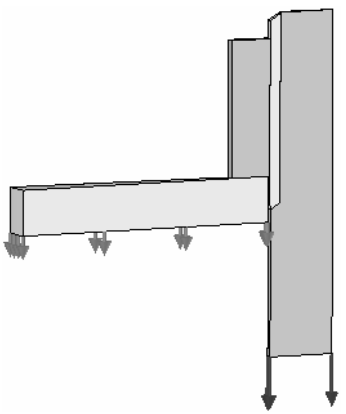


Рис. 3.34. Модель резьбового соединения с имитацией резьбы втулкой

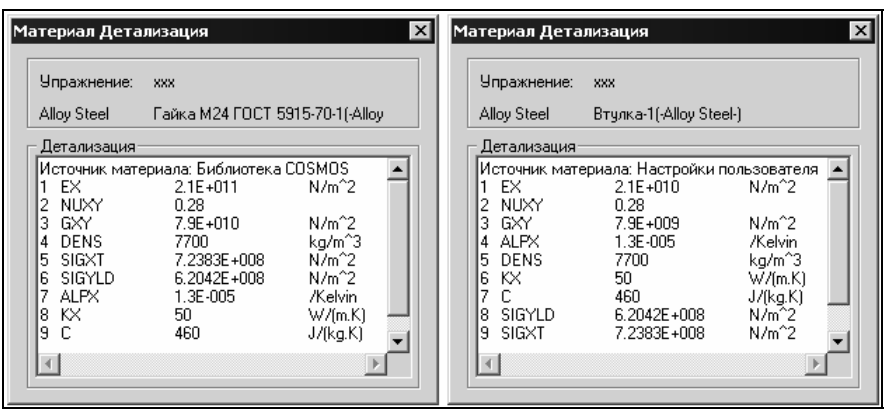


Рис. 3.35. Характеристики материалов крепежа и вспомогательной втулки

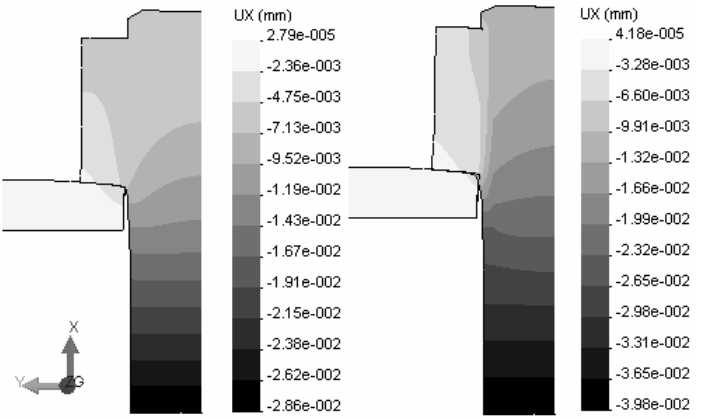


Рис. 3.36. Осевые перемещения моделей с жесткой и податливой втулками

Определенный интерес может представлять сравнение картин деформаций в "гомогенной" и "гетерогенной" моделях узла (рис. 3.37). В первом случае налицо значительная концентрация деформаций в зоне примыкания гайки к болту. Теоретически деформации там стремятся к бесконечности, что, в общем, отрицательно характеризует модель. Альтернативный вариант в значительной степени нивелирует проблему.

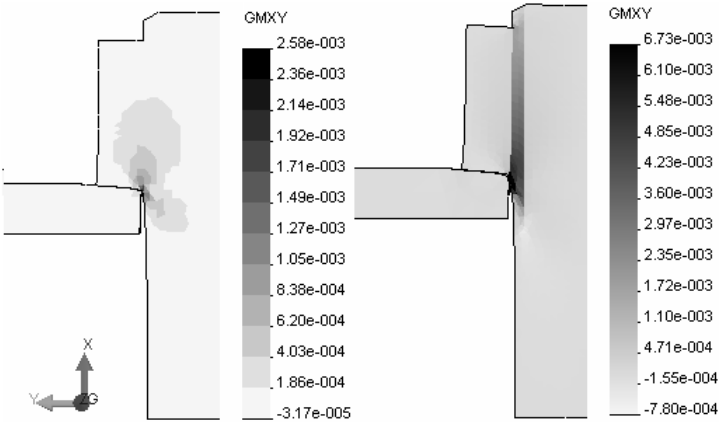


Рис. 3.37. Деформации сдвига для моделей с жесткой и податливой втулками

Стоит привести не относящееся к теме замечание. Картины деформаций получены с использованием опции осреднения по элементам (Element stresses). Причина здесь та, что на границе контакта деталей с отличающейся жесткостью материалов деформации на границе почти всегда изменяются дискретно и, соответственно, их осреднение некорректно.

Замечание

В COSMOSWorks 2005 декларирована усовершенствованная функциональность при осреднении результатов на границе контакта

В заключение еще раз упомянем об источниках погрешностей (или неоднозначностей), присущих описанному подходу и не упомянутых в ходе решения. Как представляется, требует дополнительного анализа влияние высоты гайки, толщины соединяемых пластин, способа их взаимодействия (наличие трения, шайб, контргаек), а также параметров материала этих деталей. Опущены также ситуации, связанные с эксцентриситетом приложения нагрузки и присутствием сдвигающих компонентов силы. Существенный вопрос связан с влиянием плотности сетки конечных элементов на результат. В этой модели использовалась достаточно плотная сетка. Это, с одной стороны, позволило приблизить ее к модели с резьбой. Но, с другой стороны, обеспечить эквивалентную дискретизацию в реальных конструкциях не всегда возможно — там сетка, скорее всего, будет менее плотной, что повлияет на жесткость. Этот факт требует дополнительного изучения. Тем не менее предложить альтернативу, сочетающую удовлетворительную точность и приемлемые вычислительные затраты весьма затруднительно.

3.6.5. Имитация затяжки болта

Замечание

В версии 2005 года появилась возможность ввода виртуальных болтов, имеющих предварительную затяжку и обладающих податливостью. Они должны соединяться с имитацией резьбы в детали, к которой производится присоединение, или же опираться на виртуальную же шайбу. Затяжка болта может воспроизводиться как посредством назначения величины осевой силы (действующей в собранном состоянии), так и определением крутящего момента. Последний вариант предоставляет возможность учитывать трение. Программа рассчитывает усилия в болте с учетом реального контакта между соединяемыми деталями. Вызов данной функции осуществляется посредством команды **Жесткая связь | Болт** (Connectors | Bolt). Это, как представляется, не умаляет степень пользы данного раздела, поскольку использованные в данном материале приемы являются вполне универсальными.

В приведенных выше моделях натяг в соединении порождался непосредственным приложением силы (давления). Равносильный эффект имело бы действие заданного на торце стержня перемещения. Очевидно, что в реальных конструкциях, где детали стянуты болтом с гайкой, а также в шпилечных соединениях такими средствами достичь результата невозможно. Простейшим приемом может быть приложение к стержню болта и к торцу гайки разнонаправленных уравновешенных усилий (перемещений) при свободном взаимном скольжении гладких цилиндрических поверхностей крепежа. Этот вари-

ант, однако, исключает наличие обратной связи, когда усилия в соединении, воспринимающем нагрузки отрыва, порождают дополнительные нагрузки в болте. Если же назначать перемещения, то налицо противоположный эффект — разгрузка соединения не приводит к разгрузке болта.

Пожалуй, наиболее приемлемым вариантом является задание начальной деформации в крепеже. Единственным ее источником может быть начальная деформация стержня болта. В данном случае это должна быть деформация сжатия, приводящая (при наличии сопротивления со стороны деталей) к появлению растягивающих напряжений. В COSMOSWorks начальная деформация может порождаться тепловыми деформациями, других инструментов в COSMOSWorks версии до 2005 года (за исключением опции **Горячая посадка** (Shrink Fit) команды **Пара соприкасания** (Contact Pair)) для этого нет. Для решения задачи можно предложить два алгоритма. Первый: при имеющихся у материалов коэффициентах теплового расширения назначить деталям различные температуры, которые измеряются относительно температуры в исходном состоянии. В данной модели ее следует присвоить гайке и соединяемым пластинам. Болту же и вспомогательной втулке нужно назначить меньшую температуру. Это приведет к сокращению "холодных" деталей, что, в конечном счете, приведет к сжатию пластин. Непосредственно в статическом анализе или расчете на устойчивость температуру можно назначить для компонента в целом посредством команды **Температура** (Temperature), которая присваивается аналогично другим граничным условиям из контекстного меню пиктограммы **Нагрузка/Ограничение** в Дереве конструирования COSMOSWorks соответствующего анализа. Этот способ, однако, появился только в последних версиях программы.

Другой алгоритм — изменить коэффициенты линейного теплового расширения деталей, являющихся "субъектами" действия деформаций натяга, имитируемого термоупругостью. Для реализации этого следует, например, уменьшить коэффициенты расширения всех деталей, кроме болта и втулки, в несколько тысяч раз (присваивать ноль не рекомендуется во избежание вычислительных проблем). Соответствующие характеристики для гайки приведены на рис. 3.38.

Параметром, определяющим величину натяга, является температура в отсутствие деформаций. Она назначается в меню **Статический** (Static) соответствующего анализа по команде **Свойства** (Properties) в контекстном меню соответствующего анализа. Содержимое вкладки, отвечающей за тепловые эффекты структурного анализа, показано на рис. 3.39. Введено однородное охлаждение системы с 0 до –100 °C.

Геометрическая модель соединения, способная моделировать эффект затяжки, показана на рис. 3.40. По сравнению с использованной для аппроксима-

ции резьбы (см. рис. 3.26) она дополнена гайкой (если более конкретно, то, с учетом симметрии, — сектором, оставшимся от гайки), а также еще одной пластиной (для скрепления двух пластин, собственно, и предназначено соединение). На том же рисунке приведена конечно-элементая дискретизация модели. Посредством **Элементов управления** (Mesh Controls) сетка уплотнена в зонах предполагаемой концентрации напряжений, а также в месте максимальной податливости, которая имеет место во вспомогательной втулке.

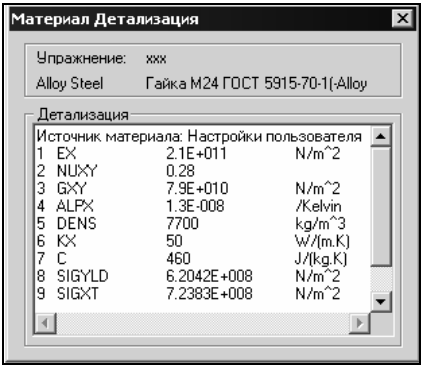


Рис. 3.38. Характеристики материалов, не подвергающихся тепловому расширению

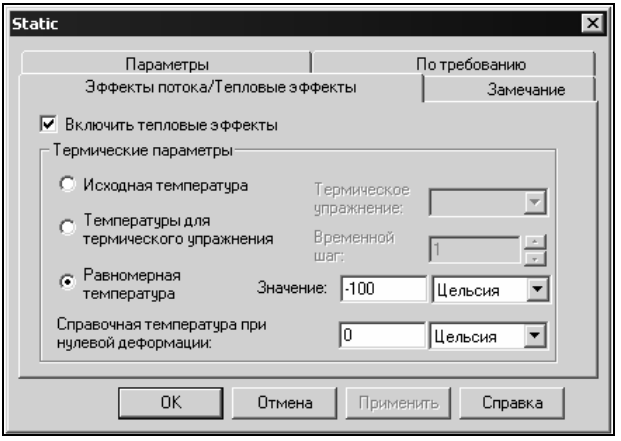


Рис. 3.39. Настройки вкладки **Эффекты потока/Тепловые эффекты** для реализации начальных деформаций

По сравнению с предыдущей задачей, внесены определенные изменения в граничные условия:

- исключено действующее стержень болта усилие;
- между двумя пластинами назначено граничное условие **Узел к узлу** (Node to Node);

- для исключения смещения системы как жесткого целого введена фиксация вершины в центре головки болта (рис. 3.41).

  Вопрос о влиянии этой заделки на результат мы обсудим далее.

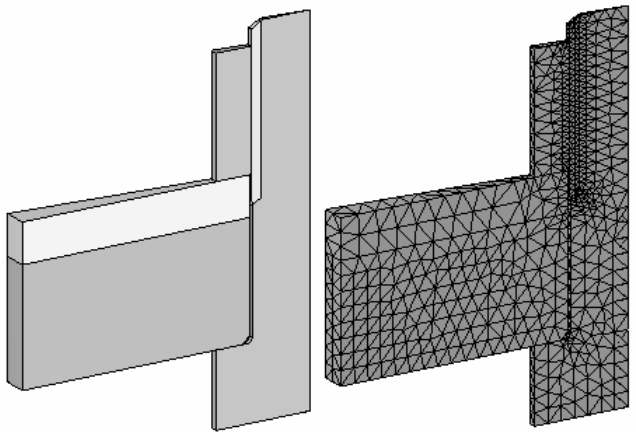


Рис. 3.40. Геометрическая модель и сетка конечных элементов для анализа влияния затяжки болта

Картина эквивалентных напряжений, порождаемых тепловой деформацией болта, показана на рис. 3.41. Настройки отображения таковы, что деформации показаны в утрированном виде. Тем не менее налицо раскрытие стыка по периметру деталей.

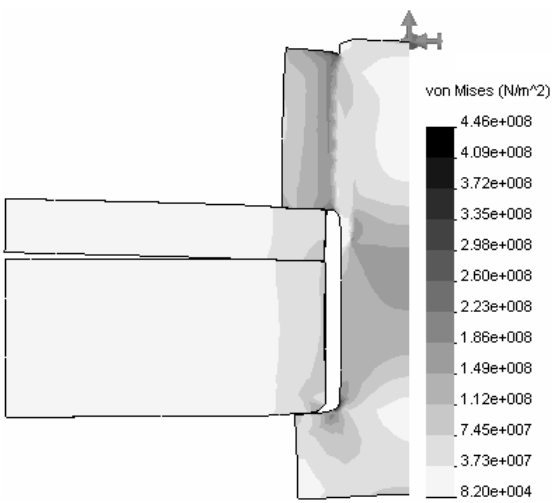


Рис. 3.41. Эквивалентные напряжения в узле с начальными деформациями

На первом этапе выделим зоны, результаты в которых могут иметь систематическую погрешность относительно реальной ситуации. Ключевой здесь является область между втулкой и гайкой, а также примыкающая к ним зона в болте. Здесь наблюдается "беспочвенная", на первый взгляд, концентрация эквивалентных напряжений. Визуально она проявляется в виде набора вертикальных изолиний и достигает 2e8 Па (это, разумеется, вне областей "законной" концентрации напряжений, располагающихся в углах возле краев и втулки). Такой величиной пренебречь невозможно. Выскажем догадку, что это происходит из-за того, что "усадке" болта в радиальном направлении препятствует достаточно жесткая гайка. Гипотезу будем считать доказанной, если похожая картина будет наблюдаться на диаграмме радиальных напряжений. Она приведена на рис. 3.42. Здесь область концентрации распространяется и в направлении к оси болта. Отметим, что расчет выполнялся без учета трения. Понятно, что в противном случае радиальные напряжения были бы еще выше из-за того, что трение препятствовало бы радиальным смещениям в теле гайки.

Замечание

Оценить степень влияния "паразитной" поперечной деформации в "чистом" виде можно, разумеется, рассчитав болт с гайкой без соединяемых деталей.

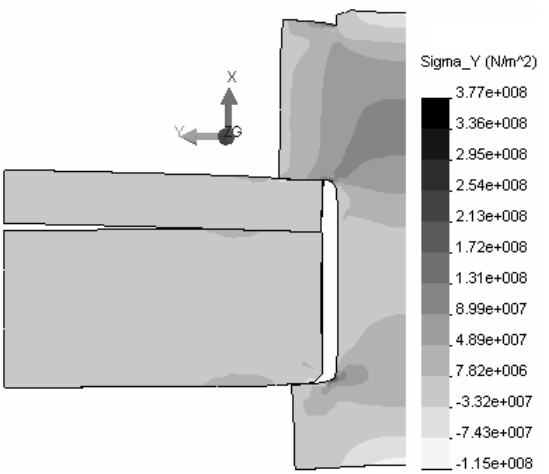


Рис. 3.42. Радиальные напряжения в узле с начальными деформациями

Способ борьбы с этим — придание термоупругим параметрам болта и втулки свойств трансверсальной анизотропии. Учитывая расположение системы координат, где плоскость YZ перпендикулярна оси болта, коэффициенты теплового расширения в этой плоскости болта и втулки должны быть равны соответствующим параметрам других деталей. Для назначения характеристик

анизотропного материала следует в окне **Материал** (Material) установить для поля **Тип** (Type) группы параметров **Модель материала** (Material model) значение **Линейный Упругий Ортотропный** (Linear Elastic Orthotropic), после чего заполнить строки, соответствующие характеристикам в направлениях, отличных от оси X (рис. 3.43). Для характеристик упругости все направления эквивалентны. Для коэффициентов же температурного расширения анизотропия должна присутствовать.

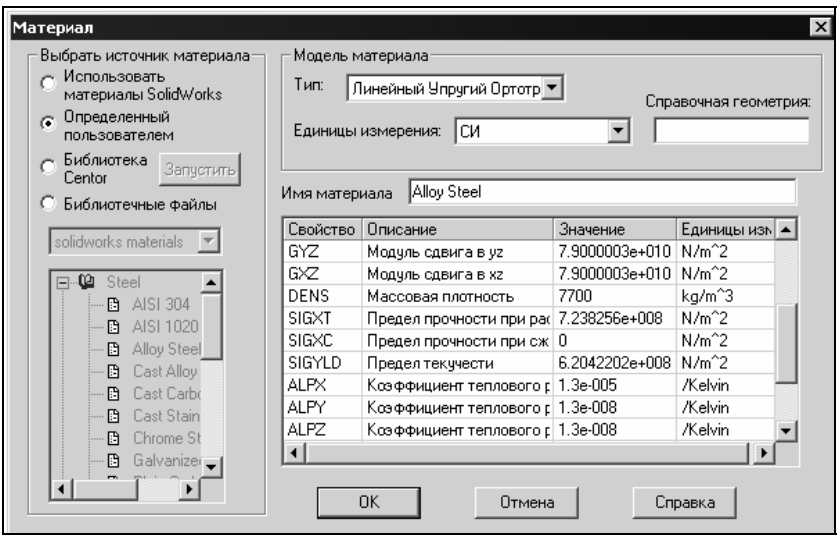


Рис. 3.43. Назначение характеристик ортотропного материала

Выполним расчет с новыми свойствами материалов. Радиальные напряжения уменьшились в 4—5 раз (рис. 3.44). Эквивалентные же напряжения, существенно уменьшившись в области резьбы, в стержне практически сохранили как характер распределения, так и величину (рис. 3.45). Перемещения, кстати, также изменились незначительно (следовательно, жесткость конструкции осталась постоянной). Это говорит о том, что, если оценивать работоспособность соединения по эквивалентным напряжениям в стержне вне зоны резьбы, то вполне можно ограничиться изотропной "усадкой".

Таким образом, получена модель, которая при достаточно скромных запросах к вычислительным ресурсам должна помочь при расчете реальных изделий. В примерах мы принимали разницу температур постоянной и равной 100 градусам. Для данной геометрии и жесткости материалов это дает эквивалентные напряжения в стержне, равные 1.2 ...1.4e8 Па. Это составляет от 20 до 70 % предела текучести конструкционных сталей. С учетом того, что затяжка болтов нормируется в долях от этой величины, получено более-менее реальное стартовое приближение, которое можно применять в расчетах. Про-

должать анализ упрощенной модели, варьируя геометрию соединяемых деталей, параметры крепежа и т. д., нерационально. Это следует делать на реальной конструкции, подбирая усилие затяжки (температуру болта), так, чтобы результат при отсутствии внешних сил соответствовал техническим требованиям к соединению. Подобный пример будет рассмотрен далее.

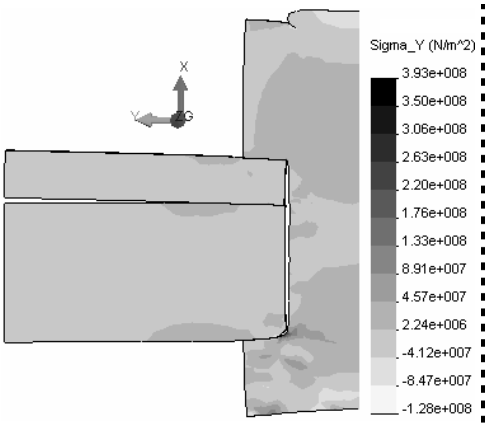


Рис. 3.44. Радиальные напряжения в узле с анизотропным болтом

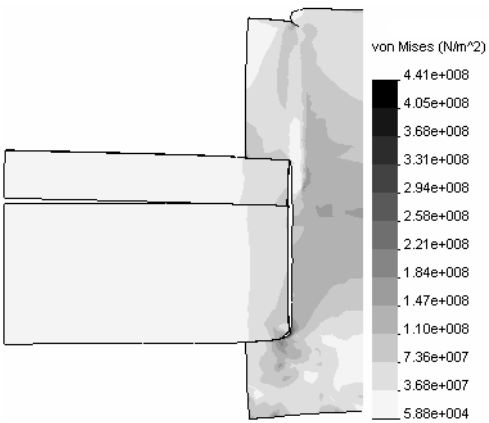


Рис. 3.45. Эквивалентные напряжения в узле с анизотропным болтом

Напоследок еще несколько замечаний. Первое касается последствий ввода заделки в точке (см. рис. 3.41), а фактически, в единственном узле сетки конечных элементов. Здесь имеем тот редкий случай, когда это является вполне корректным. На систему не действуют внешние силы, поэтому ввод ограничений в точке, лежащей на оси симметрии, не способен повлиять на напряженное состояние (ни один из компонентов напряжений в этой зоне не изменяется), а действует он исключительно как стабилизирующий фактор в процедуре решения системы уравнений. Упоминания заслуживает ситуация, связанная с влиянием усилий, действующих при затяжке резьбы крутящим моментом. Моделировать их одновременно с затяжкой болта непросто. Здесь, по всей видимости, модель, в которой винтовая резьба моделировалась массивом колец, продемонстрировала бы непригодность. Также определенную проверку прошла бы функциональность программы, связанная со способностью решать задачи с большими перемещениями совместно с действием трения. Задача, по сути, превратилась бы в нелинейную. COSMOSWorks в версии до 2005 года мало пригоден для таких проблем.

Замечание

В COSMOSWorks версии 2005 года опция **Использовать податливую пружину**... (Use soft spring...) функциональна в контактной задаче с переменной гра-

ницей контакта. Однако использованный здесь способ фиксации перемещений модели как жесткого целого более эффективен.

Замечание

В COSMOSWorks версии 2005 года виртуальный болт может быть нагружен крутящим моментом.

В ходе расчета конфигураций как с "подлинной" резьбой, так и с ее имитаторами мы сознательно ограничивались исследованием вопроса о подборе эквивалентной жесткости соединения так, чтобы упрощенная модель была пригодна для использования в задачах, где резьбовое соединение есть только часть более сложной конструкции. Вопросы, связанные с оценкой прочности самого узла, являются темой специального анализа, где вопросы адекватного моделирования геометрии, условий симметрии, подбора плотности сетки, назначения граничных условий, воспроизводящих широкий спектр расчетных ситуаций, должны рассматриваться с несколько иными акцентами.

3.7. Проектирование фланца

В этом разделе мы будем использовать полученные выше аппроксимации резьбовых соединений: упрощенное моделирование резьбы и имитацию затяжки посредством начальных тепловых деформаций для расчета узла сосуда давления.

3.7.1. Постановка задачи

Рассмотрим задачу проектирования фланца и крышки сосуда давления (рис. 3.46). Крепление крышки к фланцу бака осуществляется болтами с гайками. Используются шайбы, расположенные между крышкой и головками болтов, а также между фланцем и гайками. Анализировать будем простейшую конфигурацию, когда крышка имеет постоянную толщину, что никоим образом не упрощает методическую сторону проблемы. Цель исследования — статический расчет узла в упругой постановке с подбором параметров соединения для удовлетворения требованию нераскрываемости при действии внутреннего давления. Фланцевое соединение является частью конструкции бака, поэтому будем использовать его геометрическую модель в качестве заготовки. Понятно, что анализ соединения требует расчета по пространственной модели, а бак адекватно описывается оболочечной. Поэтому необходимо в баке выделить ту часть, которая "существенно" влияет на состояние фланца и оставить ее в модели. Пусть это будет торовая часть, а также цилиндр, примыкающий к фланцу. Может быть, размер области весьма велик по сравнению с минимально необходимым. Однако, поскольку расчет является проектировочным, т. е. геометрия объектов будет меняться, то про-

гнозировать развитие ситуации затруднительно. Если более конкретно, то при малой толщине крышки и фланца влияние деформации бака на состояние соединения более значимо. Если же узел становится более жестким, то можно "отбрасывать" бóльшую часть конструкции. Также, поскольку заранее нельзя оценить степень влияния элементов крепежа на результат, оставим в модели все объекты: прокладку и шайбы.

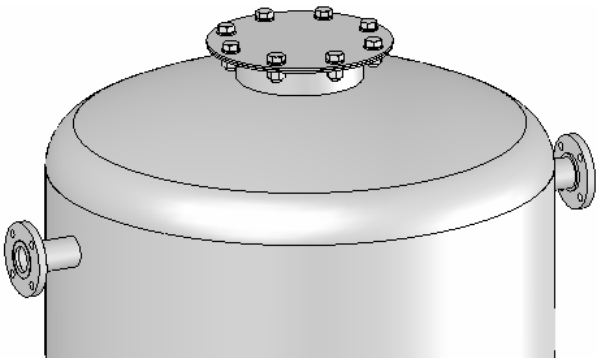


Рис. 3.46. Конструкция фланца

3.7.2. Анализ

Будем анализировать простейшую конфигурацию, в которой крышка имеет постоянную толщину. Задача состоит в том, чтобы подобрать толщину крышки и (или) фланца так, чтобы обеспечить условие нераскрытия соединения под действием внутреннего давления 1 МПа. Эта проблема требует решения пространственной контактной задачи теории упругости. Поэтому будем использовать твердотельную модель SolidWorks. Она имеет набор плоскостей симметрии, проходящих через вертикальную ось. Первое их подмножество определяется осями крепежа, те, которые принадлежат ко второму, являются биссекторными по отношению к предыдущим. Таким образом, если болтовых соединений 12, то рассчитывать можно 1/24 часть.

Рассмотрим факторы, определяющие функционирование узла:

- *геометрия объектов* — что касается бака, то варьировать можно толщину фланца и крышки, число болтов, а также размеры крепежа (диаметр болтов и размеры шайб);
- *взаимодействие деталей конструкции* — в общем случае ни одна пара деталей в узле не образует монолитного соединения, в силу чего необходимо решать контактную задачу с переменной границей. Ситуация несколько упрощается в связи с тем, что все контактные граничные условия едины: начальное состояние площадки контакта известно, а после прило-

жения нагрузки поверхности могут выходить из контакта. Этот же тип граничных условий будет имитировать возможный сдвиг компонентов: прокладки относительно бака. Если же появляются потенциально подвижные объекты, то следует сосредоточиться на подборе адекватных граничных условий, которые, с одной стороны, позволяют воспроизвести смещение деталей, а с другой — обеспечить устойчивость вычислительного процесса;

- *болтовое соединение* — в данной задаче крайне актуально использование адекватной модели болтового соединения. Это значит, что эффекты предварительного натяжения, а также снижения жесткости в зоне, где располагается резьба, должны имитироваться с максимальной тщательностью. В конкретном примере эти факторы по значимости равноценны геометрическим характеристикам деталей;
- *геометрия и материал деталей* — здесь, учитывая перспективу решения контактной задачи, важно максимально сократить размерность задачи. Для этого следует проанализировать влияние всевозможных конструктивных элементов: фасок, скруглений и т. д.

3.7.3. Решение

Подготовка исходных данных о свойствах материалов. В данной задаче для крышки и бака выбираем одну из сталей — жесткость их приблизительно одинакова. Другие типы материалов следует применять более осторожно, т. к. в модели будет присутствовать втулка, характеристики которой определялись при взаимодействии ее с крепежом, также имеющим характеристики упругости, соответствующие стали. Прочность можно оценить, сравнивая эквивалентные напряжения с пределом текучести стали конкретной марки. Также, для имитации затяжки болта, необходимо использовать функциональность термоупругого анализа. Поэтому назначаем коэффициент термического расширения всех компонентов, за исключением болта и втулки, равным 1/1000 от исходных характеристик материалов (рис. 3.47). Это соотношение, с одной стороны, обеспечит достаточную устойчивость вычислительного процесса, а с другой — приемлемую величину погрешности.

При создании расчетной модели появляется еще один тип материала, используемый в имитации резьбового соединения. Он необходим для формирования втулки, заполняющей зону, которая занята резьбой, и должна иметь податливость, обеспечивающую идентичность перемещения болта в модели с "реальной" резьбой и с ее расчетным вариантом. Соответствующие характеристики показаны на рис. 3.48. Жесткость материала составляет 1/10 от жесткости материала других деталей, причем коэффициент теплового расширения взят таким же, как и у болта.

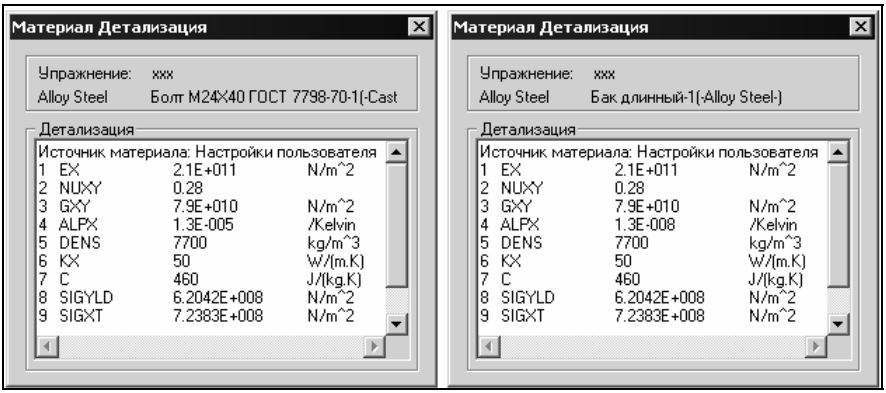


Рис. 3.47. Характеристики материала болта (слева) и бака (справа)

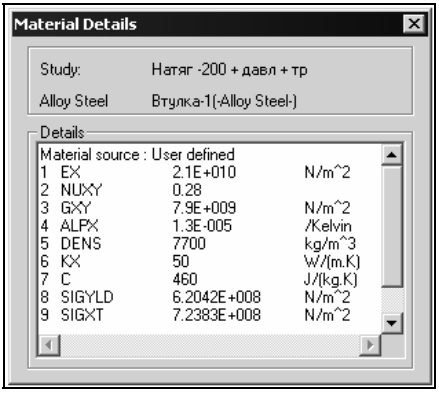


Рис. 3.48. Характеристики материала втулки, имитирующей резьбу

В конструкции присутствует прокладка. Ей мы назначаем характеристики жесткости, соответствующие меди. Здесь также наиболее значим модуль упругости, от величины которого зависит работоспособность изделия. Кроме того, учитывая неизбежность термоупругого анализа, нужно обеспечить совместность деформирования прокладки и других деталей (за исключением болта и втулки), поэтому назначаем коэффициент теплового расширения идентичным тому, который принят для материалов этих деталей.

Подготовка расчетной модели. Как упоминалось выше, в конструкции выделена часть, которая, предположительно, влияет на напряженно-деформированное состояние фланца и крышки. Для этого вырезаем из модели все, что находится ниже кромки, соединяющей нижнюю часть и верхнюю торовую поверхность. Следующий шаг — учет симметрии. Если в конструкции 8 болтов и нагрузки осесимметричны, то имеем право оставить 1/16 часть (рис. 3.49), приложив на гранях в секущих плоскостях граничные условия,

моделирующие симметрию. Здесь это — равенство нулю нормальных перемещений. К слову сказать, при реализации данной модели встретилась неоднозначность поведения COSMOSWorks при выполнении выреза в контексте сборки. Поэтому вырез выполняем в каждой детали отдельно на базе эскиза, сделанного в одной из деталей, что обеспечивает приемлемую степень ассоциативности.

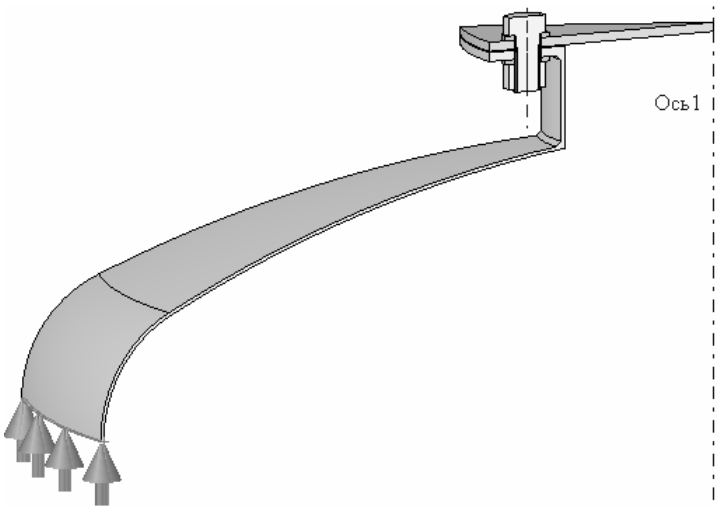


Рис. 3.49. Геометрическая модель с учетом симметрии и граничные условия в месте обрезки по горизонтали

Назначаем граничные условия, "компенсирующие" отрезанную часть бака. Учитывая практически безмоментный характер деформирования в зоне цилиндра, вполне корректным является ввод ограничений в виде равенства нулю нормального перемещения в плоскости сечения. Тем не менее в дальнейшем нужно проследить, как влияет эта заделка на напряженное состояние.

Следующий шаг — ограничение подвижности крепежа. В естественном состоянии это происходит за счет трения между деталями, обусловленного затяжкой крепежа. Из-за того, что расчет с трением увеличивает вычислительную трудоемкость, а подбор адекватной конструкции требует многократного анализа вариантов, используем иные "сдерживающие" факторы. Введем заделки, ограничивающие радиальное перемещение в вершинах деталей крепежа, попавших в плоскость симметрии (рис. 3.50). Эта операция, на первый взгляд, противоречит утверждениям о некорректности приложения граничных условий в точках и на кромках для трехмерного анализа. Данная задача является (в определенной степени) исключением. Дело здесь в том, что эти заделки не порождают "значимых" усилий в ограничиваемых этими заделками направлениях. Источников для этого может быть два: внешние усилия,

приложенные к детали, и реакции контактирующих с ней объектов. Первая составляющая отсутствует полностью. Реакции же, из-за отсутствия трения и в предположении того, что изменение формы в ходе деформирования не влияет на направление нагрузок, могут быть направлены только вертикально. В этой связи обратим внимание на то, что более одной точки на детали фиксировать в одном и том же направлении нельзя, поскольку заделка второй точки будет препятствовать повороту тела относительно горизонтальной оси. Это приведет к отклонению напряженно-деформированного состояния от реальной ситуации.

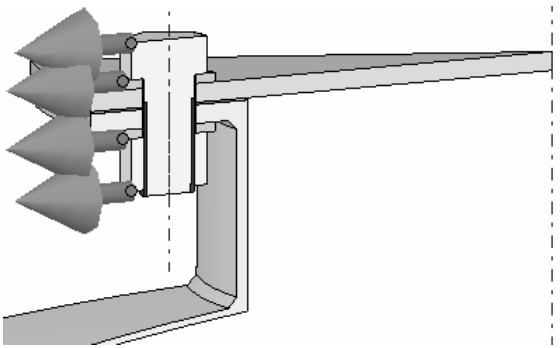


Рис. 3.50. Фрагмент модели с граничными условиями, фиксирующими радиальное смещение компонентов

При назначении силовых граничных условий в данной задаче можно пренебречь влиянием силы тяжести, ограничившись действием внутреннего давления. Здесь следует учесть тот факт, что внутренняя поверхность крышки является непрерывной, в то время как давление действует только на участок, ограниченный снаружи прокладкой. Для локализации области используем команду SolidWorks **Линия разъема**, создавая эскиз, являющийся проекцией внутренней кромки прокладки, и проецируя его на поверхность крышки.

Построение сетки можно сопроводить следующими соображениями. Естественно, чем плотнее сетка, тем больше вероятность получения точных результатов. Здесь, однако, естественным препятствием является наличие различных по топологии компонентов: тонкостенного бака, "относительно" тонкостенных крышки и фланца бака. Проблема точности при аппроксимации бака интересует нас исключительно с позиции адекватного воспроизведения его жесткости как фактора, влияющего на состояние соединения. Для этого, в принципе, достаточно одного элемента второго порядка по толщине оболочки. Что же касается крышки и фланца, то, учитывая наличие нормальных к поверхности компонентов напряжений (как нормальных, так и — при учете трения — касательных), весьма желательно иметь сетку с не менее чем двумя конечными элементами по толщине. Так же следует разбить и гайку, по-

скольку она воспринимает сжимающие и касательные нагрузки. Втулка, имитирующая резьбу, и прокладка — весьма тонкие, поэтому уплотнение сетки для достижения двух слоев элементов по толщине будет сопровождаться катастрофическим ростом размерности (в следующей главе будет описан обходной прием, позволяющий сделать это с приемлемыми вычислительными затратами). Это вряд ли будет компенсировано адекватным повышением точности. Реализуя эти соображения, назначаем элементы управления на внутренней и внешней поверхностях бака, соответствующие меньшей плотности сетки (50 мм), относительно назначаемой по умолчанию (6 мм). Для крышки и гайки как деталей в целом назначаем плотность сетки — 4 мм. При этом в исходном варианте крышка имеет толщину 8 мм, а гайка — расстояние между гранью и внутренним отверстием — 6 мм. Результат построения сетки показан на рис. 3.51 и 3.52. Видно, что элемент управления, наложенный на

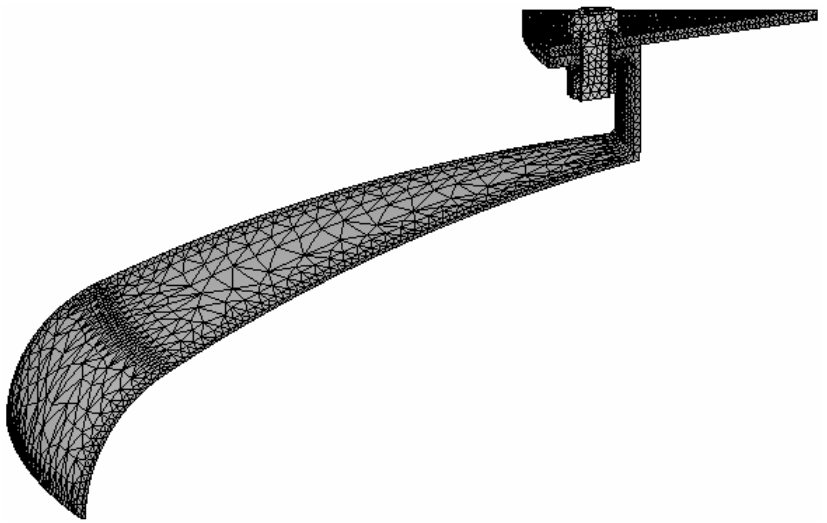


Рис. 3.51. Сетка объемных конечных элементов

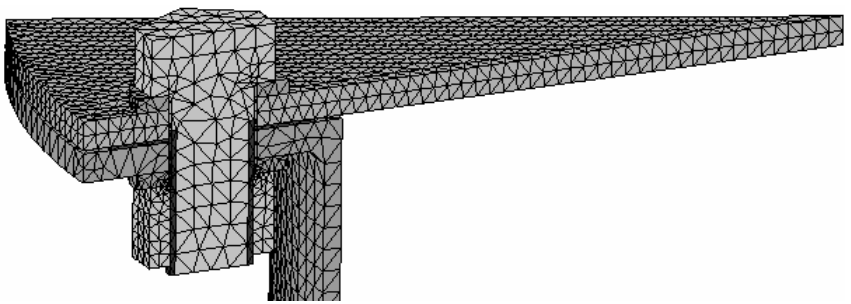


Рис. 3.52. Фрагмент сетки в зоне болтового соединения

поверхности бака, оказал недостаточное влияние на результат на кромках и ребрах. Этот момент можно было бы нивелировать, распространив действие элемента управления на кромки и грани. Не будем этого делать, учитывая то, что уплотнение сетки в зоне перехода от торовой к сферической поверхности, вообще говоря, является полезным.

Как упоминалось, практически все детали контактируют по площадкам, имея возможность скользить относительно друг друга или выходить из контакта. Поэтому в качестве контактного граничного условия по умолчанию назначаем для соприкасающихся граней условие **Узел к узлу** (Node to Node). Эта настройка выполняется в контекстном меню пиктограммы **Контакт/Зазоры** (Contact/Gaps) Менеджера COSMOSWorks. Втулка же, имитирующая податливую резьбу, находится с прилегающими к ней деталями (болтом и гайкой) в постоянном контакте (в разумном диапазоне нагрузок это соответствует реальной ситуации в резьбе). Поэтому в том же самом контекстном меню активизируем строку **Определить соприкосновение** (Define contact for components) для компонентов, вызывая панель **Компонент соприкосновения** (Contact Component). После этого выделяем в графическом окне втулку и назначаем тип граничных условий **Связанные** (Bonded). Поскольку назначения граничных условий для деталей имеет приоритет над граничными условиями по умолчанию, то в нашей задаче не нарушится контакт втулки с прилегающими к ней деталями при любой нагрузке.

И последний момент. Подбор предварительного натяга для болта. Как показано ранее, технически приемлемые значения: 100—200 МПа достигаются при уменьшении температуры болта и втулки относительно остальной конструкции на 70—100. При этом коэффициент теплового расширения (КТР) соответствует параметрам стали. Реализация модели затянутого соединения состоит, во-первых, в назначении КТР для всех деталей кроме болта с втулкой, равного примерно 1/1000 от того, которым материал обладал изначально, а во-вторых, в активизации решения термоупругой задачи. Последнее требует настройки соответствующих полей в панели **Эффекты потока/Тепловые эффекты** (Flow/Thermal Effects) (рис. 3.53). Здесь разность между величинами параметров **Температура при нулевой деформации** (Reference temperature at zero strain) и **Равномерная температура** (Uniform temperature) есть величина охлаждения болта, создающая эффект затяжки.

Настройка параметров вычислительного процесса. Степеней свободы для настройки в данной задаче немного. Рассмотрим их по порядку:

- *тип сетки конечных элементов* — для отработки размера сетки и проверки граничных условий достаточно линейных элементов. Для получения результатов и принятия решения об изменении конструкции необходима параболическая аппроксимация;

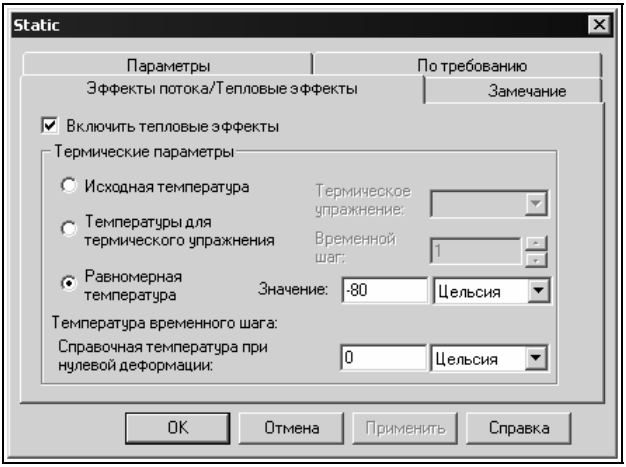


Рис. 3.53. Настройки для термоупругого расчета

- *тип решателя* — как показывает практика, нелинейные задачи (а контактная проблема относится к их числу) существенно эффективнее решаются прямыми методами. Причем это утверждение касается как времени счета, так и собственно возможности получить решение. Программа может прекратить выполнение с диагностикой о крайне медленной сходимости. Поэтому на вкладке **Параметры панели** | **Свойства** (Properties | Options), соответствующей данному **Упражнению** (Study), для переключателя **Решающая программа** (Solver) выбираем значение Direct Sparse;
- *учет трения* — на первом этапе задачу решаем без учета трения (соответствующие компенсаторы уже были введены). Поэтому опцию **Включить глобальное трение** (Include global friction) оставляем неактивной;
- *способ стабилизации модели* — принимаем во внимание наличие инструмента, подавляющего наличие мод движения модели или деталей как жесткого целого. Если "степень" стабилизации объектов будет недостаточна для устойчивого расчета, то можно будет сделать опцию **Использовать податливую пружину для стабилизации модели** (Use soft spring to stabilize model) активной и повторить расчет. При первой же попытке флажок у нее снимаем. Аналогичная ситуация может сложиться после того, как будет активизирована возможность моделировать трение и, естественно, будут сняты "искусственные" ограничения на подвижность крепежа. Задача может оказаться неустойчивой (причиной этому может быть как реальная подвижность деталей после нагружения, так и вычислительная неустойчивость, связанная с особенностями математического аппарата или компьютерной арифметики).

Вычисления и интерпретация результатов. На первом этапе решим задачу, не прикладывая давление. Цель этого упрощения — выяснить, не будет ли стык раскрываться из-за деформаций изгиба, вызванных затяжкой болтов. Как выясняется, опасения не напрасны. Картина эквивалентных напряжений на фоне деформированного состояния (перемещения масштабированы относительно реального деформированного вида в 500 раз) показана на рис. 3.54 и 3.55. Делать однозначное заключение по такого рода картинкам о том, что стык раскрывается, нельзя, поскольку, в силу нелинейности задачи, линейное масштабирование перемещений может привести к некорректному виду деформаций. Поэтому следует отобразить деформированное состояние с фактическими величинами перемещений. Здесь тоже видно, что в сечении между болтами появился зазор. Картинку мы не приводим, т. к. она получается весьма трудночитаемой.

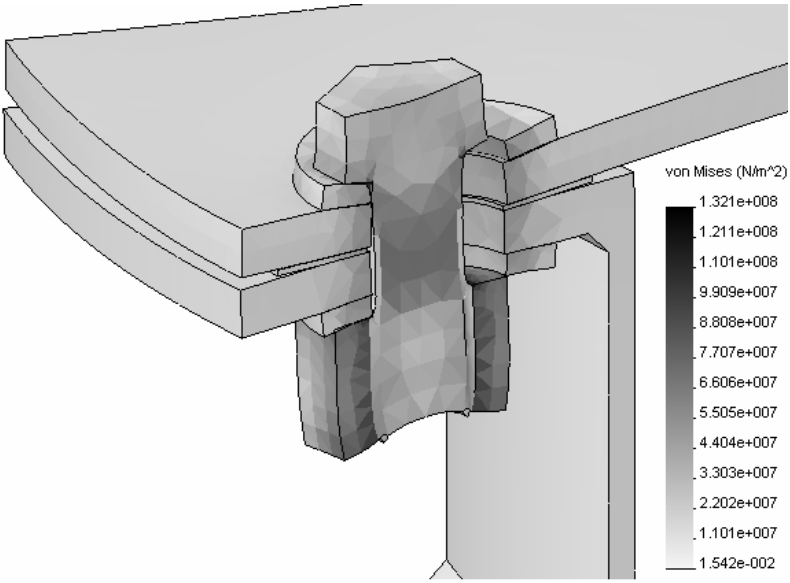


Рис. 3.54. Эквивалентные напряжения на фоне деформированного вида (увеличение перемещений в 500 раз) — вид со стороны разреза, проходящего через соединение)

Еще один способ проконтролировать состояние зоны контакта прокладки с фланцем — отображение картины нормальных напряжений в одной из деталей при отсутствии других. Например, если и не отображать крышку, то на полученной диаграмме нормальных напряжений в направлении оси системы очевидна локализация зоны сжатия. Для ясности шкала напряжений настроена так, чтобы зоны с растягивающими напряжениями закрашивались однородным цветом. Учитывая незначительное изменение искомого компонента напряжений по толщине и предотвращая возможную погрешность аппрокси-

мации напряжений, будем отображать осредненные по элементам напряжения (рис. 3.56). Пятно остаточного контакта на данной иллюстрации можно локализовать вполне достоверно.

Замечание

В COSMOSWorks версии 2005 года можно отображать распределение контактного давления на диаграмме.

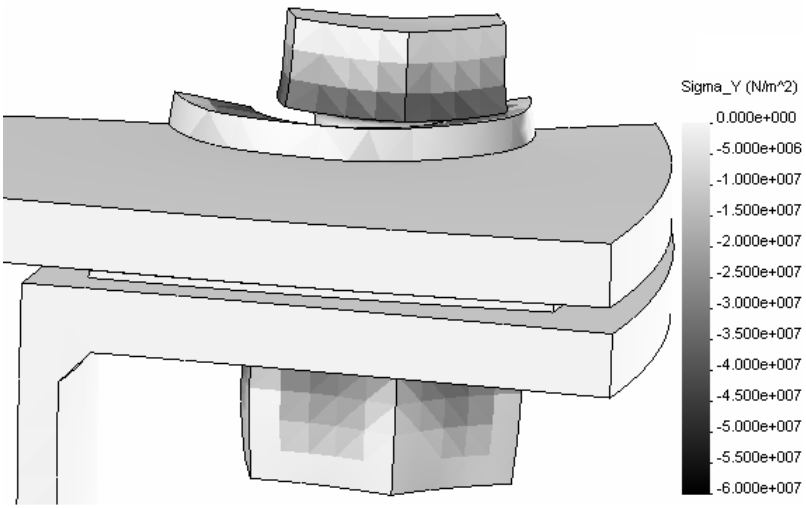


Рис. 3.55. Эквивалентные напряжения на фоне деформированного вида — вид со стороны разреза, проходящего вне соединения

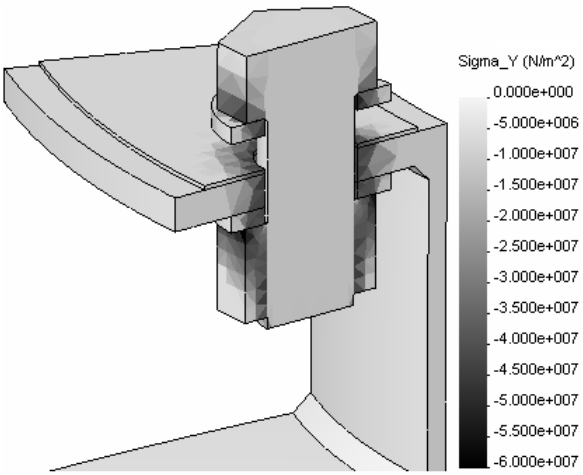


Рис. 3.56. Эквивалентные напряжения на недеформированной конструкции — крышка не показана

3.7.4. Модификация конструкции

Из-за того, что конструкция не удовлетворяет основному требованию — условию нераскрытия стыка, необходимо предпринять меры по ее модификации. Выделим основные направления:

- увеличение затяжки болтов — очевидная, на первый взгляд, манипуляция в данной конфигурации не способна принести качественных изменений. Корень проблемы в том, что затяжка болта для системы из относительно тонких пластин (фланца и крышки) порождает изгибную деформацию, которая тем больше, чем больше усилие в болте. Практический расчет показывает, что в данной конфигурации увеличение натяга не дает никакого эффекта;
- увеличение толщины деталей — это перспективное направление, поскольку в соединении возникает так называемый конус давления — зона действия сжимающих напряжений. Соответственно, чем толще детали, тем больше радиус основания;
- уменьшение расстояния между болтами — эта манипуляция также полезна, поскольку в состоянии сблизить конусы давления вплоть до их пересечения, однако имеет естественное ограничение, связанное с условием непересечения элементов крепежа и, начиная с некоторого момента, ослаблением конструкции;
- изменение параметров крепежа — потенциальные направления: увеличение диаметра болтов, увеличение наружного диаметра шайб и их толщины. Наиболее перспективным представляются последние две операции.

Результаты расчета последовательных модификаций конструкции сведены в табл. 3.8. Трение не учитывается, давление отсутствует. Мерой натяга является температура болта. Видно, что эффект достигается при комплексном изменении конструкции, а увеличение затяжки эффективно только при достаточно большой толщине пластин и относительно толстых шайбах.

Таблица 3.8. *Нормальные напряжения в стыке в отсутствие давления для различных вариантов узла*

Число болтов	Толщина фланца	Шайба		Температура болта	SY	SY
		Диаметр	Толщина		болт	край прокладки
8	8	44	4	-40	6.4e7	0
8	8	44	4	-80	1.3e8	0
16	8	44	4	-40	6.1e7	0
16	8	44	4	-80	1.2e8	0

Таблица 3.8 *(окончание)*

Число болтов	Толщина фланца	Шайба		Температура болта	SY	SY
		Диаметр	Толщина		болт	край прокладки
16	12	44	4	-80	1.3e8	0
16	15	44	4	-80	1.2e8	0
16	15	50	6	-150	2.4e8	-6e4
16	15	50	6	-200	3.3e8	-5e5

Добившись того, чтобы узел функционировал при отсутствии нагрузки, проанализируем последствия приложения давления. Видно, что давление не только не уменьшило сжимающие напряжения, но, в общем, сделало (конкретная его величина) стык более герметичным. Результаты в зависимости от толщины и натяга сведены в табл. 3.9.

Таблица 3.9. *Нормальные напряжения в стыке для различных вариантов узла при наличии давления*

Число болтов	Толщина фланца	Шайба		Температура болта	SY	SY
		Диаметр	Толщина		болт	край прокладки
16	15	50	6	-150	2.6e8	-5e5
16	15	50	6	-200	3.5e8	-7e5
16	19	50	6	-200	3.5e8	-1e7

Один из факторов, влияющих на работоспособность конструкции, — это наличие трения. При попытке его учета необходимо снять вспомогательные закрепления вершин, активизировать соответствующие опции в окне **Параметры панели** | **Свойства** (Properties | Options) и повторить анализ. Можно скопировать Упражнение (команда **Копировать**) при нахождении указателя над текущим Упражнением, затем вставить копию под новым именем (команда **Вставить**) из контекстного меню корневой пиктограммы Менеджера COSMOSWorks. Далее следует изменить упомянутые настройки для копии Упражнения. Результаты этой попытки для исходной модели отрицательны. Программа прекращает расчет с выдачей диагностического сообщения, приведенного на рис. 3.57. Причин медленной сходимости может быть несколько. Во-первых, наличие кинематических мод движения деталей как жесткого целого. То есть после приложения нагрузок детали начинают перемещаться, преодолевая трение, и, в конце концов, система становится механизмом. Ве-

роятен также случай, когда процесс решения в применении к потенциально работоспособной модели оказывается расходящимся. Здесь, в отличие от первой ситуации, когда можно внести изменения в модель или вставить искусственные стабилизаторы, что-либо предпринять очень сложно. Системное сообщение содержит рекомендацию уменьшить коэффициент трения. Это, однако, помогает далеко не всегда. Более того, в конкретной задаче успех приносит противоположная тактика. Процесс начинает сходиться в интервале 0,2—0,5. Причина вполне естественна: трение фиксирует объекты. Однако эта сходимость наблюдается только для линейных конечных элементов (распределение сжимающих напряжений при этих условиях показано на рис. 3.58). Для элементов второго порядка результат получить не удается (в версии COSMOSWorks 2005 декларировано улучшение сходимости для больших коэффициентов трения, однако авторы данную функциональность не тестировали).

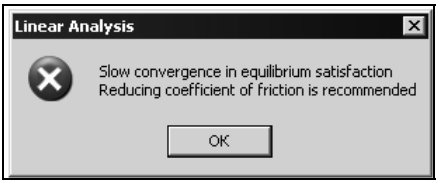


Рис. 3.57. Диагностическое сообщение о расходимости решения

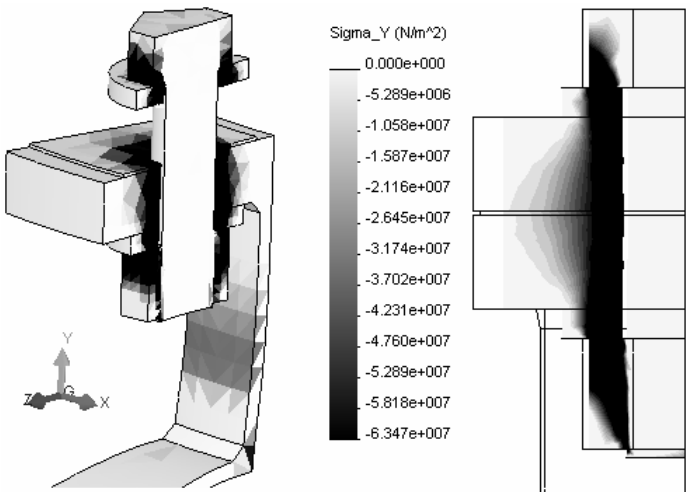


Рис. 3.58. Картина распределения сжимающих напряжений (аксонометрия и сечение) в узле под действием давления

Завершая рассмотрение примера, отметим высокую трудоемкость получения сколь-нибудь адекватной расчетной модели. Действительно, пришлось по-

следовательно решать три самостоятельных задачи: расчет резьбового соединения, подбор его имитации, расчет собственно узла. При наличии компьютерной системы с "неограниченной" производительностью можно было бы избежать первых двух этапов, при условии, что геометрия резьбы в итоговом расчете будет полноценно воспроизведена. Однако даже при нескольких болтах и отсутствии симметрии задача приобретает критическую размерность. Причем лимитом становится вычислительная способность компьютера — одновременно решаются десятки контактных задач. Здесь в определенной степени проявляются недостатки функциональности программы — отсутствие у COSMOSWorks возможности моделировать скольжение компонентов без выхода из контакта (они, кстати, не появились и в версии программы 2005 года). Понятно, что существенную долю вычислений в проблемах, похожих на приведенную, занимает анализ того, не разойдутся ли поверхности. В разумном диапазоне нагрузок все поверхности на крепеже, включая шайбы, головки болтов и гайки, не теряют контакт друг с другом. Поэтому в подобных задачах, при решении их посредством COSMOSWorks, описанная методика является единственно приемлемым инструментом (в версии до 2005 года).

Вообще говоря, данная задача есть характерный пример того, что традиционные методы деталей машин могут составлять достойную конкуренцию численным алгоритмам при расчете типовых технических объектов. Более того, поскольку в аналитические/эмпирические зависимости, как правило, заложены поправки на ресурс, отклонение расчетной схемы от реальных условий эксплуатации, статистические погрешности, то оценки, которые можно сделать посредством традиционных методов, могут быть вполне конкурентоспособны.

3.8. Расчет трубопроводных конструкций

Имея совокупность моделей для анализа прочности и устойчивости изолированного бака, а также его конструктивных элементов, попытаемся использовать их для расчета трубопроводной системы, связывающей баки и другие объекты.

3.8.1. Постановка задачи

На рис. 3.59 показана пространственная модель трубопроводной системы. Она состоит из баков, один из которых установлен на пространственной раме, собственно труб, соединенных сваркой или фланцами, а также насоса. Конструкция содержит значительный объем упрощений, однако по составу компонентов является вполне типичной. Поставим задачу выделения ее резонансных частот и управления этими частотами.

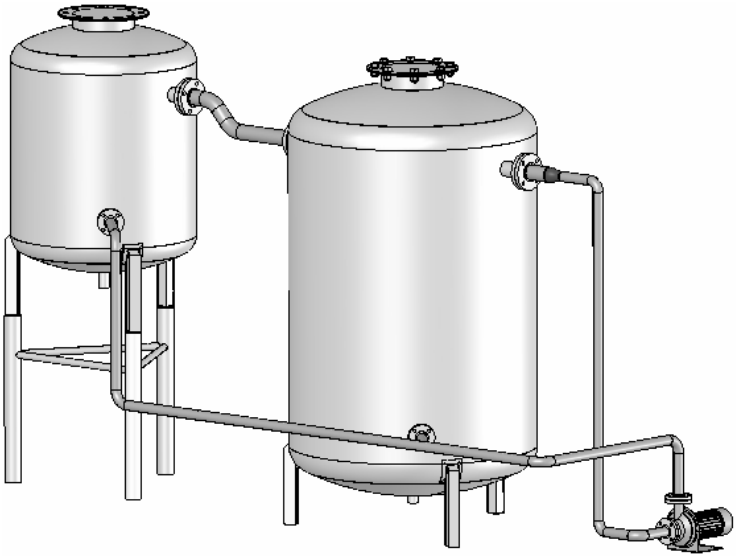


Рис. 3.59. Геометрическая модель трубопроводной системы

Может возникнуть вопрос, почему не использовать специально разработанное для трубопроводных систем программное обеспечение, позволяющее при скромных затратах времени на подготовку исходных данных получить некое решение? Дело в том, что оно, как правило, ориентируется на анализ только труб, не учитывая возможность резонанса других элементов конструкции, в нашем случае это баки и рама. Если рассчитывать трубопроводы изолированно от окружения, то весьма трудно учесть влияние локальной податливости мест их присоединения к соединяемым объектам. Баки, как правило, являются тонкостенными. Поэтому определенная жесткость присутствует в направлении оси трубы. Сопротивление же бака изгибу трубы, приваренной на цилиндрической части, крайне незначительно в направлении, лежащем в плоскости перпендикулярной оси бака, и несколько выше при изгибе трубы в плоскости, проходящей через ось бака и ось трубы. Если длина труб такова, что влиянием податливости мест заделок можно пренебречь, то можно представить эти заделки как абсолютно жесткие (относительно перемещений и поворотов). В такой ситуации расчет по балочной модели вполне корректен. В нашем примере трубы являются достаточно короткими, их "глобальная" жесткость сопоставима с жесткостью баков, а "локальная", если ее оценивать по склонности к потере устойчивости, существенно выше. Поэтому "окружение" обязано участвовать в расчете. В качестве примера рассмотрим рис. 3.60. На нем приведена поверхностная модель системы, состоящей из участка трубы большого диаметра с врезкой. Граничные условия — равенство нулю перемещений (повороты не стеснены) на кромках. Первые две резонансные формы связаны с колебанием тонкой трубы: низшая — поперечным,

вторая — в вертикальной плоскости. Обе они появились, в том числе и потому, что жесткость бака в соответствующих направлениях достаточно мала. Третья форма связана с деформациями самого бака. Для достижения показанной картины резонансных форм были специально подобраны соотношения размеров элементов системы и их толщин. Для другой геометрии собственные формы могут иметь принципиально иной вид. Вывод, однако, очевиден: при анализе резонанса изолированный расчет труб не всегда оправдан.

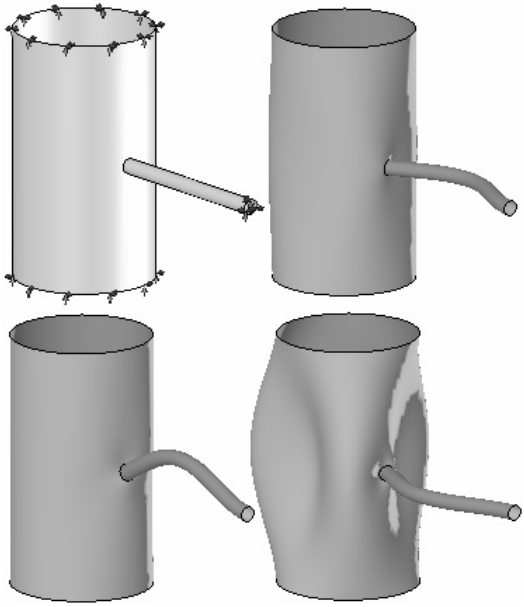


Рис. 3.60. Геометрическая модель труб с граничными условиями и первые три собственные формы

Если же выполняется статический расчет, то замена бака жесткой опорой с фиксацией всех шести степеней свободы (в терминах проектировщиков трубопроводов — *мертвая опора*) существенно искажает результаты в сторону увеличения напряжений. Это может происходить как непосредственно в заделке, так и в некоторых участках трубопровода. И — это менее очевидно, но весьма неприятно — завышение жесткости опор может снизить уровень расчетных напряжений в действительно опасных зонах.

3.8.2. Подготовка геометрической твердотельной модели

Твердотельная модель системы была построена на базе соответствующих моделей баков, являющихся подсборками. Последние могут включать крышки,

крепеж и т. д. Рама, на которой расположен меньший бак, построена с использованием группы команд **Сварная деталь** на базе пространственной системы эскизов и также является твердотельным объектом. Собственно трубопроводы созданы с использованием модуля **Routed Systems** (Маршрут и трубопровод), являющегося приложением SolidWorks. Получить возможность автоматического связывания соединительных элементов трубопроводов с баками можно, если в последние включить фланцы. На этих фланцах нужно создать **Точки маршрута** с заданным номинальным диаметром трубы, к которой этот фланец будет привариваться. Этот же диаметр определяет номенклатуру фланцев, которые могут быть присоединены к данному фланцу. Подготовив баки, можно расположить их в пространстве в соответствии с техническими требованиями.

Следующий шаг — ввод в модель других конструктивных элементов: опор и насоса. Последний также стоит оснастить деталью с **Точками маршрута**.

Этап, на котором создаются собственно узлы трубопровода, желательно выполнять после того, как получены все объекты, от которых зависят параметры труб и маршрута, вдоль которого эти трубы протянуты. Каждый изолированный участок трубопровода желательно выполнять в виде отдельного маршрута (он является сборкой). Начинать этот маршрут нужно с перетаскивания фланца (или другого объекта, содержащего **Точку маршрута**) из окна **Feature Palette** (Палитра элементов) на ответный объект, уже присутствующий в системе (в нашем случае это фланцы баков и насоса). Далее система предлагает начать создание маршрута. В появляющейся слева панели нужно выбрать тип трубы (номинальный диаметр трубы заимствуется из параметров фланца), а также определиться с тем, как будут формироваться колена: в виде отдельных участков или же будет изгибаться непрерывная труба. С точки зрения последующего расчета на прочность крайне предпочтителен второй путь. Это гарантирует непрерывность поверхностей, которые будут базой для создания сетки (или же на основе которых будут строиться поверхности для сетки). Разделение же трубопровода на трубы и колена, оправданное с точки зрения конструкции, может породить проблемы нестыковки участков сеток и, более того, зазоров между ними: трубы и колена могут иметь фаски на концах. Еще одна проблема подстерегает расчетчика в зоне сопряжения трубы и фланца. Между ним и трубой может присутствовать зазор. Он вполне естественен с точки зрения конструкции, однако приводит к затруднениям при подготовке поверхностей для наложения сетки. С этим можно смириться и скорректировать поверхностную модель, построенную на базе существующих объектов. Альтернативное решение — создать специальные конфигурации фланцев, не имеющие зазоров с трубами и, заодно, содержащие минимальное число других конструктивных элементов (буртиков, отверстий, канавок для уплотнений и т. д.). Упрощенные конфигурации следует использовать для

формирования расчетной модели (как твердотельной, так и поверхностной), а исходные — для оформления конструкторской документации. Простейший маршрут показан на рис. 3.61. Линия в центре — пространственный эскиз, на базе которого он построен.

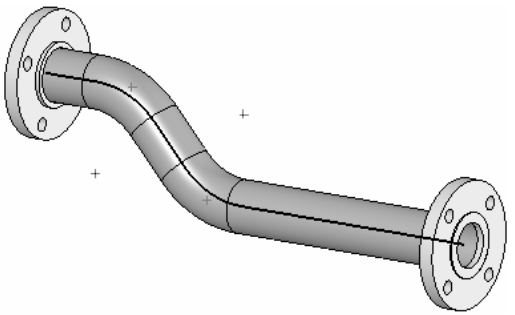


Рис. 3.61. Маршрут в твердотельном представлении

3.8.3. Построение поверхностной модели

Из двух доступных в COSMOSWorks аппроксимаций — твердотельной и оболочечной — единственно пригодной (с известными оговорками) для расчета описанной конструкции "в целом" является последняя. Подобно ситуации с расчетом изолированного бака оболочечная модель не может дать адекватную оценку прочности всех элементов конструкции, однако некоторые ее зоны для расчета пригодны. Это, в частности, собственно баки, за исключением фланцев и опор в области контакта с рамой, рамы, трубы вдали от фланцев. Менее требовательна к форме представления модели задача выделения собственных частот. Главным здесь является точное отображение массово-инерционных характеристик и аппроксимация жесткости элементов, которые "сопротивляются" деформациям, сопровождающим резонансные моды. Поэтому, не включая в поверхностную модель крепеж и оставляя из каждой пары смежных фланцев только один, будем иметь в виду, что соответствующие массы должны быть "присоединены" к оставшимся объектам при создании конечно-элементной модели. Фланец же заменяем поверхностью в виде диска. Для создания поверхности используем команду SolidWorks **Эквидистанта к поверхности**, взяв за базу одну из граней фланца. Диск следует расположить посредине между двумя фланцами, а затем ликвидировать отверстия посредством команды **Не отсекать поверхность** с активной опцией **Слить с оригиналом**. Все эти упрощения позволяют значительно уменьшить число узлов и элементов в сетке. Если подобрать для диска адекватную толщину, то компонент погрешности, обусловленный различием между инерционными характеристиками модели и реальной конструкции, не

будет значителен. Не так проста оценка влияния упрощений на жесткость конструкции и, в частности, на податливость фланцевого соединения. Можно утверждать, что жесткость подобных соединений больше жесткости соединяемых ими труб и, следовательно, собственные частоты незначительно изменятся в сторону уменьшения.

Поверхности, соответствующие трубам, также получаем, смещая наружные или внутренние грани в направлении срединной поверхности. К сожалению, попытка автоматизировать этот процесс посредством команды SolidWorks **Промежуточная поверхность** с автоматическим распознаванием объектов (опция **Найти грани по парам**) не приводит к позитивному итогу. Несколько более успешен путь, когда этот процесс управляется пользователем. Если при этом активизирована опция **Сшить поверхности**, то результат будет более утешителен. Однако если вопреки предыдущим рекомендациям трубы и колена были выполнены из деталей с фасками (именно такие исполнения присутствуют в поставке SolidWorks), то между результирующими поверхностями могут остаться зазоры. Их ликвидация, несмотря на внешне примитивный характер задачи, не вполне тривиальный процесс. В ходе работы могут возникать короткие грани, которые нужно восстанавливать. Они должны быть цилиндрами, поэтому объект SolidWorks **Поверхность** | **По сечениям** неприменим, поскольку есть вероятность получить поверхность двойной кривизны. Ее жесткость существенно отличается от цилиндрической.

По мере создания поверхностей следует сшивать их с построенными ранее. Есть ряд мест, таких как зоны примыкания фланцев, где это невозможно, однако непрерывные участки маршрутов следует объединить. Эта методика тождественна использованной при подготовке расчетной модели бака *(см. разд. 3.5)*.

Последняя рекомендация касается выбора места, в котором размещается поверхностная модель для расчета. Поскольку необходима аппроксимация сборки посредством поверхностной модели, то рекомендуется в сборку включить файл детали, где будут создаваться копии всех необходимых объектов, которые находятся в файлах деталей.

3.8.4. Анализ

Мы имеем поверхностную модель, которая может быть базой для структурного анализа (см. рис. 3.62). Формально можно выполнить статический расчет, анализ устойчивости и резонанса, однако погрешности, внесенные на этапе построения геометрии, могут оказаться совершенно неприемлемыми. Бóльшую точность может дать расчет отдельных узлов с корректным приложением граничных условий, заменяющих отсутствующие объекты. То же, но, вероятно, в меньшей степени, справедливо для расчета устойчивости. Но по-

скольку формы потери устойчивости могут быть таковы, что происходит совместная деформация различных объектов, например, опор бака и элементов рамы, то комплексный расчет вполне оправдан. В следующем разделе мы сосредоточимся на анализе резонанса. Здесь также необходимо включать в расчетную модель практически все объекты, поскольку предсказать резонансные формы для данной конструкции практически невозможно.

3.8.5. Решение

Подготовка исходных данных о свойствах материалов. Для данной задачи на результаты влияют только жесткость материалов и их плотность. Остальные свойства могут быть любыми.

Подготовка расчетной модели. Задача не допускает никаких условностей, обусловленных симметрией. Необходимые упрощения, если таковые можно применить, закладываются на этапе подготовки поверхностной модели. В процессе создания сетки, как всегда, необходимо балансировать между желаемым и доступным. Однако есть места, где минимальная плотность сетки имеет жесткие ограничения. Особенности дискретизации в COSMOSWorks таковы, что в зонах с большой кривизной могут порождаться весьма далекие от исходной геометрии аппроксимации. Характерный пример показан на рис. 3.63. На трубе присутствует поперечная "вмятина". В статическом расчете она, вероятно, повлекла бы появление концентрации напряжений, скорее всего некритической. Для задач на собственные формы эта особенность может привести к отклонению от результата, полученного для гладкой трубы, в несколько раз. Проблема решается, с одной стороны, локальным уплотнением сетки, а с другой — изменением топологии поверхности: разбиением одной грани на несколько, что служит программе своеобразным ориентиром при построении сетки. Например, для труб следует монолитную цилиндрическую поверхность разбить двумя продольными линиями разъема на два полуцилиндра. По той же самой причине (наличие неплоских поверхностей) использовать линейные конечные элементы следует исключительно на этапе отладки расчетной модели. Результаты для отчетов нужно получать только при разбиении элементами второго порядка.

Как упоминалось, толщина оболочек в COSMOSWorks никак не связана с геометрией твердотельной или поверхностной модели в SolidWorks. Для каждой из граней (или групп граней) ее нужно определять в панели COSMOSWorks **Определение оболочки** (Shell Definition), там же нужно выбрать используемую гипотезу: тонкие (thin) или толстые (thick) оболочки. Там, где отношение пролета к толщине составляет менее 15—20, следует использовать элементы толстых оболочек. В конкретной ситуации это как трубы, соединяющие баки, так и трубы, из которых изготовлены рамы. В эту ка-

тегорию попадают также крышки баков и фланцы. Последние, практически не влияя на жесткость конструкции, существенно изменяют массово-инерционные характеристики. Поэтому в расчете на собственные частоты (в отличие от устойчивости) назначать их толщины следует с должной тщательностью, обращая внимание не только на корректную имитацию жесткости, но и адекватное представление массы.

Кинематические граничные условия (рис. 3.62) состоят в ограничении всех степеней свободы (перемещений и углов поворота) на опорах. Такие же заделки назначаются в месте стыка труб с насосом. Последний, как предполагается, имеет жесткость достаточную для того, чтобы "интенсивно"

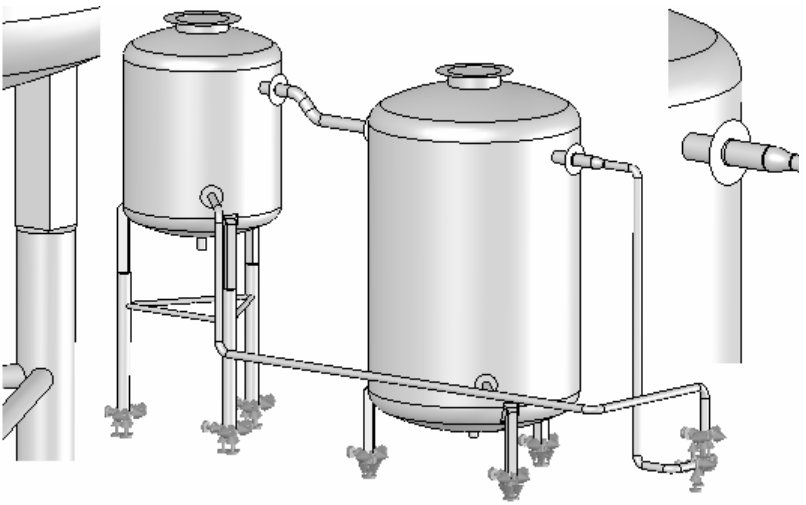


Рис. 3.62. Поверхностная модель и кинематические граничные условия

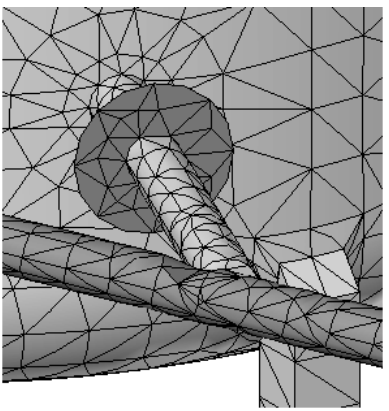


Рис. 3.63. Погрешности сеточной аппроксимации

препятствовать смещению и повороту концов труб. Статические граничные условия — нагрузки в задаче отсутствуют.

Расчет на собственные частоты и интерпретация результатов. Выполнив анализ типа **Frequency** (Частоты) с выделением первых пяти форм, получаем величины резонансных частот (рис. 3.64) и соответствующих им форм колебаний. Видно, что собственные частоты достаточно малы. Если рассмотреть собственные формы (первые две из них показаны на рис. 3.65 и 3.66 соответственно), то можно увидеть, что та, которая соответствует минимальной частоте, обусловлена деформацией фермы, на которой установлен меньший бак. Вторая форма порождена колебаниями длинного участка трубы. Высшие формы также связаны с колебаниями участков труб. Вид деформированной конструкции подтверждает высказанное ранее утверждение о том, что податливость стенок бака в зоне примыкания труб влияет на результат.

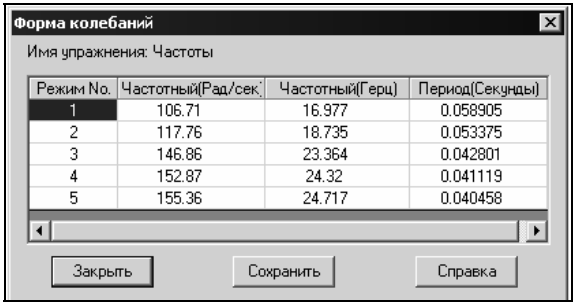


Рис. 3.64. Первые пять собственных частот



Рис. 3.65. Первая собственная форма



Рис. 3.66. Вторая собственная форма

Попытаемся воздействовать на систему, преследуя цель повысить собственные частоты. Имея в виду результат для первой собственной формы, вводим в раму диагональные жесткости, связывающие опоры. Воспрепятствовать колебаниям труб можно, зафиксировав некоторые их сечения (физический смысл — крепление к жестким кронштейнам). Критерий выбора точек крепления — максимальная амплитуда колебаний в соответствующих резонансных формах. Расчетная модель модифицированной конструкции показана на рис. 3.67.

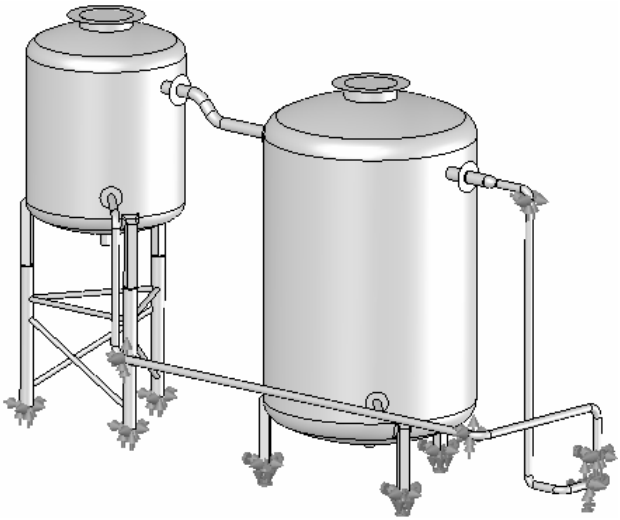


Рис. 3.67. Поверхностная модель модифицированной конструкции и соответствующие граничные условия

В результате модификации минимальная резонансная частота увеличилась почти на 50 % (рис. 3.68). Соответствующая ей собственная форма практически не изменилась за исключением того, что "наклон" бака перестал сопровождаться изгибом тонкой трубы (рис. 3.69). Более того, для первых двух форм трубы, закрепленные в сечениях, стали стабилизирующим элементом.

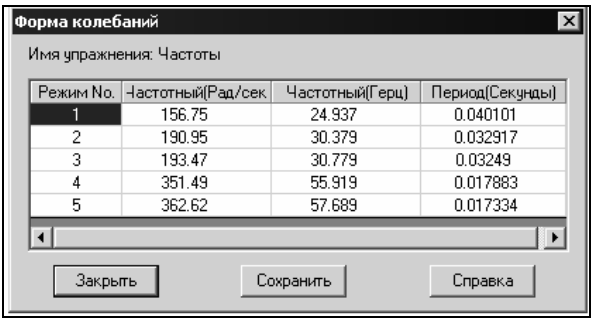


Рис. 3.68. Собственные частоты модифицированной конструкции



Рис. 3.69. Первая собственная форма модифицированной конструкции

Если отобразить вторую собственную форму (рис. 3.70), то назревающие выводы станут еще более аргументированными. Эта мода также обусловлена деформацией фермы, причем на сей раз связь между ее податливостью и перемещениями элементов бака весьма наглядна. Налицо недостаточная жесткость системы "бак плюс ферма". Именно здесь должны быть сосредоточены усилия по дальнейшей доработке конструкции. Более того, можно допустить,

что потеря устойчивости конструкцией будет происходить по аналогичной схеме.



Рис. 3.70. Вторая собственная форма модифицированной конструкции

3.9. Выводы

Последовательность рассмотренных задач является характерным примером использования программы для комплексного расчета трубопроводов совместно с объектами, которые они связывают. Необходимые модели могут быть построены на базе конечных элементов оболочек или объемных конечных элементов. Это позволяет учитывать совместные деформации всех элементов конструкции, добиваясь тем самым достаточной степени правдоподобия. Имея отработанную расчетную модель, в ряде ситуаций можно оперативно реализовывать в ней идеи по модификации конструкции с целью достижения заданных характеристик прочности, устойчивости и резонанса. В то же время для протяженных трубопроводов, соединяющих удаленные объекты, эффективность программы, в силу отсутствия специальных конечных элементов, невысока, а усилия, направленные на обеспечение приемлемой точности (модификация геометрии, подбор плотности сетки, манипуляции с задачей большой размерности), неадекватны результату.

Если же говорить о программе в целом, то мы продемонстрировали только малую часть ее возможностей. Как показывает практика, большая часть затруднений возникает у пользователей не из-за недостатка функциональности

данного пакета, а в связи с методическими проблемами. Они связаны с нехваткой навыков переноса аналитических или эмпирических методик в среду численного моделирования.

Еще два примера использования COSMOSWorks для решения прикладных задач будут рассмотрены в *разд. 6.2* и *6.5*. Часть функциональности, связанной с расчетами в предположении нелинейности задач, будет рассмотрена в *главе 4*.

ГЛАВА 4

Структурная механика — нелинейная задача (COSMOSDesignSTAR, COSMOSWorks)

COSMOSDesignSTAR, COSMOSWorks представляют собой прикладное программное обеспечение для решения задач расчета на статическую прочность и устойчивость выделения собственных частот, а также анализа проблем, связанных с геометрической и физической нелинейностью (рис. 4.1).



Рис. 4.1. Информационная панель COSMOSDesignSTAR

Замечание

Описание программы будет кратким. На то есть несколько причин. Во-первых, подавляющая часть функциональности COSMOSDesignSTAR, связанная с нелинейностью, перенесена в COSMOSWorks, а возможности последнего в сфере упругого расчета на данный момент существенно превосходят то, что есть в DesignSTAR. Как представляется, здесь сказываются приоритеты владельца продуктов фирмы Dassault Systems, связанные со стратегией их развития. Еще одна причина ограничения объема состоит в том, что полноценное изложение вопросов численного моделирования в нелинейной механике сплошных сред должно быть темой специального издания.

Замечание

Для построения геометрической модели и численного анализа использованы версии продуктов SolidWorks 2004 года и COSMOSDesignSTAR 4.0. Описание функциональности COSMOSWorks, связанное с нелинейностью, дано по версии 2005 года; приведенные элементы интерфейса, отвечающие за нелинейный анализ, даны в том виде, в каком они присутствуют в программе DesignSTAR 4.0. При этом упомянуты функциональные отличия, характеризующие COSMOSWorks 2005.

4.1. Назначение

Программа COSMOSDesignSTAR (в дальнейшем *DesignSTAR*) является разработкой фирмы SRAC. Как и COSMOSWorks, DesignSTAR предназначен для решения задач механики твердого тела методом конечных элементов, но с возможностью прямого интерфейса с популярными CAD-системами. В начале разработки продуктов "разделение труда" было следующим: COSMOSWorks разрабатывался как интегрированное приложение к SolidWorks, обладая функциональностью "начального" уровня, и был способен к решению задач исключительно в пределах упругости; DesignSTAR же позиционировался как система "среднего" уровня, которая имеет удобный интерфейс при взаимодействии с пользователем и обладает ассоциативной связью с другими CAD-системами помимо SolidWorks. Однако конкуренция на рынке CAE-программ внесла свои коррективы. После поглощения SRAC фирмой SolidWorks, а последней, в свою очередь, Dassault Systems, акцент был сделан на развитии функциональности COSMOSWorks, как одного из наиболее популярных приложений SolidWorks. Его успех способствовал продажам расчетных модулей. Конкуренты в нише интегрированных продуктов, например, разработчики DesignSpace, сосредоточились на внедрении в другие CAD-системы "среднего" уровня, например, в Autodesk Inventor и SolidEdge. Создатели универсальных конечно-элементных продуктов, например, MSC Nastran и ANSYS тоже не теряли времени и ввели так называемые "прямые" интерфейсы с SolidWorks и подобными системами (кавычки поставлены потому, что CAE-система взаимодействует не с моделью SolidWorks, а как, кстати, и

DesignSTAR, в неявном виде конвертирует ее в собственный формат). Кроме того, универсальные программы обзавелись более-менее удобными пользовательскими интерфейсами, что сделало их конкурентоспособными с точки зрения эксплуатации непрофессиональными расчетчиками.

В связи с этим можно предположить, что после выхода версии COSMOSWorks 2005 активизируется миграция пользователей с DesignSTAR (по крайней мере, той их части, которая использует SolidWorks как базовую CAD-систему) на COSMOSWorks.

В части нелинейного анализа COSMOSWorks и DesignSTAR предназначены для решения задач механики с учетом физической нелинейности сред и геометрической нелинейности объектов, в частности оболочечных.

4.2. Теоретическая база

В том, что касается упругого анализа, практически все, сказанное в одноименном разделе главы, посвященной COSMOSWorks, справедливо и для DesignSTAR, за исключением того, что последний не способен создавать виртуальные крепежные элементы и не имеет модуля оптимизации. Ряд постулатов, лежащих в основе алгоритмов, моделирующих нелинейность, рассмотрен в *главе 2*.

Большая часть решенных ранее задач (исключением являются те, которые связаны с моделированием контактной задачи с переменной границей контакта) базировались на постулатах линейности. Здесь рассматриваются случаи, в которых некоторые из этих гипотез несправедливы. Типичные виды и источники нелинейности в структурной механике следующие:

- *геометрическая нелинейность*, связанная с тем, что влияние перемещения элементов механической системы на величину или направление действия граничных условий (сил и заделок), а также на свойства самой конструкции становится значительным по сравнению с тем, когда эти явления не учитываются. Один из примеров — расчет прогиба опертой по краям пластины под действием распределенного давления. Когда величина прогиба превышает половину толщины пластинки, то линейное решение приводит к значительной погрешности. Другой пример связан с моделированием потери устойчивости. Если для тонкой длинной пластины при действии сжимающей силы линеаризованный подход дает приемлемое решение, то нагружение дуговой арки нормальной к поверхности силой приводит к прощелкиванию, которое сопровождается переходом системы в новое равновесное состояние;
- *физическая нелинейность* материалов — она выражается в зависимости характеристик упругости материала от истории нагружения. Например,

это нелинейность кривой "напряжение-деформация" (пластичность) или зависимость деформации от времени (вязкоупругость, ползучесть);

- *контактная нелинейность* — при анализе сборок может встречаться несколько ситуаций, способных приводить к отклонению от линейного реакции системы на воздействие. Во-первых, это эффекты, возникающие на границе контакта тел при входе их в контакт, когда даже небольшая нагрузка в начальный момент передается через относительно малую площадь. Как следствие, в этой зоне возможно существенное изменение формы. Во-вторых, встречаются модели, имеющие детали, способные перемещаться "почти" как жесткое целое. Многие разъемные соединения, будучи включены в некую сборку, порождают такие расчетные случаи. Схожие последствия способны повлечь использование соединительных элементов COSMOSWorks. Еще один потенциальный источник нелинейности при расчете сборок — контактное трение. Однако, поскольку трение ни DesignSTAR, ни модуль анализа нелинейности COSMOSWorks совместно с физической нелинейностью не учитывают, то эта проблема опускается.

4.3. Интерфейс

Структура меню DesignSTAR, менеджер проекта, названия команд, реакции программы на действия пользователя практически тождественны тому, что есть в COSMOSWorks. Некоторые отличия имеются в реализации интерфейса, касающегося нелинейности. В COSMOSWorks он несколько более эргономичен. Однако окна форм, связанных с настройкой базовых параметров нелинейного расчета, в обеих программах практически идентичны. Также DesignSTAR содержит подмножество команд SolidWorks, предназначенных для работы в плоском эскизе. В отличие от COSMOSWorks, DesignSTAR не имеет русскоязычной локализации.

Замечание

Перевод интерфейса COSMOSWorks, связанного с нелинейным анализом, дается в авторском варианте. Та транскрипция, которая присутствует в версии 2005 года, доступной на момент подготовки книги, в значительной части является некорректной. Поэтому названия элементов интерфейса приведены в англоязычном написании, а перевод дан в скобках.

4.4. Функциональные возможности

Предполагая, что читатель уже познакомился с COSMOSWorks, рассмотрим ту часть функциональности DesignSTAR и возможностей COSMOSWorks, которые предназначены для нелинейного анализа.

4.4.1. Базовые возможности анализа

К числу рассмотренных выше типов анализа DesignSTAR добавил один новый: Nonlinear (Нелинейный), а COSMOSWorks 2005 также Drop Test (Испытание на *ударную нагрузку*). Появившийся в последней версии COSMOSWorks расчет на *усталость* (Fatigue) реализован в линейном варианте. Это значит, что процесс накопления повреждений только диагностируется, но влияния на свойства материалов никак не оказывает. Имитация падения может осуществляться как для упругого материала, так и для материала с моделью пластического течения по Мизесу. Нелинейный расчет и сопровождающее его решение контактной задачи не нуждается в настройках, требуемых для нелинейного расчета "общего" типа.

В DesignSTAR возможно решение плоской задачи в рамках плоского деформированного или плоского напряженного состояния. Модель строится непосредственно в DesignSTAR с помощью инструментов эскиза идентичным присутствующим в SolidWorks.

Как и COSMOSWorks, DesignSTAR содержит модуль теплового расчета. Однако его функциональность существенно уступает описанному в следующей главе продукту COSMOSFloWorks, и поэтому в данной книге не рассматривается.

4.4.2. Последовательность расчета

Большинство этапов нелинейного анализа совпадает с изложенным про расчет линейный. В нелинейном анализе важное место занимает назначение параметров вычислительного процесса. Для этого используется форма **Nonlinear Analysis** (ее содержимое приведено в *разд. 4.5.3* данной главы). Основными моментами здесь являются: назначение рассматриваемого периода времени, приращения шага и действий, сопровождающих это приращение, а также допусков сходимости шагов итерационного процесса. Также нужно определить **Incremental Control Technique** (Метод управления приращениями), а также **Iterative Solution Method** (Алгоритм нелинейного решения). Состав других необходимых параметров зависит от того, как и по какой схеме будут осуществляться приращения.

Пожалуй, единственным управляющим параметром, который внесен в нелинейную часть COSMOSWorks и отсутствует в DesignSTAR (версии до 4.5), является **Singularity elimination factor** (Коэффициент устранения сингулярности), оказывающий влияние на процесс решения при сингулярности матрицы жесткости. Как следует из документации, в нормальном состоянии его величина равна 1, а воздействовать на расчет он начинает при его уменьшении. В сопровождающем COSMOSWorks примере, когда в некий момент времени в системе одна из деталей оказывается лишена закреплений, ограни-

чивающих ее подвижность как жесткого целого, рекомендовано назначить этот параметр равным 0.

Процесс нелинейного деформирования может сопровождаться изменением во времени граничных условий, свойств материала (если они зависят от времени) или температуры. Эти процессы описываются посредством кривых, например, граничные условия подчиняются параметру **Time Curve** (Кривая времени). Время, фигурирующее в этих функциях, связано со временем, присутствующим в окне **Nonlinear Analysis**. Отметим, что время, назначенное в условиях, является абстрактным параметром за исключением задач с материалами, свойства которых зависят от времени, а также нестационарного теплового расчета (его особенности применительно к COSMOSWorks и DesignSTAR мы в данной книге не рассматриваем). При решении этих двух задач время является "конкретной" величиной.

4.4.3. Свойства материалов

В COSMOSWorks и DesignSTAR доступны следующие модели материалов и типы моделей деформирования.

- *Упругие:*
  - линейно-упругие;
  - нелинейно-упругие;
  - деформируемые согласно произвольной кривой "напряжение-деформация" (в COSMOSWorks отсутствует).
- *Гиперупругие*:
  - модель Муни — Ривлина (Mooney — Rivlin);
  - модель Огдена (Ogden);
  - модель Блатца — Ко (Blatz — Ko).
- *Пластичные*:
  - модель Мизеса с изотропным и кинематическим упрочнением;
  - модель Треска с изотропным и кинематическим упрочнением;
  - модель Друкера — Прагера для упругоидеальнопластической среды.

Типы *анизотропных материалов*, имеющиеся в DesignSTAR, тождественны тем, которые доступны в COSMOSWorks.

Назначение типа нелинейности для материала производится в окне **Material** базы данных по материалам, которое нужно вызвать из Менеджера программы. Для этого используется контекстное меню пиктограммы, соответствующей детали.

Замечание

В COSMOSWorks 2005 в поставляемую базу данных для некоторых марок материалов включены экспериментальные диаграммы деформирования в пластической зоне.

4.4.4. Генерация сетки

Процесс генерации сетки в DesignSTAR, по сути, мало отличается от того, который присутствует в COSMOSWorks.

4.4.5. Граничные условия

При нелинейном анализе недоступны кинематические граничные условия группы **Connectors** (Соединительные элементы, или, как в фирменном переводе — Жесткая связь), а также нагрузки типа **Remote Load** (Дистанционная нагрузка).

4.4.6. Контактная задача

В настройках статического анализа в обеих программах существует опция **Use large displacement contact** (Большие перемещения (Контакт, Соединители или Удаленная нагрузка)). После ее активизации контактная задача будет решаться методом последовательных нагружений с анализом на каждом шаге (величина приращения нагрузки определяется программой) положения пар поверхностей, которые могут взаимодействовать между собой, и ориентации нормалей к ним. В противном случае нагрузка прикладывается полностью, а затем итерационная процедура рассчитывает площадку контакта. Выбор способа расчета оставлен на усмотрение пользователя. Документация рекомендует использовать данную возможность при деформациях более 4 %, а также после визуального контроля деформированного вида с отображением перемещений в натуральном масштабе.

Только в COSMOSWorks 2005 возможен нелинейный анализ сопряженной задачи: физическая нелинейность материала плюс неопределенная поверхность контакта. В DesignSTAR 4.0 контактная задача решается исключительно в рамках статического расчета.

4.4.7. Постпроцессор

Процедура визуализации результатов, соответствующих нелинейному анализу, отличается от применяемых для статического расчета наличием возможности показывать расчетный параметр как функцию времени. Для этого существует команда **Response Graph** (График ответа) или, если более коррект-

но, кривая отклика. Также при отображении диаграмм следует указывать номер шага времени, для которого выполняется отображение.

4.4.8. Решатели

Для решения разрешающей линейной системы уравнений в нелинейном расчете доступны две процедуры: Direct sparse (метод Холесского для разреженных матриц) и FFEPlus (Итерационный компактный). Метод FFE (Итерационный) для нелинейного расчета не предусмотрен. Как показала практика, в отличие от линейных задач, прямой метод, несмотря на большую запрашиваемую память и лучшие — в упругой постановке — показатели быстродействия, в нелинейных задачах зачастую наиболее эффективен. В частности, для проблем с большими деформациями и/или с "почти" подвижными деталями.

4.4.9. Интерфейсы

DesignSTAR функционирует как при работающем SolidWorks, так и без него. Если приобретается, например, конфигурация COSMOSWorks Nonlinear (в версии до 2005 года), то обязательно "параллельно" с ним (для активизации DesignSTAR в падающем меню COSMOSWorks есть соответствующая команда). Основа межпрограммного интерфейса состоит в том, что DesignSTAR конвертирует модель соответствующей CAD-системы в свой внутренний формат (Parasolid), который используется для построения сетки, решения и т. д. DesignSTAR, в отличие от "самостоятельных" конечно-элементных пакетов, записывает граничные условия в базовую геометрическую модель (а точнее — в файлы, связанные с ней) и ассоциирует их с объектами этой модели.

DesignSTAR (в зависимости от версии) поддерживает ассоциативную связь со следующими CAD-программами (названия приведены согласно документации DesignSTAR 4.0 — в настоящее время некоторые продукты называются иначе):

- ❒ SolidWorks;
- ❒ Mechanical Desktop;
- ❒ Autodesk Inventor;
- ❒ SolidEdge;
- ❒ CadKey 98;
- ❒ IronCAD;
- ❒ MicroStation;
- ❒ Vellum Solids.

Без сохранения ассоциативности (что не требует установки соответствующих графических программ) графическая информация может считываться из графических форматов: Parasolid (x_t, x_b), ACIS (sat), IGES (igs, iges), STEP (stp, step), CATIA V5, а также файлов, созданных перечисленными выше программами. Интерфейс с CATIA V5 получил активное развитие в версии

DesignSTAR 4.0. В поставку опционно входит специальный транслятор, который может использоваться для преобразования файлов моделей CATIA в формат Parasolid.

При обмене посредством нейтральных форматов нужно следить за соблюдением номера версии, которая в "пишущей" программе должна быть меньше или равна той, которая воспринимается имеющимся релизом DesignSTAR. Это наблюдение справедливо, в том числе, и для SolidWorks.

Сетка передается в ANSYS (файл *.ans), NASTRAN (*.dat), PATRAN (*.neu), IDEAS (*.unv). Единственная программа, в которую могут быть переданы как сетка, так и результаты, — это COSMOS/M (*.geo).

4.5. Восстановление геометрии трубных заготовок

Приведена задача расчета конструкции с учетом физической нелинейности материалов. Ее особенность состоит в том, что решение не ограничивается описанием состояния при определенной совокупности факторов, но присутствует этап проектирования. Он предназначен для подбора режима нагружения, позволяющего получить заданную форму детали.

4.5.1. Постановка задачи

Рассмотрим задачу восстановления профиля круглой трубы. Предположим, что в результате неких технологических операций одно из сечений прямой трубы приобрело эллиптичность. Необходимо подобрать параметры технологического процесса, позволяющие приблизить форму этого сечения к кругу. Восстановление производится сжатием трубы в зоне дефектного сечения до такой степени, чтобы остаточные пластические деформации привели к требуемому изменению формы. Нагрузка от пресса прикладывается через полиуретановую прокладку — пуансон.

Геометрическая модель трубы показана на рис. 4.2. Она образована на базе двух сечений, одно из которых эллипс, а второе — окружность. При этом размеры эллипса подобраны так, чтобы его периметр и длина окружности были равны. На иллюстрации можно различить линию, которая делит поперечное сечение трубы по толщине на две части. Причины ее появления объяснены ниже.

Модель трубы в SolidWorks построена в виде сборки. Затем она считывается в DesignSTAR (рис. 4.3). Объекты самой конструкции существуют в твердотельном представлении. Однако для создания оси (она требуется для назначения граничных условий) необходима вспомогательная цилиндрическая поверхность, которая также транслируется из SolidWorks.

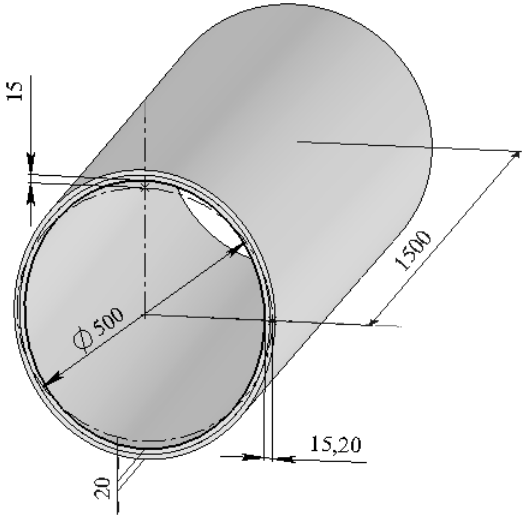


Рис. 4.2. Геометрическая модель трубы

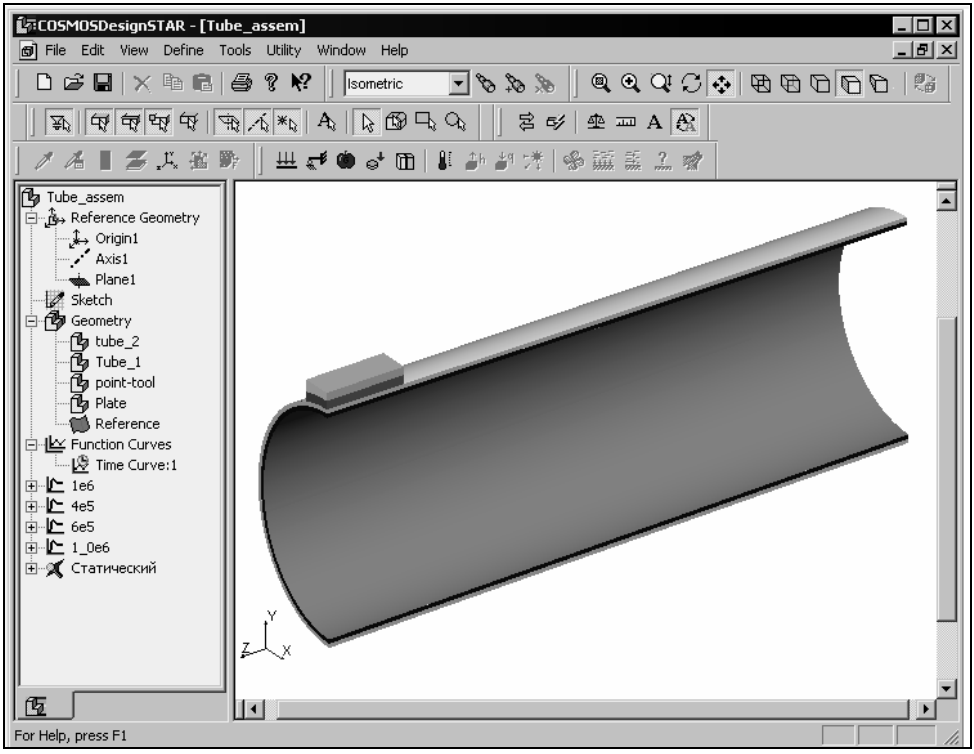


Рис. 4.3. Геометрическая модель сборки, переданная в DesignSTAR

4.5.2. Анализ

Поставленная проблема в общем случае не ограничивается расчетом конкретного объекта, а является, по существу, задачей проектирования. Она не имеет однозначного решения, а конкретные реализации технологического процесса зависят от значительного числа факторов. Многие из них весьма трудно формализовать. В силу того, что более-менее универсальное решение есть субъект весьма масштабного исследования, ограничимся описанием базовых подходов к проблеме. Выделим ключевые факторы, определяющие расчетную модель:

- геометрия и материал трубы — эти параметры являются заданными и корректировке не подлежат. Однако способ реализации этой геометрии может оказать ключевое влияние на сетку конечных элементов и, соответственно, на результат. Что касается материала трубы, то, поскольку она будет подвергаться пластическому деформированию, необходима адекватная информация о параметрах кривой "напряжение-деформация" конкретного материала. Оценка влияния степени пластичности металла на результат также представляет интерес;
- геометрия и материал полиуретанового пуансона — этот пункт предоставляет определенную свободу выбора. В том, что касается размеров, необходим достаточно масштабный поиск наилучшего варианта. Методологическая сторона этого процесса малозначима, поэтому, взяв за основу некий исходный проект, мы не будем его изменять. Менее тривиальным является вопрос о характеристиках полиуретана. Здесь нужно, во-первых, знать жесткость материала и, во-вторых, его тип. Последнее связано с тем, что деформации детали могут быть большими и для некоторых типов полиуретанов закон деформирования может отличаться от закона Гука;
- взаимодействие пуансона с прессом и трубой — в реальной конструкции пуансон имеет форму параллелепипеда. Из этого следует, что после приложения усилия происходит изменение площадки контакта — пуансон соприкасается с трубой и передает на нее нагрузку. Возможности DesignSTAR не позволяют одновременно учитывать две нелинейности: физическую — материалов — и геометрическую — сопутствующую контактной задаче с переменной границей. Понятно, что в данном случае актуальным для нас является первый из факторов. Поэтому при создании расчетной модели поверхность пуансона, передающая нагрузку на трубу, имеет цилиндрическую форму и прилегает к трубе. Имитация взаимодействия пуансона с прессом тоже имеет свои особенности. Они обусловлены способом приложения граничных условий к верхней поверхности пуансона. Если мы будем назначать перемещение плиты пресса, то включать ее в расчетную модель, в общем, и не нужно. В силу большого различия

в жесткости материалов достаточно задать перемещение на поверхности пуансона. Если же действие пресса имитируется силой, то ее непосредственное приложение (по сути, как распределенной нагрузки) к пуансону может привести к радикальному отклонению от реальности. Высокая податливость материала пуансона в совокупности с вероятной моделью материала как несжимаемого (мало сжимаемого) вызовет большие перемещения по краям и перераспределение нагрузок. Для соответствия модели действительности верхняя грань должна оставаться плоской. Выход один — в расчете имитировать плиту пресса неким объектом;

- взаимодействие трубы со столом пресса — в реальной ситуации труба находится на плоском столе, и в ходе нагружения происходит изменение площадки контакта. При этом стол в зоне возле контактной поверхности также деформируется, что влияет на состояние трубы. Как представляется, чем более податлив стол, тем меньше напряжения в зоне контакта. Выше упоминалось, что две нелинейности различных типов DesignSTAR не моделирует, поэтому придется подбирать другой тип граничных условий. Это может быть скольжение предварительно выделенной поверхности трубы по жесткой цилиндрической поверхности.

Замечание

COSMOSWorks в версии 2005 года способен решать задачи с двумя типами нелинейности: контактной, сопровождающейся входом объектов в контакт и выходом из контакта, а также с физической нелинейностью материалов деталей сборки. Однако злоупотреблять данным обстоятельством не рекомендуется. Наложение друг на друга двух итерационных процедур, обладающих определенной независимостью, в разы увеличивает время счета. Рассматриваемая задача связана со своего рода итерационной процедурой. Поэтому предложенное решение вполне актуально и для модернизированных программ.

Важной особенностью задачи является то, что нас интересует вид объекта после снятия нагрузки. Учитывая, что имеет место упругопластическое деформирование, труба будет пружинить с частичным восстановлением формы. Оба этих эффекта должны учитываться при назначении граничных условий.

4.5.3. Решение

Подготовка исходных данных о свойствах материалов. Этот шаг не ограничивается назначением собственно численных величин, но требует принятия решения о том, какие базовые гипотезы будут использованы при моделировании их поведения. Более того, данный этап наряду с тем, когда рассматриваются способы реализации граничных условий, определяет применимость программы для решения конкретной задачи.

Итак, конструкция включает следующие материалы.

- Сталь, из которой изготовлена труба (рис. 4.4). Материал должен обладать способностью к пластическому деформированию (собственно, вопрос и возник потому, что на некоем этапе оно произошло и нужно ликвидировать последствия в виде некруглого сечения). В качестве модели пластического течения принимаем модель Мизеса с изотропным упрочнением — von Mises Plasticity (isotropic). Кривую "напряжение-деформация" будем аппроксимировать билинейной зависимостью. Она требует знания модуля на упругом участке — EX и касательного модуля на участке упрочнения — ETAN. Последний во многом влияет на жесткость конструкции после достижения пластичности. Следует определиться, будет ли использоваться гипотеза больших деформаций (Large strain formulation) и больших перемещений (Large displacement formulation). Деформации материала трубы в задаче "большими" не будут, а перемещения, с учетом того, что в конструкции присутствует тонкостенный объект, можно отнести к классу "больших". Поэтому активизируем соответствующую опцию, после чего нужно сделать выбор между формулировками для обработки лагранжиана: обновляемым (**Updated lagrangian**) и полным (**Total lagrangian**). При работе с физически нелинейными объектами этого типа, как правило, используется формулировка обновляемого лагранжиана.

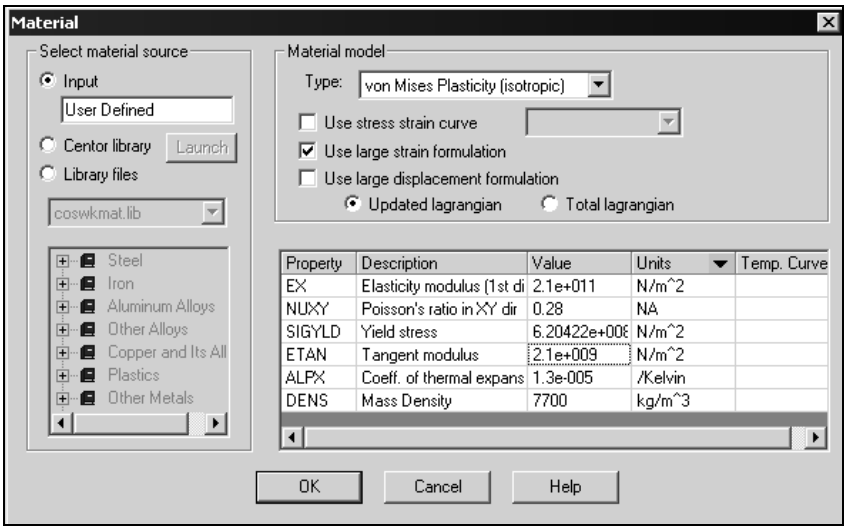


Рис. 4.4. Характеристики материала трубы

- Пластина, имитирующая плиту пресса. Как упоминалось, этот объект необходим исключительно как "посредник" для приложения силы. Основное требование к нему — достаточная жесткость. В то же время желательно,

чтобы размер пластины был минимален — так уменьшится размерность задачи. Поэтому для пластины назначим материал с жесткостью в два раза больше жесткости материала трубы. Почему именно такая величина? Чем больше различие модулей упругости деталей, образующих сборку, тем хуже сходимость вычислительного процесса. Учитывая, что податливость материала пуансона на несколько порядков выше, чем у стали, то ввод еще более жесткого материала определенно не улучшит ситуацию.

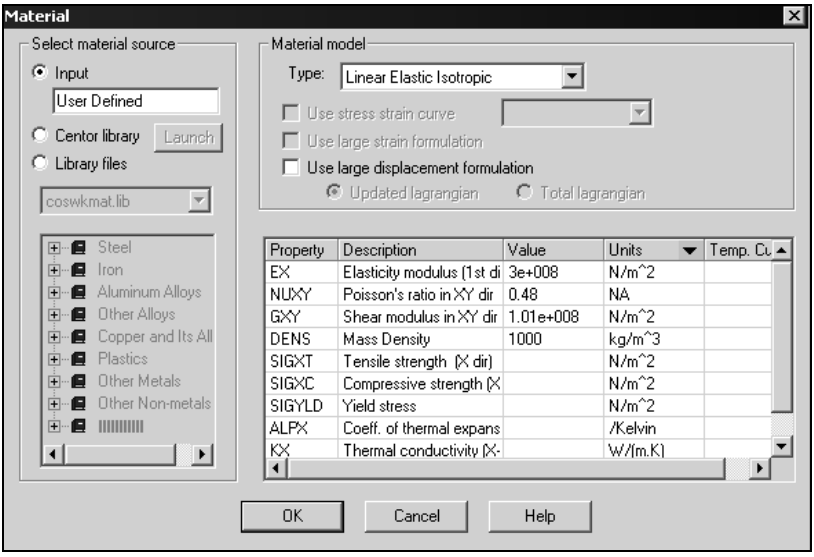


Рис. 4.5. Характеристики сплошного полиуретана

- Пуансон. Это позиция, предоставляющая наибольший простор для "творчества". Число типов полиуретанов велико, причем различия с точки зрения механики принципиальны. Например, сплошной полиуретан можно отнести к классу резиноподобных несжимаемых материалов, для которых применимы гиперэластичные модели деформирования. Этот подход требует наличия достоверных экспериментальных коэффициентов, подставляемых в выражение для плотности энергии деформации (в DesignSTAR доступны функции Муни — Ривлина (Mooney — Rivlin) и Огдена (Ogden)). Мы же ограничимся назначением коэффициента Пуассона близким к 0,5 (рис. 4.5). Если же используется пенополиуретан, то поскольку он характеризуется высокой сжимаемостью (не в смысле невысокой жесткости, а из-за малого коэффициента Пуассона), то необходимо использовать модель деформирования на базе выражения для плотности энергии Блатца — Ко (Blatz — Ko). Соответствующие характеристики показаны на рис. 4.6. Еще одной особенностью полиуретана, в частности пористого, может

быть большой уровень остаточных деформаций. Мы не будем обращать на это внимание по причине того, что на необратимую деформацию трубы при первом приложении силы они не влияют. Для данной модели деформирования используется формулировка полного лагранжиана (Total lagrangian).

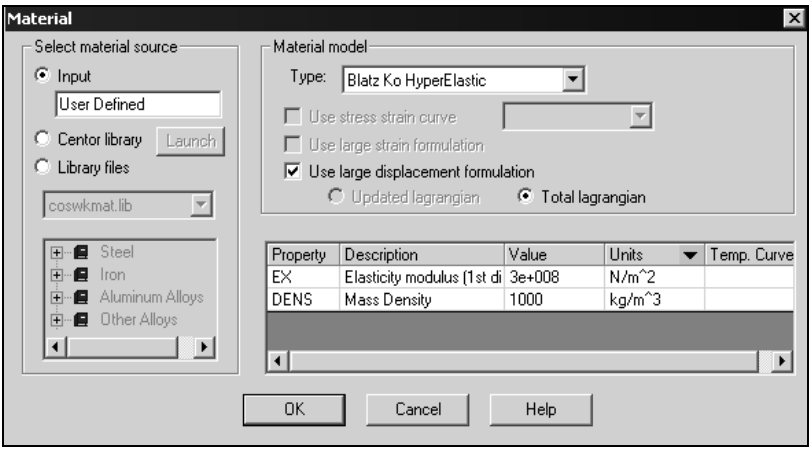


Рис. 4.6. Характеристики пенополиуретана

Подготовка расчетной модели. Задача будет решаться посредством пространственных конечных элементов, поэтому, учитывая наличие пластического деформирования трубы, необходимо построить сетку для нее так, чтобы по толщине модели располагалось два конечных элемента. Это позволит с удовлетворительной точностью описать распределение упругопластических напряжений вдоль нормали к поверхности. Поскольку ни COSMOSWorks, ни DesignSTAR не позволяют управлять числом конечных элементов по толщине, то прибегнем к обходному приему. Разобьем цилиндр по срединной поверхности на две части и оформим каждую из них как самостоятельную деталь. Тогда, поскольку программа генерирует сетку на каждой из деталей, результатом могут стать два варианта: или сетки не будет совсем, или на каждой из деталей по толщине будет располагаться минимум по одному элементу. Понятно, что плотность сетки следует увеличить в полиуретановой прокладке и возле конца трубы, к которому приложена нагрузка. Конечно-элементная модель конструкции в целом, а также ее фрагмент в окрестности пуансона показаны на рис. 4.7.

Кинематические граничные условия для трубы состоят в фиксации радиального перемещения на полосе на нижней части наружной трубы. Эта полоса выделялась на геометрической модели (команда **Линия разъема** SolidWorks). Поскольку данная аппроксимация не вполне соответствует реальности, необ-

ходимо будет обратить внимание на картину распределения напряжений в этой зоне. Для предотвращения смещения в продольном направлении назначается равным нулю нормальное перемещение на участке наружной трубы на заднем недеформированном торце. Соответствующая площадка формировалась аналогично полосе снизу. Разумеется, используем условие симметрии — геометрической и статической. Для этого расчету подвергаем половину модели, а на плоских гранях в разрезе назначаем условие скольжения — равенство нулю нормальных перемещений. На рис. 4.7 все заделки показаны на фоне сетки.

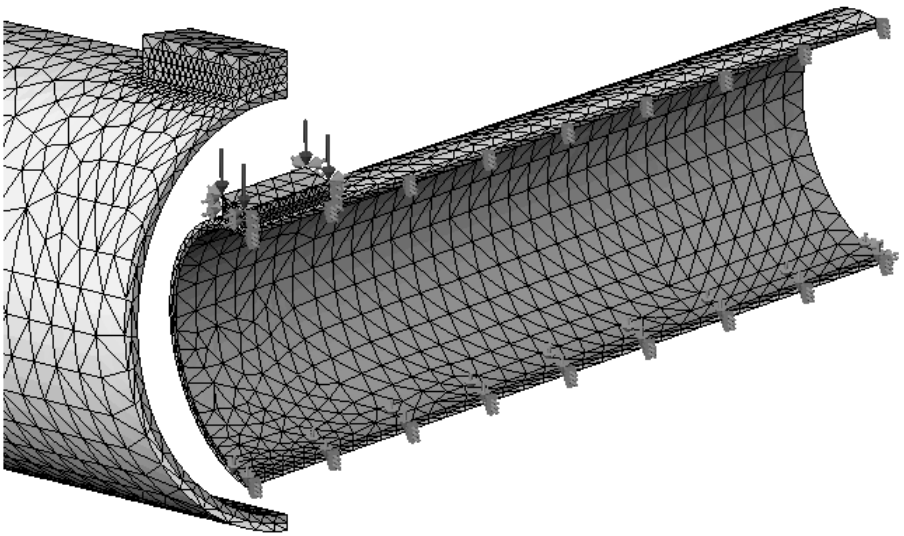


Рис. 4.7. Конечно-элементная модель и граничные условия

Как упоминалось, нагрузку на пластину можно прикладывать в виде перемещения или усилия. С точки зрения выработки рекомендаций по обеспечению заданных параметров техпроцесса, первый вариант более предпочтителен. Перемещение плиты, вызывающее некоторую остаточную деформацию (она будет результатом расчета), фигурирует уже в условии задачи. Смоделировать этот процесс можно двумя способами. Первый — увеличивать перемещение до некоторой величины, а затем возвращать его обратно. Труба сначала будет следовать за пуансоном из-за эффекта пружинения, сопровождаемого подпором не потерявшего упругость полиуретана. При этом нужно следить, не выходит ли труба из контакта с пуансоном. Еще один вариант — приложить перемещение, а затем просто "снять" это граничное условие. Однако реализация в DesignSTAR зависимых от времени граничных условий не позволяет имитировать ни одну из моделей этого процесса (в COSMOSWorks 2005 первый вариант смоделировать можно). Поэтому будем прикладывать

силу. Она задается величиной и законом изменения — **Time curve** (Кривой времени) — рис. 4.8, на которой есть три участка (еще раз отметим, что параметр здесь — абстрактное время):

- наклонный левый — рост нагрузки;
- горизонтальный — вспомогательный интервал, предназначенный для повышения наглядности результатов (в силу того, что параметры материала не зависят от времени, обязательным он не является);
- наклонный правый — уменьшение нагрузки. В принципе, можно было бы увеличить "скорость" снятия нагрузки, однако программа автоматически подбирает шаг исходя из условий точности и устойчивости (об этом см. далее). Поэтому наклон, по сути, может быть любым.

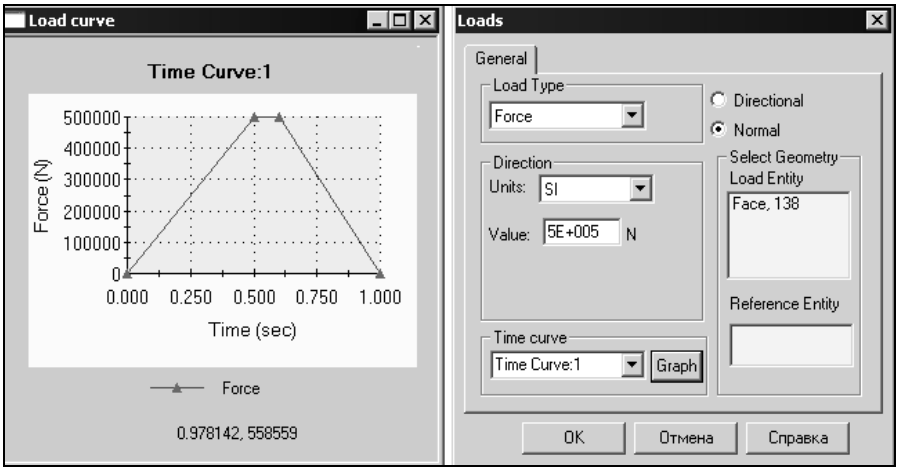


Рис. 4.8. Закон приложения силы во времени

Поскольку к пластине, имитирующей плиту пресса, приложена вертикальная сила, то встает вопрос о фиксации перемещения пластины в поперечном и продольном направлениях. Первое, в принципе, уже имеется: это условие симметрии. Тем не менее усилим его фиксацией нормального перемещения на противоположной к плоскости симметрии грани. Это повысит жесткость механической системы и, надеемся, устойчивость вычислений. Следующий вопрос — назначение заделок в продольном направлении. В реальности плита пресса не имеет возможности перемещаться, оставаясь горизонтальной. Это требование реализуем, назначая скольжение на передней и задней гранях. Данные условия не вполне соответствуют реальности, т. к. пластина, на которую действует вертикальная сжимающая нагрузка, лишается порожденной эффектом Пуассона возможности расширяться в поперечном направлении. Это несколько увеличивает жесткость модели. Поскольку скольжение

происходит без трения, то вся нагрузка передается на пуансон и, следовательно, здесь проблем нет. А т. к. пластина не будет деформироваться в поперечном направлении, то из-за упомянутого эффекта Пуассона она будет препятствовать расширению сжимаемого полиуретана в стороны (он связан с пластиной условием совместности перемещений на границе), также увеличивая жесткость системы. Этой погрешностью можно пренебречь, поскольку модуль упругости полиуретана значительно ниже, чем стали.

Проблема выбора типа граничных условий на границе контакта деталей не стоит. Никаких других вариантов, включая скольжение по границе контакта, кроме **Bonded** (Совместного перемещения) в нелинейном режиме DesignSTAR не предоставляет.

Настройка вычислительного процесса. С точки зрения объема вычислений задача весьма трудоемкая и не гарантирующая получение адекватного результата. Сочетание в конструкции резиноподобных материалов с жестким металлом, способным к пластическому деформированию, требует значительного нулевого цикла на подгонку и доводку параметров настройки с целью, если выражаться тактично, адаптации результатов под конкретные данные. Все это усугубляется значительным временем расчета каждого варианта. Однократный расчет модели на компьютере с процессором Pentium 4, частота 2,2 МГц занимает до одного часа (и это при отсутствии нелинейности, обусловленной изменением площадки контакта!).

В отличие от упругих моделей, где рекомендовалось тестирование задачи производить с использованием линейных конечных элементов, документация и расчетная практика требуют использовать параболические конечные элементы. Причина — существенно лучшая сходимость в нелинейных задачах. Группа параметров, определяющих вычислительный процесс и связанных с физической природой материалов, была описана выше. Рассмотрим содержимое окна **Nonlinear Analysis** (Нелинейный анализ) DesignSTAR, ответственного за управление нелинейными расчетами (рис. 4.9 и 4.10). Оно вызывается командой **Properties** (Свойства) из контекстного меню пиктограммы, соответствующей данному анализу.

На вкладке **Solution** (Решение) этого окна необходимо определить следующие параметры:

- **Start time**, **End time, Increment** (Время начала и конца процесса, Приращение). Ранее была определена Кривая времени. Поэтому расчет стартует при 0 единиц и заканчивается при 1 единице. Начальное приращение назначаем исходя из того, при каком значении параметра времени начнутся пластические деформации. Рекомендуется, чтобы этот шаг не был большим. Но поскольку сначала происходят упругие деформации, то малый шаг приводит к большому объему неэффективных вычислений. В данной задаче следует выбрать приращение от 0,1 до 0,2;

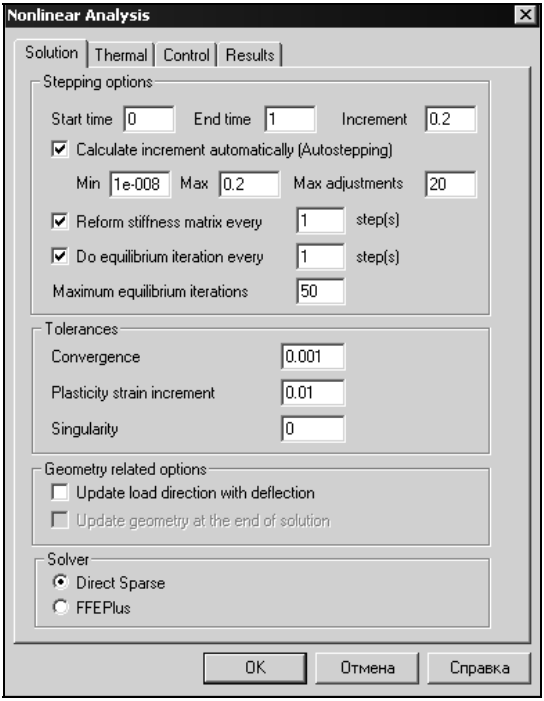


Рис. 4.9. Окно **Nonlinear Analysis**, вкладка **Solution**

- **Calculate increment automatically** (Автоматический подбор приращения). Необходимо активизировать обязательно. Причина все та же — на этапах упругого нагружения и упругой разгрузки шаг допускается большим. При больших пластических деформациях (как при их увеличении, так и при уменьшении) необходим малый шаг. Максимальное приращение выбирается на базе приведенных выше соображений. Предельное число попыток задается на основании опыта. В данной задаче, если не помогло два-три десятка попыток, то расходимость порождена физикой процесса, в частности появлением пластического шарнира;
- **Reform stiffness matrix every ... steps** (Обновлять матрицу жесткости системы каждые ... шагов). Чем "активнее" в процессе деформирования системы изменяется ее геометрия и жесткость, тем меньше должен быть этот параметр. В нашем случае 1 — проверять на каждом шаге;
- **Do equilibrium iteration very ... steps** (Проверка уравнений равновесия системы каждые ... шагов). Аналогично предыдущей опции, чем "больше" в процессе деформирования системы изменяется направление и величина усилий, тем меньшей следует назначать данную величину. В нашем случае 1 — проверять на каждом шаге;

- **Convergence** (Сходимость решения). Критерий окончания выполнения процесса, построенный на оценке перемещений. Присваиваем 0,001;
- **Plasticity strain increment** (Приращение пластических деформаций). Если моделируется физическая нелинейность, то здесь должно быть указано максимально допустимое приращение пластических деформаций на одном шаге. Очевидно, что в качестве верхнего предела можно ориентировочно использовать максимальную величину упругих деформаций (для линейного анализа), поделенную на число шагов. Если же она "слишком" малая, то этот факт вступает в противоречие с размером шага. В нашем примере назначим 0,01;
- **Singularity** (Сингулярность). Параметр, влияющий на процесс сходимости для проблем со значительной нелинейностью. Меньшая толщина — большее влияние. По умолчанию следует использовать 1. Допустимо 0 и 0,5;
- **Update load direction with deflection** (Корректировать направление нагрузки согласно деформации). При анализе по оболочечной модели — актуальный фактор, но в данной задаче направление нагрузки изменяется незначительно;
- **Update geometry at the end of solution** (Обновлять геометрию модели после решения). Геометрическая модель модернизируется с учетом перемещений, полученных в результате расчета. В версии DesignSTAR 4.5 опция не поддерживается;
- **Solver** (Решатель). Рекомендации по выбору решателей соответствуют линейной задаче. **Direct Sparse** — более устойчивый, **FFEPlus** — требует меньше ресурсов и — в некоторых ситуациях — быстрее работает.

На вкладке **Control** (Управление) (рис. 4.10) нужно уделить внимание следующим параметрам:

- **Control method** (Метод управления процессом). Определяет алгоритм, по которому назначаются приращения по кривой нагружения. Выбираем **Force** (Сила), т. е. алгоритм будет назначать приращения силы. Для задач с физической нелинейностью этот подход наиболее употребителен. Однако если бы в ходе нагружения был шанс получить прощелкивание, то нужно было бы использовать другие варианты;
- **Iterative method** (Алгоритм нелинейного решения). При первых попытках следует попробовать **NR** (Newton — Raphson) как наиболее подходящий для решении задач с физической нелинейностью при неизвестной оценке сходимости.

На вкладке **Results** определяем объекты, для которых будут строиться графики зависимости интересующего нас параметра от переменной, имитирующей время. Для данной задачи графики являются весьма информативными.

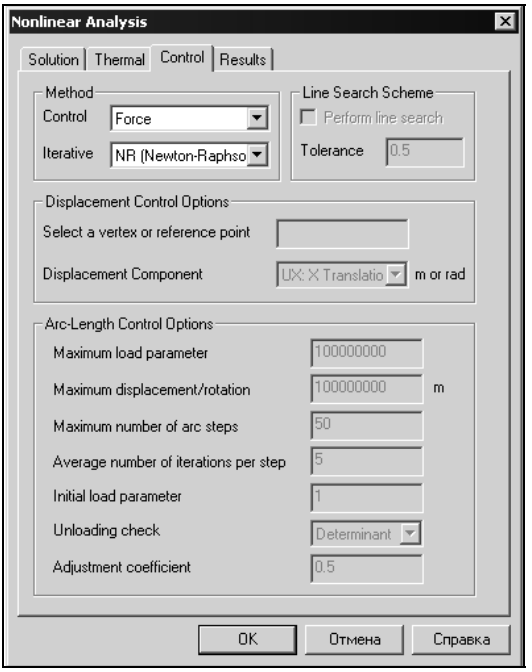


Рис. 4.10. Окно **Nonlinear Analysis**, вкладка **Control**

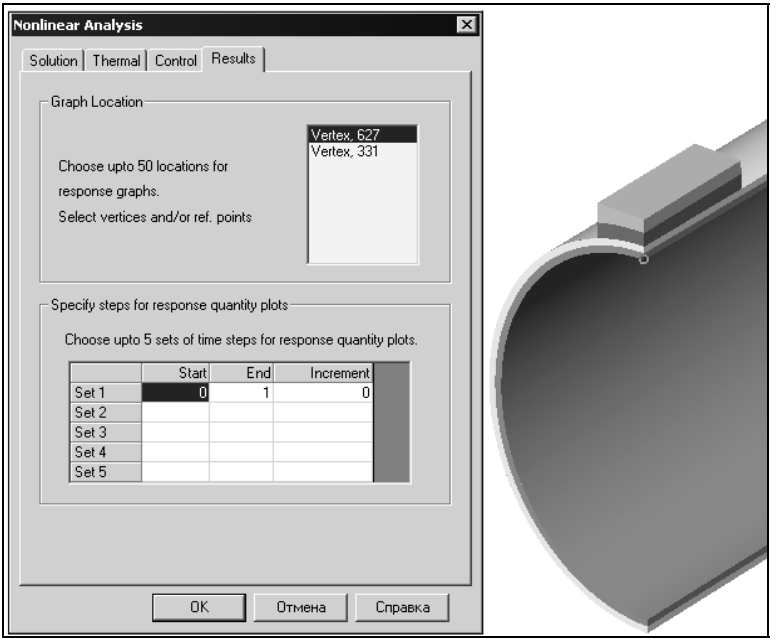


Рис. 4.11. Назначение точек отклика

В качестве Reference points (Точек отклика) будем использовать вершины на внутренней поверхности деформируемого торца трубы: первая — на внутреннем слое, вторая — на наружном (рис. 4.11). Контролировать будем вертикальное перемещение (UY). Назначаем интервал наблюдения так, чтобы он охватывал весь период расчета.

Вычисления и интерпретация результатов. Нелинейный анализ имеет большую вычислительную трудоемкость. Отработку конечно-элементной модели, назначение и проверку граничных условий следует выполнять на упругой модели. На ее базе можно получить величину нагрузки, при которой начнется пластическое течение. Ее определение производится вполне элементарно:

1. Присваиваем силе некую величину силы, например, 1.
2. Выполняем упругий расчет.
3. Отображаем диаграмму эквивалентных напряжений, скрыв перед этим все детали за исключением тех, которые моделируют трубу.
4. Активизируем вкладку **Settings** (Настройки) окна **Stress Plot** (Диаграмма напряжений) и ставим флажок для опции **Show annotation for maximum** (Показать комментарий для максимума).
5. Сравниваем его с величиной предела текучести материала (SIGYLD). С учетом того, что анализ физически и геометрически линейный, то сила, при которой начнется пластическое течение, пропорциональна отношению предела текучести к максимальному эквивалентному напряжению.

Менее предсказуемым является момент, когда конструкция перестает нести увеличивающуюся нагрузку — происходит потеря ее несущей способности. Если, как в нашей задаче, нагружение "мягкое", т. е. назначается нагрузка (в отличие от "жесткого", где прикладывается перемещение), то вычислительный процесс в этот момент начнет расходиться. В диагностическом сообщении информация о причинах не расшифровывается — они могут быть самыми разными. Поэтому, в отличие от расчета упругого, весьма желательно сначала провести анализ предельной нагрузки. Для этого рекомендуется следующая последовательность:

1. В качестве нагрузки задать вертикальное перемещение. Оно должно иметь величину, несколько большую, чем та, которая требуется в реальной конструкции.
2. Определить закон изменения перемещения как линейный без разгрузки.
3. Выполнить расчет.
4. Визуализировать картину напряжений. Если на последнем шаге присутствует большая зона пластических деформаций, то можно считать переме-

щение достаточным для того, чтобы гарантировать наличие требуемых остаточных деформаций.

5. Вывести величину силы реакции на верхней грани пластины. Если на каком-либо шаге она начнет уменьшаться, то это можно трактовать как признак потери несущей способности.

Очевидно, что основной интерес представляют напряжения в трубе. Наиболее актуальна картина напряжений в момент приложения полной нагрузки — именно тогда зона пластических деформаций максимальна. Идентификация этих областей осуществляется сравнением эквивалентных напряжений с пределом текучести — они должны быть ему равны (разумеется, с учетом конечной точности вычислений). Это, кстати, один из критериев корректности исходной модели и настройки вычислений.

Традиционный вопрос: какие напряжения принимать во внимание — вычисленные в узлах или осредненные по элементам? В данной задаче это не слишком актуально, поскольку конечной целью являются перемещения. Также в силу того, что при значительных деформациях в трубе возникает подобие пластического шарнира, то напряжения в узлах и в центрах элементов не должны значительно отличаться.

4.5.4. Анализ технологического процесса

Расчет исходного варианта. Неупругие задачи порождают бóльшую номенклатуру результатов, чем линейные. Общее представление о процессе можно получить на основе кривых Nonlinear Response (Нелинейный отклик), отображающих зависимость перемещения в заданной точке от параметра времени. На рис. 4.12 показана кривая для точки отклика, назначенной ранее (см. рис. 4.11). Кривая состоит из трех участков. Первый соответствует увеличению нагрузки, которая изменяется пропорционально времени. Перемещения же увеличиваются нелинейно: чем больше нагрузка, тем активнее их приращение. Физический смысл явления — уменьшение несущей способности изделия. Кривая имеет вертикальную асимптоту, которая достигается при некотором значении силы (иллюстрация слева). Это предел несущей способности, соответствующий подобию пластического шарнира. Следующий участок — горизонтальный отрезок. Он соответствует интервалу времени, когда нагрузка постоянна. Величина вертикального перемещения достигает максимума. Последний интервал — снятие нагрузки и уменьшение деформаций. За счет пружинения труба частично восстанавливает исходную форму. Соответствующий участок на диаграмме близок к линейному, но строго линейным (по крайней мере, в начале) он не является. При этом конечная точка соответствует остаточным деформациям.

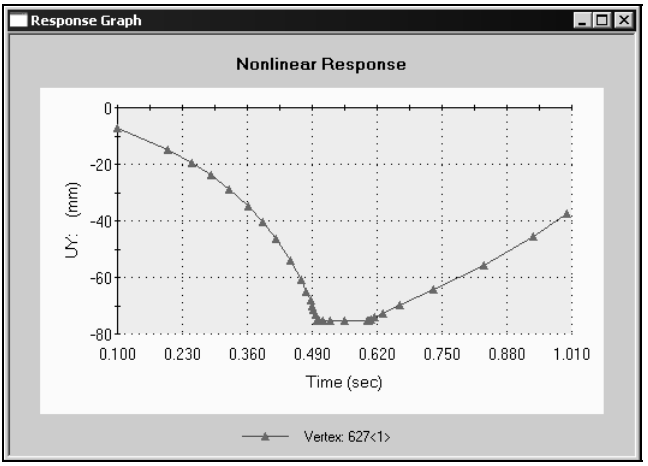


Рис. 4.12. Кривая отклика

Интересно проанализировать изменение шага итерационного процесса в зависимости от состояния изделия (результат активизации опции **Autostepping** (Автоматический подбор шага) вкладки **Solution** (Решение) окна **Nonlinear Analysis** (Нелинейный анализ)). Шаг уменьшается в зоне, когда небольшое приращение нагрузки приводит к значительному росту деформаций, а также если изменяется характер нагружения. В нашем случае — это момент, когда постоянная ранее сила начинает уменьшаться.

Имея кривые отклика, можно адекватно оценивать диаграммы перемещений, деформаций, другие результаты, зависящие от параметра времени. Рассмотрим, например, две картины эквивалентных напряжений, отображенные на фоне деформированного (с увеличением масштаба перемещений) вида. Первая (рис. 4.13) соответствует максимальной нагрузке: на кривой отклика это горизонтальный участок графика. Вторая (рис. 4.14) — конечное состояние конструкции. Для получения диаграммы, соответствующей заданному шагу, нужно, подав команду **Define** (Определить) из контекстного меню, соответствующего пиктограмме **Stress** (Напряжения) соответствующего анализа, в окне **Stress Plot** (Диаграмма напряжений) в поле **Step Number** (Номер шага) вкладки **Display** (Отобразить) выбрать номер шага, для которого осуществляется визуализация (рис. 4.15). Здесь присутствуют два затруднения. Первое — программа не запоминает информацию для всех шагов, ограничиваясь точками перегиба на графике и его конечной точкой. Второе — программа не дает пользователю возможности сопоставить номер шага и соответствующий ему параметр времени. Это можно сделать, отсчитывая точки на кривой отклика и сопоставляя их с параметрами процесса.

Если приложена максимальная сила, то пластическое состояние достигается в нескольких областях трубы. Первая — зона вблизи пуансона, а также вдоль

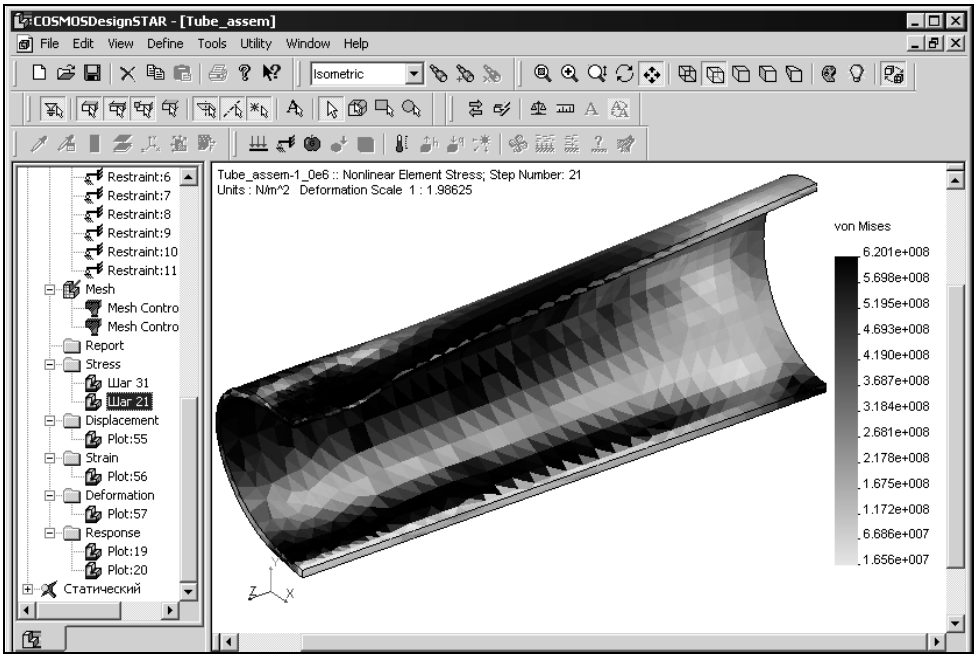


Рис. 4.13. Эквивалентные напряжения при максимальной нагрузке

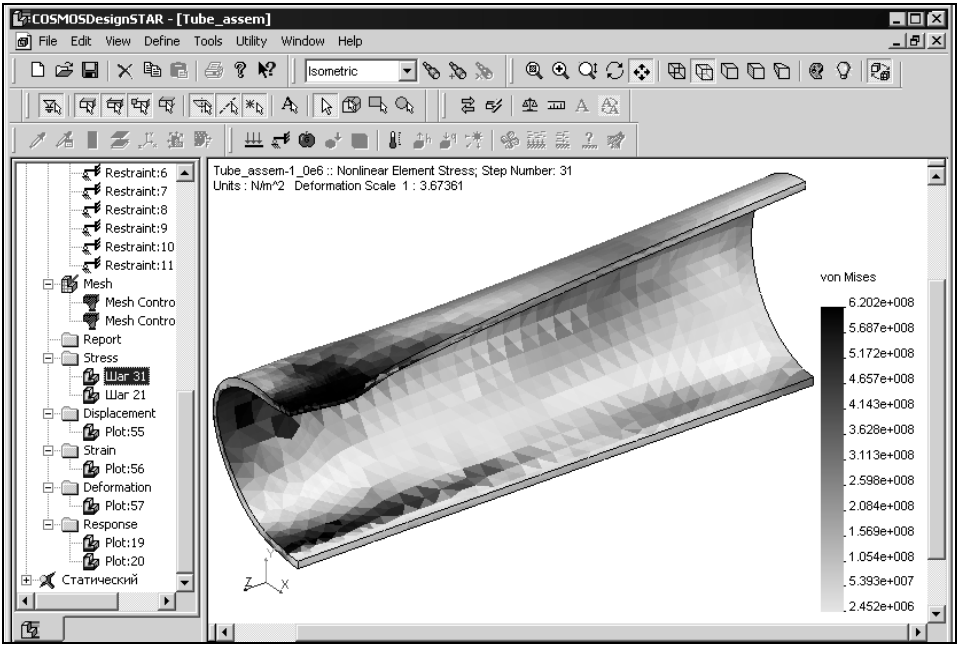


Рис. 4.14. Эквивалентные напряжения после снятия нагрузки

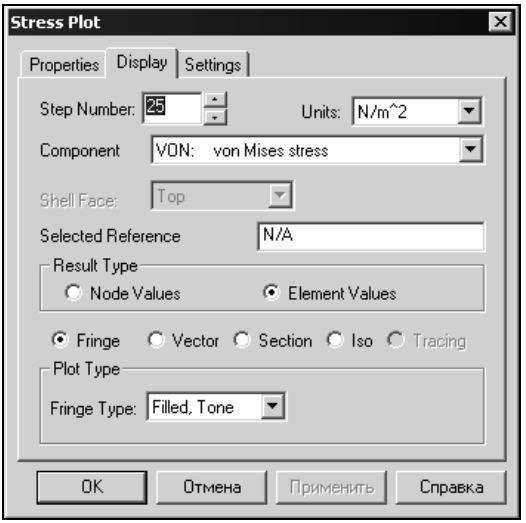


Рис. 4.15. Параметры окна **Stress Plot** при выборе отображаемого шага расчета

верхней части трубы. Снизу ей соответствует еще одна область концентрации пластических деформаций. Она характеризуется тем, что максимум локализован не под осью, а смещен вдоль образующих и находится у края опоры. Следует обратить внимание на то, что в зоне контакта с пуансоном образующая трубы теряет прямолинейность. Еще две зоны, где локализуются пластические деформации, находятся вблизи горизонтального диаметра. Таким образом, закладывается база для неоднородных остаточных пластических деформаций, которые приведут к отклонению формы от требуемой (окружности). Следующий рисунок — картина эквивалентных напряжений после разгрузки. Видно, что они весьма значительны, причем настолько, что остаются выраженные очаги пластического состояния. Они порождаются пружинением трубы после снятия нагрузки и локализованы вблизи поверхностей. При этом напряжения, действующие на внутренней и наружной поверхностях трубы, противоположны по знаку.

Профиль деформируемого торца трубы показан на рис. 4.16. Слева — исходное состояние, в середине — после приложения максимальной нагрузки, справа — после снятия нагрузки. Налицо приближение формы профиля к окружности.

4.5.5. Оценка влияния модификации на характеристики и прогноз функциональности

В силу нелинейного характера процесса невозможно непосредственно предсказать величину нагрузки, обеспечивающей заданное остаточное перемеще-

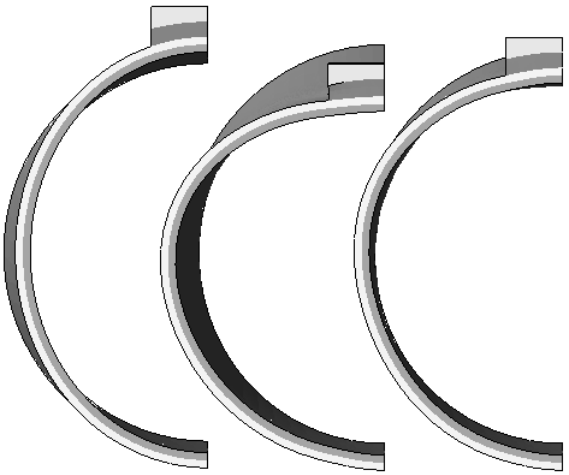


Рис. 4.16. Изменение профиля трубы в процессе деформирования

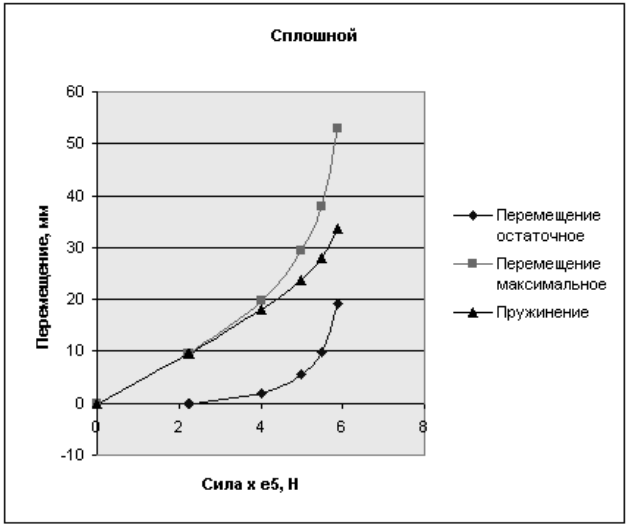


Рис. 4.17. Зависимость максимального перемещения от силы (пуансон изготовлен из сплошного материала)

ние. Для построения алгоритма прогноза выполним несколько расчетов для одной и той же модели, но с различными нагрузками. По результатам построим три графика. Аргумент — величина силы; функции — максимальное перемещение, пружинение, остаточное перемещение. На рис. 4.17 показаны зависимости для модели, где в конструкции используется сплошной полиуретан (характеристики приведены на рис. 4.4). Кривые максимального переме-

щения и пружинения в начале имеют общий линейный отрезок. Это значит, что деформирование происходит в упругой зоне и после разгрузки система возвращается в исходное состояние. Остаточные перемещения соответственно отсутствуют. При дальнейшем увеличении нагрузки происходит опережающий рост как полных перемещений, так и остаточных. Оба графика имеют вертикальную асимптоту, физический смысл которой — потеря несущей способности трубы. Интересно, что кривая, отображающая пружинение, в начале имеет практически линейный участок. Если рассматривать остаточное перемещение как аргумент, а силу — как функцию, то, имея данную кривую, можно решить обратную задачу: подобрать нагрузку по величине перемещения.

Исследуем влияние характеристик материала пуансона на процесс. Если пуансон выполнить из пенополиуретана (характеристики показаны на рис. 4.5), то вид кривых принципиально не изменится (рис. 4.18). Одновременно с назначением соответствующих характеристик нужно выбрать одну из моделей деформирования, описывающих такой тип сред. В нашем случае наиболее подходящей является модель Блатца — Ко, поскольку она не требует дополнительных параметров. Для других, доступных в DesignSTAR: Муни — Ривлина и Огдена, необходимы соответствующие коэффициенты.

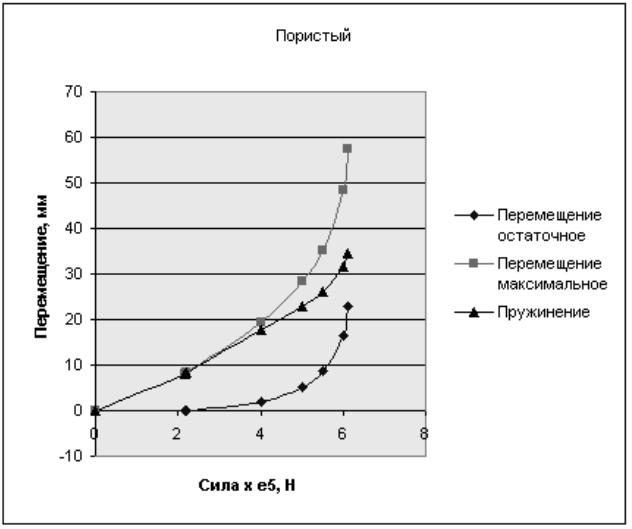


Рис. 4.18. Зависимость максимального перемещения от силы, пуансон изготовлен из пенополиуретана

Если внимательно рассмотреть деформированное состояние трубы после снятия нагрузки (см. рис. 4.14), то можно увидеть, что сверху в задней части пуансона образовалась вмятина. Можно предположить, что причиной является

отсутствие у пуансона возможности поворачиваться относительно поперечной оси. Устранить это явление несложно — достаточно снять граничное условие в виде равенства нулю перемещения на передней и задней гранях пластины, имитирующей плиту пресса, и на пуансоне. Диаграммы зависимости перемещений от силы для такой модели (материал пуансона — сплошной полиуретан) показаны на рис. 4.19. По сравнению с моделями, где вращение зафиксировано, система стала существенно более податливой. Подберем величину силы так, чтобы остаточное перемещение было равно 20 мм. В соответствии с диаграммой, необходимо приложить силу порядка 4.8e5 Н. На рис. 4.20 показано поле перемещений на фоне деформированного вида: сверху — в утрированном масштабе перемещений; снизу — в реальном. Видно, что произошла ликвидация вмятины возле задней части пуансона. Фактическая максимальная величина остаточного перемещения несколько выше ожидаемой, но на фоне точности расчета ошибкой можно пренебречь. Можно уточнить расчет, несколько уменьшив величину силы.

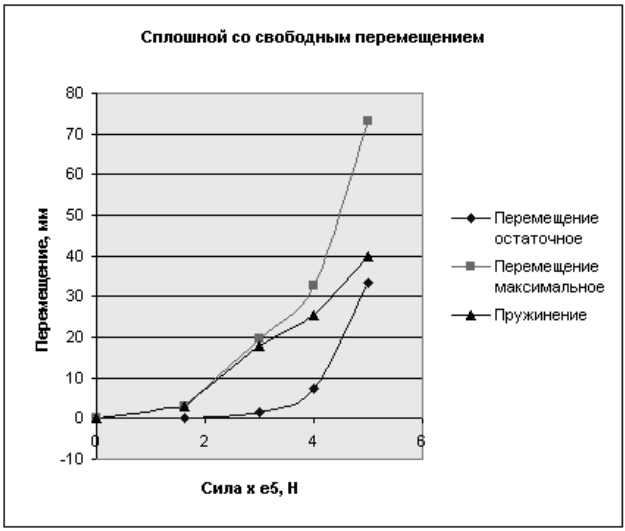


Рис. 4.19. Зависимость максимального перемещения от силы (пуансон может поворачиваться)

Соберем информацию о трех видах анализа на единую диаграмму (рис. 4.21). Выводы следующие:

- тип материала пуансона оказывает влияние на результат, однако его действие не имеет критической значимости;
- при использовании сплошного пенополиуретана остаточные перемещения несколько выше, чем при использовании пористого с эквивалентной жесткостью. В данном примере это объясняется влиянием отсутствия стесне-

ния деформаций, обусловленного малой (коэффициент Пуассона близок 0,5) сжимаемостью материала;

- наличие у пуансона степени свободы — поворота относительно поперечной оси в несколько раз уменьшает требуемую силу, а также позволяет получить форму трубы более близкую первоначальной.

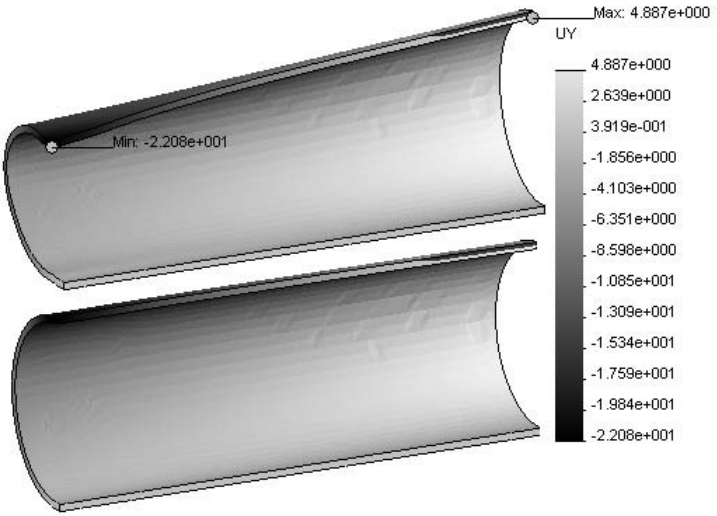


Рис. 4.20. Остаточные перемещения на фоне деформированного вида: сверху — утрированный масштаб, снизу — натуральный

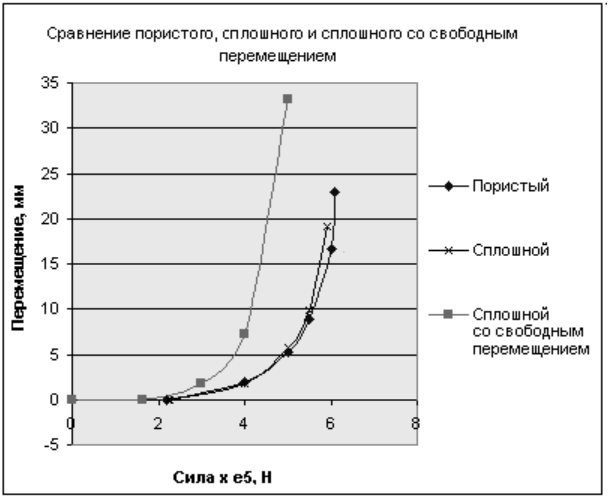


Рис. 4.21. Влияние тангенциального модуля на остаточные перемещения

Затронем еще один вопрос — как влияют пластические свойства материала трубы на результат? Во всех расчетах, результаты которых приведены выше, предполагалось, что тангенциальный модуль металла составляет 1/1000 исходного. Проанализируем влияние этой величины на конечное состояние трубы. График зависимости показан на рис. 4.22. Крайняя левая точка соответствует идеально пластическому материалу; крайняя правая — идеально упругому. В последнем случае остаточные деформации отсутствуют, и труба после снятия нагрузки полностью восстанавливает исходную форму. Существенное влияние пластичности на результат требует, во-первых, тщательного подбора характеристик материала для расчета, а во-вторых, не менее добросовестной оценки воспроизводимости параметров металла для труб различных производителей. Вариация свойств может порождаться как неоднородностью поставляемого листа, так и различием режимов переработки его в изделие.

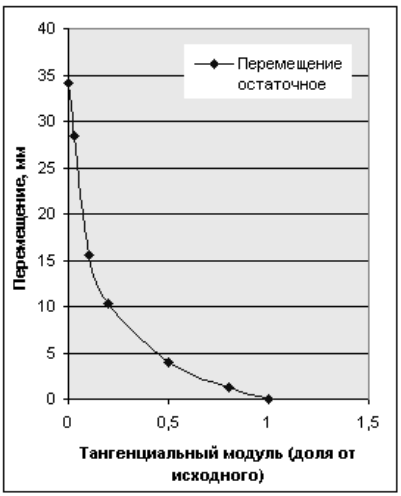


Рис. 4.22. Влияние тангенциального модуля на остаточные перемещения

В заключение обратим внимание на факторы, которые требуют внимания при решении аналогичной задачи для труб другого типоразмера или с отличающимися параметрами эллиптичности. Учитывая нелинейность проблемы, для труб с другой толщиной или диаметром необходимы новые расчеты. Разумеется, можно использовать те же граничные условия и параметры материалов. Для изменения размеров расчетной модели, с учетом ассоциативной связи расчетной модели DesignSTAR (и, тем более, COSMOSWorks) и SolidWorks, достаточно поменять размеры модели геометрической, после чего обновить информацию в окне DesignSTAR, перестроить сетку и осуществить расчет. В COSMOSWorks для этих целей предусмотрен инструмент сценариев анали-

за. Что же касается параметра эллиптичности, то он, безусловно, влияет на результат. Тем не менее можно предположить, что в некотором диапазоне размеров результаты для той или иной фиксированной величины могут быть распространены на другие конфигурации. Этот вопрос требует проведения дополнительного исследования. Мы же ограничимся констатацией того факта, что величина нагрузки, порождающей заданную остаточную деформацию, зависит от формы исходного сечения.

4.6. Выводы

Возможности нелинейного анализа COSMOSWorks и DesignSTAR позволяют решать базовые задачи, возникающие в ходе проектирования изделий машиностроения, в частности тех, которые изготовлены из металла и не связаны с большими пластическими деформациями. Рассмотренный пример деформирования "весьма" тонкостенной трубы находится, по нашей оценке, "на грани" функциональности DesignSTAR. Надо сказать, что соответствующие возможности COSMOSWorks 2005 авторы не успели тщательно протестировать. Поэтому рекомендуем читателям сделать это самостоятельно. Это имеет смысл, в частности, потому, что примеры, сопровождающие поставку COSMOSWorks 2005, демонстрируют определенное развитие продукта. В то же время такие процессы, как тонколистовая штамповка, ковка и т. д., поведение высоконелинейных сред, образующих изделия типа автомобильных покрышек, заведомо недоступны для интегрированных программ семейства COSMOS.

В то же время рассматриваемые продукты весьма эффективны для задач, целью которых является поверочный расчет изделий за пределами номинальных условий эксплуатации. Например, в "нормальном" режиме объект функционирует в пределах упругой зоны, однако необходимо знать, что произойдет, если нагрузки будут превышены. Будет ли разрушение катастрофическим или же, несмотря на появление необратимых деформаций, несущая способность сохранится?



ГЛАВА 5

Аэрогидродинамика и теплопередача

Среди задач CAE, вычислительная аэро- и гидродинамика (CFD) оставалась, пожалуй, одним их самых неприступных бастионов для широкого круга практических инженеров. Программный продукт COSMOSFloWorks (и последующие за ним EFD.Lab, EFD.V5), наконец, сделали прикладные расчеты в области аэрогидродинамики и теплопередачи достоянием "трудящихся масс". Парадоксально, но факт: несмотря на то, что данные продукты были разработаны в России, они до сих пор не имеют русской документации. Тем лучше для вас, уважаемый читатель, ведь чем пытаться найти заветную тропу в лабиринтах документации, гораздо целесообразнее будет прочесть настоящую главу.

5.1. COSMOSFloWorks, EFD.Lab, EFD.V5

Все три продукта (COSMOSFloWorks, EFD.Lab и EFD.V5) выполняют одну и ту же миссию — прежде всего, это удобный инструмент в руках инженера для оценки аэродинамических и тепловых процессов. Кстати, все три продукта базируются на одной и той же вычислительной технологии. Первым из вышеупомянутых продуктов на рынке в 1999 году появился COSMOSFloWorks (до 2002 года FloWorks). Полностью интегрированный в SolidWorks, он, в первую очередь, предназначался для использования в отраслях промышленности с коротким циклом разработки (радиоэлектронная, производство трубопроводной арматуры, задачи вентиляции и теплообмена в жилых и производственных помещениях и др.). По сравнению с традиционными CFD пакетами, такой продукт, безусловно, имел принципиальные преимущества:

- задание исходных данных и просмотр результатов непосредственно в окне графического проектирования;
- возможность использования инженером, а не CFD-специалистом;

- минимальное время на подготовку исходных данных и просмотр результатов.

Продукт обладал, пожалуй, одним существенным недостатком — он являлся приложением только SolidWorks. После первых 2-х лет бурного продвижения на рынок стало ясно, что необходимы аналогичные продукты, работающие в интеграции с другими пакетами графического проектирования, а также продукт для аэрогидродинамического моделирования, не связанный с конкретной системой САПР. Появился даже новый термин EFD (Engineering Fluid Dynamics) — означающий направление в CFD, ориентированное на инженера-проектировщика. Как следствие, появились два новых продукта: EFD.Lab (первая версия вышла в 2002) и EFD.V5 (2004):

- EFD.Lab — самостоятельный продукт, позволяющий импортировать геометрию из подавляющего большинства систем графического проектирования (Pro/ENGINEER®, IPT (Autodesk Inventor®), Mechanical Desktop®, Unigraphics®, PAR (Solid Edge®), CADKEY®, IGES, STEP, Parasolid®, SAT (ACIS®), VDA-FS, VRML, STL, DWG, DXF™, TIFF, JPG, Viewpoint, RealityWave, HSF (Hoops)). Фактически EFD.Lab обладает всеми возможностями SolidWorks по пространственному моделированию и анализу за исключением процедур оформления чертежей. Кроме того, EFD.Lab обладает рядом дополнительных возможностей по сравнению с COSMOSFloWorks, что делает его более интересным для опытного пользователя. Интересной является возможность проведения расчета на удаленном компьютере. Это, с одной стороны, позволяет экономить оперативную память (поскольку в данном случае не требуется память для препроцессора и графической части продукта), с другой стороны, это чрезвычайно полезно при проведении параметрических расчетов. Есть ряд и других дополнительных возможностей;
- EFD.V5 — приложение, полностью интегрированное в CATIA V5. Следует заметить, что EFD.V5 вообще является первым CFD-приложением CATIA V5.

С точки зрения технологии все три продукта (COSMOSFloWorks, EFD.Lab и EFD.V5) базируются на одних и тех же технологических принципах и дефакто имеют одно и то же технологическое ядро. Ключевым элементом является использование прямоугольной сетки, пересекающей произвольным образом поверхность модели, созданной в системе графического проектирования. Использование такого подхода и обеспечивает преимущества технологии EFD (универсальность, надежность, простота использования).

Как уже отмечалось, основные элементы данных продуктов были разработаны и продолжают разрабатываться в России, в московском отделении немецкой фирмы NIKA GmbH. Независимо от мотивов, пользователь часто испы-

тывает желание взглянуть в глаза разработчиков программного продукта. Для этого помещаем здесь фотографию коллектива разработчиков данных продуктов, сделанную в 2003 году (рис. 5.1).

В этой книге рассматривается продукт COSMOSFloWorks версии 2005 года.



Рис. 5.1. Фотография разработчиков COSMOSFloWorks, EFD.Lab и EFD.V5

5.2. Кому и зачем нужны эти расчеты?

Поскольку у нашей Земли, в отличие, например, от Луны или Марса, имеется довольно плотная атмосфера, а также свободная вода в виде водоемов (океанов, морей, озер, речек, болот и др.) и различных (дождевых, снеговых, градовых) осадков, и, кроме того, в технике и быту широко используются разнообразные жидкие и газообразные продукты химической промышленности (иногда с ними приходится даже бороться), так что, по крайней мере, в пределах атмосферы Земли, все пространство вне твердых или пористых тел заполнено текучими средами, то в инженерной практике необходимость расчета течений текучих сред (газов и/или жидкостей) возникает очень часто, если не повсеместно.

- Для расчета силового (стационарного и/или нестационарного) воздействия текучей среды, движущейся относительно некоторого твердого тела, на это тело или его элементы (на конструкцию или ее элементы), например, в следующих случаях.
  - Тело неподвижно, а среда движется:
    - ветровые нагрузки на сооружения, например, здания, телебашни, трубы, мосты, рекламные щиты и т. п., — расчет необходим для определения прочностной стойкости сооружений к воздействию нагрузок;

- силы, действующие на тела и приводящие в движение, например, паруса кораблей, воздушных змеев, подвижные детали обратных клапанов, ветроэнергетические установки и т. п., — расчет необходим для определения движения тел под действием этих сил;
- силы и моменты, которые необходимо преодолевать при управлении различной трубопроводной арматурой — затворами, вентилями, клапанами. В случае больших размеров этой арматуры (гидроэлектростанции, магистральные трубопроводы и т. п.) эти силы и моменты могут быть очень существенными;
- силы тяги, создаваемые газами, вытекающими через различные выходные устройства, например, сопла.

- Среда неподвижна, а тело движется:
  - сила сопротивления, подъемная, боковая и другие силы, которыми текучая среда воздействует на различные движущиеся в ней (например, летящие в атмосфере или плывущие под водой) твердые тела (автомобили, поезда, самолеты, планеры, дирижабли, ракеты, снаряды, подводные лодки, бобслейные сани и т. п.).
- Движется и тело, и среда относительно тела:
  - различные насосы, турбины, крыльчатки, шнеки, вентиляторы, мешалки — необходимо, например, определить усилия (моменты), которые к ним надо приложить, чтобы обеспечить заданную скорость их вращения; или нагрузки (силы), действующие на элементы этих устройств (например, на лопатки турбины), с целью последующей оценки их прочностной стойкости к действию этих нагрузок.

- Для расчета воздействия (стационарного и/или нестационарного) твердого тела на текучую среду.
  - Силового воздействия канала на протекающую через этот канал текучую среду, т. е. силы гидравлического сопротивления канала:
    - потерь полного давления потока при течении через трубопроводную арматуру (клапаны, вентили, колена, сужения, расширения, тройники и т. п.);
    - расхода текучей среды через различные насосы, турбины, крыльчатки, шнеки, вентиляторы в результате воздействия на эту среду подвижных рабочих частей этих устройств.
  - Перемешивающего воздействия твердого тела на состав текучей среды, например:
    - времени, за которое две стратифицированные жидкости будут полностью перемешаны друг с другом в сосуде до заданной однородно-

сти с помощью вращающейся с заданной скоростью мешалки заданной формы;

- расстояния, на котором две текучие среды перемешаются друг с другом в канале до заданной однородности после их поступления в этот канал (например, через тройник).

- Для расчета воздействия различных физических факторов на состав и направление движения текучей среды.
  - Гравитации (архимедовой силы):
    - определение эффективности работы вытяжной или приточной вентиляции (например, в химической лаборатории) с учетом сил плавучести.
  - Подвода тепла к текучей среде:
    - определение эффективности нагрева воздушной среды в помещении (комната, хранилище) системой кондиционирования (искусственного климата), а также определение расположения в этом помещении воздушных потоков, формирующихся в результате работы этой системы.
- Для решения задач сопряженного теплообмена.
  - Определение эффективности нагрева или охлаждения твердых тел текучей средой:
    - при наличии только свободной конвекции (приготовление пищи в котелке над костром);
    - в системах проточного наружного охлаждения (охлаждение конвертерных печей для плавки металлов, их фурм);
    - в системах завесного охлаждения (камеры сгорания реактивных двигателей);
    - в системах вынужденного проточного и свободно-конвективного охлаждения (например, процессоров и различных устройств в компьютерах).
  - Определение эффективности нагрева или охлаждения текучей среды твердыми телами:
    - в теплообменниках (химические производства, самогонные аппараты и т. п.);
    - в системах кондиционирования (искусственного климата) жилищ и хранилищ.

- Определение эффективности нагрева или охлаждения твердого тела при радиационном теплообмене с учетом естественной или вынужденной конвекции:
  - в печах, печах-грилях, при сушке на солнце и т. п.

❒ Для расчета движения твердых и/или жидких частиц в рассчитанном поле течения газа.

- Определение эффективности улавливания частиц различными устройствами (циклонами и др.).
- Определение эффективности разгона частиц различными устройствами (пескоструйками и др.).
- Определение эрозии твердых тел в результате выпадения на них частиц (например, различная трубопроводная арматура, используемая в нефтедобыче; лопатки и другие детали компрессоров, работающих в запыленной атмосфере; сопла реактивных двигателей, работающих на металлизированном топливе и т. п.).
- Определение наноса (налипания) капель на твердые тела (например, в металлургии на фурмах конвертеров, в порошковой металлургии при производстве порошков металлов).

Параллельно с развитием техники развивались и инженерные, т. е. не требующие решения дифференциальных уравнений, методы оценки нужных для инженерной практики величин. В результате не всегда для решения перечисленных задач необходимы сложные расчеты с решением дифференциальных уравнений течения и теплообмена с помощью соответствующих программ (например, уравнений Навье — Стокса с помощью COSMOSFloWorks). Сопротивление труб течению однородной среды определяется с помощью достаточно простых полуэмпирических зависимостей.

Чтобы техника была конкурентоспособной на рынке, она должна не только удовлетворять всем современным требованиям покупателей, но также предлагать покупателям нечто большее в развитие этих требований. Это приводит ко все большему усложнению техники и, как следствие, к усложнению необходимых для ее разработки расчетов. Инженерная практика, по крайней мере, в России и других странах СНГ традиционно опирается на проведение экспериментальных исследований, что при их правильном планировании обычно обеспечивает высокую надежность техники. Единственный, но существенный в современных условиях, недостаток таких исследований — их высокая стоимость, которая обычно учитывается в конечной стоимости продукции, и время, необходимое для подготовки и проведения таких исследований. Это существенно снижает конкурентоспособность разрабатываемой техники, которая оказывается не только слишком дорогой, но и имеет характеристики, катастрофически отстающие от развивающихся требований рынка. А любые

попытки снизить эти финансовые и временные затраты за счет сокращения объема таких исследований (в современных условиях при существенно ослабленном государственном контроле за качеством продукции это происходит почти повсеместно) обычно также приводят к потере конкурентоспособности продукции — теперь уже из-за снижения ее качества.

Поэтому оптимальный, а во многих случаях и единственный, путь создания конкурентоспособной техники (продукции) — это сочетание параметрических расчетов (расчетных исследований), которые достаточно адекватно моделируют физические явления, определяющие интересующие покупателя характеристики изделия, с экспериментальными исследованиями, необходимыми для проверки этой адекватности. Естественно, расчеты должны выполняться с помощью оптимальной для разработки данной продукции программы, т. е. базирующейся на достаточно адекватных учитываемым физическим явлениям математических моделях и обеспечивающей выполнение всей совокупности необходимых расчетов за время, приемлемое для разработки данной продукции.

Успешное развитие продаж программы COSMOSFloWorks по всему миру объективно свидетельствует о применимости этой программы для проведения таких расчетов и расчетных исследований.

5.3. Возможности COSMOSFloWorks

Чтобы рассчитать физический процесс, т. е. изменение физических параметров в пространстве и времени, его надо сначала математически смоделировать. Поскольку физические процессы — результат действия законов физики, то наиболее адекватные физическим процессам математические модели представляют собой систему отражающих законы физики дифференциальных и/или интегральных уравнений (с привлечением, если надо, полуэмпирических и эмпирических констант и зависимостей) с граничными и начальными условиями, привязывающими данную математическую модель к поставленной конкретной физической (инженерной) задаче, т. е. определяющими данные физические процессы в этой задаче.

Поскольку используемые в математической модели системы дифференциальных и/или интегральных уравнений обычно не имеют аналитического решения, они приводятся к дискретному виду и решаются на некоторой расчетной сетке. Естественно, решение математической задачи существенно зависит как от способа дискретизации уравнений, так и от способа решения полученных в результате уравнений. Очевидно, решение математической задачи будет тем точнее, чем лучше расчетная сетка разрешает области нелинейного поведения решения уравнений, что, как правило, достигается использованием более мелкой расчетной сетки в этих областях.

Таким образом, в основе COSMOSFloWorks, как и любой другой расчетной методики (например, COSMOSWorks), лежит, во-первых, математическая модель рассчитываемых физических процессов и, во-вторых, способ решения поставленной математической задачи. Эти аспекты COSMOSFloWorks описаны соответственно в *разд. 5.3.1* и *5.3.2*.

5.3.1. Математическое моделирование физических процессов

COSMOSFloWorks базируется на последних достижениях вычислительной газо- и гидродинамики и позволяет рассчитывать широкий круг различных течений: двумерные и трехмерные, ламинарные, турбулентные и переходные, несжимаемые, сжимаемые, с до-, транс- и сверхзвуковыми областями, стационарные и нестационарные течения многокомпонентных текучих сред в каналах и/или вокруг тел, с учетом гравитации, пограничного слоя, в том числе с учетом шероховатости стенок, с теплообменом между текучей средой и твердым телом, которое, в свою очередь, может состоять из нескольких материалов; с расчетом теплопередачи в твердых телах, т. е. с решением задачи сопряженного теплообмена, в том числе с учетом радиационного теплообмена между поверхностями; течения через пористые среды как через рассредоточенные сопротивления; ламинарные течения неньютоновских жидкостей; течения сжимаемых жидкостей; двухфазные течения как движение жидких или твердых частиц в потоке текучей среды.

В качестве граничных условий, помимо обычной стенки, входных и выходных отверстий, могут быть заданы приточные или вытяжные вентиляторы, температура, тепловые потоки. Возможно, задание объемных источников тепла в текучей среде и/или в теле (если рассчитывается теплопередача в твердых телах), поверхностных источников тепла на поверхности твердого тела, а также радиационных потоков тепла.

Чтобы яснее очертить круг решаемых задач, отметим, что в настоящее время в COSMOSFloWorks не рассчитываются и не учитываются: изменение геометрии проточного тракта в процессе расчета (однако не изменяющее эту геометрию движение поверхности твердого тела может быть учтено); течение жидкости и газа одновременно; свободные поверхности жидкости; химические реакции; влияние частиц двухфазной среды на движение газовой фазы.

Система уравнений Навье — Стокса

В COSMOSFloWorks движение и теплообмен текучей среды моделируется с помощью уравнений Навье — Стокса, описывающих в нестационарной постановке законы сохранения массы, импульса и энергии этой среды. Кроме того, используются уравнения состояния компонентов текучей среды, а также

эмпирические зависимости вязкости и теплопроводности этих компонентов среды от температуры. Кроме того, неньютоновские жидкости задаются зависимостью их коэффициента вязкости от скорости сдвиговых деформаций и температуры; сжимаемые жидкости задаются зависимостью их плотности от давления. Этими уравнениями моделируются турбулентные, ламинарные и переходные (между ламинарными и турбулентными, переход определяется критическим значением числа Рейнольдса) течения. Для моделирования турбулентных течений (они встречаются в инженерной практике наиболее часто) упомянутые уравнения Навье — Стокса осредняются по Рейнольдсу, т. е. используется осредненное по малому масштабу времени влияние турбулентности на параметры потока, а крупномасштабные временные изменения осредненных по малому масштабу времени составляющих газодинамических параметров потока (давления, скоростей, температуры) учитываются введением соответствующих производных по времени. В результате уравнения имеют дополнительные члены — напряжения по Рейнольдсу, а для замыкания этой системы уравнений в COSMOSFloWorks используются уравнения переноса кинетической энергии турбулентности и ее диссипации в рамках $k-\varepsilon$ модели турбулентности.

Эта система уравнений сохранения массы, импульса и энергии нестационарного пространственного течения имеет следующий вид в рамках подхода Эйлера в декартовой системе координат ($x_i, i=1,2,3$), вращающейся с угловой скоростью Ω вокруг оси, проходящей через ее начало:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k)=0\,, \tag{5.1}$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_i u_k-\tau_{ik})+\frac{\partial P}{\partial x_i}=S_i\,, \tag{5.2}$$

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_k}\left((\rho E+P)u_k+q_k-\tau_{ik}u_i\right)=S_k u_k+Q_H\,, \tag{5.3}$$

где t — время, u — скорость текучей среды, ρ — плотность текучей среды, P — давление текучей среды, S_i — внешние массовые силы, действующие на единичную массу текучей среды: $S_{iporous}$ — действие сопротивления пористого тела, $S_{igravity}$ — действие гравитации, $S_{irotation}$ — действие вращения системы координат, т. е.

$$S_i=S_{iporous}+S_{igravity}+S_{irotation} \tag{5.4}$$

E — полная энергия единичной массы текучей среды, Q_H — тепло, выделяемое тепловым источником в единичном объеме текучей среды, τ_{ik} — тен-

зор вязких сдвиговых напряжений, q_i — диффузионный тепловой поток, нижние индексы означают суммирование по трем координатным направлениям.

Для ньютоновских текучих сред тензор вязких сдвиговых напряжений определяется следующим образом:

$$\tau_{ij} = \mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\frac{\partial u_l}{\partial x_l}\delta_{ij}\right) - \frac{2}{3}\rho k\delta_{ij}, \tag{5.5}$$

где $\mu = \mu_l + \mu_t \cdot \mu_l$ — коэффициент динамической вязкости, μ_t — коэффициент турбулентной вязкости, δ_{ij} — дельта-функция Кронекера ($\delta_{ij} = 1$ при $i = j$; $\delta_{ij} = 0$ при $i \neq j$), k — кинетическая энергия турбулентности. В соответствии с $k-\varepsilon$ моделью турбулентности, μ_t определяется через величины кинетической энергии турбулентности k и диссипации этой энергии ε:

$$\mu_t = f_\mu \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon}, \tag{5.6}$$

где $f_\mu = \left[1 - \exp\left(-0{,}025R_y\right)\right]^2 \cdot \left(1 + \frac{20{,}5}{R_T}\right)$; $R_y = \frac{\rho\sqrt{k}\,y}{\mu_l}$; $R_T = \frac{\rho k^2}{\mu_l \varepsilon}$, y — расстояние от поверхности стенки, $C_\mu = 0{,}09$.

Кинетическая энергия турбулентности k и диссипация этой энергии ε определяются в результате решения следующих двух уравнений:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k}\left(\rho u_k k\right) = \frac{\partial}{\partial x_k}\left(\left(\mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_k}\right) + S_k, \tag{5.7}$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k}\left(\rho u_k \varepsilon\right) = \frac{\partial}{\partial x_k}\left(\left(\mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k}\right) + S_\varepsilon, \tag{5.8}$$

где:

$$S_k = \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho\varepsilon + \mu_l P_B,$$

$$S_\varepsilon = C_{\varepsilon 1}\frac{\varepsilon}{k}\left(f_1 \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \mu_l C_B P_B\right) - C_{\varepsilon 2} f_2 \frac{\rho\varepsilon^2}{k},$$

$$\tau_{ij}^R = \mu_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\frac{\partial u_l}{\partial x_l}\delta_{ij}\right) - \frac{2}{3}\rho k\delta_{ij};\ P_B = -\frac{g_i}{\sigma_B}\frac{1}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial x_i},$$

g_i — составляющая гравитационного ускорения в координатном направлении x_i, $\sigma_B = 0{,}9$, $C_B = 1$ при $P_B > 0$ и $C_B = 0$ при $P_B \le 0$, $f_1 = 1 + \left(\frac{0{,}05}{f_\mu}\right)^3$, $f_2 = 1 - \exp\left(-R_T^2\right)$, $C_{\varepsilon 1} = 1{,}44$, $C_{\varepsilon 2} = 1{,}92$, $\sigma_\varepsilon = 1{,}3$, $\sigma_k = 1$.

Диффузионный тепловой поток моделируется с помощью уравнения

$$q_k = -\left(\frac{\mu_l}{\mathrm{Pr}} + \frac{\mu_t}{\sigma_c}\right) c_p \frac{\partial T}{\partial x_k},\ k = 1,2,3, \qquad (5.9)$$

где $\sigma_c = 0{,}9$, Pr — число Прандтля, c_p — удельная теплоемкость при постоянном давлении, T — температура текучей среды.

Для моделирования ламинарных течений данная система уравнений несколько модифицируется, а именно полагается $\mu_t = 0$ и $k = 0$. С помощью функции f_μ моделируется переход ламинарного течения в турбулентное и турбулентного в ламинарное.

Ламинарные и турбулентные пограничные слои течения около поверхностей твердого тела, а также переход ламинарного пограничного слоя в турбулентный и, наоборот, турбулентного в ламинарный, моделируются с высокой точностью с помощью модифицированных универсальных пристеночных функций.

Многокомпонентные течения

Изменение концентраций компонентов смеси в пространстве вследствие диффузии моделируется следующими уравнениями:

$$\frac{\partial \rho y_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k}\left(\rho u_k y_i\right) = \frac{\partial}{\partial x_k}\left(\left(D_{ij} + D_{ij}^t\right)\frac{\partial y_j}{\partial x_k}\right),\ i = 1,2,...,N, \qquad (5.10)$$

где y_i — концентрация i-го компонента смеси ($\sum_{i=1}^{N} y_i = 1$), N — число компонентов, D_{ij} и D_{ij}^t — коэффициенты молекулярной и турбулентной диффузии, которые подчиняются закону Фика, так что $D_{ij} = D \cdot \delta_{ij\,j}$; $D_{ij}^t = \delta_{ij} \cdot \frac{\mu_t}{\sigma}$, где D — коэффициент диффузии, σ — турбулентное число Шмидта.

Для определения теплофизических свойств текучей среды, т. е. зависимостей плотности, вязкости, теплопроводности, удельных теплоемкостей, коэффициентов диффузии компонентов текучей среды от давления, температуры и

концентрации компонентов текучей среды, используются уравнения состояния, эмпирические и полуэмпирические зависимости.

Течение газов

Для сжимаемых текучих сред используется уравнение состояния следующего вида:

$$\rho = \rho(P, T, y), \tag{5.11}$$

где $y = (y_1, y_2, ..., y_N)$ — вектор концентраций компонентов текучей среды. Для газов используется уравнение состояния идеального газа $\rho = P/(RT)$, где R — газовая постоянная моделируемого газа, которая для смеси газов определяется как $R = R_{унив} \sum_{i=1}^{N} \frac{y_i}{M_i}$, где M_i — молекулярная масса i-го компонента смеси.

Естественно, для несжимаемых жидкостей вместо уравнения (5.11) используется $\rho = \rho(T, y)$. Для многокомпонентных жидкостей $\rho = \left(\sum_{i=1}^{N} \frac{y_i}{\rho_i} \right)^{-1}$. Для учета зависимости от температуры используется уравнение

$$\rho = \left[\sum_{i=1}^{N} \frac{y_i}{\rho_{0i}} \left(1 + \beta_{Ti} \left(T - T_0 \right) \right) \right]^{-1},$$

где β_{Ti} — коэффициент объемного теплового расширения i-го компонента, ρ_{0i} — плотность i-го компонента при некоторой температуре T_0.

Сжимаемые жидкости

Для сжимаемых жидкостей пользователем выбирается одна из следующих зависимостей их плотности от давления:

- логарифмическая зависимость: $\rho = \rho_0 / \left(1 - C \cdot \ln \frac{B + P}{B + P_0} \right)$, где ρ_0 — плотность жидкости при давлении P_0, C, B — коэффициенты, могут быть заданы также зависимости ρ_0, C, B от температуры;
- степенная зависимость: $\rho = \rho_0 \cdot \left(\frac{B + P}{B + P_0} \right)^{1/n}$, где, кроме вышеупомянутых параметров, используется также n — параметр степени, который тоже может зависеть от температуры.

Неньютоновские жидкости

Моделируются также ламинарные течения неньютоновских текучих сред, у которых коэффициент вязкости зависит от скорости сдвиговых деформаций. Тензор вязких сдвиговых напряжений в этих средах определяется вместо (5.5) следующим образом:

$$\tau_{ij} = \mu(\dot{\gamma}) \cdot \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \qquad (5.12)$$

где скорость сдвиговых деформаций $\dot{\gamma} = \sqrt{d_{ij}^2 - d_{ii} \cdot d_{jj}}$; $d_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$. Пользователь может выбрать одну из следующих трех моделей неньютоновских жидкостей, отличающихся зависимостью коэффициента динамической вязкости от скорости сдвиговых деформаций $\mu(\dot{\gamma})$:

- модель Herschel — Bulkley:

$$\mu(\dot{\gamma}) = K \cdot (\dot{\gamma})^{n-1} + \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}},$$

  где K — коэффициент консистенции, n — коэффициент степенного закона, τ_0 — предельное сдвиговое напряжение. Эта модель имеет следующие частные случаи:

  - $n = 1$, $\tau_0 = 0$ — ньютоновские жидкости, в этом случае K — динамическая вязкость жидкости;
  - $n = 1$, $\tau_0 > 0$ — неньютоновские жидкости, описываемые моделью Bingham, особенностью которой является ненулевая величина τ_0: неньютоновская жидкость ведет себя как твердое тело при $\tau < \tau_0$ и может течь только при $\tau > \tau_0$ (это изменение поведения жидкости моделируется тем, что при $\tau < \tau_0$ коэффициент консистенции K, который в этой модели называется пластической вязкостью, автоматически становится достаточно большим);
  - $0 < n < 1$, $\tau_0 = 0$ — так называемые "утончающиеся" неньютоновские жидкости, поведение которых описывается степенным законом;
  - $n > 1$, $\tau_0 = 0$ — так называемые "утолщающиеся" неньютоновские жидкости, поведение которых описывается степенным законом;

- модель со степенным законом:

$$\mu(\dot{\gamma}) = K \cdot (\dot{\gamma})^{n-1},$$

в отличие от частного случая модели Herschel—Bulkley величина μ в этой модели ограничена: $\mu_{\min} \le \mu \le \mu_{\max}$, эти минимальная и максимальная динамические вязкости задаются в дополнение к коэффициенту консистенции K и коэффициенту степенного закона n;

- модель Carreau:

$$\mu(\dot{\gamma}) = \mu_\infty + (\mu_0 - \mu_\infty) \cdot \left[1 + (K_1 \cdot \dot{\gamma})^2\right]^{(n-1)/2},$$

где μ_∞ — динамическая вязкость жидкости при бесконечно большой скорости сдвиговой деформации, т. е. минимальная динамическая вязкость, μ_0 — динамическая вязкость жидкости при нулевой скорости сдвиговой деформации, т. е. максимальная динамическая вязкость, K_1 — временная постоянная, n — коэффициент степенного закона. Эта модель — вариант сглаживания модели со степенным законом с ее ограничениями на величину μ.

Все параметры этих моделей, за исключением n, в общем случае зависят от температуры.

Гравитация

Влияние гравитации моделируется с помощью члена $S_{i\ gravity}$, входящего в составе суммарной массовой силы (5.4) в уравнения (5.2, 5.3):

$$S_{i\ gravity} = -\rho g_i, \tag{5.13}$$

где g_i — i-я составляющая (вдоль i-й оси системы координат) вектора гравитационного ускорения.

Теплопередача в твердых телах и радиационный теплообмен

Наряду с моделированием диффузии тепла в текучей среде (с помощью уравнений (5.3) и (5.9)), моделируется также теплопередача в твердых телах с помощью уравнения

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i}\right) + Q_H, \tag{5.14}$$

где $e = cT$, c — удельная теплоемкость, T — температура, λ — теплопроводность, Q_H — удельное (в единице объема) тепловыделение источника тепла.

Конвективный теплообмен между поверхностью твердых тел и текучей средой моделируется при моделировании пограничного слоя потока текучей среды.

Если теплопередача в твердых телах моделируется, то одновременно может моделироваться также радиационный теплообмен между непрозрачными для него поверхностями твердых тел. При этом рассматривается только интегральное, т. е. суммарное по всем длинам волн, излучение. Излучающие тепло поверхности задаются абсолютно черными, абсолютно белыми, или идеально серыми, так что, в соответствии с законом Ламберта, их излучение предполагается диффузным, т. е. с независящей от направления излучения яркостью. В результате, в соответствии с законом Стефана — Больцмана, излучаемое с единицы поверхности тепло определяется как

$$Q_R = \varepsilon \sigma_0 T_w^4, \tag{5.15}$$

где ε — степень черноты поверхности, σ_0 — постоянная Стефана — Больцмана, T_w — температура поверхности. Соответственно моделируется поглощение и/или отражение радиационного тепла участвующими в радиационном теплообмене поверхностями. Аналогично излучению от твердых поверхностей моделируется излучение тепла в расчетную область от расположенных в текучей среде границ расчетной области. Моделируется также приходящее с этих границ солнечное излучение с заданными, зависящими в общем случае от времени, интенсивностью и направлением. В результате для каждой участвующей в радиационном теплообмене поверхности определяется (с учетом рассчитываемого фактора видимости) разность между приходящими и уходящими (т. е. отраженными и излучаемыми) радиационными тепловыми потоками. Участие текучей среды в радиационном теплообмене не моделируется.

Пористые тела

Если текучая среда проходит через пористое тело, то влияние этого тела на параметры течения моделируется как рассредоточенное гидравлическое сопротивление, а именно $S_{i\,porous}$ в сумме (5.4) определяется как

$$S_{i\,porous} = -k\delta_{ij}\rho u_{ij}, \tag{5.16}$$

где k — вектор силы сопротивления пористого тела, который определяется свойствами пористого материала, а именно типом проницаемости и гидравлическим сопротивлением по характерным направлениям проницаемости. Моделируются пористые материалы со следующими типами проницаемости:

- изотропная — проницаемость материала одинакова по всем направлениям;

- однонаправленная — материал проницаем только в одном направлении;
- осесимметричная — проницаемость материала полностью определяется продольной и поперечной составляющими относительно некоторого направления;
- ортотропная — наиболее общий случай, когда проницаемость материала зависит от направления и полностью определяется тремя составляющими, определенными вдоль трех взаимно перпендикулярных направлений.

По определению $k = -grad(P)/(\rho \cdot V)$, где P, ρ, V — давление, плотность и скорость текучей среды, $grad$ берется по характерным направлениям проницаемости. Моделируются пористые материалы, у которых составляющие k по характерным направлениям проницаемости определяются одной (выбирается пользователем) из следующих их зависимостей от параметров течения:

- $k = \Delta P \cdot S/(m \cdot L)$, где ΔP — перепад давления между противоположными сторонами пористого тела в данном направлении, m — массовый расход текучей среды в данном направлении, S и L — площадь поперечного сечения и длина пористого тела в данном направлении. Величина k задается зависимостью ΔP от m и константами S и L. Если вместо массового расхода m задан объемный расход v, то определяется $m = v \cdot \rho$, где ρ — плотность текучей среды;
- $k = (A \cdot V + B)/\rho$, где V — скорость текучей среды, ρ — плотность текучей среды, A и B — константы. Величина k задается константами A и B, а V и ρ определяются при расчете течения;
- $k = \mu/(\rho \cdot D^2)$, где μ и ρ — коэффициент динамической вязкости и плотность текучей среды, D — характерный размер поры, обычно определяемый из экспериментов. Величина k задается константой D, а μ и ρ определяются при расчете течения;
- $k = \mu/(\rho \cdot D^2) \cdot f(\mathrm{Re})$, где $f(\mathrm{Re})$ — функция от числа Рейнольдса. Величина k задается константой D и функцией $f(\mathrm{Re})$, а μ и ρ определяются при расчете течения.

Скорость потока текучей среды в пористом материале определяется по заданной эффективной пористости данного материала, которая представляет собой объемную долю соединяющихся между собой пор в общем объеме пористого материала.

Если материал пористого тела не изотропный, то пористое тело задается его материалом и положением характерных направлений проницаемости этого материала в данном теле.

Вращающаяся система координат

Если расчет выполняется во вращающейся системе координат, то для суммы (5.4) определяется член $S_{i\,rotation}$ с помощью следующей формулы:

$$S_{i\,rotation} = -2e_{ijk}\Omega_j \rho u_k + \rho\Omega^2 r_i, \qquad (5.17)$$

где e_{ijk} — функция Леви — Чевита, Ω — угловая скорость вращения этой системы координат, r — радиус-вектор, приходящий в данную точку пространства от ближайшей к ней точки, лежащей на оси вращения данной системы координат.

Течения с частицами

Двухфазные течения текучей среды с жидкими или твердыми частицами моделируются как движение этих частиц в установившемся (рассматриваются только стационарные двухфазные течения) потоке текучей среды, т. е. предполагается, что силовое и тепловое воздействие частиц на течение газовой фазы пренебрежимо мало. Это предположение верно в том случае, когда массовая доля частиц в двухфазном потоке не превышает 30 %. При определении коэффициента сопротивления частиц предполагается, что они, как жидкие, так и твердые, имеют сферическую форму. Коэффициент сопротивления частиц рассчитывается по формуле Хендерсона для неразреженных и разреженных, до-, транс- и сверхзвуковых, ламинарных, переходных и турбулентных условий обтекания частиц. Температура частицы определяется по формуле теплообмена частицы с окружающей текучей средой. Так как учитывается влияние температуры частицы на плотность ее материала, а масса частицы считается неизменной, то соответственно изменяется размер частицы. Если необходимо, то учитывается влияние гравитации на движение частиц. Взаимодействие частиц с поверхностями твердых тел моделируется либо как полное прилипание частиц к поверхности (свойственно каплям жидкости при не очень высоких скоростях соударения), либо как идеальное или неидеальное отражение (свойственно твердым частицам). Если составляющую скорости частицы по нормали к поверхности непосредственно перед ее соударением с этой поверхностью обозначить $V_{1,n}$, а составляющую скорости частицы по касательной к этой поверхности непосредственно перед ее соударением с этой поверхностью обозначить $V_{1,\tau}$, а эти же составляющие скорости частицы сразу после ее соударения со стенкой обозначить соответственно $V_{2,n}$ и $V_{2,\tau}$ и рассмотреть отношения

$$e_n = \left|\frac{V_{2,n}}{V_{1,n}}\right|;\ e_\tau = \frac{V_{2,\tau}}{V_{1,\tau}}, \qquad (5.18)$$

то при идеальном отражении $e_n = e_\tau = 1$, а при неидеальном отражении $e_n < 1$ и $e_\tau < 1$.

Исходя из континуальной модели двухфазного течения, т. е. течения взаимопроникающих континуумов газовой фазы и частиц различных фракций (все частицы разделяются на фракции по какому-либо признаку, позволяющему однозначно задавать начальные условия движения частиц в сечении, от которого это движение рассчитывается: например, если в некоторой точке начального сечения могут находиться частицы разных размеров, то таким параметром является размер частиц), при попадании частиц на стенку определяется суммарная по всем поверхностям, на которые выпали частицы, интенсивность налипания частиц на эти поверхности по формуле $R_{\Sigma accretion} = \sum_{i=1}^{N} M_{pi}$, где N — число фракций частиц, M_{pi} — расход частиц i-й фракции, выпавших на эти поверхности; а также интенсивность уноса материала стенок, на которые выпали частицы (решение о том, приведет ли выпадение частиц на эти поверхности к налипанию частиц на этих поверхностях или к уносу материала этих поверхностей, — остается за пользователем), по формуле $R_{\Sigma erosion} = \sum_{i=1}^{N} \int_{M_{pi}} K_i \cdot V_{pi}^{b} \cdot f_{1i}\left(\alpha_{pi}\right) \cdot f_{2i}\left(d_{pi}\right) d\dot{m}_{pi}$, где K_i — заданный пользователем коэффициент эрозии материала поверхности, V_{pi} — скорость частиц непосредственно перед соударением, b — заданный пользователем показатель степени, $f_{1i}(\alpha_{pi})$ — безразмерный коэффициент, учитывающий влияние на эрозию угла α_{pi} подлета частиц к поверхности выпадения (относительно нормали к поверхности), $f_{2i}(d_{pi})$ — безразмерный коэффициент, учитывающий влияние на эрозию диаметра d_{pi} частиц.

Начальные и граничные условия

Для привязки математической модели к конкретной физической (инженерной) задаче и к области пространства, в которой она решается (так называемая расчетная область, поскольку в COSMOSFloWorks используется метод фиктивных областей, то расчетная область может быть меньше той области, в которой строится расчетная сетка), пользователь должен задать начальные и граничные условия.

Необходимость задания начальных условий, т. е. значений физических параметров среды (текучей и твердой, если рассчитывается теплопередача в твердом теле) в расчетной области, вытекает из нестационарности используемой

математической модели, т. е. ее основных уравнений (5.1—5.3, 5.10). Если задача нестационарная, и ее решение не является периодическим, то начальные условия, наряду с граничными, определяют решение задачи, т. е. не могут быть произвольными, а должны в точности соответствовать поставленной задаче (в определенном смысле их можно рассматривать как граничное условие во времени). Если задача стационарная или нестационарная, но с периодическим решением, то ее решение считается найденным после его установления во времени — в этом случае в задании начальных условий имеется определенный произвол (степень этого произвола зависит от задачи, но в любом случае начальные условия должны быть физически корректными; некоторые задачи могут иметь несколько стационарных решений, соответствующих разным областям значений начальных условий), так что от начальных условий зависит не решение задачи, а скорость нахождения этого решения (чем ближе начальные условия к решению, тем быстрее это решение будет найдено).

Задание граничных условий, т. е. условий на границах расчетной области, обязательно для всех задач — как стационарных, так и нестационарных. Фактически, граничные условия определяют связь физических процессов в расчетной области с физическими процессами вне ее. В зависимости от способа задания границ расчетной области и, соответственно, условий на них, в COSMOSFloWorks все задачи условно делятся на внутренние и внешние:

- во внутренних задачах заполненная текучей средой расчетная область ограничена стенками модели (если рассчитывается теплопередача в стенках, то эти стенки также включаются в эту расчетную область), при этом некоторые поверхности стенок могут рассматриваться как отверстия, через которые расчетная область соединяется с внешними полостями, заполненными текучей средой; все заданные на этих границах условия точно выполняются при решении задачи;
- во внешних задачах заполненная текучей средой расчетная область ограничена плоскостями расчетной сетки, параллельными координатным плоскостям и полностью лежащими в текучей среде, которая обтекает модель (так называемые внешние границы), при этом возможно также частичное прохождение этих границ через твердые тела, например, пересечение ими стенок модели или использование поверхностей модели в качестве границ (так называемые внутренние границы); при этом условия, заданные на внешних границах, не обязательно точно выполняются при решении задачи: например, при моделировании обтекания тела на всех внешних границах задаются параметры невозмущенного набегающего потока, но все возмущения, образовавшиеся в расчетной области в результате обтекания тела (скачки, волны сжатия или разрежения), свободно пересекают внешние границы, т. е. выходят из расчетной области, естественно,

на этих участках границы параметры потока отличаются от заданных граничных условий; что касается условий, заданных на внутренних границах, т. е. на поверхностях модели, они выполняются при решении задачи точно, аналогично тому, как при решении внутренних задач.

В COSMOSFloWorks могут быть заданы следующие граничные условия.

- Параметры текучей среды на входных и выходных отверстиях модели:
  - массовый или объемный расход, и если отверстие входное, то профиль скорости, температура, параметры турбулентности и пограничного слоя, а также концентрации компонентов многокомпонентной среды;
  - скорость, ее профиль, и если отверстие входное, то температура, параметры турбулентности и пограничного слоя, а также концентрации компонентов многокомпонентной среды;
  - полное или статическое давление и, на тот случай, если отверстие окажется входным (в отличие от предыдущих двух вариантов, т. е. задания расхода или скорости, при задании давления направление течения не задается, а определяется при решении задачи), температура, параметры турбулентности и пограничного слоя, а также концентрации компонентов многокомпонентной среды;
  - вытяжной или приточный вентилятор, т. е. зависимость объемного или массового расхода от перепада давления на вентиляторе, при этом давление на внешней, т. е. расположенной вне расчетной области, стороне вентилятора задается пользователем, а давление на его внутренней, т. е. являющейся границей расчетной области, стороне определяется при решении задачи; кроме того, аналогично описанному случаю задания расхода, при задании приточного вентилятора задаются профиль скорости (если необходимо, с закруткой потока), температура, параметры турбулентности и пограничного слоя, а также концентрации компонентов многокомпонентной среды;
  - в частном случае так называемого внутреннего вентилятора обе стороны вентилятора выходят в расчетную область, соответственно, для него задается только зависимость объемного или массового расхода от перепада давления на вентиляторе.
- Параметры поверхностей твердых тел, контактирующих с текучей средой (условия непротекания и прилипания здесь не упомянуты — они задаются автоматически всегда, за исключением идеальной поверхности, для которой условие прилипания потока к поверхности не задается), — их, за исключением шероховатости поверхности и идеальной стенки, корректно задавать только в том случае, если не рассчитывается теплопередача в твердых телах:

- шероховатость поверхности (строго говоря, это условие не является граничным, а описывает свойство поверхности);
- температура поверхности;
- удельный (т. е. с единицы поверхности) или суммарный (по указанной поверхности) тепловой поток;
- коэффициент теплоотдачи поверхности текучей среде — в этом случае необходимо также указать способ определения температуры текучей среды (т. к. рассчитывается пограничный слой, то соответствующая этим заданиям температура стенки определяется при решении задачи);
- адиабатическая поверхность, т. е. отсутствие теплообмена текучей среды с поверхностью;
- идеальная поверхность, т. е. отсутствие пограничного слоя на поверхности и теплообмена текучей среды с поверхностью (если теплопередача в твердых телах рассчитывается, то это условие означает теплоизолированную относительно текучей среды поверхность стенки);
- движение поверхности стенки, не изменяющее геометрию проточного тракта модели (вращение или поступательное движение).

❒ Тепловые условия на внешних поверхностях твердых тел, являющихся граничными при расчете теплопередачи в твердых телах:

- температура поверхности;
- коэффициент теплоотдачи поверхности во внешнюю (относительно расчетной области) текучую среду — в этом случае необходимо также задать температуру этой внешней среды (т. к. рассчитывается теплопередача в твердом теле, то соответствующая этим заданиям температура стенки определяется при решении задачи).

На выбранной поверхности можно задать только одно из перечисленных граничных условий (за исключением шероховатости, которая, как отмечено выше, строго говоря, не является граничным условием). Кроме того, заданные на разных поверхностях граничные условия не должны конфликтовать друг с другом.

Помимо начальных и граничных условий, задаются теплофизические свойства рассматриваемых текучих сред:

❒ для газов: молекулярная масса, показатель адиабаты, удельная теплоемкость при постоянном давлении, коэффициент динамической вязкости, коэффициент теплопроводности;

❒ для жидкостей: плотность, удельная теплоемкость, коэффициент динамической вязкости, коэффициент теплопроводности;

- плотность, удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности материалов модели (если рассчитывается теплопередача в твердом теле).

Для неньютоновских жидкостей, сжимаемых жидкостей, пористых материалов задаются их специфические свойства, описанные ранее.

Если моделируется радиационный теплообмен, то задается степень черноты участвующих в нем поверхностей; если дополнительно моделируется излучение с границ расчетной области, расположенных в текучей среде, то задаются необходимые для определения этого излучения фиктивные температура и степень черноты этих границ, а если дополнительно моделируется солнечное излучение, — то его интенсивность и направление.

5.3.2. Решение поставленной математической задачи

Для нахождения искомого численного решения задачи непрерывная нестационарная математическая модель физических процессов, используемая в COSMOSFloWorks *(см. разд. 5.3.1)*, дискретизируется как по пространству, так и по времени (т. к. движение и теплообмен текучей среды, а также теплопередача в твердом теле моделируются как нестационарные, то решение стационарных задач определяется как установившееся по времени).

Чтобы выполнить дискретизацию по пространству, вся расчетная область покрывается расчетной сеткой, грани ячеек которой параллельны координатным плоскостям используемой в расчете декартовой Глобальной системы координат модели в SolidWorks. Поскольку в COSMOSFloWorks используется метод конечных объемов, значения независимых переменных рассчитываются в центрах ячеек, а не в узлах расчетной сетки, то используемая в COSMOSFloWorks расчетная сетка описывается ее ячейками, а не узлами, как в методах конечных разностей.

Соответственно, ячейки расчетной сетки имеют форму параллелепипедов. Область, в которой эта сетка строится, также имеет единообразную для всех задач форму параллелепипеда.

При решении внутренних задач, т. е. при расчете поведения текучей среды в ограниченной стенками модели области (эта область может иметь или не иметь входные и выходные отверстия, соединяющие ее с текучей средой вне расчетной области), используется так называемый метод фиктивных областей, т. е. формально расчетная сетка строится в параллелепипедообразной области, покрывающей модель с текучей средой внутри. Но расчеты проводятся только в ячейках, попавших в расчетную область, т. е. в пространство, заполненное в соответствии с постановкой задачи текучей средой и твердым телом (если в нем рассчитывается теплопередача). В ячейках вне расчетной

области расчеты не проводятся. Этот подход позволяет рассчитывать течения в очень сложных каналах без усложнения алгоритма решения задачи.

При решении внешних задач, т. е. когда текучая среда обтекает твердое тело (при этом среда может также течь или находиться и внутри тела тоже, с сообщением или без сообщения с обтекающей тело средой), метод фиктивных областей не используется — расчетная область автоматически строится в виде параллелепипедообразной области, грани которой параллельные, как и расчетные ячейки, координатным плоскостям декартовой Глобальной системы координат модели в SolidWorks, расположены на определенном расстоянии от твердого тела. При необходимости эти грани могут быть пользователем удалены от модели или приближены к ней.

Процесс построения расчетной сетки начинается с построения так называемой базовой сетки — она получается разбиением пространства построения сетки на слои плоскостями, параллельными координатным плоскостям используемой декартовой системы координат модели. Число этих плоскостей, определяющих базовую сетку, т. е. число ячеек базовой сетки вдоль каждой из координатных осей, задается либо автоматически на основании заданных пользователем установок, либо непосредственно самим пользователем. При необходимости (например, для лучшего разрешения тонких плоских тел), некоторые из этих плоскостей, а также расположение остальных плоскостей между этими плоскостями и между этими и граничными плоскостями, могут быть заданы самим пользователем.

Поскольку грани расчетных ячеек не аппроксимируют соприкасающиеся с текучей средой поверхности твердых тел, то для разрешения расчетной сеткой относительно небольших геометрических особенностей этих поверхностей (участков повышенной криволинейности, выступов, впадин, отверстий, поверхностей тонких тел, окруженных текучей средой, и т. п.) используются процедуры соответствующего локального дробления ячеек сетки около этих участков поверхностей перед началом расчета. Так, каждая ячейка базовой сетки, пересеченная поверхностью твердого тела на границе с текучей средой (в COSMOSFloWorks такие ячейки, причем не только базовой сетки, но также всех последующих расчетных сеток, называются частичными), делится на 8 одинаковых, геометрически ей подобных ячеек меньшего размера (в COSMOSFloWorks они называются дочерними). Если используемый при построении сетки критерий дробления ячеек еще не удовлетворен, то те из 8 ячеек, которые пересечены этой поверхностью твердого тела, т. е. являются частичными, в свою очередь, аналогичным образом делятся на 8 еще более мелких ячеек, и т. д., до удовлетворения данного критерия дробления размером полученных ячеек, но не более чем до достижения размера, в 7 раз меньшего базовой ячейки.

Для разрешения областей с большими градиентами физических параметров текучей среды или температуры твердого тела используются процедуры дробления ячеек сетки как до начала расчета, так и во время расчета.

Процедура, дробящая ячейки в текучей среде до начала расчета, для каждой частичной ячейки автоматически определяет количество ячеек в текучей среде от этой ячейки до противоположной, ограничивающей данную проточную область, поверхности твердого тела по нормали к поверхности тела в этой частичной ячейке. Если это количество меньше определенного числа расчетных ячеек, то ячейки вдоль этой нормали дробятся до достижения этого определенного числа ячеек. Аналогичным образом работает процедура, дробящая ячейки в тонких твердых телах, с той лишь разницей, что подсчитываются ячейки расчетной сетки в твердом теле.

Процедура, дробящая ячейки расчетной сетки в областях с большими градиентами физических параметров текучей среды или температуры твердого тела, определенными во время расчета, анализирует рассчитанные значения физических параметров в соседних ячейках и дробит эти ячейки до тех пор, пока разница между этими значениями не станет меньше определенной величины, зависящей от анализируемых параметров. Если разница между значениями физических параметров в соседних ячейках больше определенной величины, то эта же процедура работает в обратную сторону, т. е. сливает ранее созданные этой процедурой 8 дочерних ячеек обратно в одну.

Описанные процедуры работают автоматически в соответствии с заданными по умолчанию или пользователем характеристиками установок этих процедур. Эти характеристики установок действуют во всей расчетной области, кроме того, при необходимости пользователь может выделить (с помощью SolidWorks) некоторые подобласти расчетной области и задать там другие характеристики этих установок, а также характеристики ряда дополнительных, используемых только для таких выделяемых подобластей, установок, позволяющих выполнить дробление всех (или всех, расположенных в текучей среде, или всех, расположенных в твердом теле, или всех частичных) ячеек данной подобласти до заданного относительно базовой сетки уровня.

Естественно, полученное на сформированной таким образом некоторой расчетной сетке дискретное (в COSMOSFloWorks в центрах ячеек) решение поставленной непрерывной (дифференциальной) математической задачи в общем случае зависит от размеров ячеек расчетной сетки, покрывающих расчетную область. Поэтому, чтобы решить поставленную математическую задачу достаточно точно, а также для оценки достигнутой точности, необходимо проведение нескольких расчетов на разных, более редких и более частых расчетных сетках с целью определить такую частоту расчетной сетки, начиная с которой решение задачи перестает значимо зависеть от частоты сетки, т. е. выходит на "полку", что указывает на достижение необходимой

точности решения математической задачи (так называемой сеточной сходимости решения математической задачи).

Для дискретизации дифференциальных уравнений в COSMOSFloWorks используется метод конечных объемов. Соответственно, собственно дискретизация рассмотренной в *разд. 5.3.1* непрерывной математической модели состоит в том, что значения физических переменных рассчитываются (и хранятся) только в центрах расчетных ячеек, а на гранях этих ячеек рассчитываются потоки массы, импульса, энергии, необходимые для расчета этих значений. При этом пространственные производные аппроксимируются с помощью неявных разностных операторов второго порядка точности. А именно, полученные из уравнений (5.1—5.3) интегрированием по поверхности и объему ячейки расчетной сетки интегральные уравнения

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_V U dv + \oint_S F ds = \int_V Q dv, \tag{5.19}$$

где U — вектор физических параметров (независимых переменных), V — объем ячейки, F — потоки, S — площадь поверхности (граней) ячейки, Q — массовые силы, преобразуются к дискретной форме:

$$\frac{\partial}{\partial t}(U \cdot V) + \sum_S F \cdot s = Q \cdot V. \tag{5.20}$$

Потоки F рассчитываются с использованием их аппроксимации вперед второго порядка точности, основанной на модифицированных неявных QUICK-аппроксимациях Леонарда [26] и методе минимизации полной вариации TVD [21]. Специальные аппроксимации применяются для конвективных членов, операторов *div* и *grad*.

В частичных, т. е. пересеченных поверхностью твердого тела на границе с текучей средой, расчетных ячейках вводятся дополнительные внутренние грани, аппроксимирующие попавшую в эти ячейки поверхность твердого тела, и используется специальная процедура для расчета условий на этих гранях.

Чтобы выполнить дискретизацию по времени, для каждой ячейки расчетной сетки в расчетной области из условия Куранта определяется допустимый максимальный шаг по времени, зависящий как от значений физических величин, так и от шага дискретизации по пространству в этой ячейке. Если решается нестационарная задача, то затем определяется минимальный из определенных таким образом шагов по времени по всем ячейкам расчетной сетки в расчетной области и с этим шагом, одинаковым для всех ячеек, выполняется переход (т. е. расчет параметров) к следующему моменту времени. Если решается стационарная задача, то для ускорения установления решения по вре-

мени шаги по времени в разных ячейках расчетной сетки в расчетной области разные, а именно определяются из условия Куранта в зависимости от значений физических величин и шага дискретизации по пространству в ячейке.

При дискретизации по времени используется метод расщепления операторов для более эффективного расчета давления и скорости. В соответствии с методом типа SIMPLE [24], давление рассчитывается в результате решения дискретного эллиптического уравнения, полученного алгебраическими преобразованиями дискретных уравнений сохранения массы и импульса с учетом граничных условий для скорости. В результате, для расчета значений параметров течения на очередном временно́м слое ($n+1$) по известным значениям этих параметров на предыдущем временно́м слое (n) используется следующая система алгебраических уравнений:

$$\frac{U^* - U^n}{\Delta t} + A_h(U^n, p^n)U^* = S^n; \tag{5.21}$$

$$L_h \delta p = \frac{div_h(\rho u)^*}{\Delta t} + \frac{1}{\Delta t}\frac{\rho^* - \rho^n}{\Delta t}; \tag{5.22}$$

$$\rho^* = f(p^n + \delta p, T^*, y^*); \tag{5.23}$$

$$(\rho u)^{n+1} = (\rho u)^* - \Delta t \cdot grad_h \delta p; \tag{5.24}$$

$$p^{n+1} = p^n + \delta p; \tag{5.25}$$

$$(\rho T)^{n+1} = (\rho T)^*;\ (\rho k)^{n+1} = (\rho k)^*;\ (\rho\varepsilon)^{n+1} = (\rho\varepsilon)^*;\ (\rho y)^{n+1} = (\rho y)^*, \tag{5.26}$$

$$\rho^{n+1} = f(p^{n+1}, T^{n+1}, y^{n+1}), \tag{5.27}$$

где $U = (\rho u, \rho T, \rho k, \rho\varepsilon, \rho y)$ — вектор всех независимых переменных, кроме давления p, $u = (u_1, u_2, u_3)$ — вектор скорости, $y = (y_1, y_2, \ldots y_N)$ — вектор концентраций компонентов текучей среды, $\delta p = p^{n+1} - p^n$ — вспомогательная переменная, поправка давления. Индексом * обозначены промежуточные (между слоями n и $n+1$) значения переменных. Все значения переменных относятся к центрам расчетных ячеек. Дискретные операторы A_h, div_h, $grad_h$ и $L_h = div_h grad_h$ аппроксимируют соответствующие дифференциальные операторы со вторым порядком точности.

Сначала решается система полностью неявных линейных дискретных уравнений конвекции и диффузии (5.21) относительно промежуточных (обозначенных индексом *) значений составляющих вектора U. Для решения этой системы уравнений используется обобщенный метод сопряженных градиентов [27] с привлечением метода неполной LU-факторизации.

Затем решается эллиптическое уравнение (5.22) относительно поправки давления δp. Это уравнение составлено таким образом, что значения импульса $(\rho u)^{n+1}$, рассчитанные по (5.24), удовлетворяют полностью неявному дискретному уравнению неразрывности. Решение ищется с помощью специально разработанного итерационного метода с использованием многосеточного метода [20] для ускорения сходимости. Согласно многосеточному методу, рассматриваются решения на вариационных подмножествах узлов используемой расчетной сетки, для каждого определяется соответствующая невязка, далее решение экстраполируется на нулевую величину невязки. Для повышения устойчивости и ускорения сходимости используется также процедура сглаживания получаемого решения.

Значения остальных составляющих вектора U находятся из (5.25—5.27).

Поскольку решение стационарных задач определяется в COSMOSFloWorks в результате его установления по времени, очень важно правильно выбрать момент для завершения расчета, т. е. вовремя определить, изменится ли решение при выполнении очередного шага (итерации) по времени (как упомянуто ранее, при решении стационарных задач используется локальный шаг по времени, т. е. на одном и том же шаге по времени время в разных точках пространства в общем случае разное) или нет, и если нет, то остановить расчет. В случае преждевременного завершения расчета решение еще не будет получено, например, значения физических параметров будут зависеть от заданных начальных условий, тогда как у стационарного решения такая зависимость, естественно, отсутствует, а при слишком позднем завершении расчета время от установления решения до завершения расчета будет потрачено зря.

Поскольку задача решается численно на некоторой расчетной сетке, которая может быть слишком грубой для данной задачи, и, кроме того, не исключены ошибки пользователя в задании исходных данных, то не исключены и случаи отсутствия установления вообще, — эти случаи тоже надо идентифицировать в процессе расчета как можно раньше. Естественно, решение этой проблемы проще, чем определение наличия установления, — аналогично тому, как проще доказывать необходимость, чем достаточность.

В идеальном случае, т. е. при отсутствии осцилляций решения во всей расчетной области при выполнении шагов по времени и при установлении решения одновременно во всех ячейках расчетной области, особых проблем с идентификацией достижения установления не возникает. Но в общем случае, более того, как правило, в большинстве инженерных задач, это не так: обычно присутствуют осцилляции решения при выполнении шагов по времени, и решение устанавливается не одновременно во всех ячейках расчетной области. В связи с этим возникают две проблемы, которые необходимо решить для

того, чтобы сделать вывод о необходимости завершения расчета: 1) что рассматривать в качестве решения, установление которого надо идентифицировать, 2) по каким критериям идентифицировать установление решения (неважно, в одной ячейке или во всей расчетной области, но по времени).

Практическое решение первой проблемы не столь однозначно, как может показаться на первый взгляд. Оно имеет следующие возможные варианты.

- Значения физических параметров:
  - всех независимых переменных;
  - некоторых независимых переменных;
  - некоторых комплексов независимых переменных.
- Локализация значений этих параметров:
  - в каждой ячейке сетки расчетной области;
  - некоторые интегральные характеристики, определяемые по значениям физических параметров:
    - во всей расчетной области;
    - в некоторых ее подобластях.
  - представительные значения физических параметров (максимумы, минимумы, средние, среднемассовые значения и т. п.):
    - во всей расчетной области;
    - в некоторых ее подобластях.

Очевидно, что с теоретической точки зрения наиболее правильно идентифицировать установление решения по изменению значений всех независимых переменных во всех ячейках сетки расчетной области. Но, с одной стороны, это потребует сохранения и обработки в оперативной памяти слишком большого объема информации, а именно полей этих физических параметров, рассчитанных на нескольких (может быть нескольких десятках или сотен) шагах по времени (итерациях), что существенно сократит возможность проведения расчетов на достаточно мелких расчетных сетках, обеспечивающих необходимую точность расчета. С другой стороны, т. к. решение в общем случае устанавливается не одновременно во всех ячейках расчетной области, а целью решения инженерной задачи часто бывает некоторая интегральная по некоторой подобласти расчетной области, т. е. по некоторой совокупности расчетных ячеек, характеристика (например, сила, действующая на некоторую поверхность, определяется по параметрам в частичных ячейках, покрывающих эту поверхность, а значения параметров в ячейках, расположенных на достаточном расстоянии ниже по течению от этой поверхности, практически не влияют на эту силу), которая, к тому же, может слабо зависеть от

флуктуаций значений физических параметров в одной или нескольких расчетных ячейках этой подобласти (при условии небольшой относительной доли этих ячеек в общем количестве ячеек, покрывающих эту подобласть), то при решении поставленной инженерной задачи не имеет смысла дожидаться установления решения во всей расчетной области (тем более, что это установление может оказаться недостижимым при используемых критериях установления), а лучше сразу определить, что именно интересует пользователя при решении данной задачи, т. е. цель решения задачи, и рассматривать установление только этой цели. Поэтому эта проблема и решается в COSMOSFloWorks с помощью целей проекта, которые задает сам пользователь. В качестве целей пользователь указывает интересующие его в данной инженерной задаче физические параметры или их комплексы и способ их глобализации: интегральные характеристики или представительные значения (максимумы, минимумы, средние) и по какой области пространства (объем, поверхность, кривая).

Вторая проблема решается в COSMOSFloWorks полуавтоматически, а именно рассматривается изменение выбранных пользователем целей на некотором временно́м (это название условно, в действительности вместо времени рассматривается определенное количество шагов по времени, т. е. итераций) интервале анализа, который отсчитывается назад, т. е. к началу расчета, от последнего временно́го шага (итерации). Размер этого интервала анализа либо определяется в COSMOSFloWorks автоматически на основании анализа количества расчетных ячеек, либо задается пользователем. Далее в качестве критерия установления цели рассматривается дисперсия цели на этом интервале анализа относительно ее среднего значения на этом интервале. Пороговая величина этой дисперсии, ниже которой цель считается установившейся, либо определяется в COSMOSFloWorks автоматически на основании анализа изменения цели при выполнении шагов по времени, либо задается пользователем.

Естественно, решение этих двух проблем также имеет свои погрешности, которые увеличивают общую погрешность решения поставленной математической задачи и инженерной задачи, в конечном счете.

5.4. Взаимодействие с SolidWorks

Целью любого инженерного расчета в конечном итоге является либо поиск оптимальной конфигурации (геометрии) создаваемого объекта (устройства) при заданных его свойствах, либо определение его свойств при заданной его конфигурации (геометрии). Поэтому немаловажную роль для выполняющего такие расчеты инженера играет наличие связи между используемой программой (системой) геометрического проектирования (моделирования) объектов и используемыми программами расчета свойств этих объектов.

По способу связи с программой геометрического проектирования (моделирования) существующие программы расчета течений и теплопередачи могут быть условно поделены на следующие классы:

- программы с собственными средствами моделирования геометрии;
- программы, использующие не связанную с ними программу геометрического проектирования (моделирования), результат работы которой затем конвертируется их или ее средствами в нужный формат;
- программы, полностью интегрированные с программой геометрического проектирования (моделирования).

Программы с собственными средствами моделирования геометрии обычно сильно уступают по возможностям моделирования специально предназначенным для геометрического проектирования (моделирования) программам, например, таким как SolidWorks. В результате, в этих программах задание сложной, в общем случае пространственной, геометрии объекта не всегда бывает адекватным. Это сильно осложняет, а зачастую делает невозможным адекватный расчет свойств сложных объектов (устройств).

Программы, использующие не связанную с ними программу геометрического проектирования (моделирования), результат работы которой затем конвертируется их или ее средствами в нужный для этих программ формат, отличаются от предыдущих программ бóльшими возможностями геометрического проектирования, однако при этом возникают проблемы корректного конвертирования данных из одной программы в другую. Кроме того, поскольку при любом изменении геометрии объекта приходится импортировать данные заново, это значительно усложняет работу программ расчета свойств объекта (устройства).

Поэтому все большее распространение в инженерной практике получают программы расчета свойств объектов, интегрированные с программами геометрического проектирования (моделирования). Это, в частности, позволяет оптимизировать геометрию объекта (устройства) любой сложности в максимально короткие сроки.

Полностью интегрированный в SolidWorks COSMOSFloWorks позволяет проводить расчеты течений, теплообмена (и теплопередачи) любой сложности без какой-либо дополнительной передачи данных между ним и программой геометрического проектирования (моделирования) SolidWorks, более того, задание исходных данных и визуализация результатов происходит непосредственно в среде SolidWorks, что весьма удобно и экономит время пользователя.

О том, что такое интеграция в SolidWorks, рассказывается в этом разделе.

5.4.1. Твердое тело и область, занятая текучей средой

Задача, которую решает гидрогазодинамический анализ — каким образом воздействует жидкость на тело или же, наоборот, как тело влияет на жидкость. В любом случае, рассматривается система "жидкость — тело" (исключение составляет расчет теплопроводности только в теле, который также возможен в COSMOSFloWorks). Постановка задачи предполагает задание исходных данных, т. е. определение условий, в которых работает система, а именно *граничных* и *начальных* условий.

Примечание

Здесь и далее, если нет специального упоминания, жидкостью для краткости называется любая текучая среда — жидкость, газ или неньютоновская жидкость. В отличие от английского, в котором есть слова fluid (текучая среда), liquid (жидкость) и gas (газ), в русском языке, к сожалению, нет слова, обозначающего жидкость и газ одновременно. Сравните "fluid dynamics" и "аэрогидродинамика".

В системе "жидкость — тело" вне зависимости от того, течет ли жидкость внутри тела либо омывает его снаружи, границы тела определяют поверхность, ограничивающую область распространения жидкости. Другими словами, границы тела являются граничным условием для системы "жидкость — тело". Этот тип условия в COSMOSFloWorks называется **Wall** (Стенка).

Другими необходимыми условиями являются условия, в которых находится взаимодействующая с телом жидкость. В случае внешнего обтекания — это параметры набегающего потока, такие как скорость, давление, температура и др. Такой тип условия называется **Ambient Conditions** (Внешние условия). В случае, когда рассматривается протекание жидкости через тело (например, расчет клапана) — таким условием являются параметры потока при входе и выходе из модели. Этот тип условия называется **Opening** (Отверстие).

COSMOSFloWorks автоматически интерпретирует пустое (не заполненное телом) пространство модели как пространство, заполненное жидкостью. В зависимости от взаиморасположения тела и жидкости (внутри тела или снаружи) в COSMOSFloWorks все задачи делятся на два типа — **External** (Внешние) и **Internal** (Внутренние).

Внешние задачи

Внешними считаются задачи, в которых тело помещено в поток жидкости или тело движется через жидкость. Типичные примеры — обтекание здания, крыла, автомобиля, субмарины (рис. 5.2). Под жидкостным пространством в COSMOSFloWorks подразумевается пространство внутри и вокруг те-

ла. Это пространство ограничено поверхностью тела с одной стороны (условие **Wall**) и границами расчетной области с другой (условие **Ambient Conditions**).

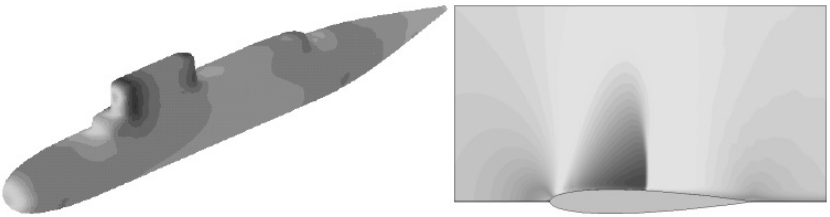


Рис. 5.2. Субмарина и профиль крыла — примеры внешних задач

Расчетная область

Расчетная область (**Computational Domain**) — прямоугольный параллелепипед, ограничивающий область, в которой производится расчет, если эта область не ограничена условиями типа **Wall** или **Opening**. Размер расчетной области определяется автоматически COSMOSFloWorks и для внешних задач зависит от параметров потока. При желании, размер расчетной области можно изменить, например, уменьшить для экономии затрачиваемой памяти и уменьшения времени счета.

Следует помнить, что для внешних задач условия, определяющие характеристики набегающего потока (**Ambient Conditions**), выставляются программой на границах расчетной области. Поэтому не рекомендуется слишком близко приближать границы расчетной области к телу, т. к. область возмущения потока может быть больше заданной области расчета, что в итоге приведет к некорректным результатам (рис. 5.3).

Тем не менее в целях экономии компьютерных ресурсов размер расчетной области может быть изменен, если имеется одна или несколько плоскостей симметрии течения или когда решается двумерная (2D) задача. В случае наличия симметрии течения граница расчетной области выставляется в плоскости симметрии, и на этой границе задается условие **Symmetry** (Симметрия). Однако пользоваться условием симметрии нужно с осторожностью, т. к. геометрическая симметрия не обязательно является условием симметрии течения (рис. 5.4).

Двумерные задачи довольно редко встречаются в инженерной практике. Двумерные задачи подразумевают идентичность течения в плоскостях, параллельных плоскости течения. Как правило, двумерные задачи используются для проверочных расчетов простейших моделей и валидации в случае, когда имеются теоретические оценки для плоского случая.

Расчетная область создается как для внешних, так и для внутренних задач.

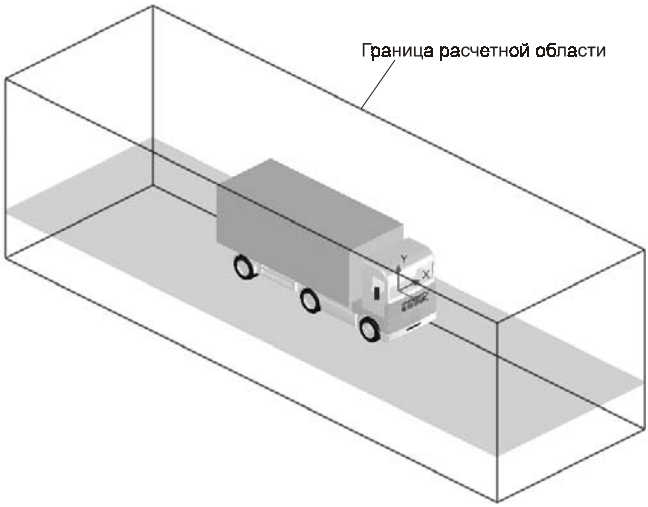


Рис. 5.3. Расчетная область, построенная для внешней задачи



Рис. 5.4. Симметричное течение в круглой трубе и несимметричное течение в симметричном плоском канале

Внутренние задачи

Для случая протекания жидкости внутри тела жидкостное пространство ограничено входными и выходными отверстиями (условие **Opening**) и поверхностями модели (условие **Wall**). Такой тип задач называется **Internal** (Внутренние). Этот тип подходит для расчета трубопроводов, клапанов, кранов, теплообменников, компьютеров и др. Внутренняя задача может и не иметь входных и выходных условий, например, при расчете свободной конвекции внутри комнаты. В этом случае жидкостное пространство ограничено только поверхностью модели. Все же большинство внутренних задач имеют проточную часть, т. е. вход и выход жидкости (рис. 5.5).

Поскольку SolidWorks является средством проектирования твердотельных конструкций, в нем отсутствуют элементы, которые необходимы для анализа системы "жидкость — тело", такие как объемы, заполненные жидкостью, области втекания и вытекания жидкости с заданными параметрами. Изначально

в SolidWorks определена лишь та часть системы, которая связана непосредственно с телом. Например, для задания условия шероховатости на поверхности (шероховатость — свойство твердого тела), достаточно выделить эту поверхность и указать размер шероховатости. Но как выделить отверстие? Для определения другой — жидкостной — части системы необходимо введение дополнительных элементов и понятий.

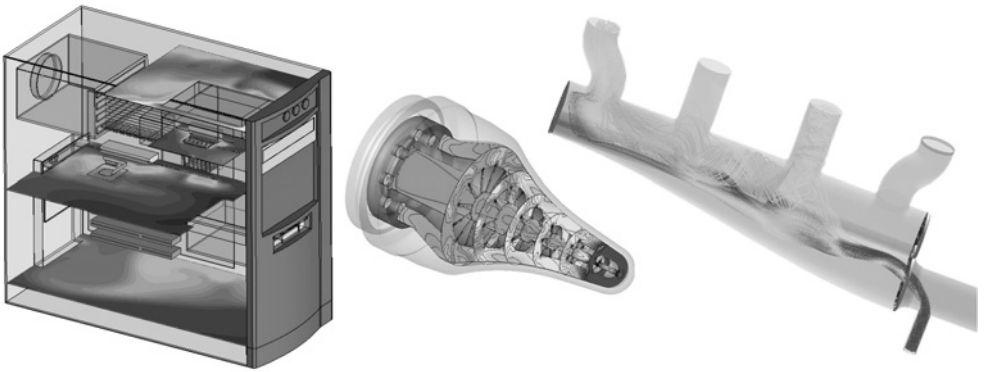


Рис. 5.5. Примеры внутренних задач

Крышки для отверстий

Для задания входных и выходных граничных условий на отверстиях модели необходимо модифицировать модель, закрыв эти отверстия твердым телом. Поверхность такой *крышки* интерпретируется COSMOSFloWorks как отверстие, и потому не нарушает изначальной твердотельной конструкции устройства. Так, для задания параметров жидкости, втекающей через отверстие, достаточно выделить внутреннюю поверхность крышки и задать на ней условия, которые имеет жидкость при входе в устройство. Соответственно, для задания выходного условия, необходимо закрыть выходное отверстие крышкой, выделить ее внутреннюю поверхность и задать на ней условия среды, в которую жидкость вытекает. На рис. 5.6 показано использование крышки для моделирования течения жидкости через шаровой кран. На входе в кран граничное условие **Inlet Mass Flow** (Втекание с заданным массовым расходом) определяет расход жидкости, поступающей в кран. На выходе из крана граничное условие **Static Pressure** (Статическое давление) определяет статическое давление среды, в которую истекает жидкость.

Таким образом, для всех внутренних задач характерно наличие замкнутой полости, ограниченной стенками модели и крышками, за исключением, когда используется условие симметрии или считается двумерный расчет. По умолчанию для внутренних задач реальная расчетная область ограничена отверстиями и поверхностью модели (внутренними поверхностями при отсутствии

теплопередачи в теле или внешними при наличии теплопередачи в теле). Однако при наличии плоскостей симметрии течения можно значительно сократить затрачиваемые ресурсы компьютера путем задания граничного условия **Symmetry** (неявно две плоскости симметрии всегда используются в двумерном расчете на двух боковых гранях расчетной области, поскольку двумерный расчет в COSMOSFloWorks выполняется как трехмерный с уменьшенной до одной базовой ячейки толщиной расчетной области по одной из координат) (рис. 5.7).

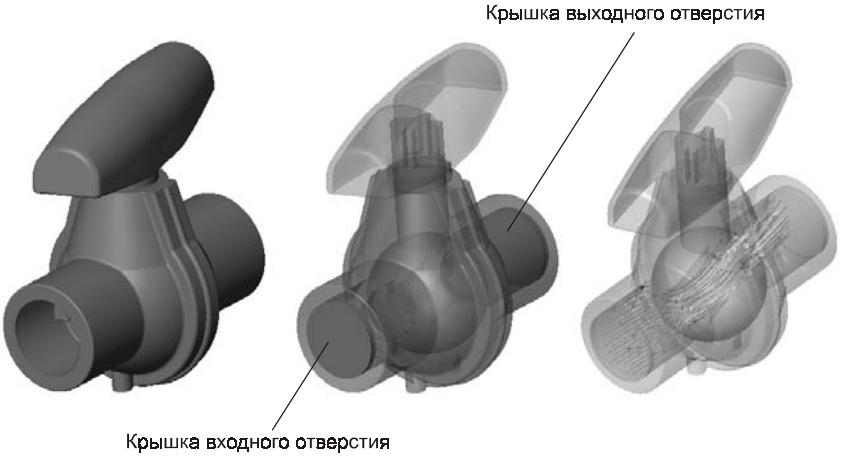


Рис. 5.6. Моделирование втекания и вытекания жидкости с помощью вспомогательных крышек: слева — оригинальная модель, в центре — модель с добавленными крышками, справа — модель с визуализацией траекторий течения

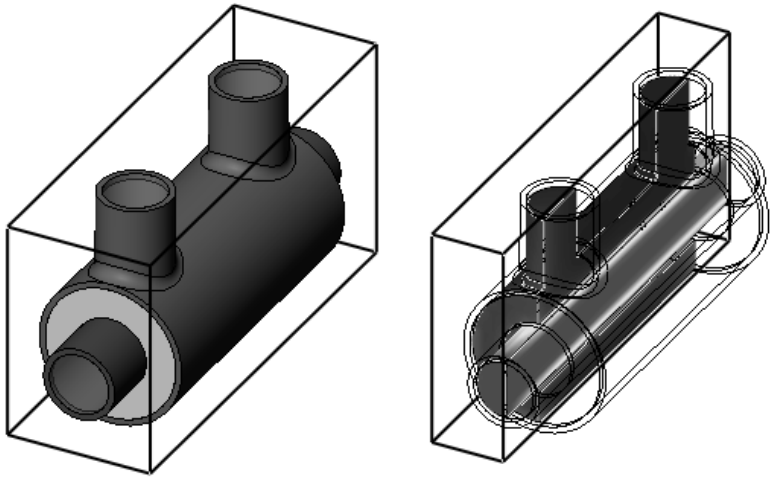


Рис. 5.7. Использование условия симметрии позволяет уменьшить расчетную область вдвое

Замкнутая полость во внутренней задаче — это и есть ее жидкостное пространство, а крышки являются теми элементами, которые, дополняя систему, связанную с телом, делают из нее систему "жидкость — тело", в которой уже возможно проведение гидрогазодинамического анализа с помощью COSMOSFloWorks.

Большинство отверстий, с которыми мы встречаемся, сделаны в плоскости. В этом случае создание крышек не представляет труда. Если конструкция модели предполагает отверстие сложной формы или отверстие вырезано не в плоскости, к нему тоже можно приспособить крышку, это лишь отнимет чуть больше усилий. В случае "неплоского" отверстия рекомендуется создавать плоские крышки, т. к. по умолчанию поток жидкости направлен по нормали в каждой точке крышки (тем не менее COSMOSFloWorks позволяет переопределить направление потока, задав желаемый вектор).

Рассмотрим пример создания крышки для сборки шарового крана.

1. В меню **Вставка** выберите команду **Компонент** | **Новая деталь**.
2. В открывшемся окне введите имя файла для создаваемой крышки, например, Крышка-Вход.
3. SolidWorks предложит выбрать плоскость, на которой будет закреплена новая деталь. Выберите торцевую плоскость трубы, как показано на рис. 5.8. Эта плоскость совпадает с плоскостью входного отверстия.

   Теперь вы находитесь в режиме создания эскиза детали Крышка-Вход.

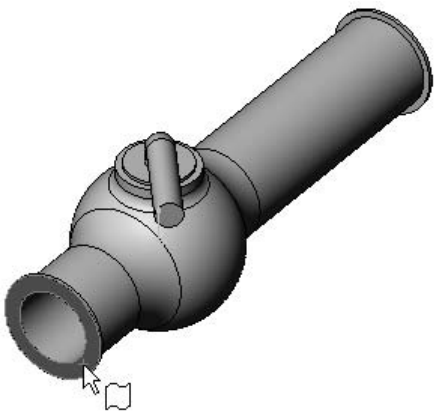


Рис. 5.8. Выделение торцевой поверхности

4. Выделите контур отверстия, щелкнув на ребре.
5. На панели **Эскиз** щелкните кнопку **Преобразование объектов**. В результате в детали создан эскиз, повторяющий контур отверстия.

6. В меню **Вставить** выберите команду **Бобышка** | **Основание** | **Вытянуть**.
7. В качестве направления выберите **От средней поверхности** — это позволит создать крышку, утопленную во внутреннюю область, и тем самым избежать конфликтного сопряжения.
8. В качестве глубины задайте разумно небольшое значение и нажмите **OK**.

Если крышки не полностью перекрывают отверстие или неплотно прилегают к отверстию, так что внутреннее (жидкостное) пространство оказывается незамкнутым, такая модель трактуется COSMOSFloWorks как модель без жидкостного пространства, и при попытке задать граничное условие типа **Opening** будет выдано сообщение об ошибке. Для того чтобы проверить, имеет ли модель замкнутую полость, в COSMOSFloWorks предусмотрен инструмент проверки геометрии модели — **Check Geometry** (Проверка геометрии).

Проверка геометрии модели

Для вызова **Check Geometry** в меню **FloWorks** выберите **Tools** | **Check Geometry**.

С помощью инструмента **Check Geometry** можно вычислить объем твердого тела и внутренней замкнутой области. Когда полость не замкнута, выдается сообщение, что жидкостной объем (fluid volume) равен нулю. Если рассматриваемая задача — внутренняя, то это, скорее всего, означает, что полость не замкнута вследствие неполного перекрывания крышками отверстий. Существуют и другие причины, по которым модель, не имеющая конфликтов в SolidWorks, является некондиционной для COSMOSFloWorks.

Возможные причины непригодности модели для COSMOSFloWorks:

- крышки не полностью закрывают отверстия в случае внутренней задачи. Индикатором этой "неисправности" является нулевой жидкостный объем, отображаемый в окне **Check Geometry** (рис. 5.9). Во избежание таких проблем рекомендуется создавать крышки немного утопленными во внутреннюю область или с размером, чуть перекрывающим размер отверстия;
- касание двух тел в одной точке или по линии, примеры — касание сферы или цилиндра. Для анализа геометрии модели COSMOSFloWorks использует булевы операции вычитания, сложения и пересечения тел. При касании тел образуется область перекрытия нулевой толщины, что приводит к ошибке булевых операций. Поэтому детали с таким сопряжением не могут быть обработаны COSMOSFloWorks. Очевидно, что такие касания могут встречаться как для внешних, так и для внутренних задач. Для разрешения такого конфликта достаточно немного утопить одно тело в другое (рис. 5.10);

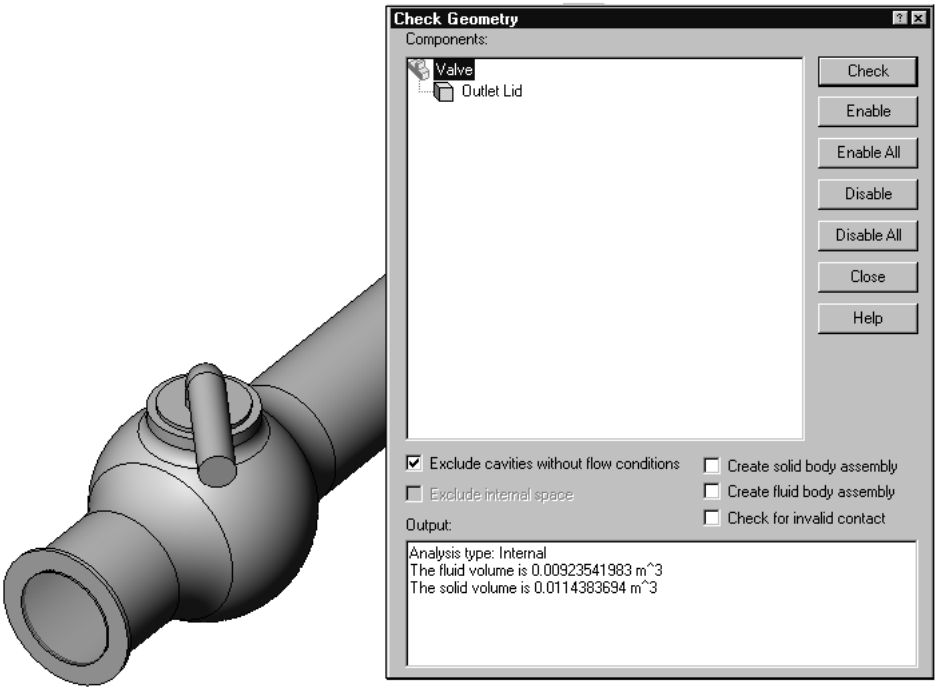


Рис. 5.9. Вычисление внутреннего объема модели с помощью **Check Geometry**

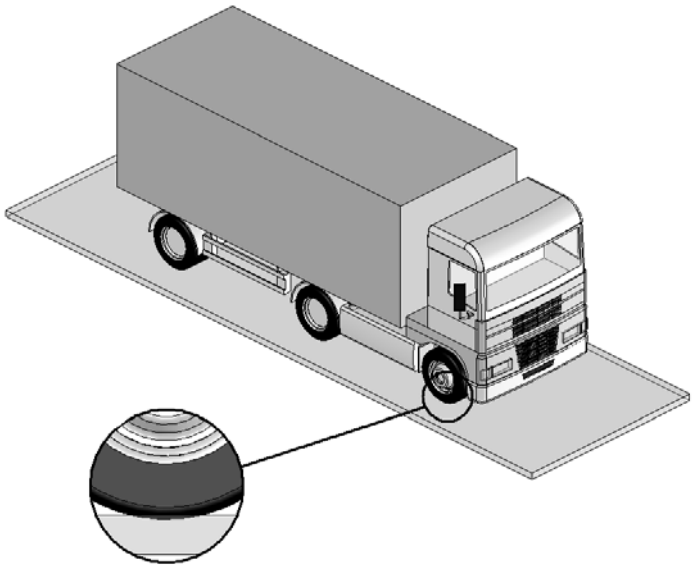


Рис. 5.10. Колеса грузовика слегка "утоплены" в дорогу, чтобы избежать касания

- сопряжение двух тел по ребру. Как и в предыдущем случае, использование булевых операций невозможно вследствие контакта нулевой толщины. Для разрешения такого конфликта достаточно немного утопить одно тело в другое или сместить тела друг относительно друга, чтобы область контакта имела ненулевую площадь (рис. 5.11).

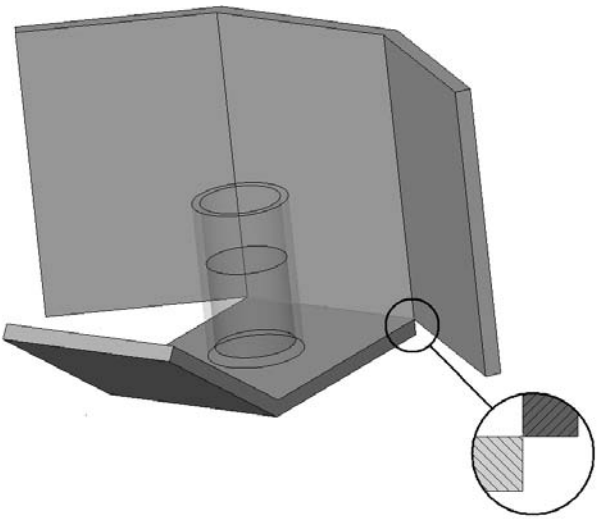


Рис. 5.11. Сопряжение тел по ребру — неразрешенная ситуация для COSMOSFloWorks

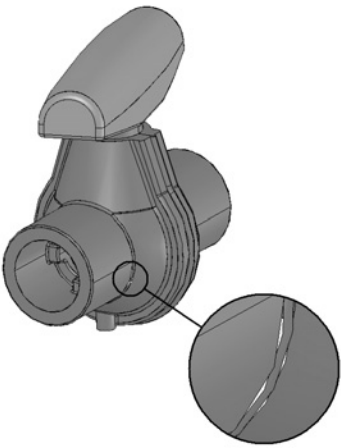


Рис. 5.12. Дефекты импортированной геометрии

Чтобы узнать, имеет ли модель какие-либо конфликтные сопряжения, можно воспользоваться опцией **Check for invalid contact** (Проверить на наличие непригодных контактов), которая доступна в окне **Check Geometry**. В случае обнаружения такого контакта в поле **Output** (Результат) окна **Check Geometry** выводится сообщение с именем детали или тела, породившего этот контакт: Part-1 may produce an invalid contact when it is used in a boolean operation.

Создание замкнутой полости для внутренних задач может потребовать дополнительных усилий, если рассматривается геометрия, импортированная в SolidWorks из другой системы моделирования. Существующие трансляторы не всегда могут идентично перевести геометрию из одного формата в другой. Часто в импортированной геометрии появляются мельчайшие щели на стыках поверхностей. Такие "дыры" являются несущественными для твердотельной модели SolidWorks, но недопустимыми для системы "жидкость — тело". В случае внутренней задачи такие дыры необходимо "латать", закрывая их твердым телом (рис. 5.12). Поэтому при работе с импортированной геометрией рекомендуется перед началом работы воспользоваться инструментом проверки геометрии.

Исключение из расчета полостей

На практике модель изначально может содержать множество замкнутых полостей. Любая замкнутая полость будет "заполнена" жидкостью и в ней будет построена сетка и проведен расчет. Но не каждая замкнутая полость интересна с точки зрения гидрогазодинамического расчета. Например, для внутренней задачи это могут быть резьбовые отверстия, прикрытые болтом. В случае внешнего обтекания тела — полости внутри тела. Чтобы не тратить компьютерные ресурсы на расчет таких бесполезных областей, можно указать COSMOSFloWorks исключить такие полости из расчета с помощью данных опций:

- **Exclude cavities without flow conditions** (Исключить полости без граничных условий). Полости, ограниченные только стенками (условие **Wall**), в отсутствии внешнего возмущения (потока тепла через стенку, граничных условий типа **Opening**) могут быть интересны лишь с точки зрения анализа свободной конвекции внутри этих полостей. Если в задаче пренебрегается гравитацией и не рассматривается теплопередача в твердом теле (чисто проточная задача), то решение в таких полостях будет равно заданному начальному распределению (очевидно, что при отсутствии теплопередачи замкнутые области никаким образом не влияют друг на друга). Поэтому для чисто проточной задачи расчет областей без входных/выходных отверстий не представляет интереса. При включении этой опции такие полости трактуются в COSMOSFloWorks как "заполненные" телом. Эта опция включена в COSMOSFloWorks по умолчанию (рис. 5.13);

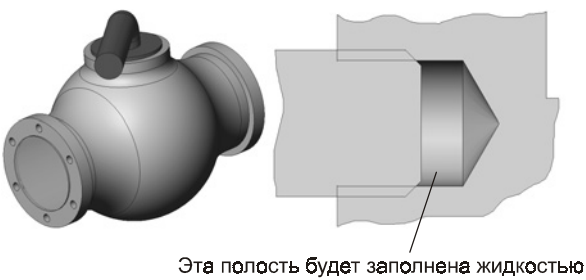


Рис. 5.13. Если опция **Exclude cavities without flow conditions** выключена, жидкостью будут заполнены и полости резьбового отверстия

- **Exclude internal spaces** (Исключить внутренне пространство). Для внешней задачи включение этой опции игнорирует все замкнутые полости внутри тела, такие полости в COSMOSFloWorks трактуются как "заполненные" телом (рис. 5.14).

Использование этих опций никак не влияет на саму модель SolidWorks. Сама модель не меняется, но ее пустые пространства по-иному трактуются внутри

COSMOSFloWorks. Замена жидкости телом происходит лишь в системе координат COSMOSFloWorks, т. к. только в этой системе существует понятие жидкости.

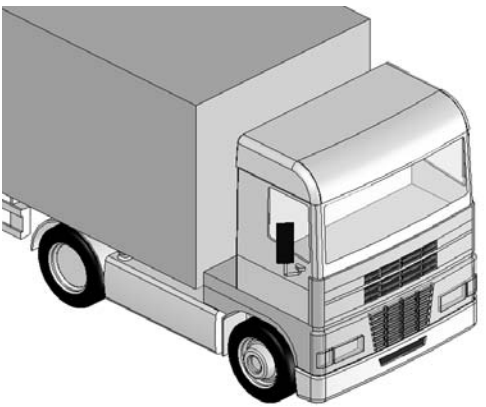


Рис. 5.14. Область в кабине грузовика по умолчанию заполнена газом, но ее имеет смысл исключить из анализа внешнего обтекания

COSMOSFloWorks и твердые тела

COSMOSFloWorks способен анализировать как сборки, так и многотельные детали (multibody parts).

Если компонент погашен (Suppressed), он полностью отсутствует для COSMOSFloWorks. Скрытый компонент не игнорируется — в нем строится расчетная сетка и происходит расчет. Поэтому, если дополнительные крышки на отверстиях смущают, их можно просто скрыть (если крышки созданы как отдельное тело) или сделать полностью прозрачными.

Наряду с погашением есть еще один способ исключить деталь из расчета твердого тела. В COSMOSFloWorks можно трактовать компонент (в случае сборки) или тело (в случае многотельной детали) как объем, занятый жидкой средой. В системе координат COSMOSFloWorks такой компонент будет рассматриваться не как твердое, а как жидкое тело. Это позволяет задавать характеристики жидкой среды локально внутри жидкостного пространства, например, начальные концентрации в объемах, изначально занятых разными жидкостями. С помощью таких тел можно также задавать характеристики расчетной сетки внутри отдельных подобластей. Очевидно, что в системе моделирования твердотельных конструкций SolidWorks изначально не предусмотрены никакие жидкостные объемы. Поэтому, чтобы локально определить свойства жидкости, необходимо создать твердое тело по объему интересуемой подобласти жидкости (что, возможно, потребует создания сборки или

многотельной детали) и указать COSMOSFloWorks трактовать его как жидкостный объем.

Для того чтобы трактовать твердый компонент как жидкое пространство из меню **FloWorks**, выберите **Component Control** (Управление компонентами). Далее, в окне **Component Control** в списке компонентов щелкните на необходимом компоненте и нажмите **Disable** (Отключить).

На рис. 5.15 показано задание начальной концентрации разных жидкостей, поступающих через патрубки в смеситель. Области патрубков заполнены телом, которое трактуется как жидкостный объем. Для каждого объема заданы соответствующие параметры концентрации жидкости: 1 — для жидкости, текущей в данном патрубке, 0 — для другой жидкости. Такое задание начальных концентраций позволяет сэкономить время, затрачиваемое на расчет данной стационарной задачи.

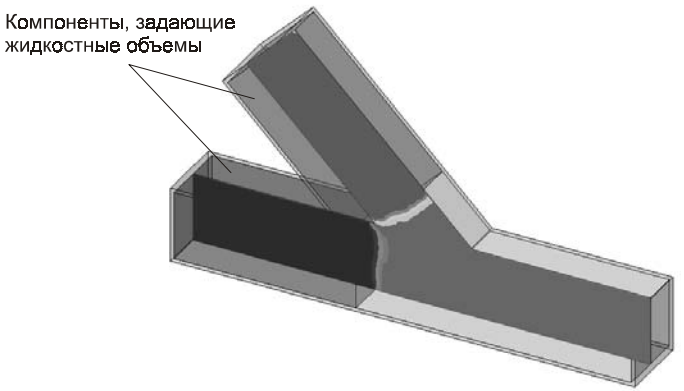


Рис. 5.15. Задание начальной концентрации жидкостей в патрубках смесителя с помощью дополнительных объемов

COSMOSFloWorks не поддерживает режим сокращенных компонентов (lightweight components), т. к. такие компоненты не полностью разрешены в составе сборки, и поэтому применение булевых операций к ним невозможно. Если сборка содержит сокращенные компоненты, то при открытии такой модели COSMOSFloWorks автоматически переведет их в полностью решенный (resolved) режим. Возможно, что после разрешения сокращенных компонентов, связь некоторых из этих компонентов или их поверхностей с условиями COSMOSFloWorks может быть разорвана. Как правило, восстановить связь компонентов и прикрепленных к ним данных помогает перестройка модели (опция **Перестроить**). При вызове перестройки модели автоматически вызывается обновление всех связей с COSMOSFloWorks. Если устранить поврежденную связь не удалось автоматически, COSMOSFloWorks выдает сообщение об ошибке с указанием, какой элемент модели и для какого условия был

утерян. На основе этой информации связь можно восстановить вручную, заново выделив необходимый компонент или его часть (поверхность, ребро, вершина). Во избежание таких трудностей при работе с COSMOSFloWorks рекомендуется отключить опцию **Автоматически загрузить делали как сокращенные** на вкладке **Качество изображения** и **Режим для большой сборки** окна **Настройки Пользователя - Общие** вызываемого из меню **Инструменты** | **Параметры**.

Связь с моделью

Всякий раз, когда меняется геометрия модели, COSMOSFloWorks отслеживает эти изменения и производит обновление связей модели с данными COSMOSFloWorks, а также предлагает скорректировать расчетную область модели в соответствии с новой геометрией. Если размер расчетной области был задан пользователем отличным от размера по умолчанию, можно отказаться от коррекции расчетной области, но в этом случае пользователь должен сам определить, подходит ли заданная расчетная область для новой геометрии.

Если вы находитесь в режиме частого редактирования модели, вы можете отключить автоматическое обновление данных COSMOSFloWorks при перестройке модели. Для этого в меню **FloWorks** | **Project** нужно снять флажок **Automatic Rebuild** (Автоматическое обновление). В этом случае проверка всех связей и проверка адекватности геометрии и расчетной области будут выполнены только при запуске на счет. В случае ошибки COSMOSFloWorks не запустит задачу и информирует о причинах сбоя.

5.4.2. Проект и конфигурация

Для создания нескольких исполнений изделия в едином файле модели, в SolidWorks предусмотрен менеджер конфигураций. Конфигурация представляет собой вариант моделирования (геометрического исполнения) детали. Каждый вариант модели требует проведения своего гидрогазодинамического (или теплового) анализа за исключением случаев, когда очевидно, что изменения никак не влияют на исследуемые свойства устройства (например, изменение формы ручки в модели шарового крана при исследовании адиабатического течения внутри крана).

Связь COSMOSFloWorks и SolidWorks

В COSMOSFloWorks возможно проведение анализа каждой из конфигураций модели. Данные COSMOSFloWorks ассоциируются с каждой конкретной конфигурацией модели. Такое "прикрепление" данных позволяет однозначно связать геометрию модели с ее гидрогазодинамическими и тепловыми харак-

теристиками, полученными в результате анализа COSMOSFloWorks, и, как следствие, легко проводить сравнение между различными вариантами как геометрического исполнения, так и вариантами задания исходных данных задачи.

Все данные о постановке задачи (граничные условия, начальные условия, вещества и т. д.), особенностях ее моделирования (тип задачи, расчетная область, настройки расчетной сетки, настройки сходимости и т. д.) и результаты ее расчета хранятся в проекте COSMOSFloWorks. Проект всегда связан с конкретной конфигурацией SolidWorks.

Примечание

Исходные данные хранятся в файле *.fwp, а результаты в *.fld. Эти файлы, как и другие файлы проекта, хранятся в папке проекта, которая именуется по номеру создания проекта и расположена в той же папке, что и модель SolidWorks. Для доступа к папке проекта необходимо в меню FloWorks выбрать **FloWorks | Project | Open Project Directory**. Связи с моделью сохраняются непосредственно в модели SolidWorks. Связь конфигурации и проекта прописывается в окне свойств конфигурации в поле **Комментарии** в виде строки, начинающейся со слов "NEVER EDIT THIS LINE". Никогда не редактируйте и не удаляйте эту строку, иначе связь с проектом COSMOSFloWorks будет утеряна.

Работа в COSMOSFloWorks начинается с создания проекта. При создании проекта определяется его связь с конфигурацией модели. При этом проект можно связать с существующей конфигурацией, а можно создать новую (рис. 5.16). Новая конфигурация будет точной копией текущей, но к ней уже будет "прикреплен" проект COSMOSFloWorks. Создание новой конфигурации используется, если необходимо исследовать ту же геометрию модели, но с другой постановкой газодинамической или тепловой задачи (например, с другими граничными условиями). Таким образом, как только с конфигурацией SolidWorks ассоциируется проект COSMOSFloWorks, конфигурация перестает быть просто вариантом моделирования геометрии устройства, она становится вариантом эксплуатации данного устройства.

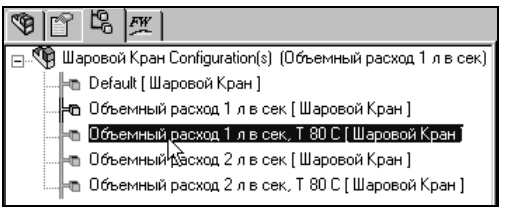


Рис. 5.16. Переключение между проектами COSMOSFloWorks осуществляется переключением между соответствующими конфигурациями

При создании проекта происходят следующие действия — создание необходимых файлов проекта, если не используется имеющаяся конфигурация, то

создание копии текущей конфигурации SolidWorks и создание связи файлов проекта с анализируемой конфигурацией. Все это происходит автоматически, пользователь лишь указывает имя новой или имеющейся конфигурации.

Подробную информацию о проекте и способах его создания см. в разд. 5.5.3.

Удаление данных COSMOSFloWorks

Удаление данных COSMOSFloWorks из модели происходит с удалением проекта COSMOSFloWorks. Это можно сделать двумя способами: с удалением связанной конфигурации и без удаления.

Первый способ — удаление конфигурации SolidWorks стандартными средствами SolidWorks, а именно, щелкнув правой кнопкой мыши на имени конфигурации и выбрав **Удалить**. COSMOSFloWorks сделает запрос на удаление файлов проекта, связанных с данной конфигурацией: "`Do you also want to delete the directory containing the COSMOSFloWorks files associated with this configuration (Хотите ли Вы также удалить папку, содержащую COSMOSFloWorks файлы, ассоциированные с удаляемой конфигурацией)?`" При нажатии **Yes**, все файлы проекта COSMOSFloWorks, в том числе и различные файлы результатов, будут удалены. Будьте внимательны при удалении проекта таким способом. Поскольку папка проекта является папкой, в которую по умолчанию (если не определено пользователем другой папки) сохраняются отчеты, графики, картинки и другие файлы результатов, то в этой папке может находиться важная для вас информация.

Другой способ — очистка конфигурации SolidWorks от данных COSMOSFloWorks. В этом случае удаление самой конфигурации не происходит, а удаляются только связи проекта с конфигурацией и все файлы проекта, в том числе и файлы результатов. Для удаления проекта таким способом выберите **FloWorks** | **Project** | **Clear Configuration** (FloWorks | Проекта | Очистить конфигурацию).

5.4.3. Визуализация результатов в среде SolidWorks

Одним из преимуществ средств анализа, интегрированных в САПР, является визуализация результатов расчета непосредственно в графическом окне системы моделирования.

Несомненно, это сильно облегчает обработку результатов, что в конечном итоге приводит к экономии времени, необходимого инженеру для решения задачи.

В этом разделе мы кратко рассмотрим взаимодействие пользователя с SolidWorks при просмотре результатов. *Подробную информацию о просмотре результатов анализа см. в разд. 5.5.9.*

Как представлены результаты

В COSMOSFloWorks результаты могут быть представлены различными способами:

- картины распределения параметров поля течения и температуры в сечениях (**Cut Plots**, **3D Profile Plots**) и на поверхностях модели (**Surface Plots**), отображение поверхностей уровня (**Isosurfaces**) визуализируются непосредственно в окне SolidWorks;
- траектории частиц (**Particle Study**) и линии тока (**Flow Trajectories**) также показываются непосредственно в окне SolidWorks;
- определение значений параметров в точке (**Point Parameters**), интегральных и локальных (минимальное, максимальное, среднее) значений параметров на поверхности (**Surface Parameters**) и в объеме (**Volume Parameters**). Таблицы рассчитанных значений показываются в окне COSMOSFloWorks или выводятся в файл Microsoft Excel;
- графики изменения параметров во время расчета (**Goal Plots**), графики изменения параметров вдоль траекторий или любого заданного пользователем направления (**XY Plots**) выводятся в файл Microsoft Excel (значения параметров вдоль траекторий может также выводиться в текстовый файл);
- отчеты (**Reports**) выводятся в формате Microsoft Word;
- картины распределения параметров и траекторий, отображаемые в окне SolidWorks, могут быть сохранены в форматах BMP, JPG, VRML или AVI.

Отображение результатов возможно одновременно в каждой из четырех секций графической области SolidWorks. Каждая из них имеет свои заданные пользователем установки просмотра. В одной секции окна можно строить различные распределения параметра (по поверхности, в плоскости), но отображаемый параметр для секции — всегда один. Например, в одной секции можно визуализировать распределение давления по поверхностям модели или в сечениях, а в другой — распределение скорости в тех же или других сечениях модели (рис. 5.17).

Для визуализации распределения параметров в сечении необходимо выделить плоскую поверхность или плоскость. Плоскость может являться одной из имеющихся координатных плоскостей или дополнительной плоскостью, построенной с помощью опции **Вставка** | **Справочная геометрия** | **Плоскость**. Для сборок допустимо выделение плоскостей, принадлежащих сборке. Плоскости, созданные в деталях, не могут быть выделены. Плоскость сечения может быть параллельно сдвинута на заданное расстояние от выделенной плоской поверхности или плоскости.

Для отображения траекторий частиц или линий тока необходимо указать точку, через которую проходит траектория. Можно явно определить эту точку,

задав ее координаты, но удобнее выделить поверхность (плоскость, эскиз или кривую) и задать число точек, которые будут равномерно распределены на выделенной поверхности (плоскости, эскизе или кривой соответственно). При желании каждую траекторию можно сохранить как кривую (элемент моделирования **Кривая**).

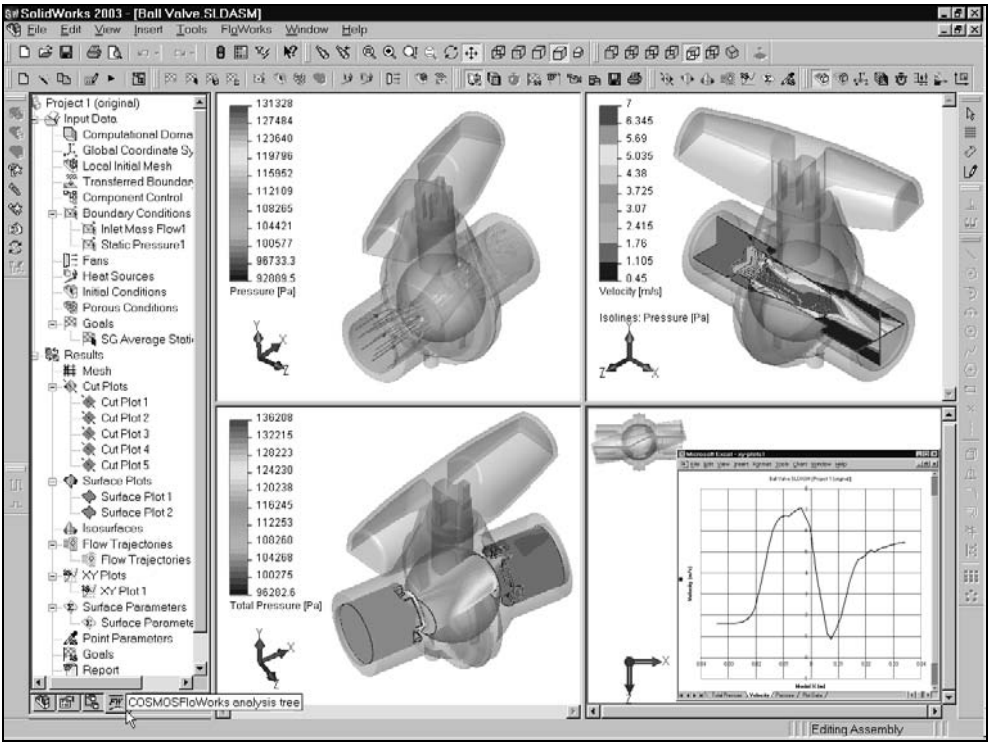


Рис. 5.17. Визуализация результатов в различных секциях графической области

При определении значений параметров в точке интересующие точки могут быть заданы посредством указания их координат или взяты с выделенной плоской поверхности или плоскости: равномерно по поверхности при задании общего числа точек или в произвольных точках поверхности при указании их местоположения щелчком кнопки мыши.

Как и при отображении результатов в сечениях, плоскость определения точек (в том числе и точек траекторий) может быть сдвинута на заданное расстояние от выделенной плоской поверхности или плоскости (рис. 5.18).

Для отображения картин распределения параметров или определения их значений на поверхностях необходимо выделить интересующие поверхности модели. Для отображения распределения параметров в объеме необходимо

выделить компонент, определяющий этот объем. Это можно сделать, щелкнув либо на его имени в дереве конструирования (**FeatureManager**), либо на любой его поверхности.

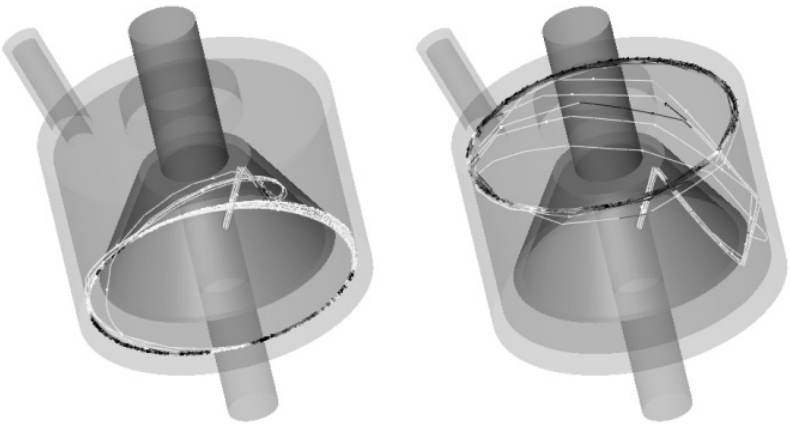


Рис. 5.18. Траектории частиц различной массы. Точки траекторий взяты на поверхности, определяющей входное отверстие

Во всех случаях выделенная поверхность может быть не только стенкой модели, но и поверхностью крышки (т. е. поверхностью, определяющей отверстие), а также поверхностью тела, рассматриваемого в COSMOSFloWorks как жидкостный объем, т. е. тела, отключенного в **Component Control**. Такое тело может быть специально создано лишь для того, чтобы получить значения параметров в сечении потока (при выделении поверхности тела) или в объеме жидкости (при выделении целого тела). В этом случае тело должно быть создано и помещено в расчетную область до начала расчета.

Как увидеть результаты

При визуализации результатов непосредственно в окне SolidWorks, модель может полностью или частично закрывать собой картины результатов, особенно это касается внутренних задач, где интересующая область находится внутри модели. Существует несколько способов, позволяющих добиться того, чтобы модель не мешала восприятию результатов:

- отображение модели в режиме **Каркасного представления** — этот режим сохраняет представление о геометрии модели и в то же время максимально открывает ее для просмотра результатов. В качестве альтернативы стандартному виду **Каркасного представления** в COSMOSFloWorks существует способ отображения только линий пересечения поверхностей — **Outlines** (Контуры). Отображение только линий пересечения поверхно-

стей в одних случаях позволяет не перегружать вид излишними деталями, в других же может затруднить восприятие результатов. Режим **Outlines** включается при выборе **FloWorks** | **Results** | **Display** | **Outlines** или нажатии кнопки **Display Outlines** на панели инструментов COSMOSFloWorks **Display Results** (Отображение результатов) (рис. 5.19);

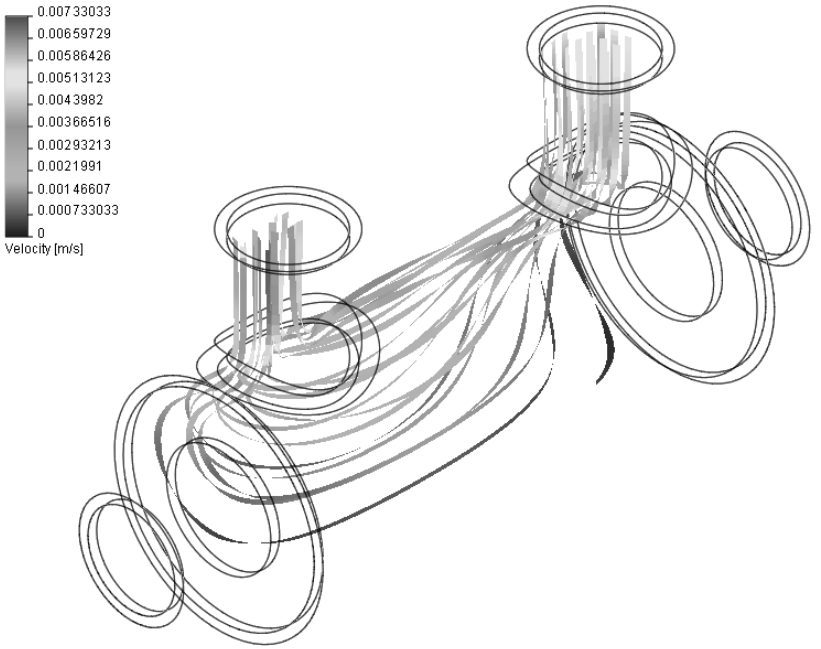


Рис. 5.19. Вид модели в режиме **Outlines** при визуализации результатов

- использование **Разреза** — разрез модели не "режет" картину результатов. Использование разреза делает картину особенно наглядной при отображении параметров в сечениях (Cut Plots, 3D Profile Plots) и на поверхностях модели (рис. 5.20);
- задание свойства прозрачности модели. Свойства прозрачности в SolidWorks можно задавать как для отдельных поверхностей, так и для элементов конструирования или целых тел. Для удобства задания прозрачности сразу всей модели можно воспользоваться средством COSMOSFloWorks **Model Transparency** (Прозрачность модели). Для этого выберите **FloWorks** | **Results** | **Display** | **Transparency** или нажмите кнопку **Set Model Transparency** на панели инструментов COSMOSFloWorks **Display Results** (рис. 5.21);
- частичное или полное скрытие модели. В SolidWorks легко можно скрыть компонент в составе сборки или тело в составе многотельной детали. Но

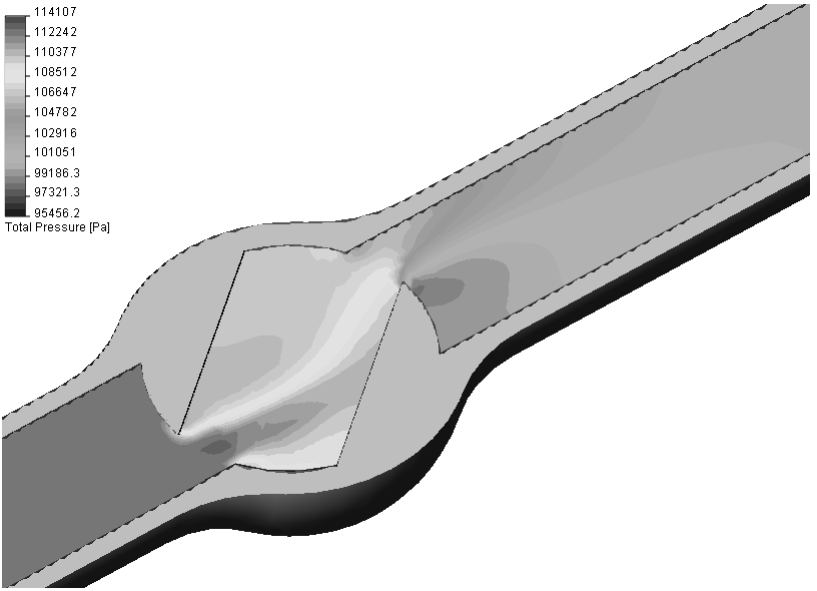


Рис. 5.20. Использование разреза при отображении картины в сечениях



Рис. 5.21. Степень прозрачности задана одинаковой для всей модели с помощью **Model Transparency**

если необходимо скрыть целиком модель, сделать это быстро поможет опция COSMOSFloWorks **Display Geometry** (Отображение геометрии). Достаточно нажать кнопку **Display Geometry** на панели инструментов COSMOSFloWorks **Display Results** и модель будет скрыта. Повторное нажатие показывает модель.

Следует отметить, что перспективный вид модели (вид **Перспектива**) не поддерживается COSMOSFloWorks. Для конфигураций SolidWorks, связанных с проектом COSMOSFloWorks, попытка назначить вид перспективы будет проигнорирована.

Для удобства навигации по сильно приближенной модели, когда видимая область составляет небольшую часть модели, в COSMOSFloWorks существует специальный режим — **Map View** (Обзорный вид). Когда включен режим **Map View**, то, как только модель становится больше видимой области экрана, в правом верхнем углу появляется уменьшенный вид модели, на котором показана ее видимая часть (рис. 5.22).

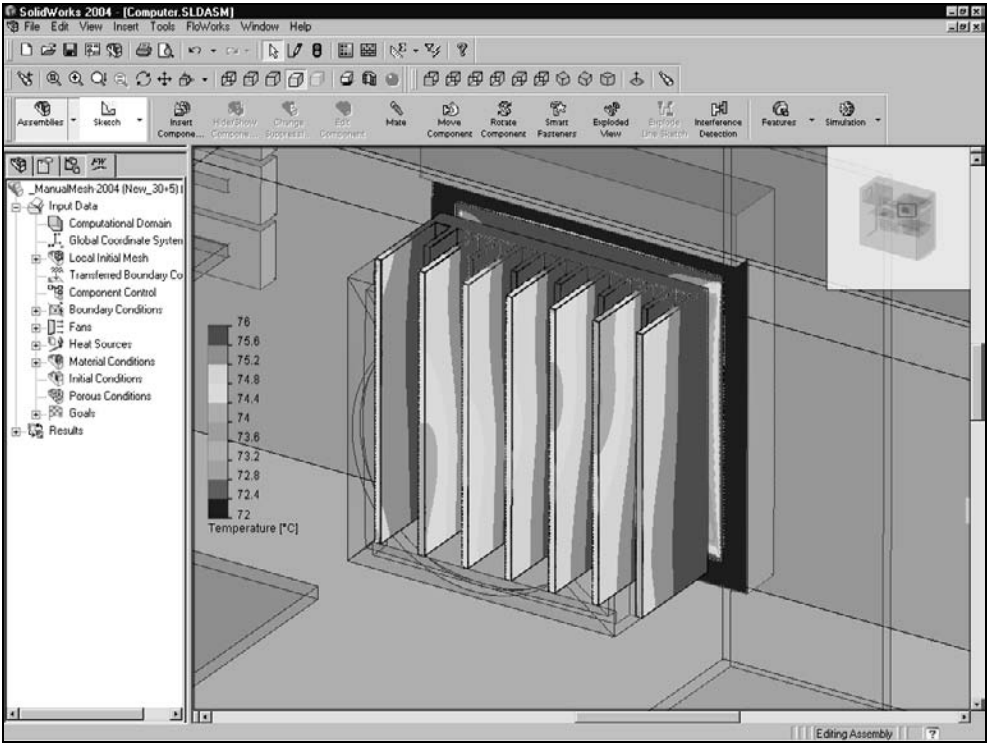


Рис. 5.22. Режим обзорного вида облегчает навигацию по модели

Несколько слов о производительности

Отображаемые картины результатов цельно связаны с моделью, они вращаются, перемещаются и масштабируются одновременно вместе с моделью. Картины результатов и геометрии модели находятся в едином пространстве Open GL[1]. Отображение результатов, как и отображение модели, требует соответствующих ресурсов памяти и процессора. Если отображается довольно большое число картин результатов (например, визуализация распределения поля температуры на всех поверхностях сложного теплообменника), на слабых графических картах возможно видимое замедление при изменении ориентации модели (аналогичное замедление может происходить и без визуализации результатов для очень сложной модели на не очень мощной графической карте). Избавиться от такого замедления можно, отключив прорисовку результатов во время изменения ориентации модели. Для этого в меню **FloWorks** выберите **Results** | **View Settings** (Результаты | Настройки просмотра). В окне **View Settings** перейдите на вкладку **Options** (Опции) и измените значение опции **Display while dynamic** (Отображать во время изменения ориентации) на **No** для соответствующего типа отображаемых результатов (картины в сечениях, картины на поверхностях, поверхности уровня или траектории).

Если возникают проблемы с отображением результатов COSMOSFloWorks, возможно установленная графическая карта не поддерживает набор инструкций Open GL, используемый в COSMOSFloWorks, или работает с ним некорректно. Если включено аппаратное ускорение графики, попробуйте использовать программное ускорение. Для этого в меню SolidWorks выберите **Инструменты** | **Параметры**, щелкните на пункте **Качество изображения** и выделите опцию **Использовать программу OpenGL**.

5.4.4. Интерфейс COSMOSFloWorks

COSMOSFloWorks выполнен по стандартам SolidWorks, предполагающим высокую степень интеграции, интуитивно понятный интерфейс и легкость в управлении.

COSMOSFloWorks имеет следующие элементы управления: меню, в том числе и контекстное, Дерево анализа, панели инструментов.

Меню

После установки программы, в списке приложений SolidWorks, вызываемом из меню **Инструменты** | **Добавления**, появляется новый пункт — COSMOSFloWorks. Если COSMOSFloWorks активизирован, то интерфейс SolidWorks меняется следующим образом:

---

[1] Open GL — система трехмерной графики, используемая в SolidWorks.

- в главное меню SolidWorks добавляется пункт **FloWorks**;
- в меню **?** добавляются пункты **COSMOSFloWorks Help Topics** (Справка по COSMOSFloWorks) и **About COSMOSFloWorks** (О COSMOSFloWorks);

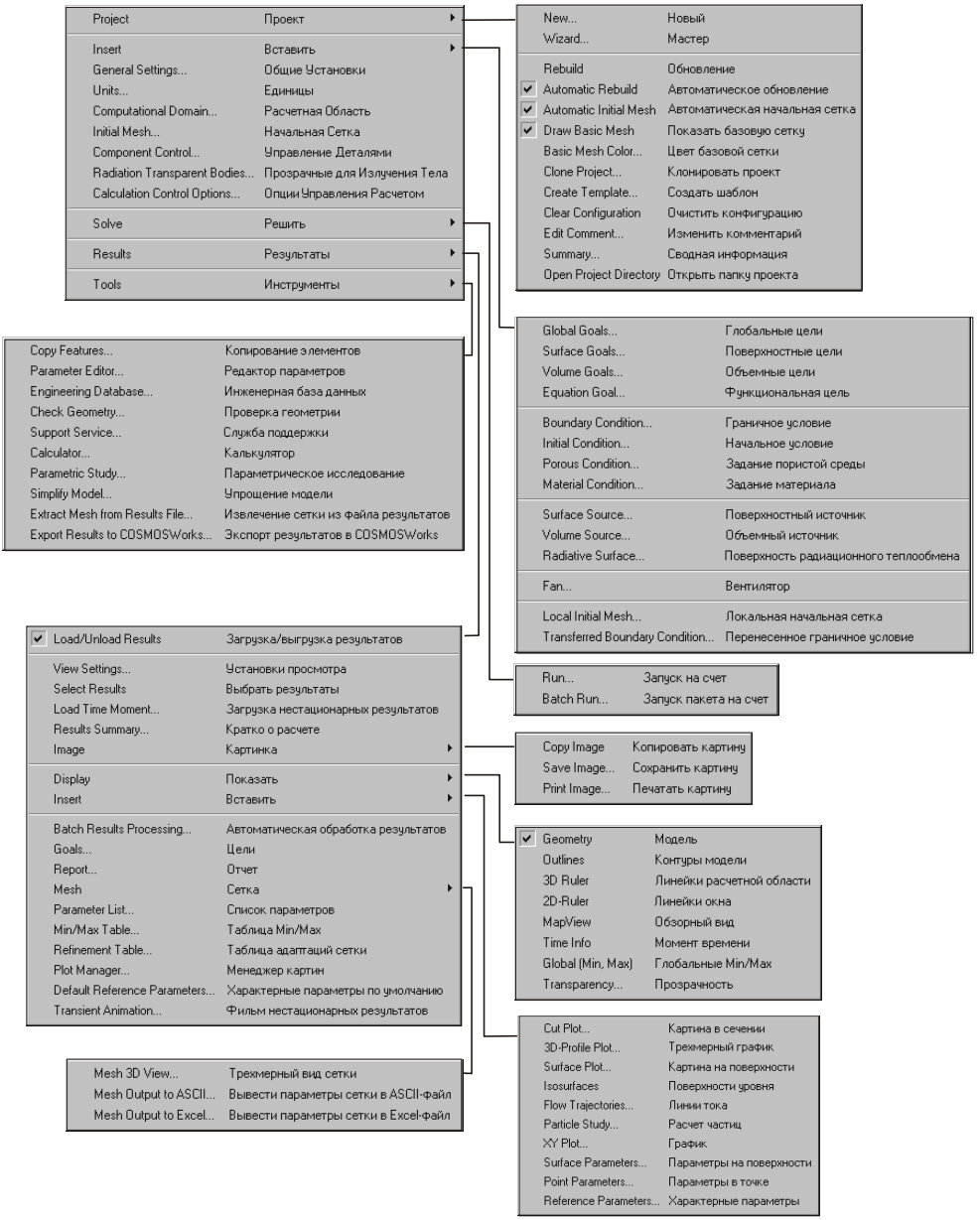


Рис. 5.23. Структура меню COSMOSFloWorks

- в контекстное меню, вызываемое нажатием правой кнопки мыши на любой панели инструментов, добавляются панели инструментов COSMOSFloWorks;
- в окне задания параметров SolidWorks, вызываемом из меню **Инструменты | Параметры**, кнопка **Посторонняя фирма** вызывает окно **COSMOSFloWorks Options** (Настройки COSMOSFloWorks).

Меню COSMOSFloWorks показано на рис. 5.23.

Кроме того, после создания проекта COSMOSFloWorks в контекстном меню, вызываемом нажатием правой кнопки мыши на поверхности модели, активизируются следующие пункты:

- **Insert Boundary Condition** (Вставить граничное условие);
- **Insert Surface Goals** (Вставить поверхностную цель).

В режиме загруженных результатов задачи в контекстном меню, вызываемом нажатием правой кнопки мыши в любой точке графической области, активизируется пункт **View Settings** (Параметры просмотра).

Дерево анализа

Дерево анализа (COSMOSFloWorks analysis tree) появляется сразу после создания проекта COSMOSFloWorks в левой части окна SolidWorks рядом с Менеджером конфигураций. Дерево анализа является наиболее удобным и быстрым способом постановки задачи, запуска на счет и просмотра результатов.

Функции, которые выполняет Дерево анализа для проведения анализа задачи в COSMOSFloWorks, сходны с функциями, которые выполняет Дерево конструирования FeatureManager для создания детали в SolidWorks.

Объектом моделирования является форма. В SolidWorks форма определяется набором базовых элементов конструирования (основание, вырез, скругление, оболочка и т. д.), из которых, как из кирпичиков, строится та или иная геометрическая конфигурация. Такая организация процесса моделирования позволяет легко вносить изменения в существующую конфигурацию формы и делает сам процесс моделирования более наглядным. Работа с элементами конструирования осуществляется с помощью дерева конструирования FeatureManager. Объектом исследования COSMOSFloWorks является гидрогазодинамическая и/или тепловая задача, полностью определенная в проекте COSMOSFloWorks. Проект, как и конфигурация модели, также определяется составляющими элементами, такими как расчетная область, граничные условия, начальные условия, материалы, источники тепла, настройки сетки, элементы визуализации результатов (картины в плоскостях, картины на поверхностях, картины траекторий и др.). Работа с элементами проекта осуществляется с помощью Дерева анализа (рис. 5.24).

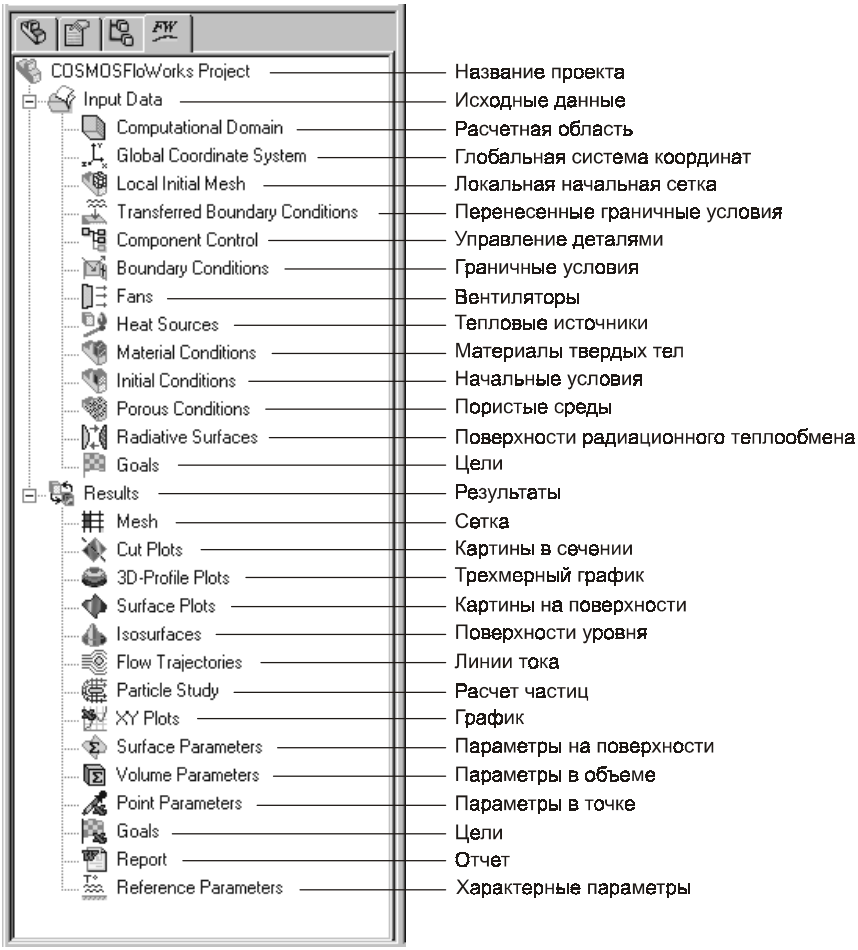


Рис. 5.24. Дерево анализа COSMOSFloWorks

Часть функций Дерева анализа продублирована в меню и на панелях инструментов. В частности, создание элемента возможно с помощью меню, Дерева анализа или панели инструментов.

Следующие действия с элементами проекта возможны только в Дереве анализа:

- редактирование определения (**Edit Definition**) элементов;
- удаление (**Delete**) элементов;
- погашение (**Suppress**) и высвечивание (**Unsuppressed**) элементов исходных данных. Аналогично погашению элементов геометрии модели, при погашении элемента проекта он остается в проекте, но игнорируется;

- скрытие (**Hide**) и отображение (**Show**) элементов исходных данных и результатов;
- переименование элементов, которое можно выполнить, дважды нажав на имя элемента с интервалом (нажатие, пауза, нажатие), затем необходимо ввести новое имя и нажать клавишу <Enter> для изменения имени элемента;
- клонирование (**Clone**) элементов просмотра результатов;
- сохранение в файл картин в сечениях и на поверхностях модели без визуализации в окне SolidWorks (**Save as**).

Панели инструментов

На панелях инструментов сосредоточены наиболее часто используемые команды программы. Команды, вызываемые из панелей инструментов, полностью эквивалентны командам, вызываемым из меню или Дерева анализа. Отобразить или скрыть панели инструментов COSMOSFloWorks можно с помощью контекстного меню, вызываемого нажатием правой кнопки мыши на любой панели инструментов.

Назначение кнопок на панелях **Main** (Главная), **Features** (Элементы), **Results Main** (Главная для результатов), **Results Insert** (Вставить элемент результатов), **Results Display** (Отображение результатов) представлено в табл. 5.1—5.5.

Таблица 5.1. *Панель инструментов* ***Main***

Кнопка	Ярлык		Функция
	**New Project**	Новый проект	Создание нового проекта по шаблону
	**Wizard**	Мастер проекта	Инструмент пошагового создания проекта
	**Clone Project**	Клонирование проекта	Создание точной копии (клона) проекта
	**General Settings**	Общие установки	Определение общих установок проекта (тип задачи, физические модели, тип жидкости, система единиц, общие начальные условия и др.), задание внешних условий (Ambient Conditions)
	**Run Solver**	Запуск на счет	Запуск проекта на счет
	**Engineering Database**	Инженерная база данных	Открытие базы данных, содержащей материалы, системы единиц и др.

Таблица 5.2. *Панель инструментов* ***Features***

Кнопка	Ярлык		Функция
	**Global Goal**	Глобальная цель	Определение интересующего параметра расчета
	**Surface Goal**	Поверхностная цель	Определение интересующего поверхностного параметра
	**Volume Goal**	Объемная цель	Определение интересующего объемного параметра
	**Equation Goal**	Функциональная цель	Определение интересующего параметра как функции других параметров
	**Boundary Condition**	Граничное условие	Задание граничных условий втекания и вытекания на отверстиях (массовый расход, скорость, давление и др.) и стенках (шероховатость, температура, подвижность стенки и др.)
	**Initial Condition**	Начальное условие	Задание локальных начальных условий
	**Porous Condition**	Пористые тела	Задание пористых тел
	**Material Condition**	Материалы	Задание материалов твердых тел
	**Surface Source**	Поверхностный источник	Задание теплового источника на поверхности
	**Volume Source**	Объемный источник	Задание объемного теплового источника
	**Fan**	Вентиляторы	Задание вентилятора как устройства, задающего зависимость объемного расхода от перепада статического давления на данном устройстве
	**Local Initial Mesh**	Локальная начальная сетка	Установка настроек сетки в локальной области
	**Transferred Boundary Condition**	Перенесенные граничные условия	Позволяет в качестве граничных условий использовать результаты расчета, полученные ранее в данном или каком-либо другом проекте

Таблица 5.3. *Панель инструментов* ***Results Main***

Кнопка	Ярлык		Функция
	**Load/Unload Results**	Загрузка/Выгрузка результатов	Включает/Отключает режим просмотра результатов

Таблица 5.3 *(окончание)*

Кнопка	Ярлык		Функция
	**View Settings**	Установки просмотра	Определяет установки просмотра (отображаемый параметр, диапазон значений, способ отображения, тип палитры и др.)
	**Load Time Moment**	Загрузка нестационарных результатов	Загружает результаты для определенного момента времени в случае нестационарной задачи
	**Generate Goals Plot**	Построение графика целей	Построение графика изменения интересующего параметра в процессе расчета
	**Generate Report**	Создание отчета	Создание отчета о выполненном расчете
	**Transient Animation**	Фильм нестационарных результатов	Создание анимации результатов нестационарной задачи
	**Copy Image**	Копирование изображения	Копирование изображения в графической области в буфер
	**Save Bitmap Image**	Сохранение изображения	Сохранение изображения в графической области в файл формата BMP
	**Print Active View**	Печать текущего изображения	Печать изображения в графической области

Таблица 5.4. *Панель инструментов* ***Results Insert***

Кнопка	Ярлык		Функция
	**Insert Cut Plot**	Создание картины в сечении	Создание картины распределения параметра в сечении
	**Insert 3D-Profile Plot**	Создание картины трехмерного графика	Создание картины трехмерного графика распределения параметра в сечении
	**Insert Surface Plot**	Создание картины на поверхности	Создание картины распределения параметра на поверхности
	**Display Isosurfaces**	Показать поверхности уровня	Изображение поверхностей уровня
	**Insert Flow Trajectories**	Показать линии тока	Изображение линий тока, определение значений параметров вдоль линий тока

Таблица 5.4 *(окончание)*

Кнопка	Ярлык		Функция
	**Insert Particle Study**	Расчет частиц	Изображение траекторий частиц, расчет взаимодействия со стенками, определение значений параметров вдоль траекторий частиц
	**Insert XY Plot**	Построение графика	Построение графика изменения параметров вдоль выбранного направления
	**Computation of Surface Parameters**	Расчет параметров на поверхности	Просмотр минимальных, максимальных и средних, а также интегральных значений параметров на поверхности
	**Computation of Volume Parameters**	Расчет параметров в объеме	Просмотр минимальных, максимальных и средних, а также интегральных значений параметров в объеме
	**Insert Point Parameters**	Расчет параметров в точке	Просмотр значений параметров в точке

Таблица 5.5. *Панель инструментов* ***Results Display***

Кнопка	Ярлык		Функция
	**Display Model Geometry**	Отображение модели	Скрывает/Показывает модель
	**Display Outlines**	Отображение контуров	Скрывает/Показывает очертания модели
	**Display 3D-ruler**	Отображение линейки	Скрывает/Показывает линии и насечки на гранях расчетной области
	**Display Time Info**	Отображение момента времени	Скрывает/Показывает информацию о текущем загруженном моменте времени нестационарной задачи
	**Display Global Min Max**	Отображение минимума и максимума	Скрывает/Показывает минимальное и максимальное значение отображаемого параметра
	**Set Model Transparency**	Установить прозрачность модели	Задает степень прозрачности для всей модели
	**Display MapView**	Отображение обзорного вида	Включает/Выключает общий вид модели с отмеченной областью графического окна

Локализация

На сегодняшний день существует английская и японская версии COSMOSFloWorks. Компания NIKA GmbH, разработчик COSMOSFloWorks, планирует в будущем расширить список локализаций, в том числе добавить и русскую. Тем не менее, если наличие русской локализации является принципиальным вопросом для принятия решения об использовании COSMOSFloWorks уже сегодня, создание ее возможно по запросу к разработчикам.

5.5. Решение задачи

При решении инженерной задачи с помощью COSMOSFloWorks можно выделить следующие этапы:

1. Возможность решения задачи с помощью COSMOSFloWorks.
2. Создание или необходимая модификация модели SolidWorks.
3. Создание проекта.
4. Задание граничных и начальных условий.
5. Постановка целей проекта.
6. Регулирование расчетной сетки.
7. Управление процессом расчета.
8. Просмотр и интерпретация результатов.
9. Определение точности полученного решения.

В этом разделе подробно рассматривается каждый.

5.5.1. Возможность решения задачи

Прежде всего, необходимо выделить геометрические и физические особенности рассматриваемой инженерной задачи, которые, по оценкам пользователя, существенно влияют на ее решение. Это необходимо для оценки возможности решения данной задачи с помощью COSMOSFloWorks. Например:

- Если в данной задаче имеются подвижные детали, изменяющие геометрию проточного тракта, и эта геометрия не может быть фиксирована во вращающейся системе координат, то необходимо оценить:
  - существенно ли влияют подвижность этих деталей и изменение геометрии проточного тракта во вращающейся системе координат на решение задачи;
  - если да, то можно ли задачу решить как квазистационарную, поскольку геометрия проточного тракта в процессе расчета в COSMOSFloWorks

изменяться не может (поверхности твердых тел могут быть подвижными, но без изменения геометрии проточного тракта, в том числе во вращающейся системе координат).

- Если в данной задаче имеется многокомпонентная среда с реагирующими между собой компонентами, то важен ли учет химических реакций для решения данной задачи, или реагирующие компоненты смеси можно заменить продуктами их реакции, или рассматривать их как нереагирующие вследствие их слабого перемешивания и/или малых скоростей реакций (химические реакции в COSMOSFloWorks не рассматриваются).
- Если в данной задаче имеется свободная поверхность жидкости, то важен ли учет ее подвижности для решения данной задачи, или ее можно заменить твердой поверхностью; а также есть ли необходимость рассчитывать одновременно течение жидкости и газа, поскольку в COSMOSFloWorks жидкость и газ одновременно не рассматриваются, соответственно не рассматриваются свободные поверхности жидкости.

Можно привести и другие примеры явной невозможности использования COSMOSFloWorks для решения некоторых инженерных задач, а также примеры упрощения инженерных задач с целью их решения с помощью COSMOSFloWorks, но предвидеть и описать все возможные ситуации невозможно — пользователь сам должен принимать соответствующие решения по каждой конкретной задаче, предварительно ознакомившись с возможностями COSMOSFloWorks. Может быть для этого понадобится дополнительный просмотр различных надежных литературных источников или привлечение опыта других, более опытных разработчиков, но лучше это сделать как можно раньше, чтобы потом не тратить время впустую. При этом не помешает критический подход к чужому опыту, поскольку этот опыт может оказаться не только бесполезным, но даже вредным, если ему слепо следовать. Не исключено, что пользователю придется самому заняться исследованием данного вопроса.

Если вы определили, что решить данную инженерную задачу с помощью COSMOSFloWorks возможно, или, несмотря на некоторые сомнения, вы хотите попробовать это сделать, то следующий этап, — это создание SolidWorks-модели (если она еще не была создана ранее) и проекта COSMOSFloWorks для решения данной задачи.

5.5.2. Модификация модели SolidWorks

Если модель SolidWorks уже создана в процессе проектирования изделия, т. е. полностью адекватна изделию, то не исключено, что для решения поставленной инженерной задачи с помощью COSMOSFloWorks эту модель необходимо модифицировать:

- упростить, убрав из рассмотрения (погасив) те ее детали, которые не влияют на решение задачи, но увеличивают потребляемые COSMOSFloWorks компьютерные ресурсы — в первую очередь память — и, возможно, затрачиваемое на решение задачи процессорное время (например, может быть нет необходимости задавать гофрированную поверхность детали, на разрешение которой расчетной сеткой понадобится громадное число ячеек, совершенно бесполезных с точки зрения решения задачи, а целесообразнее задать вместо нее эквивалентную шероховатость стенки, или, например, если модель имеет тонкие стенки, изогнутые или плоские, но не совпадающие с направлением координатных осей, обе стороны которых находятся в контакте с текучей средой, то, если их толщина несущественна с точки зрения решения задачи, ее целесообразно увеличить насколько это возможно, что позволит сократить число ячеек расчетной сетки, необходимых для разрешения этих стенок);
- дополнить модель необходимыми крышками, закрывающими входные и выходные отверстия;
- изменить модель во избежание конфликтных сопряжений (касание, сопряжение тел по ребру);
- создать фиктивные тела, например, для задания в локальном объеме жидкости начальных условий, локальных настроек сетки или для получения значений параметров в локальной области жидкости;
- дополнить вспомогательными деталями, например входными и выходными трубками, необходимыми для обеспечения безвихревого течения на входных и выходных отверстиях модели при решении задачи с помощью COSMOSFloWorks. Очевидно, что присоединение к модели необходимых для решения задачи дополнительных деталей неизбежно приведет к увеличению числа ячеек расчетной сетки, соответственно к увеличению требуемой памяти и процессорного времени, поэтому их размеры должны быть адекватными поставленной задаче.

Эти действия при условии их правильного выполнения могут оказаться очень существенными для решения задачи. Если не все последствия данных действий ясны, то может оказаться целесообразным варьирование деталей модели и/или их размеров в серии расчетов с целью определения их влияния на результаты расчета.

В принципе, модификацию модели можно производить в любой момент, предшествующий запуску задачи на счет. Как уже отмечалось, COSMOSFloWorks динамически отслеживает изменения модели. Поэтому, если первоначально нет ясности в том, какие манипуляции с моделью нужно произвести, чтобы адаптировать или оптимизировать ее к проведению анализа в COSMOSFloWorks, можно переходить к следующему этапу — созданию проекта COSMOSFloWorks.

5.5.3. Создание проекта COSMOSFloWorks

Проект выполняет две функции. Во-первых, проект связан с конкретной геометрической конфигурацией модели и, таким образом, однозначно определяет соответствие между геометрическим исполнением модели и его гидрогазодинамическими и тепловыми характеристиками, полученными в результате расчета. Имя конфигурации, к которой присоединен проект, является одновременно и именем этого проекта. Во-вторых, проект содержит все данные о постановке задачи, особенностях ее моделирования и результатах расчета. Часть исходных данных (так называемая *базовая* часть проекта) может быть определена при создании проекта. Данные проекта, составляющие его базовую часть, представлены в табл. 5.6. *Подробное описание данных базовой части проекта см. в разд. "Мастер проекта" данной главы.*

Таблица 5.6. *Базовая часть проекта*

Тип данных	Описание
Система единиц	Система единиц измерения, используемая в проекте для задания численных значений (СИ, СГС, и др.). Выбранная система единиц не влияет на единицы измерения SolidWorks
Тип текучей среды	Один из четырех возможных типов текучей среды: жидкость (несжимаемая), газ, неньютоновская жидкость или сжимаемая жидкость
Физические особенности	Учитываемые физические особенности, такие как: теплопередача в теле, тип течения (ламинарный, турбулентный, ламинарный и турбулентный), радиационный теплообмен, нестационарность, гравитация, течение газа при больших числах Маха и др.
Система координат	Стационарная или вращающаяся с постоянной угловой скоростью
Тип задачи	Внешняя или внутренняя
Шероховатость	Значение шероховатости для всех стенок модели
Текучая среда	Жидкости или газы, определенные условиями задачи
Тепловое условие на стенках	Тепловое граничное условие на всех стенках модели (для расчета конвективного теплообмена между поверхностью твердых тел и текучей средой). Задается при отсутствии учета теплопередачи в теле
Условия радиационного теплообмена	Внешняя радиация, солнечная радиация, тип поверхности радиационного теплообмена. Задается только при учете радиационного теплообмена
Твердые тела	Материалы твердых тел, определенные условиями задачи. Задается только при учете теплопередачи в теле

Таблица 5.6 *(окончание)*

Тип данных	Описание
Тепловое условие на внешних стенках	Тепловое граничное условие на всех внешних стенках модели (для расчета конвективного теплообмена между поверхностью твердых тел и внешней средой). Задается только для внутренних задач при учете теплопередачи в теле
Начальные (внешние) условия	Значения термодинамических параметров, параметров турбулентности, скорости и концентрации в начальный момент времени; для внешних задач — значения параметров невозмущенного потока (параметры, заданные на границах расчетной области)
Уровень решения и разрешения геометрии	Критерии, определяющие точность решения поставленной задачи с помощью установок расчетной сетки и критериев завершения расчета

Проект может быть создан тремя способами:

- по шаблону — в шаблоне проекта определена его базовая часть. Существует стандартный шаблон, поставляемый вместе с продуктом. Пользователь может также создать свой собственный шаблон на основе текущего проекта и использовать его в дальнейшем для создания новых проектов с идентичной или схожей базовой частью;
- с помощью Мастера проекта. **Wizard** (Мастер проектов) — инструмент пошагового создания базовой части проекта. Использование Мастера проекта является наиболее наглядным путем создания проекта;
- клонированием имеющегося проекта — если вы собираетесь создать проект, незначительно отличающийся от уже имеющегося (например, исследуя поведение устройства, варьируя какой-нибудь из параметров течения), то наиболее удобный путь создания нового проекта — клонировать (копировать) текущий проект. Клонированный проект будет иметь все установки текущего проекта, включая установки просмотра результатов. Клонировать проект и затем изменить какую-нибудь из его установок, как правило, быстрее, чем создавать его заново с помощью Мастера проекта. Клонировать проекты возможно в рамках одной модели. Клонировать проект из одной модели в другую невозможно, однако возможно копирование отдельных элементов проекта между проектами разных моделей с помощью опции **Copy Features** (Копирование элементов).

Базовая часть проекта содержит данные, являющиеся достаточными для расчета внешних задач, т. к. в случае внешних задач заданные значения термодинамических параметров, параметров турбулентности, скорости и концен-

трации определяют начальные условия задачи и, одновременно, условия невозмущенного потока, задающиеся на границах расчетной области, т. е. граничные условия для внешней задачи. Для внутренних задач, как правило, характерно наличие граничных условий втекания и вытекания, которые задаются отдельно. Кроме того, независимо от типа задачи, может возникнуть необходимость настройки установок расчетной сетки, критериев останова задачи, задания целей исследования и др.

Создание проекта по шаблону

Для создания проекта на основе шаблона проекта из меню **FloWorks** выберите **Project** | **New** (Проект | Новый) (рис. 5.25).

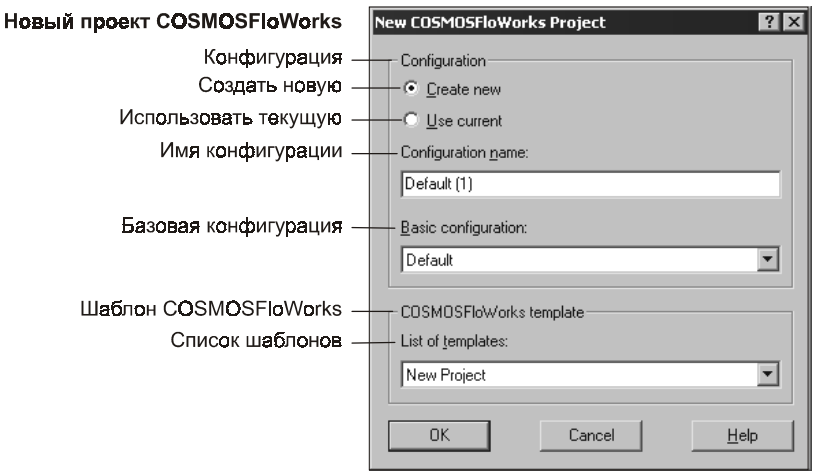


Рис. 5.25. Создание проекта по шаблону

При создании по шаблону проект можно привязать либо к любой существующей конфигурации модели, либо скопировать текущую конфигурацию под новым именем, связав данные COSMOSFloWorks с этой новой конфигурацией. В первом случае необходимо выбрать опцию **Use current** (Использовать текущую) и выбрать конфигурацию из списка **Basic configuration** (Базовая конфигурация). Во втором случае нужно выбрать опцию **Create new** (Создать новую) и дать название создаваемой конфигурации в поле **Configuration name** (Имя конфигурации).

Изначально пользователю доступен только стандартный шаблон **New Project**. Параметры базовой части проекта, созданного по этому шаблону, приведены в табл. 5.7. Пользователь может создавать свои собственные шаблоны и использовать их для создания типовых проектов COSMOSFloWorks.

Таблица 5.7. *Стандартный шаблон COSMOSFloWorks* ***New Project***

Тип данных	**Значение**	
Система единиц	**SI (m-kg-s)**	СИ (метр-килограмм-секунда)
Тип текучей среды	**Liquid**	Жидкость
Физические особенности	**Flow type**: **Laminar and Turbulent**	Тип течения: Ламинарный и турбулентный, с автоматическим определением переходного режима. Другие физические особенности не учитываются
Система координат	Стационарная	
Тип задачи	**Internal**, **Exclude cavities without flow conditions**	Внутренняя, с исключением из расчета замкнутых пустотелых объемов, не имеющих граничных условий, заданных на какой-либо внутренней поверхности объема
Шероховатость	0 микрометров	
Текучая среда	**Water SP**	Вода
Тепловое условие на стенках	**Adiabatic**	Адиабатическая стенка
Начальные условия	**Pressure**: 101325 Pa **Temperature**: 293,2 K **Velocity**: 0 m/s **Turbulence intensity**: 2 %	Давление: 101325 Па Температура: 293,2 K Скорость: 0 м/с Интенсивность турбулентности: 2 % (значение турбулентной длины (**Turbulence length**) зависит от характерного размера модели)
Уровень решения и разрешения геометрии	**Level of initial mesh**: 3 **Result Resolution level**: 3	Уровень начальной сетки: 3 Уровень решения задачи: 3

Создание шаблона проекта

Процесс создания собственного шаблона проходит две стадии:

1. Если проект был создан на основе стандартного шаблона, то, прежде чем переходить к непосредственному созданию шаблона, необходимо произвести соответствующие изменения базовой части проекта. Если проект был создан с помощью Мастера проекта или клонированием, проверьте, что установки базовой части проекта соответствуют желаемым. После создания проекта каким-либо способом, просмотр и редактирование его

базовой части происходит в окнах **General Settings** (Общие установки), **Calculation Control Options** (Опции управления расчетом), **Initial Mesh Settings** (Начальная сетка), а также **Units System** (Система единиц). *Подробную информацию о редактировании проекта см. в разд. "Редактирование проекта" данной главы.*

2. Сохранение данных новой базовой части проекта как шаблона проекта с помощью опции **Create Template** (Создать шаблон). Для создания собственного шаблона в меню **FloWorks** выберите **Project | Create Template** (Проект | Создать шаблон). Далее в поле **Template name** (Имя шаблона) необходимо ввести имя создаваемого шаблона. При нажатии **OK** данные базовой части текущего проекта будут сохранены как шаблон проекта с заданным именем (рис. 5.26).

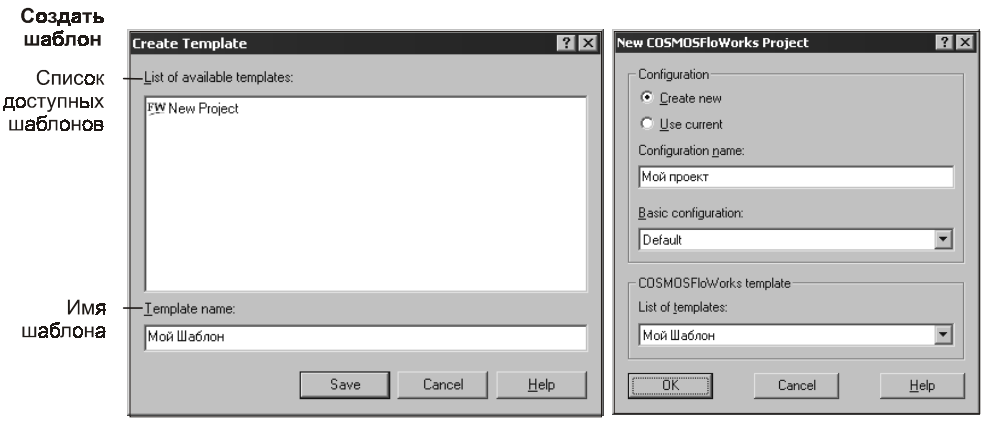


Рис. 5.26. Создание собственного шаблона и его использование при создании нового проекта

Шаблоны проекта сохраняются в папке **template**, которая находится в главной папке продукта, определяемой пользователем при установке (по умолчанию Program Files\COSMOS Applications\COSMOSFloWorks 2005). После этого шаблон становится доступным для создания проекта в поле **List of templates** (Список шаблонов) окна **New COSMOSFloWorks Project** (Новый проект COSMOSFloWorks).

Когда удобнее использовать шаблон

Использование шаблона может быть очень удобным, если исследуются однотипные (с одинаковой или схожей базовой частью проекта) задачи для разных моделей. В таком случае, базовая часть проекта, созданная для одной модели, может быть сохранена как шаблон, а проекты оставшихся моделей создаются из этого шаблона, автоматически наследуя ранее заданные установки задачи. Если же однотипные задачи решаются в рамках одной модели с разными ее конфигурациями, то удобнее пользоваться клонированием проекта. Если ха-

рактеристики задачи, определенные в базовой части проекта, заметно отличаются от характеристик задач, для которых проект уже имеется, то следует использовать Мастер проекта.

Мастер проекта

Мастер проекта позволяет создать проект, шаг за шагом двигаясь от одного типа данных базовой части проекта к другому. Для вызова Мастера проекта из меню **FloWorks** выберите **Project** | **Wizard** (Проект | Мастер).

Шаг 1 — Project Name (Имя проекта)

Задание исходных данных для нового проекта с помощью Мастера проекта начинается с определения конфигурации модели, к которой этот проект будет присоединен. Можно либо использовать текущую конфигурацию, либо создать копию текущей конфигурации с новым именем:

- **Create new** (Создать новую) — создает копию текущей конфигурации с именем, заданным в поле **Configuration name** (Имя конфигурации), и присоединяет к ней проект COSMOSFloWorks;
- **Use current** (Использовать текущую) — присоединяет проект к текущей конфигурации модели;
- **Comments** (Комментарии) — в комментариях может быть задана любая справочная информация. После создания проекта комментарии могут быть просмотрены и, при желании, отредактированы в окне **Comment** (Комментарий), вызываемом из меню **Project** | **Edit Comment** (Проект | Изменить комментарий).

Шаг 2 — Units (Система единиц)

На этом этапе выбирается наиболее удобная система единиц измерения для ввода и вывода числовых данных.

Использование символов единиц измерения при вводе

Выбранная система единиц используется по умолчанию, так что при вводе числовых данных нет необходимости вводить символы единиц измерения. Это не исключает возможности введения данных и в любых других единицах измерения, имеющихся в базе данных **Units** (Система единиц). Для этого в окошке необходимо вместе с числовым значением ввести также символ единицы измерения. После этого COSMOSFloWorks автоматически преобразует введенную величину в систему единиц, используемую по умолчанию.

Выбранная система единиц никак не влияет на основную систему единиц SolidWorks, используемую для создания детали.

Чтобы не выходить преждевременно из Мастера проектов, желательно заранее, до начала создания проекта, посмотреть базу данных **Units** (Система

единиц) и в случае необходимости сформировать в ней удобную для вас систему единиц. Чтобы попасть в базу данных **Units**, в меню **FloWorks** выберите **Tools | Engineering Database** (Инструменты | Инженерная база данных). *Подробную информацию об инженерной базе данных см. в разд. "Инженерная база данных" этой главы.*

Если не определены пользовательские системы единиц измерения, то выбор осуществляется среди следующих заданных систем:

- CGS (СГС) — сантиметр-грамм-секунда;
- FPS — фут-фунт-секунда;
- IPS — дюйм-фунт-секунда;
- NMM (НМКС) — Ньютон-миллиметр-килограмм-секунда;
- SI (СИ) — Международная система единиц (Ньютон-метр-килограмм-секунда);
- USA — фут-фунт-секунда (давление в pound/inch^2 (фунт-сила/дюйм^2), т. е. psi, объемный расход в foot^3/min (фут^3/мин), т. е. CFM).

После того как базовая часть проекта создана, изменить выбранную систему единиц можно в диалоговом окне **Units Settings** (Установки системы единиц), для доступа к которому выберите **FloWorks | Units** (FloWorks | Система единиц).

Совет

Если ни одна из систем единиц, предлагаемых вам на выбор, не подходит, то выберите ту из них, которая наиболее близка к желаемой, а после завершения прохода Мастера проекта выберите **FloWorks | Units** (FloWorks | Система единиц) и отредактируйте там выбранную систему единиц нужным образом. Данные изменения будут актуальны только для текущего проекта. Если вы хотите, чтобы внесенные изменения были доступны и для других проектов, необходимо сохранить измененную систему единиц под другим именем. *См. разд. "Редактирование проекта" данной главы.*

Шаг 3 — Fluid Type and Physical Features (Тип текучей среды и физические особенности)

На этом шаге задается тип текучей среды (fluid type), а также физические особенности задачи (physical features). В COSMOSFloWorks возможен анализ только одного из следующих типов текучей среды:

- **Liquid** (ньютоновская несжимаемая жидкость);
- **Non-Newtonian liquid** (неньютоновская жидкость);
- **Compressible liquid** (сжимаемая жидкость);
- **Gas** (газ).

В случае многокомпонентной среды тип среды относится ко всем ее компонентам.

Совет

Если в задаче рассматривается течение жидкости и газа (жидкость и газ протекают в замкнутых непересекающихся объемах, т. е. без смешения), то такой случай можно смоделировать в COSMOSFloWorks. Для этого в инженерной базе данных необходимо создать новое вещество, формально являющееся текучей средой одного типа, но со свойствами другой текучей среды, например, газ со свойствами жидкости или жидкость со свойствами газа, и потом использовать его в проекте вместе с другой текучей средой.

Поскольку неньютоновские и сжимаемые жидкости рассматриваются исключительно в рамках их ламинарных течений, то в случае их рассмотрения в проекте необходимо из списка **Flow Type** (Тип течения) выбрать значение **Laminar Only** (Всюду ламинарное течение), согласно которому все течение будет рассматриваться как ламинарное.

В этом же окне учитываются физические особенности задачи:

- **Heat transfer in solids** (Теплопередача в твердых телах) — учитывает теплопередачу в твердых телах;
- **Heat transfer in solids only** (Только теплопередача в твердых телах) — используется, если в рассматриваемой задаче рассчитываться будет только теплопередача в твердом теле, т. е. текучая среда не задается;
- **Radiation** (Радиационный теплообмен) — учитывает радиационный теплообмен при решении задачи сопряженного теплообмена, т. е. при включенной опции **Heat transfer in solids** (Теплопередача в твердых телах);
- **Flow type** (Тип течения) — устанавливает тип рассматриваемого течения. По умолчанию течение в разных областях (в ядре потока, в пограничном слое около стенок модели) рассчитывается либо как турбулентное, либо как ламинарное, либо как переходное, в зависимости от значений соответствующих критериев. Этому соответствует тип **Laminar and Turbulent** (Ламинарное и турбулентное). Если хотите, чтобы течение во всех областях рассчитывалось как ламинарное, отключите турбулентность, выбрав значение **Laminar Only** (Всюду ламинарное течение). Соответственно, если хотите указать, что течение турбулентное всюду в расчетной области, выберите значение **Turbulent Only** (Всюду турбулентное течение);
- **High Mach number flow** (Течение с большим числом Маха) — учитывает особенности высокоскоростных газовых течений, при которых число Маха потока выше 3 в стационарных задачах или выше 1 — в нестационарных;
- **Time dependent** (Нестационарность) — необходимо выбрать эту опцию, если рассматривается нестационарная задача. Для задания интервала фи-

зического времени задачи щелкните **Time Settings** (Установки времени) и задайте значение времени в поле **Total analysis time** (Длительность процесса). Кроме того, в поле **Output time moments** (Моменты выдачи результатов) отметьте моменты времени (от начала рассматриваемого интервала физического времени задачи) сохранения результатов решения нестационарной задачи или в поле **Output time step** (Временной шаг выдачи) — интервал сохранения результатов. После прохождения Мастера проектов установки времени могут быть изменены в окне **Calculation Control Options** (Опции управления расчетом);

- **Gravitational effects** (Гравитационные эффекты) — выберите эту опцию, если необходимо учитывать в задаче гравитационные эффекты (например, при расчете свободной конвекции). Щелкните **Gravitational Settings** (Гравитационные данные) и задайте компоненты X, Y, Z вектора гравитационного ускорения. Если решается нестационарная задача, то вектор гравитационного ускорения можно также задать зависящим от времени. Если в вашем проекте рассматриваются жидкости, то проверьте наличие в инженерной базе данных зависимости их плотности от температуры. Если рассматриваются газы, то гравитационные эффекты могут быть учтены только в случае отсутствия задания **High Mach number flow** (Течение с большим числом Маха).

Подробную информацию о физических особенностях см. в разд. 5.5.4.

Шаг 4 — Rotating Reference Frame (Вращающаяся система координат)

Если в задаче какое-нибудь твердое тело вращается, то течение в такой задаче можно рассчитать в системе координат, вращающейся вместе с этим телом, т. е. неподвижной относительно него. При этом неподвижные части модели должны быть осесимметричны относительно оси вращения системы координат. Неподвижная (в абсолютной системе координат) поверхность стенки задается с помощью граничного условия **Stator** (Статор) на вкладке **Moving walls** (Вращающиеся стенки) диалогового окна **Boundary Conditions** (Граничные условия).

Если задается вращающаяся система координат, то по умолчанию предполагается, что все стенки модели вращаются со скоростью вращения этой системы координат, т. е. неподвижны относительно нее. При этом учитываются соответствующие кориолисовы и центробежные силы.

Если задается вращающаяся система координат, то по умолчанию скорость и давление задаются во вращающейся системе координат (V_r и P_r):

$$V_r = V_{abs} - \omega \times r;\ P_r = P_{abs} - 1/2 \cdot \rho\omega^2 \cdot r^2,$$

где V_{abs} и P_{abs} — скорость и давление в абсолютной, т. е. неподвижной системе координат, ω — угловая скорость вращения, ρ — плотность, r — расстояние от оси вращения. Возможно также задание скорости и давления в абсолютной системе координат. Для этого надо при задании скорости в окне **Boundary Conditions** (Граничные условия) снять флажок **Relative to rotating frame** (Во вращающейся системе координат), а при задании давления снять флажок **Pressure potential** (Давление в точке отсчета) (рис. 5.27).

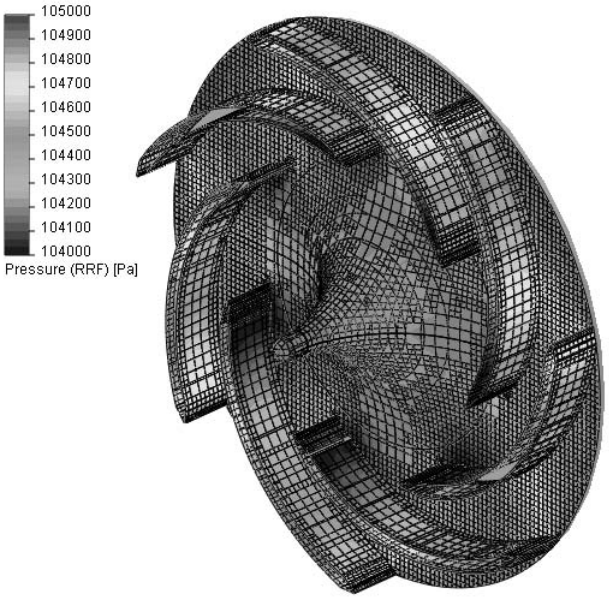


Рис. 5.27. Течение в импеллере рассчитывается во вращающейся системе координат

По умолчанию, если задана вращающаяся система координат, параметры отображаются во вращающейся системе. Снимите флажок с опции **Relative to rotating frame** (Во вращающейся системе координат) на вкладке **Coordinate system** (Координатная система) окна **View Settings** (Установки просмотра), чтобы показать параметры картин в сечении (cut plot), картин на поверхности (surface plot) и поверхностей уровня (isosurface) в абсолютной (стационарной) системе координат.

Примечание

Линии тока всегда отображаются во вращающейся системе координат. Активная система координат показана в скобках за именем параметра, написанного под палитрой: RRF — вращающаяся система координат (rotating reference frame), SRF — абсолютная (неподвижная) система координат.

На этом шаге задаются следующие параметры:

- **Enable rotating reference frame** (Задать вращающуюся систему координат) — включает расчет во вращающейся системе координат;
- **Rotation axis** (Ось вращения) — задает ось вращения. Осью вращения может быть либо ось, созданная как справочная геометрия (**Вставить** | **Справочная геометрия** | **Ось**), либо ось выбранной системы координат. По умолчанию используется так называемая *глобальная система координат* (Global Coordinate System). Координатные плоскости этой системы параллельны плоскостям по умолчанию (плоскости "Спереди", "Сверху", "Слева"), а ее центр совпадает с началом координат модели. Чтобы показать глобальную систему координат, в Дереве анализа COSMOSFloWorks щелкните правой кнопкой мыши на элементе **Global Coordinate System** и в контекстном меню выберите **Show** (Показать). Также может использоваться система координат, созданная как справочная геометрия. Чтобы использовать ось или систему координат, созданную как справочная геометрия, необходимо выделить соответствующий справочный элемент в дереве проектирования SolidWorks (FeatureManager tree);
- **Angular velocity** (Угловая скорость) — задает величину угловой скорости по правилу "буравчика".

Шаг 5 — Analysis Type (Тип задачи)

На этом этапе определяется тип задачи (внешняя или внутренняя), указывается, нужно ли исключать полости из расчета, а также определяется ось, используемая для задания значений в цилиндрической или сферической системе координат. *Подробную информацию о типе задач и исключении полостей из расчета см. в разд. 5.4.*

В COSMOSFloWorks, помимо константных значений можно задавать зависимости от координат и времени (для нестационарных задач). Для этого используется кнопка **Design** (Задание), вызывающая окно с тем же названием. Зависимость может быть задана в виде таблицы значений или формулы. Для задания табличной зависимости вы можете импортировать двухколоночные таблицы данных из Microsoft Excel. Для этого скопируйте нужную вам двухколоночную таблицу из Microsoft Excel в буфер обмена, затем щелкните любую ячейку в левом (т. е. там, где аргумент) столбце таблицы на вкладке **Table of values** (Таблица значений) окна **Design** (Задание) и нажмите комбинацию клавиш <Ctrl>+<V>. При задании формулы аргументы функций log, sin, cos, tan, exp должны быть в круглых скобках. Символ "^" означает возведение в степень стоящей слева функции: например, $\sin^2 x$ вводится как sin(x)^2, а $\sin(x^2)$ вводится как sin(x^2).

Значения величин, задаваемых в окнах **Wizard** (Мастер проектов) и **General Settings** (Общие установки), могут быть заданы зависимыми от координат

Глобальной системы (**Global coordinate system**, см. предыдущий шаг). Для задания данных в цилиндрической или в сферической системе координат используются координаты **r** (радиус), **phi** (φ) и **theta** (θ), определенные через **Reference axis of the global coordinate system** (Ось задания), как показано на рис. 5.28.

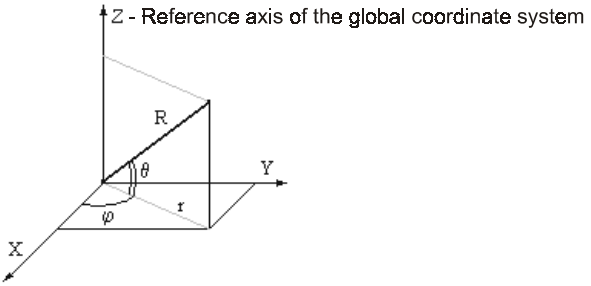


Рис. 5.28. Ось Z выбрана как **Reference axis of the global coordinate system**

Для величин, определенных в других окнах, ось задания (**Reference Axis**) задается непосредственно в этих окнах.

Шаг 6 — Roughness (Шероховатость)

Здесь задается шероховатость стенки (**Roughness**), которая по умолчанию будет использоваться для всех стенок модели, находящихся в контакте с текучей средой, за исключением тех стенок, чья шероховатость задана в граничном условии **Real Wall** (Реальная стенка) в диалоговом окне **Boundary Condition** (Граничное условие).

Величина шероховатости определяется через высоты неровностей (выступов и впадин) шероховатой поверхности, случайным образом распределенных по этой поверхности, и представляет собой используемую в инженерной практике величину Rz. Величина шероховатости может быть задана в микронах (микрометрах), микродюймах, или в производных единицах измерения (custom units).

Шаг 7 — Selecting fluid substances (Текучая среда)

Здесь задаются текучие вещества (**fluids**), чье течение будет рассчитываться в данном проекте COSMOSFloWorks.

Примечание

COSMOSFloWorks не может рассчитывать течение сразу нескольких неньютоновских (**non-Newtonian liquid**) или сжимаемых жидкостей (**compressible liquids**) с отличающимися свойствами. В одном проекте можно задать несколько неньютоновских или сжимаемых жидкостей, но для всех их будут использо-

ваться свойства той из них, которую вы указали в окне **Reference liquid** (Характерная жидкость). Таким образом, фактически будет рассмотрена одна жидкость, но под разными именами, что позволяет проследить перемешивание различных частей этой жидкости.

В списке **Database of fluids** (База данных по текучим веществам) присутствуют жидкости или газы (в зависимости от выбранного типа текучей среды), определенные в COSMOSFloWorks. В проекте могут использоваться до 10-ти текучих веществ. Если нужное текучее вещество отсутствует в списке **Database of fluids** (База данных по текучим веществам), то его необходимо добавить в **Engineering Database** (Инженерная база данных). *См. разд. "Редактирование проекта" данной главы.*

Для задания текучих веществ проекта дважды щелкните на нужном вам веществе в списке **Database of fluid** или перетащите материалы из этого списка в список **Selected fluids** (Текучие вещества проекта).

Шаг 8 — Default Wall Conditions (Тепловое условие на стенках по умолчанию)

Если в проекте не решается сопряженная задача теплообмена (т. е. опция **Heat transfer in solids** (Теплопередача в твердых телах) не выбрана), то на соприкасающихся с текучей средой стенках модели необходимо задать одно из следующих тепловых условий, которые будут использоваться в проекте для всех стенок модели по умолчанию:

- **Adiabatic wall** (Адиабатическая стенка) — т. е. теплоизолированная стенка. По умолчанию на всех стенках задается прилипание потока, т. е. рассматривается трение потока на стенке. Если вы хотите задать стенку не только теплоизолированной, но и не оказывающей сопротивления трения потоку, то в диалоговом окне **Boundary Condition** (Граничное условие) на этой стенке надо задать граничное условие **Ideal Wall** (Идеальная стенка);
- **Wall temperature** (Температура стенки) — задает температуру стенок;
- **Heat flux** (Удельный тепловой поток) — поток тепла через единицу площади поверхности в единицу времени. Положительные значения соответствуют потоку тепла от стенки к текучей среде, отрицательные значения — потоку тепла от текучей среды к стенке;
- **Heat transfer rate** (Тепловая мощность) — поток тепла через всю выделенную поверхность в единицу времени. Положительные значения соответствуют потоку тепла от стенки к текучей среде, отрицательные значения — потоку тепла от текучей среды к стенке.

Если есть необходимость задать величину в виде зависимости от координат и/или времени (для нестационарных задач), то переместите курсор в поле ввода и щелкните **Design** (Задание).

При необходимости на выбранных вами поверхностях модели, соприкасающихся с текучей средой, можно задать другие тепловые условия, отличающиеся от действующих по умолчанию. Так, температуру (**Temperature**) и коэффициент теплоотдачи (**Heat Transfer Coefficient**) можно задать как граничное условие **Real Wall** (Реальная стенка) в диалоговом окне **Boundary Condition** (Граничное условие), а удельный тепловой поток (**Heat flux**) и тепловую мощность (**Heat transfer rate**) — в диалоговом окне **Surface Source** (Поверхностный источник).

Шаг 9 — Default Outer Wall Conditions (Тепловое условие на внешних стенках по умолчанию)

Если решается внутренняя (internal) задача с сопряженной задачей теплообмена, то на внешней поверхности модели необходимо задать тепловое условие (например, теплообмен с окружающей модель внешней текучей средой), которое в дальнейшем будет действовать в проекте по умолчанию.

На внешней поверхности модели могут быть заданы следующие тепловые условия:

- **Adiabatic wall** (Адиабатическая стенка) — теплоизолированная стенка;
- **Heat transfer coefficient** (Коэффициент теплоотдачи) — тепловой поток через внешнюю поверхность модели Q задается с помощью коэффициента теплоотдачи α и температуры внешней текучей среды (Temperature of external fluid) T_f по формуле: $Q = \alpha(T_f - T_s) \cdot S$, где S — площадь внешней поверхности модели. Необходимая температура внешней стенки T_s рассчитывается при решении задачи;
- **Surface heat generation rate** (Удельная мощность поверхностного тепловыделения через единицу площади, Вт/м^2) — положительные значения соответствуют тепловому потоку от окружающей среды к внешней поверхности модели, а отрицательные — от внешней поверхности модели к окружающей среде;
- **Heat generation rate** (Мощность тепловыделения через всю внешнюю поверхность модели, Вт) — положительные значения соответствуют тепловому потоку от окружающей среды к внешней поверхности модели, а отрицательные — от внешней поверхности модели к окружающей среде;
- **Wall temperature** (Температура стенки) — температура внешней поверхности модели.

Если на некоторых внешних поверхностях модели необходимо задать другие тепловые условия, т. е. отличающиеся от используемых по умолчанию, то **Heat generation rate** (Мощность тепловыделения) и **Surface heat generation rate** (Удельная мощность поверхностного тепловыделения) на этих поверх-

ностях задаются с помощью диалогового окна **Surface Source** (Поверхностный источник), а **Heat transfer coefficient** (Коэффициент теплоотдачи) — с помощью граничного условия **External Real Wall** (Внешняя реальная поверхность).

Шаг 10 — Default Radiative Surface (Условия радиационного теплообмена по умолчанию)

Если в проекте учитывается радиационный теплообмен между поверхностями — опция **Radiation** (Радиационный теплообмен) выбрана, — то необходимо задать радиационные свойства всех поверхностей модели, контактирующих с текучей средой проекта.

- В поле **Default wall radiative surface** (Радиационные свойства поверхностей по умолчанию) выбирается радиационное свойство поверхностей, которое будет задано по умолчанию на всех поверхностях модели, контактирующих с текучей средой проекта за исключением внешних поверхностей в случае решения внутренней задачи.
- В поле **Default outer wall radiative surface** (Радиационные свойства внешних поверхностей по умолчанию) выбирается задаваемое по умолчанию радиационное свойство внешних поверхностей модели в случае решения внутренней задачи.
- В поле **Environment radiative surface** (Излучение окружающей среды) задаются радиационные свойства границ расчетной области в случае внешней задачи и входных и выходных отверстий модели в случае внутренней задачи. Эти свойства могут быть одного из следующих типов:
  - **Blackbody opening/outer boundary** (Абсолютно черные отверстие или внешняя граница) — это означает, что границы расчетной области (в случае решения внешней задачи) или отверстия модели (в случае решения внутренней задачи) излучают тепловой поток Q внутрь расчетной области, который определяется как $Q = \varepsilon\sigma T^4$, где ε — заданная степень черноты (**Emissivity coefficient**) границ расчетной области (выбирается в **Engineering Database** (Инженерная база данных)), а T — заданная температура излучения окружающей среды (Environment radiative temperature);
  - **Non-radiative surface** (Неизлучающая поверхность) — это означает, что расположенные вдали границы расчетной области не участвуют в лучевой теплопередаче, т. е. не излучают и не поглощают тепловой поток.
- Если необходимо учесть солнечное излучение окружающей среды, отметьте опцию **Solar radiation** (Солнечное излучение), задайте вектор на-

правления этого излучения его составляющими X, Y, Z (**Direction X**, **Y**, **Z**) и интенсивность излучения в поле **Intensity** (Интенсивность).

Для выбора нужного радиационного свойства щелкните **Browse** (Путь) и найдите это свойство в **Engineering Database** (Инженерная база данных). Если радиационные свойства некоторых поверхностей модели необходимо задать отличающимися от используемых по умолчанию, то это можно сделать в диалоговом окне **Radiative Surface** (Поверхность радиационного теплообмена).

Подробную информацию по типам радиационных поверхностей см. в разд. 5.5.4.

Шаг 11 — Selecting solid substances (Твердые тела)

По аналогии с выбором текучих сред здесь задаются материалы твердых тел для проекта COSMOSFloWorks. Если материалов несколько, то также указывается тот из них, который будет использоваться по умолчанию (**Default material**) для всех твердых тел данного проекта, что позволит сократить объем вводимой информации. Для задания материалов тел, отличных от используемого по умолчанию, используется окно **Material Condition** (Задание материала). *См. разд. 5.5.5.*

Если необходимый вам материал отсутствует в списке **Database of solids** (База данных по материалам), то вы можете сами добавить его в **Engineering Database** (Инженерная база данных).

Шаг 12 — Initial and Ambient Conditions (Начальные и внешние условия)

Под заданием **Initial and Ambient Conditions** (Начальных и внешних условий) подразумевается задание значений термодинамических параметров текучей среды (давление, температура, плотность), скорости потока, параметров турбулентности, концентраций веществ (если текучая среда состоит из нескольких веществ), а также значения начальной температуры твердых веществ.

В зависимости от типа задачи, заданные параметры имеют разный смысл:

- если вы решаете стационарную внутреннюю (internal) задачу, то задание параметров в этом окне означает задание начальных условий в расчетной области. Если вы хотите решить такую задачу за более короткое время, то задайте **Initial Conditions**, т. е. начальные значения независимых параметров задачи, как можно ближе к предполагаемому решению по сравнению с задаваемыми по умолчанию;
- если вы решаете стационарную внешнюю (external) задачу, то задание параметров в этом окне означает задание начальных условий в расчетной области и граничных условий на ее границах. Задаваемые термодинамиче-

ские параметры и скорость набегающего (т. е. внешнего) невозмущенного потока характеризуют начальное состояние обтекающей тело среды;

- если вы решаете нестационарную (time-dependent) задачу, то, в общем случае, необходимо задать точное начальное состояние среды за исключением тех случаев, когда задача имеет установившееся периодическое решение (например, в случае задания периодических граничных условий), которое не зависит от начальных условий и, следовательно, может быть получено при любых начальных условиях, несмотря на то, что может быть потребуется больше времени для исключения их влияния.

Начальные (внешние) условия могут быть заданы постоянными или переменными в пространстве и времени. Можно также использовать результаты других расчетов в качестве начальных (внешних) условий.

Шаг 13 — Result resolution and Geometry Resolution (Уровень решения и разрешения геометрии)

На этом шаге задаются параметры, влияющие на расчетную сетку и критерии завершения расчета, а значит, и на точность решения задачи. Очевидно, что чем мельче расчетная сетка, тем точнее моделируется задача, и тем ближе ее дискретное решение к реальному непрерывному распределению. Второй составляющей, определяющей точность решения, является величина критериев сходимости, по достижении которых задача считается сошедшейся. При этом более жесткие критерии и более мелкая расчетная сетка, очевидно, требуют большей оперативной памяти и процессорного времени. Поэтому задание параметров, влияющих на расчетную сетку и критерии сходимости, — это всегда компромисс между желаемой точностью и имеющимися ресурсами компьютера.

- **Result Resolution** (Уровень решения) — влияет на уровень начальной сетки и критерии сходимости задачи. Можно выбрать любой из восьми предлагаемых уровней решения задачи. Первый уровень позволяет получить решение очень быстро, но оно будет иметь самую низкую точность. Восьмой уровень позволяет получить наиболее точное решение, но для этого потребуется много оперативной памяти и процессорного времени. Чем выше требуемая точность решения, тем более высокий **Result Resolution** (Уровень решения) должен быть установлен. Очевидно, что для каждой конкретной задачи достаточным будет тот **Result Resolution** (Уровень решения), превышение которого не приводит к заметному изменению результатов.

Совет

Начинайте с уровня **Result Resolution** не более 5 (рекомендуемое значение 3). При использовании уровней 6, 7 и 8 происходит дополнительная адаптация

расчетной сетки к полю течения в ходе расчета. Это может существенно увеличить число ячеек, и, в общем случае, такая процедура не является оправданной для первого расчета.

- **Gap Size** (Зазор) — задав величину **Minimum gap size** (Минимальный зазор), вы определяете минимальный размер проходного сечения задачи, который будет разрешен расчетной сеткой. Фактически, заданная величина минимального зазора используется COSMOSFloWorks при построении расчетной сетки и непосредственно влияет на размер наименьшей ячейки, такой, чтобы в любом зазоре оказалось не менее двух ячеек поперек зазора. Автоматически определяемый минимальный зазор зависит от размеров модели и расчетной области, а также от размеров отверстий и тел, на которых заданы начальные и граничные условия. Если модель имеет проходное сечение, минимальные размеры которого меньше заданного или автоматически определенного минимального размера проходного сечения, то эти проходные сечения могут оказаться (и, скорее всего, будут) неразрешенными, т. е. при расчете будут иметь другие размеры (меньшие или большие). Чтобы вручную задать минимальный зазор, отметьте **Manual specifications of the minimum gap size** (Минимальный зазор задается пользователем) и введите нужное значение в поле **Minimum gap size** (Минимальный зазор).

  Можно связать величину минимального зазора (**Minimum gap size**) с некоторым размером модели, т. е. приравнять зазор этому размеру. В результате при изменении этого размера будет автоматически изменяться величина минимального зазора. Чтобы установить такую связь, отметьте опцию **Minimum gap size refers to the feature dimension** (Связать минимальный зазор с выбранным размером модели) и выберите соответствующий размер в графическом окне.

- **Wall Thickness** (Толщина стенки) — если модель имеет омываемые текучей средой с обеих сторон стенки или выпирающие в поток уступы, чья толщина меньше **Minimum wall thickness** (Минимальной толщины стенки) или **Minimum gap size** (Минимального размера проходного сечения), то эти особенности модели могут оказаться (и, скорее всего, будут) неразрешенными, т. е. при расчете будут заменены текучей средой. Чтобы вручную задать минимальную толщину стенки, отметьте **Manual specifications of the minimum wall thickness** (Задание минимальной толщины стенки вручную) и введите нужное значение в поле **Minimum wall thickness** (Минимальная толщина стенки).

  Можно связать величину минимальной толщины стенки (**Minimum wall thickness**) с некоторым размером модели, т. е. приравнять толщину этому размеру. В результате при изменении этого размера будет автоматически изменяться величина минимальной толщины стенки. Чтобы установить

такую связь, отметьте опцию **Minimum wall thickness refers to the feature dimension** (Связать минимальную толщину стенки с выбранным размером модели) и выберите соответствующий размер в графическом окне.

Примечание

В случае внутренней задачи стенки модели, омываемые текучей средой только с одной стороны, разрешаются всегда правильно, независимо от заданной **Minimum wall thickness** (Минимальной толщины стенки). Если в модели отсутствуют стенки, обе стороны которых омываются текучей средой, а также выпирающие в поток уступы, то **Minimum wall thickness** (Минимальную толщину стенки) вручную задавать не надо.

- **Advanced narrow channel refinement** (Дробление сетки в узких каналах) — если эта опция выбрана, то COSMOSFloWorks сильнее обычного мельчит сетку в узких каналах для обеспечения более высокой точности расчета течения и теплообмена в этих каналах. Необходимо иметь в виду, что это может привести к значительному увеличению числа ячеек расчетной сетки.

Шаг 14 — Summary (Сводная информация)

На последнем шаге приведена суммарная информация о только что заданном проекте. Если, прочитав эту информацию, вы поняли, что что-то задали неверно, можно вернуться назад на любой этап и исправить ошибку. Сводную информацию о проекте можно посмотреть и после его создания, выбрав **FloWorks** | **Project** | **Summary** (FloWorks | Проект | Сводная информация).

После создания проекта данные, определенные на шагах 3—12 (кроме установок времени), можно изменить в окне **General Settings** (Общие установки), вызываемом из меню **FloWorks** | **General Settings** (FloWorks | Общие установки). Установки решения и разрешения геометрии (шаг 13) можно изменить в окнах **Automatic Initial Mesh** (Автоматическая начальная сетка) и **Calculation Control Options** (Опции управления расчетом).

Клонирование проекта

Клонирование проекта может быть полезно для сравнения различных вариантов модели, отличающихся небольшими изменениями геометрии, а также вариантов проекта, отличающихся, например, граничными условиями или компонентами текучей среды.

Чтобы клонировать проект, выберите **FloWorks** | **Project** | **Clone Project** (FloWorks | Проект | Клонировать проект). Клонирование создает точную копию текущего проекта COSMOSFloWorks (рис. 5.29). Эту копию можно присоединить либо к одной из существующих конфигураций модели, либо к новой конфигурации модели, являющейся копией текущей:

- **Create new** (Создать новую) — создает копию текущей конфигурации с именем, заданным в поле **Configuration name** (Имя конфигурации), и присоединяет к ней проект COSMOSFloWorks;
- **Add to existing** (Добавить в существующую) — присоединяет проект к конфигурации, выбранной в списке **Existing configuration** (Существующая конфигурация).

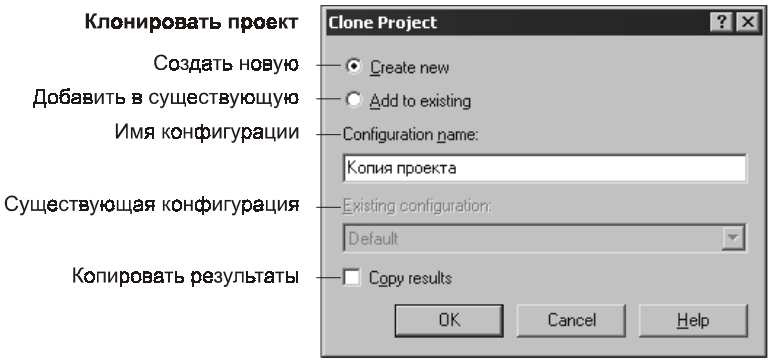


Рис. 5.29. Окно **Clone Project**

Все проектные данные, а также установки просмотра результатов, копируются в новый проект. Если копируемый проект содержит результаты расчета, то их тоже можно скопировать в новый проект, так что новый проект будет полностью идентичен копируемому (за исключением названия). Для копирования результатов необходимо выбрать опцию **Copy results** (Копировать результаты).

Папка проекта

После создания проекта в папке, содержащей модель, появляется папка, имя которой соответствует порядковому номеру данного проекта в рамках рассматриваемой модели. В папке проекта содержатся все необходимые файлы проекта, туда же сохраняются и результаты расчеты. Файлы проекта связываются с конфигурацией, к которой прикреплен проект, через номер проекта, определенный в свойствах конфигурации в поле **Заметка**, как показано на рис. 5.30. Поэтому удаление или переименование папок, носящих имя проекта, приведет к потере связи между COSMOSFloWorks и моделью.

Совет

В связи с тем, что папки проектов сохраняются в папке модели, во избежание путаницы с проектами следует избегать нахождения исследуемых моделей в одной папке. Например, если вы проводите анализ сборки, а потом захотели

исследовать деталь, входящую в состав этой сборки и расположенную в той же папке, что и файл сборки, то прежде чем создавать проект COSMOSFloWorks, лучше скопировать эту деталь в другую папку.

Для быстрого доступа к папке проекта выберите **FloWorks | Project | Open Project Directory** (FloWorks | Проект | Открыть папку проекта).

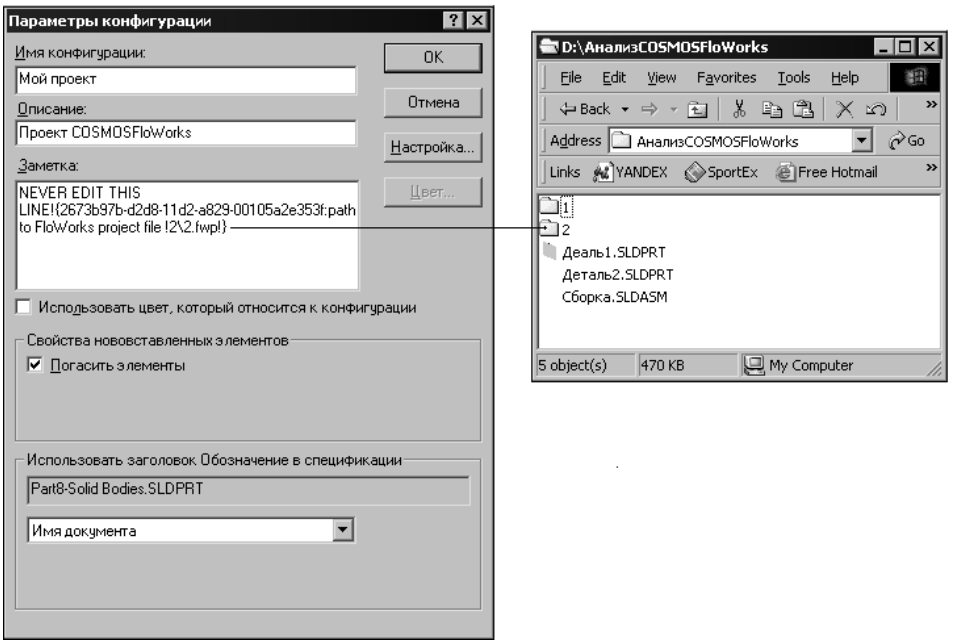


Рис. 5.30. Папка проекта прописана в свойствах конфигурации, к которой прикреплен проект

Редактирование проекта

Редактирование данных проекта производится в следующих окнах:

- **General Settings** (Общие установки) — редактирование базовой части проекта, за исключением настроек системы единиц измерения и настроек уровней решения и разрешения геометрии сеткой;
- **Unit System** (Система единиц) — настройка системы единиц измерения;
- **Computational Domain** (Расчетная область) — редактирование размеров расчетной области, задание плоскости симметрии течения, задание двумерной задачи;
- **Automatic Initial Mesh** (Автоматическая начальная сетка), **Initial Mesh** (Начальная сетка) — настройка параметров, определяющих расчетную сетку задачи;

- **Calculation Control Options** (Опции управления расчетом) — настройка опций управления расчетом, таких как уровень решения, критерии сходимости, моменты сохранения результатов, адаптация расчетной сетки к полю течения и др.

Общие установки

Для доступа к окну **General Settings** (Общие установки) выберите **FloWorks | General Settings** (FloWorks | Общие установки).

Содержимое окна **General Settings** всегда отражает текущее состояние проекта COSMOSFloWorks. Наполнение и структура окна **General Settings** практически полностью повторяет структуру данных **Wizard** (Мастера проектов). *Значение установок окна **General Settings** подробно рассматривается в разд. "Мастер проекта" данной главы (шаги 3—12).*

В отличие от Мастера проектов, данные в **General Settings** распределены по страницам определенного типа (рис. 5.31).

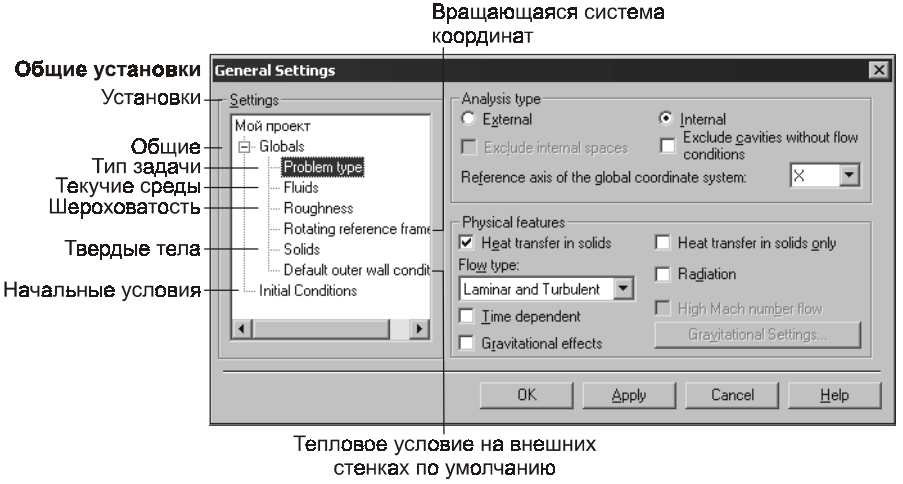


Рис. 5.31. Окно **General Settings**

Для перехода на страницу нужного типа данных необходимо щелкнуть на соответствующую ветку дерева в правой части окна. Ветки деревьев динамически появляются и исчезают согласно выбранным физическим особенностям задачи.

Другим существенным отличием от Мастера проектов является наличие кнопки **Replace** (Заменить) на страницах **Fluids** (Текучие среды) и **Solids** (Твердые тела), определяющих рассматриваемые в задаче вещества (рис. 5.32).

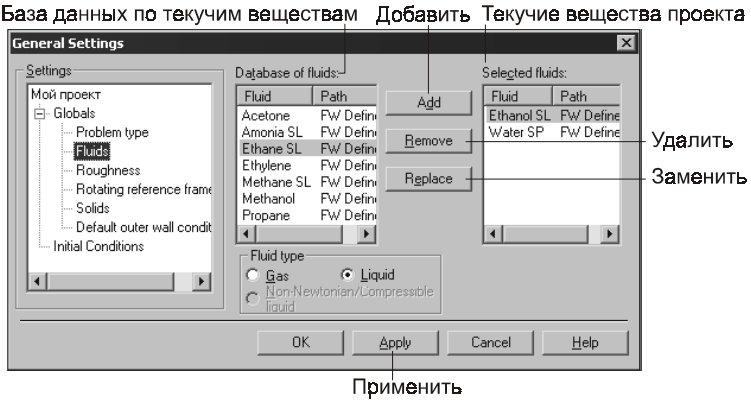


Рис. 5.32. Кнопка **Replace** позволяет заменить во всем проекте одно вещество на другое

Если вы заменяете вещество (компонент текучей среды или твердое тело), то все данные заменяемого вещества автоматически переносятся на заменяющее его новое вещество. Данная опция удобна, если в проекте рассматривается многокомпонентная среда. Например, в диалоговом окне **Boundary Condition** (Граничные условия) вы задали параметры смеси на входе в модель. Затем, если хотите посмотреть, как замена одного компонента текучей смеси на другой повлияет на результаты расчета, то используйте опцию **Replace** (Заменить) для замены одного компонента другим. Если вместо этой опции использовать опцию **Add** (Добавить), то придется заново задавать все исходные данные, связанные с новым компонентом.

Стандартная кнопка **Apply** (Применить) позволяет сохранять внесенные изменения без выхода из окна.

Единицы измерения

COSMOSFloWorks позволяет выбрать удобную для пользователя систему единиц, в которой задаются исходные данные и просматриваются полученные результаты. Для этого можно выбрать одну из стандартных систем единиц, предлагаемых COSMOSFloWorks, либо сформировать новую систему единиц как произвольную комбинацию единиц — стандартных либо созданных пользователем.

Чтобы изменить систему единиц текущего проекта, выберите **FloWorks | Units** (FloWorks | Система единиц) (рис. 5.33).

Чтобы посмотреть используемые в проекте единицы измерения различных физических величин или изменить используемую в проекте систему единиц, откройте в дереве **Parameter** (Параметр) папку с интересующими вас физическими величинами. Например, **Main** (Основные физические величины),

Geometrical Characteristics (Геометрические величины), **Loads&Motion** (Нагрузки и движение) и т. д.

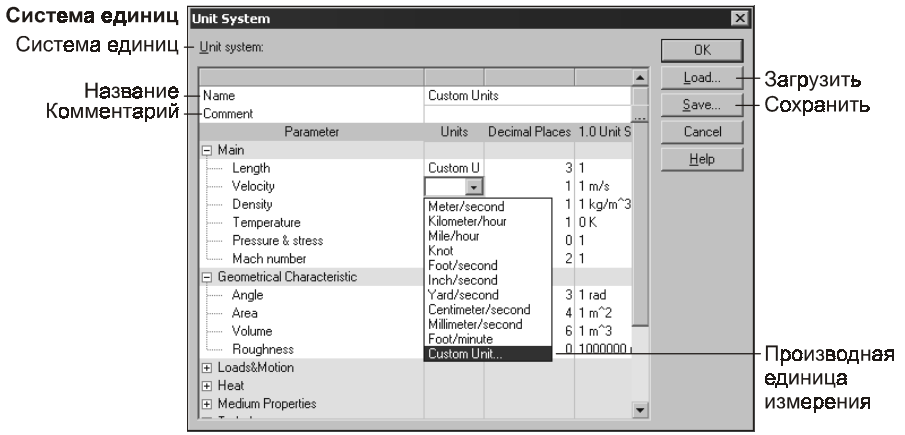


Рис. 5.33. С помощью окна **Unit System** можно изменить стандартную систему единиц

Примечание

Единица измерения шероховатости задается для величины **Roughness** (Шероховатость), расположенной в папке **Geometrical Characteristic**.

Чтобы изменить используемую в проекте единицу измерения, щелкните соответствующую ячейку в столбце **Units** (Система единиц) и выберите из предлагаемого списка нужную единицу измерения. Последний элемент списка называется **Custom Unit** (Производная единица измерения). Выберите **Custom Unit**, если хотите создать (с помощью арифметических операций) новую единицу измерения, производную от соответствующей единицы измерения системы СИ.

Производная единица измерения получается как результат арифметического выражения от соответствующей единицы системы СИ. Например, можно использовать в проекте в качестве единицы измерения нанометр, если указать его связь с метром. Для этого в окне **Custom Unit** необходимо задать следующие параметры:

- **Unit name** (Имя единицы) — имя единицы, отображаемое в окнах задания исходных данных и при просмотре результатов;
- **Unit to SI formula** (Формула пересчета единицы в систему СИ) — функция, в которой параметром является значение, выраженное в создаваемой единице измерения, а результатом — значение в системе СИ. Щелкните кнопкой **Unit** для обозначения параметра функции. Например, **Unit to SI formula** для нанометра имеет вид: {Unit}*E-9;

- **SI to unit formula** (Формула пересчета из системы СИ) — функция, в которой параметром является значение, выраженное в единицах системы СИ, а результатом — значение, выраженное в создаваемой единице измерения. Щелкните кнопкой **SI** для обозначения параметра функции. Например, **SI to unit formula** для нанометра имеет вид: {SI}*E+9.

Чтобы изменить число десятичных знаков при визуализации данной единицы измерения, щелкните соответствующую ячейку в столбце **Decimal places** (Число десятичных знаков) и используйте направленные вверх и вниз стрелки в поле редактирования.

Если хотите использовать в проекте другую систему единиц, щелкните **Load** (Загрузить) и выберите нужную систему в диалоговом окне **Load from Database** (Загрузка из базы данных). Чтобы сохранить сформированную вами систему единиц, щелкните **Save** (Сохранить) и в появившемся диалоговом окне **Save to Database** (Сохранить в базе данных) введите ее название в поле **Unit system name** (Название системы единиц). Укажите также папку в **Engineering Database** (Инженерная база данных), где эта система будет храниться.

Выбранная (или созданная) вами система единиц будет использоваться в текущем проекте COSMOSFloWorks по умолчанию при задании исходных данных проекта и при просмотре результатов расчета. Поэтому при вводе исходных данных проекта в данной системе единиц нет необходимости вместе с числами вводить символы единиц измерения. Однако если вы хотите ввести данные в других единицах измерения, то можете это сделать, введя рядом с числами символы этих единиц измерения. Эти символы должны быть такими же, как в базе данных **Units** (Система единиц). Что касается числа десятичных знаков у вводимых исходных данных, то оно может быть любым — все десятичные знаки будут восприняты правильно.

Расчетная область

Все расчеты течения и теплопередачи в твердом теле выполняются в пределах расчетной области. При создании нового проекта с помощью **Wizard** (Мастер проектов) COSMOSFloWorks автоматически создает расчетную область вокруг модели.

Расчетная область представляет собой прямоугольный параллелепипед, причем как в случае трехмерного расчета, так и в случае двумерного расчета. В случае двумерного расчета расчетная область имеет границами в третьем измерении две параллельные плоскости с одной ячейкой базовой сетки (basic mesh) между ними.

Грани расчетной области параллельны трем плоскостям по умолчанию (плоскости "Спереди", "Сверху", "Слева"). Граничные плоскости расчетной

области внешних задач (External problems) автоматически располагаются на некотором расстоянии от модели. Граничные плоскости расчетной области внутренних задач (Internal problems) автоматически проводятся по габаритам модели, если опция **Heat transfer in solids** (Теплопередача в твердых телах) включена, или по габаритам только проточного тракта, если эта опция не включена.

Окно **Computational Domain** (Расчетная область) предназначено для изменения размеров расчетной области. Для вызова окна **Computational Domain** из меню выберите пункт **Computational Domain** или щелкните правой кнопкой мыши на иконке **Computational Domain** в Дереве анализа и в появившимся контекстном меню выберите **Edit Definition** (Редактировать задание).

Размеры расчетной области зависят от типа и условий задачи и определяются автоматически COSMOSFloWorks. Тем не менее в некоторых случаях может потребоваться изменить размеры расчетной области.

Размеры расчетной области могут стать неадекватными вследствие внесения следующих изменений в уже созданный проект:

- изменение вектора скорости внешнего потока (по величине и/или по направлению). Для задач внешнего типа оптимальной формой расчетной области считается форма, размер которой в направлении вектора скорости внешнего потока больше двух других размеров, т. к. именно в этом направлении распространяется основное возмущение. Это учитывается при создании проекта с помощью **Wizard** (Мастера проекта). Если же вы поменяли направление или величину скорости внешнего потока в окне **General Settings**, то вам необходимо соответствующим образом поменять размеры расчетной области;
- переключение типа задачи (внешняя или внутренняя).

Во избежание этого необходимо переустановить размеры расчетной области после внесения изменений. Это можно сделать на вкладке **Size** (Размеры) либо в автоматическом режиме, либо заданием координат границ расчетной области вручную. Чтобы переустановить границы расчетной области в автоматическом режиме, щелкните **Reset** (Восстановить).

Если вы уверены, что решение рассматриваемой внутренней или внешней задачи (течение и, если решается сопряженная задача теплообмена, температурное поле в твердом теле) имеет одну или несколько плоскостей симметрии, параллельных плоскостям расчетной области, то можете ограничить ими расчетную область, уменьшив ее таким образом. При этом необходимо поставить условие **Symmetry** (Симметрия) на этих границах. Поскольку расчетная область уменьшается, то сокращаются требуемая память и время счета (рис. 5.34).

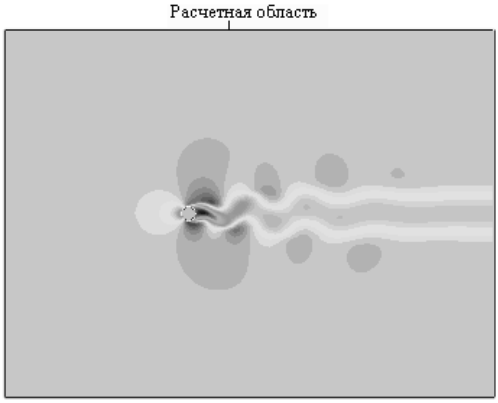


Рис. 5.34. Дорожка Кармана при обтекании цилиндра (двумерная нестационарная внешняя задача)

Примечание

При установке плоскостей симметрии имейте в виду, что симметричность модели и симметричность набегающего потока не всегда гарантируют симметричность остальных областей течения. В качестве примера можно привести дорожку Кармана за цилиндром.

Если в качестве граничного условия на отверстии, поверхности или в объеме задано интегральное граничное условие (например, массовый или объемный расход, мощность тепловыделения) и это отверстие (поверхность, объем) пересечено заданной плоскостью симметрии, то необходимо учитывать, что заданное значение граничного условия будет отнесено к той части отверстия (поверхности, объема), которое входит в расчетную область. Так, например, если плоскость симметрии делит площадь отверстия пополам, то будет неверным задание в качестве граничного условия реального расхода через это отверстие, а будет правильным задание половины от этого расхода (рис. 5.35).

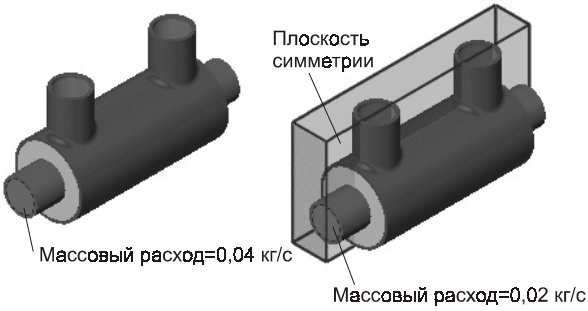


Рис. 5.35. Корректировка задания граничных условий в случае задания плоскости симметрии

Если вы уверены, что течение является двумерным плоским, то можете выполнить двумерный расчет (**2D plane flow**) вместо трехмерного, что позволит сократить требуемую память и уменьшить время счета.

Инженерная база данных

Если в процессе создания проекта вы обнаружили, что в списке веществ, определенных COSMOSFloWorks, нет нужного вам вещества, необходимо дополнить этот список, создав желаемое вещество в **Engineering Database** (Инженерная база данных). Создание вещества подразумевает задание его имени и свойств. Данные инженерной базы общие для всех проектов, поэтому, однажды создав вещество, вы можете использовать его и в других проектах.

В **Engineering Database** (Инженерная база данных) хранится:

- информация по физическим свойствам различных газообразных (gas) и жидких (liquid) веществ, в том числе неньютоновских (non-Newtonian liquids) и сжимаемых жидкостей (compressible liquids), а также твердых (solid) веществ. Она включает постоянные значения и табличные зависимости различных физических параметров от температуры и давления (последнее — только для точек кипения и отвердевания жидкостей);
- кривые зависимости объемного расхода от перепада статического давления для ряда промышленных вентиляторов (fan curves);
- свойства пористых материалов (porous media);
- дополнительные визуализируемые параметры (custom visualization parameters) — определяются как функции (сформированные с помощью стандартного набора математических операций) от физических параметров, визуализируемых по умолчанию, в результате значения этих параметров можно визуализировать так же, как все визуализируемые параметры;
- свойства поверхностей радиационного теплообмена (radiative surfaces);
- система единиц (units), в которой вы хотите задавать исходные данные и просматривать результаты расчета проекта.

В дополнение к тому, что имеется в **Engineering Database** (Инженерная база данных) по умолчанию, пользователи могут ввести в эту базу данных свои вещества, кривые, единицы, параметры.

Чтобы попасть в **Engineering Database**, выберите пункты **FloWorks** | **Tools** | **Engineering Database** (FloWorks | Инструменты | Инженерная база данных).

Все данные Инженерной базы данных хранятся в файле ChemBase.mdb, а все введенные пользователем данные — в файле ChemBaseUser.mdb; оба файла хранятся в папке **bin**, которая находится в главной папке продукта, опре-

деляемой пользователем при установке. Эту папку можно сделать доступной и для других пользователей. По умолчанию вы используете файл ChemBaseUser.mdb. Чтобы использовать файл ChemBaseUser.mdb, хранящийся в другой папке, необходимо указать его расположение в окне общих установок COSMOSFloWorks (COSMOSFloWorks Options) в ячейке **Directory for the user Engineering Database** (Папка пользователя Engineering Database). Для вызова окна **COSMOSFloWorks Options** выберите **Инструменты** | **Настройки** и далее нажмите кнопку **Посторонняя фирма**. На количество пользователей, имеющих доступ к одному и тому же файлу ChemBaseUser.mdb, ограничений нет, но когда один из пользователей сохраняет свои данные в этой базе данных, другие пользователи будут вынуждены ждать, пока завершится процесс сохранения (рис. 5.36).

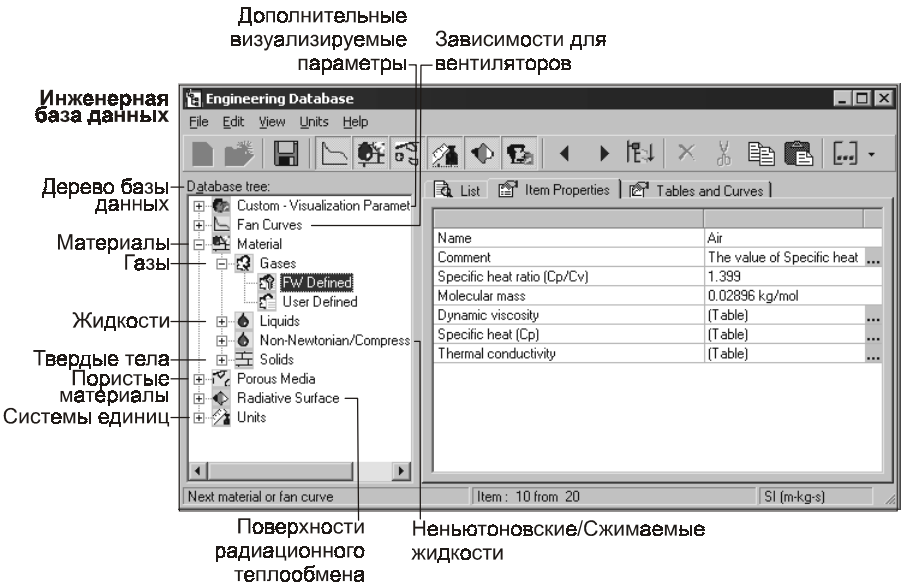


Рис. 5.36. Окно **Engineering Database**

Можно также импортировать инженерную базу данных от другого пользователя. Для этого щелкните **File** | **Import** (Файл | Импортировать) и укажите ChemBaseUser.mdb файл этого пользователя.

Вы можете корректировать и/или дополнять Инженерную базу данных только в папках **User Defined** (Данные пользователя). Эти папки доступны в дереве **Database tree** (Дерево базы данных).

Если элемент базы данных (вещество, вентилятор и т. д.), свойства которого вы хотите подправить, находится в папке **FW Defined** (Данные COSMOSFloWorks), то его необходимо скопировать в папку **User Defined** (Данные

пользователя) или в ее подкаталог. Вы можете скопировать элемент путем его перетаскивания мышью из одной папки в другую в дереве **Database tree** (Дерево базы данных) при нажатой клавише <Ctrl> или с помощью команд **Copy** (Копировать) и **Paste** (Вставить), доступных в меню **Edit** (Редактировать).

Если хотите дополнить базу данных новым элементом (веществом, вентилятором и т. д.), выберите **File** | **New** | **New Item** (Файл | Новый | Новый элемент). Выбрав или создав элемент, подкорректируйте или задайте его свойства на вкладках **Item Properties** (Свойства) и **Tables and Curves** (Таблицы и графики).

Для сохранения внесенных изменений выберите **File** | **Save** (Файл | Сохранить).

5.5.4. Физические особенности

Теплопередача в твердых телах

Теплопередача в текучей среде, а также теплообмен между текучей средой и стенками модели (конвекция) рассчитываются в COSMOSFloWorks автоматически.

Теплопередача в твердых телах по умолчанию не рассчитывается, но будет включена в расчет при решении сопряженной задачи теплообмена (conjugate heat transfer) (конвективный теплообмен + теплопередача в твердых телах) при выборе опции **Heat transfer in solids** (Теплопередача в твердых телах) в **Wizard** (Мастер проектов) или в **General Settings** (Общие установки). Для этого необходимо выбрать материалы твердых тел из Инженерной базы данных. Один из этих материалов необходимо также указать как заданный по умолчанию. Кроме того, необходимо задать начальную температуру твердых тел, используемую по умолчанию для всех тел. Если модель является сборкой или многотельной деталью, то для деталей (тел) модели вы можете задать другие материалы (из указанных для проекта) и начальные температуры с помощью диалоговых окон **Material Condition** (Материалы) и **Initial Condition** (Начальное условие).

Наконец, вы можете задать поверхностные тепловые источники (**Surface Sources**) на выбранных поверхностях твердых тел, соприкасающихся с текучей средой, а также объемные тепловые источники (**Volume Sources**) в выбранных деталях или телах модели (для сборок или многотельных деталей).

При включении опции **Heat transfer in solids only** (Только теплопередача в твердых телах) в рассматриваемой задаче рассчитывается только теплопередача в твердом теле, т. е. текучая среда не задается.

Радиационный теплообмен между поверхностями

Если вы решаете задачу с учетом теплопередачи в твердых телах, причем их температура достаточно высока и/или окружающий их газ достаточно разрежен, так что радиационный теплообмен между твердыми телами и/или между ними и внешним пространством сопоставим с конвективным теплообменом (т. е. радиационный теплообмен играет заметную роль в данной задаче, значительно влияя на температуру твердых тел), то нужно отметить в проекте физическую особенность **Radiation** (Радиационный теплообмен) и задать степень черноты поверхностей твердых тел, участвующих в радиационном теплообмене. Кроме того, если необходимо, можно задать радиационный поток к твердым телам от границ расчетной области в текучей среде (Environment radiation). В результате этот поток будет нагревать доступные ему поверхности твердых тел.

В **Engineering Database** (Инженерная база данных) имеются следующие стандартные типы поверхностей радиационного теплообмена:

- **Non-radiating surface** (Неизлучающая/непоглощающая поверхность) — эта поверхность не участвует в радиационном теплообмене, т. е. не излучает, не поглощает и не отражает радиационно передаваемое тепло;
- **Absorbent wall** (Абсорбирующая стенка) — эта поверхность полностью поглощает все радиационно передаваемое тепло, пришедшее на нее, т. е. как абсолютно черное тело, но, в отличие от абсолютно черного тела, совсем не излучает тепло;
- **Blackbody wall** (Абсолютно черная стенка) — эта поверхность имеет степень черноты, равную 1 (абсолютно черная поверхность), т. е. полностью поглощает все пришедшее на нее радиационно передаваемое тепло и излучает тепло по закону Стефана — Больцмана;
- **Whitebody wall** (Абсолютно белая стенка) — эта поверхность имеет степень черноты, равную 0 (абсолютно белая поверхность), т. е. полностью отражает все пришедшее на нее радиационно передаваемое тепло (по закону Ламберта), при этом свое тепло не излучает, т. е. температура этой поверхности не влияет на радиационный теплообмен;
- **Symmetry** (Симметрия) — если на стенке задано граничное условие **Ideal Wall** (Идеальная стенка) в качестве плоскости симметрии задачи и в задаче рассчитывается радиационный теплообмен, то на этой стенке необходимо также задать тип поверхности радиационного теплообмена **Symmetry** (Симметрия);
- **Blackbody opening/outer boundary** (Абсолютно черное отверстие или внешняя граница) — эта граница имеет степень черноты, равную 1 (абсолютно черная граница), т. е. излучает тепло внутрь расчетной области как

абсолютно черное тело, но ее температура задается пользователем на границах расчетной области внешней задачи в поле **Environment radiative temperature** (Температура излучения окружающей среды) в окне **Wizard** (Мастер проектов) или **General Settings** (Общие установки), а на отверстиях модели в поле **Radiative temperature** (Температура излучения) окна **Radiative surface** (Поверхность радиационного теплообмена);

- **Solar opening** (Солнечное излучение) — задается в окне **Radiative surface** (Поверхность радиационного теплообмена) на некоторой поверхности (отверстии модели или границе расчетной области, лежащей в текучей среде) как излучение тепла от этой поверхности внутрь расчетной области или внутрь модели в заданном направлении (**Direction**) и с заданной интенсивностью (**Intensity**);
- **Real surfaces (Поверхности материалов)** — набор поверхностей типа **Wall** (см. далее), степень черноты которых соответствует степени черноты наиболее используемых материалов.

При задании проекта на выбранной поверхности радиационного теплообмена задаются **Emissivity coefficient** (Степень черноты) и одно из следующих свойств поверхности, участвующей в радиационном теплообмене:

- **Wall** (Стенка) — означает, что излучение тепла поверхностью будет определяться заданной степенью черноты (**Emissivity coefficient**) в диапазоне от 0 до 1 (т. е. можно задать поверхность как серое тело);
- **Opening/outer boundary** (Отверстие или внешняя граница) — означает, что отверстие модели или граница расчетной области внешней задачи будет излучать тепло внутрь расчетной области в соответствии с заданной степенью черноты этой границы в диапазоне от 0 до 1. Температура этой граничной поверхности не вычисляется, а задается пользователем;
- **Wall to ambient** (Излучение стенки во внешнюю среду) — означает, что поверхность твердого тела излучает тепло во внешнюю среду в соответствии с заданной степенью своей черноты в диапазоне от 0 до 1, но это тепло не попадает на стенки модели, т. е. исчезает во внешней среде.

Примечание

Предполагается, что текучие среды не излучают и не поглощают радиационно передаваемое тепло (т. е. они прозрачны для радиационной передачи тепла), так что радиационная теплопередача рассматривается только для поверхностей твердых тел.

Если излучающие тепло твердые поверхности не заданы как абсолютно черные или абсолютно белые, то предполагается, что они серые, т. е. имеют непрерывный спектр излучения, подобный спектру излучения абсолютно черного тела, так что их тепловое излучение одинаково на всех длинах волн. Таким образом, рассматривается только полное радиационное излучение, проинтегриро-

ванное по всем длинам волн. Для конкретной поверхности конкретного материала (некоторые из них имеются в **Engineering Database**) степень черноты поверхности может зависеть только от ее температуры.

Предполагается, что излучение тепла с поверхностей твердых тел является диффузным, т. е. подчиняющимся закону Ламберта, согласно которому яркость излучения, т. е. плотность потока энергии в единичном телесном угле, одинакова во всех направлениях.

Радиационный теплообмен рассчитывается одновременно с конвективным теплообменом и теплопередачей в твердых телах.

При просмотре результатов расчета можно визуализировать следующие характеристики радиационного теплообмена.

- Локальные характеристики (плотность потока энергии) в окне **Surface Plots** (Картины на поверхности):
  - **Net radiant flux** (Плотность суммарного радиационного теплового потока) — разность между плотностью радиационного теплового потока, уходящего с поверхности, и радиационного теплового потока, приходящего на нее, положительная величина этой разности означает, что плотность уходящего радиационного теплового потока больше плотности приходящего радиационного теплового потока;
  - **Leaving radiant flux** (Плотность уходящего радиационного теплового потока) — плотность радиационного теплового потока, уходящего с поверхности.
- Интегральные характеристики (мощность) в окне **Surface Parameters** (Параметры на поверхности):
  - **Net radiation rate** (Суммарный радиационный тепловой поток) — интеграл плотности суммарного радиационного теплового потока по данной поверхности;
  - **Leaving radiation rate** (Уходящий радиационный тепловой поток) — интеграл плотности уходящего радиационного теплового потока по данной поверхности.

Тела, прозрачные для теплового излучения

Помимо поверхностей, не участвующих в радиационном теплообмене (Non-radiative surface), в COSMOSFloWorks (начиная с версии 2005) возможно указать, что тело (компонент сборки или тело многотельной детали) является прозрачным для теплового излучения, т. е. тепловое излучение проходит сквозь тело, не поглощаясь и не отражаясь, а само тело тепло не излучает. Такое тело, тем не менее, обменивается теплом с окружающей средой за счет теплопередачи в твердых телах и конвективного теплообмена с текучей средой. Такие тела могут использоваться, например, для моделирования грани-

цы, которая является разделителем между объемами текучих сред, но при этом не препятствует теплообмену между этими текучими средами за счет радиации (например, стекла лампочки).

Чтобы указать, что тело является прозрачным для теплового излучения, выберите **FloWorks | Radiation transparent bodies** (FloWorks | Прозрачные для излучения тела). Далее в списке компонентов выделите нужный компонент и нажмите **Disable** (Отключить).

Турбулентность

В COSMOSFloWorks по умолчанию течение в разных областях (в ядре потока, в пограничном слое около стенок модели) рассчитывается либо как турбулентное, либо как ламинарное, либо как переходное, в зависимости от значений соответствующих критериев. Если вы хотите, чтобы течение во всех областях рассчитывалось как ламинарное, можно отключить турбулентность, отметив опцию **Laminar Only** (Всюду ламинарное течение) в Мастере проектов (**Wizard**) или в окне Общие установки (**General Settings**). Можно также указать, что течение турбулентное всюду в расчетной области, — для этого в этих диалоговых окнах отметьте опцию **Turbulent Only** (Всюду турбулентное течение).

По умолчанию параметры турбулентности (**Turbulence parameters**) задаются автоматически. В случае необходимости можно самим задать параметры турбулентности: либо интенсивность турбулентности и турбулентную длину (т. е. линейный масштаб турбулентности), либо энергию турбулентности и турбулентную диссипацию. В большинстве случаев трудно заранее оценить параметры турбулентности потока, поэтому рекомендуется использовать те значения, которые задаются по умолчанию. Параметры турбулентности задаются в качестве начальных условий и входных граничных условий, а также внешних условий для внешних течений. Кроме того, на стенках входных отверстий всегда, в том числе по умолчанию, задаются **Boundary layer parameters** (параметры пограничного слоя).

Тип пограничного слоя в COSMOSFloWorks по умолчанию определяется в зависимости от значения числа Рейнольдса, определенного по эквивалентному гидравлическому диаметру входного отверстия:

$$D = \frac{4A}{P},$$

где A — площадь отверстия, P — периметр отверстия.

При этом толщина пограничного слоя по умолчанию определяется по эффективной длине стенки, зависящей от этого числа Рейнольдса.

Нестационарные задачи

В COSMOSFloWorks задачи всех типов решаются с помощью решения нестационарных уравнений Навье — Стокса. Стационарные задачи решаются методом установления решения во времени от заданных пользователем начальных условий. Шаги по времени проводятся до тех пор, пока изменения параметров во времени не станут достаточно малыми. Тогда решение считается установившимся (сошедшимся). В общем случае, начальные условия для таких задач могут быть заданы достаточно произвольно. Однако, задавая начальные условия ближе к искомому решению, можно ускорить процесс установления решения. Для внешних (external) задач начальные условия автоматически задаются такими же, как внешние условия (ambient conditions), т. е. параметры невозмущенного набегающего потока.

При решении нестационарных (time-dependent) задач шаги по времени выполняются от начальных условий до тех пор, пока не будет пройден заданный интервал физического времени задачи. В отличие от стационарных задач, начальные условия для нестационарных задач, в общем случае, должны быть достаточно точными, за исключением нестационарных задач с установившимся периодическим решением (например, в случае задания периодических граничных условий), начальные условия для которых могут быть произвольными, но требуется дополнительное время для исключения их влияния на решение.

Стационарные задачи решаются методом установления решения во времени с использованием локальных шагов по времени, т. е. шаг по времени определяется для каждой ячейки расчетной сетки индивидуально, а именно с учетом параметров течения, рассчитанных в данной ячейке. При решении нестационарных задач шаг по времени во всех ячейках одинаковый и по умолчанию определяется COSMOSFloWorks автоматически на основании рассчитанных параметров течения во всей расчетной области. Если нужно получить более точное решение нестационарной задачи (с помощью задания более мелкого шага по времени по сравнению с автоматически выбираемым, например, для разрешения высокочастотного периодического решения) или быстрее рассчитать теплопередачу в твердых телах (с помощью задания более крупного шага по времени по сравнению с автоматически выбираемым, например, в том случае, когда картина течения устанавливается существенно быстрее), в этих случаях целесообразно задавать шаг по времени вручную. Если решается нестационарная задача расчета только теплопередачи в твердых телах, т. е. без расчета текучей среды, то лучше задать шаг по времени вручную.

Для решения нестационарной задачи требуется задание интервала физического времени задачи. В **Wizard** (Мастере проектов) он задается как **Total analysis time** (Длительность процесса). Альтернативный способ его зада-

ния — в окне **Calculation Control Options** (Опции управления расчетом) как **Maximum physical time** (Максимальное физическое время задачи), определяющее момент завершения расчета. Кроме того, можно задать моменты сохранения результатов расчета в системе отсчета физического времени задачи. В Мастере проектов они задаются в окне **Time Settings** (Установки времени) как **Output time moments** (Моменты выдачи результатов), можно также задать **Output time step** (Временной шаг выдачи результатов). Альтернативный способ их задания — в диалоговом окне **Calculation Control Options** (Опции управления расчетом) в виде стратегии и моментов сохранения результатов расчета. Нестационарные граничные условия задаются с помощью окна **Design** (Задание).

Течение с большим числом Маха

Если плотность текучей среды зависит от давления, то, в случае существенного влияния этой зависимости на характеристики течения, целесообразно учитывать сжимаемость этой среды.

В COSMOSFloWorks газы всегда рассматриваются как сжимаемые, а жидкости обычно рассматриваются как несжимаемые, но при необходимости могут быть заданы сжимаемыми (compressible liquids).

Если максимальная скорость течения газа в задаче превышает число Маха (**Mach number**) M = 3 при решении стационарной задачи или 1 при решении нестационарной задачи, то необходимо отметить **High Mach number flow** (Течение с большим числом Маха) в окне **Wizard** (Мастер проектов) или **General Settings** (Общие установки). При этом не рекомендуется включать опцию **High Mach number flow** (Течение с большим числом Маха) в тех случаях, когда сверхзвуковое течение имеется только в относительно небольшой области, а в большей части расчетной области течение дозвуковое. Если область, занятая сверхзвуковым течением, занимает примерно половину (или больше половины) расчетной области, то рекомендуется включить опцию **High Mach number flow**.

Если эта опция не выбрана, а заданные начальные или граничные условия указывают на максимальную скорость потока $M > 3$ в стационарной задаче или $M > 1$ в нестационарной задаче, то COSMOSFloWorks выдает соответствующее предупреждение. В процессе решения задачи COSMOSFloWorks также будет информировать о том, превышает ли максимальная скорость потока указанные выше значения или нет. Имейте в виду, что указание **High Mach number flow** (Течение с большим числом Маха) для низкоскоростного течения газа (максимальное число Маха $M < 1{,}5$) может привести к снижению точности расчета.

Гравитационные эффекты

Для задач со свободной конвекцией необходимо в окне **Wizard** (Мастер проектов) или **General Settings** (Общие установки) отметить **Gravitational effects** (Гравитационные эффекты) и задать вектор гравитационного ускорения в окне **Gravitational Settings** (Гравитационные данные).

Если в вашем проекте рассматриваются жидкости, то проверьте наличие зависимости их плотности от температуры в Инженерной базе данных.

Если в вашем проекте рассматриваются газы, то учет гравитации возможен только в том случае, если опция **High Mach number flow** (Течение с большим числом Маха) не выбрана.

Если учитываются гравитационные эффекты (gravitational effects), то по умолчанию автоматически включается опция **Pressure potential** (Давление в точке отсчета). Если эта опция включена, то задаваемое в качестве начальных и граничных условий статическое давление $P_{заданное}$ рассматривается как давление в точке начала используемой в расчете Глобальной системы координат проекта (**Global Coordinate System**), а необходимое для проведения расчета абсолютное давление $P_{абсолютное}$ определяется по этому давлению следующим образом:

$$P_{заданное} = P_{абсолютное} - \rho \cdot (g_x x + g_y y + g_z z),$$

где ρ — средняя по расчетной области плотность текучей среды, g_i — компоненты заданного вектора гравитационного ускорения, x, y, z — координаты используемой в расчете Глобальной системы координат проекта. Если опция **Pressure potential** (Давление в точке отсчета) не включена, то задаваемое в качестве начальных и граничных условий статическое давление рассматривается как абсолютное.

5.5.5. Задание граничных и начальных условий

Всякая решаемая с помощью COSMOSFloWorks задача должна иметь начальные и граничные условия. В случае решения стационарной задачи начальные условия влияют на скорость установления, тогда как граничные условия полностью определяют картину течения. В случае решения нестационарной задачи картина течения зависит как от начальных, так и от граничных условий.

Начальные условия

В COSMOSFloWorks стационарные задачи решаются в результате установления решения нестационарных уравнений Навье — Стокса во времени при выполнении шагов по времени (как итераций) от заданного начального со-

стояния среды (начальных условий). Естественно, начальные условия, т. е. начальные распределения значений независимых переменных задачи, должны быть заданы во всей расчетной области. Чтобы решить стационарную задачу за более короткое время, задайте начальные условия ближе к искомому решению (вместо заданных по умолчанию начальных условий).

Если решается нестационарная задача, то заданные вами начальные условия по определению должны в точности отражать начальное состояние среды перед развитием рассматриваемого процесса во времени, за исключением тех случаев, когда ищется периодическое нестационарное решение, не зависящее от начальных условий (например, если заданы периодические во времени нестационарные граничные условия), — в этом случае начальные условия могут быть любыми, но потребуется дополнительное время для исключения их влияния на искомое решение задачи.

Если решается внешняя (external) задача, то начальными условиями являются заданные в окнах **Wizard** или **General Settings** внешние условия (Ambient Conditions), т. е. значения независимых переменных невозмущенного внешнего течения.

Обзор начальных условий, задаваемых в COSMOSFloWorks, представлен в табл. 5.8.

Таблица 5.8. *Начальные условия*

Тип начального условия	**Окно**
1. Условия, задаваемые во всей расчетной области	
Независимые значения параметров текучей среды: • статические температура и давление (для газов возможны комбинации "температура и плотность" или "давление и плотность"); • компоненты вектора скорости (для газов также возможно задание числа Маха); • концентрации (относительные, по массе или по объему) компонентов для многокомпонентной среды; • параметры турбулентности (интенсивность и длина турбулентности или турбулентная диссипация и энергия турбулентности)	**Wizard**, **General Settings** (Initial and Ambient Conditions)
В качестве начальных условий могут быть использованы результаты одного из предыдущих расчетов, выполненного в данном или каком-либо другом проекте	**Wizard**, **General Settings** (Initial and Ambient Conditions); **Run**, **Batch Run** (Только для использования предыдущих результатов текущего проекта)

Таблица 5.8 *(окончание)*

Тип начального условия	**Окно**
Температура твердых тел (Если решается задача с учетом теплопередачи в твердых телах (опция **Heat transfer in solids** включена))	**Wizard**, **General Settings** (Initial and Ambient Conditions)
Заданные в **Wizard**, **General Settings** значения распространяются на все поле течения и все твердые тела, если не переопределены для отдельных тел и объемов текучей среды	
2. Условия, задаваемые в локальном объеме	
Параметры текучей среды: • Статические температура и давление (для газов возможны комбинации "температура и плотность" или "давление и плотность"); • Компоненты вектора скорости (для газов также возможно задание числа Маха); • Концентрации (относительные, по массе или по объему) компонентов для многокомпонентной среды; • Параметры турбулентности (интенсивность и длина турбулентности или турбулентная диссипация и энергия турбулентности)	**Initial Condition**
Температура твердых тел (Если решается задача с учетом теплопередачи в твердых телах (опция **Heat transfer in solids** включена))	**Initial Condition**

Примечание

Если тела, рассматриваемые как жидкостные объемы, частично заходят на детали, представляющие твердые тела, то приоритет отдается последним, т. е. область перекрытия рассматривается как твердое тело.

Граничные условия

Граничные условия для внешних (external) и внутренних (internal) задач задаются по-разному:

- при решении внешних задач вы задаете граничные условия на всех границах расчетной области (computational domain) как внешние условия (ambient) или условия симметрии (symmetry), а также, если необходимо, на поверхностях модели, например, на ее отверстиях (openings);
- при решении внутренних (internal) задач вы задаете граничные условия на поверхностях модели, т. е. на ее стенках (wall) и отверстиях (openings), а также, если необходимо, условие симметрии (symmetry) на границах расчетной области.

Обзор граничных условий представлен в табл. 5.9.

Таблица 5.9. *Граничные условия*

Тип граничного условия	**Окно**
1. Условия, задаваемые на границах расчетной области	
Параметры внешней (относительно модели) текучей среды (при решении внешней (**External**) задачи): • статические температура и давление (для газов возможны комбинации "температура и плотность" или "давление и плотность"); • компоненты вектора скорости (для газов также возможно задание числа Маха); • концентрации (относительные, по массе или по объему) компонентов для многокомпонентной среды; • параметры турбулентности (интенсивность и длина турбулентности или турбулентная диссипация и энергия турбулентности)	**Wizard**, **General Settings** (Initial and Ambient Conditions)
Если граница расчетной области является плоскостью симметрии течения, то на ней задается условие симметрии (**Symmetry**). Это может быть сделано как для внешних, так и для внутренних задач	**Computational Domain**
В качестве граничных условий можно использовать результаты одного из предыдущих расчетов (причем не обязательно из текущего проекта), при этом значения физических параметров, полученные в ранее проводимом расчете, будут использоваться в текущем проекте в качестве граничного условия. Это может быть сделано как для внешних, так и для внутренних задач	**Transferred Boundary Condition**
2. Условия, задаваемые на отдельных (выделяемых пользователем) поверхностях	
2.1. Условия на поверхностях, определяющих отверстия	
Входная/выходная скорость (для газов также число Маха)	**Boundary Condition**
Входной/выходной массовый расход	**Boundary Condition**
Входной/выходной объемный расход	**Boundary Condition**
Статическое/полное давление	**Boundary Condition**
Вентиляторы (идеальное устройство, задающее зависимость объемного расхода от перепада статического давления на этом устройстве)	**Fans**
Входные граничные условия включают также температуру текучей среды, концентрации (относительные, по массе или по объему) компонентов многокомпонентной среды, параметры турбулентности и пограничного слоя. Кроме того, возможно задание входного профиля и направления течения, в том числе закрутки потока	

Таблица 5.9 *(продолжение)*

Тип граничного условия	**Окно**
2.2. Условия на стенках	
Температура стенки	**Boundary Condition**
Коэффициент теплоотдачи (α)	**Boundary Condition**
Адиабатическая стенка без трения	**Boundary Condition**
Поверхностные тепловые источники: • с заданной тепловой мощностью; • с заданным удельным тепловым потоком	**Surface Source**
Если решается внутренняя задача (**Internal**) с учетом теплопередачи в твердых телах (опция **Heat transfer in solids** включена), то на внешних поверхностях модели, которые не контактируют с текучей средой проекта, но расположены внутри расчетной области, можно задать тепловые граничные условия, определяющие теплообмен модели с внешней средой: • температура внешних стенок; • коэффициент теплоотдачи (α) на внешних стенках	**Boundary Condition**
Тип радиационной поверхности (при учете радиоактивного теплообмена)	**Radiative Surface**
Шероховатость	**Boundary Condition**
Тангенциальная скорость поверхности (для моделирования плоскопараллельного, тангенциального или вращательного движения поверхности)	**Boundary Condition**
Стационарная поверхность (для моделирования неподвижной в абсолютной системе координат осесимметричной поверхности при расчете во вращающейся системе координат)	**Boundary Condition**
Значения физических параметров, полученные в ранее проводимом расчете, могут быть перенесены на поверхность текущего проекта и использоваться в качестве граничного условия	**Transferred Boundary Condition**
Условия на стенках, заданные в окнах **Boundary Condition**, **Surface Source** и **Radiative Surface**, переопределяют условия, заданные по умолчания в окнах **Wizard** или **General Settings**	
3. Условия, применяемые по умолчанию на всех стенках модели	
Шероховатость	**Wizard**, **General Settings** (Roughness)

Таблица 5.9 *(продолжение)*

Тип граничного условия	Окно
Если теплопередача в твердых телах не рассчитывается (опция **Heat transfer in solids** выключена), то на всех поверхностях модели, контактирующих с текучей средой, задается одно из тепловых граничных условий: • адиабатическая стенка (по умолчанию); • температура стенки; • поверхностные тепловые источники с заданной тепловой мощностью; • поверхностные тепловые источники с заданным удельным тепловым потоком	**Wizard**, **General Settings** (Default Wall Conditions)
Если в проекте рассчитывается теплопередача в твердых телах (опция **Heat transfer in solids** включена), то тепловые граничные условия на поверхностях стенок модели, контактирующих с текучей средой, не задаются. Вместо этого решается сопряженная задача теплообмена на границе между текучей средой и твердым телом	
Если решается внутренняя задача (**Internal**) с учетом теплопередачи в твердых телах (опция **Heat transfer in solids** включена), то на внешних поверхностях модели, которые не контактируют с текучей средой проекта, но расположены внутри расчетной области, задаются тепловые граничные условия, определяющие теплообмен модели с внешней средой: • адиабатическая внешняя стенка (по умолчанию); • температура внешних стенок; • коэффициент теплоотдачи (α) на внешних стенках; • тепловые источники на внешних поверхностях с заданным удельным тепловым потоком; • тепловые источники на внешних поверхностях с заданной тепловой мощностью	**Wizard**, **General Settings** (Default Outer Wall Conditions)
Если решается задача с учетом радиоактивного теплообмена (опция **Radiation** включена), то задается тип радиационной поверхности. По умолчанию — Non-radiative surface (Неизлучающая и непоглощающая поверхность)	**Wizard**, **General Settings** (Default Radiative Surface)
Если решается внутренняя задача (**Internal**) с учетом радиоактивного теплообмена (опция **Radiation** включена), то дополнительно задается тип радиационной поверхности для внешних поверхностей внутренней задачи. По умолчанию — Non-radiative surface (Неизлучающая и непоглощающая поверхность)	**Wizard**, **General Settings** (Default Radiative Surface)

Таблица 5.9 *(окончание)*

Тип граничного условия	Окно
4. Условия, применяемые к объему	
Объемный источник: • с заданной температурой; • с заданной мощностью тепловыделения; • с заданной удельной мощностью тепловыделения	**Volume Source**
Материалы твердых тел	**Material Condition**
Материалы пористых тел	**Porous Condition**

Примечание

При задании граничных условий для внутренних задач необходимо следить за их непротиворечивостью. Например, стационарная внутренняя задача не может быть решена, если вы задали только **Flow openings** (Отверстия с заданным течением) с условием **Velocity** (Скорость) и ни одного **Pressure opening** (Отверстия с заданным давлением) — в этом случае практически невозможно обеспечить баланс массового расхода через отверстия модели. Чтобы избежать таких проблем при решении задачи, в проекте желательно задать, по крайней мере, одно условие **Pressure opening** (Отверстие с заданным давлением).

Для граничного условия, задаваемого на поверхности (в том числе и на поверхности крышки, определяющей отверстие), эту поверхность необходимо выделить в графической области. Для доступа к внутренним поверхностям удобно пользоваться опцией **Выбрать другой**, которая появляется в контекстном меню при нажатии правой кнопки мыши в области модели. Удобно также включить опцию выделения сквозь прозрачные детали — **Выбор с помощью прозрачности**. Наконец, все поверхности тела можно быстро выделить, щелкнув на имени этого тела в дереве проектирования (**FeatureManager tree**). При этом быстро снять выделение лишних поверхностей можно с помощью инструмента **Filter** (Фильтр). *См. разд. "Окно Boundary Condition (Граничное условие)".*

Для условия, задаваемого в объеме, объем может быть выделен либо в дереве проектирования, либо непосредственно в графической области при выделении его поверхности, ребра или вершины.

Значения начальных и граничных условий могут быть заданы в виде константы, табличной или формульной зависимости от координат **X**, **Y**, **Z**, θ, φ, **r** и времени t (для нестационарных задач) с помощью кнопки **Design** (Задание) и опции **Reference axis** (Ось задания), имеющихся в соответствующих окнах задания условий (за исключением значения шероховатости, которое может быть только константой). Здесь θ, φ — координаты сферической системы ко-

ординат, **r** — радиус в цилиндрической системе координат, ось которой задается в поле **Reference axis** (Ось задания) как одна из осей Глобальной или справочной системы координат.

В тех окнах, где возможно задание параметров турбулентности, для их задания необходимо предварительно включить опцию **Show advanced parameters** (Показать дополнительные параметры). *См. разд. "Турбулентность"* данной главы.

Окно *Initial Condition* (Начальное условия)

Для вызова окна **Initial Condition** (Начальное условия) выберите **FloWorks | Insert | Initial Condition** (FloWorks | Вставить | Начальное условие).

Окно **Initial Condition** служит для задания начальных значений параметров текучей среды или температуры твердого тела, отличающихся от используемых по умолчанию (т. е. заданных в **Wizard** или **General Settings**) (рис. 5.37).

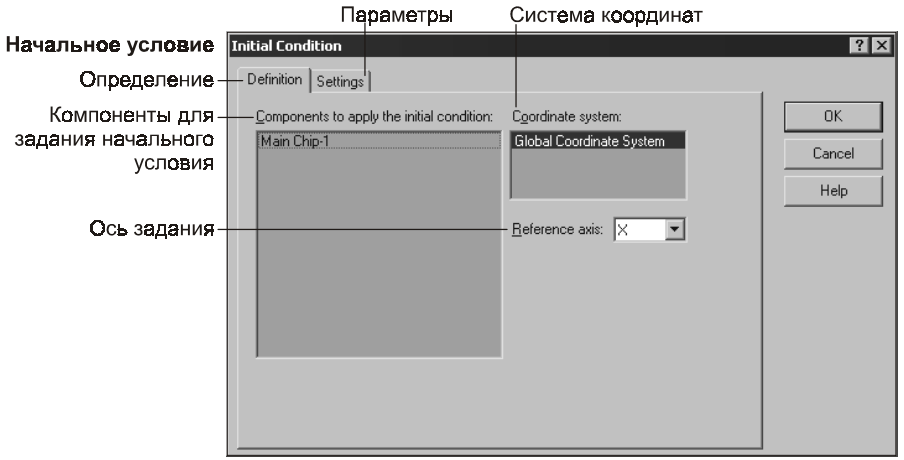


Рис. 5.37. Окно **Initial Condition** используется для задания начальной температуры чипа

На вкладке **Definition** (Определение) определяется объем, к которому применяется начальное условие (**Component to apply the initial condition**), и ось задания (**Reference axis**) как одна из осей выбранной системы координат (**Coordinate system)**.

В зависимости от того, к какому объему применяется условие (к твердому телу или телу, рассматриваемому как жидкостный объем), в окне **Initial Condition** задаются либо начальные значения параметров текучей среды, либо начальная температура твердых тел (последнее возможно при учете теплопередачи в твердых телах).

Определить полость, в которой задаются начальные значения параметров текучей среды, можно двумя способами:

- создать компонент (деталь сборки или тело многотельной детали) по объему интересующей полости, а затем "отключить" компонент с помощью окна **Component Control** (Управление деталями), в результате чего объем, занимаемый компонентом, будет рассматриваться в COSMOSFloWorks как полость, заполненная текучей средой проекта. Наконец, находясь в окне **Initial Condition**, выделить компонент;
- выделить любую поверхность (в том числе и поверхность крышки, закрывающей отверстие), ограничивающую замкнутую полость (начиная с версии 2005).

Выделить компонент можно, щелкнув на любой его поверхности, ребре, вершине или на его имени в дереве проектирования SolidWorks (Feature manager tree). Чтобы убрать компонент из списка, отметьте его в списке и нажмите клавишу <Delete>.

Управление деталями

Для вызова окна **Component Control** (Управление деталями) выберите **FloWorks** | **Component Control** (FloWorks | Управление деталями) (рис. 5.38).

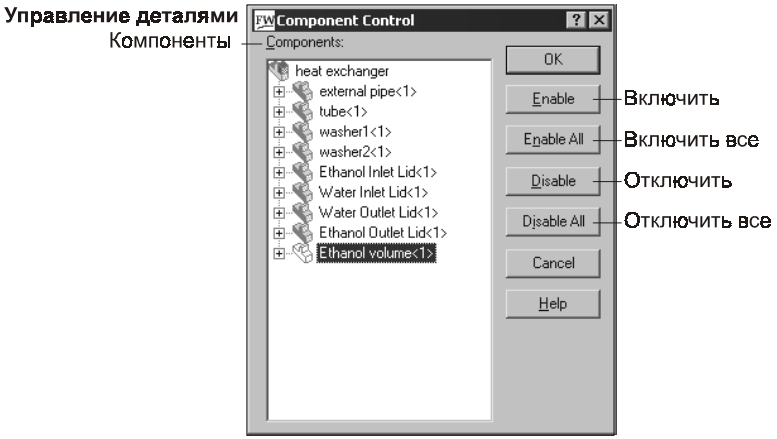


Рис. 5.38. Окно **Component Control**

Выделив компонент в списке компонентов (**Components**) и нажав **Disable** (Отключить), вы указываете COSMOSFloWorks рассматривать этот компонент как объем, занятый текучей средой.

Начальные параметры текучей среды (или начальная температура твердых тел) задаются на вкладке **Settings** (Параметры) окна **Initial Condition**.

Окно *Boundary Condition* (Граничное условие)

В диалоговом окне **Boundary Condition** (Граничное условие), при решении как внутренних, так и внешних задач, задаются входные (**Inlet**) и выходные (**Outlet**) (относительно пространства, заполненного текучей средой) граничные условия течения, а также условия на выбранных поверхностях модели, соприкасающихся с текучей средой. Кроме того, тепловые граничные условия могут быть заданы на выбранных внешних поверхностях модели при решении внутренних задач с расчетом теплопередачи в твердых телах.

Для внутренних течений необходимо задавать граничные условия на входных и выходных отверстиях модели, если таковые имеются (в этом нет необходимости при их отсутствии, т. е. при расчете естественной конвекции в замкнутой полости модели). В случае внешнего течения можно задать вдув (или отсос) потока с поверхности модели во внешнее пространство (или из него).

Заданные граничные условия можно схематично визуализировать непосредственно на модели в графическом окне с помощью окрашенных стрелок, указывающих направление потока и вид граничного условия. Для этого щелкните правой кнопкой мыши элемент **Boundary Condition** (Граничное условие) в Дереве анализа COSMOSFloWorks и выберите **Show** (Показать) или **Hide** (Спрятать) в зависимости от того, хотите или не хотите показывать эти стрелки.

Определение типа граничного условия

Для вызова окна **Boundary Condition** (Граничное условие) выберите **FloWorks** | **Insert** | **Boundary Condition** (FloWorks | Вставить | Граничное условие) (рис. 5.39).

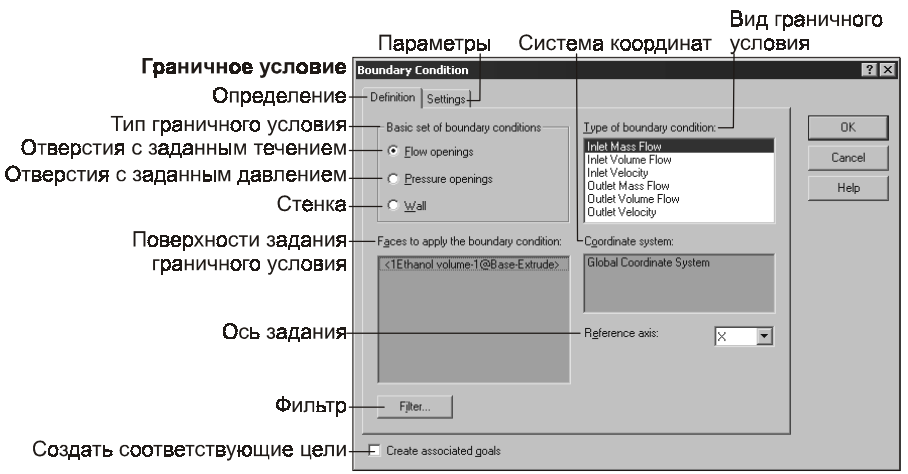


Рис. 5.39. Окно **Boundary Condition**

На вкладке **Definition** (Определение) определяются следующие параметры граничного условия:

- **Basic set of boundary conditions** (Тип граничного условия) — определяет тип задаваемого граничного условия. Здесь **Opening** (Отверстие) — поверхность, на которой вы задаете граничное условие, связанное с протеканием текучей среды через эту поверхность. Каждый тип граничных условий содержит несколько видов:
  - **Flow openings** (Отверстия с заданным течением) — предполагает задание граничного условия одного из следующих видов: **Inlet Velocity** (Входная скорость), **Outlet Velocity** (Выходная скорость); если текучая среда газообразная, то вместо абсолютной скорости может быть задано число Маха (**Mach number**), **Inlet Mass flow rate** (Входной массовый расход), **Outlet Mass flow rate** (Выходной массовый расход), **Volume flow rate** (Объемный расход). Таким образом, помимо типа основного параметра (скорость или расход), задается направление потока через данную поверхность: "входной (inlet)" означает втекание в модель, а "выходной (outlet)" — вытекание. Входные граничные условия включают также температуру текучей среды, концентрации компонентов многокомпонентной текучей среды, параметры турбулентности и пограничного слоя;
  - **Pressure openings** (Отверстия с заданным давлением) — предполагает задание граничного условия одного из двух видов: **Static pressure** (Статическое давление) или **Total pressure** (Полное давление). При этом направление потока не задается; но на тот случай, если поток будет втекать через данное отверстие, задается температура текучей среды (fluid temperature), концентрации (concentrations) компонентов многокомпонентной текучей среды, параметры турбулентности (turbulence parameters) и пограничного слоя (boundary layer parameters);
  - **Wall** (Стенка) предполагает задание на выделенной поверхности граничного условия одного из трех видов:
    - **Real Wall** (Реальная стенка) — позволяет задать отличающиеся от используемых по умолчанию (заданных в **Wizard** (Мастер проектов) или диалоговом окне **General Settings** (Общие установки)) шероховатость (**Roughness**), и/или коэффициент теплоотдачи (**Heat transfer coefficient**), и/или температуру (**Temperature**) поверхности стенки, контактирующей с текучей средой. Кроме того, граничное условие **Real Wall** (Реальная стенка) позволяет задать тангенциальную скорость поверхности твердого тела на границе с текучей средой для моделирования плоскопараллельного, тангенциального, или вращательного движения этой поверхности. Кроме того, если расчет проводится во вращающейся системе координат, то с помощью этого

граничного условия выбранную поверхность твердого тела на границе с текучей средой можно задать неподвижной в этой системе координат;

- **Outer Wall** (Внешняя поверхность) — позволяет задать температуру внешней поверхности модели (**Wall temperature**) или коэффициент теплоотдачи (**Heat transfer coefficient**) внешней поверхности модели и температуру внешней текучей среды (**External fluid temperature**) при решении внутренней задачи с расчетом теплопередачи в твердых телах (т. е. при отмеченной опции **Heat Transfer in Solids**);
- **Ideal Wall** (Идеальная стенка) — позволяет задать выбранную поверхность модели адиабатической, без трения по ней текучей среды. Это условие может быть использовано для задания плоскостей симметрии течения с целью уменьшения расчетной области и, соответственно, сокращения требуемой памяти и времени счета.

Значения параметров задаются на вкладке **Settings** (Параметры).

- Для задания граничного условия необходимо в графической области экрана выделить поверхности, к которым будет применен тот или иной тип граничного условия. Названия выделенных поверхностей появляются в списке **Faces to apply the boundary condition** (Поверхности задания граничного условия). Для исключения поверхности из списка выделите ее имя в списке и нажмите клавишу <Delete>.

Совет

Удобно вызывать окно **Boundary Condition** следующим образом: в графическом окне щелкните правой кнопкой мыши на поверхности модели, для которой собираетесь задать граничное условие, и в появившемся контекстном меню выберите опцию **Insert Boundary Condition** (Вставить граничное условие). В этом случае выбранная поверхность сразу попадает в список **Faces to apply the boundary Condition** (Поверхности задания граничного условия).

Кроме того, все поверхности тела можно быстро выделить, щелкнув на имени этого тела в Дереве проектирования (**FeatureManager tree**). Щелкнув **Filter** (Фильтр) можно снять выделение лишних поверхностей определенного типа:

- **Remove faces out of computational domain** (Убрать поверхности вне расчетной области) — убирает из списка поверхностей задания граничного условия поверхности, расположенные за пределами расчетной области;
- **Remove outer faces** (Убрать внешние поверхности) — убирает из списка поверхностей задания граничного условия внешние поверхности модели при решении внутренней задачи;

- **Remove faces in contact with fluid** (Убрать поверхности контакта с текучей средой) — убирает из списка поверхностей задания граничного условия поверхности, контактирующие с текучей средой;
- **Leave only outer faces and faces in contact with fluid** (Оставить только внешние поверхности и поверхности контакта с текучей средой) — убирает из списка все поверхности кроме внешних и поверхностей, контактирующих с текучей средой. Этот способ, в частности, удобен при задании теплового условия на внешних поверхностях модели (**Outer Wall**).

❐ Если хотите задать поток с закруткой или в виде произвольных векторов скорости, или неравномерный по поверхности (поверхностям) распределения параметров, то в поле **Coordinate System** (Система координат) задайте систему координат, в которой будете это делать. Если выделена плоская поверхность, COSMOSFloWorks использует систему координат, связанную с поверхностью. Такая система координат имеет свое начало в центре поверхности, а ее ось X ориентирована по нормали к поверхности. При этом в поле **Coordinate System** появляется название **Face based coordinate system** (Координатная система, привязанная к поверхности), а сама система отображается в графическом окне. Вы также можете использовать любую справочную систему координат или Глобальную систему координат проекта (**Global Coordinate System**). Для использования справочной системы координат ее необходимо создать с помощью функции SolidWorks **Вставка** | **Справочная геометрия** | **Координатная система** и выделить в Дереве проектирования SolidWorks (**FeatureManager tree**). Глобальная система координат проекта (**Global Coordinate System**) выбирается из Дерева анализа COSMOSFloWorks или автоматически при удалении другой системы координат из поля **Coordinate System**. Для удаления системы координат выделите ее имя в поле **Coordinate System** и нажмите клавишу <Delete>. Для задания параметров в цилиндрической (или сферической) системе координат в списке **Reference axis** (Ось задания) в качестве оси этой цилиндрической (или сферической) системы координат укажите одну из осей системы координат, выбранной предварительно и отображаемой в списке **Coordinate System** (Система координат) (рис. 5.40).

❐ Иногда необходимо задать цель, связанную каким-либо образом с граничным условием задачи. Например, если задано граничное условие Отверстие с заданным давлением (**Pressure opening**), то имеет смысл задать расход через эту границу в качестве поверхностной цели. COSMOSFloWorks позволяет это сделать автоматически — для этого нужно при задании граничного условия отметить **Create associated goals** (Создать соответствующие цели). Если интересующая цель была предварительно связана с

этим типом граничного условия, она будет автоматически создана при его создании. Связь различных задаваемых целей с типом граничного условия задается в диалоговом окне **COSMOSFloWorks Options** (Опции COSMOSFloWorks), вызываемом из меню SolidWorks при выборе **Инструменты** | **Параметры** | **Посторонняя фирма**.

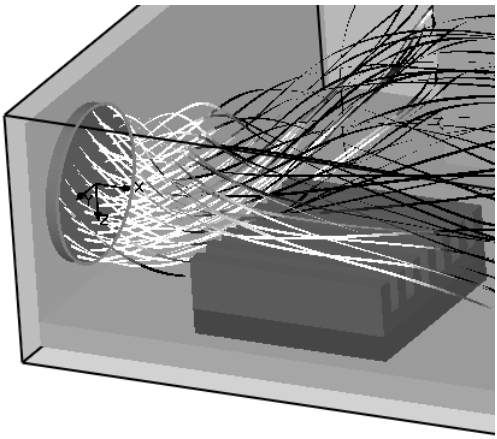


Рис. 5.40. Координатная система, привязанная к поверхности, используется для задания закрутки потока

Задание параметров граничного условия

На вкладке **Settings** (Параметры) выбираются значения параметров, определяющих граничное условие, тип и вид которого задан на вкладке **Definition** (Определение).

Для задания значения или выбора параметра дважды щелкните его ячейку в столбце **Value** (Значение). Если необходимо задать параметр в виде зависимости от координат или времени, щелкните сначала ячейку этого параметра в столбце **Value**, а затем — **Design** (Задание).

Если выбрано граничное условие **Flow opening** (Отверстие с заданным течением) или **Pressure opening** (Отверстие с заданным давлением), то задаются следующие параметры:

- **Flow Parameters** (Параметры потока) — в зависимости от вида граничного условия в качестве параметров потока во входном и выходном отверстиях задаются скорость (**Velocity**) (или, как вариант, число Маха (**Mach number**) — только для газов) или расход — массовый (**Mass flow rate**) или объемный (**Volume flow rate**), — а также направление вектора скорости (**Flow vector directions**). Предлагаются следующие способы задания направления вектора скорости (**Flow vector directions**):

- **Normal to face** (По нормали к поверхности) — вектор скорости перпендикулярен поверхности;
- **Swirl** (Закрученный поток) — задается закрутка потока вокруг оси цилиндрической системы координат, заданной на вкладке **Definition** (Определение) в окне **Reference axis** (Ось задания). Параметры закрутки задаются с помощью следующих составляющих скорости:
  - **Angular velocity** — угловая скорость, направление закрутки определяется знаком этой скорости по правилу буравчика;
  - **Radial velocity** — радиальная скорость;
- **3D vector** (Произвольный вектор) — направление потока задается X-, Y-, Z-составляющими вектора скорости (**in X, Y, Z directions**), определенными в декартовой системе координат, заданной на вкладке **Definition** (Определение) в поле **Coordinate System** (Система координат). При этом если задана не скорость, а массовый или объемный расход, то абсолютные значения составляющих вектора скорости могут быть произвольными, т. е. они определяют только направление, но не величину скорости, которая в этом случае определяется внутри COSMOSFloWorks по заданному вами расходу через данную поверхность;
- **Inlet profile** (Входной профиль) — для интегральных граничных условий потока, заданных на входе в модель, т. е. входного массового или объемного расхода, можно задать входной профиль скорости (например, параболический), причем используемые для его задания величины скорости могут быть любыми, т. к. они будут автоматически пересчитаны в соответствии с заданным расходом. Для задания зависимости в цилиндрической системе координат снова используется **Reference axis** (Ось задания), определенная на вкладке **Definition**. Например, для задания параболического профиля скорости течения в трубе, показанного на рис. 5.41, нужно ввести в окно **Design** следующую зависимость: (0.5*D – **r**)^2, где D — значение диаметра трубы, **r** — переменная в формуле профиля (рис. 5.41);
- **Fully developed tube profile** (Полностью развитый профиль трубы) — для круглых входных отверстий (а также для плоских отверстий в расчете двумерной — 2D — задачи) эта опция автоматически (в зависимости от числа Рейнольдса входного течения) задает входные профили скорости и параметров турбулентности (значений турбулентной энергии и диссипации), соответствующих развитому профилю течения в цилиндрическом или плоском канале;
- **Relative to rotating frame** (Во вращающейся системе координат) — скорость (или число Маха) задается в используемой для расчета вра-

щающейся системе координат, т. е. как V_r, по которой абсолютная скорость V_{abs} (т. е. в неподвижной системе координат) определяется следующим образом: $V_{abs} = V_r + \omega \cdot r$, где ω — угловая скорость вращения системы координат, r — радиус, отсчитываемый от оси вращения этой системы координат. Если флажок с этой опции снят, то задаваемая скорость является абсолютной, т. е. определенной в неподвижной системе координат V_{abs}.

Примечание

Массовый или объемный расход, заданный во вращающейся системе координат (т. е. при отмеченной опции **Relative to rotating frame**), не изменится при переходе к абсолютной (неподвижной) системе координат в том случае, если тангенциальная составляющая скорости, появляющаяся вследствие этого вращения, является касательной к поверхности данного отверстия модели, следовательно, не влияет на величину этого расхода (например, когда ось вращения перпендикулярна поверхности этого отверстия).

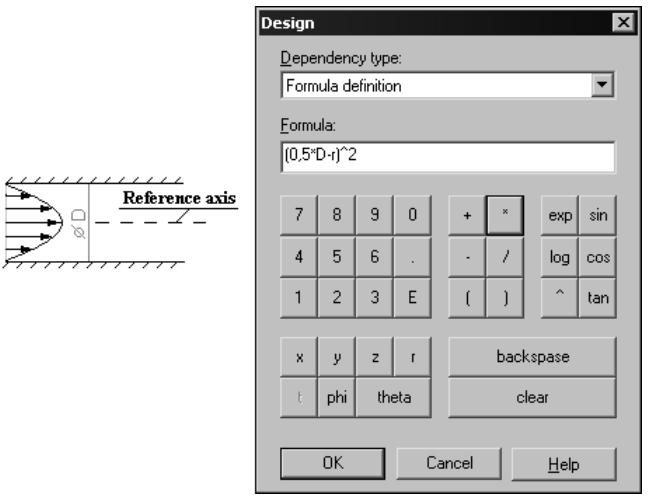


Рис. 5.41. Параболический профиль скорости, заданный в окне **Design**

- **Thermodynamic parameters** (Термодинамические параметры) задаются для граничных условий **Inlet Flow opening** (Входное отверстие с заданным течением) и **Pressure opening** (Отверстие с заданным давлением):
  - **Static pressure** (Статическое давление) или **Total pressure** (Полное давление) — статическое или полное давления в соответствии с выбранным типом граничного условия. Кроме того, если отмечена опция **High Mach number flow** (Течение с большим числом Маха) в **Wizard**

или **General Settings**, то на входных отверстиях с заданным потоком задается **Approximate pressure** (Примерное давление). *Подробную информацию о **Approximate pressure** см. в. разд. "Граничные условия в задачах с газами" данной главы*;

- **Pressure potential** (Давление в точке отсчета) — если задача решается во вращающейся системе координат (т. е. отмечена опция **Rotating reference frame**), то по умолчанию включается также опция **Pressure potential** (Давление в точке отсчета); в результате задаваемое статическое давление относится только к оси вращения этой системы координат, а абсолютное давление определяется по этому заданному статическому давлению, плотности текучей среды, осредненной по всей расчетной области, угловой скорости вращения этой системы координат, и радиусу, отсчитываемому от оси вращения этой системы координат: $P_{абс.} = P_{задан.} + 0,5\rho\omega^2 r^2$. Если флажок с опции **Pressure potential** снят, то задаваемое статическое давление является абсолютным давлением $P_{абс.}$. Если задача решается с учетом гравитации, то по умолчанию также включается опция **Pressure potential**; в результате задаваемое статическое давление относится только к точке начала Глобальной системы координат (**Global Coordinate System**), а абсолютное давление определяется по этому заданному статическому давлению, плотности текучей среды, осредненной по всей расчетной области, вектору гравитационного ускорения и положения точки в этой системе координат: $P_{абс.} = P_{задан.} + \rho(g_x x + g_y y = g_z z)$. Если флажок с опции **Pressure potential** (Давление в точке отсчета) снят, то задаваемое статическое давление является абсолютным давлением $P_{абс.}$;

- **Temperature** (Температура, статическая для газов) — температура втекающей жидкости на **Pressure openings** (Отверстия с заданным давлением) задается на тот случай, если поток будет втекать в расчетную область через отверстия с заданным давлением.

❒ **Substance Concentrations** (Концентрации компонентов текучей среды) — для многокомпонентной текучей среды необходимо задать концентрации (по массе (**by Mass**) или по объему (**by Volume**)) ее компонентов. На **Pressure openings** (Отверстия с заданным давлением) концентрации задаются на тот случай, если поток будет втекать в расчетную область через эти отверстия.

Кроме того, выбрав опцию **Show advanced parameters** (Показать дополнительные параметры), можно задать свои значения параметров турбулентности (**Turbulence parameters**) или пограничного слоя (**Boundary layer parameters**) вместо задаваемых COSMOSFloWorks по умолчанию.

- **Turbulence parameters** (Параметры турбулентности) — **Intensity** (Интенсивность турбулентности) и **Length** (Турбулентная длина) или **Energy** (Энергия турбулентности) и **Dissipation** (Турбулентная диссипация). *См. также разд. 5.5.4*;
- **Boundary layer parameters** (Параметры пограничного слоя) — для втекающего в модель потока задаются:
  - **Boundary layer type** (Тип пограничного слоя) — ламинарный (**Laminar**) или турбулентный (**Turbulent**);
  - Если выбрано граничное условие Входная скорость, то, отметив флажок **Set up boundary layer parameters** (Задать параметры пограничного слоя), можно также задать следующие параметры пограничного слоя:
    - **Dynamic boundary layer thickness** — толщина динамического пограничного слоя;
    - **Heat boundary layer thickness** — толщина теплового пограничного слоя;
    - **Core velocity** — скорость внешнего (относительно пограничного слоя) потока;
    - **Core temperature** — температура внешнего (относительно пограничного слоя) потока.

Примечание

Если в окне **Wizard** (Мастер проекта) или **General Settings** (Общие установки) выбрана опция **Laminar Only** (Всюду ламинарное течение), то поле течения везде, включая пограничный слой, рассчитывается как ламинарное.

Если на вкладке **Definition** (Определение) выбрано граничное условие **Real Wall** (Реальная стенка), то на вкладке **Settings** (Параметры) задаются следующие параметры:

- **Adjust wall roughness** (Задать шероховатость стенки) — задает шероховатость (R_z) выбранной поверхности;
- **Adjust wall heat transfer coefficient** (Задать коэффициент теплоотдачи) — позволяет определить тепловой поток от стенки к текучей среде при заданном коэффициенте теплоотдачи (**Heat transfer coefficient**) и, если не рассматривается теплопередача в твердых телах, заданной температуре стенки (**Wall temperature**). Температура текучей среды, которая также необходима для определения теплового потока от стенки к текучей среде при заданном коэффициенте теплоотдачи, может быть определена одним из следующих двух способов:
  - задана пользователем — для этого надо в строке **Define fluid temperature by** (Определить температуру текучей среды как) выбрать функ-

цию **User defined temperature** (Температура задается пользователем) и задать значение **External fluid temperature** (Температура внешней текучей среды);

- получена интерполированием рассчитанной COSMOSFloWorks температуры текучей среды на заданное пользователем расстояние от стенки модели: в строке **Define fluid temperature by** выберите функцию **Temperature interpolated at prescribed distance** (Интерполировать температуру на заданное расстояние) и укажите значение **Dynamic boundary layer thickness** (Толщина динамического пограничного слоя). В результате необходимая для расчета теплового потока температура текучей среды будет определена интерполяцией рассчитанной температуры текучей среды на внешнюю границу динамического пограничного слоя;

❒ **Adjust wall temperature** (Задать температуру стенки) — задает температуру стенки (**Wall temperature**). Заданная температура стенки будет рассматриваться как источник (или сток) тепла независимо от того, рассчитывается ли в данном проекте теплопередача в твердых телах. Эта температура также необходима для определения теплового потока от стенки к текучей среде при заданном коэффициенте теплоотдачи в случае, если не рассматривается теплопередача в твердых телах.

Если решается внутренняя задача с учетом теплопередачи в твердых телах, то на выбранных внешних поверхностях модели может быть задано граничное условие вида **Outer Wall** (Внешняя поверхность). В этом случае на вкладке **Settings** (Параметры) в строке **Wall Condition** (Условие на стенке) могут быть заданы следующие параметры:

❒ **Wall temperature** (Температура стенки) — температура внешней поверхности модели;

❒ **Heat transfer coefficient** (Коэффициент теплоотдачи) — если выбрана эта опция, то на выбранных внешних поверхностях модели задается коэффициент теплоотдачи этих поверхностей α в окружающую модель внешнюю среду, чья температура T_f задается как **External fluid temperature** (Температура внешней текучей среды), так что мощность теплового потока от этой внешней среды к выбранным внешним поверхностям модели будет определяться по следующей формуле: $Q = \alpha \cdot \left(T_s - T_f\right) \cdot S$, где T_s — температура выбранных внешних поверхностей модели, S — площадь этих поверхностей. При этом температура внешней поверхности модели рассчитывается COSMOSFloWorks в результате расчета теплопередачи в твердых телах.

Как уже отмечалось, при выборе типа граничного условия Реальная стенка (**Real Wall**) возможно задать плоскопараллельное, тангенциальное или вращательное движение поверхности этой стенки.

Задание подвижных стенок

На вкладке **Moving Wall Settings** (Параметры подвижных стенок) можно задать движение поверхности стенки (без изменения ее геометрии в системе координат, в которой проводится расчет) путем задания направления и скорости этого движения. Можно задать плоскопараллельное или тангенциальное движение (**translation**) цилиндрических поверхностей вдоль их образующих или вдоль их направляющих, лежащих в плоскостях, перпендикулярных к образующим этих поверхностей, или вращение (**rotation**) осесимметричной поверхности около ее оси. Кроме того, может быть задана неподвижная стенка (**stator**) во вращающейся системе координат. Задание подвижной стенки трактуется в программе как задание тангенциальной скорости поверхности в качестве граничного условия на этой поверхности.

Примечание

Задание подвижной стенки никак не влияет на расчет теплопередачи в этой стенке, т. е. при этом расчете движение стенки не учитывается. Таким образом, заданное движение стенки влияет только на движение текучей среды около поверхности этой стенки.

Для задания движения поверхности стенки перейдите на вкладку **Moving Wall Settings** и включите опцию **Adjust moving wall settings** (Задать параметры подвижных стенок).

Тип движения выбирается из списка **Motion type** (Тип движения):

- **Translation** (плоскопараллельное или тангенциальное движение) — этот тип движения может быть задан для любой цилиндрической поверхности, т. е. поверхности, заданной параллельными прямолинейными образующими (или плоскопараллельным движением некоторой кривой вдоль прямолинейной образующей). Так, плоская поверхность, являющаяся частным случаем цилиндрической поверхности, может двигаться в любом направлении в ее плоскости, а неплоская поверхность может двигаться либо вдоль ее прямолинейной образующей, либо вдоль ее направляющей кривой, лежащей в плоскости, перпендикулярной этой образующей (рис. 5.42).
- **Rotation** (Вращение) — этот тип движения может быть реализован для любой поверхности вращения, т. е. поверхности, образованной вращением некоторой кривой около заданной оси, например, для цилиндра или конуса (рис. 5.43).
- **Stator** (Статор) — этот тип стенки может быть задан только в случае проведения расчета течения во вращающейся системе координат. При прове-

дении такого расчета все поверхности модели по умолчанию считаются неподвижными во вращающейся системе координат, т. е. вращающимися вместе с ней. Поверхности модели, которые заданы как **Stator** (Статор), считаются неподвижными в абсолютной (невращающейся) системе координат, т. е. вращающимися во вращающейся системе координат в противоположную вращению системы координат сторону с угловой скоростью вращения, равной по абсолютной величине скорости вращения системы координат (рис. 5.44).

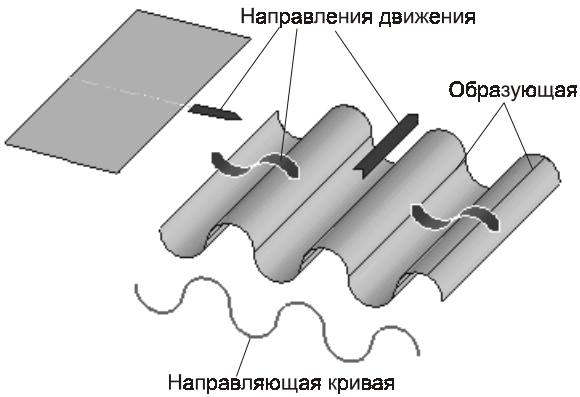


Рис. 5.42. Примеры плоскопараллельного движения

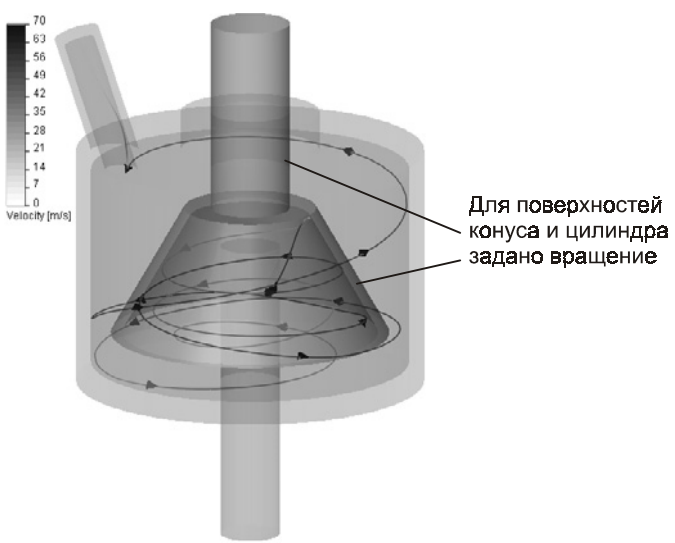


Рис. 5.43. Пример вращательного движения

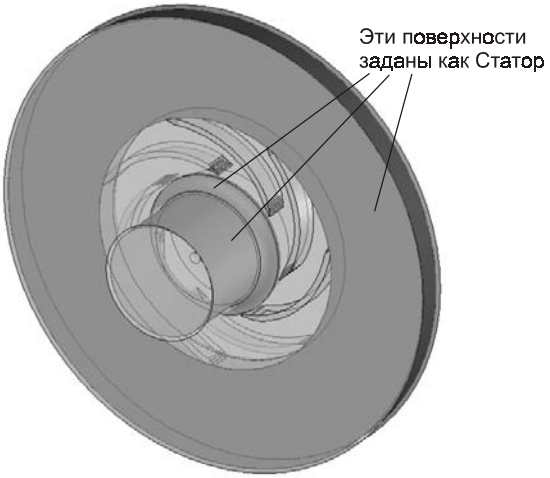


Рис. 5.44. Стенки импеллера, рассчитанного во вращающейся системе координат, заданы как **Stator** (Статор)

Значение скорости движения (угловой скорости для вращения) задается в поле **Velocity** (Скорость).

В поле **Motion direction** (Направление движения) задается направление движения поверхности одним из следующих способов:

- **Reference Axis** (Ось задания) — в Дереве проектирования SolidWorks (**FeatureManager tree**) выберите справочную ось. Чтобы ее создать, щелкните **Вставка** | **Справочная геометрия** | **Ось**. Если выбран тип движения поверхности **Translation** (плоскопараллельное или тангенциальное движение), то поверхность будет двигаться в направлении этой оси (если скорость положительная). Если выбран тип движения поверхности **Rotation** (Вращение), то поверхность будет вращаться вокруг этой оси в направлении, которое определяется по правилу "буравчика" по знаку заданной угловой скорости вращения. Направление заданной таким образом оси легко определить по ее начальной точке, около которой показано имя этой оси;
- **Axis of Coordinate system** (Ось системы координат) — в Дереве проектирования SolidWorks (**FeatureManager tree**) выберите справочную систему координат или оставьте выбранную по умолчанию **Global Coordinate System** (Глобальная система координат проекта), затем в окошке **Axis** (Ось) выберите одну из осей этой системы координат, которая будет либо определять направление движения поверхности в случае типа движения поверхности **Translation**, либо будет осью вращения поверхности в случае типа движения поверхности **Rotation**;

Примечание

Система координат, выбранная на вкладке **Definition**, и ее ось (**Reference axis**) используются только для задания зависимостей исходных данных в окне **Design** (Задание), не надо их путать с системой координат и осью, выбранными на вкладке **Moving Wall Settings** (Параметры подвижных стенок) и используемыми только для задания направления движения поверхности.

- **Tangent to Curve** (По касательной к кривой) — в Дереве проектирования SolidWorks (**FeatureManager tree**) выберите кривую, являющуюся линией пересечения данной движущейся цилиндрической поверхности с плоскостью, перпендикулярной ее образующим (эта кривая является направляющей данной цилиндрической поверхности). В результате поверхность будет двигаться вдоль этой кривой (см. рис. 5.42).

Граничные условия в задачах с газами

При задании течения в качестве граничного условия на отверстиях модели в случае расчета течений с газами необходимо учитывать следующие обстоятельства.

- **Approximate pressure** (Примерное давление) — этот параметр наряду с температурой используется для оценки числа Маха входного потока в том случае, когда оно не задано пользователем. Если число Маха входного потока больше 1 (т. е. входной поток является сверхзвуковым), то **Approximate pressure** используется в качестве граничного условия, следовательно, должно быть задано достаточно точно. Если число Маха входного потока меньше 1, то **Approximate pressure** используется только в качестве вспомогательного параметра и не влияет на полученное решение задачи, но его достаточно точная оценка позволяет ускорить получение этого решения.
- Корректное задание в качестве граничного условия входного объемного расхода, входной скорости, входного числа Маха. Если в качестве граничного условия на входе в модель задан или объемный расход, или скорость, или число Маха, а в некоторой области внутри модели течение становится полностью сверхзвуковым (т. е. как в сопле), то расчет, скорее всего, будет некорректным, т. к. скорость потока на входе в модель (в отличие от массового расхода) будет полностью определяться показателем адиабаты газа и геометрией проточного тракта модели. В результате такого неверного задания входного граничного условия давление, плотность и массовый расход газа в процессе расчета будут увеличиваться и уменьшаться без сходимости к решению. Во время такого расчета появится соответствующее предупреждение, что течение газа с заданным на входе в модель объемным расходом или скоростью, или числом Маха стало сверхзвуковым в некотором месте расчетной области.

В этом случае необходимо вместо этих граничных условий задать в качестве граничного условия на входе в модель массовый расход или давление.

Обратите внимание, что описанная проблема появляется только в том случае, когда поверхность перехода через скорость звука (т. е. с числом Маха = 1) полностью перекрывает проточный тракт модели.

- Если рассчитывается течение газа и на выходе из модели получен сверхзвуковой поток, то граничное условие на выходе из модели (а также на расположенной ниже по течению внешней границе расчетной области при решении внешней задачи) игнорируется. Если хотите, чтобы граничные условия на выходе из модели действительно были выполнены при решении задачи, убедитесь, что соответствующее поставленной задаче число Маха на выходе из модели меньше 1.

Окно *Fan* (Вентилятор)

Граничное условие **Fan** (Вентилятор) рассматривается как идеальное устройство, создающее объемный (или массовый) расход (можно также задать закрутку потока) в зависимости от разницы статических давлений на входе и выходе из этого устройства, при этом давление со стороны расчетной области осредняется по поверхности задания вентилятора. Зависимость объемного (или массового) расхода через **Fan** от перепада статического давления берется из инженерной базы данных — так называемые fan curves (зависимости вентиляторов).

Вы можете задать вентилятор на любой соприкасающейся с текучей средой поверхности модели, например, на вспомогательных крышках, закрывающих входные и выходные отверстия модели (рис. 5.45).

Примечание

Имеющиеся в **Engineering Database** (Инженерная база данных) зависимости объемного расхода через различные вентиляторы от перепада статического давления приведены там исключительно в качестве примеров, а не как рекомендации использовать именно эти вентиляторы. Зависимости, заданные в Инженерной базе данных, взяты из каталогов фирмы Papst. COSMOSFloWorks не гарантирует точность этих зависимостей и не обновляет их при обновлении в каталогах. Если в решаемой задаче имеется вентилятор, то пользователь должен сам задать именно те характеристики, которые этот вентилятор имеет. При задании характеристик необходимо руководствоваться данными фирмы-производителя данного вентилятора.

Для вызова окна **Fan** (Вентилятор) выберите **FloWorks** | **Insert** | **Fan** (FloWorks | Вставить | Вентилятор) (рис. 5.46).

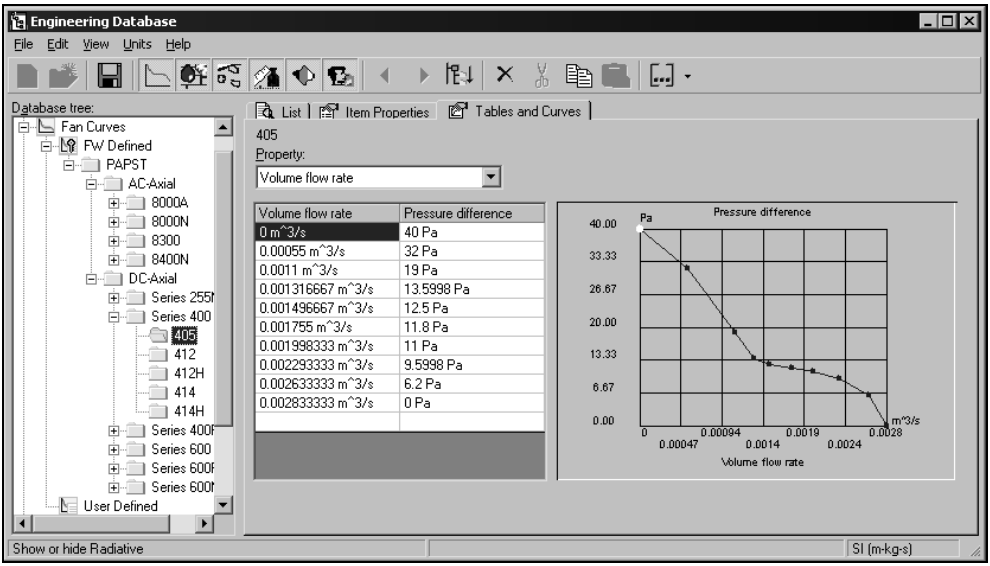


Рис. 5.45. Кривая зависимости вентилятора (fan curve), заданная в Инженерной базе данных

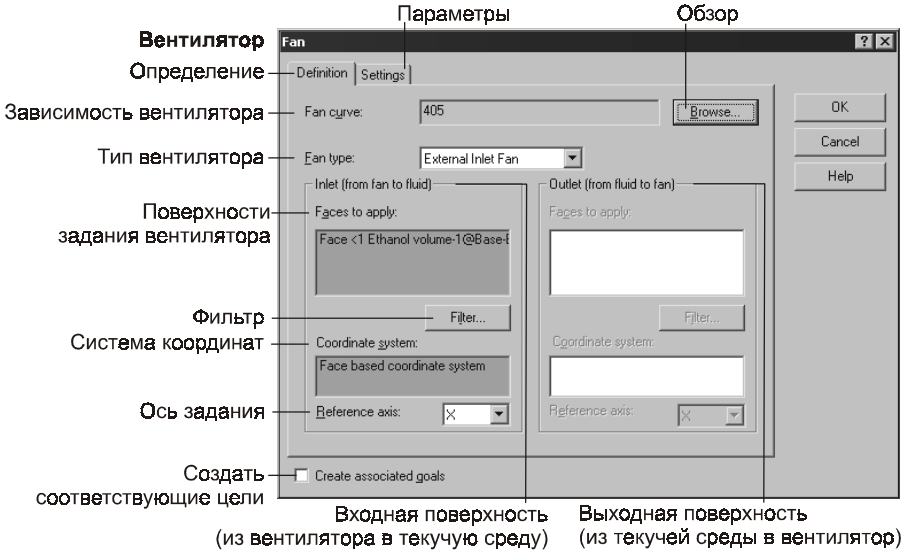


Рис. 5.46. Окно **Fan**

На вкладке **Definition** (Определение) определяются следующие параметры вентилятора:

- **Fan curve** (Зависимость вентилятора) — зависимость объемного (или массового) расхода от разницы статических давлений, заданная в инженерной

базе данных. Нажав **Browse** (Просмотреть), вы попадаете в Инженерную базу данных, в папку, где находятся предварительно заданные зависимости, и можете выбрать зависимость, подходящую для вашего вентилятора.

- **Fan type** (Тип вентилятора) — определяет тип задаваемого вентилятора, как один из следующих возможных:
  - **External Inlet Fan** (Входной внешний вентилятор) — задается на входном отверстии модели (подает текучую среду в расчетную область);
  - **External Outlet Fan** (Выходной внешний вентилятор) — задается на выходном отверстии модели (отбирает текучую среду из расчетной области);
  - **Internal Fan** (Внутренний вентилятор) — задается внутри модели, т. е. внутри расчетной области на двух поверхностях, одна из которых рассматривается как входная из вентилятора в расчетную область (**Inlet**), а другая — как выходная (**Outlet**); соответственно, между ними берется перепад давления. Необходимые для расчета расхода текучей среды через такой вентилятор статические давления на этих поверхностях определяются в процессе расчета течения внутри расчетной области и осреднения полученных распределений давления по этим поверхностям.

  Объемный расход текучей среды через внешние вентиляторы (**External Inlet Fan** и **External Outlet Fan**) определяется разностью между внешним давлением, заданным как **Ambient pressure** (Внешнее давление) на вкладке **Settings** (Параметры), и статическим давлением текучей среды на поверхности вентилятора со стороны расчетной области, определенным в процессе расчета течения и осредненным по этой поверхности.
- **Faces to apply** (Поверхность задания вентилятора) — выбранная в графической области поверхность, на которой задается вентилятор. В случае задания **Internal Fan** (Внутренний вентилятор) предварительно укажите, как интерпретировать выбираемую поверхность — как входную (из вентилятора в текучую среду) или выходную (из текучей среды в вентилятор). Для этого щелкните соответствующее окно списка **Faces to apply** (Поверхности задания вентилятора), в который будут включены имена всех выбранных вами поверхностей. Для исключения поверхности из списка выделите ее имя в списке и нажмите клавишу <Delete> или воспользуйтесь кнопкой **Filter** (Фильтр) (рис. 5.47).

Примечание

При задании **Internal Fan** (Внутренний вентилятор) необходимо помнить, что **Inlet** (Входная поверхность) — это поверхность, через которую текучая среда выходит из вентилятора, а **Outlet** (Выходная поверхность) — это поверхность, через которую текучая среда входит в вентилятор.

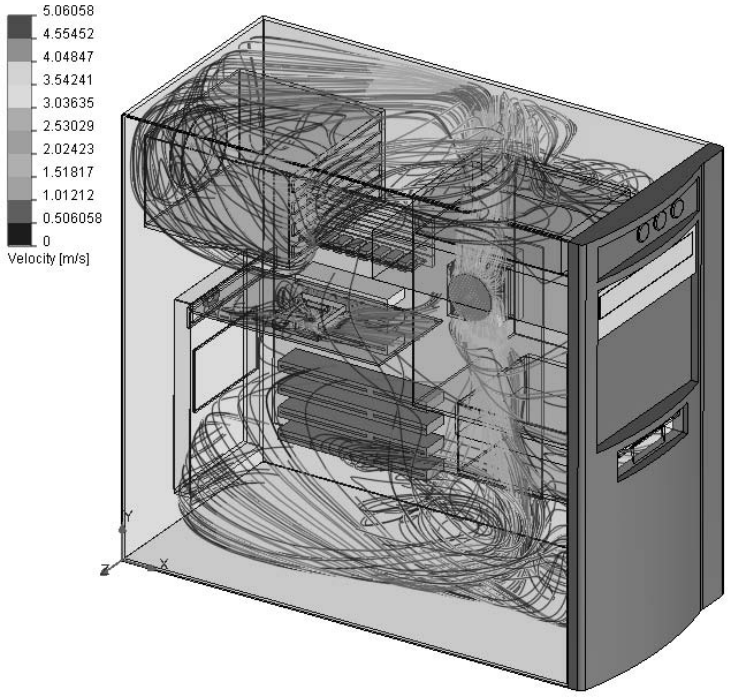


Рис. 5.47. Внутренний вентилятор в модели компьютера

- Для задания вентилятора с закруткой потока, с произвольным вектором скорости или для задания значений параметров, зависящих от времени или координат, необходимо задать систему координат (**Coordinate system**) ось задания (**Reference axis**) так, как описано в *разд. "Окно Boundary Condition (Граничное условие)" данной главы*.

На вкладке **Settings** (Параметры) задаются параметры потока на входе или выходе вентилятора (в зависимости от его типа): направление вектора скорости (**Flow parameters**), термодинамические параметры (**Thermodynamic parameters**), концентрации (**Substance concentration**) компонентов (для многокомпонентной среды), параметры турбулентности (**Turbulence parameters**).

При задании внутренних вентиляторов (**Internal Fans**) по умолчанию температура выходящего из вентилятора потока (т. е. потока на входной (inlet surface) по отношению к текучей среде поверхности) равна температуре потока, входящего в вентилятор (т. е. заданного на выходной (outlet) по отношению к текучей среде поверхности). Для задания температуры потока, выходящего из вентилятора, необходимо снять флажок с опции **Use outlet temperature** (Использовать выходную температуру).

Окно *Surface Source* (Поверхностный источник)

Здесь вы задаете поверхностный тепловой источник на поверхности твердого тела, соприкасающейся с текучей средой.

Для вызова окна **Surface Source** (Поверхностный источник) выберите **FloWorks** | **Insert** | **Surface Source** (FloWorks | Вставить | Поверхностный источник) (рис. 5.48).

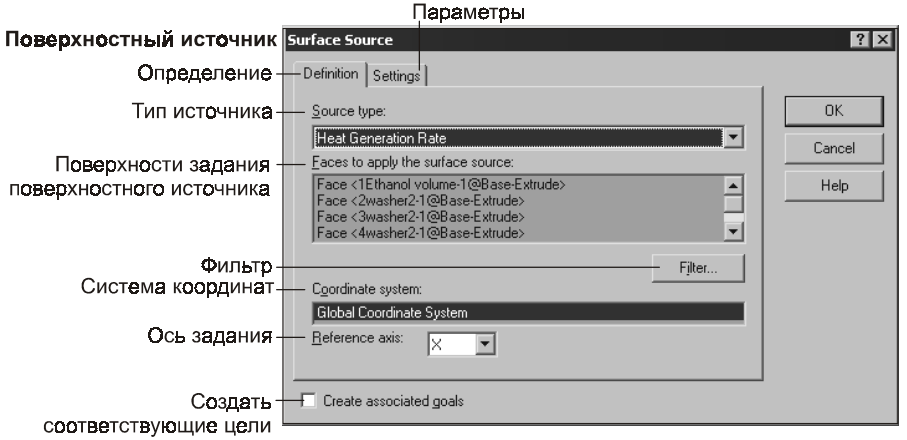


Рис. 5.48. Окно **Surface Source**

Если теплопередача в твердых телах не рассматривается, то этот источник, заданный в виде **Heat Transfer Rate** (Тепловая мощность, Вт) или **Heat Flux** (Тепловой поток, Вт/м^2), заданный на выбранной поверхности, является тепловым граничным условием для текучей среды вместо условия на стенках по умолчанию, заданному в окне **Wizard** или **General Settings**. Положительные значения соответствуют потоку тепла от твердого тела к текучей среде, а отрицательные — от текучей среды к твердому телу.

Если рассчитывается теплопередача в твердых телах, то этот источник, заданный в виде **Heat Generation Rate** (Мощность тепловыделения, Вт) или **Surface Heat Generation Rate** (Удельная мощность поверхностного тепловыделения, Вт/м^2), является тепловым источником для твердого тела. При этом поток тепла от текучей среды к стенке определяется *температурой стенки*, зависящей от заданного теплового источника, теплопередачи внутри стенки и теплообмена между текучей средой и стенкой. При этом положительные значения соответствуют тепловыделению в твердом теле, отрицательные значения указывают на поглощение тепла в теле.

Значения величин задаются на вкладке **Settings** (Параметры) и в общем случае могут быть заданы зависимыми от времени или координат.

Окно *Radiative Surface* (Поверхность радиационного теплообмена)

Если решается сопряженная задача теплообмена (выбрана опция **Heat transfer in solids** в окне **Wizard** или **General Settings**) и при этом учитывается радиационный теплообмен (выбрана опция **Radiation**), то данное окно позволяет задать радиационные свойства контактирующей с текучей средой поверхности, отличные от заданных по умолчанию в окне **Wizard** или **General Settings**.

Для вызова окна **Radiative Surface** (Поверхность радиационного теплообмена) выберите **FloWorks** | **Insert** | **Radiative Surface** (FloWorks | Вставить | Поверхность радиационного теплообмена) (рис. 5.49).

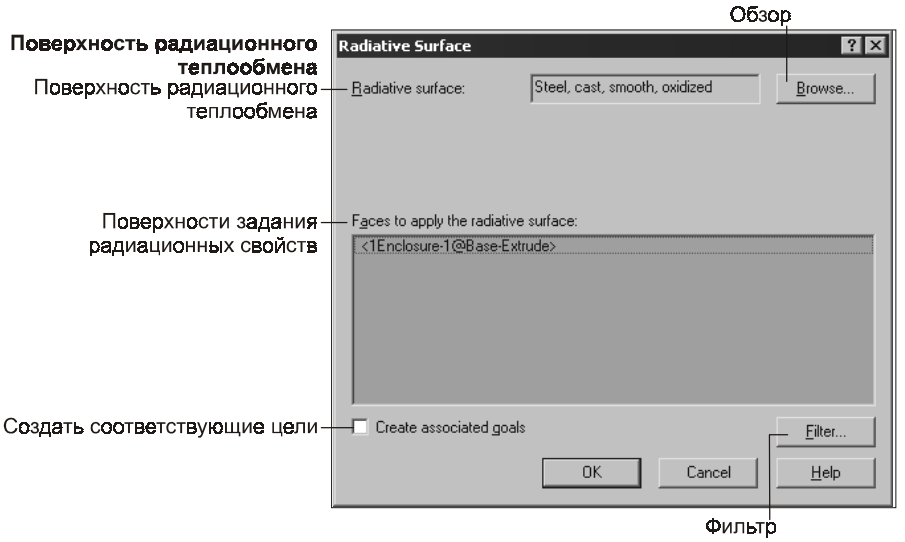


Рис. 5.49. Окно **Radiative Surface**

Радиационные свойства поверхностей (тип поверхности — стенка, излучающее отверстие, и др. — и степень черноты) задаются в инженерной базе данных. Для задания радиационных свойств той или иной поверхности необходимо выделить поверхность и, нажав **Browse** (Просмотреть), выбрать нужную поверхность (**Radiative surfaces**) из Инженерной базы данных.

Подробную информацию о типах радиационных поверхностей см. в разд. 5.5.4.

Для свойства поверхности **Blackbody opening/outer boundary** (Абсолютно черные отверстие или внешняя граница) необходимо задать в **Radiative temperature** (Температура излучения) T, необходимую для расчета лучисто-

го теплового потока $Q = \varepsilon\sigma T^4$, излучаемого данной абсолютно черной (т. е. $\varepsilon = 1$) поверхностью внутрь расчетной области.

Для свойства поверхности **Solar opening** (Поверхность солнечного излучения) необходимо задать составляющие вектора направления **Direction X**, **Y**, **Z** (Направление X, Y, Z) и интенсивность **Intensity** (Интенсивность) теплового потока, излучаемого этой поверхностью внутрь расчетной области.

Примечание

Если поверхность радиационного теплообмена является поверхностью теплоизолятора (материала с нулевой теплопроводностью, называемого в COSMOSFloWorks **insulator**), то, вне зависимости от типа радиационной поверхности, задаваемого пользователем, COSMOSFloWorks всегда будет считать такую поверхность абсолютно белой стенкой (**whitebody wall**).

Окно *Volume Source* (Объемный источник)

Здесь вы задаете объемный тепловой источник в твердом теле или в текучей среде.

Объемный тепловой источник в твердом теле может быть задан только в случае учета теплопередачи в твердом теле (опция **Heat transfer in solids**).

Чтобы задать объемный тепловой источник в текучей среде, необходимо пространство, занятое этим источником, представить в виде детали сборки (или тела многотельной детали), а затем выключить (**Disable**) ее с помощью диалогового окна **Component Control** (Управление деталями), так что COSMOSFloWorks будет рассматривать ее как полость, занятую текучей средой.

Примечание

Если часть тела, в котором вы задали мощность тепловыделения (**Heat Generation Rate**), лежит вне расчетной области (**Computational Domain**), то в данном проекте вместо заданной вами будет использоваться величина, пропорциональная объему той части тела, которая лежит в пределах расчетной области.

Для вызова окна **Volume Source** (Объемный источник) выберите **FloWorks** | **Insert** | **Volume Source** (FloWorks | Вставить | Объемный источник (рис. 5.50).

Возможные типы объемного источника: **Temperature** (Температура), **Heat generation rate** (Мощность тепловыделения, Вт) и **Volumetric heat generation rate** (Удельная мощность объемного тепловыделения, Вт/м^3).

Положительные значения **Heat generation rate** (Мощность тепловыделения, Вт) и **Volumetric heat generation rate** (Удельная мощность объемного тепловыделения, Вт/м^3) соответствуют выделению тепла в объеме, а отрицательные — поглощению тепла.

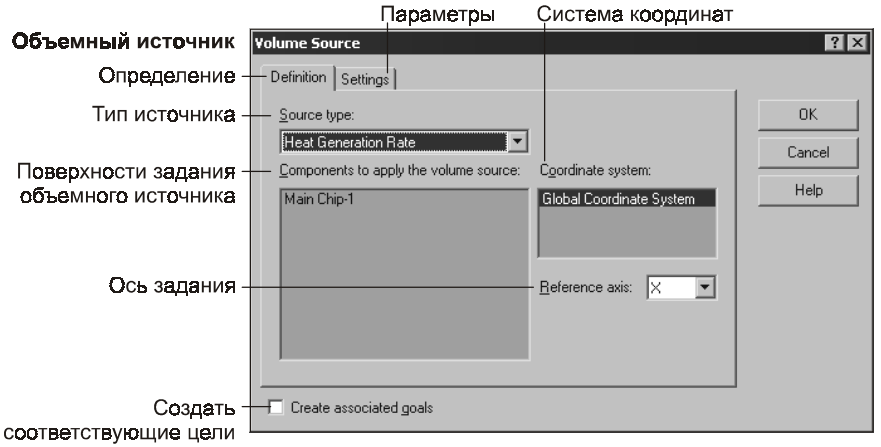


Рис. 5.50. Окно **Volume Source**

Окно *Material Condition* (Задание материала)

Если решается сопряженная задача теплообмена, то в этом окне для выбранного компонента сборки (или тела многотельной детали) можно задать материал, отличающийся от используемого для всех твердых тел данного проекта по умолчанию в соответствии с установками **Wizard** (Мастер проектов) или **General Settings** (Общие установки).

Для вызова окна **Material Condition** (Задание материала) выберите **FloWorks** | **Insert** | **Material Condition** (FloWorks | Вставить | Задание материала) (рис. 5.51).

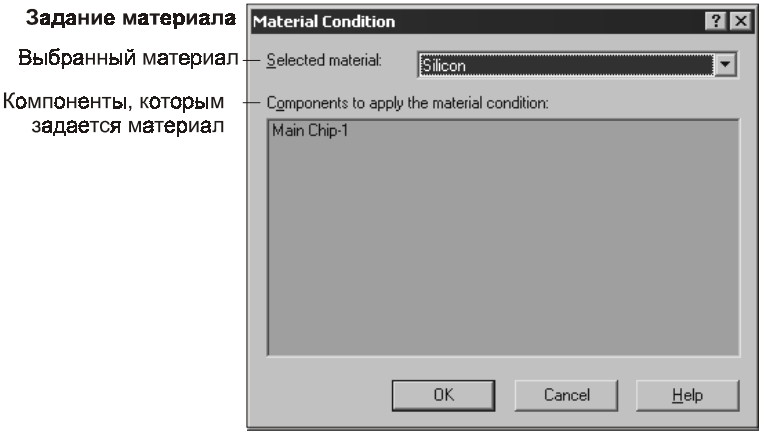


Рис. 5.51. Окно **Material Condition**

В списке **Selected material** (Выбранный материал) присутствуют материалы, выбранные в окне **Wizard** (Мастер проектов) на шаге задания материалов проекта. Если в этом списке вы не обнаружили нужного материала, необходимо закрыть окно **Material Condition** и добавить материал в проект в окне **General Settings** (Общие установки), выбрав его из материалов, имеющихся в **Engineering Database** (Инженерной базе данных). Если же нужного материала нет в данный момент в Инженерной базе данных, необходимо открыть **Engineering Database** и добавить материал.

Выбранные твердые тела (компонент сборки или тело многотельной детали) отображаются в списке **Components to apply the material condition** (Компоненты, которыми задается материал). Выделить тело можно, щелкнув на его имени в Дереве проектирования (**FeatureManager tree**) или непосредственно в графической области, щелкнув на его поверхности, ребре или вершине. Чтобы убрать компонент из списка, отметьте его в списке и нажмите клавишу <Delete>.

Совет

Во избежание некорректного перетекания тепла через необходимые для расчета внутренних течений вспомогательные крышки на отверстиях модели, лучше всего выполнить их в виде отдельных деталей и задать для них материал с нулевой теплопроводностью (insulator).

Окно *Porous Condition* (Задание пористой среды)

Окно **Porous Condition** (Пористое тело) позволяет задать деталь (или тело многотельной детали) как пористое тело. Пористый материал для этого тела берется из **Engineering Database** (Инженерной базы данных).

Перед тем как задавать пористое тело, выполните следующие шаги.

1. Откройте **Engineering Database** (Инженерная база данных) и задайте там пористый материал, который собираетесь использовать для пористого тела. *Свойства пористых тел подробно описаны в разд. 5.3.1.*
2. В окне **Component Control** (Управление деталями) отключите деталь (или тело) модели, которая будет задана пористой.

Для вызова окна **Porous Condition** (Задание пористой среды) выберите **FloWorks** | **Insert** | **Porous Condition** (FloWorks | Вставить | Задание пористой среды) (рис. 5.52).

На вкладке **Main** (Главная) выбираются свойства пористого тела из инженерной базы данных и тело (компонент сборки или тело многотельной детали), к которому эти свойства будут применены.

Если выбранный вами пористый материал имеет анизотропную проницаемость — **Unidirectional** (Однонаправленная), **Axisymmetrical** (Осесиммет-

ричная), **Orthotropic** (Ортотропная), — то на вкладке **Direction** (Направление) задается система координат и направление проницаемости для привязки свойств пористого материала к данному телу.

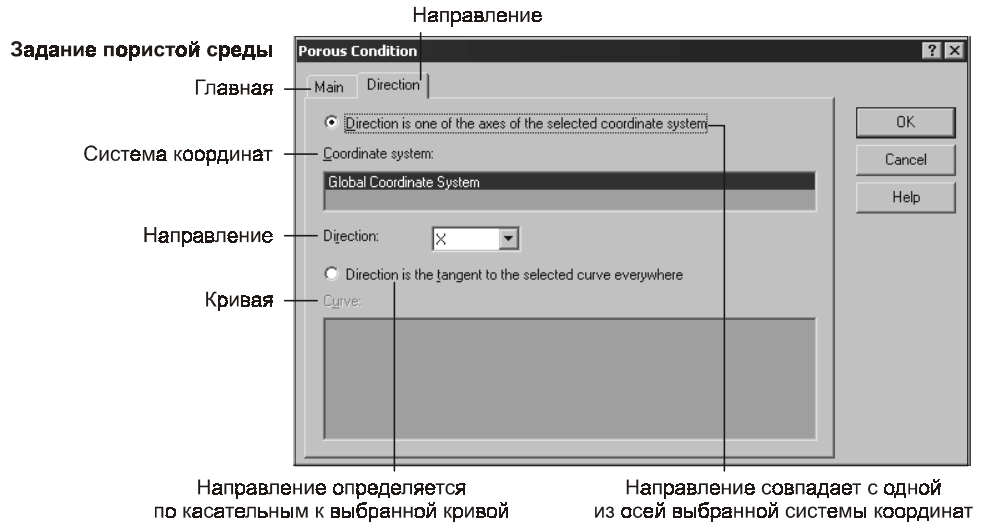


Рис. 5.52. Окно **Porous Condition**

Для анизотропных пористых тел с типом проницаемости **Unidirectional** (Однонаправленная) или **Axisymmetrical** (Осесимметричная) направление проницаемости выбирается одним из двух способов:

- **Direction is one of the axes of the selected coordinate system** (Направление совпадает с одной из осей выбранной системы координат) — направление проницаемости совпадает с осью (**Direction**) выбранной системы координат (**Coordinate system**). По умолчанию используется **Global Coordinate System** (Глобальная система координат проекта). При желании вместо нее можно выбрать любую справочную систему координат, выделив ее в Дереве проектирования (**FeatureManager tree**);
- **Direction is the tangent to the selected curve everywhere** (Направление определяется по касательным к выбранной кривой) — в каждой точке пористого тела направление проницаемости определяется по касательной к кривой (**Curve**). Чтобы выбрать кривую, щелкните ее в Дереве проектирования (**FeatureManager tree**).

Для анизотропных пористых тел с типом проницаемости **Orthotropic** (Ортотропная) проницаемость задается тремя взаимно перпендикулярными направлениями, соответствующими осям выбранной системы координат (**Coordinate system**).

Примечание

В COSMOSFloWorks имеется ограничение на величину сопротивления пористого материала: $k \le 100\ V/x$, где V — скорость течения, x — максимальный размер ячейки расчетной сетки в пористом теле, k — проницаемость, задаваемая как свойство пористой среды в инженерной базе данных. Если k превышает эту величину, то можно получить неверное решение. Для уменьшения k рекомендуется уменьшить x за счет задания более мелкой расчетной сетки в пористом теле, особенно на его границе с областью, заполненной текучей средой.

Задание *Transferred Boundary Conditions* (Перенесенные граничные условия)

Опция **Transferred Boundary Conditions** (Перенесенные граничные условия) позволяет в качестве граничных условий использовать результаты расчета, полученные ранее в данном или каком-либо другом проекте. Единственное ограничение на используемые проекты: как текущий проект, так и проект, результаты которого используются в качестве граничных условий, должны иметь одну и ту же **Global Coordinate System** (Глобальную систему координат).

Для вызова мастера **Transferred Boundary Conditions** (Перенесенные граничные условия) выберите **FloWorks** | **Insert** | **Transferred Boundary Conditions** (FloWorks | Вставить | Перенесенные граничные условия). Далее мастер задания шаг за шагом проведет вас через задание перенесенных граничных условий.

Шаг 1 — *Selecting Boundaries* (Выбор границ)

Здесь указываются границы текущего проекта, на которых будут заданы граничные условия, перенесенные из другого проекта. В качестве них можно выбрать границы расчетной области (**Computational domain boundaries**), т. е. **Xmax**, … **Zmin**, или поверхности модели (например, для задания граничного условия на отверстии выделяется поверхность крышки его закрывающего), выбрав последние в графическом окне.

Примечание

Необходимо, чтобы хотя бы часть расчетной области лежала в текучей среде.

Шаг 2 — *Selecting Results to Transfer* (Выбор переносимых результатов)

Здесь указывается проект, результаты которого будут использоваться в качестве граничных условий:

- **COSMOSFloWorks project** (Проектов COSMOSFloWorks) — позволяет выбрать проект одной из открытых моделей;

- **Results file (*.fld)** (Файл с результатами) — результаты расчета хранятся в папке проекта в файле с расширением fld. Если модель с нужным проектом не открыта, вы можете использовать ее результаты в качестве граничных условий, указав местоположение файла результатов.

Шаг 3 — *Specifying Type of Condition* (Задание типа граничного условия)

На последнем шаге задается тип перенесенного граничного условия, т. е. набор физических параметров, значения которых будут использованы в качестве граничного условия. Из списка **Boundary condition type** (Вид граничного условия) можно выбрать один из следующих типов граничных условий:

- **Ambient** (Внешний поток) — те же параметры, которые задаются в качестве граничного условия невозмущенного потока на границах расчетной области при решении внешних (external) задач. Во время расчета это условие используется точно так же, как условие невозмущенного потока для внешних задач;
- **Impulse** (Импульс) — температура, плотность, концентрации компонентов текучей среды, параметры турбулентности, импульс текучей среды (как и скорость, импульс — векторная величина);
- **Velocity** (Скорость) — скорость, температура, плотность, концентрации компонентов текучей среды, параметры турбулентности;
- **Static Pressure** (Статическое давление) — те же параметры, которые задаются в качестве граничного условия **Pressure openings** (Отверстия с заданным давлением) при указании типа этого граничного условия **Static Pressure** (Статическое давление): статическое давление, температура, концентрации компонентов текучей среды и параметры турбулентности;
- **Total Pressure** (Полное давление) — те же параметры, которые задаются в качестве граничного условия **Pressure openings** (Отверстия с заданным давлением) при указании типа этого граничного условия **Total Pressure** (Полное давление): полное давление, температура, концентрации компонентов текучей среды и параметры турбулентности.

Независимо от того, какой тип граничного условия из перечисленных выбран, если в текущем проекте и в проекте, результаты которого используются в качестве граничных условий, включена опция **Heat Transfer in Solids** (Теплопередача в твердых телах), то там, где перенесенная граница попадает в твердое тело, в качестве граничного условия будет задана температура твердого тела. При этом удельный тепловой поток из одного проекта в другой не переносится, а получается в результате расчета теплопередачи в текущем проекте, при этом никаких ограничений на его значение не накладывается.

При определении границ расчетной области, на которых будут заданы перенесенные граничные условия, следует иметь в виду:

- распределение параметров потока и параметров состояния твердого тела на этих границах, взятое из посчитанного расчета, должно быть монотонным насколько возможно;
- границы расчетной области не должны быть расположены слишком близко к телу;
- граничные условия, перенесенные или заданные на границах расчетной области, должны соответствовать постановке задачи. Например, если в решаемой задаче материнская плата выполнена из теплопроводящего материала, то будет некорректно размещать границу расчетной области внутри материнской платы, т. к. это приведет к неправильному определению теплового потока, отводимого от чипа через материнскую плату.

5.5.6. Постановка целей проекта

Стационарные задачи, т. е. задачи, решение которых не зависит от времени, решаются в COSMOSFloWorks как нестационарные. Для этого проводятся итерации по времени до тех пор, пока не будет получено установившееся, т. е. не меняющееся во времени, решение задачи. Чтобы определить, достигнуто ли установившееся решение или нет, и вовремя остановить расчет, необходимо иметь соответствующий критерий.

В COSMOSFloWorks имеются внутренние критерии для принятия решения о завершении расчета, но пользователю лучше самому задать такие критерии, называемые в COSMOSFloWorks **Goals** (Цели). В качестве целей можно задавать любые физические параметры, представляющие для вас интерес в данном проекте.

Близкое к стационарному поведение целей в процессе расчета будет являться в этом случае критерием завершения расчета, т. е. достижения установившегося с инженерной точки зрения решения задачи. Задание целей, возможно, не только снизит погрешности расчета интересующих вас параметров, но также в большинстве случаев позволит раньше остановить расчет, т. е. сократить время счета. Вы можете наблюдать поведение целей в процессе расчета и остановить расчет досрочно, если решите, что нет необходимости его продолжать.

При анализе сходимости цели вычисляется дисперсия этой цели — разница между ее максимальным и минимальным значениями на отсчитываемом от последней выполненной итерации интервале анализа (analysis interval), которая сравнивается с критериальной (определяющей завершение расчета) дисперсией этой цели, заданной вручную или автоматически. Наряду с критери-

ем сходимости целей есть и другие критерии завершения расчета, например, выполнение заданного числа итераций, единицей измерения количества которых является так называемая travel (продувка), длина которой в итерациях определяется автоматически, так что, в зависимости от установок, расчет может завершиться после выполнения заданного числа продувок, хотя сходимость целей еще не достигнута, или, наоборот, может завершиться сразу по достижении сходимости целей до выполнения заданного числа итераций.

Для каждой из заданных целей можно указать, использовать ли ее в качестве критерия завершения расчета. Если выбрана опция **Use the goal for convergence control** (Использовать цель для завершения расчета), то цель используется в качестве критерия завершения расчета по сходимости целей (**Goal Convergence Criteria**). Если цель не используется как критерий завершения расчета, то ее поведение не влияет на выбор момента завершения расчета, так что расчет может быть завершен до сходимости данной цели. Такие цели используются только для информации (for information only).

Вы можете задать **Goals** (Цели) следующих четырех типов:

- **Global goal** (Глобальная цель) — это физический параметр, рассчитываемый для всей расчетной области. Для задания глобальной цели выберите **FloWorks** | **Insert** | **Global Goal** (FloWorks | Вставить | Глобальная цель);
- **Surface goal** (Поверхностная цель) — это физический параметр, рассчитываемый на заданной пользователем поверхности модели. Для задания поверхностной цели выберите **FloWorks** | **Insert** | **Surface Goal** (FloWorks | Вставить | Поверхностная цель);
- **Volume goal** (Объемная цель) — это физический параметр, определяемый только для сборок (или многотельных деталей) и рассчитываемый по заданному пользователем объему внутри расчетной области либо в текучей среде, либо в твердом теле. Для задания объемной цели выберите **FloWorks** | **Insert** | **Volume Goal** (FloWorks | Вставить | Объемная цель);
- **Equation Goal** (Функциональная цель) — это цель, выраженная функцией, составленной из простейших математических операций над ранее заданными целями, граничными и начальными условиями. Для задания функциональной цели выберите **FloWorks** | **Insert** | **Equation Goal** (FloWorks | Вставить | Функциональная цель).

Для неинтегральных параметров можно задавать минимальное (**Min**), среднее (**Av**), максимальное (**Max**), а также среднерасходное/среднемассовое (для поверхностных/объемных целей, **Bulk Av**) значения.

5.5.7. Регулирование расчетной сетки

Как отмечено в *разд. 5.3.2*, математическая задача, соответствующая поставленной инженерной газогидродинамической и/или тепловой задаче, решается

на некоторой расчетной сетке с пространственными ячейками в форме параллелепипедов, которая в COSMOSFloWorks строится автоматически, но на основании характеризующих ее установок, заданных пользователем или используемых по умолчанию.

Сетка, применяемая в COSMOSFloWorks, является прямоугольной и адаптивной. Сетка состоит из базовых ячеек, некоторые из них могут быть подроблены. Базовые ячейки задаются тремя наборами базовых плоскостей, соответствующим трем осям декартовой системы координат. В общем случае расстояние между плоскостями в этих наборах может быть различным. При дроблении ячейка разбивается на 8 равных ячеек путем деления пополам по осям X, Y и Z. Каждая из этих ячеек также может быть подроблена аналогичным образом и т. д. (рис. 5.53). Число операций дробления, необходимое для того, чтобы получить данную ячейку, называется уровнем ячейки или уровнем дробления ячейки. Базовые ячейки имеют уровень — 0. Максимально возможный уровень — 7.

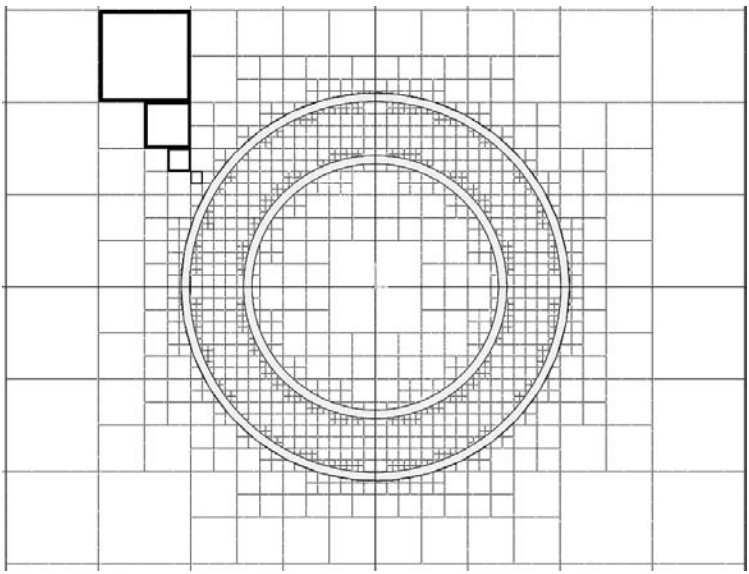


Рис. 5.53. Адаптация сетки путем дробления — захват сеткой коаксиальных цилиндров

Топология сетки описывает положение в пространстве некоей группы тел. Пространство вне тел называется жидкостью. Ячейки делятся на 3 типа: тельные ячейки (solid cells) — ячейки, целиком лежащие внутри этих тел; жидкостные ячейки — целиком лежащие в жидкости (fluid cells) и частичные ячейки (partial cells) — ячейки, часть которых лежит в теле, а часть — в жидкости (рис. 5.54).

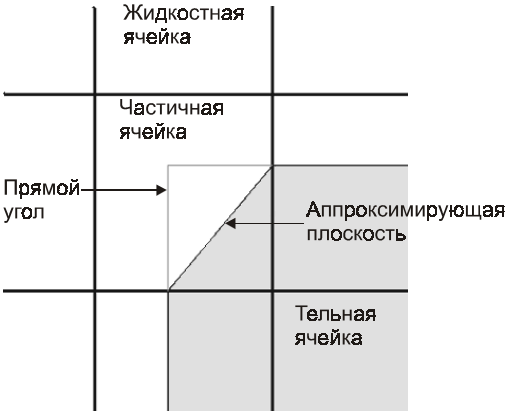


Рис. 5.54. Двумерное сеточное представление прямого угла и типы ячеек

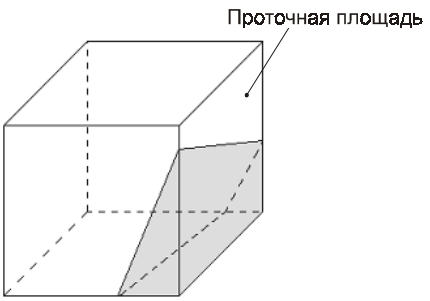


Рис. 5.55. Частичная ячейка

Всю информацию о поверхности раздела несут частичные ячейки. Граница раздела аппроксимируется плоскостью и для каждой частичной ячейки хранится информация о нормали к поверхности раздела в данной ячейке и об открытых для протока жидкости долях граней (проточные площади). Соответственно, в ячейке возможно наличие только одной границы раздела жидкость/тело (рис. 5.55).

Если невозможно провести аппроксимацию границы раздела плоскостью, то ячейка называется ячейкой с неопределенной нормалью или иррегулярной (irregular cell). Так на рис. 5.56 иррегулярные ячейки выделены жирным.

Как уже отмечалось ранее, адаптивность прямоугольной сетки достигается путем дробления ячеек. Дробление ячейки инициируется в том случае, если для этой ячейки не удовлетворен один из следующих критериев:

- критерий захвата малой особенности (**Small solid feature refinement criterion**);
- критерий кривизны поверхности (**Curvature refinement criterion**);
- критерий захвата выступов поверхности (**Tolerance refinement criterion**);
- критерий дробления в каналах (**Narrow channel refinement criterion**);
- критерий дробления по типу ячейки.

Каждому из этих критериев соответствуют максимальные уровни дробления, такие, что дробление происходит до тех пор, пока в получившихся ячейках не будут выполнены все критерии, либо пока размер ячейки не достигнет величины, соответствующей заданному максимальному уровню. Смысл критериев подробно рассмотрен далее в *разд. "Задание начальной расчетной сетки"*.

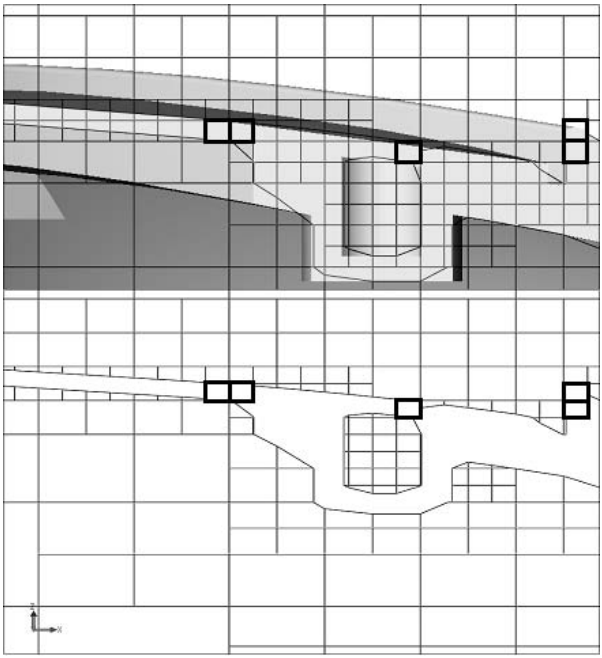


Рис. 5.56. Пример захвата модели сеткой с образованием иррегулярных ячеек

Процесс создания расчетной сетки осуществляется COSMOSFloWorks в общем случае в три этапа.

1. Создание базовой расчетной сетки — непосредственно сразу после задания характеризующих ее параметров.
2. Создание начальной расчетной сетки (на основе базовой расчетной сетки) — сразу после запуска задачи на счет. На этой сетке осуществляется решение задачи до того, как будет (если, конечно, будет) осуществлен 3-й этап построения расчетной сетки.
3. Модификация расчетной сетки в процессе решения задачи для лучшего разрешения областей расчетной области с сильным изменением решения (т. е. с высокими градиентами параметров) — если пользователем заданы соответствующие установки (при определенных установках этот этап отсутствует).

Количество доступных пользователю (т. е. задаваемых им или используемых по умолчанию) характеристик расчетных сеток, построенных на этих трех этапах построения расчетной сетки зависит от того, какую опцию выбрал пользователь:

- если выбрана опция **Automatic Initial Mesh** (Автоматическая начальная сетка), то количество этих характеристик минимально;

- если опция **Automatic Initial Mesh** (Автоматическая начальная сетка) отключена, то все доступные пользователю характеристики начальной расчетной сетки задаются им в диалоговых окнах **Initial Mesh** (Начальная сетка) и, при необходимости, **Local Initial Mesh** (Локальная начальная сетка).

Рассмотрим эти характеристики расчетной сетки более подробно.

Автоматическая расчетная сетка

Если в меню **FloWorks** | **Project** (FloWorks | Проект) выбрана (т. е. отмечена галочкой) опция **Automatic Initial Mesh** (Автоматическая начальная сетка), то, выбрав **FloWorks** | **Initial Mesh** (FloWorks | Начальная сетка), попадаем в окно **Automatic Initial Mesh** (Автоматическая начальная сетка), которое дает пользователю доступ к следующим четырем характеристикам расчетной сетки:

- бегунок **Level of initial mesh** (Уровень начальной сетки) имеет 8 позиций, определяющих размер ячеек базовой расчетной сетки, и автоматически задаваемые характеристики начальной расчетной сетки (см. далее): чем выше номер позиции, тем более густой будет начальная расчетная сетка, т. е. с более мелкими ячейками, позволяющими лучше разрешить особенности геометрии модели (поверхности стенок), а также картину течения в проточных областях модели;
- опция **Minimum gap size** (Минимальный зазор) становится доступной пользователю, если он отметит **Manual specification of the minimum gap size** (Минимальный зазор задается пользователем). В результате пользователь может либо изменить значение этого параметра (которое уже определено COSMOSFloWorks автоматически на основании заданных пользователем при создании проекта граничных условий и тепловых источников) вручную в окошке **Minimum gap size** (Минимальный зазор), либо приравнять его к некоторому выбранному размеру модели, отметив **Minimum gap size refers to the feature dimension** (Связать минимальный зазор с выбранным размером модели) и выбрав нужный размер средствами SolidWorks. Уменьшение значения этого параметра приводит к уменьшению размера ячеек расчетной сетки, что достигается, в первую очередь, путем уменьшения размера ячеек базовой сетки так, чтобы на длину, определенную значением этого параметра, приходилось в текучей среде между двумя стенками не менее определенного количества ячеек начальной сетки, зависящего от позиции бегунка **Level of initial mesh** (Уровень начальной сетки);
- опция **Minimum wall thickness** (Минимальная толщина стенки) становится доступной пользователю, если он отметит **Manual specification of the minimum wall thickness** (Минимальная толщина стенки задается пользо-

вателем). В результате пользователь может либо изменить значение этого параметра вручную в окошке **Minimum wall thickness** (Минимальная толщина стенки), либо приравнять его к некоторому выбранному размеру модели, отметив **Minimum wall thickness refers to the feature dimension** (Связать минимальную толщину стенки с выбранным размером модели) и выбрав нужный размер средствами SolidWorks. Уменьшение значения этого параметра приводит к уменьшению размера ячеек расчетной сетки, что достигается, в первую очередь, путем уменьшения размера ячеек базовой сетки так, чтобы на длину, определенную значением этого параметра, приходилось в стенке твердого тела не менее определенного количества ячеек начальной сетки, зависящего от позиции бегунка **Level of initial mesh** (Уровень начальной сетки), причем, как видно из этого описания, не имеет смысла задавать величину **Minimum wall thickness** (Минимальная толщина стенки) больше величины **Minimum gap size** (Минимальный зазор);

- опция **Advanced narrow channel refinement** (Дробление сетки в узких каналах), если отмечена, позволяет "раздвинуть" ограничения на уровень дробления ячеек для обеспечения соответствующего уровню **Level of initial mesh** (Уровень начальной сетки) количества ячеек в текучей среде между стенками канала.

Аналогичные характеристики расчетной сетки доступны пользователю при создании базовой части проекта с помощью **Wizard** (Мастер проектов): в его окне **Result Resolution and Geometry Resolution** (Уровень решения и разрешение геометрии модели) пользователь с помощью бегунка задает значение параметра **Result Resolution** (Уровень решения), определяющего базовую и начальную расчетную сетки аналогично параметру **Level of initial mesh** (Уровень начальной сетки), а остальные три параметра полностью идентичны описанным ранее. В отличие от **Level of initial mesh**, **Result Resolution** определяет также критерии завершения расчета и модификацию расчетной сетки в процессе расчета с целью ее адаптации к решению задачи.

Совет

Отношение максимального размера модели к минимальному значению из двух величин **Minimum gap size** и **Minimum wall thickness** во многом определяет стратегию поведения при построении сетки. Если это отношение меньше 100, то использование автоматических настроек сетки (задаются в окне **Automatic Initial Mesh**), скорее всего, оптимально. Если больше 300, но меньше 1000, то использование ручных настроек (задаются в окне **Initial Mesh**) может существенно уменьшить число ячеек и потому крайне желательно. Если больше 1000, то использование ручных настроек абсолютно необходимо.

Задание начальной расчетной сетки

Если в меню **FloWorks** | **Project** (FloWorks | Проект) снять отметку (галочку) с опции **Automatic Initial Mesh** (Автоматическая начальная сетка), то, щелк-

нув **FloWorks | Initial Mesh** (FloWorks | Начальная сетка), можно открыть диалоговое окно **Initial Mesh** (Начальная сетка), на четырех вкладках которого пользователь получает доступ ко всему набору характеристик расчетной сетки.

- На вкладке **Basic Mesh** (Базовая сетка) задаются параметры базовой сетки, которая образована пересечением трех семейств плоскостей, перпендикулярных, соответственно, трем осям X, Y, Z декартовой Глобальной системы координат (**Global coordinate system**), в которой осуществляется расчет:
  - число ячеек вдоль осей X, Y, Z этой Глобальной системы координат;
  - сдвиг, сгущение или разрежение базовой сетки с помощью:
    - управляющих плоскостей (**Control planes**), заданных пользователем в одноименной таблице в дополнение к двум всегда присутствующим в этой таблице управляющим плоскостям, которые являются границами расчетной области;
    - коэффициентов сгущения или разрежения базовой сетки, заданных пользователем в столбце **Relative mesh step** (Относительный шаг сетки) той же таблицы для имеющихся управляющих плоскостей (рис. 5.57).

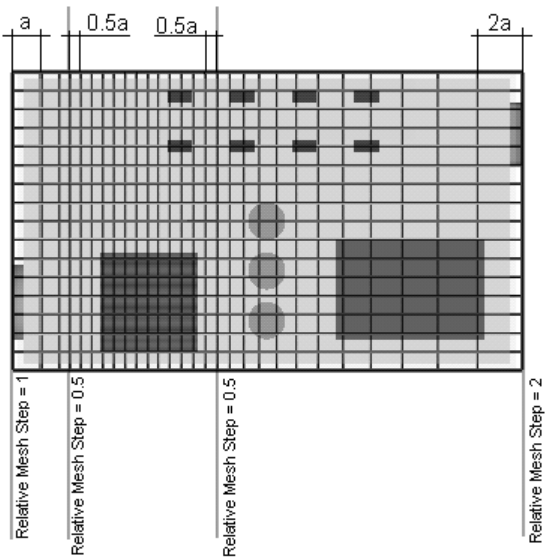


Рис. 5.57. Сгущение сетки с помощью управляющих плоскостей

По умолчанию при решении внутренних задач базовая сетка всегда равномерная, с почти кубическими ячейками (для внешних задач предусмот-

рено сгущение к обтекаемой модели последовательности образующих эту сетку плоскостей и, соответственно, разрежение к границам расчетной области).

Если отметить опцию **Draw basic mesh** (Показать базовую сетку), то базовая сетка тут же будет показана на модели.

- На вкладке **Solid/Fluid Interface** (Поверхность раздела твердых тел с текучей средой) задаются значения параметров, определяющих разрешение геометрических особенностей поверхности модели, омываемой текучей средой:
  - с помощью бегунка **Small solid feature refinement level** (Уровень разрешения сеткой мелких особенностей модели), принимающего дискретные положения 0…7, задается допустимый максимальный уровень дробления ячейки базовой сетки для удовлетворения критерия разрешения начальной расчетной сеткой мелких особенностей модели, который заключается в том, что максимальный угол между нормалями к поверхности модели в расчетной ячейке не должен превышать 120° (рис. 5.58): положение бегунка **N**, где **N** = 0…7, означает, что допустимый минимальный размер ячейки начальной сетки при попытках удовлетворить этот критерий в 2^N раз меньше размера ячейки базовой сетки по каждой из осей Глобальной системы координат (**Global Coordinate system**) (рис. 5.59);

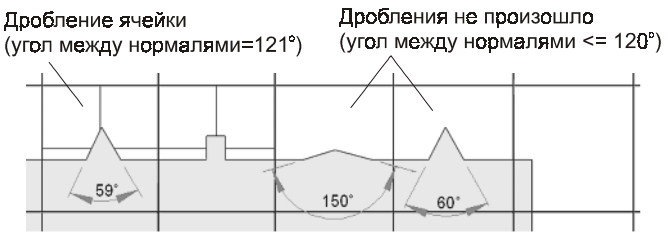


Рис. 5.58. Дробление по критерию 120°

  - с помощью бегунка **Curvature refinement level** (Уровень разрешения сеткой кривизны поверхности), принимающего дискретные положения 0…7, задается допустимый максимальный уровень дробления ячейки базовой сетки для удовлетворения критерия разрешения начальной расчетной сеткой кривизны поверхности модели (см. далее): положение бегунка **N**, где **N** = 0…7, означает, что допустимый минимальный размер ячейки начальной сетки при попытках удовлетворить этот критерий в 2^N раз меньше размера ячейки базовой сетки по каждой из осей Глобальной системы координат (рис. 5.60);

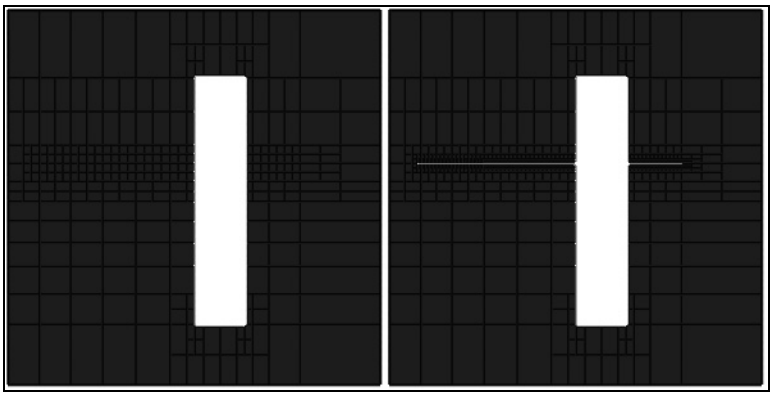


Рис. 5.59. Влияние уровня разрешения сеткой мелких особенностей модели на разрешение расчетной сеткой горизонтального тонкого цилиндра.
Слева: уровень разрешения = 1 — построенная расчетная сетка не разрешила этот цилиндр;
справа: уровень разрешения = 4 — построенная расчетная сетка разрешила этот цилиндр

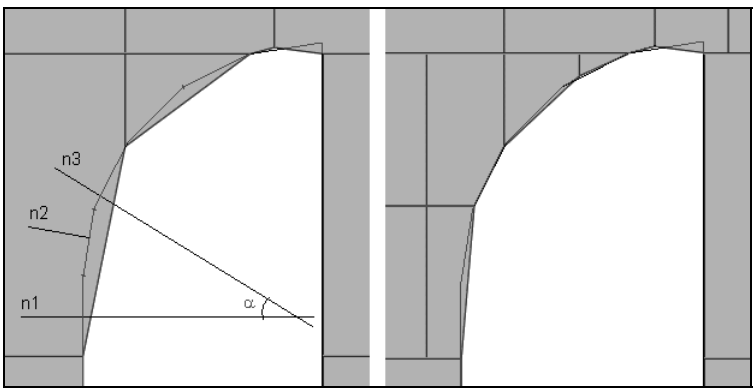


Рис. 5.60. Влияние уровня разрешения расчетной сеткой кривизны поверхности модели на размер частичных ячеек расчетной сетки.
Слева: уровень разрешения = 0 — частичные ячейки не дробятся;
справа: уровень разрешения = 1 — частичные ячейки дробятся 1 раз

- **Curvature refinement criterion** (Критерий разрешения сеткой кривизны поверхности) — задает допустимый максимальный угол α (в радианах) между нормалями к поверхности модели в расчетной ячейке, который используется в качестве критерия разрешения начальной расчетной сеткой кривизны поверхности модели: очевидно, что чем меньше этот угол, тем лучше разрешение кривизны поверхности (см. рис. 5.60). Кроме того, при $\alpha = 120°$ этот критерий совпадает с критерием разрешения сеткой мелких особенностей модели, а при $\alpha < 120°$ имеет перед последним приоритет;

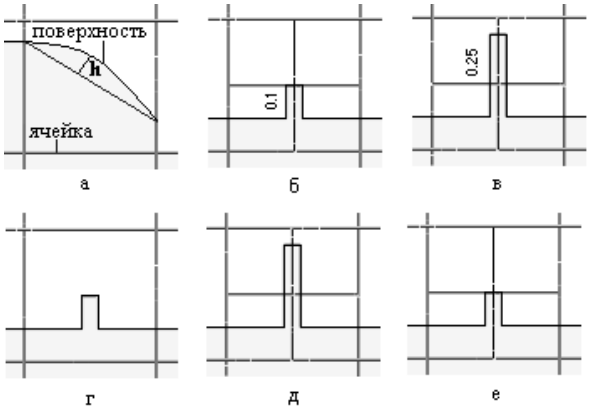


Рис. 5.61. Влияние уровня разрешения расчетной сеткой выступов поверхности модели на разрешение расчетной сеткой выступов поверхности модели.
а) определение ***h***; *б-в*) дробление ячеек при работе опции **Small solid features refinement**; *г-е*) дробление ячеек при работе опции **Tolerance refinement**; *г-д*) критерий разрешения сеткой выступов поверхности модели = 0,1; *е*) этот критерий = 0,08

- с помощью бегунка **Tolerance refinement level** (Уровень разрешения сеткой выступов поверхности), принимающего дискретные положения 0…7, задается допустимый максимальный уровень дробления ячейки базовой сетки для удовлетворения критерия разрешения начальной расчетной сеткой выступов поверхности модели: положение бегунка **N**, где **N** = 0…7, означает, что допустимый минимальный размер ячейки начальной сетки при попытках удовлетворить этот критерий в 2^N раз меньше размера ячейки базовой сетки по каждой из осей Глобальной системы координат (рис. 5.61);
- **Tolerance refinement criterion** (Критерий разрешения сеткой выступов поверхности) — задает допустимую максимальную выпуклость (т. е. допустимое максимальное расстояние) ***h*** поверхности модели в ячейке относительно плоского многоугольника, аппроксимирующего эту поверхность в ячейке (см. рис. 5.61).

❒ На вкладке **Refining Cells** (Дробление ячеек) с помощью бегунков, принимающих дискретные положения 0…7, задается дробление всех ячеек выбранного типа в заданное число раз относительно ячейки базовой сетки: положение бегунка **N**, где **N** = 0…7, означает, что размер ячейки начальной сетки будет в 2^N раз меньше размера ячейки базовой сетки по каждой из осей Глобальной системы координат:

- если отмечено **Refine all cells** (Дробить все ячейки), то с помощью бегунка **Level of refining all cells** (Уровень дробления всех ячеек) устанавливается уровень дробления всех ячеек расчетной сетки;

- если отмечено **Refine fluid cells** (Дробить все ячейки в текучей среде), то с помощью бегунка **Level of refining fluid cells** (Уровень дробления всех ячеек в текучей среде) устанавливается уровень дробления всех ячеек расчетной сетки в текучей среде;
- если отмечено **Refine solid cells** (Дробить все ячейки в твердом теле), то с помощью бегунка **Level of refining solid cells** (Уровень дробления всех ячеек в твердом теле) устанавливается уровень дробления всех ячеек расчетной сетки в твердом теле;
- если отмечено **Refine partial cells** (Дробить все частичные ячейки), то с помощью бегунка **Level of refining partial cells** (Уровень дробления всех частичных ячеек) устанавливается уровень дробления всех частичных ячеек расчетной сетки (частичные ячейки — ячейки, находящиеся частично в теле, частично в текучей среде), причем ячейки этого типа будут дробиться до максимального уровня дробления среди максимальных уровней дробления, заданных различными характеристиками начальной расчетной сетки.

❒ На вкладке **Narrow channels** (Узкие каналы), если отмечена опция **Enable narrow channels refinement** (Включить опцию дробления сетки в узких каналах), задаются значения параметров, определяющих дробление ячеек начальной расчетной сетки для получения более точного решения задачи в проточных частях модели:

- в окне **Characteristic number of cells across a narrow channel** (Критическое число ячеек поперек узкого канала) задается минимальное число ячеек начальной расчетной сетки в текучей среде по нормали к поверхности модели до противоположной поверхности модели: если этих ячеек меньше, то они дробятся;
- с помощью бегунка **Narrow channel refinement level** (Уровень дробления сетки в узких каналах), принимающего дискретные положения 0…7, задается допустимый максимальный уровень дробления ячейки базовой сетки для удовлетворения критерия **Characteristic number of cells across a narrow channel** (Критическое число ячеек поперек узкого канала): положение бегунка **N**, где **N** = 0…7, означает, что допустимый минимальный размер ячейки начальной сетки при попытках удовлетворить этот критерий в 2^N раз меньше размера ячейки базовой сетки по каждой из осей Глобальной системы координат;
- если опция **Enable the minimum height of narrow channels** (Задать минимальную высоту узкого канала) и/или опция **Enable the maximum height of narrow channels** (Задать максимальную высоту узкого канала) отмечены и заданы значения этих величин, то вышеописанная про-

цедура дробления ячеек начальной расчетной сетки в узких каналах будет работать не во всей расчетной области, а только там, где расстояние в текучей среде по нормали к поверхности модели до противоположной поверхности модели будет лежать в указанном с помощью этих величин диапазоне.

Критерий дробления в тонких каналах среди прочих критериев стоит особняком. Дело в том, что если остальные критерии базируются на свойствах поверхности в данной ячейке (не считая критерий дробления по типу ячейки), то критерий дробления в тонких каналах базируется на количестве ячеек между поверхностями. Общая идея алгоритма состоит в трассировке лучей. С аппроксимирующей плоскости в ячейке выпускается нормаль и определяется, через сколько ячеек она прошла, прежде чем достигла другой поверхности. Вычисляемым параметром является эффективное число ячеек на луче. Это число сравнивается с заданным числом ячеек на канал. Если число ячеек на луче меньше заданного, то происходит дробление сетки. Следует обратить внимание, что при дроблении (в силу дискретности) число ячеек может оказаться больше заданного. В этом случае часть ячеек в середине канала объединяются. Действительно, исходя из специфики течений жидкости, вблизи стенки канала необходимо иметь более густую сетку. Кроме того, обеспечивается максимально возможная симметрия сетки (рис. 5.62).

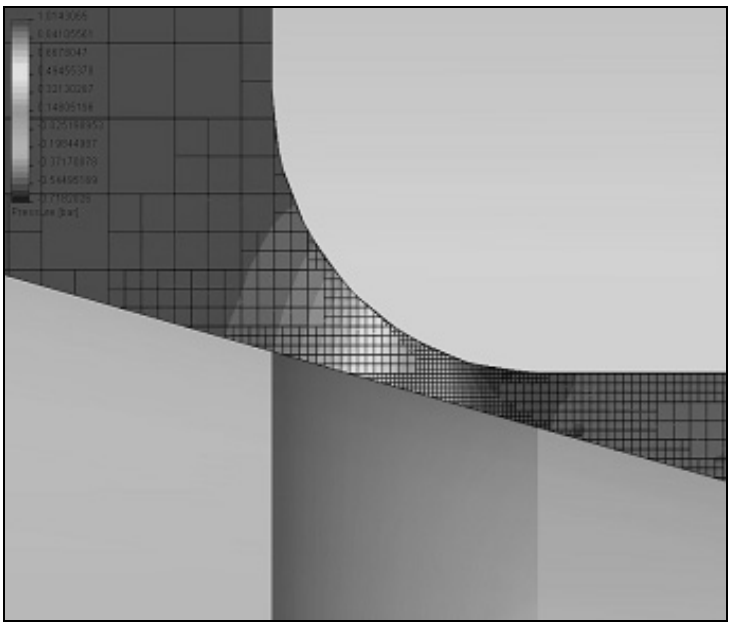


Рис. 5.62. Пример адаптации сетки в тонком канале: обеспечивается постоянное число ячеек на канал при его переменной толщине

При нажатии на кнопку **Reset** (Восстановить) в окне **Initial Mesh** (Начальная сетка) появляется окно **Automatic Initial Mesh** (Автоматическая начальная сетка), изменения в котором автоматических критериев сетки приведут к соответствующим изменениям характеристик базовой и начальной сетки в окне **Initial Mesh**.

Задание начальной расчетной сетки в локальных областях

Если в некоторых подобластях расчетной области необходимо задать характеристики начальной расчетной сетки, отличающиеся от заданных в диалоговом окне **Initial Mesh** (Начальная сетка), можно воспользоваться диалоговым окном **Local Initial Mesh** (Локальная начальная сетка), вызываемом при выборе **FloWorks** | **Insert** | **Local Initial Mesh** (FloWorks | Вставка | Локальная начальная сетка).

Подобластями, в которых могут задаваться характеристики начальной расчетной сетки, могут быть детали (компонент сборки или тело многотельной детали), поверхности, кромки или углы деталей. Если интересующая область является областью в жидкости, то эту область нужно задать как деталь и указать COSMOSFloWorks рассматривать ее как объем, занятый жидкостью, отключив это тело в окне **Component Control** (Управление компонентами). В окне **Local Initial Mesh** (Локальная начальная сетка) задаются значения тех же параметров начальной расчетной сетки, что задаются на вкладках диалогового окна **Initial Mesh** (Начальная сетка), за исключением параметров базовой сетки (они здесь изменяться не могут). В результате в этих подобластях будут действовать только заданные в этом диалоговом окне характеристики построения начальной расчетной сетки.

Если изложение принципов действия критериев адаптации сетки к геометрии модели показалось вам недостаточным для принятия решения о задании тех или иных настроек сетки на практике, можете воспользоваться табл. 5.10.

Таблица 5.10. *Использование настроек дробления ячеек начальной сетки*

Тип дробления	Применяется к объектам	Результат
Small solid features refinement	Поверхности раздела жидкость/тело, жидкость/пористая среда, пористая среда/тело	Выделяет мелкие особенности геометрии
Curvature refinement	Поверхности раздела жидкость/тело, жидкость/пористая среда, пористая среда/тело, тело/тело (разные материалы)	Выделяет поверхности с кривизной, больше заданной

Таблица 5.10 *(окончание)*

Тип дробления	Применяется к объектам	Результат
Tolerance refinement	Поверхности раздела жидкость/тело	Обеспечивает заданное отклонение сеточного представления геометрии от реальной геометрии
Narrow channel refinement	Внутренние объемы и проточные каналы, заполненные жидкостью	Обеспечивает заданное число ячеек поперек канала
Refining cells	Объемы, жидкости или тела, поверхности раздела сред, расчетная область	Обеспечивает заданную густоту сетки в области тела, жидкости или на поверхности раздела двух сред

5.5.8. Управление процессом расчета

Помимо задания в проекте COSMOSFloWorks исходных данных для расчета, т. е. типа задачи, учитываемых физических особенностей, материалов и веществ, начальных и граничных условий, характеристик начальной расчетной сетки, до начала расчета пользователь также задает (или оставляет заданными по умолчанию) установки, касающиеся действий COSMOSFloWorks во время решения задачи (при необходимости, их можно также изменить во время расчета):

- критерии завершения расчета;
- изменение (дробление) расчетной сетки в областях с рассчитанными высокими градиентами параметров;
- сохранение промежуточных результатов расчета;
- дополнительные опции, влияющие на время и точность решения задачи ("замораживание" параметров течения; изменение заданного по умолчанию шага по времени для нестационарных задач; изменение заданного по умолчанию числа лучей, выпускаемых с поверхности при расчете радиационного теплообмена).

Рассмотрим все эти установки подробнее.

Опции управления расчетом

Критерии завершения задачи и другие установки, касающиеся действий COSMOSFloWorks во время решения задачи, показаны и доступны для изменения в окне **Calculation Control Options** (Опции управления расчетом), которое вызывается при выборе **FloWorks | Calculation Control Options**

(FloWorks | Опции управления расчетом), или во время расчета из меню **Calculation** (Расчет) диалогового окна **Solver** (Решатель) (рис. 5.63).

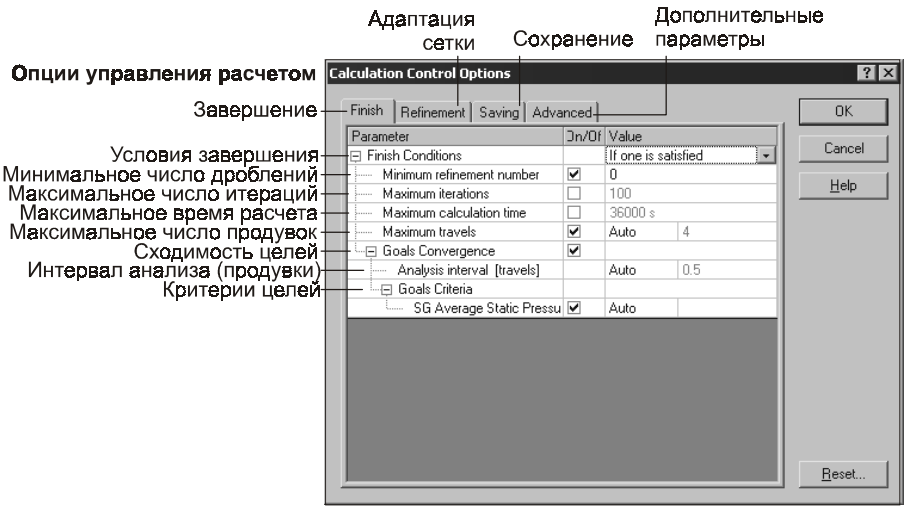


Рис. 5.63. Окно **Calculation Control Options**

Критерии завершения расчета

Если задача нестационарная и имеет нестационарное и непериодическое решение, то расчет обычно проводится до заданного момента физического времени задачи. Если, начиная с некоторого момента времени, решение нестационарной задачи устанавливается, т. е. становится стационарным или периодическим, и именно это решение интересует пользователя, то расчет проводится до достижения этого момента времени, точнее, до определения этого стационарного или периодического решения на основании выполнения некоторого критерия, что позволяет утверждать, что такое решение достигнуто. Поскольку задача решается численно, то осуществляется дискретизация решения задачи не только по пространству, но и по времени, т. е. задача решается сначала на некотором временном слое, затем выполняется очередной шаг по времени, который, естественно, одинаков для всей расчетной области. Эти шаги по времени в COSMOSFloWorks называются итерациями (iterations); номер текущей итерации выводится в окно наблюдения за расчетом (**Solver**), после каждой итерации в таблицу и на график целей (**Goals**) выдаются текущие значения целей проекта, а также обновляются визуализируемые картины полей физических параметров.

Если задача стационарная, то, в соответствии с подходом COSMOSFloWorks, она решается как нестационарная, но для ускорения установления решения

шаги в физическом времени задачи осуществляются не с одинаковым для всей расчетной области шагом, а с локальными, т. е. разными для различных областей расчетной области, шагами по времени, так что физическое время задачи в разных областях расчетной области после выполнения очередного шага по времени разное. Каждый такой шаг по времени в COSMOSFloWorks также называется итерацией (iteration), после каждой такой итерации пользователю выдаются полученные в результате ее выполнения значения физических параметров в той же форме, что и при решении нестационарных задач. Как и при поиске стационарного или периодического решения нестационарной задачи, возникает проблема идентификации достижения искомого решения задачи, которая решается также на основании анализа выполнения некоторого критерия, — как только он выполняется — можно утверждать, что такое решение достигнуто, и, следовательно, завершить расчет после очередной итерации по времени.

На вкладке **Finish** (Завершение) пользователю предлагается (на его выбор) воспользоваться следующими критериями завершения расчета.

- **Finish Conditions** (Условия завершения) — в этом поле необходимо указать, достаточно ли для завершения расчета выполнение хотя бы одного из следующих используемых критериев (для этого надо выбрать **If one is satisfied**), или для завершения расчета должны быть выполнены все используемые критерии (для этого надо выбрать **If all are satisfied**):
  - **Minimum refinement number** (Минимальное число дроблений) — минимальное число уточнений расчетной сетки в процессе решения задачи. Расчет будет продолжаться, как минимум, до тех пор, пока не будет выполнено заданное число дроблений;
  - **Maximum iterations** (Максимальное число итераций) — число итераций, которое должно быть выполнено;
  - **Maximum physical time** (Максимальное время задачи) — если решается нестационарная задача, то указать длительность расчета по физическому времени задачи;
  - **Maximum calculation time** (Максимальное время расчета) — процессорная длительность расчета;
  - **Maximum travels** (Максимальное число продувок) — число итераций, измеряемое в продувках (**travels**), которое должно быть выполнено. Термин travel (продувка) означает выполнение определенного количества итераций при решении задачи. Это количество итераций определяется для каждой задачи индивидуально: для стационарной задачи в зависимости от расчетной сетки, для нестационарной задачи — в зависимости от свойств текучей среды и течения, а именно, как такое

количество итераций, за которое возмущение течения пересечет расчетную область;

- **Goals Convergence** (Сходимость целей) — в этом поле можно указать, анализируется ли поведение заданных в проекте целей для принятия решения о завершении расчета (если да, то флажок должен быть отмечен). Если поведение целей анализируется, то:
  - в строке **Analysis interval** (**travels**) (Интервал анализа (продувки)) можно задать длину (в продувках, т. е. **travels**) интервала анализа целей, отличающуюся от заданной по умолчанию;
  - в группе **Goals Criteria** (Критерии целей) можно задать дисперсии целей, отличающиеся от используемых по умолчанию, по достижении которых на заданном интервале анализа будет считаться, что по данной цели достигнута сходимость решения задачи, так что расчет можно завершить.

Адаптация расчетной сетки к решению задачи

Под адаптацией сетки к решению задачи понимается изменение расчетной сетки в процессе расчета для учета особенностей получаемого решения. Для этого ячейки сетки дробятся в тех высокоградиентных областях течения, которые не были достаточно хорошо разрешены расчетной сеткой до начала расчета или во время предыдущих адаптаций расчетной сетки к решению задачи, и сливаются в более крупные в низкоградиентных областях течения.

На вкладке **Refinement** (Адаптация сетки) пользователь может изменить используемые по умолчанию установки изменения расчетной сетки во время решения задачи (т. е. адаптации расчетной сетки к решению задачи).

- **Refinement** (Адаптация сетки) — указывает на необходимость изменения расчетной сетки во время решения задачи. Для этого вместо **disabled** (отключено) выбрать допустимый уровень дополнительного дробления ячеек расчетной сетки во время решения задачи: **level** = **N**, где **N**=1…7 означает, что допустимый минимальный размер ячеек расчетной сетки после дробления в 2^N раз меньше размера ячейки начальной расчетной сетки по каждой из осей Глобальной системы координат (**Global Coordinate System**);
- **Refinement criterion** (Критерий дробления сетки) — если обозначить его как ε_{cpi}, то ячейка расчетной сетки при ее адаптации к решению задачи будет дробиться (т. е. будет разделена пополам по каждому координатному направлению, так что образуется 8 ячеек вдвое меньшего размера) в том случае, когда за время, прошедшее после последней адаптации сетки к решению задачи, хотя бы раз выполнилось условие $\alpha \cdot K_{cpi} \geq \varepsilon_{cpi}$, где α — коэффициент, определяемый тем, в какой среде лежат соседние

ячейки ($\alpha = 1$, если ячейка лежит в твердом теле, или лежит в текучей среде, но все ее соседние ячейки лежат либо только в текучей среде, либо только в твердом теле), K_{cpi} — характеристика решения в данной ячейке, определяемая следующим образом:

- в жидкости:

$$K_{spl} = \sum_{i=1}^{N_{nb}} \max\left(\frac{\left|\vec{V}_o - \vec{V}_i\right|}{\max\left(\left|\vec{V}_o\right|, \left|\vec{V}_i\right|\right)}, 4 \cdot \frac{\left|T_o - T_i\right|}{\Delta T_{global}} \right),$$

- в газе в стационарной задаче:

$$K_{spl} = \sum_{i=1}^{N_{nb}} \max\left(\frac{\left|\vec{V}_o - \vec{V}_i\right|}{\max\left(\left|\vec{V}_o\right|, \left|\vec{V}_i\right|\right)}, 0,5 \cdot \left(\frac{\left|P_o - P_i\right|}{\max(P_o, P_i)} + \frac{\left|\rho_o - \rho_i\right|}{\max(\rho_o, \rho_i)} \right) \right),$$

- в газе в нестационарной задаче:

$$K_{spl} =$$

$$= \sum_{i=1}^{N_{nb}} \max\left(\frac{\left|\rho_o \vec{V}_o - \rho_i \vec{V}_i\right|}{\max\left(\left|\rho_{o\,sound} \vec{V}_{o\,sound}\right|, \left|\rho_{i\,sound} \vec{V}_{i\,sound}\right|\right)}, 0,5 \cdot \left(\frac{\left|P_o - P_i\right|}{\max(P_o, P_i)} + \frac{\left|\rho_o - \rho_i\right|}{\max(\rho_o, \rho_i)} \right) \right),$$

- в твердом теле:

$$K_{spl} = \frac{20}{\Delta T_{global}} \left| \sum_{j=1}^{3} \left(\frac{T_{j(+)} - T_o}{x_{j(+)} - x_{j\,o}} - \frac{T_o - T_{j(-)}}{x_{j\,o} - x_{j(-)}} \right) \cdot \left(\frac{x_{j(+)} - x_{j(-)}}{2} \right) \right|,$$

где $\vec{V}$ — вектор скорости, P — давление, ρ — плотность текучей среды, T — температура, x — координата, N_{nb} — число соседних ячеек (от 6 до 24), нижний индекс o обозначает параметры рассматриваемой ячейки, нижний индекс i обозначает параметры i-й соседней ячейки, имеющей общую грань с рассматриваемой ячейкой, нижний индекс *sound* обозначает параметры при скорости звука, ΔT_{global} обозначает разницу температур в расчетной области, нижний индекс j обозначает номер оси системы координат, нижний индекс $j(+)$ обозначает параметры в соседних ячейках в направлении оси j системы координат, нижний индекс $j(-)$ обозначает параметры в соседних ячейках в направлении, противоположном направлению оси j системы координат. Значения всех параметров берутся в центрах ячеек.

❒ **Unrefinement criterion** (Критерий слияния ячеек сетки) — если обозначить его как ε_{mer}, то 8 дочерних (т. е. образовавшихся ранее при дроблении

ячейки сетки) ячеек родительской (т. е. дроблением которой они получены) ячейки расчетной сетки при адаптации расчетной сетки к решению задачи будут слиты обратно в эту родительскую ячейку в том случае, когда на каждой итерации после последней адаптации расчетной сетки к решению задачи, или, если данная адаптация первая в расчете, то после определяемого внутри COSMOSFloWorks стартового момента для начала выполнения таких сравнений, выполнялось условие $K_{mer} \le \varepsilon_{mer}$, где K_{mer} — характеристика решения в рассматриваемых 8 дочерних ячейках, определяемая точно так же, как K_{cpl} в **Refinement criterion** (Критерий дробления сетки), за исключением того, что суммирование при определении K_{mer} выполняется по всем 36 парам этих 8 дочерних ячеек;

- **Adaptive Refinement in Fluid** (Адаптация сетки в жидкости) — если выбрана эта опция, сетка будет изменена в областях с текучей средой. При этом по умолчанию характеристика решения в ячейке K_{spl} рассчитывается по локальной, т. е. в данной ячейке относительно соседних ячеек, вариации параметра. Это может вызвать ненужные дробления ячеек в не очень важных для решения задачи местах расчетной области, т. е. там, где в этом нет необходимости. Чтобы этого избежать, рекомендуется использовать опцию **Use global parameter variation** (Использовать глобальную вариацию параметра), указывающую, что при адаптации сетки к решению задачи будут использованы не локальные, а глобальная вариация параметра. В результате изменения скорости, давления, плотности между итерациями будут отнесены к максимальной разности значений данных параметров во всей расчетной области:

$$\frac{\left|\vec{V}_o - \vec{V}_i\right|}{V_{\max} - V_{\min}}, \frac{\left|P_o - P_i\right|}{P_{\max} - P_{\min}}, \frac{\left|\rho_o - \rho_i\right|}{\rho_{\max} - \rho_{\min}},$$

  где индексы max и min означают максимальные и минимальные во всей расчетной области значения;

- **Adaptive Refinement in Solid** (Адаптация сетки в твердом теле) — если выбрана эта опция, сетка будет изменена в твердых телах;

- **Approximate Maximum Cells** (Максимально допустимое число ячеек расчетной сетки) — определяет максимально возможное число ячеек. В результате адаптации расчетной сетки к решению задачи число ячеек этой сетки может оказаться столь большим, что продолжение расчета будет невозможно из-за переполнения оперативной памяти компьютера. Эта опция позволяет ограничить число ячеек расчетной сетки, создаваемых при адаптации расчетной сетки к решению задачи. Возможно, что заданное максимально допустимое число ячеек будет несколько превышено из-за особенностей построения сетки. Ячейки с более высокими значениями K_{spl} дробятся первыми, что обеспечивает оптимальную сетку в случае дости-

жения (или некоторого превышения) заданного максимально допустимого числа ячеек;

- **Refinement Strategy** (Стратегия адаптации сетки к решению задачи) — определяет моменты времени проведения адаптации расчетной сетки к решению задачи. Можно либо оставить используемую по умолчанию Периодическую адаптацию сетки к решению задачи (**Periodic refinement**), либо вместо нее выбрать Табличную адаптацию сетки к решению задачи (**Tabular refinement**) или Адаптацию сетки к решению задачи только вручную (**Manual only**):
  - **Units** (Единицы) — единицы измерения (итерации (iterations) или продувки (travels)), с помощью которых задаются моменты проведения адаптаций сетки к решению задачи;
  - **Relaxation interval** (Интервал релаксации) — задается в выбранных в **Units** (Единицы) единицах измерения и отсчитывается от момента последней адаптации сетки к решению задачи; до его истечения расчет не может быть завершен;
  - если выбрана опция **Periodic refinement** (Периодическая адаптация сетки к решению задачи), то задается момент выполнения первой адаптации — **Start** (Стартовый момент), а также периодичность проведения адаптаций — **Period** (Периодичность);
  - если выбрана опция **Tabular refinement** (Табличная адаптация сетки к решению задачи), то, дважды щелкнув в ячейке **Refinement table** (Таблица адаптаций сетки), можно открыть окно для задания (в выбранных в **Units** (Единицы) единицах измерения) каждого момента выполнения адаптации сетки к решению задачи;
  - если выбрана опция **Manual only** (Адаптацию сетки к решению задачи только вручную), то расчетная сетка будет адаптироваться к решению задачи только при выборе **Calculation** | **Refine** (Расчет | Адаптировать сетку) в окне **Solver** (Решатель); таким же способом можно инициировать адаптацию сетки к решению задачи при использовании опций **Periodic refinement** (Периодическая адаптация сетки к решению задачи) и **Tabular refinement** (Табличная адаптация сетки к решению задачи).

Сохранение промежуточных результатов

На вкладке **Saving** (Сохранение) задаются моменты (в выбранных единицах измерения) сохранения промежуточных результатов во время решения задачи.

- Если отмечена опция **Save Before Refinement** (Сохранить перед адаптацией сетки к решению задачи), то промежуточные результаты решения зада-

чи будут автоматически сохраняться во время расчета перед каждым изменением расчетной сетки (т. е. ее адаптации к решению задачи).

- Если отмечена опция **Periodic Saving** (Периодическое сохранение), то промежуточные результаты решения задачи будут периодически сохраняться во время расчета. Эта опция имеет два параметра:
  - **Units** (Единицы) — единица измерения, с помощью которой будет задан период сохранения промежуточных результатов решения задачи. Предлагается выбрать **Iterations** (Итерации) или **Physical time** (Физическое время задачи — только для нестационарных задач);
  - **Period** (Период) — период (в выбранной единице измерения) сохранения промежуточных результатов решения задачи.
- Если отмечена опция **Tabular Saving** (Табличное сохранение), то промежуточные результаты решения задачи будут сохраняться в моменты расчета, заданные пользователем таблично. Эта опция задается с помощью **Units** (Единицы) и **Saving Table** (Таблица моментов сохранения результатов):
  - **Units** (Единицы) — выбирается единица измерения, с помощью которой будут заданы моменты сохранения промежуточных результатов решения задачи. Предлагается выбрать **Iterations** (Итерации) или **Physical time** (Физическое время задачи — только для нестационарных задач);
  - если дважды щелкнуть в ячейке **Saving Table** (Таблица моментов сохранения результатов), то в появившемся в результате окне **Table** (Таблица) можно задать таблицу моментов (в выбранных единицах измерения) для сохранения промежуточных результатов решения задачи.

Если решается нестационарная задача, и в **Wizard** (Мастер проектов) в окне **Time Settings** (Временны́е установки) заданы **Output time step** (Временной шаг выдачи результатов) или **Output time moments** (Моменты выдачи результатов), то их значения (в единицах физического времени задачи) появляются в соответствующих ячейках, т. е. значение **Output time step** (Временной шаг выдачи результатов) становится значением параметра **Period** (Период) опции **Periodic Saving** (Периодическое сохранение), а значения **Output time moments** (Моменты выдачи результатов) появляются в таблице окна **Table** (Таблица) и в ячейках **Point N** (Точка №).

Дополнительные опции

При моделировании различных явлений нередко возникает ситуация, когда на результат оказывают влияние процессы, идущие с разной скоростью. При

значительной (на порядок и более) разнице скоростей этих процессов происходит чрезмерное повышение затрат машинного времени на моделирование. Одним из средств ускорения расчета в таких случаях является "заморозка" — постоянное или временное прекращение расчета наиболее быстрого процесса (процессов).

На вкладке **Advanced** (Дополнительные параметры) пользователь может задать некоторые опции, влияющие на время и точность решения задачи.

- С помощью опции **Flow Freezing** ("Замораживание" течения) задаются параметры, управляющие процедурой "замораживания" значений всех параметров течения (т. е. использования тех же значений этих параметров, что и на предыдущей итерации), за исключением температур текучей среды и твердых тел, а также концентраций компонентов многокомпонентной текучей среды, которые рассчитываются на каждой итерации, поскольку сходятся медленнее, чем остальные параметры течения. Эта опция позволяет быстрее решить задачи, в которых существенную роль играют процессы теплопередачи и теплообмена, а также распространения компонентов текучей среды. Чтобы включить эту опцию, нужно вместо **disabled** (отключено) выбрать стратегию этой опции: **Periodic** (Периодически) или **Permanent** (Постоянно):

  - стратегия **Periodic** (Периодически) означает, что "замораживание" выполняется периодически. При этом задаются следующие параметры:

    - **Maximum freezing period** (Максимальный период "замораживания") — если этот период равен **N** (измеряется в итерациях), то выполняется следующая процедура: начиная с заданного в ячейке **Start** (Старт) начального момента, число следующих одна за другой итераций с "замороженным" течением увеличивается на единицу после каждой итерации с полным расчетом течения до тех пор, пока это число не станет равным **N**. После этого на всем протяжении расчета после каждой итерации с полным расчетом течения выполняется **N** итераций с "замороженным" течением;

    - **Start** (Старт) — момент расчета (задается в продувках (travels)), с которого начинает работать процедура "замораживания" течения;

  - стратегия **Permanent** (Постоянно) означает, что, начиная с заданного в ячейке **Start** (Старт) начального момента (в продувках (travels)), течение "замораживается" до конца расчета, т. е. во всех последующих итерациях рассчитываются только температуры текучей среды и твердых тел, а также концентрации компонентов многокомпонентной текучей среды, а остальные параметры течения не изменяются. С момента начала работы опции "замораживания" течения адаптации расчетной сет-

ки к решению задачи не проводятся, даже если они были заданы на вкладке **Refinement** (Адаптация сетки) (рис. 5.64).

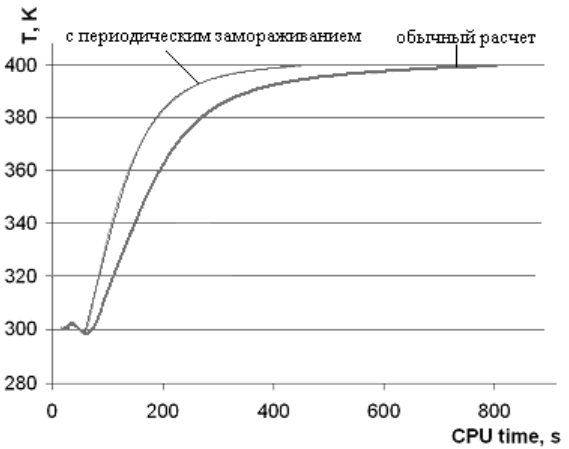


Рис. 5.64. Сравнение времени сходимости минимальной температуры жидкости обычного расчета и расчета с использованием "замораживания" течения

- С помощью опции **Manual Time Step** можно задать шаг по физическому времени задачи, с которым будет определено ее искомое нестационарное решение. По умолчанию нестационарные задачи решаются с шагом по времени, который выбирается автоматически в зависимости от параметров течения. Если нужно получить более точное решение нестационарной задачи (с помощью задания более мелкого шага по времени по сравнению с автоматически выбираемым, например, для разрешения высокочастотного периодического решения) или быстрее рассчитать теплопередачу в твердых телах (с помощью задания более крупного шага по времени по сравнению с автоматически выбираемым, например, в том случае, когда картина течения устанавливается существенно быстрее) — в этих случаях целесообразно задавать шаг по времени вручную. Если решается нестационарная задача расчета только теплопередачи в твердых телах, т. е. без расчета течения текучей среды (т. е. включена опция **Heat transfer in solids only** (Только теплопередача в твердых телах)), то лучше задать шаг по времени вручную. Чтобы задать шаг по времени вручную, надо отметить опцию **Manual time step** (Задание шага по времени вручную) и задать величину шага.
- Если решается задача с радиационным теплообменом, то с помощью опции **View factor resolution level** (Уровень разрешения фактора видимости) можно изменить заданное по умолчанию число лучей, испускаемых с поверхности, участвующей в радиационном теплообмене. Так, если твердые

тела имеют низкую теплопроводность, то задаваемое значение параметра этой опции рекомендуется увеличить.

Щелкнув **Reset** (Восстановить), вы можете выставить значения опций окна **Calculation Control Options** в соответствии с выбранным уровнем решения (**Result Resolution**), имеющим 8 позиций (1…8). Чем выше номер позиции, тем жестче критерии завершения расчета и тем чаще осуществляется адаптационное изменение расчетной сетки к решению задачи (дополнительные опции не используются): при позициях 1…5 оно отсутствует, при позиции 6 оно осуществляется 1 раз, при позиции 7 — три раза, при позиции 8 — периодически.

Примечание

Значения критериев завершения расчета и адаптации расчетной сетки аналогичным образом определяются в окне **Wizard** (Мастер проектов) на шаге **Result Resolution and Geometry Resolution** (Уровень решения и разрешение геометрии модели) с той лишь разницей, что уровень решения, задаваемый в окне **Wizard**, влияет также и на уровень начальной сетки (**Level of initial mesh**), определяемый в окне **Automatic Initial mesh** (Автоматическая начальная сетка).

После того как заданы все исходные данные, а также установки, касающиеся действий COSMOSFloWorks во время решения задачи, можно запустить проект на счет, т. е. начать решать поставленную задачу.

Запуск на счет

Запуск проекта на счет выполняется с помощью диалогового окна **Run** (Запуск на счет) или, если вслед за этим расчетом планируется последовательно запустить на счет в автоматическом режиме еще несколько проектов COSMOSFloWorks, то с помощью диалогового окна **Batch Run** (Запуск пакета на счет) первый проект запускается на счет, а остальные проекты ставятся за ним в очередь на выполнение расчета.

Окна **Run** (Запуск на счет) и **Batch Run** (Запуск пакета на счет) вызываются из меню **FloWorks** | **Solve** (FloWorks | Решить) (рис. 5.65).

При запуске на счет пользователю предоставлена возможность управления процессом расчета с помощью следующих опций:

- **Create mesh** (Создать расчетную сетку) — создает расчетную сетку. Если эта опция выбрана, а опция **Solver** (Решение) не выбрана, то расчет завершается сразу после построения начальной расчетной сетки, которую после этого можно будет посмотреть с помощью постпроцессора. Если ранее расчетная сетка не строилась, то эта опция отмечена автоматически. Если ранее расчетная сетка строилась, то выбор этой опции означает, что расчетная сетка будет построена заново (это необходимо при изменении задаваемых характеристик сетки);

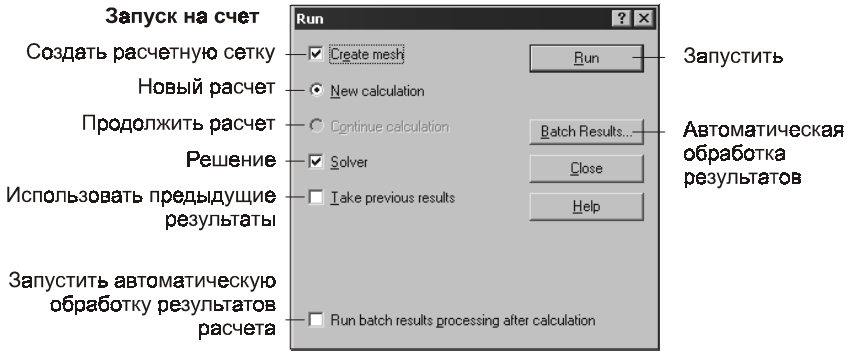


Рис. 5.65. Окно **Run**

- **Solver** (Решение) — выбор этой опции означает, что будет осуществляться решение задачи (первый раз, заново или в продолжение ранее выполнявшегося, но не завершенного);
- **New calculation** (Новый расчет) — выбор этой опции означает, что расчет выполняется первый раз или заново (при этом, если опция **Create mesh** (Создать расчетную сетку) не выбрана, то будет использована уже построенная расчетная сетка);
- **Continue calculation** (Продолжить расчет) — расчет будет выполнен как продолжение ранее выполнявшегося, но не завершенного расчета;
- **Take previous results** (Использовать предыдущие результаты) — выбор этой опции означает, что в качестве начальных условий нового расчета будут использованы результаты предыдущего. Если решалась и решается нестационарная задача, то для использования предыдущих результатов необходимо в списке **Start from time moment** (Начать с момента времени) указать тот момент физического времени задачи, при котором эти результаты были сохранены, — расчет автоматически начнется с этого момента физического времени задачи и будет продолжаться до выполнения условия его завершения;

Примечание

Если вы выберите опцию **Take previous results** (Использовать предыдущие результаты), то начальные условия, заданные в **Wizard** (Мастер проектов) или **General Settings** (Общие установки), будут проигнорированы.

- **Run batch results processing** (Запустить автоматическую обработку результатов расчета) — выбор этой опции означает, что отчеты (reports) и графики (XY-plots, Goal plots), заданные в окне **Batch results processing** (Автоматическая обработка результатов расчета), будут созданы автоматически после завершения расчета и сохранены в папку проекта. В отли-

чие от отчетов, которые создаются по готовым шаблонам, параметры графиков должны быть предопределены в постпроцессоре, т. е. предварительно должны быть созданы элементы **XY-plot** (График) и **Goal plot** (График целей) (рис. 5.66).

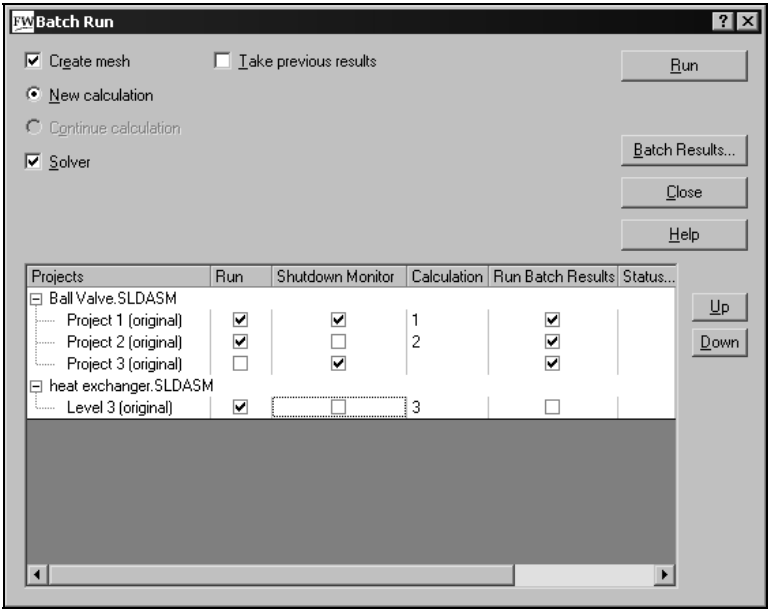


Рис. 5.66. Окно **Batch Run**

Кроме того, в окне **Batch Run** (Запуск пакета на счет) представлена таблица с проектами всех открытых в данный момент деталей. В этой таблице для этих проектов имеются следующие опции:

- в столбце **Run** (Запуск на счет) отмечаются те проекты, которые будут запущены на счет в данном пакете;
- в столбце **Shutdown Monitor** (Закрыть окно наблюдения за расчетом) отмечаются те из запускаемых на счет проектов, у которых после завершения расчета будет закрыто окно наблюдения за расчетом (после завершения расчета в нем сохраняется последняя информация о расчете, включая выводимые графики и картины полей параметров);
- в столбце **Calculation Order** (Очередность расчетов) задается автоматически и с помощью кнопок **Up** (Вверх) и **Down** (Вниз) очередность запуска на счет проектов из данного пакета;
- в столбце **Run Batch Results processing** (Автоматически обработать результаты расчета) отмечены те проекты, результаты расчетов которых будут автоматически обработаны после завершения расчета.

Примечание

При запуске на счет происходит автоматическое обновление данных проекта (rebuild). Если некоторые из выбранных проектов запускаемого пакета требуют согласия пользователя на обновление данных, то эти проекты будут пропущены, чтобы не задерживать расчет всего пакета, и помечены статусом "Canceled" (Отменен). Во избежание пропуска расчета, рекомендуется перед запуском пакета расчетов открыть каждый проект и произвести обновление его данных, вызвав **FloWorks | Project | Rebuild** (FloWorks | Проект | Обновление).

Запуск на счет осуществляется нажатием на кнопку **Run** (Запустить).

Наблюдение за расчетом

Сразу после запуска проекта на счет, т. е. сразу после начала расчета, открывается и остается активным до завершения расчета диалоговое окно **Solver** (Решатель — во время построения расчетной сетки оно называется **Mesh Generation** — Генерация сетки). Это окно (рис. 5.67) дает информацию о ходе расчета; с его помощью можно посмотреть результаты расчета, полученные на последней выполненной итерации (шаге по времени), изменить настройки опций управления расчетом в диалоговом окне **Calculation Control Options** (Опции управления расчетом), инициировать изменение расчетной сетки в ходе расчета, т. е. ее адаптацию к решению задачи, приостановить или остановить расчет.

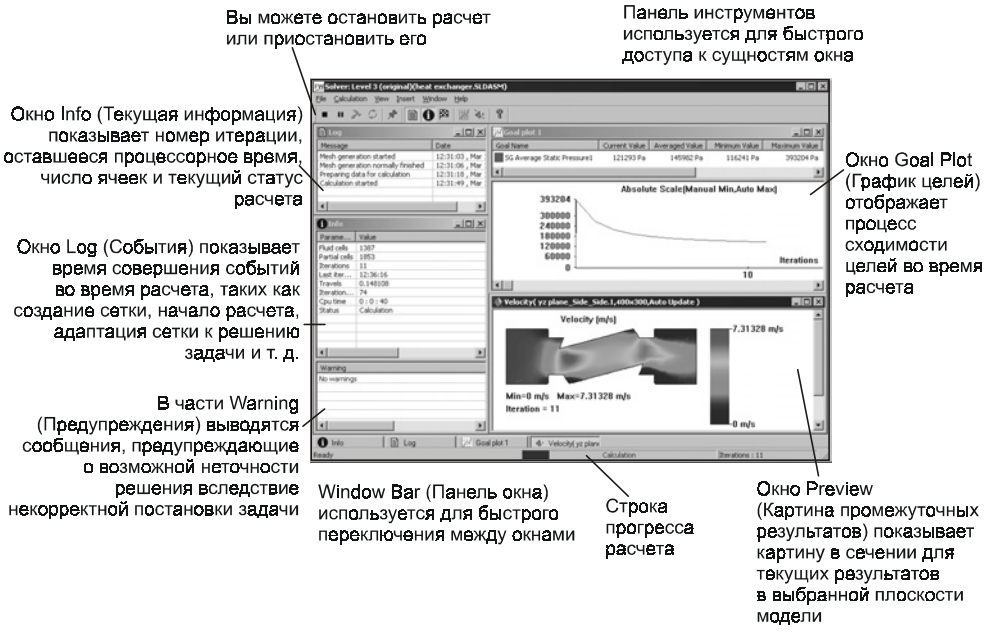


Рис. 5.67. Окно **Solver**

С помощью основного меню окна **Solver** (Решатель) (рис. 5.67) можно:

- остановить расчет, щелкнув **Calculation** | **Stop** (Расчет | Остановить) или иконку **Stop** (Остановить) на панели инструментов. Во всех этих случаях COSMOSFloWorks спросит, хотите ли вы сохранить текущие результаты (save the current results) или нет. Если текущие результаты сохраняются, то расчет может быть продолжен;
- остановить расчет с сохранением текущих результатов, щелкнув **File** | **Save and Close** (Файл | Сохранить и остановить). Если хотите остановить расчет без сохранения текущих результатов — щелкните **File** | **Close** (Файл | Остановить), а если щелкнуть **File** | **Save Current Results** (Файл | Сохранить текущие результаты), то результаты сохраняются без остановки расчета;
- приостановить расчет, щелкнув **Calculation** | **Suspend** (Расчет | Приостановить). Продолжительность приостановки расчета (в минутах) может быть задана. Для этого надо щелкнуть **Calculation** | **Suspend Options** (Расчет | Опции приостановки расчета). Приостановка расчета не позволяет вам изменить модель или проект, но позволяет временно освободить машинные ресурсы для использования других программ. Если до этого расчет был приостановлен, то после повторного нажатия он начинает идти дальше;
- посмотреть или изменить значения параметров **Calculation Control Options** (Опции управления расчетом), щелкнув **Calculation** | **Calculation Control Options** (Расчет | Опции управления расчетом), т. е. опций завершения расчета, адаптации сетки к решению задачи в процессе расчета, сохранения результатов, "замораживания" параметров течения, ручного задания шага по времени, ручного задания числа лучей, испускаемых с поверхности радиационного теплообмена;
- инициировать адаптацию сетки к решению задачи, щелкнув **Calculation** | **Refine** (Расчет | Адаптировать сетку).

В процессе решения задачи можно также получить различную информацию о ходе решения задачи. Щелкнув **Insert** (Вставить) и одну из следующих опций, можно получить следующую информацию.

- **Log** (События) — окно, содержащее запись всех основных событий процесса решения задачи: название события (например, начало расчета, конец расчета) и время, когда оно произошло.
- **Information** (Текущая информация) — окно, содержащее общую текущую информацию о процессе решения задачи: информацию о ходе и результатах построения сетки (данные о числе ячеек расчетной сетки), номер текущей итерации, затраченное процессорное время (с момента начала

решения задачи), время на итерацию и др. Кроме того, в нижней части этого окна выдаются Предупреждения (**Warnings**) пользователю в виде сообщений о полученных специфических промежуточных результатах решения, которые должны насторожить пользователя, т. к. указывают на возможную некорректность решения.

- **Goal plot** (Таблица целей) — список всех заданных в проекте целей (**List of goals**), для каждой из которых показано:
  - текущее значение (**Current value**);
  - среднее, минимальное и максимальное значения на интервале анализа сходимости цели (**Average value**, **Minimum value**, **Maximum value**), отмеряемом назад от последней выполненной итерации;
  - разницу между максимальным и минимальным значениями цели на интервале анализа (**Delta**);
  - критерий сходимости цели (**Criterion**) — допустимую разницу между максимальным и минимальным значениями цели на интервале анализа;
  - индикатор сходимости цели (**Progress**), показывающий в процентах отношение заданного **Criterion** к разнице **Delta**, т. е. насколько величина физического параметра, заданная в качестве цели, близка к сходимости (по достижении 100 % появляется сообщение "**achieved**" — "достигнуто"). Если **Delta** осциллирует, то индикатор сходимости тоже осциллирует вплоть до обратного движения, даже после достижения 100 %. Поскольку одним из заданных необходимых условий завершения расчета может быть выполнение заданного числа продувок (travels), т. е. соответствующего числа итераций, не говоря уже о том, что может быть задано несколько целей, то очевидно, что по индикатору сходимости цели не всегда можно оценить время завершения расчета. Если индикатор сходимости у цели отсутствует, это означает, что сходимость этой цели показана только для информации и не принимается во внимание при принятии решения о завершении расчета.
- **Goal Plot** (График целей) — окно графика сходимости отдельных (выбранных пользователем) целей. В верхней части окна: та же информация, что и в таблице целей, в нижней части окна — графики изменения этих целей в ходе расчета. Если щелкнуть правой кнопкой мыши по полю графика, то в появившемся диалоговом окне **Goal Plot Settings** (Установки графика целей) можно указать нужные установки построения графиков:
  - по оси абсцисс могут быть отложены итерации (iterations), или, если решается нестационарная задача, физическое время задачи, т. е. время развития рассчитываемого процесса с момента его начала (physical time), или процессорное время решения задачи (CPU time), или длительность расчета в продувках (travels). Если отмечена опция **Show**

analysis interval (Показать интервал анализа), то на оси абсцисс дополнительно прямоугольником показан интервал анализа целей. Дополнительно, с помощью бегунка **Plot length** (Длина графика) можно сжимать, а с помощью движка в нижней части графика — передвигать график по оси абсцисс;

- по оси ординат могут быть отложены: абсолютные (absolute scale) или отнесенные к диапазону изменения (normalized scale), текущие (Current value), средние (Average value), максимальные (Maximum value) или минимальные (Maximum value) по интервалу анализа значения цели; может быть применен логарифмический масштаб (Logarithmic scale). Поскольку, по умолчанию, график абсолютных значений цели строится во всем диапазоне изменения цели от ее абсолютного минимума до ее абсолютного максимума с начала расчета до текущего момента, то в полях **Manual min** (Заданный минимум) и **Manual max** (Заданный максимум) можно ограничить диапазон показа значений цели, задав, соответственно, нижнюю и верхнюю границы графика по оси ординат.

- **Preview** (Картина промежуточных результатов) — картина (текущих) результатов решения задачи в заданной плоскости, полученная на последней выполненной итерации (последнем шаге по времени). Если опция **Auto update** (Автоматическое обновление) не отмечена в диалоговом окне **Preview Settings** (Установки картины промежуточных результатов), то для обновления картины щелкните **Calculation | Update Previews** (Расчет | Обновить картины). Картины могут быть представлены в виде заливок (**Contours**), изолиний (**Isolines**), или векторов скорости (**Velocity vectors**). Можно задать периодичность (в итерациях) сохранения обновляемых картин в виде bmp-файлов, что позволит в дальнейшем, при анализе сходимости решения, рассматривать поведение не только целей, но также картин физических параметров во время расчета, что существенно расширяет надежность полученных результатов.

- **Refinement Table** (Таблица адаптаций сетки) — информация обо всех изменениях расчетной сетки, выполненных во время расчета (ее адаптациях к решению задачи): когда это было сделано, т. е. номер итерации, физическое время задачи (только для нестационарных задач), количество ячеек новой расчетной сетки: в текучей среде (**Fluid cells**), в твердом теле (**Solid cells**), частичных (**Partial cells**), а также в течение какого периода (измеряемого итерациями) перед изменением сетки собиралась информация о градиентах физических параметров (**History duration**), на основании которой изменена расчетная сетка.

- **Min/Max Table** (Таблица минимумов и максимумов) — таблица минимальных и максимальных значений основных термодинамических параметров на текущей итерации;

- **Summary** (Сводный отчет) — полная информация о постановке задачи. При выборе **Report** (Отчет) та же информация сбрасывается в документ формата Microsoft Word©.

Из приведенного здесь описания опций COSMOSFloWorks по управлению расчетом видно, что они дают пользователю широкие возможности для повышения и проверки надежности решения задачи, наблюдения за ходом расчета и своевременного вмешательства в него, в частности, для принятия своевременного решения о завершении расчета или о необходимости его продолжения, что в некоторых случаях дает существенную экономию затрачиваемого машинного времени.

5.5.9. Просмотр результатов

Краткое описание возможностей постпроцессора COSMOSFloWorks дано в *разд. 5.4*. Здесь рассмотрим подробное описание этих возможностей.

Загрузка результатов

Просмотр результатов начинается с загрузки в постпроцессор COSMOSFloWorks файла результатов. Результаты расчета сохраняются в файл с расширением fld в папку проекта. Для нестационарной (time-dependent) задачи сохраняются также файлы с результатами, полученными в моменты времени, предварительно заданные пользователем при определении временны́х установок нестационарной задачи (в окне **Wizard**) или при задании установок сохранения результатов (в окне **Calculation Control Options**). Файл, в котором содержатся конечные результаты расчета, называется n.fld, где n — имя папки проекта. Промежуточные результаты решения задачи сохраняются в файле r_n.fld, где n — номер итерации, после которой промежуточные результаты решения задачи были сохранены.

Результаты работы генератора начальной расчетной сетки сохраняются в файл с расширением cpt. Этот файл содержит только информацию о полученной начальной расчетной сетке (если в процессе расчета не происходит адаптация сетки к полю течения (solution-adaptive refinement), то начальная сетка не изменяется до конца расчета). Для начинающих пользователей или в случае, когда нет уверенности в адекватном разрешении геометрии модели расчетной сеткой, рекомендуется запускать только генерацию сетки *(см. разд. "Запуск на счет")* и анализировать полученную сетку, перед тем как запускать задачу на счет. Файл результатов также содержит информацию о расчетной сетке. После загрузки файла результатов можно посмотреть трехмерную расчетную сетку, на которой были получены результаты. Для этого из меню **FloWorks** | **Results** | **Mesh** (FloWorks | Результаты | Сетка) выберите **Mesh 3D View** (Трехмерный вид сетки). Если хотите вывести в Excel или тек-

стовый (ASCII) файл значения физических параметров, полученные в ячейках сетки указанного типа, в этом же меню выберите **Mesh Output to Excel** (Вывести в Excel) или **Output to ASCII** (Вывести в текстовый файл) соответственно.

Загрузка файла результатов (fld) или файла расчетной сетки (cpt) осуществляется в окне **Load Results** (Загрузка результатов), вызываемом при выборе **FloWorks | Results | Load/Unload Results** (FloWorks | Результаты | Загрузить/Выгрузить результаты) (рис. 5.68).

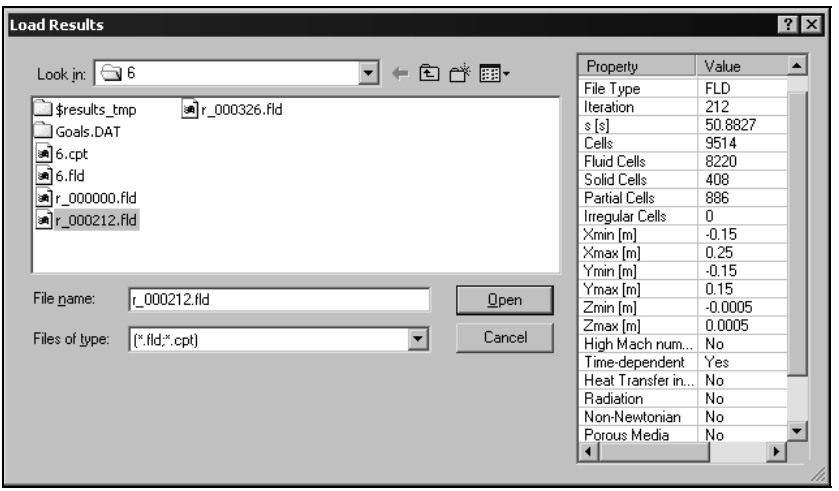


Рис. 5.68. Окно **Load Results**

Чтобы определить, в каком из файлов содержатся интересующие вас результаты, смотрите информацию о выбранном файле в списке **Property/Value** (Свойство/Значение). В первую очередь смотрите строки **Iteration** (Итерация) и **Time** (физическое время), — особенно в задачах, имеющих несколько файлов с результатами, относящимися к разным итерациям или моментам времени.

Можно осуществить быструю ограниченную загрузку результатов расчета только для просмотра графиков сходимости целей (goal plots) и составления отчета (report). Для этого щелкните **FloWorks | Results | Select Results** (FloWorks | Результаты | Выбрать результаты) и укажите либо нужный fld-файл.

После загрузки результатов вам становятся доступны следующие средства просмотра и анализа результатов:

- картины в сечении (**Cut plots**);
- трехмерный график (**3D-Profile plots**);

- картины на поверхности (**Surface plots**);
- картины поверхностей уровня (**Isosurfaces**);
- визуализация линий тока (**Flow trajectories**);
- расчет движения частиц (**Particle study**);
- просмотр значений параметров на поверхности (**Surface parameters**);
- просмотр значений параметров в объеме (**Volume parameters**);
- просмотр значений параметров в точке (**Point parameters**);
- графики (**XY plots**);
- графики изменения сходимости целей (**Goals**);
- отчет (**Report**);
- создание фильмов (**Animation**).

Можно копировать, сохранять, печатать текущую картину результатов. Для этого из меню **FloWorks** | **Results** | **Image** (FloWorks | Результаты | Картина) выберите одну из следующих опций:

- **Copy Image** (Копировать картину) — копировать текущую картину результатов в буфер обмена информацией;
- **Save Image** (Сохранить картину) — сохранить текущую картину результатов как bmp-файл заданного размера (в пикселах) и названия;
- **Print Image** (Печатать картину) — печатать текущую картину результатов.

Результаты можно смотреть одновременно во всех четвертях графического окна. Каждая из этих четвертей имеет свои установки просмотра. Установки просмотра и созданные элементы визуализации сохраняются в проекте COSMOSFloWorks.

Установки просмотра

В окне **View Settings** (Установки просмотра) задается визуализируемый физический параметр, а также установки его показа для текущей четверти графического окна. Активная четверть имеет серый контур по своей границе.

Чтобы открыть окно **View Settings** (Установки просмотра), выберите **FloWorks** | **Results** | **View Settings** (FloWorks | Результаты | Установки просмотра). Можно также вызвать это окно, дважды щелкнув на палитре в левом верхнем углу графической области, или из контекстного меню, вызываемого щелчком правой кнопки мыши в графической области.

Окно **View Settings** (Установки просмотра) имеет следующие установки:

- **Contours** (Заливки) — сплошная окраска любой поверхности в зависимости от значений на этой поверхности выбранного физического параметра

(**Parameter**) и выбранной палитры (**Palette**), равномерно разбивающей интересующий вас диапазон изменения данного физического параметра на интервалы, число которых равно заданному числу цветов палитры (**Number of colors**), так что каждому интервалу значений физического параметра соответствует определенный цвет палитры. Заливки отображаются в **Surface Plots** (Картины на поверхности) и **Cut Plots** (Картины в сечении). Кроме того, эти установки могут быть применены для создания изолиний, а также для раскрашивания траекторий, векторов и поверхностей уровня в соответствии со значениями на них (для векторов — в их точках) физического параметра, выбранного для просмотра на вкладке **Contours** (Заливки). Для этого на соответствующей вкладке необходимо выбрать **Use from contours** (Установки от заливки) (рис. 5.69);

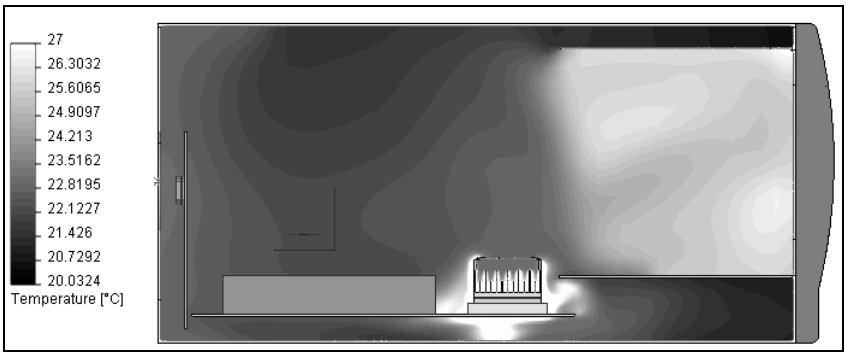


Рис. 5.69. Распределение температуры показано в виде заливок

- **Isolines** (Изолинии) — на этой вкладке выбирается физический параметр, изолинии которого могут быть изображены на картинах в сечениях (**Cut Plots**) и картинах на поверхности (**Surface Plots**). Уровни изолиний определены равномерным разбиением рассматриваемого диапазона изменения данного физического параметра на интервалы, число которых на 1 меньше заданного количества уровней (**Number of levels**) (рис. 5.70);
- **Vectors** (Векторы) — на этой вкладке задаются общие параметры построения картин векторов скорости отображаемых на картинах в сечениях и на поверхности: размер стрелок (**Arrow size**), вид отображения (**Mode**) — вектора в пространстве (**3D Vectors**) или их проекции на поверхность картины (**Projected Vectors**), размер диапазона скорости, такой, что при выходе абсолютного значения вектора скорости за заданный диапазон длина вектора не изменяется (рис. 5.71);
- **Flow trajectories** (Траектории) — на этой вкладке задается способ окраски линий тока и траекторий частиц: либо все траектории имеют один цвет (который для линий тока задается в окне **Flow trajectories** (Траектории), а

для траекторий частиц — в окне **Particle Study Results** (Результаты расчета частиц)), либо они окрашиваются в зависимости от значений на них физического параметра, выбранного на вкладке **Contours** (Заливки), в соответствии с палитрой, выбранной там же;

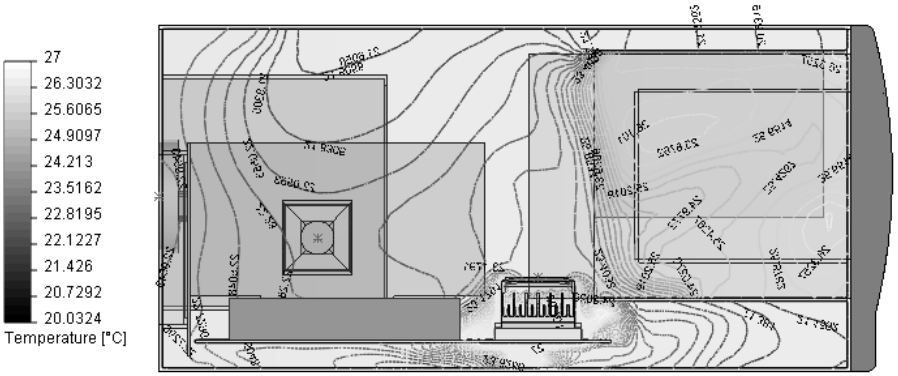


Рис. 5.70. Изолинии температуры

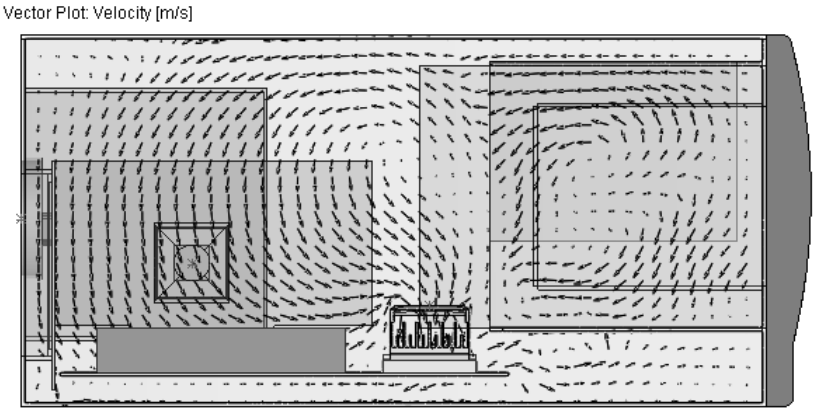


Рис. 5.71. Векторы скорости

- **Isosurfaces** (Поверхности уровня) — на этой вкладке выбирается физический параметр для просмотра его значений в виде поверхностей уровня, собственно значения параметра (максимум 16 разных значений), настройки отображения (область отображения, цвет и сетка для лучшей визуализации формы этих поверхностей); в том числе можно задать последовательный показ поверхностей уровня в виде фильма (**Animation**);
- **Options** (Опции) — на этой вкладке можно задать показ **2D-Ruler** (Линеек окна) и **3D-Ruler** (Линеек расчетной области), а также отменить отобра-

жение картин результатов во время вращения, смещения, увеличения/уменьшения изображения модели с целью увеличения скорости этих операций (**Display while dynamic**), можно установить размер, цвет и прозрачность уменьшенного вида модели с отмеченной видимой областью (**Map View**), а также задать цвет, прозрачность и положение палитры (**Color Bar**);

- **Coordinate system** (Система координат) — на этой вкладке выбирается система координат, в которой будут определены X-, Y-, Z-составляющие скорости. Кроме того, по умолчанию, если задана вращающаяся система координат, параметры отображаются во вращающейся системе. Чтобы показать параметры картин в абсолютной (невращающейся) системе координат, нужно снять флажок с опции **Relative to rotating frame** (Во вращающейся системе координат);

Примечание

Линии тока отображаются во вращающейся системе координат всегда. При смене системы координат необходимо также обновить минимальные и максимальные значения параметров, щелкнув **Reset CS Dependent Min/Max** (Обновить зависимые от координат минимум и максимум).

- **3D-Profile** (Трехмерный график) — на этой вкладке задается физический параметр (**Parameter**), изменение которого в выбранном пользователем сечении показано в виде поверхности, каждая точка которой смещена на расстояние, пропорциональное значению параметра в данной точке сечения. При этом расстояние, на которое смещается максимум значений, задается в поле **Distance factor** (Коэффициент удаления).

Вне зависимости от способа отображения физического параметра в списке **Parameter** (Параметр) изначально находятся не все из возможных параметров визуализации, а только основные (например, полное давление (Total pressure) изначально отсутствует в этом списке). Чтобы сделать доступными и другие параметры, необходимо их включить в окне **Display Parameters** (Параметры визуализации), вызываемом при нажатии кнопки **Parameter List** (Список параметров). Кроме того, список визуализируемых параметров можно расширить за счет добавления дополнительных параметров (**Custom visualization parameters**), которые задаются в виде функций (на основе стандартных математических операций) от стандартных единиц измерения в **Engineering Database** (Инженерной базе данных).

Одним из параметров визуализации может быть коэффициент теплоотдачи стенки (heat transfer coefficient), α. Если выбран этот параметр, то необходимо также задать характерную температуру текучей среды, которая будет ис-

пользована исключительно для визуализации коэффициента теплоотдачи стенки:

$$\alpha = q/\left(T_s - T_f\right),$$

где q — рассчитанный COSMOSFloWorks удельный тепловой поток от стенки к текучей среде, T_s — рассчитанная COSMOSFloWorks температура поверхности стенки, соприкасающейся с текучей средой, T_f — заданная пользователем характерная температура текучей среды. Чтобы задать характерную температуру текучей среды, используемую для всех стенок, выберите **FloWorks** | **Results** | **Default Reference Parameters** (FloWorks | Результаты | Характерные параметры по умолчанию). Чтобы задать характерную температуру текучей среды, используемую для визуализации коэффициента теплоотдачи какой-то конкретной стенки, выберите **FloWorks** | **Results** | **Insert** | **Reference Parameters** (FloWorks | Результаты | Вставить | Характерные параметры) — в этом окне можно задать характерную температуру для выделенных поверхностей.

Если хотите сузить диапазон просматриваемых значений интересующего физического параметра, то задайте желаемые минимальное и максимальное значения в полях **Min** и **Max** для соответствующего способа отображения (заливки, изолинии, векторы, трехмерный график). Если хотите восстановить полный диапазон просмотра, заключенный между автоматически определяемыми минимальным и максимальным значениями данного физического параметра во всей расчетной области (они всегда показаны слева от окошек **Min** и **Max**), то щелкните **Reset Min/Max** (Восстановить Min/Max). Опция **Reset Min/Max** (Восстановить Min/Max) действует в определенном смысле глобально: полный диапазон просмотра восстанавливается для всех способов отображения.

При желании можно сохранить текущие установки просмотра (**Save as**) и загрузить их впоследствии для данного проекта (**Open**).

Картины в сечении

С помощью **Cut Plot** (Картина в сечении) можно посмотреть распределение значений интересующего физического параметра (задается в окне **View Settings**) по выбранному сечению. Картины в сечении могут показывать распределение параметра в виде заливок (**Contours**), изолиний (**Isolines**), также могут быть показаны векторы скорости (**Vectors**) и расчетная сетка (**Mesh**) (рис. 5.72).

Примечание

Возможность просмотра расчетной сетки в картинах в сечении и картинах на поверхности изначально отключена и появляется, если в окне **COSMOSFloWorks**

Options (Опции COSMOSFloWorks) выбрана опция **Display Mesh** (Показывать сетку).

Векторы и изолинии могут быть раскрашены в соответствии с распределением физического параметра на линии вектора или изолинии. Для этого в окне **View Settings** на вкладке **Contours** (Заливки) задается физический параметр, диапазон его изменения, число цветов и вид палитры, а на вкладке **Vectors** и **Isolines** отмечается опция **Use from contours** (Установки от заливки).

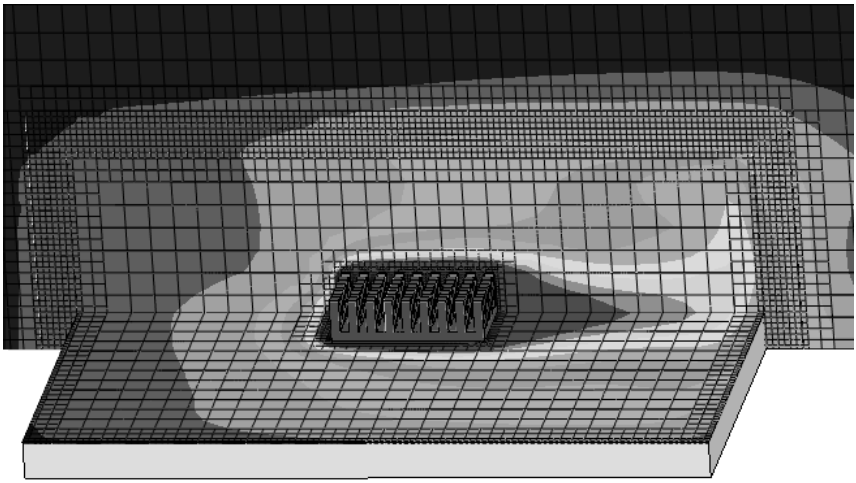


Рис. 5.72. Картины в сечении: показано распределение температуры и расчетная сетка

Окно задания картины в сечении вызывается при выборе **FloWorks** | **Results** | **Insert** | **Cut Plot** (FloWorks | Результаты | Вставить | Картина в сечении).

В некоторых случаях удобно создать **Cut Plot** редактированием копии уже имеющегося **Cut Plot** — для создания такой копии щелкните правой кнопкой мыши элемент ранее созданного **Cut Plots** в Дереве анализа COSMOSFloWorks и выберите **Clone** (Клонировать).

Плоскость сечения (**Section plane definition**) может быть определена одним из следующих способов:

- **Reference** (Плоскость или плоская поверхность) — в корневом каталоге Дерева проектирования SolidWorks (**FeatureManager**) выберите одну из трех координатных плоскостей или там же — любую другую плоскость, или выделите одну из плоских поверхностей модели. Для сборок существует ограничение на выбор плоскости: для картин в сечениях необходимо использовать только плоскости, принадлежащие верхнему уровню сборки. При необходимости, если плоскость (сечение), в которой собираетесь смотреть результаты, не совпадает с базовой, то в поле **Section position** (Положение сечения) можно задать положение (т. е. плоскопараллельный

сдвиг) плоскости относительно базовой с учетом стрелки, исходящей от базовой плоскости в графическом окне и указывающей положительное направление возможного сдвига;

- **Normal to screen** (По нормали к экрану) — для картины в сечении можно выбрать плоскость, перпендикулярную к экрану. Эта плоскость задается двумя точками. Чтобы задать их, щелкните кнопкой мыши в первой точке и перетащите указатель во вторую точку, затем отпустите кнопку мыши. Можно также задать координаты X и Y этих точек. Координаты определяются в пикселах с учетом того, что начало координат находится в левом нижнем углу графической области. При этом можно зафиксировать положение плоскости относительно модели при вращении, перемещении, изменении масштаба модели в любой момент, нажав на кнопку **Fix** (Фиксировать), или в момент создания картины, выбрав опцию **Fix at creation time** (Фиксировать во время создания);
- **Normal to screen vertical** (**horizontal**) (По нормали к экрану, вертикально (горизонтально)) — для картины в сечении можно выбрать плоскость, перпендикулярную к экрану и при этом расположенную горизонтально или вертикально. Такая плоскость определяется одной точкой. Для определения этой точки щелкните ее в графической области или введите ее координаты X и Y. Координаты определяются в пикселах с учетом того, что начало координат находится в левом нижнем углу графической области.

Параметры картины в сечении задаются на вкладке **Settings** (Параметры).

- Для векторов:
  - **Vector spacing** (Расстояние между векторами) — расстояние между точками, в которых строятся векторы скорости на картине;
  - **Uniform plot** (Равномерное распределение) — одинаковое расстояние между точками, в которых строятся векторы скорости на картине;
  - **Gradient plot** (Градиентное распределение) — расстояние между точками, в которых строятся векторы скорости на картине, зависит от градиента скорости: чем выше градиент скорости, т. е. сильнее изменяется скорость, тем меньше расстояние между векторами;
  - **Fixed color** (Фиксированный цвет) — если в окне **View Settings** (Установки просмотра) на вкладке **Vectors** (Векторы) отмечена опция **Use fixed color** (Фиксированного цвета), то здесь задается цвет векторов (рис. 5.73).
- Для изолиний:
  - **Fixed color** (Фиксированный цвет) — если в окне **View Settings** (Установки просмотра) на вкладке **Isolines** (Изолинии) отмечена опция **Use fixed color** (Фиксированного цвета), то здесь задается цвет изолиний;

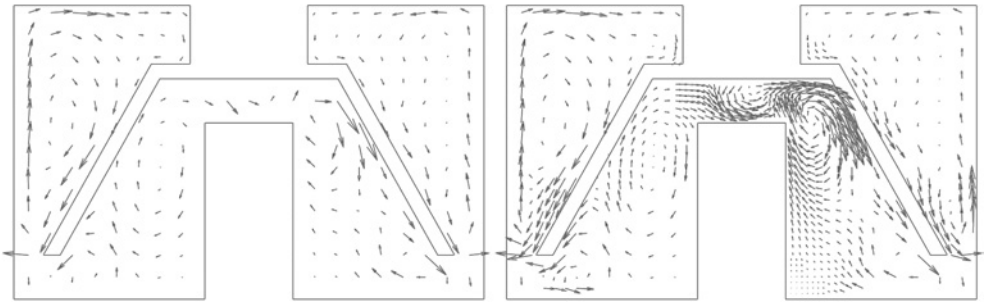


Рис. 5.73. Равномерная (слева) и градиентная (справа) картина векторов

- **Background color** (Фоновый цвет) — для картины с изолиниями можно задать цвет фона, если отмечена опция **Draw background** (Фон) и на этой картине нет заливки (**Contours**);
- **Display values** (Показать значения) — если эта опция отмечена, то около изолиний (не всех) будут показаны соответствующие значения физического параметра;
- **Display outlines** (Показать контуры картины) — если эта опция отмечена, то границы картины оттеняются черной линией;
- **Interpolate results** (Интерполировать результаты) — эта опция позволяет при просмотре результатов расчета включить/отключить их интерполяцию между центрами ячеек расчетной сетки. Если эта опция включена (по умолчанию), то COSMOSFloWorks показывает результаты расчета с применением их интерполяции между центрами ячеек расчетной сетки. Если эта опция отключена (т. е. не отмечена), то при просмотре результатов расчета их интерполяция между центрами ячеек не осуществляется (это, в частности, ускоряет их просмотр), так что в пределах каждой ячейки результаты расчета будут показаны постоянными (рис. 5.74);

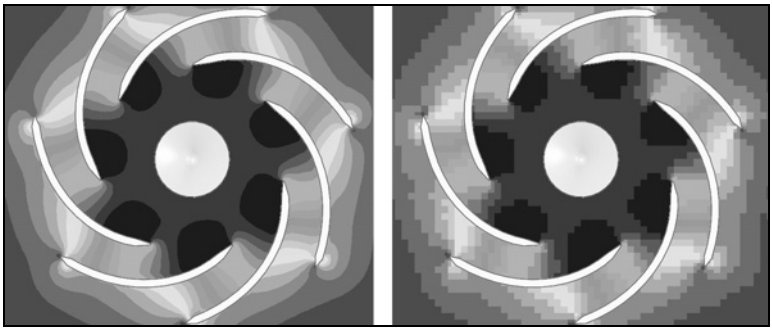


Рис. 5.74. Справа — интерполяция результатов включена, слева — отключена

- **Use CAD geometry** (Использовать геометрию САПР) — по умолчанию, при просмотре результатов расчета будет показана геометрия САПР, однако геометрия этой модели, разрешенная расчетной сеткой COSMOSFloWorks и, соответственно, использованная в расчете, может несколько от нее отличаться (рис. 5.75). Если эта опция отключена (т. е. не отмечена), то при просмотре результатов будет показано сеточное представление геометрии модели. Отключение этой опции немного ускоряет просмотр;

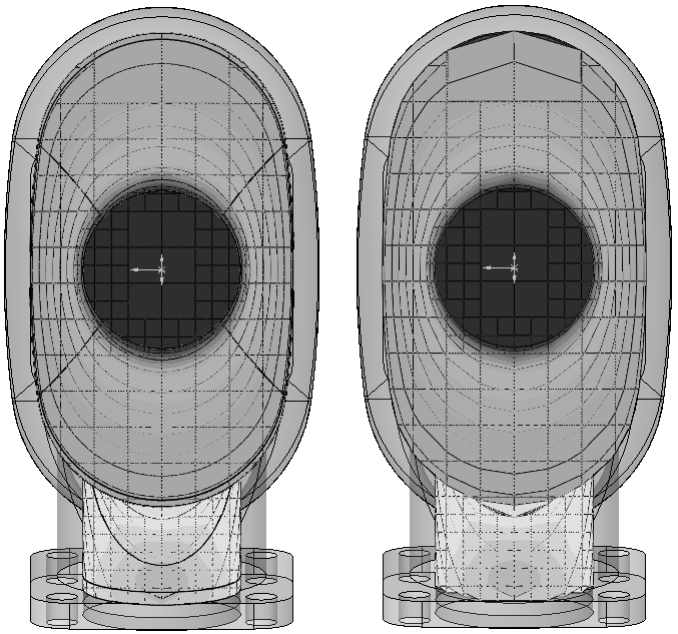


Рис. 5.75. Картина с геометрией САПР (слева — время создания картины 30 сек.) и геометрией, полученной в результате аппроксимации расчетной сеткой (справа — время создания картины 4 сек.)

- **Display boundary layer** (Показывать пограничный слой) — эта опция определяет, показывать или не показывать влияние пограничного слоя на параметры течения около стенок модели. Отключение этой опции ускоряет просмотр.

Картина в сечении может быть ограничена прямоугольной областью, координаты границ которой в Глобальной системе координат (**Global coordinate system**) задаются на вкладке **Region** (Область).

Можно также просмотреть изменение картины в сечении модели вдоль линии, перпендикулярной этой плоскости сечения. На вкладке **Animation**

(Фильм) установите количество кадров (**Number of frames**) фильма. Кадр фильма — это одна картина в сечении, причем плоскость сечения параллельна базовой плоскости и находится на границе между интервалами, на которые равномерно делится диапазон сдвига плоскости относительно базовой плоскости. Этот диапазон задается двумя бегунками как **Start and finish position** (Положения начального и конечного сечений), так что количество интервалов равно **N** = **Number of frames** (Количество кадров) — 1. Вы можете создать стандартный avi-файл или сохранить серию изображений в виде набора bmp-файлов.

Трехмерный график

Трехмерный график дает представление о распределении значений физического параметра в сечении модели в виде поверхности, полученной смещением точки сечения по нормали к плоскости сечения на расстояние, пропорциональное значению физического параметра в этой точке (если рассечь такую поверхность плоскостью, перпендикулярной плоскости сечения, то линия пересечения рассекаемой и секущей поверхностей будет являться графиком изменения параметра вдоль линии проекции поверхности (трехмерного графика) на плоскость сечения (рис. 5.76)).

Физический параметр и коэффициент пропорциональности (**Distance factor**) задаются в окне **View Settings** (Установки просмотра), а плоскость сечения (**Section plane/face**), область визуализации (**Region**) и параметры отображения (**Display outlines**, **Use CAD geometry**, **Display boundary layer**) — в окне **3D-Profile Plot** (Трехмерный график), вызываемом при выборе **FloWorks** | **Results** | **Insert** | **3D-Profile Plot** (FloWorks | Результаты | Вставить | Трехмерный график).

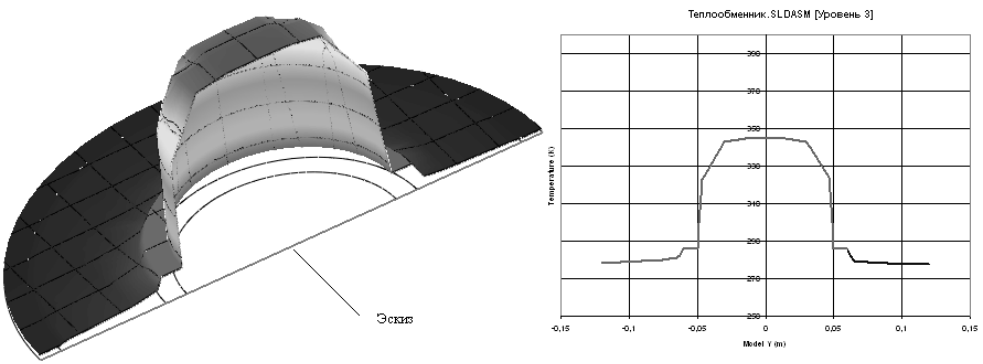


Рис. 5.76. Слева — трехмерной график показывает распределение температуры по сечению трубы и кожуха теплообменника, справа — график изменения этого же параметра вдоль эскиза, построенный с помощью инструмента **XY plot** (График)

Поверхность трехмерного графика может быть раскрашена в соответствии с распределением физического параметра в плоскости рассматриваемого сечения. Для этого в окне **View Settings** на вкладке **Contours** (Заливки) задается физический параметр, диапазон его изменения, число цветов и вид палитры, а на вкладке **3D-Profile Plot** (Трехмерный график) отмечается опция **Use from contours** (Установки от заливки). Если же выбран единый цвет (**Use fixed color**), то в окне **3D-Profile Plot** можно установить необходимый шаг сетки (**Grid step**), проецируемой на поверхность для лучшей визуализации формы поверхности.

Картины на поверхности

С помощью **Surface Plot** (Картина на поверхности) можно посмотреть распределение значений интересующего физического параметра (задается в окне **View Settings**) по выбранной поверхности модели, соприкасающейся с текучей средой. Значения параметра могут быть представлены в виде заливок, изолиний, также может быть показан вектор скорости и расчетная сетка.

Окно задания картины в сечении вызывается при выборе **FloWorks** | **Results** | **Insert** | **Surface Plot** (FloWorks | Результаты | Вставить | Картина на поверхности).

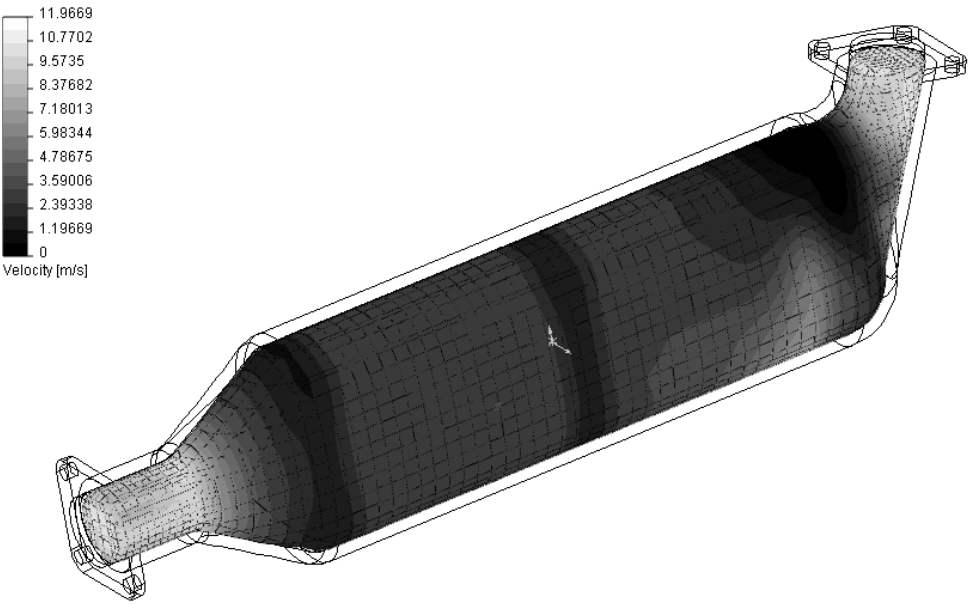


Рис. 5.77. Картины на поверхности

Интересующая поверхность выбирается непосредственно выделением в графической области. Если хотите выбрать сразу все поверхности модели, со-

прикасающиеся с текучей средой, то отметьте опцию **Use all faces** (Включить все поверхности). Если выделенная поверхность является границей раздела разных сред (между твердым телом и жидкостью, между жидкостью и пористой средой или между твердым телом и пористой средой), то необходимо задать среду (**Medium**), в которой хотите увидеть данную картину на поверхности. Для твердых сред в картине на поверхности может быть показана только температура (рис. 5.77).

Параметры картин на поверхности и область ограничения задаются аналогичным образом, как и для **Cut Plot** (Картины в сечении).

Картины поверхностей уровня

Поверхность уровня (**Isosurfaces**) какого-либо физического параметра показывает поверхность, в каждой точке которой значение параметра равно определенной величине. Физический параметр и его значение, а также настройки отображения (цвет, область визуализации и др.) задаются в окне **View Settings** (Установки просмотра) на вкладке **Isosurfaces** (Поверхности уровня). Для того чтобы заданные таким образом поверхности уровня показать в графической области, нужно в Дереве анализа щелкнуть правой кнопкой мыши на элементе **Isosurfaces** и в появившемся контекстном меню выбрать **Show** (Показать) или **FloWorks** | **Results** | **Insert** | **Isosurfaces** (FloWorks | Результаты | Вставить | Поверхности уровня) (рис. 5.78).

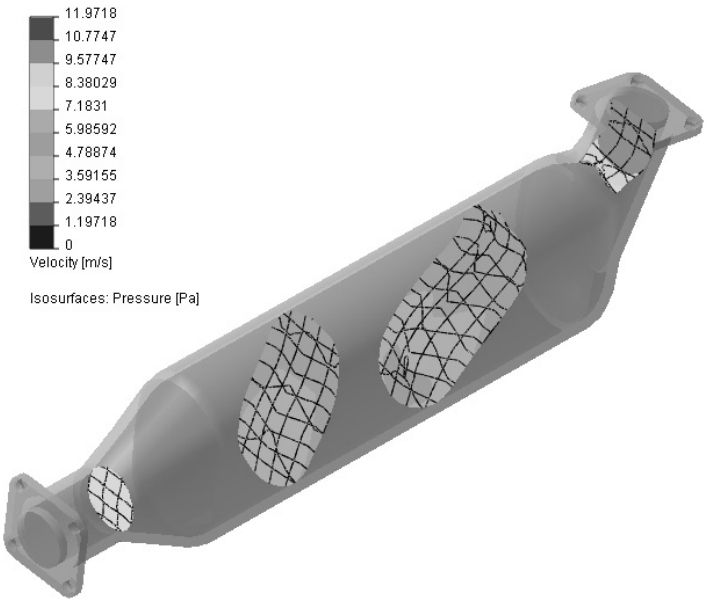


Рис. 5.78. Поверхности уровня давления раскрашены заливками согласно значению скорости на этой поверхности

Поверхности уровня могут быть раскрашены в соответствии с распределением физического параметра на линии вектора или изолинии. Для этого в окне **View Settings** на вкладке **Contours** (Заливки) задается физический параметр, диапазон его изменения, число цветов и вид палитры, а на вкладке **Isosurfaces** отмечается опция **Use from contours** (Установки от заливки). Если же выбран единый цвет (**Use fixed color**), то, щелкнув **Grid** (Сетка), можно установить необходимый шаг сетки (**Grid spacing**), проецируемой на поверхность для лучшей визуализации формы поверхности.

Для скрытия или удаления отображаемых поверхностей уровня щелкните правой кнопкой мыши на элемент **Isosurfaces** в Дереве анализа и выберите **Hide** (Скрыть) или **Clear and Hide** (Скрыть и очистить).

Траектории линий тока

Окно **Flow Trajectories** (Траектории течения) позволяет построить линии тока текучей среды, т. е. линии, в каждой точке которых вектор скорости направлен по касательной к ним. Чтобы построить линии тока в COSMOSFloWorks, необходимо на вкладке **Definition** (Определение) диалогового окна **Flow trajectories** (Линии тока) задать точки, через которые линии тока будут проходить. Кроме того, можно ограничить область построения линий тока, указав направление построения линий тока **Forward** (Вниз по потоку) или **Backward** (Вверх по потоку) относительно точек их задания. Если указываете **Both** (Оба направления), то линии тока строятся как вверх, так и вниз по потоку относительно точек их задания.

Окно задания картины в сечении вызывается при выборе **FloWorks** | **Results** | **Insert** | **Flow Trajectories** (FloWorks | Результаты | Вставить | Траектории течения) (рис. 5.79).

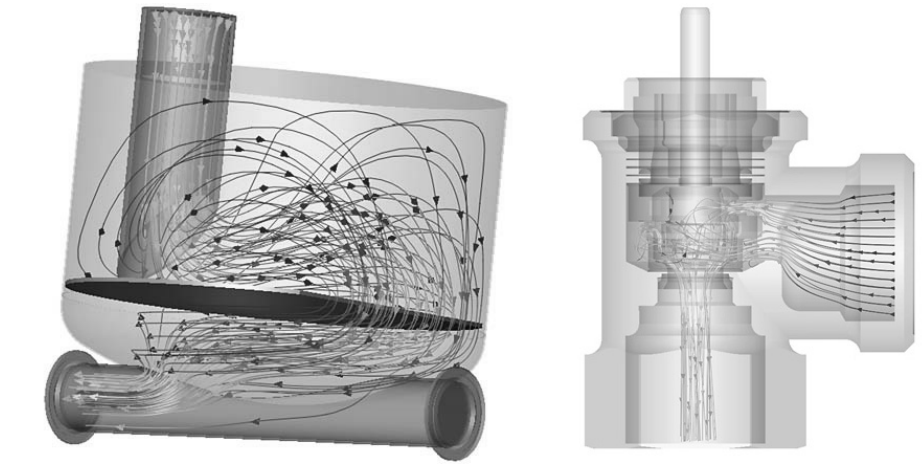


Рис. 5.79. Визуализация линий тока

Положение точек, через которые будут проходить построенные линии тока, можно определить несколькими способами: ввести координаты точек, непосредственно указать мышью положение точек в графической области на выделенной плоскости или плоской поверхности или задать число точек, равномерно распределенных на выделенной поверхности, плоскости, кривой или на выделенном эскизе. Способ задания точек выбирается в списке **Start points from** (Способ задания начальных точек):

- **Table** (Таблица) — точки задаются таблично. Это можно сделать двумя способами: либо ввести координаты точек в Глобальной системе координат (**Global Coordinate system**), либо указать мышью нужные точки в графической области на выбранной плоскости или плоской поверхности модели (или на плоскости, смещенной от выбранной на заданный плоскопараллельный сдвиг (**Shift**)). В любом случае, координаты всех заданных точек будут показаны на вкладке **Table** (Таблица). Предварительно перед выбором точек на заданной плоскости (плоской поверхности), необходимо ее зафиксировать, нажав **Fix** (Закрепить). В противном случае, любые нажатия в графической области не будут восприниматься COSMOSFloWorks как указание местоположения точки. Чтобы точка попала в таблицу, необходимо после ввода ее координат или указания ее положения в графической области нажать **Add** (Добавить). При указании точек в области можно также включить опцию **Auto Add** (Автоматическое добавление), для автоматического ввода в таблицу координат указываемых точек;

Совет

Можно также скопировать координаты точек из Excel. Для этого создайте таблицу координат точек в Excel в виде столбцов X, Y, Z (т. е. того же вида, как на вкладке **Table**). Затем скопируйте эту таблицу в буфер обмена, откройте вкладку **Table** (Таблица) и нажмите клавиши <Ctrl>+<V>. В результате все попадающие в текучую среду точки включаются в таблицу на вкладке **Table** (Таблица).

- **Reference** (Равномерно) — точки, число которых задается в поле **Number of trajectories** (Число линий траекторий), автоматически распределяются равномерно по выбранной плоскости или плоской или кривой поверхности, либо вдоль кривой или эскиза.

Совет

Для быстрого выделения поверхности, на которой задано граничное условие или поверхностная цель, щелкните на имени этого условия или цели в Дереве анализа COSMOSFloWorks.

Параметры отображения линий тока задаются на вкладке **Settings** (Установки):

- **Cross size** (Ширина) — ширина полосок или стрелок при показе линий тока;

- **Draw trajectories as** (Показать линии тока как) — линии тока могут быть показаны линиями (**Line**), полосками (**Band**) или линиями со стрелками (**Line with Arrow**);
- **Fixed color** (Фиксированный цвет) — если на вкладке **Flow Trajectories** (Линии тока) окна **View Settings** (Установки Просмотра) отмечена опция **Use fixed color** (Фиксированного цвета), то здесь выбирается цвет линий тока;
- **Maximum length** (Максимальная длина) — эта опция ограничивает длину линий тока заданием максимальной длины линии тока;
- **Maximum time** (Максимальное время) — эта опция ограничивает длину линий тока заданием максимального времени, в течение которого частица текучей среды может двигаться вдоль линии тока с учетом ее скорости, рассчитанной на этой линии;
- **Use CAD geometry** (Использовать геометрию САПР) — при отключении этой опции линии тока будут построены для сеточного представления геометрии модели *(см. разд. "Картины в сечении")*.

Опции **Maximum length** (Максимальная длина) и **Maximum time** (Максимальное время) позволяют сэкономить процессорное время и память компьютера, требующиеся для построения линий тока, особенно в вихревых областях.

Чтобы посмотреть, как изменяются параметры вдоль линий тока, можно экспортировать в Excel или текстовый файл результаты расчета, полученные на этих линиях. Для этого на вкладке **Export** (Экспорт) необходимо задать физические параметры, значения которых на линии тока вам интересны. Если хотите построить графики изменения параметров в Excel, необходимо выбрать абсциссу графика (**Abscissa**) из следующих вариантов: длина кривой (**Curve length**), координата Глобальной системы координат (**Model X, Y, Z**) или время движения по линии тока (**Time**). При выводе координаты в текстовый файл текущая длина линии, время движения и значение параметра выводятся построчно. Местоположение и имя файла можно задать, щелкнув в поле **Text file path** (Имя текстового файла).

Кроме того, при нажатии **Create Curves** (Создание кривых) будут созданы кривые, повторяющие форму линий тока. Эти кривые могут быть впоследствии также использованы для построения графиков изменения значений физического параметра вдоль этих кривых — *см. далее разд. "Построение графика"*.

Одним из эффектных способов визуализации результатов является создание фильма линий тока. Такой фильм наглядно показывает распространение текучей среды по объему расчетной области. Для стационарных задач (или для выбранного момента времени нестационарной задачи) кадр фильма — это

картина распространения жидкости (или газа) вдоль линии тока в один из моментов времени, на которые равномерно разбито максимальное (среди всех отображаемых траекторий линий тока) время распространения жидкости (или газа) по линиям тока. Число интервалов времени равно числу кадров фильма (**Number of frames**), которое задается на вкладке **Animation** (Фильм).

Для нестационарных задач число кадров фильма соответствует количеству моментов времени, в которые сохранялись результаты, т. к. в этом случае кадр фильма — картина распространения траекторий в один из сохраненных моментов времени *(см. также разд. "Фильмы для просмотра результатов" данной главы)*.

Расчет частиц

В версии COSMOSFloWorks 2005 прежние возможности расчета движения частиц в установившемся потоке текучей среды значительно расширились, в результате чего появился новый инструмент постпроцессора — **Particle Study** (Расчет частиц). С помощью **Particle Study** возможно показать траектории движения твердых или жидких частиц (например, пыль или капли) в текучей среде, а также рассчитать следующие показатели взаимодействия частиц со стенками модели: суммарную (для всей поверхности стенки) интенсивность уноса материала стенки вследствие соударения частиц со стенкой (**Total Erosion Mass Rate**) или суммарную интенсивность налипания частиц на стенку (**Total Accumulation Mass Rate**). Посмотреть значения интенсивности уноса и налипания на выбранной поверхности можно после проведения расчета частиц в окне **Surface Parameters** (Параметры на поверхности).

Примечание

Интенсивность налипания или эрозии не рассчитывается на поверхностях тела, являющегося пористой средой.

Модель текучей среды с жидкими или твердыми частицами в COSMOSFloWorks предполагает сферические частицы постоянной массы, воздействие которых на течение пренебрежимо мало, при этом течение влияет на скорость и температуру (а значит, и плотность) частиц, что, в свою очередь, влияет на размер частиц. Для расчета частиц необходимо задать точки входа частиц в текучую среду, начальные параметры частиц (температура, диаметр, скорость; а для расчета налипания или эрозии также интенсивность появления частиц), материал частиц и условия взаимодействия частиц со стенками (отражение или поглощение). Если необходимо, можно также учесть влияние гравитации на движение частиц.

См. также разд. "Течения с частицами" данной главы.

Постановка задачи расчета частиц

Постановка задачи расчета частиц полностью определяется в окне **Particle Study**, вызываемом при выборе **FloWorks** | **Results** | **Insert** | **Particle Study** (FloWorks | Результаты | Вставить | Расчет частиц) (рис. 5.80).

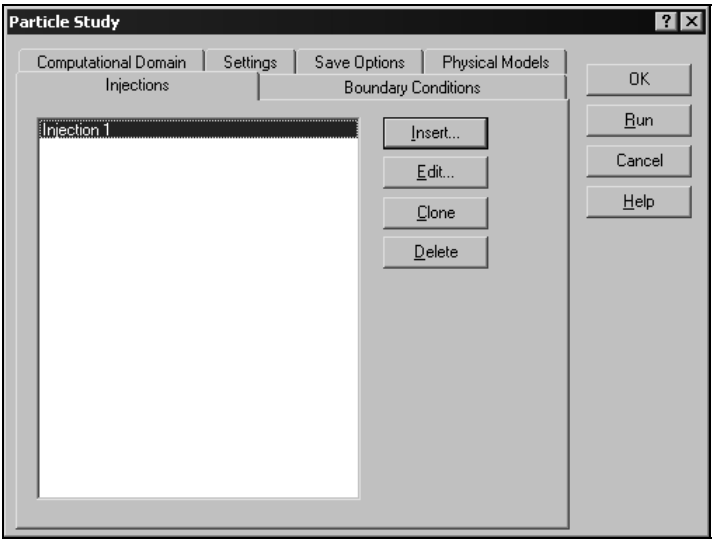


Рис. 5.80. Окно **Particle Study**

На вкладке **Injections** (Фракции) определяются фракции частиц, рассматриваемых в задаче. Фракция частиц (injection) — это набор частиц одного и того же материала с одинаковыми начальными условиями, т. е. условиями, которые имеют частицы при входе в текучую среду (скорость, диаметр, температура). Также для фракции задается ее суммарный массовый расход (количество массы частиц, вносимое данной фракцией в текучую среду в единицу времени), который используется для расчета суммарной интенсивности налипания частиц и эрозии стенки.

Для задания фракции на вкладке **Injections** (Фракции) окна **Particle Study** (Расчет частиц) щелкните **Insert** (Вставить). В появившемся окне **Injection** (Фракция) на вкладке **Definition** (Задание) задаются точки входа частиц, а на вкладке **Settings** (Параметры) — начальные условия (**Initial Conditions**), материал (**Particle material**) и массовый расход фракции (**Mass flow rate**).

Подходящий способ задания точек входа частиц выбирается в списке **Injection type** (Тип фракции). Задание точек входа частиц через таблицу (**Table**) или равномерно на выделенном элементе (**Reference**) аналогично заданию точек, через которые проходят траектории линий тока *(см. разд."Траектории*

линий тока" данной главы). Можно также выбрать текстовый файл (**File**), в котором заданы координаты точки в Глобальной системе координат, компоненты вектора скорости (или значение скорости, если задается относительная скорость), значение температуры и интенсивность появления частиц (кг/с) в точке с заданными координатами. Значения задаются в системе единиц проекта в одну строку через пробел.

Начальная скорость и температура всех частиц фракции могут быть заданы в абсолютных (тип **Absolute**) величинах либо относительно значений скорости и температуры потока текучей среды в точках входа частиц (тип **Relative**). Абсолютное значение скорости и направление движения частиц определяется заданием компонентов вектора скорости. В случае задания относительной скорости (**Velocity condition type** = **Relative**) указывается только значение скорости, т. к. в этом случае направление движения частицы совпадает с направлением движения потока в точке входа частицы. Аналогично, при задании относительной температуры (**Temperature condition type** = **Relative**) указанное значение температуры есть разница между температурой частицы и температурой потока в точке входа частицы.

На вкладке **Boundary Conditions** (Граничные условия) определяются условия взаимодействия частиц со стенками модели. Возможные условия взаимодействия: полное прилипание (**Absorption** — свойственно каплям жидкости при не очень высоких скоростях соударений), идеальное (**Ideal reflection** — угол падения равен углу отражения) или неидеальное отражение (**Reflection**). При неидеальном отражении задаются такие коэффициенты изменения нормальной и тангенциальной скорости **en** и **et**, как показано на рис. 5.81.

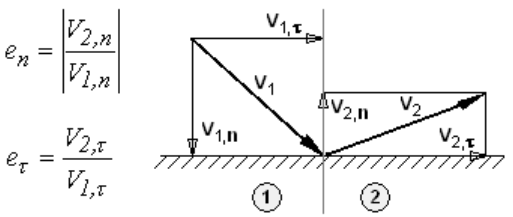


Рис. 5.81. Неидеальное отражение частицы от поверхности стенки модели

По умолчанию на всех поверхностях модели задано условие прилипания. Чтобы изменить это условие для всех поверхностей, выделите **<Default>** (<По умолчанию>) и нажмите **Edit** (Изменить). Чтобы задать условие взаимодействия частицы со стенкой, отличное от используемого по умолчанию, для какой-то конкретной стенки, нажмите **Insert** (Вставить) (рис. 5.82).

На вкладке **Computational Domain** (Область расчета) задаются координаты, ограничивающие область, в которой будет проведен расчет частиц. По умолчанию расчет будет проведен во всей расчетной области.

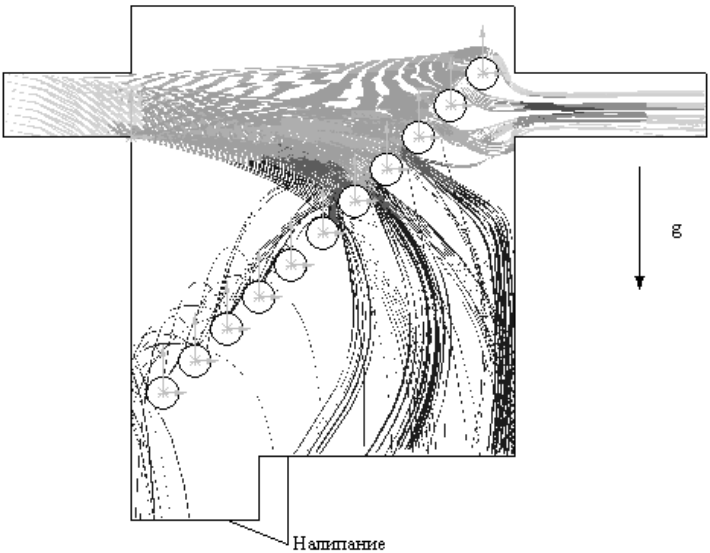


Рис. 5.82. Траектории частиц различной массы в коллекторе. Вектор гравитации направлен вниз, на дне коллектора стоит условие налипания, на остальных поверхностях — идеальное отражение

На вкладке **Settings** (Параметры) определяются критерии, ограничивающие длину траекторий частиц: **Максимум iteration count** (Максимальное число переходов) — траектория частицы обрывается по достижению заданного числа переходов между точками (траектория частицы определяется последовательным переходом от одной точки к другой на расстояние, зависящее от скорости в данной точке и шага по времени), критерии **Максимум length** и **Максимум time** работают так же, как и для траекторий линий тока.

На вкладке **Physical Models** (Физические модели) вы можете учесть влияние гравитации (**Gravity**), задав вектор гравитации, и включить расчет интенсивности налипания частиц (**Calculate Total Accumulation Mass Rate**) или интенсивности эрозии стенки (**Calculate Total Erosion Mass Rate**).

Формулы расчета интенсивности налипания и эрозии указаны в разд. "Течения с частицами" данной главы.

В случае расчета эрозии, если необходимо, можно задать зависимость интенсивности эрозии от угла падения частиц (**Function of impact angel**), относительной скорости падения частицы (**Function of relative particle velocity)** и диаметра частицы (**Function of particle diameter**), в общем случае, скорость стенки может быть не равна нулю *(см. разд. "Задание подвижных стенок" данной главы)*. Зависимости задаются в виде таблиц при нажатии на кнопку **Design** (Задание). Если имеющиеся у пользователя зависимости приведены

в системе единиц, отличной от системы единиц, используемой в проекте, можно задать коэффициент пропорциональности (**Coefficient K**).

На вкладке **Save Options** (Установки сохранения) выбираются физические параметры частиц (координаты точек траекторий и значения в них скорости, длина траектории, температура и др.), которые будут доступны для просмотра после завершения расчета частиц. При желании значения выбранных параметров частиц (**Particle parameters**) и параметров потока текучей среды (**Fluid parameters**) в точках траекторий частиц можно сохранить в текстовый файл сразу после завершения расчета частиц.

Для запуска расчета частиц нажмите **Run** (Запустить). После окончания расчета в Дереве анализа COSMOSFloWorks появится новый элемент — **Particle Study n**, где n — порядковый номер задачи расчета частиц. Чтобы посмотреть результаты расчета, щелкните правой кнопкой мыши на этом элементе и выберите **View results** (Просмотр результатов).

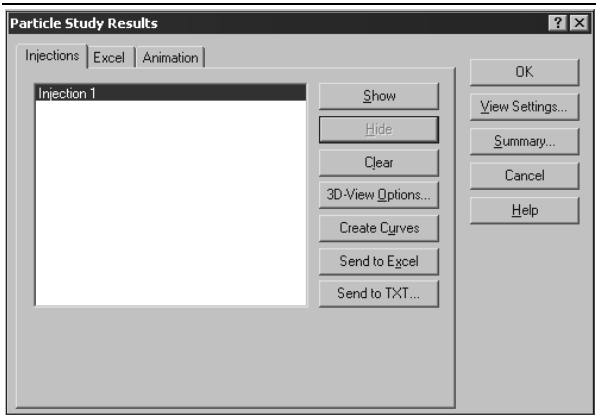
Примечание

В одном проекте может находиться сколь угодно много различных постановок задач расчета частиц. Однако просмотр результатов возможен только для активной задачи. Чтобы активизировать задачу, в Дереве анализа щелкните правой кнопкой мыши на названии задачи и выберите **Activate Particle Study** (Активизировать задачу расчета частиц).

Просмотр результатов расчета частиц

В окне **Particle Study Results** (Результаты расчета частиц) задаются параметры просмотра траекторий частиц в графической области, осуществляется просмотр и вывод в Excel или текстовый файл значений физических параметров частиц (выбранных для сохранения при постановке задачи) и потока текучей среды взятых на линиях траекторий частиц, а также задаются настройки фильма распространения частиц (рис. 5.83).

Для того чтобы показать траектории той или иной фракции частиц, на вкладке **Injections** (Фракции) выделите имя фракции и нажмите **Show** (Показать). Размер, цвет и форма (полоса, линия или линия со стрелками) траекторий выбранной фракции задаются в окне **3D-View Options** (Опции просмотра). Для построения графика изменения параметров текучей среды и параметров частиц вдоль линий траекторий нажмите **Send to Excel** (Вывод в Excel). Физический параметр и параметр абсциссы графика задается на вкладке **Excel**. Для вывода таблицы значений параметров в текстовый файл выберите **Send to TXT** (Вывод в файл). При нажатии **Create Curves** (Создание кривых) будут созданы кривые, повторяющие форму линий траекторий частиц выбранной фракции.



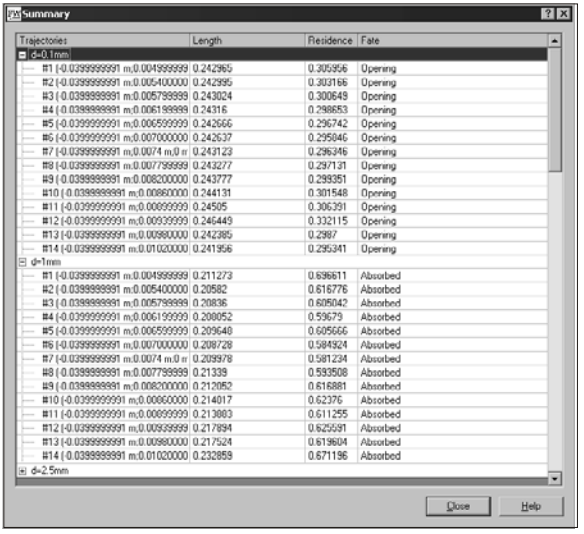


Рис. 5.83. Окна **Particle Study Results** и **Summary**

Дополнительно в окне **Summary** (Сводный отчет) можно посмотреть следующую информацию для всех фракций:

- **Trajectories** (Траектории) — координаты точек входа частиц;
- **Length** (Длина) — длина траектории;
- **Residence time** (Продолжительность жизни) — время распространения траектории частицы внутри расчетной области до того момента, как она исчезнет по одной из причин, показанных в столбце **Fate** (Причина завершения): вылет за пределы расчетной области через отверстие (**Opening**), налипание на стенку (**Absorbed**), ограничение длины траектории одним из критериев (**Maximum iteration count**, **Maximum length**, **Maximum time**).

Создание фильма траекторий частиц аналогично созданию фильма линий тока.

Построение графика

График (**XY Plot**) позволяет посмотреть изменение интересующих вас физических параметров вдоль заданной линии. В качестве этой линии можно использовать любую определенную графическими средствами линию, например, двумерные или трехмерные эскизы, кривые. Как координаты линии, так и значения физических параметров вдоль нее, экспортируются в Excel-файл, в котором на странице **Plot Data** (Таблицы) формируются соответствующие таблицы, а на других страницах строятся графики.

Если заданная вами линия проходит через области, где интересующий вас физический параметр не определен, то график будет построен только для тех сегментов линии, на которых данный параметр определен. Например, это будет сделано, если заданная линия частично выходит за пределы расчетной области или проходит через твердое тело, тогда как в качестве параметров выбраны параметры текучей среды. Каждый соответствующий сегмент графика имеет свою таблицу на странице Excel-файла и имя вида Sketch1@Arc1@Line3@Spline1, т. е. начинающееся с имени линии (т. е. эскиза или кривой).

Примечание

Если заданная вами линия лежит на поверхности твердого тела, соприкасающейся с текучей средой, то, вследствие незначительных колебаний координат этой линии, часть этой линии может проходить по твердому телу, а часть — по текучей среде. В результате графики параметров текучей среды (твердого тела) будут построены только для тех участков линии, которые расположены в текучей среде (твердом теле). Во избежание этого необходимо смещать линию на незначительное расстояние внутрь текучей среды, или внутрь твердого тела, — в зависимости от того, какой физический параметр вас интересует.

Для создания графика выберите **FloWorks** | **Results** | **Insert** | **XY Plot** (FloWorks | Результаты | Вставить | График) (рис. 5.84).

Эскизы или кривые, графики изменения значений выбранного физического параметра вдоль которых хотите построить, выбираются в Дереве проектирования (**FeatureManager tree**). Если модель — сборка, то необходимо, чтобы эти эскизы или кривые лежали в корневой части Дерева проектирования.

Необходимо также задать следующие параметры графика:

- **Abscissa** (Абсцисса) — параметр, который откладывается по оси абсцисс графика: **Curve Length** (Расстояние вдоль линии) — расстояние вдоль линии, отсчитываемое от точки, с которой было начато построение этой ли-

нии; **Model X, Y, Z** (Оси X, Y, Z модели) — в качестве оси абсцисс графика выбирается одна из осей Глобальной системы координат; **Sketch X, Y, Z** (Оси X, Y, Z эскиза) — в качестве оси абсцисс графика выбирается одна из осей системы координат эскиза;

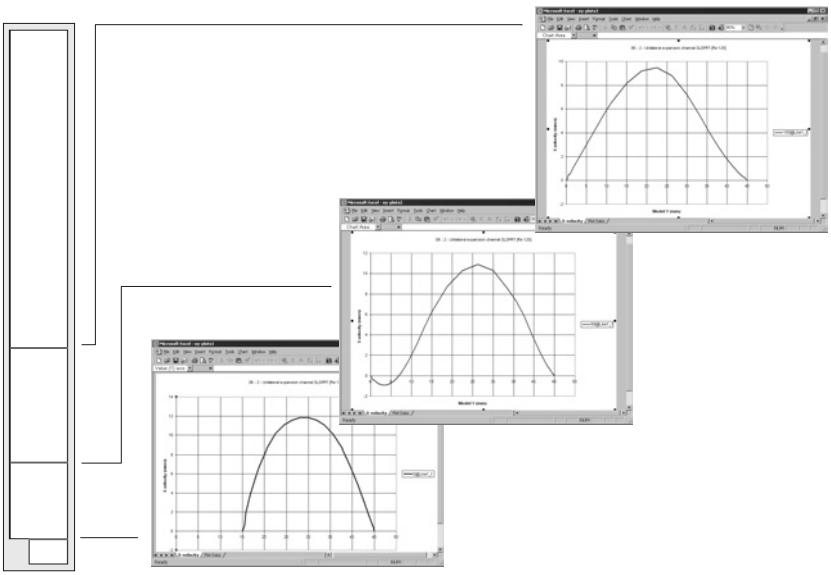


Рис. 5.84. График изменения компонента скорости вдоль линии эскиза показан в Excel с помощью **XY Plot**

- **Template** (Шаблон) — по умолчанию, график создается на основе стандартного шаблона с именем **xy-plots.xlt**. Если вы имеете опыт VBA-программирования в Excel, то можете изменить стандартный шаблон, чтобы организовать вывод данных в Excel нужным вам образом. Чтобы созданный шаблон использовался при построении графика, его необходимо поместить в папку **<install_dir> / Lang / english / Template / XY plot** и выбрать в списке **Template** (Шаблон);
- **Geometry Resolution** (Разрешение геометрии) — регулирует, насколько хорошо эскиз (кривая) аппроксимируется линейными участками. Установка более высокого разрешения приводит к замедленному созданию графика, но создается более точная форма кривой. Для линии достаточно установить минимальное разрешение геометрии (2 конечных точки). Для сложных кривых рекомендуется задавать большее разрешение;
- **Parameter Resolution** (Разрешение параметра) — контролирует количество дочерних сегментов (определяемых **Geometry Resolution** (Разрешением геометрии), расчетной сеткой, геометрией модели и полем течения),

принимая во внимание изменение параметра. Перед созданием графика, COSMOSFloWorks исключает ненужные точки, что позволяет ускорить его создание. Если кривая параметра может быть линейно аппроксимирована по числу дочерних сегментов (внутренний критерий зависит от изменения параметра и заданного разрешения параметра так, что чем выше разрешение, тем меньше критерий), то ненужные сегменты исключаются, что позволяет уменьшить общее число точек графика. Установка более высокого разрешения приводит к замедленному созданию графика (обрабатывается большее количество точек), но создается более точный профиль кривой;

- **Coordinate system** (Система координат) — для X-, Y-, Z-составляющих вектора скорости необходимо выбрать систему координат, в которой эти составляющие определены. По умолчанию используется **Global Coordinate System** (Глобальная система координат). При желании вместо нее можно выбрать любую другую систему координат в Дереве проектирования (**FeatureManager tree**);
- **Equidistant points** (Равноудаленные точки) — график строится по значениям параметра в точках, равномерно распределенных на линии эскиза или кривой.

Вы можете задать установки графиков и воспользоваться опцией **Batch Results Processing** (Автоматическая обработка результатов расчета) для автоматического построения графиков без вызова окна **XY-Plot** для каждого графика. В этом случае Excel-файлы с графиками будут сохранены в папку проекта.

Построение графика целей

График целей показывает изменение в процессе расчета физического параметра, заданного как цель (goal). График строится в Excel на отдельной странице. В этом же файле на странице **Summary** (Итог) показаны значения этих целей в момент завершения расчета (или в момент физического времени задачи, выбранный для просмотра результатов расчета нестационарной (time-dependent) задачи).

Цели, для которых вы хотите построить график их изменения во время расчета, задаются в окне **Goals** (Цели), вызываемом при выборе **FloWorks** | **Results** | **Goals** (FloWorks | Результаты | Цели). В этом же окне определяется параметр, откладываемый по оси абсцисс графика (**Abscissa**):

- **CPU time** (Процессорное время) — процессорное время решения задачи (в секундах);
- **Iterations** (Итерации) — число выполненных итераций;

- **Travels** (Продувки) — число выполненных продувок;
- **Physical time** (Физическое время) — физическое время задачи (т. е. развития рассчитываемого процесса с момента начала расчета), только для нестационарных задач.

При желании можно изменить заданный COSMOSFloWorks вывод данных в Excel, заменив стандартный шаблон (goals.xlt) своим собственным, выбрав его в списке **Template** (Шаблон). Чтобы ваш шаблон стал доступен для выбора, его необходимо поместить в папку **<install_dir>/Lang/english/Template /Goals.Template**.

Задание установок окна **Goals** сохраняется в Дереве анализа как элемент **Goal Plots** (График целей). Можно воспользоваться опцией **Batch Results Processing** для автоматического создания графиков целей заданных ранее (т. е. имеющихся элементов **Goal Plots**) без вызова окна **Goals**. В этом случае, Excel-файлы с графиками будут сохранены в папку проекта.

Просмотр параметров на поверхности и в объеме

С помощью диалогового окна **Surface Parameters** (Параметры на поверхности) можно посмотреть минимальные, максимальные и средние значения локальных (**Local**) физических параметров (давления, температуры, скорости, и т. д.) и интегральных (**Integral**) физических параметров (расходы, силы, и т. д.) на выбранной поверхности, а с помощью диалогового окна **Volume Parameters** (Параметры в объеме) в выбранном объеме (интегральные параметры для объема — масса и объем). Полученные значения могут быть также экспортированы в Excel.

Окно просмотра параметров на поверхности вызывается при выборе **FloWorks** | **Results** | **Insert** | **Surface Parameters** (FloWorks | Результаты | Вставить | Параметры на поверхности), а окно просмотра параметров в объеме при выборе **FloWorks** | **Results** | **Insert** | **Volume Parameters** (FloWorks | Результаты | Вставить | Параметры в объеме).

Если решалась нестационарная (time-dependent) задача, то в данном диалоговом окне используются дополнительные вкладки **Transient** (Моменты времени) и **Table** (Таблица). На вкладке **Transient** (Моменты времени), открыв дополнительное диалоговое окно **Scenario** (Моменты), можно из моментов физического времени задачи, заданных для сохранения результатов, выбрать интересующие вас для просмотра значений локальных и интегральных параметров на вкладке **Table**. Кроме того, на вкладке **Transient** (Моменты времени) в списке **Current time** (Текущий момент времени) выбирается момент времени для просмотра значений физических параметров на вкладках **Local** (Локальные) и **Integral** (Интегральные) данного диалогового окна.

Совет

Если решалась нестационарная (time-dependent) задача, то, экспортировав в Excel значения физических параметров, полученные в выбранные вами моменты времени, можно в Excel построить графики изменения этих физических параметров во времени.

Вы также можете задать шаблон (**Template**) представления результатов в Excel и систему координат (**Coordinate system**) для расчета компонентов сил, моментов (на поверхности) и скорости (в объеме).

Для просмотра значений параметров в объеме текучей среды этот объем должен быть задан как отдельный компонент (деталь сборки или тело многотельной детали) и отключен в окне **Component Control** (Управление деталями). *См. разд. "Управление деталями" данной главы.*

Просмотр параметров в точках

С помощью диалогового окна **Point Parameters** (Параметры в точках) можно посмотреть значения физических параметров в точках, заданных вами в текучей среде или твердом теле в пределах расчетной области. Точки задаются либо их координатами, либо щелканьем этих точек в графическом окне (**One by one**) на выбранных плоскостях или плоских поверхностях модели (**Plane/planar surface**) или в плоскости, отстоящей от выбранной на заданное расстояние (**Plane position**), либо заданием некоторой сетки (**Grid**), узлы которой будут этими точками. Значения параметров в заданных таким образом точках будут показаны на вкладке **Table** (Таблица), кроме того, их можно экспортировать в Excel-файл.

Окно просмотра параметров в точках вызывается при выборе **FloWorks** | **Results** | **Insert** | **Point Parameters** (FloWorks | Результаты | Вставить | Параметры в точках).

Если решалась нестационарная задача, выбор интересующих моментов времени осуществляется аналогично просмотру параметров на поверхности или в объеме. Аналогичным же образом можно задать шаблон представления результатов, экспортируемых в Excel, и систему координат.

Создание отчета

В COSMOSFloWorks предусмотрена возможность создания в Microsoft Word© отчета (**Report**) о выполненном расчете. Для создания отчета выберите **FloWorks** | **Results** | **Report** (FloWorks | Результаты | Отчет).

Информация отчета может быть включена в существующий документ Word, либо может быть создан новый документ с этой информацией на базе стандартного или заданного пользователем шаблона.

Шаблон определяет расположение информации в документе посредством имеющихся в нем специальных идентификаторов — ID. В процессе создания отчета COSMOSFloWorks заменяет ID информацией из активного проекта, ассоциированной с данным ID. Для создания отчета на базе шаблона щелкните **From Template** (По шаблону) и выберите желаемый шаблон. В COSMOSFloWorks имеются следующие стандартные шаблоны:

- **id_fullreport.dot** — позволяет создать текстовый отчет, включающий в себя всю доступную информацию о текущем проекте в краткой форме (с использованием всех **short** (краткие) ID);
- **idf_fullreport.dot** — позволяет создать текстовый отчет, включающий в себя всю доступную информацию о текущем проекте в полной форме (с использованием всех **full** (полные) ID; это самый полный отчет);
- **id_inputdata.dot** — позволяет создать текстовый отчет об исходных данных проекта в краткой форме;
- **idf_inputdata.dot** — позволяет создать текстовый отчет об исходных данных проекта в полной форме;
- **id_results.dot** — позволяет создать текстовый отчет, включающий в себя только краткую информацию о результатах расчетов.

В дополнение к стандартным шаблонам можно задать свой шаблон на базе имеющихся ID. Для создания своего шаблона щелкните **New Template** (Новый шаблон). Далее в появившийся пустой документ вставьте желаемые ID, которые будут заменяться соответствующей информацией проекта при создании отчета на основе этого шаблона. Возможные ID и их описание представлены на вкладке **IDs** окна **Report** (Отчет). Некоторые ID имеют две формы: полную (**full**) с префиксом IDF_ и краткую (**short**) с префиксом ID_. Полная форма дает максимум информации о свойстве проекта, ассоциированным с ID.

Информация, закрепленная за ID, или сам ID (при включенной опции **Insert IDs only** (Вставить идентификатор)) добавляется нажатием кнопки **Add to Report** (Добавить в отчет) либо в конец документа (**End of the document**), либо в то место, где находится курсор мыши (**Current position**).

Для включения информации в существующий документ его необходимо предварительно открыть, щелкнув **Open File** (Открыть файл), и включить возможность добавления данных COSMOSFloWorks в этот файл. Для этого в списке **Available target documents** (Имеющиеся документы) необходимо выделить имя документа и нажать **Attach** (Присоединить). Для включения информации в новый пустой документ щелкните **New Document** (Новый документ): появится новый документ Word с включенной возможностью добавления данных (Attached).

Помимо текстовой информации, определенной соответствующими ID, с помощью вкладки **Pictures and Charts** (Рисунки и графики) можно также добавить рисунки (текущий вид окна SolidWorks или рисунок из bmp-файла) и Excel-графики. Необходимо заметить, что добавляется вся информация с текущего листа выбранной книги Excel. Если в момент добавления Excel-файл закрыт, то информация берется с листа, появляющегося при открытии этого файла. Добавление текущего вида и выбор файла рисунка или книги Excel осуществляется при нажатии **Add to Report** (Добавить в отчет).

Примечание

Каждый раз, когда вы щелкаете **Add to Report** (Добавить в отчет), информация добавляется во все файлы, для которых включена возможность добавления данных COSMOSFloWorks. У таких файлов в списке **Available target documents** (Имеющиеся документы) в колонке **Attached** (Присоединенный) указано **Yes**.

После добавления данных в документ или ID в шаблон необходимо переключиться в Word и сохранить эти документы.

Вы можете воспользоваться опцией **Batch Results Processing** (Автоматическая обработка результатов расчета) для автоматического создания отчетов на базе шаблонов без вызова окна **Report**. В этом случае отчеты будут сохранены в папку проекта.

Фильмы для просмотра результатов

В COSMOSFloWorks для просмотра результатов расчета в пространстве и во времени можно создать фильмы (**Animation**) двух типов:

- при просмотре результатов решения стационарных задач, а также результатов решения нестационарных задач, для выбранного момента физического времени задачи можно создать фильм, показывающий изменение в пространстве значений физических параметров, представленных картиной в сечении, линиями тока, траекториями частиц или поверхностями уровней. Параметры фильма картин в сечении, линий тока и траекторий частиц задаются, соответственно, в окнах **Cut Plot**, **Flow Trajectories** и **Particle Study Results**, а параметры фильма поверхностей уровня — в окне **View Settings**;
- при просмотре результатов решения нестационарных (time-dependent) задач можно создать фильм, показывающий изменение во времени значений физических параметров, представленных картиной в сечении, трехмерным графиком, картиной на поверхности, линиями тока, траекториями частиц или поверхностями уровня.

Для просмотра изменения значений физических параметров во времени, предварительно для любого момента времени создайте те картины результа-

тов (картины в сечении, картины на поверхности, трехмерный график и т. д.), изменение во времени которых вас интересует. Далее выберите **FloWorks | Results | Transient Animation** (FloWorks | Результаты | Фильм нестационарных результатов) для вызова окна **Animation** (Фильм), в котором, щелкнув **Scenario** (Моменты), укажите моменты времени, используемые для создания фильма (кадр фильма показывает значения физического параметра в данный момент физического времени задачи). Кроме того, для фильма любого типа необходимо задать следующие параметры:

- **Static frames** (Кадры фильма) — отметьте опцию **BMP files** (BMP-файлы), если хотите сохранить каждый кадр фильма в виде bmp-файла. В поле **Location** (Место хранения) с помощью **Browse** (Путь) укажите папку для этих файлов. В поле **Name template** (Шаблон имени) укажите общую часть имен этих файлов;
- **Movie** (Фильм) — отметьте опцию **AVI file** (AVI-файл), если хотите создать фильм формата AVI. С помощью **Browse** (Путь) укажите папку для этого файла. Укажите скорость смены кадров в фильме — число кадров в секунду (**Frame rate**). Отметьте **Compressed** (**Microsoft Video 1**), если хотите, чтобы фильм был сжат с помощью программы сжатия Microsoft Video 1.

Для создания фильма щелкните **Create** (Создать), а для его просмотра в стандартном проигрывателе avi-файлов щелкните **Play** (Проигрывать).

5.5.10. Инструменты COSMOSFloWorks

В этом разделе дается краткое описание инструментов COSMOSFloWorks, доступных из меню **FloWorks | Tools** (FloWorks | Инструменты):

- **Copy Features** (Копирование элементов) — позволяет скопировать элементы активного проекта (цели, граничные условия, источники, вентиляторы и др.) в другие проекты открытых моделей;
- **Parameter Editor** (Редактор параметров) — позволяет одновременно (в одном окне) менять значения параметров, общих для различных элементов исходных данных, в том числе различных проектов;
- **Engineering Database** (Инженерная база данных) — база данных, содержащая материалы, системы единиц, типы радиационных поверхностей и др. *Подробную информацию об Инженерной базе данных см. в разд. "Редактирование проекта"*;
- **Check Geometry** (Проверка геометрии) — позволяет проверить геометрию модели на наличие конфликтных сопряжений и определить пригодность модели к расчету в COSMOSFloWorks. *Подробную информацию о проверке геометрии см. в разд. 5.4.1*;

- **Support Service** (Сервис поддержки) — если при использовании COSMOSFloWorks возникли проблемы, можно обратиться в службу поддержки с помощью Мастера службы поддержки (**Support Service**), который предназначен для сбора информации о проблеме, архивации нужных файлов и отправки их по электронной почте;
- **Calculator** (Калькулятор) — специальный калькулятор позволяет выполнять различные вспомогательные вычисления с помощью газодинамических формул. Например, можно использовать калькулятор для анализа опорожнения баков со сжатым газом через небольшое отверстие (отверстия) в окружающую среду с заданным противодавлением. Такая задача требует значительных затрат машинного времени, поскольку она нестационарная, а в струе истекающего газа имеются волны сжатия и разрежения, для расчета которых в COSMOSFloWorks приходится использовать очень малые шаги по времени. Во многих случаях, время опорожнения бака существенно больше этих шагов, так что эта нестационарная задача решается очень долго. С другой стороны, как при сверхзвуковом, так и при дозвуковом истечении газа из бака изменение параметров газа в баке во время его опорожнения может быть легко рассчитано простым интегрированием обыкновенного дифференциального уравнения, что осуществлено в газодинамическом калькуляторе;
- **Parametric Study** (Параметрическое исследование) — позволяет провести серию расчетов с варьированием выбранного параметра (одного из размеров модели или одного из параметров граничного условия) с целью определения такого его значения, при котором выбранный в качестве цели (goal) данного параметрического исследования результат расчета становится равным (или достаточно близким) заданному пользователем значению. Варианты модели с присоединенными проектами COSMOSFloWorks, отличающимися друг от друга только значением варьируемого параметра (т. е. размера модели или параметра граничного условия), дадут в результате расчета различные значения цели данного параметрического исследования. Полученные значения цели параметрического исследования сравниваются с заданным целевым значением, которое может быть константой или табличной или аналитической зависимостью от некоторых параметров. Если разность между полученным значением цели и заданным целевым значением по абсолютной величине превышает заданное критериальное значение, то с помощью метода секущих выбирается новое значение варьируемого параметра, автоматически создается новая конфигурация модели с соответствующим проектом COSMOSFloWorks и проводится расчет. Эта серия расчетов будет остановлена, когда либо разность между полученным значением цели и заданным целевым значением станет меньше (по абсолютной величине), чем заданное критериальное значение,

либо будет выполнено максимально допустимое число расчетов, либо COSMOSFloWorks определит, что данная параметрическая задача не может быть решена в заданном диапазоне значений варьируемого параметра.

Такое параметрическое исследование может быть проведено, например, для определения положения плунжера клапана, при котором сила, действующая на этот плунжер со стороны текучей среды, уравновешивается силой, действующей со стороны пружины этого клапана. Для этого сила, действующая на плунжер со стороны текучей среды, задается в качестве цели данного параметрического исследования (как surface goal), а сила сопротивления пружины, зависящая от положения плунжера, задается (в окне **Parametric study**) в качестве целевого значения данного параметрического исследования;

- **Simplify Model** (Упрощение модели) — если в модели очень много скруглений кромок (fillets), то на построение расчетной сетки и обработку результатов при наличии пограничного слоя может потребоваться существенно больше времени по сравнению со случаем отсутствия этих особенностей у геометрии модели. Если вы уверены, что некоторые скругления кромок не влияют на решение задачи, то для ускорения построения сетки или обработки результатов расчета можно погасить (suppress) скругления. При этом надо иметь в виду, что если эта опция используется, то при визуализации результатов расчета вы видите не ту геометрию, которая была использована во время решения задачи;
- **Extract Mesh from Results File** (Извлечение сетки из файла результатов) — извлекает информацию о расчетной сетки из файла результатов (файл с расширением fld) и сохраняет эту информацию как файл расчетной сетки (файл с расширением cpt), который может быть использован для проведения нового расчета. Если расчетная сетка была адаптирована к решению задачи (solution-adaptive meshing) во время предыдущего расчета, с помощью этого инструмента ее можно использовать в качестве начальной сетки для последующего расчета;
- **Export results to COSMOSWorks** (Экспорт результатов в COSMOSWorks) — позволяет передать в COSMOSWorks (начиная с версии 2004) рассчитанные в COSMOSFloWorks полное давление и статическую температуру (давление и температуру текучей среды на поверхности модели и температуру твердого тела), что позволяет рассчитать статическую и динамическую прочность модели. Фактически, при выборе меню **Export results to COSMOSWorks** маркируются поверхности модели, с которых COSMOSWorks считывает значения передаваемых параметров. Поэтому после каждой такой операции необходимо сохранить модель, прежде чем начинать работу в COSMOSWorks.

5.5.11. Определение точности полученного решения

Чтобы определить точность полученного решения, необходимо сначала определить, что понимать под полученным решением и что понимать под его точностью.

С теоретической точки зрения решение стационарной задачи — это значения всех независимых переменных во всех ячейках сетки расчетной области, а также интерполяция этих значений (и экстраполяция, если необходимо, в частности, на поверхность твердых тел, поскольку дискретные значения переменных определены в центрах расчетных ячеек) на всю расчетную область; а решение нестационарных задач — это значения всех независимых переменных во всех ячейках сетки расчетной области во все рассчитанные моменты времени (т. е. на всех шагах по времени), интерполяция этих значений (и экстраполяция, если необходимо) на всю расчетную область для каждого рассчитанного момента времени, а также интерполяция этих значений с рассчитанных моментов времени на любой момент времени в интервале физического времени задачи (в котором проведен расчет).

Однако для практической реализации это определение решения задачи не годится по нескольким причинам:

- для этого надо хранить в компьютере и обрабатывать в его оперативной памяти слишком большой объем информации, а именно поля, т. е. значения во всех ячейках расчетной сетки, нескольких физических параметров, причем на всех шагах по времени (итерациях), что, в свою очередь, существенно сокращает возможность проведения расчетов на достаточно мелких расчетных сетках, обеспечивающих необходимую точность расчета (решения математической задачи);
- если решается стационарная задача, то определенное таким образом решение обычно, в общем случае, устанавливается не одновременно во всех ячейках расчетной сетки, более того, поскольку задача решается численно, на не обязательно оптимальной расчетной сетке, то в некоторых ее ячейках установление может вообще оказаться недостижимым при используемом критерии установления;
- инженерные задачи отличаются от других задач, например "академических", своей повышенной целенаправленностью, поскольку, по существу, они всегда направлены на оптимизацию некоторого устройства (конструкции и т. п.) с целью обеспечения максимальной эффективности его работы, — поэтому в таких задачах обычно бывает необходимо рассчитать большое количество различных вариантов, каждый из которых характеризуется значением (или значениями) выбранной целевой функции, анализи-

руя которые стремятся достичь оптимума и доказать, что он действительно достигнут наиболее рациональными способами. Естественно, при этом обычно не интересуются подробно всем рассчитанным полем значений независимых переменных решения, а интересуются исключительно полученным значением целевой функции. Тем более что в некоторых задачах значительная часть расчетной области создается исключительно из-за необходимости существенного расширения расчетной области, поскольку на отодвигаемых границах неизвестны, или не могут быть заданы по постановке задачи точные граничные условия (например, в большинстве внешних задач).

В связи с последним обстоятельством в качестве решения инженерной задачи обычно и рассматривают эту целевую функцию. Например, целевой функцией может быть интеграл некоторой физической величины по некоторой подобласти расчетной области, рассчитанный по соответствующей совокупности расчетных ячеек (например, сила давления или сила трения, действующая на некоторую поверхность, определяемая, соответственно, по давлению или по скорости и плотности текучей среды в частичных ячейках, покрывающих эту поверхность), или некоторой локальной характеристикой, например, максимальной температурой твердого тела, омываемого текучей средой. Очевидно, что такая целевая функция обычно слабо зависит от флуктуаций значений физических параметров в одной или нескольких расчетных ячейках этой подобласти (естественно, при условии небольшой относительной доли этих ячеек в общем количестве ячеек, покрывающих эту подобласть, и при не очень высокой амплитуде осцилляций), что существенно упрощает и делает более надежным решение задачи.

С теоретической точки зрения точность решения задачи — это отклонение решения, также определенного с теоретической точки зрения, от соответствующих значений, имеющихся или осуществимых в физической реальности в тех же точках пространства и в те же моменты времени. Определенная таким образом точность решения задачи всегда имеет две независимые составляющие: точность решения математической задачи, поставленной в соответствие физическому явлению с помощью используемой математической модели, и точность моделирования физического процесса с помощью данной математической модели (в эту точность входит также точность постановки задачи). Принципиально, что эти две составляющие точности независимы друг от друга. Кроме того, принципиально, что соответствующие им погрешности решения каждой конкретной задачи в общем случае являются не случайными, а систематическими, т. к. обусловлены используемой математической моделью и применяемым методом решения математической задачи (естественно, расчеты, проведенные на очень грубых расчетных сетках, дают скорее случайную, чем систематическую погрешность). Но определить априори, т. е.

до проведения специальных систематических расчетов, в какую сторону полученное решение отклоняется от точного решения, т. е. какой знак имеют эти погрешности (для первой погрешности имеется в виду точное решение математической задачи, а для второй — осуществимые в физической реальности значения) в каждой точке расчетной области и в каждый рассчитанный момент времени (при решении нестационарных задач), в общем случае практически невозможно, более того, в разных подобластях расчетной области и в разные моменты времени знак этого отклонения может быть разным. Следовательно, в общем случае правильнее определить точность решения задачи через сумму абсолютных значений этих погрешностей, не обращая внимания на то, что в некоторых случаях эти погрешности могут иметь разный знак.

Если погрешности имеют разный знак, то при сравнении результатов расчетов с имеющимися экспериментальными данными может создаться ложное впечатление "высокой точности" решения задачи, но в действительности такая "точность" не имеет ничего общего с реальной точностью решения задачи, поскольку является следствием "наложения одной ошибки на другую". Так, при уменьшении размеров ячеек расчетной сетки или при незначительном изменении параметров задачи, или при решении стационарной задачи как нестационарной (без локальных шагов по времени) эта "точность" может парадоксально сильно ухудшиться, что неудивительно, поскольку погрешность решения математической задачи обычно существенно более неустойчива к таким изменениям по сравнению с погрешностью математической модели рассматриваемого физического явления.

Учитывая все эти обстоятельства, целесообразно при решении инженерных задач, как, впрочем, и любых других, например "академических", стремиться достичь максимальной (при имеющихся компьютерных и временны́х ресурсах) точности решения математической задачи, чтобы точность решения инженерной задачи была как можно более близка к точности математического моделирования физического явления (естественно, оставшуюся погрешность решения математической задачи практически невозможно будет при этом отделить от погрешности математического моделирования).

Поскольку, как отмечено ранее, в качестве решения инженерной задачи целесообразно рассматривать значения некоторых целевых функций (в COSMOSFloWorks они называются целями проекта и выбираются пользователем), то естественно определить точность полученного решения (как с точки зрения решения математической задачи, так и с точки зрения математического моделирования) как точность именно этих значений.

Для обеспечения приемлемой точности решения математической задачи при решении стационарных задач необходимо решить следующие три проблемы:

- своевременно идентифицировать установление решения (т. е. установление цели или целей проекта) в каждом проводимом расчете;

- если задача решается как стационарная, т. е. с локальным выбором шага по времени, то необходимо убедиться, что решение этой же задачи, но как нестационарной, т. е. с одинаковыми для всей расчетной области шагами по времени, дает те же или достаточно близкие результаты, поскольку в некоторых задачах это может быть не так. Тогда придется решать данную стационарную задачу исключительно как нестационарную, что потребует, к сожалению, гораздо больше времени;
- провести серию расчетов на сетках с разным разрешением геометрических особенностей модели и нелинейностей рассчитываемого поля физических параметров, чтобы убедиться в наличии так называемой сеточной сходимости решения задачи и получить окончательное решение задачи на оптимальной (по точности решения математической задачи с учетом ресурсов и быстродействия компьютера) расчетной сетке.

Естественно, при решении нестационарных задач с периодическими решениями вторую из этих трех проблем решать не надо, а при решении нестационарных задач с непериодическими решениями необходимо решить только последнюю из них.

Очевидно, что решение каждой из этих трех проблем сопровождается оценкой соответствующей погрешности решения данной проблемы и, как следствие, оценкой общей погрешности решения математической задачи, включающей и эти погрешности тоже (кроме этих в погрешность решения математической задачи входят и другие погрешности, например, связанные с расчетом физических параметров при соприкосновении более крупных ячеек с более мелкими, т. е. когда, в результате работы алгоритма дробления ячеек, к грани более крупной ячейки примыкают 4 грани более мелких ячеек).

Оценить погрешности решения этих трех проблем можно следующими способами:

- погрешность идентификации установления решения близка к заданному пользователем допустимому максимальному отклонению цели от ее среднего значения на отсчитываемом назад от последней выполненной итерации интервале анализа, длина которого (в "продувках", измеряемых, в свою очередь, в итерациях) задается либо автоматически, либо пользователем. В соответствии с алгоритмом COSMOSFloWorks, если максимальное отклонение цели от ее среднего значения на этом интервале стало меньше заданной величины, то считается, что установление данной цели произошло. Если решение задачи имеет тенденцию к установлению, т. е., начиная с некоторой итерации, с увеличением номера итерации максимальное отклонение цели от ее среднего значения на интервале анализа уменьшается, и этот интервал анализа достаточно большой (не менее 100 итераций), то можно оценить, что максимальная погрешность иденти-

фикации установления решения не превышает заданное пользователем допустимое максимальное отклонение;

- погрешность из-за применения локального шага по времени определяется просто как разница между решением задачи как стационарной, т. е. полученным с локальным шагом по времени, и решением этой же задачи, но как нестационарной, т. е. с одинаковым по всей расчетной области шагом по времени;
- погрешность из-за ограниченного количества ячеек расчетной сетки, т. е. незавершенной сеточной сходимости решения задачи, определяется непосредственно в результате сравнения между собой решений задачи, полученных на разных, более крупных (т. е. с меньшим количеством ячеек) и более мелких (т. е. с бóльшим количеством ячеек) расчетных сетках. В идеальном случае желательно, чтобы эти сетки имели одинаковую структуру, обеспечивающую разрешение особенностей геометрии модели, т. е. чтобы каждая последующая сетка этого ряда, т. е. с бóльшим количеством ячеек, была бы получена из предыдущей путем деления каждой ячейки сетки надвое по каждой координатной оси, т. е. на 8 более мелких ячеек. В принципе, создание такого ряда сеток возможно с использованием ручных настроек построения начальной расчетной сетки, задаваемых в диалоговых окнах **Initial Mesh** и **Local Initial Mesh**, но при этом надо учесть ограничение на размер сетки, накладываемое доступной памятью компьютера, так что реально таких сеток, начиная с той, которая разрешает все существенные особенности геометрии модели минимальным количеством ячеек, может быть всего 2...3, что, естественно, затрудняет выявление нелинейного изменения решения задачи при изменении количества ячеек расчетной сетки. Поэтому при использовании COSMOSFloWorks рекомендуется так подобрать настройки расчетных сеток этого ряда, чтобы количество ячеек у сеток, соседних в этом ряду, отличалось бы в 1,5...2 раза. Естественно, если заданные цели проекта касаются текучей среды, то имеется в виду количество ячеек, лежащих в текучей среде и на ее границе с твердым телом. Если решение задачи имеет тенденцию к сеточной сходимости, т. е., начиная с некоторого количества ячеек сетки, с увеличением количества ячеек сетки отличие цели (целей) от ее значения (их значений) на предыдущей сетке заметно уменьшается, то можно оценить, что максимальная погрешность решения задачи из-за ограниченного количества ячеек расчетной сетки не превышает полученную разницу между значениями цели (целей) на двух соседних расчетных сетках этого ряда). К сожалению, на практике при решении инженерных задач ресурсы памяти и быстродействия компьютера накладывают существенные ограничения на возможности исследования сеточной сходимости решения задачи, так что, фактически, погрешность из-за незавершенной сеточной

сходимости может оказаться существенно выше рассмотренной выше погрешности идентификации установления решения, поэтому окончательное решение данной задачи приходится получать на предельно большой (по количеству ячеек) расчетной сетке, а решения, полученные на сетках с меньшим количеством ячеек, служат лишь для оценки этой погрешности. Если же получено, что погрешность из-за незавершенной сеточной сходимости меньше погрешности идентификации установления решения, то за окончательное решение данной задачи можно принимать решение, полученное на той расчетной сетке, при которой эти две погрешности примерно одинаковы.

После того как получено удовлетворительное по точности (или, по крайней мере, с известной точностью) решение математической задачи, следующим этапом является оценка точности математического моделирования физического процесса. Для этого проводится сравнение полученного решения с имеющимися экспериментальными данными (с учетом их погрешности, складывающейся из погрешности изготовления материальной части, погрешности измерений и погрешности чистоты эксперимента, т. е. отсутствия паразитных влияний). Естественно, ввиду ограниченности экспериментальных данных, для такой проверки желательно подобрать максимально близкие к решаемой инженерной задаче экспериментальные данные. Соответственно, помимо стоящей перед вами инженерной задачи, придется дополнительно (желательно до решения инженерной задачи) решать (с применением таких же подходов и стратегии, как при решении инженерной задачи) некоторую тестовую задачу, для которой имеются экспериментальные данные, с которыми можно провести сравнение получаемых расчетных данных. Это существенно повышает надежность оценки точности получаемого численного решения стоящей перед вами инженерной задачи, так что эти дополнительные затраты ресурсов и времени вполне окупятся в дальнейшем, в том числе при решении других близких инженерных задач.

Если в результате решения тестовой задачи оказалось, что точность ее решения с помощью COSMOSFloWorks вас не удовлетворяет, проверьте еще раз, правильно ли вы все сделали при ее решении, не упустили ли вы каких-нибудь существенных физических или геометрических особенностей при создании проекта COSMOSFloWorks, например:

- насколько созданная в SolidWorks модель соответствует реальному телу;
- правильно ли заданы граничные условия, например, параметры пограничного слоя во входном отверстии, граничные условия на внешней поверхности тела при решении внутренней задачи с сопряженным теплообменом (учетом теплопроводности);
- корректно ли было решать 2D-задачу (вместо 3D-задачи), если она решалась;

- корректно ли было задавать плоскости симметрии, если они задавались, с учетом того, что из симметрии модели и граничных условий вовсе не следует симметрия поля течения;
- насколько точно были заданы начальные условия, если решалась нестационарная задача с непериодическим решением;
- учитывалась ли гравитация в задачах с небольшими скоростями течения и существенным теплообменом и/или смешением текучих сред разной плотности.

И наконец, позволяет ли COSMOSFloWorks решать такие задачи вообще, ввиду имеющихся в нем ограничений, например:

- при решении нестационарных задач используется модель стационарного пограничного слоя;
- отсутствует ли кавитация в потоке жидкости, поскольку она не учитывается, но может существенно влиять на расход жидкости через трубопроводную арматуру (вентили, клапаны и др.);
- существенна ли закрутка потока от вентилятора, поскольку ее задание лежит целиком на пользователе (в COSMOSFloWorks закрутка потока на границе расчетной среды, в частности на вентиляторе, может быть задана различными способами, в том числе напрямую с помощью 3D-векторов, но для корректного задания значений характеристик закрутки необходимо иметь соответствующие экспериментальные данные).

5.6. Стратегия решения задачи

Как отмечено в *разд. 5.5.11*, чтобы оценить точность полученного решения поставленной математической задачи, необходимо проведение нескольких расчетов на разных расчетных сетках, отличающихся размером и, соответственно, количеством ячеек. Если получено, что, начиная с некоторой частоты сетки, решение задачи перестает значимо зависеть от частоты сетки, т. е. выходит на "полку", то можно считать, что необходимая точность решения математической задачи достигнута, т. к. получена так называемая сеточная сходимость решения математической задачи. Естественно, возникает вопрос об определении пороговой величины изменения решения задачи при заметном (в 1,5...2 раза) изменении размера ячеек сетки и, соответственно, их количества, меньше которой изменения решения можно считать незначимыми. Очевидно, что определить этот порог безотносительно какого-либо физического параметра невозможно, поэтому естественной при решении этого вопроса является ориентация на те физические параметры, для определения значений которых и решается данная задача, тем более что обычно уже при постановке задачи известны допустимые погрешности определения этих значений. То есть,

для определения сеточной сходимости решения задачи используются те же физические параметры, которые задаются в проекте в качестве целей и по поведению которых в процессе решения стационарной задачи идентифицируется установление решения задачи и, соответственно, принимается решение о завершении расчета. Кроме того, наблюдение за поведением этих целей в процессе установления решения задачи позволяет оценить погрешность их определения в отдельно взятом расчете. Погрешность, кстати, уменьшается осреднением целей по интервалу анализа и позволяет не требовать меньшей погрешности при анализе сеточной сходимости.

Таким образом, стратегия решения инженерной задачи с помощью COSMOSFloWorks заключается, прежде всего (это является ее ключевым пунктом!), в проведении при фиксированной базовой части проекта (т. е. при фиксированной модели, фиксированной расчетной области, фиксированных граничных и начальных условиях) не одного расчета, а нескольких с варьированием расчетной сетки. Поскольку процесс построения расчетной сетки в COSMOSFloWorks автоматизирован, варьирование расчетной сетки достигается варьированием параметров проекта, представляющих ее установки, т. е. управляющих ее построением до расчета и изменением во время расчета.

Дополнительным пунктом стратегии решения инженерной задачи с помощью COSMOSFloWorks является варьирование вспомогательных элементов модели, добавленных к модели из-за их необходимости для решения задачи (например, входные и выходные трубки для внутренних задач с протоком для обеспечения отсутствия вихрей на входных и выходных отверстиях, которые существенно увеличивают погрешность решения), в достаточности и необходимости размеров которых вы можете сомневаться, а также тех физических параметров проекта, которые, по вашему мнению, могут повлиять на решение задачи, но величина которых вам точно неизвестна, так что они были заданы в проекте весьма приблизительно (например, турбулентность набегающего потока). Эти расчеты рекомендуется проводить после описанного ранее выявления сеточной сходимости, так что при их проведении обычно нет необходимости по-новому исследовать сеточную сходимость, достаточно лишь проводить эти расчеты с теми настройками сетки, которые обеспечили удовлетворительную точность решения при исследовании сеточной сходимости. Это может также относиться и к параметрическим инженерным расчетам с изменением отдельных деталей модели и/или параметров течения, но при этом не следует забывать о потенциальной необходимости проверки сеточной сходимости, которую рекомендуется выполнять во всех сомнительных случаях.

Несмотря на кажущуюся простоту предлагаемой стратегии, ее полная реализация обычно сопряжена с существенными трудностями, заключающимися, прежде всего, в возрастании запрашиваемой оперативной памяти и времени

расчета при увеличении числа ячеек расчетной сетки. При ограниченных ресурсах компьютера и ограниченном времени, за которое задача должна быть решена (вследствие простоты и удобства задания проекта COSMOSFloWorks, проведения по нему расчета и анализа полученных результатов, вы потратите в целом не более 1 часа вашего личного времени на реализацию данной стратегии), выбор реализации стратегии для решения конкретной задачи в конечном счете определяет, будет ли задача решена с удовлетворяющей вас точностью. Не исключено, что для решения задачи понадобится дальнейшее упрощение модели и/или уменьшение расчетной области.

5.6.1. Рекомендации по просмотру результатов

Приведем несколько рекомендаций по просмотру получаемых результатов расчета. Это не менее важный, чем выбор стратегии, аспект правильного решения задачи, т. к. неверная интерпретация полученных результатов может свести на нет все усилия по разработке и выполнению стратегии решения задачи.

После того как задача запущена на счет, целесообразно, если у вас, конечно, есть на это время, периодически наблюдать за идущим расчетом, по крайней мере, за изменением физических параметров, определенных вами в качестве целей перед началом расчета (можно наблюдать также поля параметров в задаваемых вами сечениях) по следующим причинам:

- можно вмешаться в процесс принятия решения о завершении расчета, прервав расчет до его автоматического завершения, если он вас почему-либо не устраивает, например, COSMOSFloWorks выдал предупреждения, из которых видно, что продолжение расчета бессмысленно, или, наоборот, если решается стационарная задача (это относится и к некоторым нестационарным задачам), и вы считаете, что решение задачи уже получено;
- если решается стационарная задача, то наблюдение в процессе установления решения за поведением физических параметров, определенных вами в COSMOSFloWorks в качестве целей, позволяет, в случае их осцилляции в процессе решения задачи, уже в ходе расчета определить величину и погрешность (дисперсию) их установления путем осреднения значений по итерациям (по интервалу анализа);
- если интересующие вас физические параметры не очень сильно изменяются, то можно уже в ходе расчета оценить значения, которые будут получены по его завершении.

Особенно важна первая из этих причин, т. к. в ряде случаев это позволяет существенно сократить время расчета. Например, COSMOSFloWorks выдал предупреждение, что на выходном отверстии модели находится вихрь, что существенно снижает корректность расчета, поэтому необходимо удлинить

выходную трубку модели. Или, например, если при решении стационарной задачи на уровне 7 или 8 видно, что выполняющиеся в процессе расчета уточнения расчетной сетки не приводят к увеличению числа ячеек сетки и к заметному изменению результатов (например, целей), то расчет можно остановить.

При просмотре и анализе результатов решения задачи, после завершения расчета, в первую очередь, рекомендуется посмотреть изменения указанных целей в процессе расчета, если вы их не смотрели перед завершением расчета. Если решается стационарная задача, и интересующие вас параметры заданы в качестве целей задачи, то, в случае осцилляции этих параметров в процессе расчета, их более точные расчетные значения целесообразно определять осреднением по интервалу анализа, примыкающему к последней выполненной итерации. При этом определяется также дисперсия данной цели относительно ее среднего значения, характеризующая погрешность определения данной цели при решении данной задачи.

Полезно проверить отсутствие вихря в выходном сечении модели, а также посмотреть общую картину течения, и если рассчитывалась теплопередача в твердых телах, то распределение температуры по модели. Естественно, в первую очередь, целесообразно посмотреть поле изменения интересующего вас физического параметра, причем в области, охватывающей интересующую вас область, — с целью выявления возможного появления результатов, противоречащих физике.

Целесообразно посмотреть также поля изменения тех физических параметров, которые связаны с интересующим вас физическим параметром. Например, если вас интересуют потери полного давления, то целесообразно посмотреть поле изменения скорости потока; а если вас интересует температура твердого тела, то посмотреть поле изменения теплового потока от текучей среды к твердому телу.

В соответствии с общим подходом к оценке надежности и точности решения инженерной задачи, полученного с помощью любой расчетной методики, эта оценка складывается из двух оценок: оценки точности решения математической задачи, соответствующей используемой математической модели физического явления, и оценки точности моделирования физического процесса с помощью используемой в расчетной методике математической модели.

Точность решения математической задачи определяется математическими методами вне зависимости от адекватности математической модели рассчитываемому физическому явлению. В нашем случае оценка этой точности базируется на анализе сеточной сходимости решения задачи на основании решений, полученных на разных расчетных сетках. Кроме того, поскольку стационарные задачи решаются в COSMOSFloWorks с помощью метода

установления с применением локального шага по времени, в некоторых случаях, особенно при сомнениях относительно стационарности задачи, небесполезной является дополнительная проверка точности полученного решения путем решения аналогичной нестационарной задачи, т. е. без использования локального шага по времени.

После того как получено удовлетворительное по точности решение математической задачи, следующим этапом является оценка точности моделирования физического процесса с помощью используемой в расчетной методике математической модели. Для этого проводится сравнение полученного решения с имеющимися экспериментальными данными (с учетом их погрешности, складывающейся из погрешности измерений и погрешности чистоты эксперимента, т. е. отсутствия паразитных влияний). Естественно, ввиду ограниченности экспериментальных данных, для такой проверки желательно подобрать их максимально близкими к решаемой инженерной задаче. Соответственно, помимо стоящей перед вами инженерной задачи, приходится дополнительно (желательно до решения этой инженерной задачи) решать (с применением вышеописанной стратегии) некоторую тестовую задачу, для которой имеются экспериментальные данные, с которыми можно провести сравнение получаемых расчетных данных. Это существенно повышает надежность оценки точности получаемого численного решения стоящей перед вами инженерной задачи, так что дополнительные затраты ресурсов и времени вполне окупятся в дальнейшем, в т. ч. при решении близких инженерных задач.

5.6.2. Основные ошибки пользователей

Если в результате решения тестовой задачи оказалось, что точность ее решения с помощью COSMOSFloWorks вас не удовлетворяет, проверьте еще раз, правильно ли вы все сделали при ее решении, не упустили ли каких-нибудь существенных физических или геометрических особенностей при создании проекта COSMOSFloWorks и, наконец, позволяет ли COSMOSFloWorks решать такие задачи вообще, ввиду имеющихся в нем ограничений.

Рассмотрим некоторые ошибки и неверные действия, часто совершаемые пользователями при решении инженерных задач с помощью COSMOSFloWorks.

❒ При задании исходных данных:

- неучет каких-либо физических особенностей, которые в некоторых задачах необходимо учитывать: течение газа с большим числом Маха (обязательно при числе Маха больше 3); гравитации (обязательно при рассмотрении перемешивания двух и более газов или жидкостей при небольшой скорости потока); нестационарности (например, при уме-

ренных числах Рейнольдса, при которых образуются нестационарные вихри);

- при задании расчетной области — необоснованное задание плоскостей симметрии (например, в задачах с умеренными числами Рейнольдса, при которых образуются вихри, которые могут пересекать предполагаемые плоскости симметрии);
- если были заданы плоскости симметрии, то при возврате к полной расчетной области после нажатия кнопки **Reset** (Восстановить) на вкладке **Size** (Размер) пользователи часто забывают заменить **Symmetry** (Симметрия) на **Default** (По умолчанию) на вкладке **Boundary Condition** (Граничные условия);
- если заданы плоскости симметрии, то при задании на входных или выходных отверстиях массового или объемного расхода необходимо задавать только ту часть расхода, которая попадает в расчетную область, а не весь расход, проходящий через выделенную поверхность;
- если задаются интегральные граничные или объемные условия (тепловые потоки, тепловыделение или теплопоглощение и т. п.), то необходимо помнить, что их величина в COSMOSFloWorks относится ко всей поверхности или всему объему, на которой или в котором они заданы, а к расчетной области относится только та их часть, которая пропорциональна площади или объему, попавшим в расчетную область;
- если вы задаете закрутку потока на входных или выходных отверстиях (Fans, Boundary Conditions), то не забудьте правильно указать ось закрутки и используемую систему координат на вкладке **Definition** (Определение);
- если в проекте COSMOSFloWorks используется пористое тело со свойствами **Unidirectional** (Однонаправленная) или **Orthotropic** (Осесимметричная), то не забудьте указать направление его осей;
- не забывайте, что заданные граничные условия не должны противоречить физике происходящих в расчетной области явлений: например, если течение на входе в модель является дозвуковым, то при переходе всего потока через скорость звука внутри модели некорректно в качестве входного граничного условия задавать скорость потока или объемный расход, поскольку они полностью определяются геометрией канала и показателем адиабаты газа;
- если вы указали нестационарность как одну из физических особенностей задачи, а эта задача имеет циклически изменяющиеся граничные условия и, соответственно, имеет установившееся циклическое решение, для получения которого необходимо несколько раз повторить рас-

чет течения на протяжении одного цикла, каждый раз задавая в качестве начальных данных решение, полученное в конце предыдущего цикла, то нет необходимости задавать граничные условия сразу для нескольких циклов, гораздо удобнее задать их для одного цикла и провести серию расчетов, каждый раз начиная расчет течения с нулевого момента времени. Для этого при каждом следующем расчете в диалоговом окне **Run** (Запуск) необходимо указывать **Take previous results** (Использовать предыдущие результаты) и задавать время конца цикла в окне **Start from the time moment** (Начать с момента времени);

- при задании целей типа **Surface Goals** (Поверхностные цели), **Volume Goals** (Объемные цели), **Equation Goals** (Функциональные цели) лучше сразу, т. е. до начала расчета, давать им такие имена, которые были бы удобны для однозначной идентификации этих целей без привлечения графического окна SolidWorks;
- если вы хотите смотреть в процессе решения задачи результаты в определенных сечениях модели, то лучше заранее, т. е. до начала расчета, определить положение этих плоскостей относительно точки начала координат — во время расчета это можно будет сделать только путем перебора положений, что займет слишком много времени.

❒ При наблюдении за ходом расчета (просмотре промежуточных результатов во время расчета):

- если вы хотите остановить расчет на этапе построения расчетной сетки, то после подтверждения нажатия **Stop** (Стоп) вам придется подождать, пока это построение будет завершено. Если у вас на это нет времени, то не имеет смысла указывать на то, что вы не хотите ждать, поскольку единственный способ быстро остановить процесс — снять задачу с помощью диспетчера задач операционной системы;
- если вы хотите остановить расчет в процессе решения задачи, то после подтверждения нажатия **Stop** вам придется подождать, пока не будут завершены все расчеты по текущей итерации. Если у вас на это нет времени, то не имеет смысла указывать на то, что вы не хотите ждать, поскольку единственный способ быстро остановить процесс — снять задачу с помощью диспетчера задач операционной системы (при этом, естественно, будут сохранены данные только тех итераций, которые были сохранены ранее);
- при просмотре промежуточных результатов во время расчета не забывайте о трехмерности решаемой задачи (если она не двумерная плоская): для получения полной картины решения целесообразно смотреть его в 2—3-х пересекающихся плоскостях.

- При просмотре результатов после завершения расчета:
  - имейте в виду, что настройки диалогового окна **View Settings** (Установки просмотра) относятся ко всем **Cut Plots** (Картины в сечении), **Surface Plots** (Картины на поверхности), **Flow Trajectories** (Траектории течения), **Isosurfaces** (Поверхности уровня), активным в данном графическом поле SolidWorks, поэтому:
    - если диалоговое окно **Flow Trajectories** не открывается, то это означает, что в настройках **View Settings** на вкладке **Flow Trajectories** указано **Use from contours** (Цвет от заливки), а на вкладке **Contours** (Заливки) указан параметр, определенный только на поверхностях модели;
    - для одновременного просмотра разных параметров в сечениях и/или на поверхностях, и/или вдоль траекторий необходимо разделить графическое окно SolidWorks на 2 или 4 графических поля и смотреть в каждом из них свой параметр;
  - если в **Surface Parameters** вы просматриваете интегральные параметры (площадь, расходы, тепловые потоки, силы и т. п.), то необходимо помнить, что:
    - их величина в COSMOSFloWorks относится только к той части поверхности, которая попала в расчетную область;
    - их величина определена с некоторой погрешностью, обусловленной погрешностью представления этой поверхности в SolidWorks и COSMOSFloWorks, причем последнее связано с частотой расчетной сетки;
  - если в **Cut Plots** или **Surface Plots** вы хотите посмотреть расчетную сетку, то не забудьте отметить опцию **Display mesh** (Отобразить сетку) в окне **COSMOSFloWorks Options**. Иначе в диалоговых окнах **Cut Plots** и **Surface Plots** будет отсутствовать опция **Mesh** (Сетка), соответственно, просмотр расчетной сетки в них будет недоступен.

5.7. Вместо заключения

На данный момент структура и облик CAD-интегрированных приложений для решения задач аэро- и гидродинамического моделирования (COSMOSFloWorks, EFD.Lab, EFD.V5) вполне оформились. Более того, через 5 лет (начиная с 1999 г.) после выпуска первой версии продукта FloWorks можно уверенно констатировать, — появился инструмент, позволяющий проводить гидродинамическое моделирование с учетом специфики работы практического инженера.

Интересна сама эволюция FloWorks (и последующих за ним пакетов, основанных на EFD-технологии) за последние 5 лет. Тем более что пользователи (а особенно это касается образовательных лицензий) с высокой степенью вероятности до сих пор работают с ранними версиями продуктов. Также на них ссылаются и авторы ряда публикаций в специальной периодике. Если первая версия FloWorks 99 (октябрь 1999 г.) несла на себе печать максимализма (пользователь был вообще лишен доступа к сетке и критериям остановки расчета), то, начиная с SP2 FloWorks 2001 (ноябрь 2001), появилось разделение FloWorks на опции Standard и PE, причем в последней опции пользователь имел доступ к настройкам сетки и критериям останова расчета. Начиная с FloWorks 2003 (кстати, FloWorks 2002 в природе не существовало), различие между Standard и PE-опциями дополнилось в сторону большей функциональности PE. В мае 2003 г. FloWorks трансформировался в COSMOS/FloWorks (сначала название писалось через косую черту), а начиная с COSMOSFloWorks 2005 (август 2004 г.), пользователи опции STANDARD также получили права доступа к сетке и критериям остановки расчета. Таким образом, в настоящий момент различие между STANDARD и PE — это исключительно различие в функциональности, разумеется, в пользу PE-опции:

- неньютоновские жидкости (Non-Newtonian liquids);
- радиационный теплообмен между твердыми телами (Surface-to-surface radiation);
- солнечная радиация (Solar radiation);
- вращающиеся системы координат (Rotating frame if reference);
- перенос результатов с одного расчета в качестве начального приближения и граничных условий для последующего расчета. Удобно для более детального анализа в интересующей подобласти (Transferred Boundary Conditions);
- средства ведения параметрических расчетов с обратной связью. Например, требуется определить положение задвижки, определяемое действием гидродинамических сил и пружины (Parametric Study).

Кстати, для EFD.Lab и EFD.V5 с самого начала набор функциональных возможностей был не ниже COSMOSFloWorks PE. Версии продуктов EFD.Lab и EFD.V5 имеют нумерацию X.XX, причем версии 3.X имеют технологическое ядро, аналогичное COSMOSFloWorks 2003 SPX, 4.X — COSMOSFloWorks 2004 SPX, 5.X — COSMOSFloWorks 2005 SPX.

Что касается GUI как такового, наиболее существенные изменения произошли между FloWorks 99 и FloWorks 2000. А это уже история. Ну и конечно, доступ к сетке и критериям останова (для PE, начиная с FloWorks 2001 SP2, а с COSMOSFloWorks 2005 и для STANDARD). Далее для GUI принципиаль-

ных изменений замечено не было, в основном изменения отражали прирост физической функциональности. А это отдельная история, и ее основные моменты таковы:

- FloWorks 2001 — пористые среды, частицы в потоке, шероховатые стенки;
- FloWorks 2003, COSMOS/FloWorks 2003, EFD.Lab 3.X — неньютоновские жидкости, тангенциально движущиеся стенки, радиационный теплообмен между твердыми телами;
- COSMOSFloWorks 2004, EFD.Lab 4.X — вращающиеся системы координат, объемные силы, солнечная радиация.

Тем не менее в области функциональности по физическим моделям продукты еще уступают крупнейшим брэндам традиционного CFD. А с другой стороны, как следствие развития, интерфейс COSMOSFloWorks стал заметно перегружен по сравнению с первыми версиями. Продукт изрядно потерял в одном из своих основных достоинствах — простоте и прозрачности GUI. Что будет дальше — увидим.

Наряду с развитием интерфейса и расширением функциональных возможностей происходили и существенные улучшения базовой EFD-технологии. Отметим основные вехи:

- FloWorks 2001 SP2 — существенное ускорение решателя. До этого момента "доброжелатели" называли продукт "SlowWorks";
- FloWorks 2003 SP0 — радикальное улучшение методики расчета тепловых потоков;
- FloWorks 2003 SP1, EFD.Lab 3.1 — возможность расчета сжимаемых течений газа начиная от несжимаемых течений и до $M > 2$ по единому алгоритму с использованием неявной схемы;
- FloWorks 2004 SP0, EFD.Lab 3.0 — CPU-затраты на одну ячейку за одну итерацию остаются константой, даже при большом числе ячеек. Это дало возможность считать задачи с числом ячеек порядка миллиона в течение суток;
- FloWorks 2004 SP0, EFD.Lab 3.0 — существенно ускорена работа генератора сетки. Для генерации сетки на сложной модели (порядка миллиона ячеек) в большинстве случаев требуется всего несколько минут.

Здесь уместно опять вернуться к вопросам о точности моделирования. Для профессионалов в области CFD это предмет, по крайней мере, отдельной главы, и им мы рекомендуем обратиться к серии из 19-ти валидационных примеров, подробно описанных в COSMOSFloWorks (равно как EFD.Lab, EFD.V5), или к пока еще немногочисленным публикациям. Данные примеры охватывают основные типы течений (обтекание пластины, цилиндра, течения

в трубах, каверне, течения за уступом, течения в каналах сложной формы и др.) и физических моделей (сжимаемые, несжимаемые, пористые среды, неньютоновские жидкости, подвижные стенки, частицы в потоке и т. п.). Важно, что для большого числа примеров результаты приведены в широком диапазоне определяющих параметров, так что пользователь может сам попытаться оценить точность используемой технологии.

Безусловно, пакетам COSMOSFloWorks, EFD.Lab, EFD.V5 (а может быть и еще что-нибудь появится) есть куда развиваться, и в первую очередь — к дальнейшему расширению функциональности. С другой стороны, основные фирмы-разработчики традиционных CFD-пакетов все больше и больше обращают внимание на продвижение CFD-приложений, интегрированных в CAD и предназначенных для практического инженера. Это естественный процесс, продиктованный развитием вычислительной техники и CAD/CAE-приложений, хотя возможно, что "лед тронулся" в конкретный момент времени именно благодаря успешному опыту FloWorks.



ГЛАВА 6

Проектирование элементов механических систем

В данной главе мы рассмотрим специализированные приложения для проектирования типовых элементов конструкций. Первое из них — SolidWorks Toolbox, содержащее базу стандартных деталей, процедуры расчета балок и подшипников. Здесь описано приложение GearTrax, предназначенное для создания моделей зубчатых зацеплений, а также элементов зубчатых колес. Более подробную информацию мы предоставим о тех функциях, которые связаны с выполнением расчетов; другие возможности будут только перечислены.

Подобно другим модулям группы SolidWorks Office, в частности, Animator, FeatureWorks, PhotoWorks, данное приложение имеет фирменную локализацию. Поэтому элементы интерфейса Toolbox приводятся только в русскоязычном варианте.

Замечание

Для построения геометрических моделей и численного анализа использованы версии продуктов SolidWorks и COSMOSWorks 2005. Описание интерфейса соответствует этим версиям.

6.1. Кулачки

Один из пунктов меню **Toolbox** называется **Кулачки**. Эта команда служит для создания линейных и угловых кулачков с назначенным законом движения. Объект помещается в новую деталь, которая затем может быть отредактирована средствами SolidWorks.

6.1.1. Функциональные возможности и ограничения

Посредством SolidWorks Toolbox можно создавать линейные или круговые кулачки, для которых пользователь определяет как тип толкателя, так и траекторию. Возможно назначение 14-ти типов движения, включая постоянный, гармонический, циклоидный, постоянную скорость и ускорение, полиномы различной степени. К сожалению, в документации и справочной системе не все эти варианты описаны адекватно. Толкатель может совершать возвратно-поступательное движение ортогонально направлению движения линейного кулачка, а для кругового — в радиальном направлении. Можно задать направление движения под углом к нормали (радиусу), а также считать толкатель качающимся.

Под траекторией толкателя понимается движение его точки, относительно которой система строит виртуальный ролик (в диалоговых окнах он определяется параметром **Диаметр толкателя**). Траектория, в общем случае, является пазом постоянной ширины, причем его глубина может быть меньше толщины заготовки — тогда получается глухой кулачок. Можно получить и сквозной вырез. В этой ситуации допустимо оставить как одно, так и оба тела, на которые траектория разделяет заготовку.

Существенно, что получившийся профиль аппроксимируется отрезками, т. е. получается ломаная линия, которая порождает цилиндрическую поверхность. Предусмотрен вариант аппроксимации траектории дугами окружностей, которые связаны сопряжениями **Касательность** в эскизе, формирующем вырез. Оба варианта способны создать проблемы как с точки зрения расчета механизма на базе кулачка (об этом ниже), так и при изготовлении реального объекта. В последнем случае перед формированием управляющей программы для станка следует предпринять определенные действия по сглаживанию профиля. Точность описания траектории определяется значением **Инкремента приращения** для линейного кулачка и **Хордовым отклонением** или **Угловым инкрементом** для кругового кулачка. Очевидно, что это инструменты косвенного контроля, не гарантирующие соблюдения заданного отклонения траектории фактической от теоретической.

Определенным ограничением модуля является отсутствие ассоциативности построений. Это значит, что после создания детали внести в нее исправления можно исключительно инструментами SolidWorks, а для получения модифицированного объекта требуется создать новую деталь. Вывод здесь очевиден: создавать проект, имеющий в качестве базы кулачок, можно, только если существует уверенность в том, что кинематика построена правильно.

Большую часть этих проблем снимает программа CamTrax — разработка фирмы Camnetics, США, которая может использоваться совместно с SolidWorks

или другими CAD-системами, в частности, SolidEdge и Inventor. Мы не будем рассматривать этот продукт, поскольку кулачковые механизмы в большинстве отраслей машиностроения вытеснены электронными управляющими устройствами. Рассмотренный далее пример построения торцового кулачка предназначен скорее для демонстрации возможностей SolidWorks и расчетных программ.

Примеры *кругового* и *линейного* кулачков, построенных посредством Toolbox, показаны на рис. 6.1.

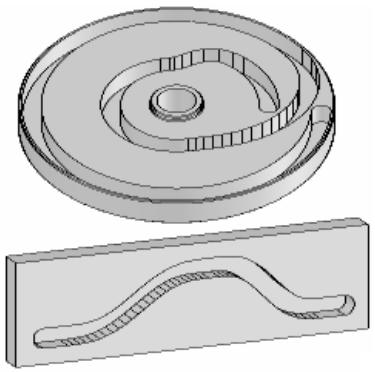


Рис. 6.1. Круговой и линейный кулачки, построенные посредством Toolbox

6.1.2. Интерфейс

Работа с кулачками осуществляется в одноименном окне, появляющемся после команды в меню **Toolbox**. В окне присутствуют три вкладки:

- **Настройка** — выбор типа кулачка, а также общих параметров кулачкового механизма, в контексте которого будет функционировать кулачок;
- **Движение** — создание участков траектории и назначение их параметров;
- **Создание** — определение характеристик заготовки и того, как кулачок в ней располагается.

Существует возможность записи набора параметров в локальную базу данных. Она хранится в файле SWBrowser.mdb, который, как правило, располагается в папке по адресу: Common Files \ SolidWorks Data \ Lang \ English. Для доступа к базе нужно нажать кнопку **Часто используемые** на вкладке **Настройка**.

6.1.3. Практика использования

Поставим задачу создания *торцового кулачка*, обеспечивающего движение по гармоническому (синусоидальному) закону на некотором участке. Как

упоминалось, в Toolbox присутствует функция создания линейных кулачков. Воспользуемся ею, а после получения результата решим, что делать дальше. Подключаем Toolbox как интегрированное приложение SolidWorks (рис. 6.2), причем Toolbox Browser не нужен (он предназначен для автоматизации процесса помещения детали в сборку). Затем создаем деталь, которая необходима для того, чтобы получить доступ к меню **Toolbox**, и в ходе построений изменяться не будет.

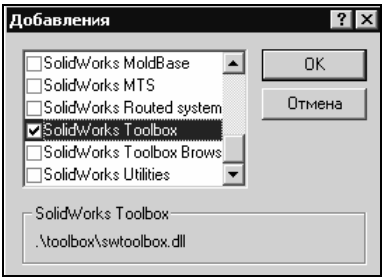


Рис. 6.2. Активизация Toolbox в окне

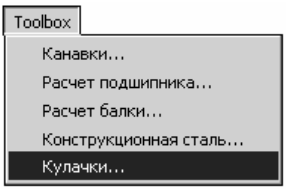


Рис. 6.3. Вызов команды построения кулачка

В меню **Toolbox** (рис. 6.3) вызываем команду построения кулачка. После этого появляется окно с тремя вкладками, поля которых нужно заполнить. Операции на вкладке **Настройка** (рис. 6.4) следующие:

- В выпадающем списке **Тип кулачка** выбираем **Линейный**. Как упоминалось, доступен еще тип **Круговой**. Однако перенести замкнутую плоскую кривую на цилиндрическую поверхность торцового кулачка было бы крайне затруднительно.
- Из списка **Тип толкателя** выбираем **Преобразование**. Это подразумевает возвратно-поступательное движение толкателя в направлении, перпендикулярном горизонтали на кулачке.
- В поле **Диаметр толкателя** назначаем диаметр окружности, образующей поверхность контакта толкателя с кулачком. Это может быть любая величина (соответствующая, разумеется, толкателю, который будет использоваться в паре с кулачком), но при этом радиус цилиндра должен быть меньше минимального радиуса кривизны кулачка на вогнутой его части. Если это условие не будет выполнено (в некий момент толкатель коснется кулачка по двум линиям и решение, по сути, станет некорректно), то последует предупреждение, после чего некая конфигурация кулачка будет все-таки получена.
- В поле **Начальный подъем** назначаем величину расстояния траектории от верхней кромки прямоугольника, описывающего заготовку.

- Поле **Начальный ход** определяет расстояние от начала траектории до стороны прямоугольника, находящейся в начале кулачка.
- В выпадающем списке **Движение кулачка** выбираем, куда будет двигаться кулачок. Если назначить **Влево**, то расстояние, определяемое параметром **Начальный ход**, отсчитывается с левой стороны.

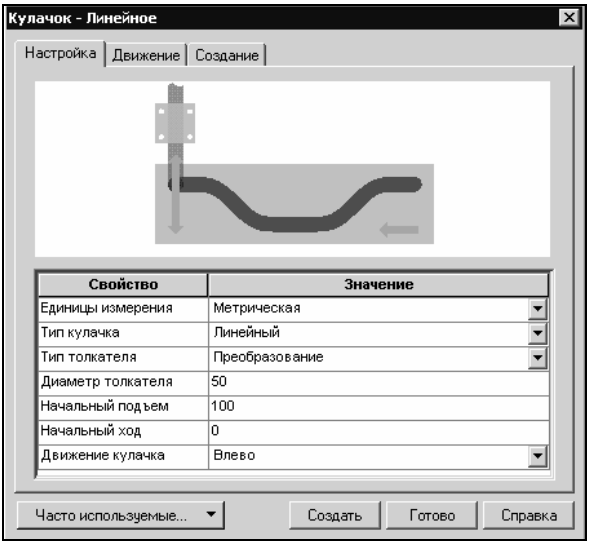


Рис. 6.4. Параметры вкладки **Настройка**

Вкладка **Движение** показана на рис. 6.5 в уже заполненном состоянии. Создание рабочей траектории сводится к созданию ее участков. Это можно осуществить нажатием кнопок **Добавить** (новый участок будет последним) или **Вставить** (новый участок будет помещен после текущего активного участка). Смысл кнопок **Редактировать**, **Удалить** и **Удалить все** очевиден.

- Нажимая кнопку **Добавить**, последовательно наращиваем траекторию (рис. 6.6). Пусть первый участок не будет приводить к перемещению толкателя. Поэтому выбираем тип движения **Задержка**, а длину этого участка принимаем 100 мм — эта величина вводится в поле **Расстояние пробега**.
- Еще раз нажав кнопку **Добавить**, добавляем половину периода косинусоиды (**Тип движения — Двойной гармонический полный подъем**) с амплитудой, равной 10 мм (величина равна разности значений **Конечный** и **Начальный подъем**). **Расстояние пробега** (полупериод) равно 100 мм (рис. 6.7).
- Следующий участок — возвращение траектории на прежний уровень. Его также выполняем по косинусоиде (рис. 6.8).

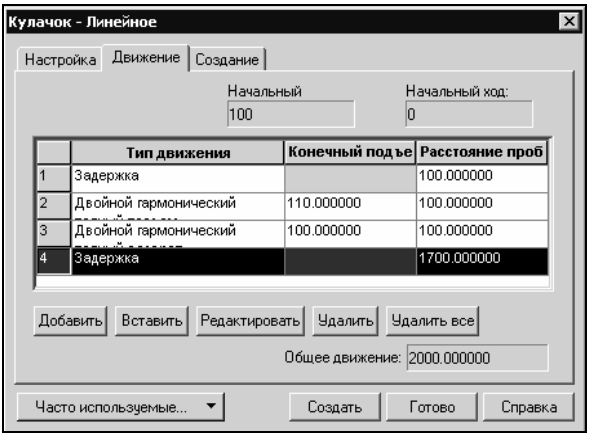


Рис. 6.5. Содержание вкладки **Движение**

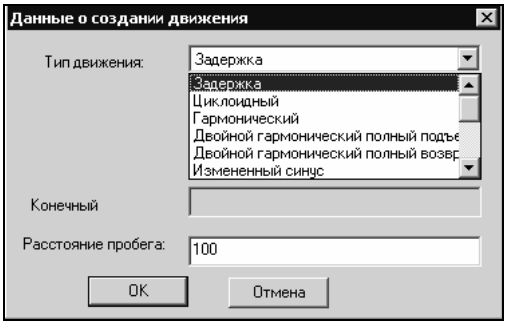


Рис. 6.6. Создание участка с неподвижным толкателем

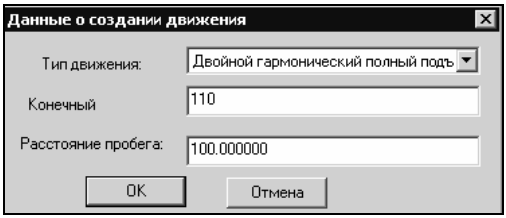


Рис. 6.7. Участок подъема с косинусоидальной траекторией

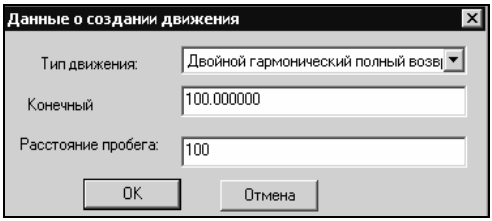


Рис. 6.8. Участок спуска с косинусоидальной траекторией

- Последний участок, как и первый, также горизонтальный. Длина его 1700 мм (рис. 6.9). Возникает вопрос о том, почему в детали присутствуют два смежных горизонтальных участка? Их, разумеется, можно было бы выполнить за один прием. Однако предполагается использовать эту деталь в модели сборки, для которой будет выполняться анализ динамики. Поэтому для облегчения проектирования принято решение выполнить два прямых участка. Полная длина кулачка (имеется в виду проекция траектории на основание, а не длина траектории) отображается в поле **Общее движение**.

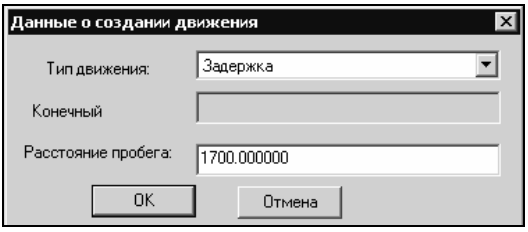


Рис. 6.9. Горизонтальный участок

- Определив все, что связано с рабочей поверхностью кулачка, переходим на вкладку **Создание** (рис. 6.10). Здесь обращаем внимание на перечисленные ниже поля.

  - **Метод создания** — определение того, куда будет помещаться кулачок. Это всегда новая деталь, которая будет создана после нажатия кнопки **Создать**.

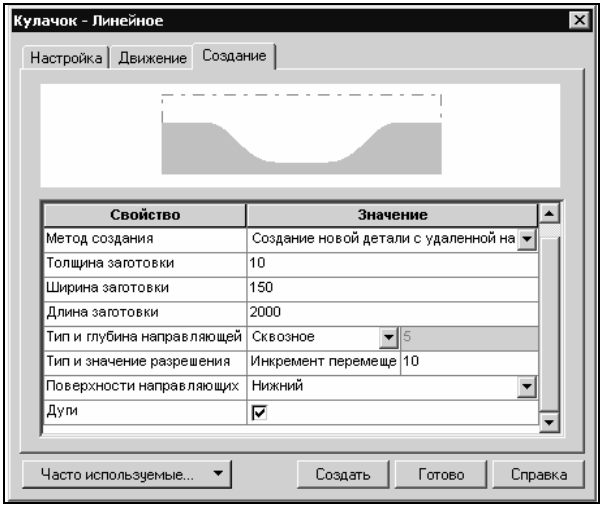


Рис. 6.10. Параметры вкладки **Создание**

- **Толщина заготовки** — толщина пластины, которая будет превращена в кулачок. В нашем случае это не имеет значения, тем более что средствами SolidWorks толщину готового кулачка можно изменить без проблем.
- **Ширина заготовки** — высота прямоугольника. Ее желательно иметь такой, чтобы паз, образованный толкателем, полностью помещался в заготовке. Ширина зависит от диаметра толкателя, а также от параметров траектории, назначенных на вкладке **Движение**. Для экономии времени можно назначить достаточно большую величину, построить кулачок, оценить "излишки" и повторить расчет. Как и в случае с толщиной заготовки, результат может быть скорректирован штатными инструментами SolidWorks.
- **Длина заготовки** — длина прямоугольника, описывающего заготовку. Желательно иметь ее не меньшей, чем суммарная длина всех траекторий (она отображается в поле **Общее движение**).
- **Тип и глубина направляющей** — определяет то, как будет выполнена рабочая зона кулачка: в виде паза (**Глухое**) или как отверстие-полоса (**Сквозное**).
- **Тип и значение разрешения** — для линейного кулачка доступно только **Инкремент перемещения**. Следующий параметр — величина инкремента. Назначается верхняя его граница, т. е. система будет подбирать такое число отрезков, формирующих траекторию, чтобы размер каждого приближался к этой величине снизу.
- **Поверхности направляющих** — в ситуации, когда прорезь для толкателя делит кулачок на два тела, определяет, какое из них (или оба) нужно сохранить.
- **Дуги** — признак того, что траектория будет аппроксимирована касательными дугами. В противном случае траектория будет ломаной, а рабочая поверхность, соответственно, призматической.

❐ После нажатия кнопки **Создать** система открывает новый файл, в который помещает модель кулачка, имеющий (при назначенных выше параметрах) вид полосы (рис. 6.11). Важным для последующих построений является то, что рабочая поверхность не является непрерывной, а состоит из отдельных граней.

В окне присутствует кнопка **Часто используемые**. В меню, появляющемся при нажатии этой кнопки, находится команда **Создать**, позволяющая сохранить текущие настройки окна (всех его вкладок), а также команда **Список**, открывающая доступ к библиотеке записанных в базу кулачков. В состоянии поставки в базе данных присутствуют пять объектов.

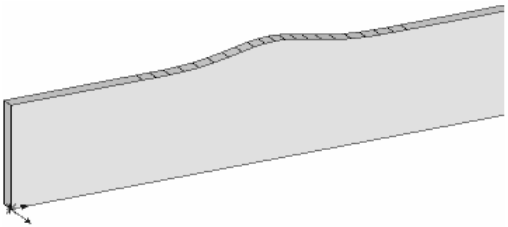


Рис. 6.11. Модель линейного кулачка

Приступаем к созданию торцового кулачка. Инструменты для сворачивания полосы в трубу в SolidWorks отсутствуют. Поэтому из всего, что получилось, пользу может принести только контур профиля. Для этого на одной из сторон кулачка создаем эскиз и проецируем на него отрезки кромки командой **Преобразование объектов**. Для выбора кромок указываем мышью одну из них, а затем из контекстного меню подаем команду **Выберите касательность**. Такой алгоритм выбора позволяет убедиться в факте наличия касательности объектов (но не гладкости по второй производной). Результат показан на рис. 6.12.

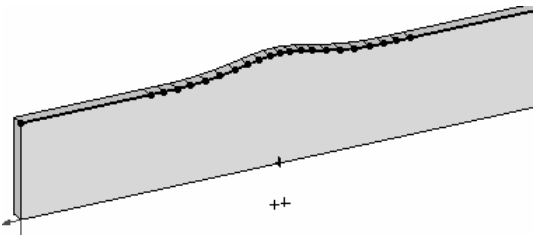


Рис. 6.12. Эскиз рабочего профиля линейного кулачка

Пользы от существования линейного кулачка уже не будет, более того, предполагая использование процедур SolidWorks для работы с листовым материалом, необходимо избавиться от существующей в файле твердотельной информации. Уничтожать объект мы не имеем права, т. к. вслед за ним последует и его потомок — необходимый для дальнейших построений эскиз. Поэтому удаляем твердое тело. Для этого вызываем контекстное меню пиктограммы, соответствующей построенному твердому телу, а затем подаем команду **Удалить тело** (рис. 6.13).

Замечание

Информацию, имеющуюся в этой детали, можно было бы использовать для проектирования другой, работая в контексте сборки. Тогда не пришлось бы ни уничтожать твердое тело, ни создавать вспомогательный эскиз. Это, однако, породило бы несколько более сложную структуру данных.

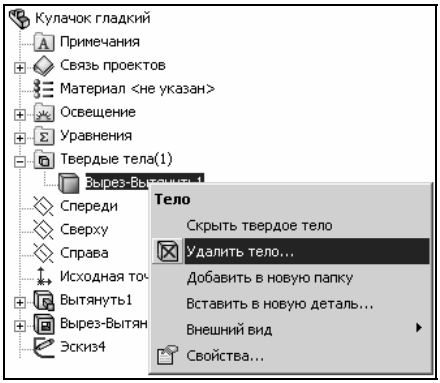


Рис. 6.13. Удаление твердотельной информации

Создаем заготовку кулачка (см. рис. 6.15). Это будет цилиндр, длина срединной окружности которого должна в точности равняться длине траектории кулачка (правильнее — длине проекции этой траектории на горизонтальную плоскость). Для этого в горизонтальной плоскости создаем эскиз и чертим в нем дугу произвольного (на первом этапе) диаметра. Здесь обратим внимание на пару заслуживающих внимания обстоятельств. Первое: почему дуга, а не окружность? Ответ: предстоит получение *развертки*, а замкнутый цилиндр развернуть невозможно. Придется вводить вырез, который (есть такая вероятность) не позволит выполнить затем развертку цилиндра из-за ограничений программы. Второй момент — один из концов дуги должен находиться на одной вертикали с концом эскиза-траектории. Это достигается наложением соответствующих взаимосвязей в эскизе.

Гарантировать равенство длин дуги и профиля можно посредством уравнения. Для этого подаем команду **Инструменты** | **Уравнения** | **Добавить** и в появившемся окне **Добавить уравнение** (рис. 6.14) связываем размеры (их предварительно следует отобразить командой **Отобразить размеры элемента** из контекстного меню пиктограммы **Примечания** Дерева конструирования). В процессе создания уравнения используем команды **Калькулятора**. После создания эскиза вытягиваем тонкостенную бобышку на некоторое расстояние (рис. 6.15). При этом для тонкостенного элемента выбираем параметр **От средней поверхности**. Это нужно для обеспечения равенства длины развертки и траектории кулачка при последующих построениях.

Следующий этап — получение развертки. Выводим на экран панель инструментов **Листовой металл** и подаем команду **Сгибы** (рис. 6.16). В панели **Листовой металл** окна SolidWorks выполняем необходимые настройки (рис. 6.17).

- Поле **Зафиксированная грань или кромка** заполняем, указывая на внутреннюю кромку цилиндра.

- Следим за тем, чтобы в опции **Допуск сгиба** присутствовал флажок; в списке **Допуск сгиба —** тип был выбран **Коэффициент К** (смещение срединной поверхности) и величина **К** была равна 0,5. Это нужно для того, чтобы срединная поверхность цилиндра (длина ее развертки должна быть равна длине траектории кулачка) не претерпела изменения длины в ходе преобразования "объект ⇔ развертка".



Рис. 6.14. Создание уравнения, связывающего дугу и траекторию

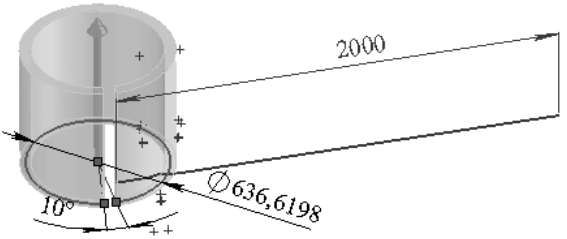


Рис. 6.15. Создание тонкостенной бобышки

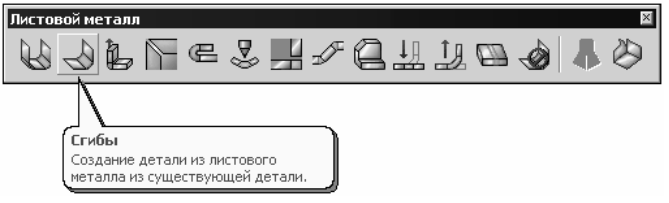


Рис. 6.16. Команда для получения развертки

В результате должна получиться развертка цилиндра, причем "развернуться" (для этого вызываем команду **Плоский**) он должен так, чтобы одна из плос-

костей оказалась параллельна плоскости эскиза (рис. 6.18). Если развертка сориентировалась иначе, то следует изменить эскиз, формирующий цилиндр.

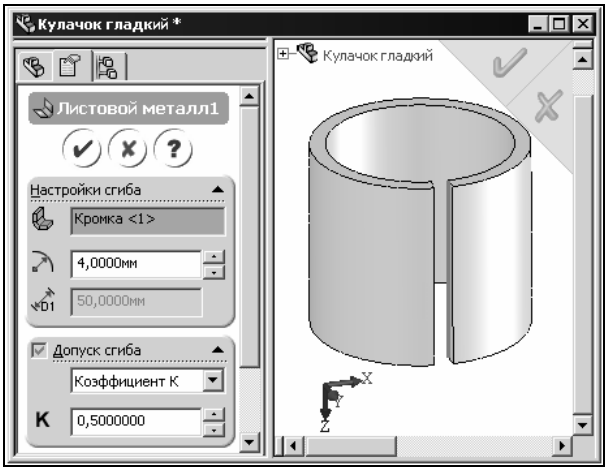


Рис. 6.17. Параметры формирования развертки

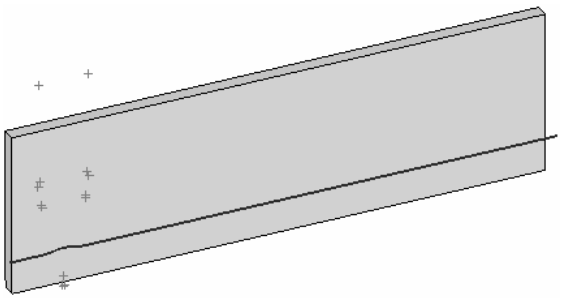


Рис. 6.18. Развертка цилиндра на фоне эскиза профиля

Имеем цилиндр в развернутом виде и эскиз, плоскость которого параллельна одной из граней развертки. Создаем эскиз на грани, проецируем на него содержимое предыдущего эскиза и подаем команду **Вставка** | **Вырез** | **Поверхностью**, отсекая верхнюю часть заготовки (рис. 6.19). Результат операции показан на рис. 6.20.

Если отобразить модель в режиме **Закрасить**, то увидим, что криволинейная поверхность кулачка имеет набор кромок — это линии сопряжения участков поверхностей. Вспоминаем, что при создании кулачка программа предлагала выбор между дугами и отрезками. Поэтому результирующая поверхность оказалась набором цилиндрических граней, касающихся друг друга по общим кромкам. С точки зрения функционирования и решения (в некотором смысле

эти понятия взаимосвязаны) это весьма неудобный факт. Отсутствие непрерывности по второй производной приводит к ударным эффектам, имитация которых в расчете сопровождается определенными затруднениями. Попробуем избежать этих проблем, заменив совокупность дуг сплайном. Для этого выбираем заменяемые участки (рис. 6.21), а затем подаем команду **Разместить сплайн**, кнопка для которой находится на панели **Инструменты сплайна** (рис. 6.22). В появившейся панели (рис. 6.23) назначаем параметры, определяющие факт удаления исходных объектов, а также точность аппроксимации.

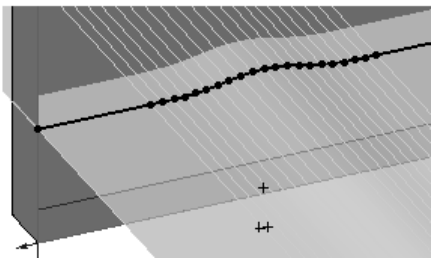


Рис. 6.19. Отсечение верхней части развертки

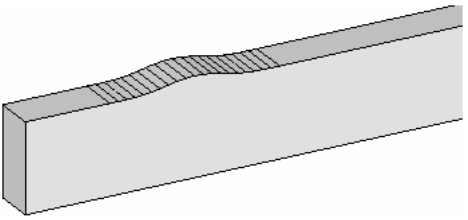


Рис. 6.20. Результат отсечения

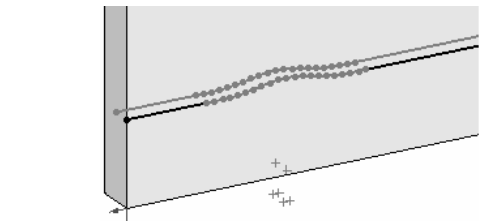


Рис. 6.21. Выбор объектов, аппроксимируемых сплайном

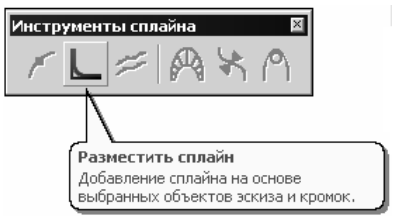


Рис. 6.22. Команда **Разместить сплайн**

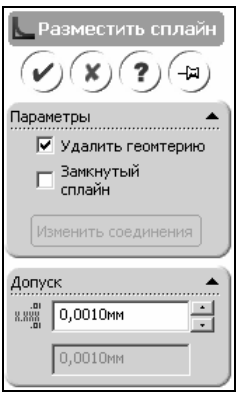


Рис. 6.23. Параметры команды **Разместить сплайн**

Результат аппроксимации совокупности дуг сплайном показан на рис. 6.24. На первый взгляд, картина удовлетворительна. Однако, не удовольствовавшись внешними проявлениями, проанализируем то, что получилось. Указав

на сплайн и подав команду **Инструменты** | **Инструменты сплайна** | **Отобразить кривизну**, получаем результат (рис. 6.25). После выполнения команды вид кривизны может отличаться от ожидаемого, тогда подаем команду **Изменить масштаб кривизны** (эта и другие команды, обрабатывающие сплайны, находятся в панели **Инструменты сплайна**). Получившаяся картина не слишком хороша: кривизна изменяется не плавно. Попытки изменить параметр **Допуск** в настройках команды **Разместить сплайн** ровным счетом ни к чему не приводят.

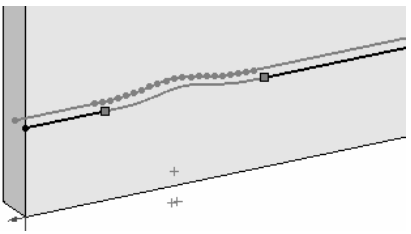


Рис. 6.24. Результат команды **Разместить сплайн**

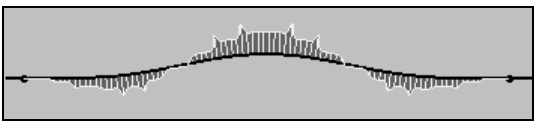


Рис. 6.25. Кривизна сплайна, построенного на базе дуг

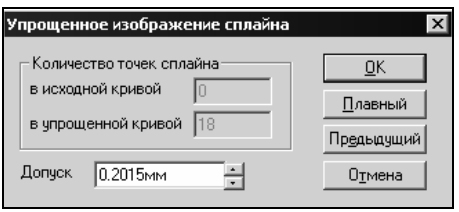


Рис. 6.26. Получение более гладкого сплайна

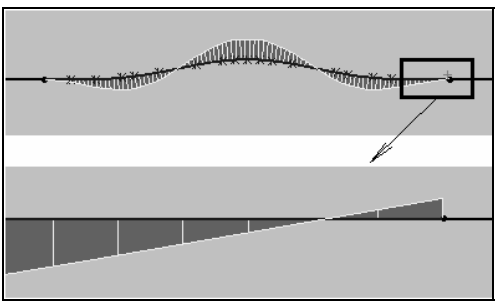


Рис. 6.27. Упрощенное изображение сплайна и фрагмент в зоне перехода в прямолинейный участок

В SolidWorks отсутствуют качественные инструменты для выглаживания сплайнов и, соответственно, поверхностей. Неким паллиативом является команда **Упрощенное изображение сплайна**, где, задав допуск, можно получить сплайн, имеющий меньшее количество точек и, по этой причине, обладающий (возможно) "большей" гладкостью. Результат преобразования с параметрами, показанными на рис. 6.26, приведен в верхней части рис. 6.27. Визуальная оценка дает положительный результат. Памятуя о том, что удаление точек может привести к качественным изменениям на концах сплайна, увеличим картинку в этой зоне (рис. 6.27, внизу). Налицо разрыв в кривизне, что означает наличие угла в месте сопряжения сплайна и прямой. Более того,

кривизна на незначительном удалении от точки сопряжения меняет знак. Это свидетельствует о наличии своего рода бугорка на сплайне возле стыка.

Для сравнения отобразим то же место, но до модификации сплайна. Вид кривизны на рис. 6.28 свидетельствует о наличии проблем с гладкостью сопряжения, но они здесь менее выражены. Поскольку полученный полуфабрикат будет использоваться далее, не будем забывать о выявленных изъянах.



Рис. 6.28. Фрагмент в зоне перехода до изменения сплайна

Предпримем, впрочем, еще одну попытку добиться желаемого. Построим сплайн через точки исходной кривой (она показана на рис. 6.21) и назначим ему сопряжения **Касательность** на обоих концах. Результат показан на рис. 6.29. Как видим, картина вполне удовлетворительная и, что ценно, не содержащая неявных последствий. Это, кстати, подходящий пример того, что некоторые инструменты автоматизации построений могут порождать серьезные побочные эффекты.

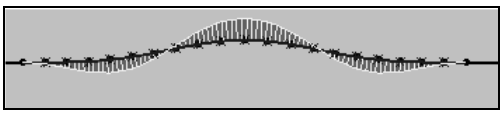


Рис. 6.29. Кривизна сплайна, проходящего через концы дуг

Считая выполненной задачу построения кулачка линейного (он существует на развертке цилиндрического тела), вернемся, однако, к главной цели раздела — построению торцового кулачка. Для более "гладкого" сплайна результат обрезки развертки поверхностью, построенной на базе этого сплайна, показан на рис. 6.30. Как видим, сегментная структура, которая не устроила нас на рис. 6.20, ликвидирована, рабочая поверхность кулачка состоит из трех граней: двух плоских и одной криволинейной цилиндрической.

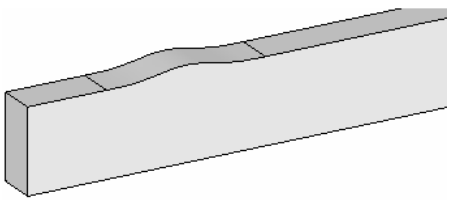


Рис. 6.30. Результат отсечения с использованием "гладкого" сплайна

Возвращаем обрезанный цилиндр в исходное состояние, отжимая кнопку **Плоский** на панели **Листовой металл**. Если все сделано правильно (не нарушена структура данных, позволяющая системе идентифицировать объект как "деталь из листового металла"), то полоса свернется и примет вид рис. 6.31. На модели сохранена топология рабочей поверхности: она состоит из двух плоских и одной криволинейной грани. Заполняем разрыв, вставляя Бобышку, контуры которой сформированы на базе объектов окружения (рис. 6.32). В качестве условия вытягивания бобышки выбираем **До поверхности** (используется плоская грань) и констатируем образование непрерывной плоской грани.

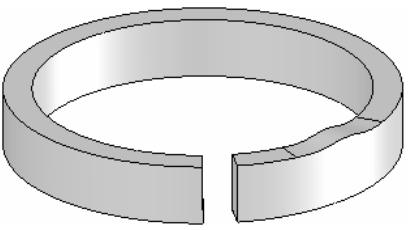


Рис. 6.31. Результат отсечения с использованием "гладкого" сплайна

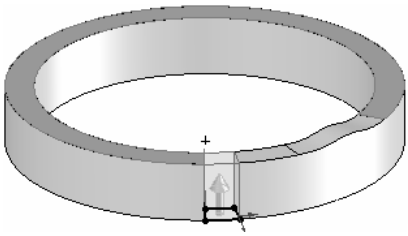


Рис. 6.32. Замыкание цилиндра

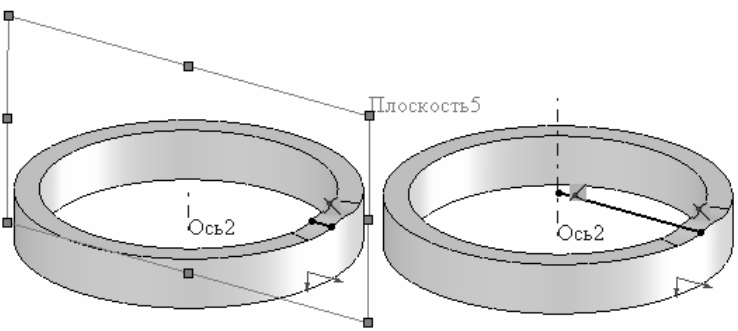


Рис. 6.33. Сечение плоскостью, проходящей через ось, и результат удлинения сечения

Получив кольцо с криволинейным выступом, убедимся, что построенная поверхность подходит для использования в торцовом кулачке. Для этого она должна быть линейчатой, т. е. любое сечение этой поверхности плоскостью, проходящей через ось, должно давать прямую линию (это строгое требование). Для проверки создаем одну из таких плоскостей (так, чтобы она пересекала криволинейный участок), на ней открываем эскиз; в эскизе подаем команду **Эскиз вдоль линии пересечения тел** и указываем на выступ. Если указать получившуюся линию (рис. 6.33, слева), то высвечивается пиктограмма прямой (на иллюстрации она не показана). Затем убедимся в том, что

прямая пересекает ось. Попытаемся назначить взаимосвязь **Совпадение** между одним из концов отрезка и осью кулачка (она должна быть для этого создана). Факт того, что операция выполнена системой (рис. 6.33, справа) свидетельствует о корректности построений.

Опишем альтернативные способы построения подобных объектов, позволяющие не прибегать к разверткам. Последние, надо сказать, не всегда доступны, в частности, для объектов, имеющих двойную кривизну. Эти алгоритмы не связаны с Toolbox, но весьма часто используются в процессе поверхностного моделирования, например, при разработке формообразующих литьевых пресс-форм. Один способ будет предполагать наличие профиля линейного кулачка. Второй — будет являться попыткой непосредственной обработки цилиндрической поверхности.

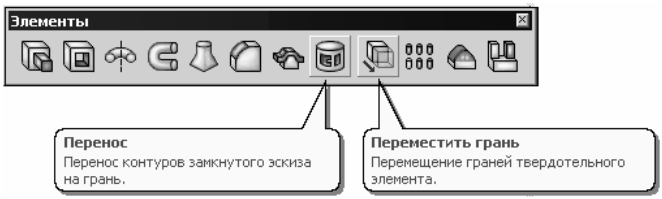


Рис. 6.34. Команды для работы с проекциями линий

Предположим, имеется каким-то способом полученная траектория в плоскости, например, результат команды **Разместить сплайн** (см. рис. 6.24). Цель — получить эту кривую на поверхности цилиндра без искажений (с сохранением линейных и угловых размеров). Команды **Линия разъема** и **Проекционная кривая** бесполезны, поскольку выполняют параллельное проецирование. Более подходит команда **Перенос** панели **Элементы** (рис. 6.34), однако непосредственное применение ее к эскизу успеха не имеет. Причина в том, что функция обрабатывает только замкнутые эскизы (прямое ее назначение — перенос текста на криволинейную грань). Модифицируем эскиз так, чтобы он содержал замкнутый контур (рис. 6.35). При этом во избежание неоднозначности, желательно, чтобы горизонтальный размер контура был меньше длины окружности наружной грани цилиндра. Подавая команду и заполняя необходимые поля (рис. 6.36), получим цилиндр с разделенной цилиндрической гранью, показанный на рис. 6.37 (для наглядности она закрашена более темным оттенком). Здесь нелишней является проверка соответствия длины линий на развертке и на поверхности. Различие наблюдается в пятом знаке — это вполне удовлетворительный результат.

Имеем базу для дальнейших построений. Необходимо отсечь часть цилиндра, лежащую "выше" верхнего контура грани. Для этого нужно построить искомую рабочую поверхность. Используем команду **Линейчатая поверхность**

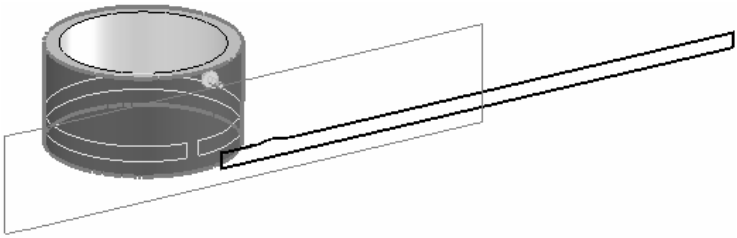


Рис. 6.35. Подготовка контура для наложения на поверхность

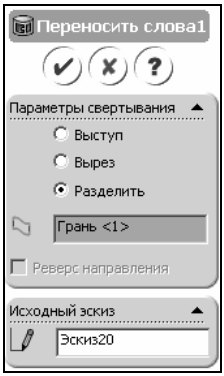


Рис. 6.36. Параметры команды **Перенос**

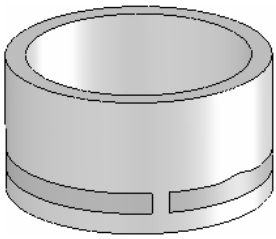


Рис. 6.37. Результат выполнения переноса контура на поверхность

из группы **Поверхности** (рис. 6.38). Убеждаемся, что она позволяет получить линейчатую поверхность, основанную на некоторой совокупности направляющих (их нужно поместить в поле **Выбор кромки**), причем образующие этой поверхности будут перпендикулярны заданной поверхности (поэтому выбираем для поверхности **Тип — Перпенд. поверхности**). Длину образующей (поле **Расстояние/направление**) назначаем несколько больше толщины цилиндра. Поскольку дальнейшие построения предполагают манипуляции с поверхностью как с единым объектом, активизируем опцию **Отсечь и сшить**. Предварительный просмотр дает картину рис. 6.39, а результат (при скрытом цилиндре) имеет вид рис. 6.40.

Из-за того, что профиль был укорочен (за счет линейной части), кольцо получилось разомкнутым. Заполнить его можно, построив поверхность **По сечениям** на базе свободных кромок. Она, однако, не будет примыкать вплотную к наружной цилиндрической поверхности (наружная кромка будет прямой линией). Поэтому заплатку строим с достаточной тщательностью. На плоской поверхности заготовки создаем эскиз, а на эскизе формируем контур, состоящий из двух отрезков — это проекции свободных кромок — и двух дуг, центры которых лежат на оси цилиндра (эти взаимосвязи нужно назначать вручную), а концы — на концах отрезков. Посредством команды **Вставка**

Поверхность | **Плоская поверхность** создаем заплатку, которую затем сшиваем (используется одноименная команда) с исходной поверхностью (рис. 6.41 и 6.42).

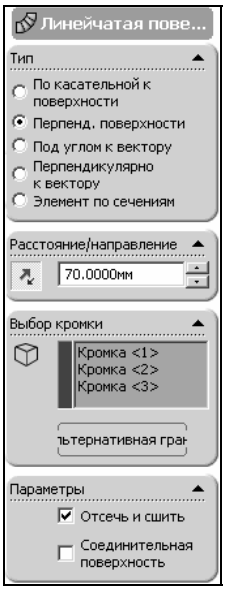


Рис. 6.38. Построение отсекающей поверхности

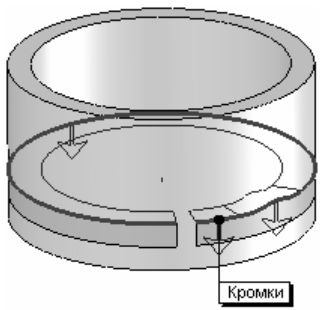


Рис. 6.39. Предварительный просмотр результата

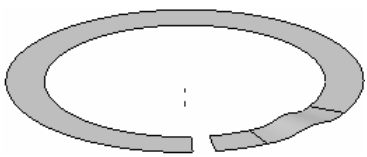


Рис. 6.40. Заготовка отсекающей поверхности

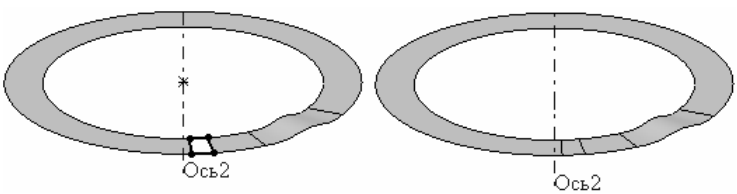


Рис. 6.41. Доработка отсекающей поверхности: эскиз и новая грань

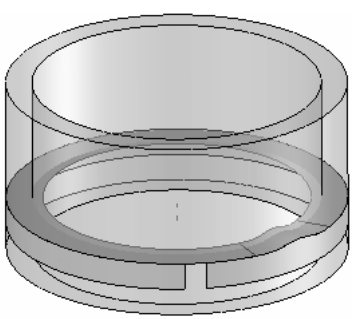


Рис. 6.42. Заготовка кулачка совместно с отсекающей поверхностью

Казалось бы, все в порядке. Есть твердое тело, есть поверхность, которая внутри цилиндра выступает за его пределы, а снаружи ее край "точно" лежит на внешней поверхности цилиндра (см. рис. 6.42, где скрытый ранее цилиндр вновь отображен). Однако попытка применить команду **Вставка** | **Вырез** | **Поверхностью** сопровождается сообщением об ошибке. Вероятной причиной неудачи является зазор (визуально он не диагностируется, поскольку его размер находится на уровне математической погрешности программы) между краем поверхности и гранью цилиндра. Попытка удлинить отсекающую поверхность в наружном направлении не удается. Поэтому уменьшаем толщину цилиндра, применяя команду **Вырез**. Для выреза используем окружность, эквидистантную кромке цилиндра (рис. 6.43).

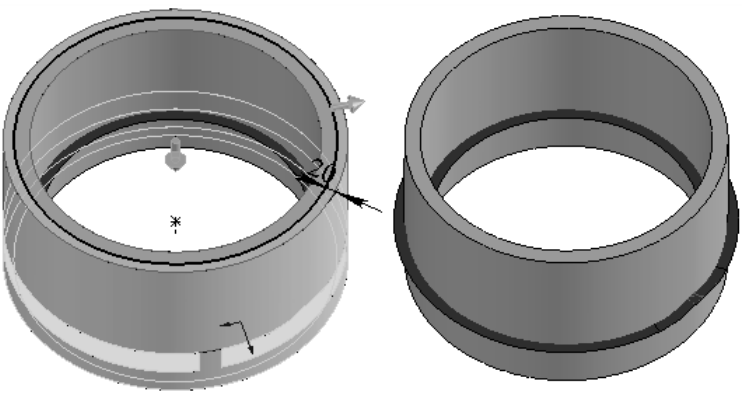


Рис. 6.43. Смещение наружной грани цилиндра за счет выреза: выполнение команды и результат

После этого еще раз подаем команду **Вырез** | **Поверхностью**, которая выполняется без проблем. Толщину цилиндра "наращиваем" до исходного ее состояния посредством команды **Переместить грань** (рис. 6.44).



Рис. 6.44. Выполнение команды **Переместить грань**

Получившийся результат, в принципе, эквивалентен показанному на рис. 6.32. Однако попытка проверить, является ли сечение выступа плоскостью, проходящей через ось (аналогично рис. 6.34), приводит к тому, что диагностируется наличие сплайна. Тем не менее, если этой же плоскостью пересечь отсекающую поверхность (которая показана на рис. 6.41), то результатом будет прямая. Таким образом, погрешности внутренней математики программы приводят к определенной неоднозначности. Как представляется, получившаяся деталь пригодна для последующего анализа.

Еще один способ проектирования профиля кулачка связан с попыткой каким-либо образом получить профиль, лежащий на цилиндрической поверхности. В группе команд **Объекты эскиза** находится команда **Сплайн на поверхности**. Она позволяет разместить на произвольной поверхности пространственный сплайн (формально он существует в трехмерном эскизе). Затем нужно из каких-либо внешних источников взять размеры, определяющие положение точек сплайна, после чего воспроизвести описанные выше действия. Можно пойти и более изощренным путем. Получив некую траекторию на плоскости (в том числе и на базе функции **Кулачок**), нужно образмерить ее точки, а затем через инструмент **Уравнений** связать размеры, определяющие сплайн на поверхности, с размерами на плоскости. Это весьма трудоемкая операция, однако, если по каким-то причинам невозможно (или нерационально) наложить кривую на поверхность, она способна дать некий результат. При этом придется преодолевать затруднения, связанные с достижением касательности между сплайном на поверхности и горизонтальными участками траектории, которые, будучи расположены на цилиндре, являются дугами.

И последнее в этом разделе. Для последующего анализа создадим механизм на базе кулачка. Система спроектирована так, чтобы обеспечить перекатывание ролика, расположенного на вилке штока, по поверхности. Для этого шток квадратного сечения вставлен в ответное отверстие в пластине-поводке. На противоположном конце поводка имеется цилиндрическое отверстие, по диаметру совпадающее со стержнем на кулачке. В целях отсечения лишних сущностей стержень и кулачок составляют одно целое. Ролик (его диаметр соответствует тому, который использовался при формировании профиля кулачка) может вращаться вокруг оси, а она, в свою очередь, относительно вилки штока. Квадратная призма (в дальнейшем она будет играть роль груза) с квадратным же отверстием находится на штоке, а ее вертикальное положение относительно штока определяется взаимосвязью **Расстояние**. Геометрия сборки и взаимосвязи, определяющие взаимное положение деталей, показаны на рис. 6.45. Динамический анализ конструкции будет описан в *главе 7*.

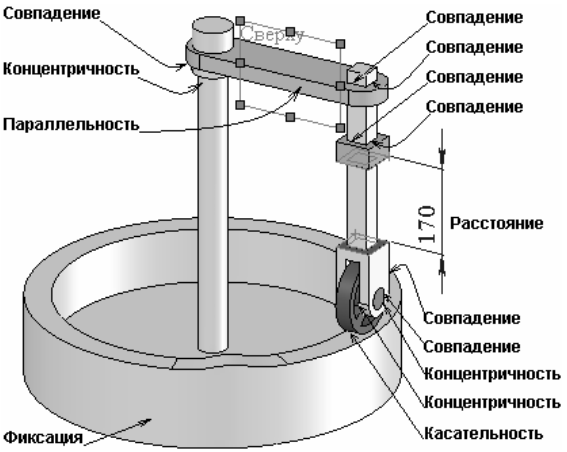


Рис. 6.45. Торцовый кулачок в составе механизма

6.2. Проектирование и расчет балок

В SolidWorks Toolbox включена процедура расчета балок. Она связана с базой данных **Конструкционная сталь**, из которой черпает информацию о геометрических параметрах сечений.

6.2.1. Функциональные возможности и ограничения

Возможности Toolbox, связанные с *балками*, базируются на двух функциях: базе данных по стандартным профилям и процедуре расчета балок. База содержит стандарты ANSI, ISO, DIN и т. д. В каждый из каталогов включены несколько типов профилей, которые, в свою очередь, содержат номенклатуру размеров. Для профилей доступны массово-инерционные характеристики. Создание профиля подразумевает создание эскиза на текущей активной плоскости редактируемой детали и помещение на этот эскиз контура профиля. Дальнейшие действия всецело зависят от пользователя.

Расчет балок основан на применении зависимостей Сопротивления материалов, подразумевающих недеформируемость поперечного сечения, линейное распределение напряжений по высоте сечения, отсутствие поперечного сдвига. Причем эти гипотезы действуют независимо от соотношения размеров конкретного объекта. Доступны шесть типов расчетных схем (рис. 6.46). Две из них — консольная балка с сосредоточенной силой на конце и распределенной по длине нагрузкой. Остальные — балка на двух опорах с одной или двумя сосредоточенными силами и под действием распределенной нагрузки.

Вычислять можно как прогиб, так и максимальное нормальное напряжение. Нагрузка относительно сечения балки может быть сориентирована только в двух направлениях.

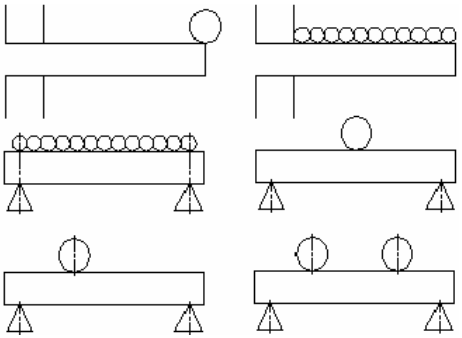


Рис. 6.46. Виды статических схем

Пример создания и расчета балки, сопровождающийся сравнением с анализом МКЭ, приведен ниже.

6.2.2. Интерфейс

Выбор профиля осуществляется через окно **Конструкционная сталь** (см. рис. 6.48), которое можно вызвать непосредственно из меню **Toolbox** или же из окна **Расчет балки** (см. рис. 6.47). Созданный эскиз, подобно другим объектам, формируемым посредством Toolbox, не имеет ассоциативной связи с базой данных. При соответствующих настройках модуля изменения, внесенные в объект пользователем, теряются после перезагрузки модели. Однако изменить имеющуюся деталь или профиль редактированием через базу данных невозможно.

6.2.3. Практика использования

Спроектируем балку, рассчитаем ее посредством инструментов Toolbox, а затем сравним расчет с результатами МКЭ.

Применение Toolbox

Создаем деталь, активизируем одну из имеющихся плоскостей и подаем команду **Toolbox | Конструкционная сталь** (рис. 6.47). В появившемся окне выбираем стандарт, тип профиля, а затем — размер (рис. 6.48). К сожалению, элементы, относящиеся к ГОСТ, рассчитываться не могут — объекты пользователя не допускают их сопровождения расчетными зависимостями. По мере выбора параметров из выпадающих списков, в окне появляется чертеж

профиля (его условный вид), а также геометрические и массово-инерционные характеристики. Последние представляют интерес с точки зрения сравнения с теми, которые определяет SolidWorks.

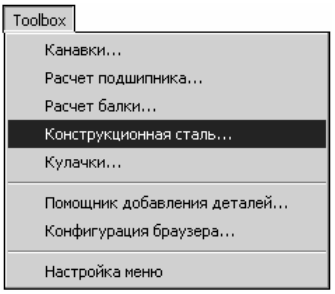


Рис. 6.47. Вызов команды для работы с профилями

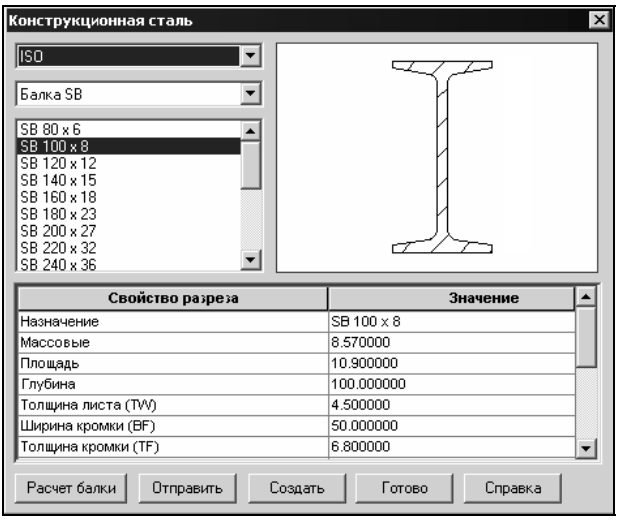


Рис. 6.48. Выбор стандарта, типа профиля и размера

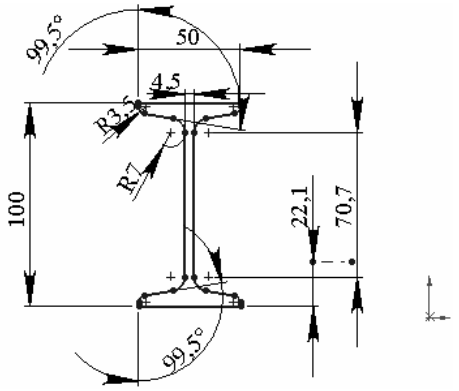


Рис. 6.49. Профиль балки в эскизе

Определившись с тем, какой профиль будет использован, можно выполнить расчет и/или поместить профиль в модель. В принципе, эти операции никак не связаны. Нас не интересует подбор профиля под конкретную задачу, поэтому, выбрав произвольный размер, нажимаем кнопку **Создать**. На активной плоскости создается эскиз профиля данного стандарта, выполненный в соответствии с показанными в окне размерами (рис. 6.49). Поскольку привяз-

ки объектов эскиза к его системе координат отсутствуют, то назначаем их. На основе эскиза вытягиваем бобышку длиной 750 мм (рис. 6.50).

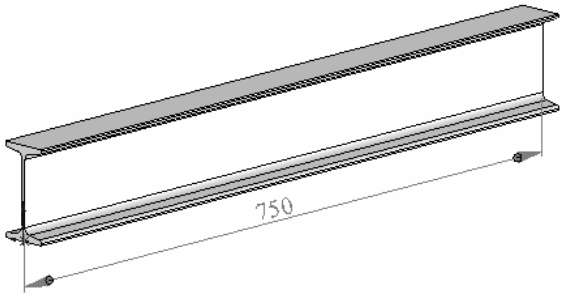


Рис. 6.50. Половина балки

В окне **Конструкционная сталь** нажимаем кнопку **Расчет балки**, после чего появляется одноименное окно (рис. 6.51). Перемещая ползунковый переключатель, присутствующий в группе **Тип нагрузки**, выбираем расчетную схему: балка на двух шарнирных опорах с сосредоточенной силой посередине. На первом этапе будем рассчитывать прогиб в центре, поэтому для переключателя **Тип расчета** выбираем **Отклонение**. Сечение двутавра ориентируем вертикально, выбрав для переключателя **Ось** значение **Локальная ось X**. Заполняем поля:

- **Модуль** — модуль упругости материала балки;
- **Длина** — расстояние между опорами;
- **Нагрузка** — действующая посередине вертикальная сила.

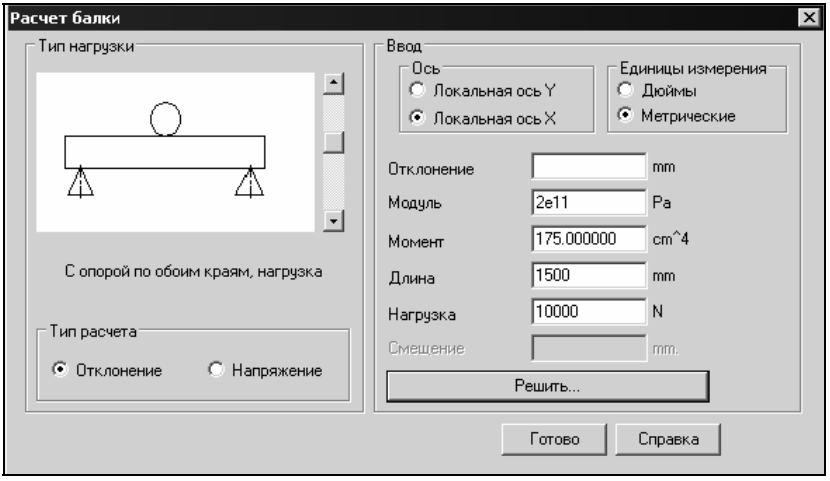


Рис. 6.51. Окно **Расчет балки** с информацией для расчета прогиба

Величина **Момент** — момент инерции сечения относительно оси X профиля (в данном случае это горизонтальная ось) вычисляется программой.

После нажатия кнопки **Решить** программа вычисляет величину **Отклонение** (прогиб в центре). В нашем случае оно равно 2,01 мм.

Если переключить **Тип расчета** в положение **Напряжение**, то система рассчитает момент сопротивления сечения, а после нажатия кнопки **Решить** вычислит максимальное напряжение, поместив его в одноименное поле (рис. 6.52). Отметим, что если в вычисляемых полях **Отклонение** или **Напряжение** присутствует какая-либо информация, то кнопка **Решить** нефункциональна.

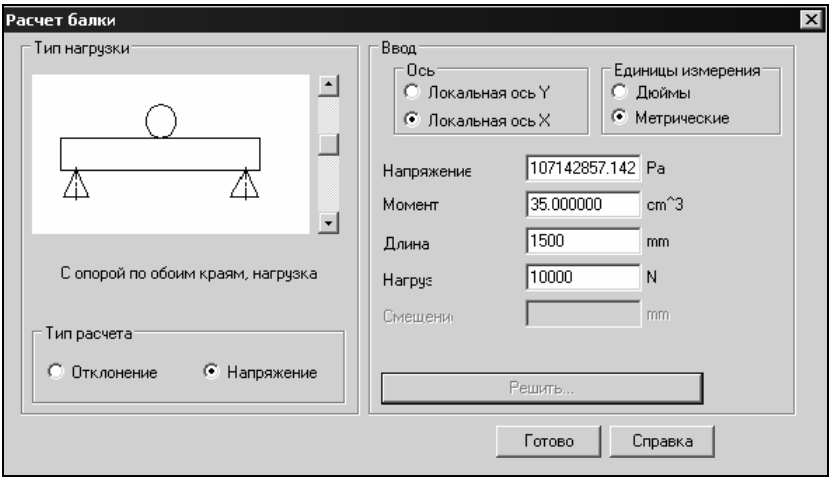


Рис. 6.52. Окно **Расчет балки** с результатом расчета напряжений

Численный анализ

Имея для балки результаты, полученные посредством зависимостей Сопротивления материалов, выполним ее расчет с использованием метода конечных элементов. Как и ранее, будем применять программу COSMOSWorks. На первом этапе не будем делать анализ постановки задачи, а предпримем "лобовое" решение, посмотрев, к чему оно приведет (вычислительные подробности, необходимые для получения достоверной картины напряжений, мы пока опустим).

Берем модель, показанную на рис. 6.54, в которой учтена симметрия в продольном направлении, и отрезаем от нее половину вертикальной плоскостью — она же является плоскостью симметрии геометрии и граничных условий. Ставим кинематические граничные условия: **Нагрузки** | **Ограничения** | **Симметрия** на гранях, лежащих в плоскостях симметрии, и равенство

нулю перемещения нижней кромки правого торца балки в направлении, перпендикулярном нижней грани (рис. 6.53). Для верхней кромки левого торца назначаем силу, действующую перпендикулярно верхней грани: **Нагрузки** | **Ограничения** | **Сила** | **Приложить нормальную силу**. Величина силы — 2 500 Н, что составляет ¼ от нагрузки, действовавшей на "целую" балку. Результат наложения граничных условий показан на рис. 6.55.

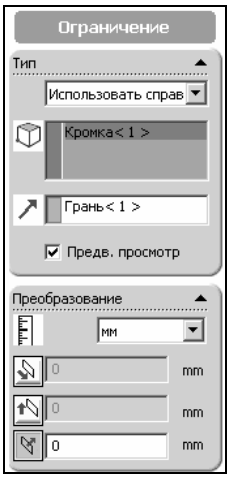


Рис. 6.53. Граничное условие на конце балки

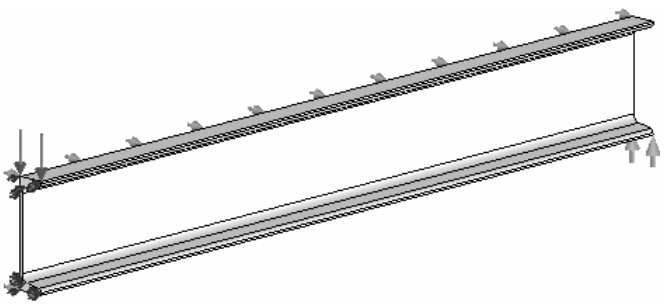


Рис. 6.54. Четверть балки — граничные условия

Строим сетку с качеством **Высокое** (конечные элементы второго порядка). Фрагмент дискретизации показан на рис. 6.55. Отметим, что плотность сетки недостаточна для достоверной оценки распределения напряжений по толщине стенок и во внутренних углах.

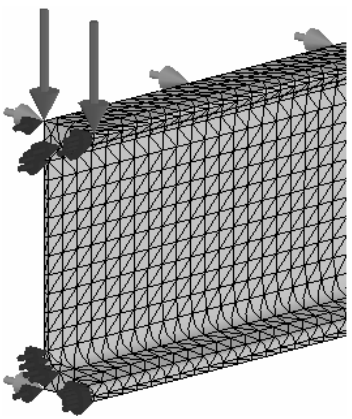


Рис. 6.55. Фрагмент сетки конечных элементов

Выполнив расчет, получаем картины перемещений в вертикальном направлении UY (рис. 6.56) и нормальных напряжений от изгиба SZ (рис. 6.57). Мы будем анализировать только те компоненты напряженно-деформированного состояния, которые фигурируют в расчете посредством Toolbox. Как видно, максимальный прогиб по оценке МКЭ несколько больше, чем решение по "Сопромату", а наибольшие изгибные напряжения — существенно выше.

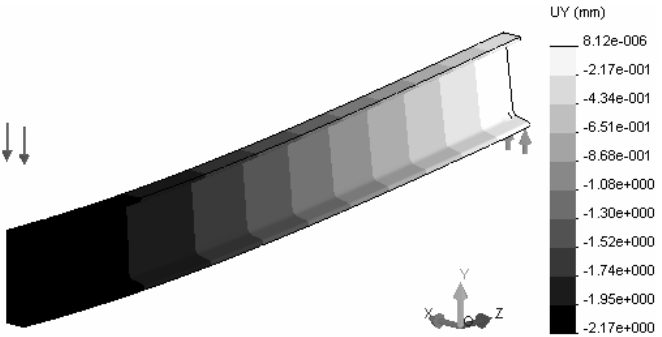


Рис. 6.56. Прогиб балки

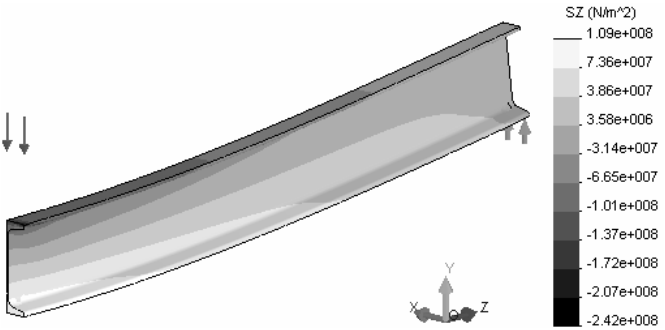


Рис. 6.57. Изгибные напряжения

Причин того, что величина прогиба оказалась больше, чем в расчете по балочной модели, несколько:

1. МКЭ учитывает деформацию поперечного сдвига (в нашем случае — в плоскости YZ), а балочная аппроксимация — нет.
2. В отличие от балочной модели, МКЭ моделирует локальную деформацию в зоне опертой кромки.
3. Поскольку нагрузка равномерно распределена по кромке, то в реальности возникает изгибная деформация полки швеллера, которая в балочной аппроксимации игнорируется.

Пункты 2 и 3 описывают эффекты, влияющие на картину изгибных напряжений, причем в последнем случае изгиб полки относительно продольной оси, взаимодействуя с заделкой, за счет эффекта Пуассона порождает составляющую вдоль продольной оси. Фрагмент диаграммы нормальных напряжений с увеличением масштаба в районе плоскости симметрии показан на рис. 6.58.

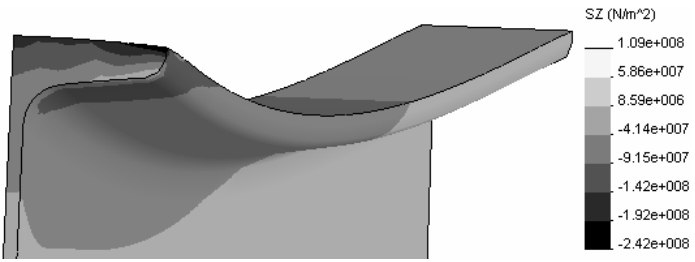


Рис. 6.58. Изгибные напряжения — фрагмент в сечении возле плоскости симметрии

Постараемся подогнать численное решение под "Сопромат". Борьбу ведем с поперечным сдвигом балки и изгибом полки. Первый и самый простой подход — использовать линейные конечные элементы, а также выполнять расчет на более редкой сетке. Если по толщине полки будет размещен только один слой таких элементов, то, в силу того, что в пределах элемента деформация постоянна, изгибные моды созданы не будут. По той же причине будет ослаблено влияние деформаций поперечного сдвига. Соответствующая сетка конечных элементов показана на рис. 6.59.

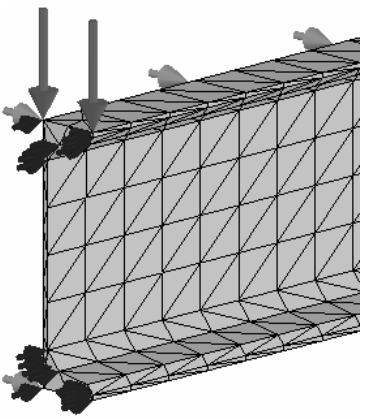


Рис. 6.59. Редкая сетка линейных элементов и граничные условия

Картина перемещений (рис. 6.60) приблизилась к ожидаемой, но на этот раз максимальные перемещения несколько меньше требуемых (как представля-

ется, балка приобрела избыточную жесткость за счет менее точной аппроксимации геометрии сечения). Распределение изгибных напряжений (рис. 6.61) также приблизилось к балочной модели — отличие составляет около десяти процентов.

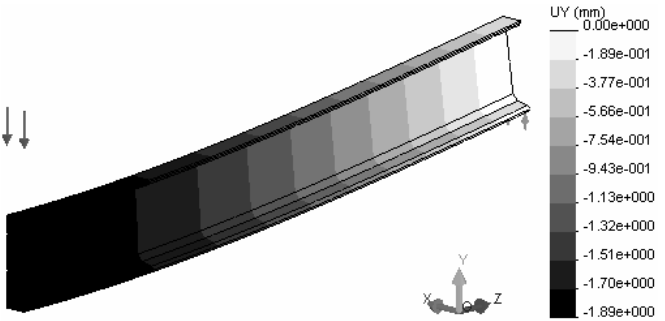


Рис. 6.60. Прогиб балки при аппроксимации линейными элементами

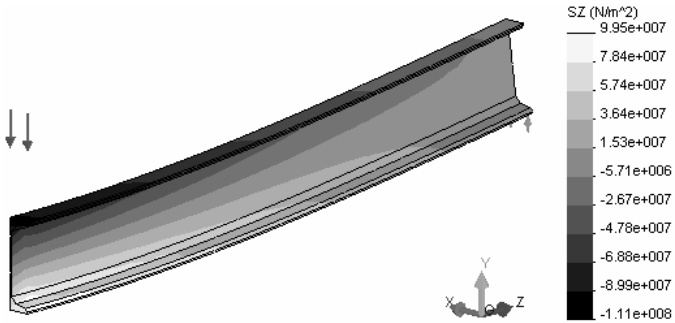


Рис. 6.61. Изгибные напряжения при аппроксимации линейными элементами

Данный подход обладает неприятной побочной особенностью: если балка входит в состав некоей конструкции, то в силу условностей COSMOSWorks все остальные объекты также должны аппроксимироваться линейными элементами. Попытаемся модернизировать расчетную схему так, чтобы получить ожидаемый результат для параболических элементов. Вставим балку в сборку, а затем к торцам присоединим две пластины, сечение которых тождественно профилю балки (рис. 6.62). Пластины введены для того, чтобы препятствовать изгибу полки. Граничные условия, действовавшие на концах балки, сохраняют свое положение, однако теперь они приложены к кромкам стыка и по поверхности сопряжения левого конца с пластиной. Для пластин назначаем жесткость материала в 1 000 раз больше, чем для материала балки (рис. 6.63).

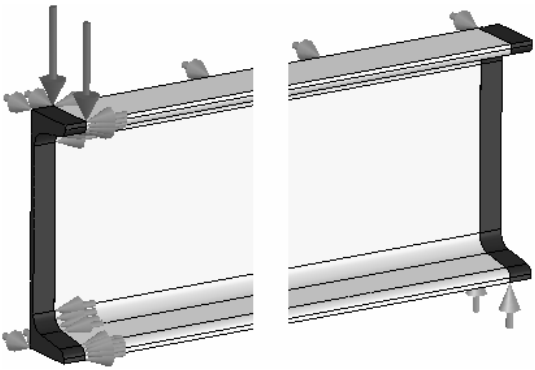


Рис. 6.62. Балка в сборке

Диаграммы перемещений и напряжений после расчета с сеткой элементов второго порядка, плотность которой идентична рис. 6.55, показаны на рис. 6.63 и 6.64. Результат по перемещениям удовлетворительный, по напряжениям — отрицательный. В последнем случае жесткие пластины стесняют поперечные деформации, что приводит к концентрации напряжений.

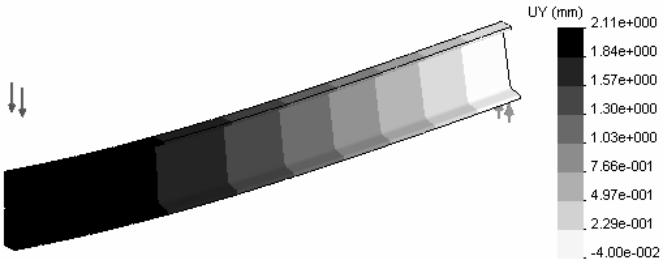


Рис. 6.63. Прогиб балки в сборке

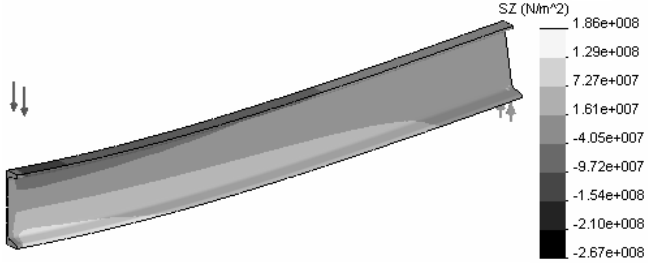


Рис. 6.64. Изгибные напряжения для балки в сборке

Прибегнем к еще более экзотическим инструментам. Придадим материалу балки свойства анизотропии, сделав его жесткость в направлениях, отличных

от того, которое будет совпадать с осью балки, в 100 раз большей, чем реальная. Увеличим в 100 раз модули сдвига во всех плоскостях и изменим коэффициенты Пуассона так, чтобы они соответствовали базовым соотношениям теории упругости (в противном случае, решение невозможно). Фактически получаем трансверсально-изотропную среду с плоскостью изотропии YZ. Повысив жесткость, мы сводим на нет изгиб полок относительно продольной оси балки и локальные деформации в зоне опоры. Кроме того, должна уменьшиться концентрация напряжений в плоскости симметрии. Для того чтобы такой материал получить, в окне **Материал** выбираем опцию **Определенный пользователем**, а затем для параметра **Тип модели** выбираем **Линейный Упругий Анизотропный**, после чего вводим соответствующие числа (рис. 6.65). Перед подачей команды **Применить/Редактировать материал**, после которой и возникает данное окно, следует создать систему координат, связанную с балкой (рис. 6.66), относительно которой и подбирать характеристики упругости. Чтобы она появилась в поле **Справочная геометрия**, необходимо перед вызовом окна эту систему координат указать.

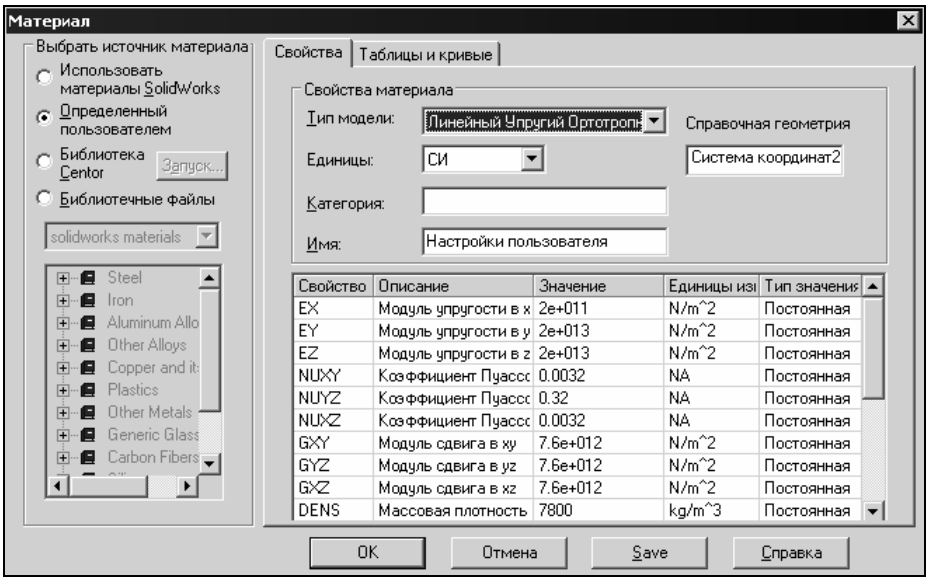


Рис. 6.65. Жесткость ортотропного материала

Как по перемещениям (рис. 6.67), так и по напряжениям (рис. 6.68) результаты близки к "Сопромату". Нормальные напряжения по высоте изменяются практически линейно. Отметим, что получены они на плотной сетке элементов второго порядка.

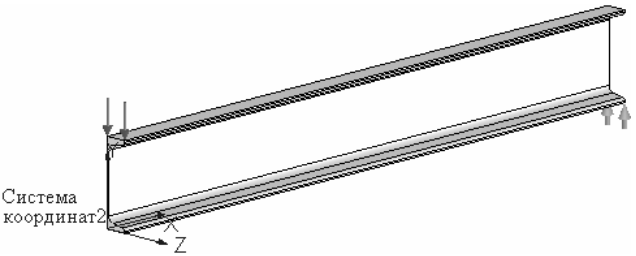


Рис. 6.66. Справочная система координат для связи с ортотропным материалом

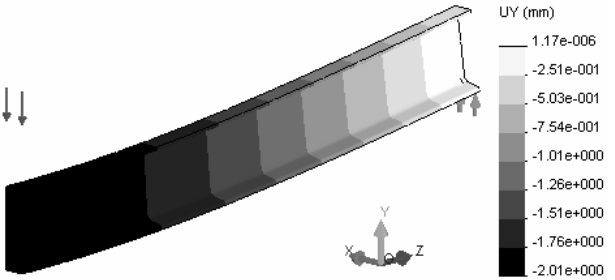


Рис. 6.67. Прогиб анизотропной балки

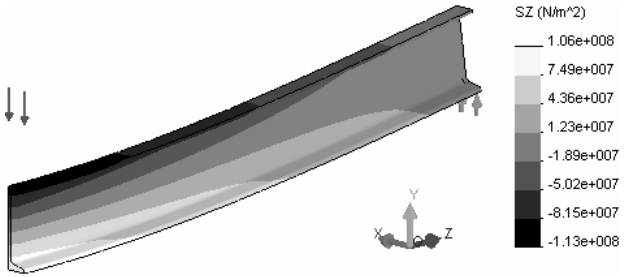


Рис. 6.68. Изгибные напряжения анизотропной балки

Проверим этот алгоритм "доработки" решения точного до уровня приближенного на балке с распределенной нагрузкой (рис. 6.69 и 6.70). "Балочные" изгибные напряжения равны 53,6 МПа.

Численный результат по перемещениям (UY макс. = –1,33 мм) для элементов второго порядка на относительно плотной сетке вполне удовлетворителен. А вот изгибные напряжения имеют зону концентрации, которая, на сей раз, локализована у опоры (рис. 6.71). Решая задачу для анизотропной балки, получаем диаграмму напряжений в виде рис. 6.72. И здесь результат "подогнан" к балочной модели с высокой точностью.

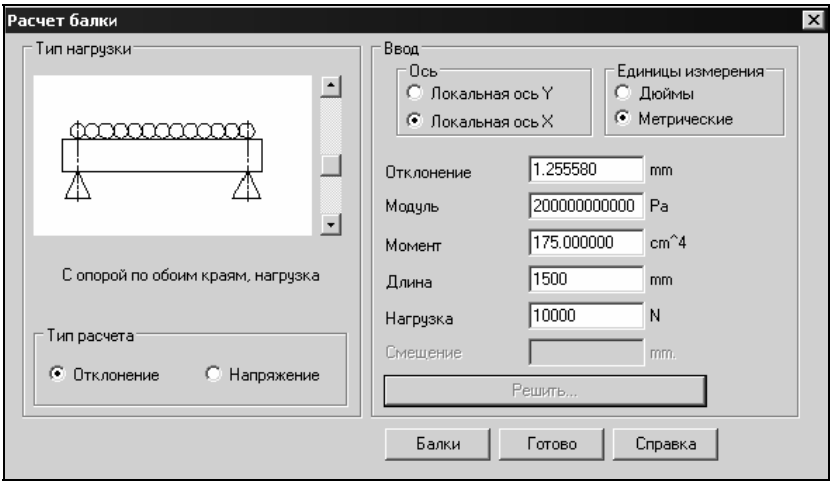


Рис. 6.69. Расчет балки с распределенной нагрузкой

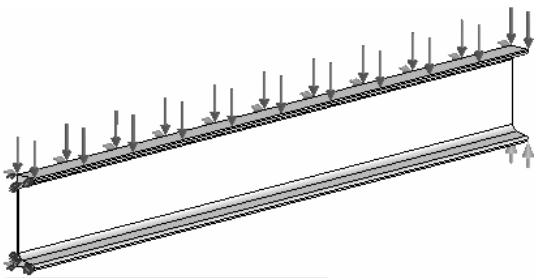


Рис. 6.70. Геометрическая модель и граничные условия для МКЭ

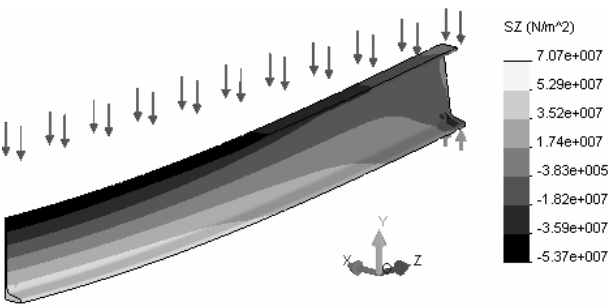


Рис. 6.71. Изгибные напряжения изотропной балки с распределенной нагрузкой

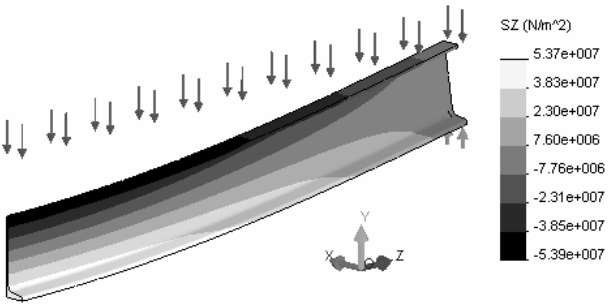


Рис. 6.72. Изгибные напряжения анизотропной балки с распределенной нагрузкой

Выводы

Модули **Конструкционная сталь** и **Расчет балки** предназначены для доступа к базе данных по профилям металлопроката и процедурам их расчета по методикам Сопротивления материалов. Надо сказать, что эти приложения появились до того, как в SolidWorks была введена функция **Сварные конструкции**, способная обрабатывать совокупность профилей, присутствующих в детали. Тем не менее, рассмотренные здесь процедуры также сохраняют актуальность, в частности, благодаря обширной базе данных и возможности редактировать профиль после вставки в модель SolidWorks. Использование же базы **Элементы конструкций** из Toolbox Browser позволяет вставлять детали, являющиеся профилями, непосредственно в сборку. В ряде ситуаций эта функция бывает полезна.

Мы уделили повышенное внимание анализу расчетных моделей для того, чтобы ясно очертить пределы применимости упрощенных методик, а также показать источники расхождений с результатами численного анализа (научившись заодно манипулировать достаточно "тонкими" настройками моделей МКЭ). Из тестов следует, что встроенный анализ позволяет на стадии проектирования оценить работоспособность конструктивного элемента вне контекста. Что же касается зон взаимодействия балок с окружающими объектами, имеющими, в частности, высокую жесткость, то здесь возможности МКЭ трудно чем-либо заменить. Мы еще раз убедились, что изолированный расчет объекта не является исчерпывающим для оценки конструкции или узла.

6.3. Расчет подшипника

Одна функция Toolbox предназначена для расчета несущей способности и долговечности подшипников, присутствующих в стандартной поставке (объекты пользователя и те, которые соответствуют локальным стандартам, в частности ГОСТ, в эту категорию не попадают). Окно, возникающее после

подачи команды **Расчет подшипника** из меню **Toolbox**, показано на рис. 6.73. Как видно, далеко не все коэффициенты, присутствующие в зависимостях Деталей машин, имеют аналоги среди параметров программы. Отличаются, соответственно, и результаты, причем, как правило, в сторону завышения характеристик (прогнозируемых!). Определенную пользу можно извлечь из того, что, например, для шариковых подшипников можно назначать число и диаметр шариков (независимо от того, как реализуется проект), получая оценку **Работоспособности** (в отечественной терминологии — *грузоподъемности*). Этот факт в определенной степени снимает ограничение на работу с отсутствующими стандартами. Кроме того, если не удалось подобрать объект с подходящей грузоподъемностью, можно, выбрав для переключателя пункт **Предназначение**, сделать поле **Работоспособность** редактируемым и ввести нужную величину. Затем, зная **Эквивалентную нагрузку** (в отечественной терминологии — *эквивалентная динамическая нагрузка*), можно определить **Срок службы** *(ресурс)* в часах.

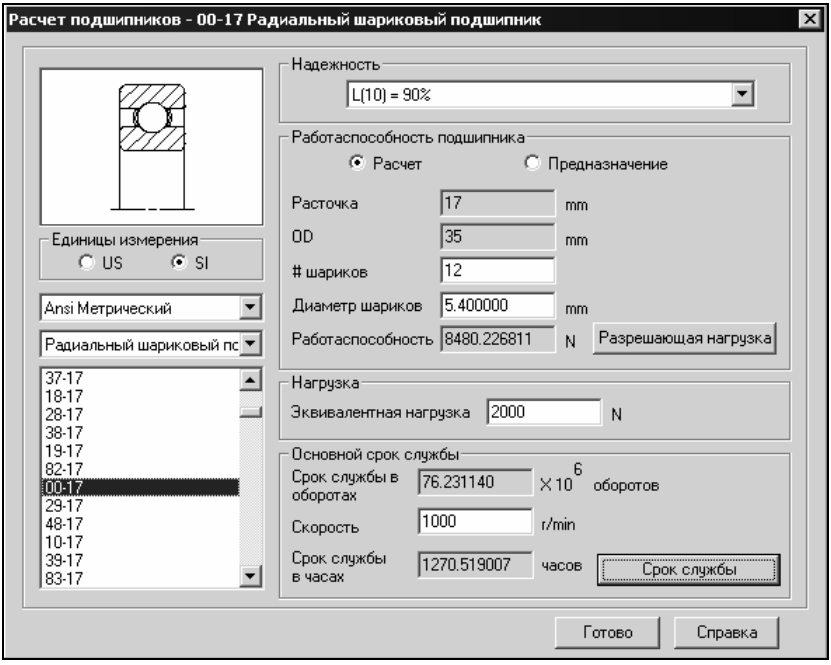


Рис. 6.73. Окно **Расчет подшипников**

Заключение по поводу использования функции **Расчет подшипника** таково. На этапе предварительного проекта ее использовать можно. Оценка грузоподъемности более-менее соответствует справочным значениям. Что касается ресурса, то здесь лучше использовать общепринятые методики.

6.4. Toolbox Browser

Toolbox содержит базу данных типовых элементов деталей — канавок, профилей проката, а также базу стандартных деталей: крепежа, проката, подшипников, штампов и уплотнений, элементов трансмиссий и т. д., сгруппированных в соответствии со стандартами: ISO, DIN, JIS и т. д. База содержит возможности пополнения. Поэтому в официальную поставку входит библиотека деталей ГОСТ, разработанная фирмой SolidWorks Russia.

Доступ к стандартным объектам осуществляется через Toolbox Browser, подключаемый как приложение к SolidWorks в меню **Добавления**. Toolbox также должен быть активен. Затем создается новая или открывается имеющаяся сборка. Если работа происходит в SolidWorks версии до 2005 года, то Toolbox Browser появляется на вкладке Toolbox. Щелкнув по ней, получаем доступ к набору стандартов. После выбора стандарта появляется список библиотек, а после активизации необходимой библиотеки — доступен набор типоразмеров (рис. 6.74, слева). На иллюстрации видны названия всех доступных на момент выхода книги библиотек ГОСТ. В SolidWorks 2005 Toolbox:Browser был перемещен в **Библиотеку проектирования**, расположенную на **Панели задач**. После ее активизации посредством команды **Вид** | **Панель задач** она располагается справа от окна с моделью и имеет вид, как показано на рис. 6.74, справа.

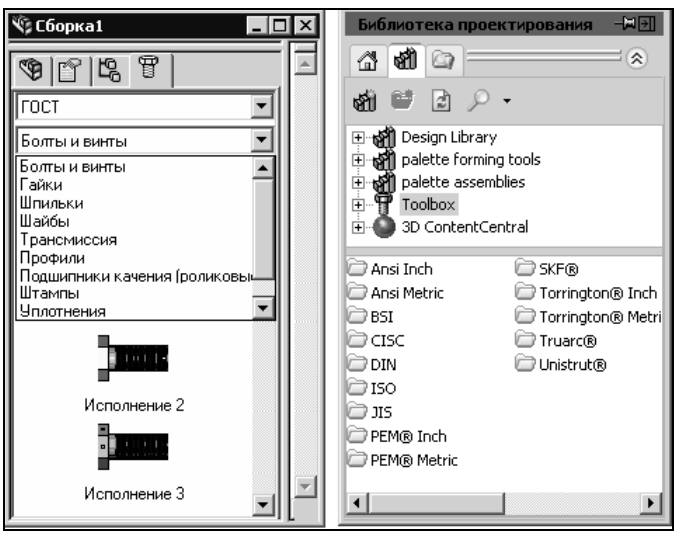


Рис. 6.74. Toolbox Browser со списком библиотек в SolidWorks версий 2004 и 2005

Помещение детали в сборку осуществляется перетаскиванием, в процессе которого возникает окно с типоразмерами, из которых следует выбрать необ-

ходимый. Если в ходе перетаскивания деталь перемещается над подходящим объектом (в стандартных деталях, как правило, присутствует **Ссылка на сопряжение**), то возникают пиктограммы, отображающие потенциальные взаимосвязи. В зависимости от настроек *браузера* (рис. 6.75) вставленная деталь может помещаться как ссылка на элемент библиотеки, или же для нее создается локальная копия с помещением в назначенный каталог. Здесь нужно иметь в виду, что вставка со ссылкой не позволяет сохранить отредактированный объект. Более того, если деталь вставлена как ссылка, то перевести ее в другое состояние затем невозможно.

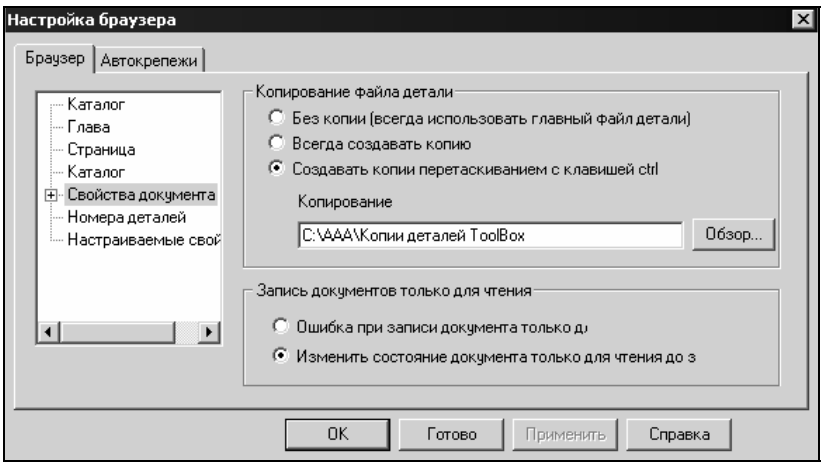


Рис. 6.75. Окно **Настройка браузера**

Еще один способ позиционирования стандартных деталей — команда **Автокрепежи**, присутствующая в панели инструментов **Сборка** (рис. 6.76) или в меню **Вставка**. Если детали сборки содержат отверстия, созданные командой **Отверстие под крепеж**, то после подачи этой команды система предлагает начать поиск подходящих отверстий и, найдя их, вставляет (взаимодействуя с оператором) крепежные изделия. Структура крепежа назначается применительно к стандарту на вкладке **Автокрепежи** окна **Настройка браузера**.



Рис. 6.76. Панель инструментов **Сборка** с командой **Автокрепежи**

Один из каталогов в нескольких стандартах называется **Трансмиссия**. Он содержит элементы зубчатых зацеплений: прямозубые и косозубые колеса, рейки и конические колеса. Диалоговое окно для подбора типоразмера пока-

зано на рис. 6.77. Как видно, номенклатура варьируемых параметров весьма ограничена.

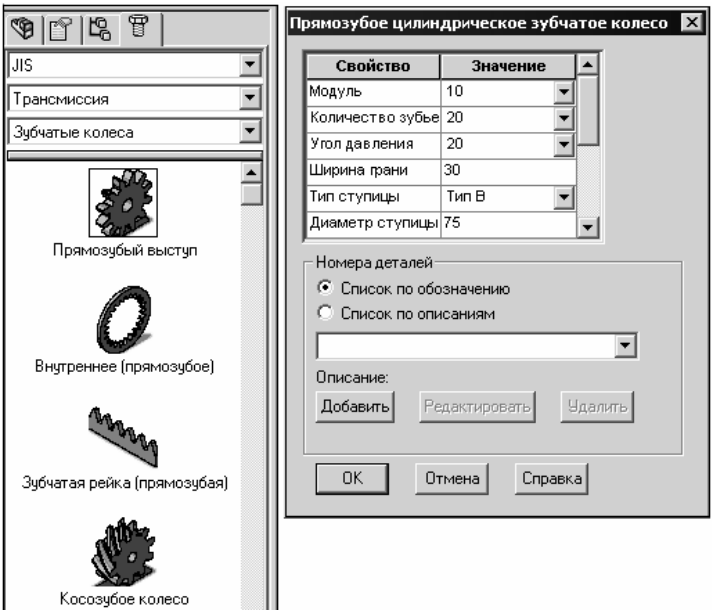


Рис. 6.77. Выбор элемента зубчатого зацепления и назначение параметров

На рис. 6.78 показано *прямозубое колесо*, созданное в соответствии с приведенными параметрами. Программа строит модель в следующей последовательности: цилиндр; вырез между двумя зубьями; размножение выреза; формирование ступицы. Эскиз, на базе которого формируется впадина между зубьями, показан на рис. 6.79. Как видно, вместо ожидаемого *эвольвентного профиля*, в эскизе начерчена окружность. Это значит, что зуб будет иметь цилиндрическую рабочую поверхность.

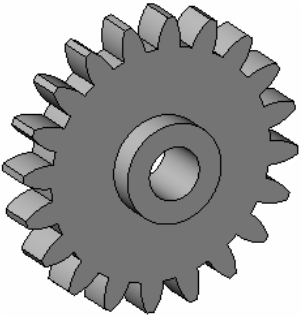


Рис. 6.78. Модель зубчатого колеса

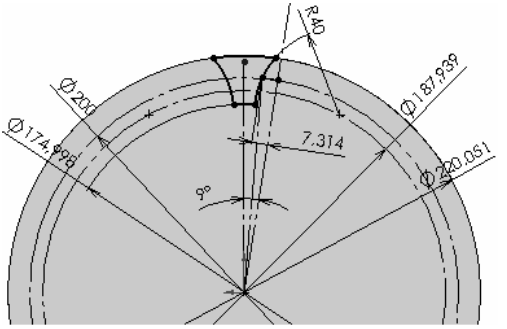


Рис. 6.79. Эскиз выреза, формирующего впадину

Предупреждение

В справочной системе Toolbox написано: "Зубчатые колеса предназначены только для проектирования. Это не зубчатые колеса с эвольвентным зацеплением, которые можно использовать для производства".

В свете сказанного, модели элементов трансмиссий, присутствующие в Toolbox, можно использовать в иллюстративных целях или на этапе компоновки сборок, включая также имитацию кинематики (если выполнять ее на уровне возможностей SolidWorks). Описанная далее программа GearTrax в значительной степени снимает эти ограничения.

6.5. GearTrax

Продукт GearTrax — разработка фирмы Camnetics Inc., США, предназначена для построения моделей деталей трансмиссий. GearTrax является независимой программой, функционирующей "параллельно" с CAD-системой, но обладающей при этом возможностью обновлять (по команде пользователя) геометрическую модель и считывать из нее параметры, относящиеся к изделию. GearTrax может взаимодействовать с SolidWorks, Inventor и SolidEdge, причем для каждой из этих систем выпускается оригинальная версия кода. Информационная панель программы показана на рис. 6.80. Следует обратить внимание на то, что диагностирован серийный номер SolidWorks — это свидетельство (косвенное) того, что официальная поставка привязана к лицензии CAD-системы.



Рис. 6.80. Информационная панель GearTrax

Функциональные возможности и ограничения

GearTrax предназначен для создания моделей деталей *трансмиссий*, при этом объект, параметры которого определены в программе, затем формируется в CAD-системе. Контуры зубьев описываются сплайном или совокупностью окружностей, имитирующих — если необходимо — эвольвентный профиль. Полученная кинематическая пара визуализируется в окне программы с имитацией движения (только для цилиндрических колес). При изменении управляющих параметров происходит пересчет управляемых, причем можно, базируясь на выбранном стандартном объекте, сформировать отличающуюся от стандарта деталь. Система обрабатывает следующие объекты.

- *Цилиндрические прямозубые* и *косозубые* зубчатые колеса. Зацепление может быть внешним и внутренним. Базовыми характеристиками для них являются:
  - модуль;
  - диаметральный шаг;
  - набор параметров с произвольным доступом.

  Система допускает:
  - изменение межцентрового расстояния;
  - назначение смещения;
  - назначение окружного зазора;
  - назначение толщины зуба;
  - изменение большинства остальных геометрических параметров относительно стандартных значений.

  Геометрическая модель прямозубого колеса получается на базе эскиза, формирующего впадину между зубьями, которая затем размножается как круговой массив. Если формируется косозубое колесо, то эскиз, лежащий на плоскости, перпендикулярной оси, протягивается вдоль спирали, образуя вырез (рис. 6.81). После этого вырез размножается поворотом относительно оси колеса.
- *Конические* зубчатые колеса с прямыми и круговыми зубьями. Прямозубое колесо получается размножением относительно оси выреза, полученного как элемент **По сечениям**. Одно из сечений — точка, находящаяся в месте пересечения осей пары, а другое — эскиз, построенный в плоскости, касательной к конусу, ограничивающему заднюю часть колеса (рис. 6.82).

Колесо с *круговыми зубьями* строится на базе сечения выреза и направляющих кривых, которые система строит в углах сечения (рис. 6.83). Отметим,

что автоматически этот вырез не получается. Программа выдает эскиз сечения и направляющие кривые. Остальные действия пользователь должен сделать самостоятельно.

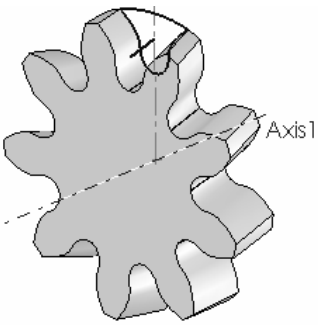


Рис. 6.81. Цилиндрическое косозубое колесо и эскизы, формирующие вырез

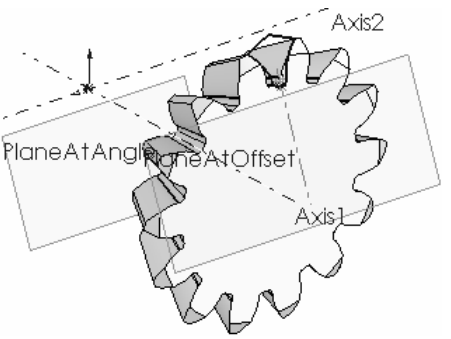


Рис. 6.82. Коническое прямозубое колесо и эскизы, формирующие вырез

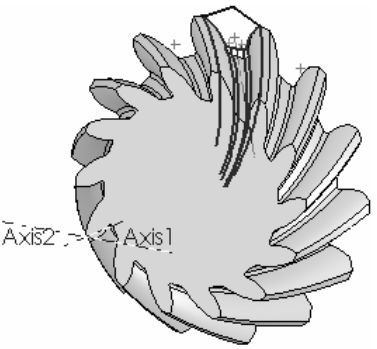


Рис. 6.83. Коническое колесо с круговыми зубьями, эскиз сечения выреза и направляющие кривые

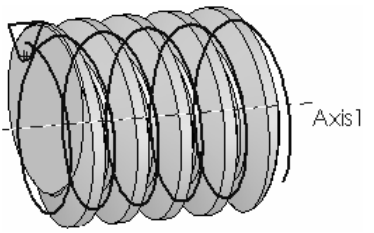


Рис. 6.84. Архимедов червяк и эскизы, формирующие вырез

- Элементы архимедова *червячного зацепления*. Программа строит *червяк* вырезом цилиндра. Профиль выреза формируется в плоскости, проходящей через ось цилиндра, а направляющая — винтовая линия, ось которой совпадает с осью цилиндра (рис. 6.84).

  Червячное колесо получается размножением выреза вращением относительно оси. Сечение выреза, являясь симметричным относительно линии, параллельной оси колеса, находится в плоскости, которая параллельна оси и проходит через ось червяка (виртуального). Траектория выреза является участком винтовой линии, формирующей червяк (рис. 6.85).

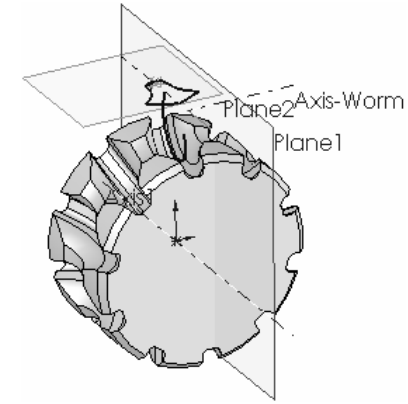


Рис. 6.85. Колесо, соответствующее архимедову червяку, и эскизы, формирующие вырез

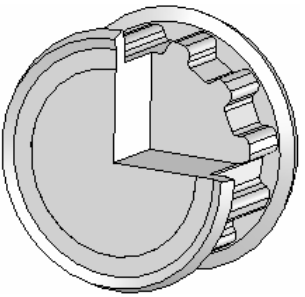


Рис. 6.86. Шкив зубчато-ременной передачи со сделанным в SolidWorks вырезом

- *Шкивы клиновых* и *поликлиновых передач*, а также передач с *зубчатыми ремнями* (рис. 6.86).
- *Звездочки цепных передач* (рис. 6.87).
- Элементы *шлицевых соединений* с эвольвентными зубьями (рис. 6.88).

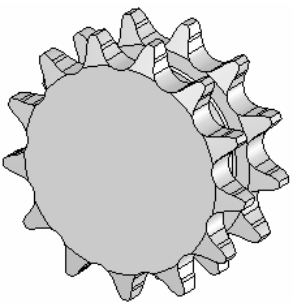


Рис. 6.87. Звездочка цепной передачи

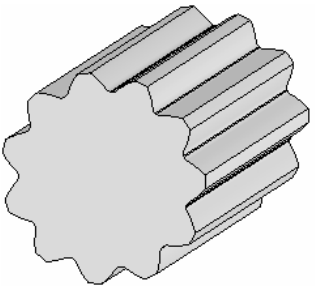


Рис. 6.88. Вал с эвольвентными шлицами

Бóльшая часть других возможностей программы будет проанализирована одновременно с рассмотрением интерфейса.

Важно знать, что GearTrax способен сформировать модель в SolidWorks, только если CAD-система функционирует с английским меню. В противном случае следует напоминание, и программа завершает работу. Для переключения языка в SolidWorks подается команда **Инструменты** | **Настройка** | **Использовать меню на английском языке**, после чего нужно перезагрузить программу. В стандартной поставке GearTrax имеет два, по сути, независимых канала обмена данными с SolidWorks. Первый — создание в SolidWorks

файла детали, формирование в нем объекта и, при необходимости, построения сечения детали и таблицы аннотаций. Второй шлюз предназначен для считывания специфических параметров зацепления из активной детали SolidWorks в GearTrax. Существует разновидность поставки, когда команда вызова GearTrax встраивается в меню SolidWorks. Авторы не имели возможность протестировать этот вариант.

Интерфейс

После запуска программы возникает окно формы, показанное на рис. 6.89. Оно содержит падающее меню, набор вкладок, два рисунка, первый из которых отображает объект, соответствующий активной вкладке, второй рисунок имеет два состояния — статическое и анимированное. Если картинка изменяется, это значит, что идет процесс построения модели в SolidWorks. В правом нижнем углу присутствует кнопка **Show/Hide** (Показать/Скрыть), управляющая видимостью чертежа, который в пропорциональном (для цилиндрических) или схематическом (для всех остальных объектов) масштабе отображает кинематическую пару или другие объекты (в зависимости от того, с чем мы имеем дело).

Рассмотрим содержимое меню, обращая внимание, в целях экономии места, только на те функции, которые являются специфическими для данного типа программ.

- **File** (Файл) — содержит команды:
  - **Print Form** (Печать формы);
  - **Capture GearTrax screen to a file** (Захват содержимого экрана в файл);
  - **Capture GearTrax screen to the clip board** (Захват содержимого экрана в буфер обмена);
  - **Capture and paste to MS Paint** (Захват и вставка в MS Paint);
  - **Empty Clipboard** (Очистка буфера обмена).
- **View** (Вид) — содержит команду:
  - **Keep on Top** (Держать впереди) — сохраняет окно программы поверх остальных окон.
- **Insert** (Вставить) — содержит команды:
  - **Tooth Profile Cut** (Сечение профиля зуба);
  - **Insert Annotations** (Вставить примечания) — вставляет в текущий активный документ таблицу с параметрами детали. Таблица может иметь внутренний формат SolidWorks или формат MS Excel.

- **Tools** (Инструменты) — содержит команды:
  - **Link to Active Part** (Связать с активной деталью) — восстановление параметров из загруженной в SolidWorks детали в GearTrax;
  - **Update Linked Part** (Обновить деталь, с которой связана программа) — приведение детали в соответствие с информацией в GearTrax;
  - **Create a Data Sheet (Excel format)** (Создать спецификацию) — создает файл MS Excel, в который помещает таблицу с информацией об узле, каждой из его деталей, а также планируемые результаты измерений;
  - **Read a Data Sheet (Excel format)** (Считывание спецификации) — считывание информации из таблицы MS Excel с последующим созданием модели SolidWorks;
  - **Units** (Системы единиц);
  - **Options** (Настройки) — характеристики, определяющие способ образования колес, режимы измерений на реальных объектах — колесах.
- **Help** (Помощь) — содержит команды:
  - **GearTrax Help Topics** (Справочная система GearTrax);
  - **Tutorial** (Учебное пособие) — включает несколько примеров работы с программой;
  - **Tip of the Day** (Совет дня) — некоторые рекомендации по использованию GearTrax;
  - **Registration** (Регистрация) — форма для регистрации программы;
  - **License** (Лицензия) — лицензионное соглашение;
  - **About GearTrax** (О GearTrax) — информационная панель программы.

Из числа вкладок окна **Options** рассмотрим те, которые актуальны для большинства деталей, а также вкладку с настройками для цилиндрических колес. Вкладка **General** (Общие) содержит следующие поля (рис. 6.89).

- **Involute Options** (Параметры эвольвенты) — назначается признак **Fix Involute Sketch** (Фиксация эвольвенты в эскизе). Если опция активна, то элементы эскиза будут зафиксированы.
- **Tooth Pattern** (Массив зубьев) — признак того, как система взаимодействует с пользователем при создании массива зубьев:
  - **Never inquire before creating new pattern** (Никогда не спрашивать перед созданием массива зубьев);
  - **Always inquire before creating new pattern** (Всегда спрашивать перед созданием массива зубьев);

- **Inquire only when tooth number exceeds** (Спрашивать, если число зубьев превышает ...).

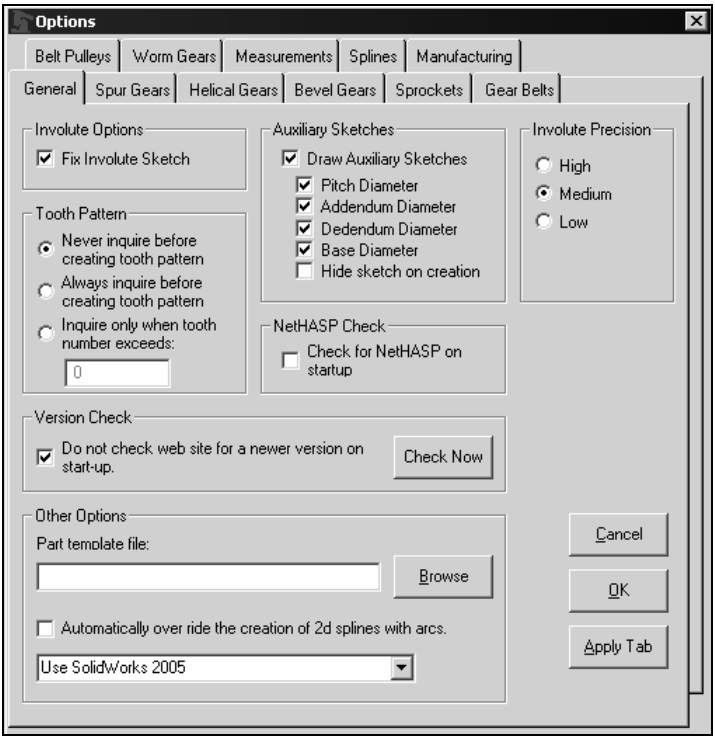


Рис. 6.89. Вкладка **General**

- Группа опций **Auxiliary Sketches** (Вспомогательные эскизы). Содержит опции, определяющие номенклатуру создаваемых вспомогательных эскизов:
  - **Draw Auxiliary Sketches** (Чертить вспомогательные эскизы);
  - **Pitch Diameter** (Диаметр делительной окружности);
  - **Addendum Diameter** (Высота головки зуба);
  - **Dedendum Diameter** (Высота ножки зуба);
  - **Base Diameter** (Диаметр основной окружности);
  - **Hide sketch on creation** (Скрыть эскизы после создания).
- **Involute Precision** (Точность эвольвенты) — фактически, точность сплайна (число точек на нем), ее описывающего, или число дуг окружности, аппроксимирующих профиль:

- **High** (Высокая);
- **Medium** (Средняя);
- **Low** (Низкая).

❒ **NetHASP Check** — проверка ключа.

❒ **Version Check** (Проверка версии) — если флажок установлен, то проверка версии после старта программы не производится. Кнопка **Check Now** (Проверить сейчас) предназначена для обращения к Web-сайту фирмы для проверки появления новой версии и ее загрузки.

❒ Группа **Other Options** (Остальные настройки) содержит поля:

- **Part template file** (Шаблон файла детали) — файл шаблона детали, который будет использоваться при создании новой детали. Если поле не заполнено, то будет использоваться шаблон детали по умолчанию SolidWorks, который находится по адресу: **Инструменты** | **Параметры** | **Шаблоны по умолчанию**;
- **Automatically over ride the creation of 2d splines with arcs** (Автоматически заменять создание плоских сплайнов дугами окружностей);
- **Use SolidWorks ...** (Использовать версию SolidWorks ...).

Вкладка **Manufacturing** (Изготовление) (рис. 6.90) позволяет имитировать предполагаемую технологию изготовления цилиндрических прямозубых и косозубых колес.

❒ **Hobbing** (Нарезание червячной фрезой или рейкой). В результате получается удлиненная в направлении ножки эвольвента, и при малом числе зубьев проявляется эффект подрезки зубьев.

❒ **Full involute** (Полная эвольвента) — имитация изготовления пальцевой фрезой, эвольвента продолжается до основной окружности. Подрезки зубьев, имеющей место в предыдущем случае, не происходит.

❒ **Full fillet radius (hobbing)** (Полное скругление впадины, ковка) — имитация изготовления ковкой, что порождает отсутствие окружности на впадине, которая заменяется полным скруглением. Эта опция применима только для стандартов **Coarse Pitch** и **Fine Pitch** (Крупный и мелкий шаг).

Вкладка **Spur Gears** (Цилиндрические колеса) (рис. 6.91) позволяет назначить следующие параметры.

❒ **Spur Gear Data Annotations** (Примечания для цилиндрических колес) — номенклатура отображаемых примечаний, касающихся геометрии зацепления.

❒ **Miscellaneous Annotations** (Прочие примечания) — прочие данные о колесе.

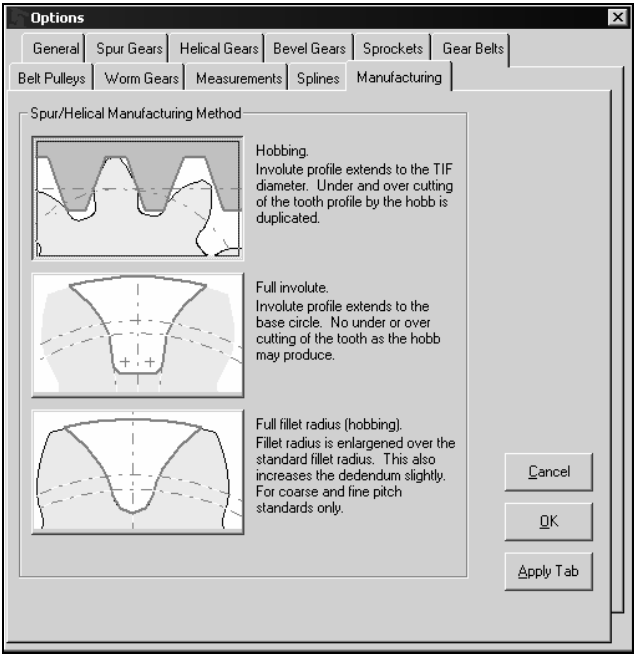


Рис. 6.90. Вкладка **Manufacturing**

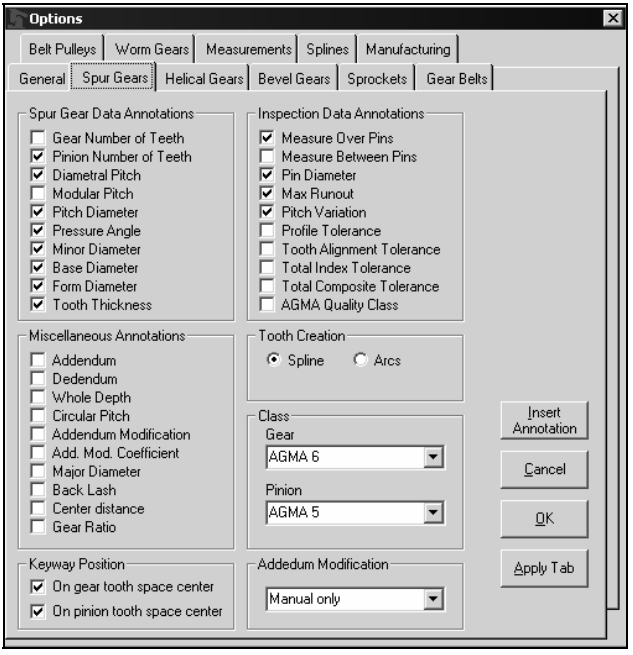


Рис. 6.91. Вкладка **Spur Gears**

- **Inspection Data Annotations** (Примечания об измерениях) — номенклатура выводимых на чертеж или модель результатов измерений.
- **Tooth Creation** (Создание зуба) — способ формирования профиля зуба:
  - **Spline** (Сплайн) — профиль зуба описывается сплайном;
  - **Arcs** (Дуги) — профиль зуба формируется набором дуг окружностей.

Замечание

В документации к программе акцентируется внимание на том, что при использовании модели для создания программы станка с ЧПУ следует выяснить, каким образом интерполируется траектория инструмента. На некоторых устройствах она состоит из набора дуг, поэтому использование опции **Arcs** более рационально.

- **Class** (Класс) — класс точности колеса и шестерни. Этот параметр имеет исключительно иллюстративный смысл.
- **Keyway Position** (Расположение шпонки) — если колесо будет проектироваться со ступицей, содержащей шпоночный паз, то это поле определяет положение паза относительно зуба.
- **Addedum Modification** (Смещение) — управляет тем, как будет выполняться смещение:
  - **Manual only** (Только вручную) — пользователь должен вводить значение в соответствующее поле;
  - **Automatic only** (Только автоматически) — система автоматически подбирает смещение так, чтобы избежать подрезки зубьев.

Значимой функциональностью обладает вкладка **Measurements** (Измерения) (рис. 6.92). Она содержит поля, в которых отображаются предполагаемые результаты измерений "по штифтам" для прямозубых колес, "по шарам" — для косозубых, а также длину хорды между противоположными сторонами двух или более зубьев.

- Группа полей **Gear — between pins** (Колесо — между штифтами) — содержит поля:
  - **Measurement over pins** (Измерения по штифтам) — величина расстояния "по штифтам", расположенным во впадинах колеса на диаметральной линии;
  - **Pin diameter** (Диаметр штифта) — диаметр штифтов, используемых для измерения.
- Группа **Pinion — between pins** (Шестерня — между штифтами) — содержит поля, аналогичные тем, которые характеризуют колесо.

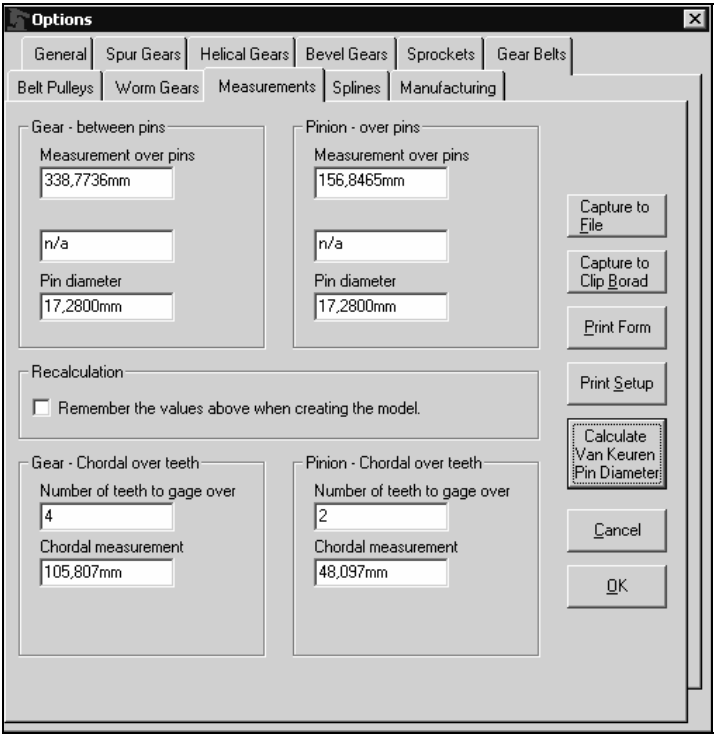


Рис. 6.92. Вкладка **Measurements**

- **Recalculation** — признак необходимости запомнить параметры при создании модели.
- Группа полей **Gear — Chordal over teeth** (Колесо — хорда по зубьям) — содержит поля:
  - **Number of teeth to gage over** (Число зубьев, охватываемых калибром);
  - **Chordal measurement** (Длина хорды).
- Группа полей **Pinion — Chordal over teeth** (Колесо — хорда по зубьям) — содержит поля аналогичные полям для колеса.
- Кнопка **Calculate Van Keuren Pin Diameter** (Диаметр штифтов по Van Keuren) — предназначена для назначения диаметра штифтов применительно к параметрам кинематической пары. Предполагается использование стандартного инструмента. Появившаяся в полях **Pin diameter** величина может быть изменена пользователем.

Завершим описание интерфейса разбором вкладки **Spur/Helical** (Прямозубое/Косозубое), определяющей параметры соответствующих кинематических пар (рис. 6.93). Возле некоторых числовых полей присутствуют кнопочки.

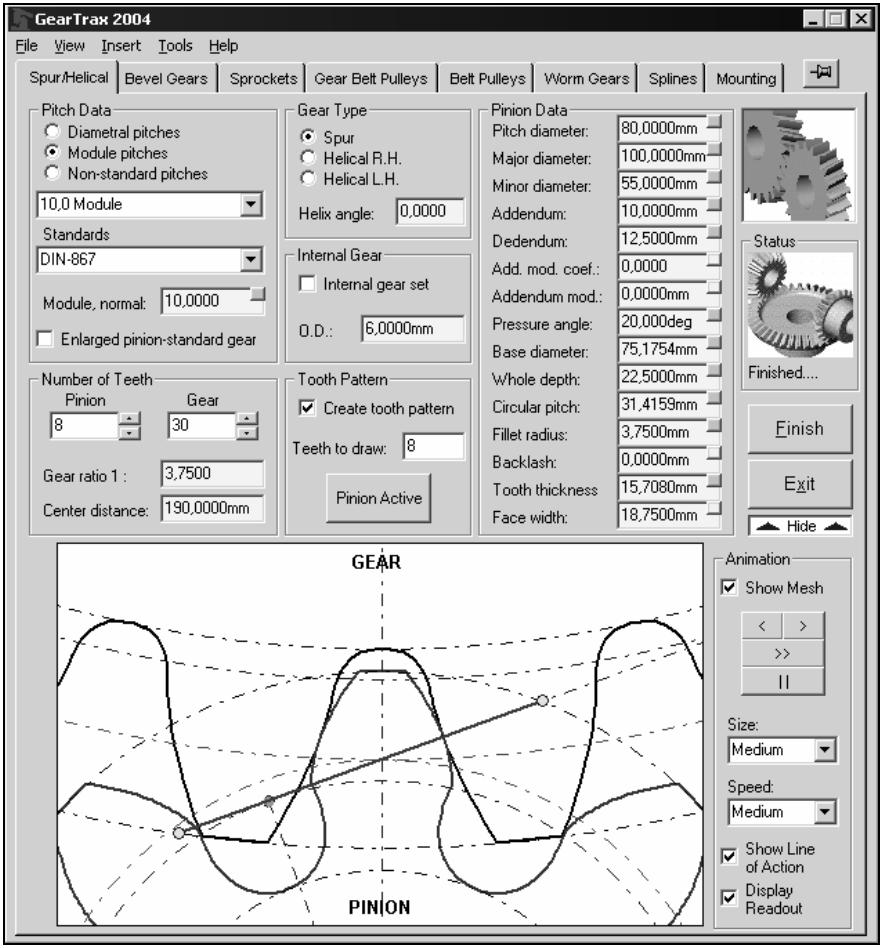


Рис. 6.93. Вкладка **Spur/Helical**

Они могут быть серыми (поле не подлежит редактированию) и светло-зелеными (поле можно изменить). После их нажатия появляются окна редактирования соответствующих параметров (пример показан на рис. 6.94). В этих окнах присутствует кнопка **Help**, после активизации которой возникает панель с информацией о том, на какие параметры повлияет изменение данной величины.

- Группа **Pitch Data** (Данные о шаге) определяет тип стандарта, на базе которого будут формироваться объекты, а также, в рамках выбранного стандарта — типоразмер колес. Доступны три варианта определения размеров:
  - **Diametral pitches** (Шаг на основе диаметра) — этот стандарт базируется на дюймовой системе и в России практически не используется;

- **Module pitches** (Шаг на основе модуля);
- **Non-standard pitches** (Нестандартный шаг) — этот вариант предполагает возможность корректировки практически всех полей. При изменении некоторого параметра зависимые размеры также меняются.

В рамках выбранной системы размеров в выпадающем списке доступен набор стандартных значений. В нашем случае это модуль.

Также в группе **Pitch Data** присутствуют следующие поля:

- **Standards** (Стандарты) — выбор базового стандарта. ГОСТ 13755—81 "Параметры исходного профиля" отсутствует, однако стандарты DIN-867 и JIS, в принципе, аналогичны ему, по крайней мере, в части, связанной с цилиндрическими колесами. Незначительное отличие присутствует в величине скругления ножки зуба, однако эта величина может быть отредактирована после подбора базовых параметров. Большинство стандартов подразумевают угол зацепления 20°. Стандарты **Coarse Pitch** (Крупный шаг) и **Fine Pitch** (Мелкий шаг) также генерируют пары с углами 14,5 и 25°. Кроме того, присутствует группа стандартов фирмы ABA-PGT Inc. (**http://www.abapgt.com**), отличающихся измененной (за счет смещения) высотой зуба и изменением профиля вблизи вершины. Эти стандарты предназначены для проектирования пластмассовых колес, позволяя снизить шум, повысить прочность и ресурс;
- **Module, normal** (Нормальный модуль) — при выборе опции **Non-standard pitches** позволяет ввести произвольную величину модуля;
- **Enlarged pinion-standard gear** (Корригированная шестерня) — при установке флажка пользователь получает доступ к полям **Center distance** (1/2 межцентрового расстояния) и **Addendum modification** (Смещение) для шестерни.

❒ Группа параметров **Number of Teeth** (Число зубьев) содержит поля, связанные с числом зубьев:

- **Pinion** (Шестерня) — число зубьев шестерни;
- **Gear** (Колесо) — число зубьев колеса;
- **Gear ratio 1** (Передаточное число);
- **Center distance** (1/2 межцентрового расстояния).

❒ Группа параметров **Gear Type** (Тип колеса) управляет типом цилиндрического колеса:

- **Spur** (Прямозубое);
- **Helical R.H.** (Косозубое правое);

- **Helical L.H.** (Косозубое левое);
- **Helix angle** (Угол наклона линий зубьев).

❒ Группа параметров **Internal Gear** (Внутреннее зацепление) управляет свойствами пары с внутренним зацеплением:

- **Internal gear set** (Установка внутреннего зацепления);
- **O.D.** (Наружный диаметр).

❒ Группа **Tooth Pattern** (Массив зубьев) включает параметры, влияющие на вид модели SolidWorks:

- **Create tooth pattern** (Создать массив зубьев);
- **Teeth to draw** (Число создаваемых зубьев).

❒ Кнопка **Pinion/Gear Active** (Активна шестеренка/колесо) является переключателем, управляющим, какая информация отображается справа: относящаяся к шестеренке или к колесу.

❒ Группа **Pinion/Gear Data** (Параметры шестеренки/колеса) включает поля, характеризующие размеры детали. Доступ к ним зависит от того, разрешена ли ручная модификация смещения **Spur Gears** | **Addendum Modification** | **Manual only** и активна ли опция **Non-standard pitches**:

- **Pitch diameter** (Диаметр делительной окружности);
- **Major diamete**r (Диаметр окружности вершин);
- **Minor diameter** (Диаметр окружности впадин);
- **Addendum** (Высота головки зуба);
- **Dedendum** (Высота ножки зуба);
- **Add. mod. coef**. (Коэффициент смещения);
- **Addendum modification** (Смещение). При нажатии на кнопку, расположенную справа от поля, появляется окно (рис. 6.94), в котором присутствуют поля:
  - **Addendum Modification, Gear** (Смещение для колеса);
  - **Addendum Modification, Pinion** (Смещение для шестерни);
  - **Approach Length** (Длина подъема);
  - **Recess Length** (Длина спада);
  - **Contact Ratio** (Коэффициент перекрытия);
- **Base diameter** (Диаметр основной окружности);
- **Whole depth** (Высота зуба);

- **Circular pitch** (Окружной делительный шаг);
- **Fillet radius** (Радиус скругления у корня зуба);
- **Backlash** (Окружной зазор);
- **Tooth thickness** (Толщина зуба);
- **Face width** (Ширина венца).

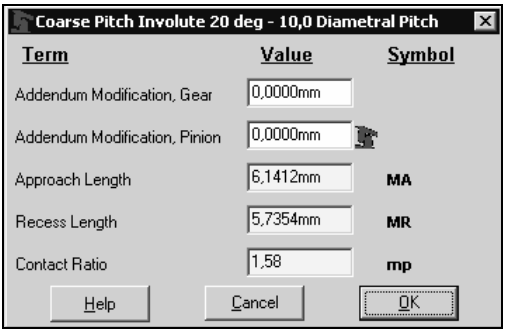


Рис. 6.94. Окно **Addendum modification**

- Группа параметров **Animation** (Анимация), управляющих содержимым графического окна:
  - **Show Mesh** (Показать зацепление) — управляет тем, будет ли показана кинематическая пара в пропорциональном масштабе (флажок стоит) или единичная деталь в условном виде;
  - **Size** (Размер);
  - **Speed** (Скорость);
  - **Show Line of Action** (Показать линию зацепления).

Практика использования

Рассмотрим два примера. Первый — построение элементарной модели шестерни, второй — проектирование сплайнового шлицевого соединения.

Построение модели шестерни

Если в окне рис. 6.93 нажать кнопку **Finish** при условии, что настройки описанных выше окон сохранены, то в SolidWorks появится модель шестерни рис. 6.95. Поскольку имитировалась технология изготовления рейкой: **Options** | **Worm Gears** | **Hobbing**, то налицо подрезка зубьев. Если в SolidWorks открыть эскиз, на базе которого построена модель, то получим

картину рис. 6.96. Как видно, впадина зуба описывается двумя симметричными сплайнами.

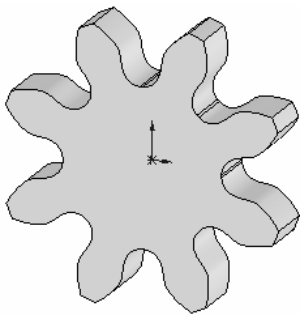


Рис. 6.95. Модель прямозубой шестерни

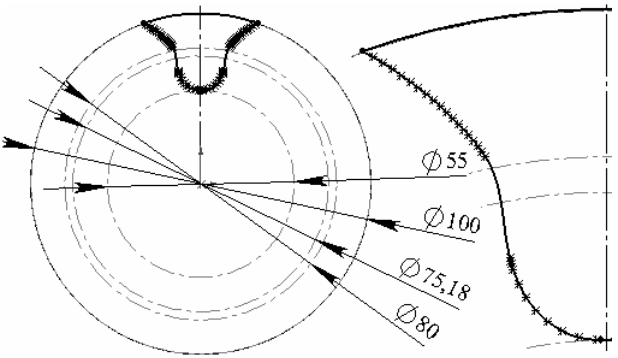


Рис. 6.96. Эскиз, на базе которого построена шестерня

Если возникнет задача создания сборки, состоящей из двух или более зубчатых колес, то пригодится входящий в поставку программы файл сборки с именем AssemblySketch. Он содержит параметрический эскиз и две оси. Меняя размеры на эскизе в соответствии с данными GearTrax, можно получить компоновку кинематической пары, а затем при помощи сопряжений SolidWorks привязать к ней детали.

Проектирование шлицевого соединения

Рассмотрим процесс создания и анализа шлицевого соединения. Сначала получим геометрическую модель, затем выполним прочностной анализ, после чего попытаемся улучшить исходный проект.

GearTrax не осуществляет прочностного проектирования, поэтому предположим, что необходимая информация была получена из постороннего источника. Заполним необходимые поля формы **Splines** (Шлицы) (рис. 6.97). С точки зрения последующего прочностного анализа, интересными являются поля группы **Root and Fit** (Ножка и посадка), для которой выбираем значение **Flat root, side fit** (Плоская головка, выравнивание по стороне), а также класса точности (по сути, окружной зазор между сторонами шлица и канавки). Здесь выбираем 7h — максимальный из имеющихся (на самом деле пользователь может в поле **Clearance** (Зазор) назначить произвольную величину). И то и другое сделано для облегчения работы генератора сетки в COSMOSWorks, хотя в зависимости от формы впадины результат может существенно изменяться.

После нажатия кнопки **Finish** SolidWorks генерирует модель, которая показана на рис. 6.98, вверху. Дорабатываем ее перед вставкой в сборку (рис. 6.99, внизу).

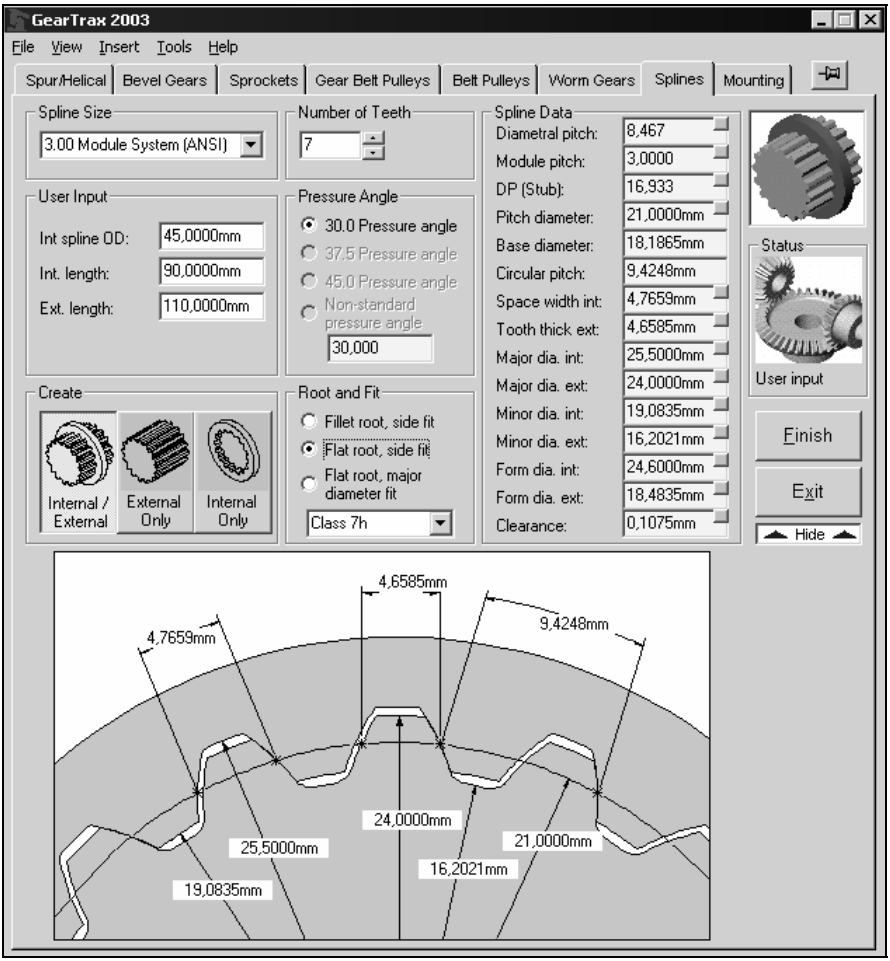


Рис. 6.97. Параметры шлицевого соединения

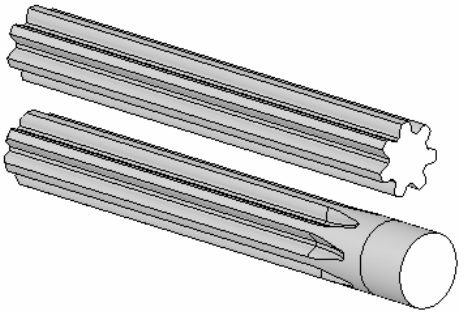


Рис. 6.98. Исходная модель вала и ее доработка

Аналогичные операции выполняем со ступицей, получая сначала "полуфабрикат", а затем и готовый конструктивный элемент (рис. 6.99). Поскольку GearTrax выполняет дно впадин ступицы без скруглений, вводим их посредством SolidWorks.

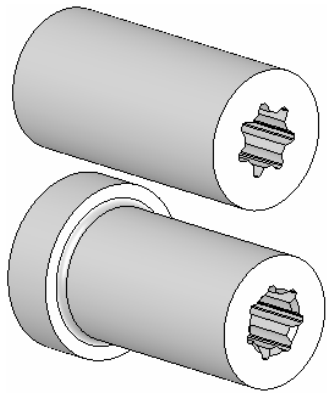


Рис. 6.99. Исходная модель ступицы и ее доработка

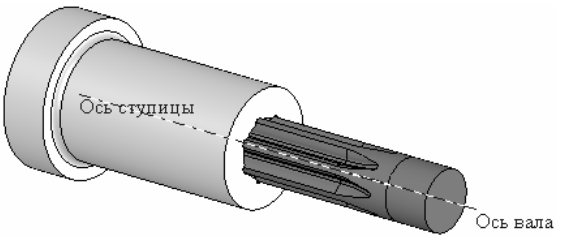


Рис. 6.100. Модель сборки

Объединяем детали в сборку (рис. 6.100). Назначаем очевидные сопряжения: фиксацию ступицы, совпадение осей двух цилиндров, а также совпадение торцовых граней ступицы и вала. Менее прозрачен вопрос о том, как "скреплять" объекты в окружном направлении. Детали имеют зазор между рабочими поверхностями, поэтому нужно расположить их так, чтобы обеспечить наименьшую вычислительную трудоемкость: в процессе приложения нагрузки должно происходить минимальное изменение топологии. Поэтому следует ввести детали в соприкосновение в ненагруженном состоянии, причем, при выборе из двух возможных вариантов, сделать это так, чтобы после приложения нагрузки у вала не было участка свободного поворота. Попытка назначить сопряжение **Касательность** для одной из пар граней (одна принадлежит шлицу на валу, а другая — впадине в ступице) заканчивается неудачей. Чуть позже мы выявим ее причину.

Единственный выход — выполнить сопряжение одной из вершин, принадлежащих сопрягаемой поверхности подвижной детали (в нашем случае — вала), с ответной поверхностью неподвижного объекта. Результат показан на рис. 6.101. На первый взгляд, результат достигнут. Однако, как всегда, имея дело со сплайновыми поверхностями, попытаемся более тщательно оценить ситуацию. Если подать команду SolidWorks **Проверить интерференцию компонентов**, то результат на экране будет иметь вид рис. 6.102. Это значит, что детали находятся в состоянии пространственного конфликта, причем зоны пересечения присутствуют в каждой паре "шлиц-впадина". Если отобра-

зить в сборке два сплайна, формирующих контур вырезов (и, соответственно, зубьев) на валу и на ступице, то выясняется, что точки сплайнов не совпадают. Это значит, что мы имеем дело с двумя различными сплайнами, которые, по сути, ни при каких обстоятельствах не будут совпадать.

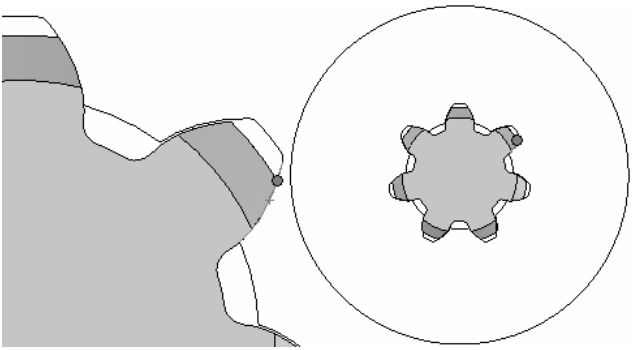


Рис. 6.101. Определение исходного состояния модели (вид со стороны ступицы)

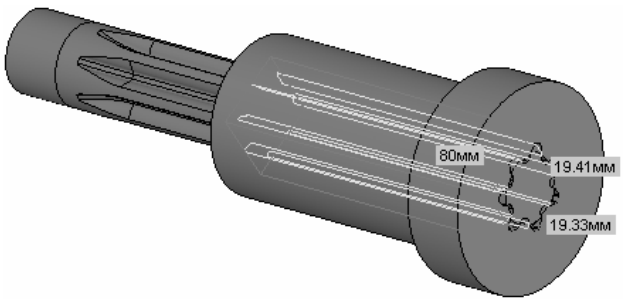


Рис. 6.102. Результат проверки интерференции деталей

Отреагировать на возникшую проблему можно, как водится, двумя способами. Первый — оставить все как есть, понадеявшись на то, что в силу малой "толщины" области интерференции она не будет замечена расчетной программой. Если же это не получится, то следует перестроить модели деталей, подобрав вместо сплайна (или того участка, который формирует область, принадлежащую одновременно обеим деталям) окружность подходящего радиуса и положения (например, построив дугу по трем точкам, являющимся вершинами сплайна). При этом в качестве базы нужно взять только один из сплайнов, например, образующий зуб на валу, а профиль впадины следует получить проецированием этой окружности с последующим дополнением оставшейся части. С точки зрения расчета на прочность, отличие от исходной модели будет незначительным, если дуга равна или несколько длиннее разделяемой области.

Замечание

Очевидно, что если необходимо оформить конструкторскую документацию, то следует создать конфигурацию, в которой вал фиксируется в сборке относительно ступицы по условию симметрии. Это значит, что зазор между шлицами и впадинами разделяется поровну между двумя сторонами.

Тем не менее попытаемся решить задачу с моделью в ее исходном состоянии, когда вершина шлица помещена на поверхность впадины ступицы. Используем для расчета COSMOSWorks. Создаем **Упражнение** (Study) с **Типом анализа** (Analysis Type) **Статический** (Static). Задача, если не принимать во внимание подробности, связанные с креплением вала и ступицы, обладает циклической симметрией (сочетание геометрии и граничных условий). Этот тип симметрии не может быть смоделирован в COSMOSWorks, поэтому геометрическая модель должна присутствовать целиком.

Назначаем граничные условия. Усилия и заделки следующие.

- Конструкция будет нагружена крутящим моментом. Для локализации области его приложения на цилиндрической поверхности вала выделена полоса. Для этого использовалась команда SolidWorks **Линия разъема**. Чтобы назначить крутящий момент, нужно, удерживая клавишу <Ctrl>, указать ось (ее надо предварительно создать в сборке) и цилиндрическую грань, после чего подать команду **Сила** (Force) и в появившейся панели **Сила** проследить, что система поняла тип нагрузки (переключатель **Тип** (Type) должен быть установлен в положение **Приложить вращающий момент** (Apply torque)).

Замечание

Здесь имеет место некорректный перевод фразы Apply torque. Это значит Приложить крутящий момент.

- На цилиндрической поверхности бóльшего цилиндра ступицы ставим условие **Зафиксированная** (Fixed). Оно, за редким исключением, порождает особенности в виде бесконечных напряжений на границах зоны, к которой оно приложено. В "инженерных" расчетах МКЭ борьба с этим явлением сводится к двум приемам: простому игнорированию и назначению заведомо редкой сетки на границе или по области в целом (качество результатов там почти всегда будет весьма неоднозначным).
- Смещение вала в осевом направлении предотвращаем фиксацией перемещения нормально торцу, который противоположен втулке.
- Поскольку в процессе нагружения может изменяться граница контакта, то особое внимание уделяем назначению контактных граничных условий. Грани, касающиеся друг друга в исходном состоянии, в процессе деформации могут выходить из контакта на каких-либо участках или целиком, а

также скользить по соприкасающимся поверхностям. Оба этих явления описываются граничным условием **Узел к узлу** (Node to Node), которое мы назначаем для сборки в целом (рис. 6.103). Это значит, что если в исходном состоянии поверхности деталей "достаточно" (степень достаточности в документации к программе не оговаривается) близки, то нормальные к поверхностям перемещения узлов в ненагруженном состоянии будут одинаковы.

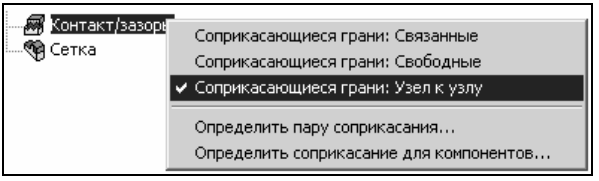


Рис. 6.103. Контактные граничные условия по умолчанию

Вид пиктограмм, отображающих назначенные граничные условия, приведен на фоне результата (см. рис. 6.107).

Сетка конечных элементов показана на рис. 6.104 и 6.105. Относительно "средней" плотности назначены **Элементы управления** (Mesh controls), сгущающие сетку на поверхностях шлицов и во впадинах между ними, и "разуплотняющие" на цилиндрических поверхностях ступицы, на цилиндрической грани вала и на его торце, противоположном втулке. Как представляется, данная плотность сетки является минимально достаточной для оценки поведения соединения "в целом" (т. е. его жесткости, распределения напряжений по длине шлицов, интегральной оценки контактных напряжений). При этом сетка состоит из 197 193 элементов и 282 296 узлов, порождая, соответственно, систему из 846 888 уравнений. Если бы нас интересовала более точная картина в отдельных местах, то дальнейшее уплотнение можно было бы осуществлять не для всех зубьев. Его можно было бы выполнить только в некоторой области, включающей по одному зубу и по одной впадине (они, разумеется, должны быть смежными) каждой детали и некоторое пространство, к ним примыкающее.

Отладку расчетной модели можно выполнять на сетке с линейными конечными элементами, а для получения результатов следует использовать параболические конечные элементы. Для этого переключатель **Качество сетки** (Mesh Quality) на вкладке **Сетка** (Mesh) окна **Настройки** (Settings) следует установить в положение **Высокое** (High Quality). Выполняем расчет данной модели. Картина эквивалентных напряжений на фоне деформированного состояния (в утрированном масштабе) показана на рис. 6.107. При этом напряжения отображены в режиме поэлементного осреднения, для чего соответст-

вующий переключатель в панели **Построение напряжения** (Stress Plot), определяющего параметры диаграммы, следует установить в положение **Значения элементов** (Element values) (рис. 6.106).

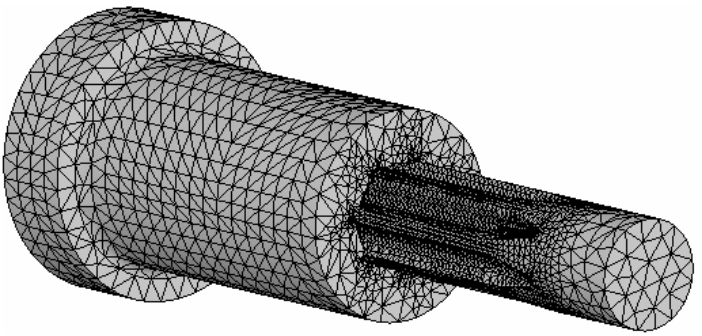


Рис. 6.104. Сетка конечных элементов для сборки

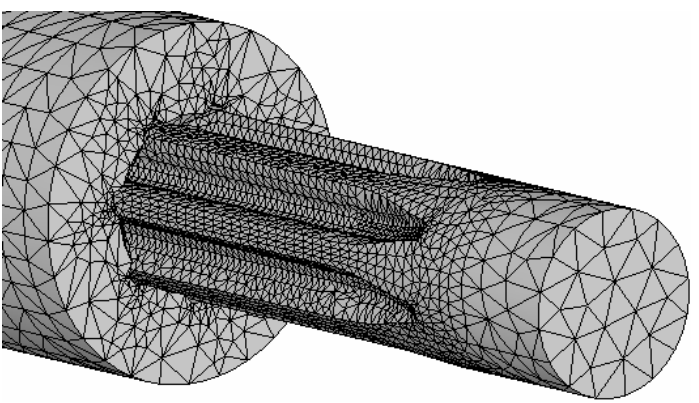


Рис. 6.105. Фрагмент сетки конечных элементов

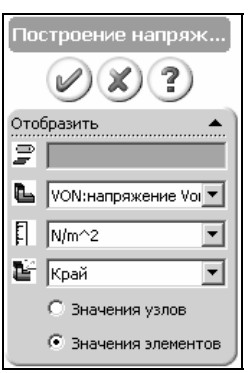


Рис. 6.106. Выбор осреднения напряжений по элементам

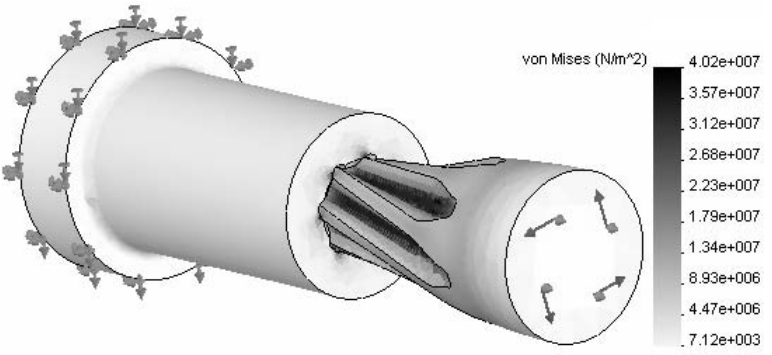


Рис. 6.107. Эквивалентные напряжения в режиме поэлементного осреднения

Если построить диаграмму с напряжениями, осредненными по узлам, — **Значения узлов** (Node values), то диапазон изменения величин будет несколько шире. Однако, с учетом предполагаемых погрешностей, сопровождающих решение контактной задачи, напряжения в центрах элементов внушают больше доверия.

Проанализируем результаты. Мы не будем обращать внимание на абсолютные величины параметров — при назначении другого крутящего момента они изменятся практически (контактная задача может сопровождаться нелинейностью) пропорционально. Если скрыть ступицу и снова отобразить диаграмму эквивалентных напряжений (рис. 6.108), то увидим, что максимальное значение уменьшилось (правда, очень несущественно). Это свидетельствует о том, что наиболее опасным местом является начало зуба ступицы. В то же время практически все дно канавок также является зоной концентрации напряжений.



Рис. 6.108. Эквивалентные напряжения в вале

Что касается процессов в канавке, то управлять ими можно только изменяя форму профиля и, естественно, глубину канавок. Если отобразить касательные напряжения в вале в плоскости XZ на фоне вертикального сечения

(рис. 6.109), то видно, что они вносят главный вклад в эквивалентные напряжения. Однако их изменение по вертикали достаточно плавное, а следовательно, дело не только в концентрации напряжений, но и просто в ослаблении сечения.

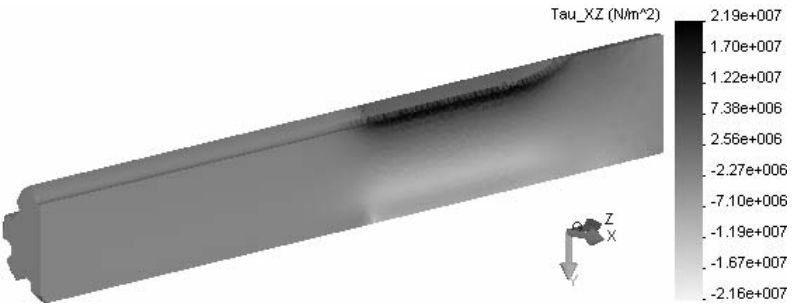


Рис. 6.109. Касательные напряжения в вале

Причина же, по которой конец втулки стал наиболее опасным местом, как можно предположить, состоит в том, что передача нагрузки с вала на ступицу осуществляется, в силу большой ее жесткости, на очень малом участке. На рисунке с деформированным валом видно, что шлицы претерпевают резкий изгиб в местах начала контакта с зубьями ступицы. Там же формируются две зоны концентрации напряжений: в шлицах и у корня зубьев ступицы в месте локализации растягивающих и сдвиговых напряжений. Эта проблема может быть решена изменением геометрии втулки ступицы. Сделать это нужно так, чтобы передача крутящего момента с одной детали на другую происходила на большей длине. Решений здесь два: увеличить жесткость вала на кручение или уменьшить соответствующую жесткость втулки.

Отвлечемся от анализа результатов и вернемся к тому, как была формулирована расчетная модель. Дебатировался вопрос, как отреагирует программа на интерференцию деталей. Выяснилось, что система отработала вполне корректно. Во-первых, затребованный контакт был реализован, а, во-вторых, после приложения нагрузки функционировал так, как ожидалось. Контактные площадки в расчетной модели тождественны тем, которые должны были быть в модели геометрической. Второе замечание связано с тем, что приложенные контактные граничные условия предполагают только взаимное скольжение или размыкание изначально контактирующих граней. Проанализируем возможность другого явления: входа узлов в контакт.

Оценить вероятность этого события в первом приближении можно, сравнив перемещения в окружном направлении в узлах сетки. Сравнение можно выполнить и по диаграмме окружных перемещений, однако точные численные значения более надежны. Один из узлов находится на кромке шлица, которая

находится на стороне, имеющей зазор со ступицей, а другой узел (принадлежащий ступице) выбирается так, чтобы он был как можно ближе к первому. По аналогичной схеме можно сравнить перемещения на общем торце узла. Ни та ни другая проверка не диагностируют пересечения объектов в нагруженном состоянии. Проверка внутри ступицы может быть осуществлена посредством построения диаграмм для сечений. Для этого, отобразив необходимую диаграмму, следует из соответствующего ей контекстного меню подать команду **Ограничение сечения** (Section Clipping), после чего настроить появившуюся панель согласно рис. 6.110. Перед подачей команды нужно щелкнуть по плоскости, в которой — или параллельно которой — будет выполняться сечение. Затем в панели **Сечение** (Section) в поле **Расстояние** (Distance) назначить расстояние от базовой плоскости до требуемого сечения.

Замечание

Корректный перевод термина Section Clipping — Обрезка сечением.

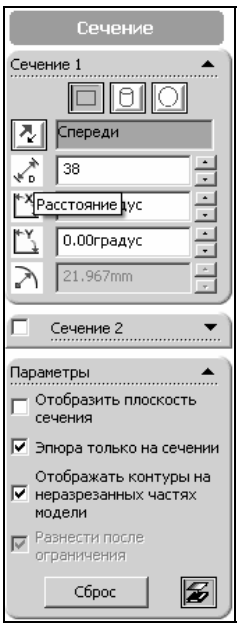


Рис. 6.110. Настройка параметров сечения

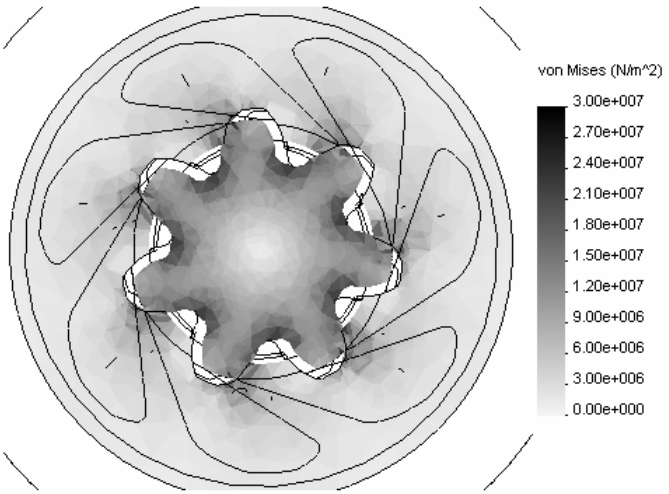


Рис. 6.111. Вид деформированного сечения

Вид деформированного сечения в утрированном масштабе показан на рис. 6.111. Плоскость сечения находится вблизи нагруженного торца втулки.

Более наглядный способ убедиться в отсутствии необходимости учитывать вероятность появления новых контактных площадок — собственно расчет,

содержащий такую возможность. Для этого последовательно выбираем вступающие (потенциально) в контакт пары граней (рис. 6.112), подаем команду **Определить пару соприкасания** (Define Contact Pair), после чего в панели **Пара соприкасания** в выпадающем списке **Тип** (Type) выбираем значение **Поверхность** (Surface). Повторяем эту операцию для семи пар потенциальных участников контакта. В результате часть Менеджера COSMOSWorks, в которой визуализируется информация о контактных граничных условиях, принимает вид рис. 6.113.

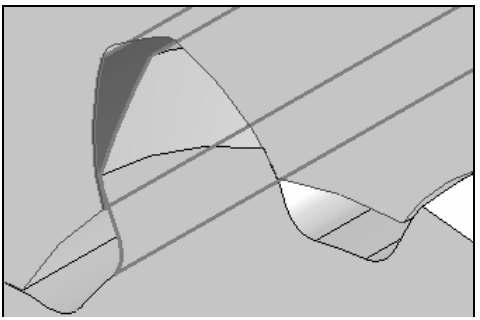


Рис. 6.112. Выбор граней, которые могут вступить в контакт

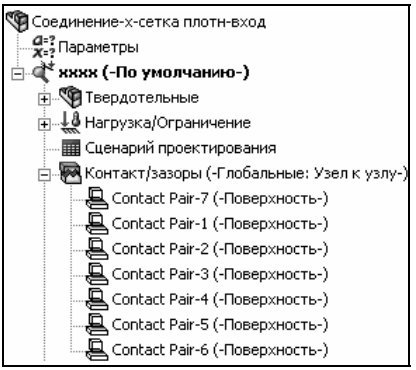


Рис. 6.113. Контактные граничные условия

Памятуя о высокой трудоемкости решения контактных задач с возможностью входа объектов в контакт и выхода из него, временно исключим из рассмотрения шесть пар из семи. Для этого последовательно указываем их в Менеджере при нажатой клавише <Shift>, а затем из контекстного меню подаем команду **Погасить элементы** (Suppress feature). Понятно, что одновременно все объекты не могут вступить в контакт. Процесс всегда начнется с какой-либо одной пары поверхностей, поэтому такая методика абсолютно оправдана. Перестраиваем сетку и выполняем расчет. Получившийся результат с точностью до вероятных отличий в сетке практически эквивалентен достигнутому в результате предыдущего анализа. Следующий шаг — расчет со всеми возможными контактными парами, но на сетке линейных элементов. Здесь также никаких радикальных изменений не замечено. Однако анализ с использованием параболических конечных элементов дает результат, показанный на рис. 6.114 и 6.115.

Для того чтобы получить дополнительную информацию, отобразим диаграммы перемещений. На рис. 6.116 результат приведен для системы, в которой вход в контакт возможен, а на рис. 6.117 — для исходной расчетной модели. Налицо значительное отличие результатов: перемещение увеличились в несколько раз. Никаких рациональных объяснений этому придумать невозможно.

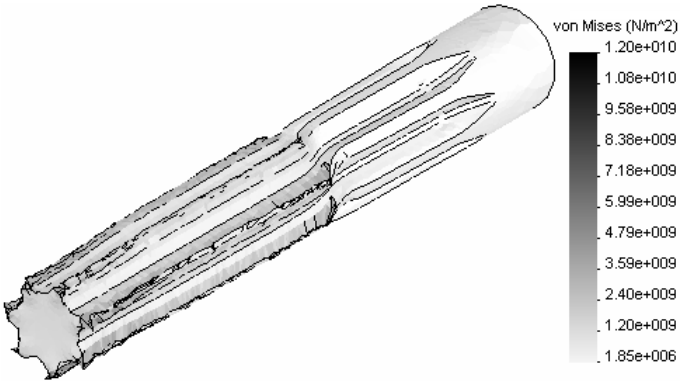


Рис. 6.114. Эквивалентные напряжения для системы, в которой возможно увеличение площадок контакта

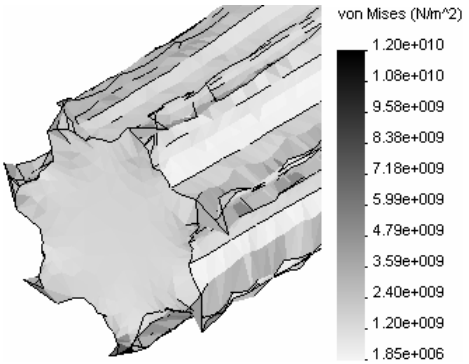


Рис. 6.115. Эквивалентные напряжения — фрагмент диаграммы

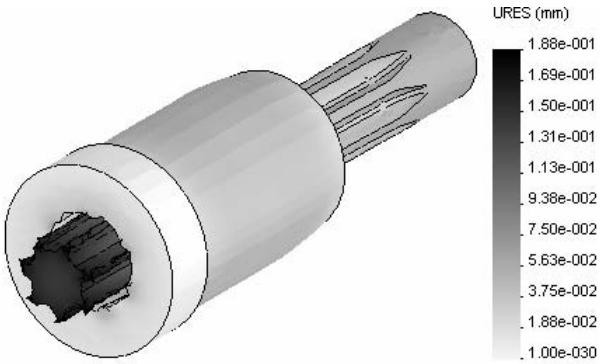


Рис. 6.116. Перемещения для системы, в которой возможно увеличение площадок контакта

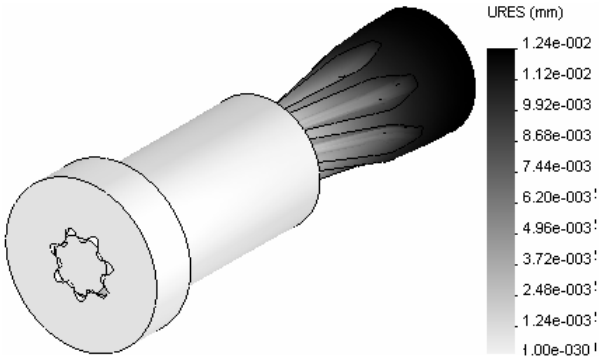


Рис. 6.117. Перемещения для системы, в которой возможно только уменьшение площадок контакта

Если в процессе деформирования контактные площадки увеличиваются (по числу и/или по площади), то, за исключением сугубо экзотических конфигураций, жесткость системы возрастает, и перемещения, соответственно, должны уменьшиться. Здесь же изменения пошли в обратную сторону. Попытка использовать не итерационный (FFEPlus), а прямой (Direct sparse) решатель в предположении наличия расходимости итерационного процесса ситуацию не изменила. Судя по всему, здесь мы имеем дело с ошибкой программы, некорректно обрабатывающей сочетание двух типов контактных граничных условий, приложенных к одной и той же детали. В этой ситуации можно попробовать разделить деталь на две, сделав это так, чтобы все грани, входящие в контакт, "сконцентрировались" на одной детали, а выходящие — "остались" на другой. Между соприкасающимися гранями таких деталей нужно поставить контактное граничное условие **Связанные** (Bonded).

Может возникнуть вопрос, почему мы столь тщательно добивались доказательств необязательности включения в контактные граничные условия возможности входа граней в соприкосновение. Дело в том, что такие конфигурации обладают, как минимум, двумя отрицательными особенностями. Первая — существенный рост времени решения. Добавление контактного граничного условия типа **Поверхность** (Surface) во множество, уже содержащее набор контактных пар типа **Узел к узлу** (Node to Node), может привести к многократному увеличению времени решения. Задача оптимального проектирования (пример приведен далее) требует, как минимум, нескольких десятков итераций (при этом вероятность получения проекта, близкого к условно-оптимальному, далека от ста процентов). Учтем, что однократный статический расчет данной системы с параметрами, описанными ранее (величина плотности сетки, использование конечных элементов с линейным изменением деформации), требует (в зависимости от конфигурации компьютера) нескольких десятков минут. Поэтому-то интегральная разница составит де-

сять и более часов. С этим соображением смыкается еще одно обстоятельство. Как мы убедились, граничные условия, описывающие вход объектов в контакт, иногда порождают негладкую функцию отклика. То есть, при малом изменении, например, нагрузки и/или геометрии, что обусловлено изменением переменных проектирования (например, если одной из степеней свободы является размер площадки, к которой приложено давление), возможно дискретное изменение целевой функции. Нечто подобное имело место в нашем примере. Поэтому подвергать математической оптимизации узлы, в которых детали способны входить в контакт, рекомендуется, только если возможности эмпирических методов исчерпаны.

В завершение рассмотрим процедуру оптимизации шлицевого соединения. Мы пришли к выводу, что вал ослабляют концентраторы напряжений — впадины между шлицами. Подбор оптимальной формы сечения шлицевого вала — это специальная и, в общем, достаточно исследованная задача. Мы не будем ее касаться. Еще было установлено, что втулка ступицы обладает избыточной жесткостью. Это приводит к перегрузке начальных участков зубьев и, соответственно, к концентрации напряжений. Помимо негативного влияния на прочность, избыток материала порождает лишний вес. Это позволяет сформулировать проблему оптимизации как задачу минимизации веса. Чтобы читатель представил себе постановку задачи, сразу приведем не только исходный проект, но и результат оптимизации (рис. 6.118).

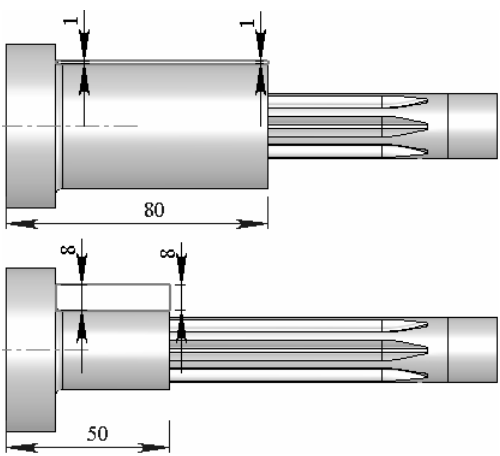


Рис. 6.118. Исходный и условно-оптимальный проекты узла

Для решения используем модуль **Optimization** (Оптимизация) COSMOSWorks. В качестве стартовой точки необходим, как минимум, один расчет. Он должен быть выполнен с теми параметрами сетки и граничными условиями, которые будут использоваться в ходе оптимизации.

Выполняем следующие операции.

1. Создаем **Упражнение** (Study) с **Типом анализа** (Analysis type) **Оптимизация** (Optimization) (рис. 6.119).

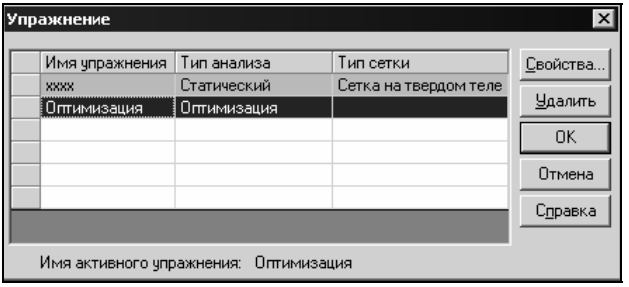


Рис. 6.119. Создание упражнения для оптимизационного анализа

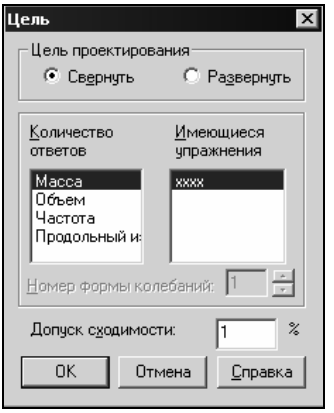


Рис. 6.120. Назначение целевой функции

2. В новом упражнении определяем параметры **Цели** (Objective) (рис. 6.120), назначая:
   - **Цель проектирования** (Design goal) — **Свернуть** (Minimize);
   - **Количество ответов** (Response quantity) — здесь выбираем **Массу** (Mass), а также Упражнение, на базе которого она будет вычисляться. Эту операцию выполняем, используя список **Имеющиеся упражнения** (Available studies);
   - **Допуск сходимости** (Convergence tolerance) — эту величину не следует делать слишком малой, поскольку получение "точного" условного оптимума в подобных задачах маловероятно.

Замечание

Здесь имеет место некорректный перевод терминов: Objective (Целевая функция); Minimize (Минимизировать); Maximize (Максимизировать), Response quantity (Функция отклика); Buckling (Устойчивость).

3. Назначаем переменные проектирования. Для этого используем окно **Расчетные параметры** (Design Variables). Результат показан на рис. 6.121, а процесс заполнения окна — на рис. 6.122.

Замечание

Здесь также перевод терминов выполнен не совсем точно: Design Variables следует трактовать как Переменные проектирования.

Увидеть варьируемые размеры можно на рис. 6.122. Первые два — это толщина, на которую уменьшается втулка (в исходном состоянии это 1 мм), в третий — это длина ступицы. То, что варьируется форма выреза, а не диаметр, сделано исходя из посторонних соображений, и специфической функции не несет. Мы ввели также варьирование диаметра (формально — выреза) по длине втулки, чтобы предоставить системе возможность более равномерно распределить по длине ступицы передаваемый крутящий момент.

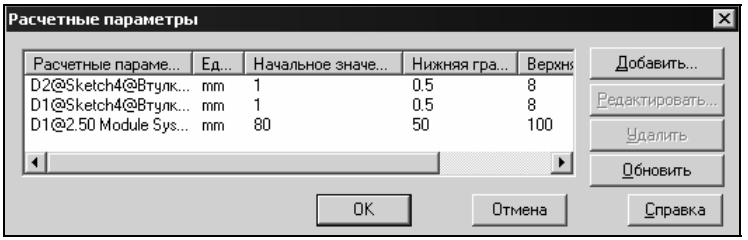


Рис. 6.121. Назначение переменных проектирования

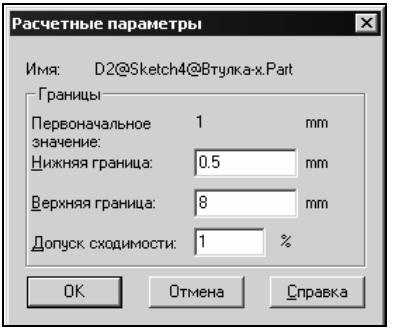


Рис. 6.122. Параметры переменной проектирования

4. Последняя операция — наложение ограничений. Для этого используем окно **Ограничения** (Constraints). На рис. 6.123 оно показано в заполненном состоянии. Ввод новых ограничений осуществляется в окне **Ограничение** (Constraint) (рис. 6.124). Естественным требованием является неувеличение максимального эквивалентного напряжения. В исходном варианте мы имеем 4.02 e7 Па. С учетом существующих погрешностей расчета, а также для того, чтобы дать системе возможность попробовать все направления поиска, назначаем в качестве верхней границы допустимого интервала несколько большую величину. Принимаем осреднение по элементам — **Элементарные напряжения** (Element Stress) в качестве алгоритма расчета напряжений, которые формируют ограничения. Это сделано для

повышения устойчивости алгоритма, поскольку напряжения в узлах более чувствительны к малой вариации размеров конструкции, а также к особенностям сетки конечных элементов.

Замечание

Корректный перевод термина Element Stress — Напряжения в элементах.

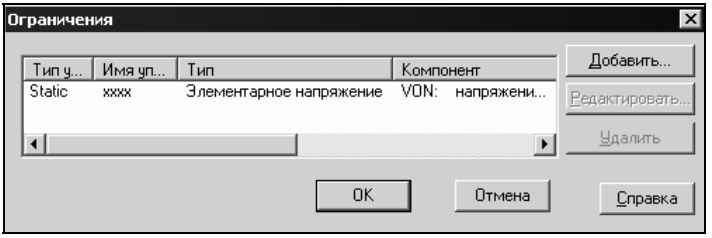


Рис. 6.123. Назначение ограничений

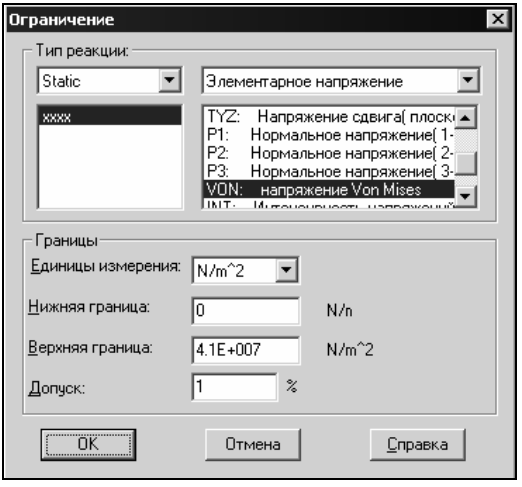


Рис. 6.124. Параметры ограничения

В окне **Свойства** (Properties) упражнения **Оптимизация** назначаем **Максимальное число этапов проектирования** (Maximum no. of design cycles) равным двадцати. Как упоминалось, для контактных задач трудно рассчитывать на строгую сходимость, поэтому после осуществления некоторого числа итераций рекомендуется повторно рассмотреть постановку задачи проектирования и, может быть, уточнить настройки. Результат работы алгоритма показан на рис. 6.118. Для того чтобы его отобразить, необходимо дважды щелкнуть по пиктограмме **Окончательное проектное решение** (Final Design), находя-

щейся в папке **Результаты этапов проектирования** (Design Cycle Result) (рис. 6.125). Как видно, система вышла на границу допустимой области. Из этого следует, что, в принципе, возможность дальнейшего снижения массы не исчерпана.

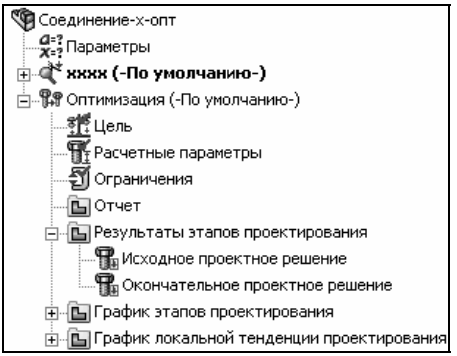


Рис. 6.125. Фрагмент Менеджера COSMOSWorks, определяющий оптимизационный процесс

Диаграммы эквивалентных напряжений для вала и сборки модернизированной конструкции приведены на рис. 6.127 и 6.126 соответственно. Наблюдается интересный факт: снижение массы привело к уменьшению максимальных эквивалентных напряжений в конструкции. Они уменьшились в ступице (сравните с рис. 6.107), а во впадинах вала не изменились (см. рис. 6.108). В то же время средний уровень напряжений в ступице вырос. Это, в общем, позитивный эффект: оптимальные (с точки зрения статики) конструкции обладают свойством равнопрочности (факт, насколько известно авторам, недоказанный, но широко используемый). Налицо определенное улучшение

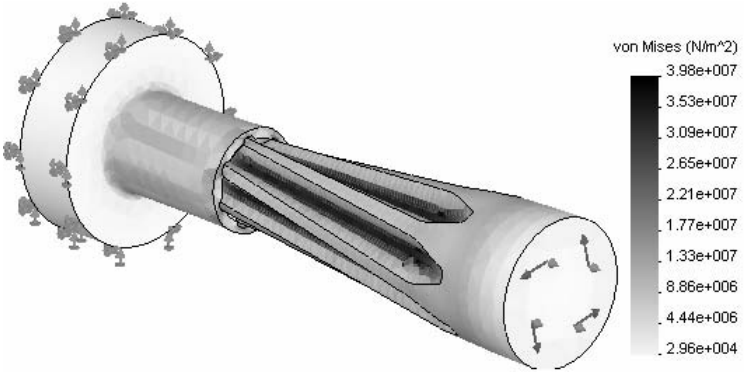


Рис. 6.126. Эквивалентные напряжения в улучшенной конструкции



Рис. 6.127. Эквивалентные напряжения в вале для улучшенной конструкции

ситуации. Оно проявляется, во-первых, в уменьшении концентрации напряжений на краю втулки, где шлицы начинают контактировать с зубьями ступицы (кривизна деформированного шлица также уменьшилась). Во-вторых, видно, что напряжения в шлицах внутри ступицы выросли, т. е. в работу включилась бóльшая часть втулки. Собственно уменьшение напряжений в месте встречи вала со ступицей произошло именно за счет их перераспределения внутрь втулки (ясно, что крутящий момент в ходе оптимизации не изменился).

Получив улучшенный проект, следует обратить внимание на то, как система выполнила для него расчет. Если отобразить сетку конечных элементов (рис. 6.128), то выяснится, что она несколько более редкая, чем та, которая использовалась для исходной конфигурации (см. рис. 6.105). Выполним поверочный анализ. Для этого подберем **Элементы управления** (Mesh controls) такие, чтобы обеспечить сопоставимое число слоев конечных элементов по толщине втулки, а также в других характерных направлениях (рис. 6.129).

Картина эквивалентных напряжений в конструкции с модифицированной сеткой показана на рис. 6.130. Как и ожидалось, распределение напряжений во втулке стало более гладким, однако абсолютные их величины существенно не изменились. С точки зрения формального алгоритма оптимизации "уточненный" расчет оптимального проекта некорректен: если бы промежуточные варианты рассчитывались с той же плотностью сетки, то, возможно, и оптимум был бы другим (и не факт, что разница ограничивалась количественными изменениями). Однако в инженерной практике такая последовательность действий вполне традиционна.

В связи с этим подчеркнем, что желательно назначать параметры, определяющие плотность сетки, такими, чтобы у всех проектов, которые система генерирует в ходе оптимизации, сетки были сопоставимы. Критерием сравнения здесь является не абсолютная величина элементов, а их число в направлении максимального градиента напряжений (если более корректно —

деформаций). Например, оптимизируя толстостенный цилиндр под действием внутреннего давления, нужно стремиться к сохранению числа элементов в радиальном направлении. Если же рассматривается полоса при изгибе, то характерным является направление вдоль полосы (при использовании элементов оболочек). Надо сказать, что COSMOSWorks не имеет для этого всех необходимых инструментов для управления плотностью сетки. В частности, нельзя назначить число элементов в некотором направлении непосредственно — воздействие производится только осредненным размером элемента. Однако при соответствующих навыках более-менее приемлемый результат достижим.

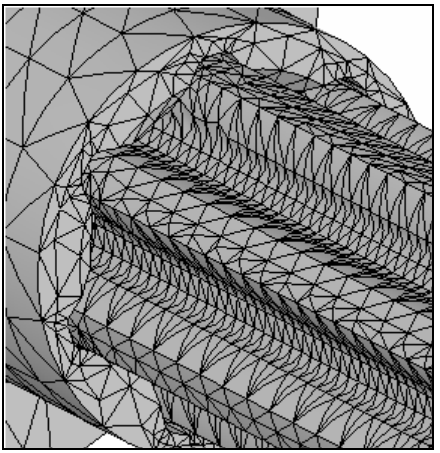


Рис. 6.128. Сетка конечных элементов улучшенной конструкции

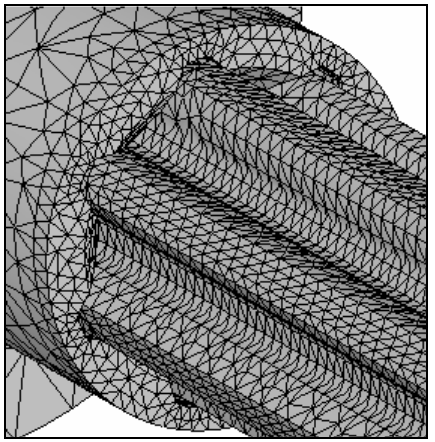


Рис. 6.129. Модифицированная сетка конечных элементов улучшенной конструкции

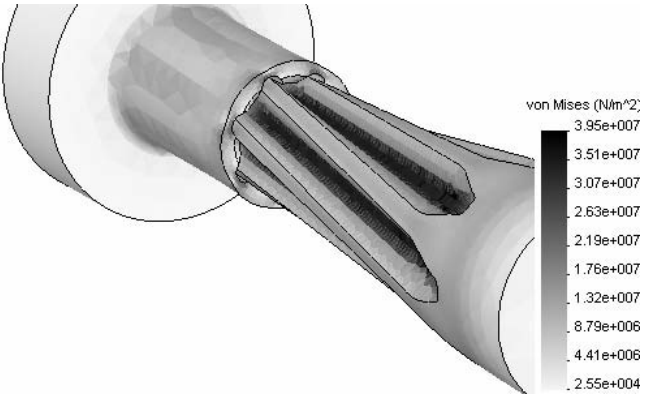


Рис. 6.130. Эквивалентные напряжения в улучшенной конструкции с модифицированной сеткой

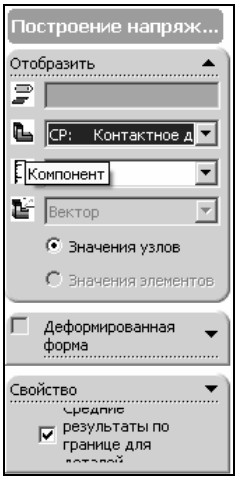


Рис. 6.131. Настройка диаграммы **Напряжения** для вывода контактного давления

Показательной является картина контактного давления на взаимодействующих гранях. Для этого создаем диаграмму напряжений с выбором в качестве **Компонента** (Component) **Контактного давления** (Contact pressure) (рис. 6.131). Оставляем активной опцию **Средние результаты по границе для деталей** (Average results across boundary for parts), которая управляет осреднением напряжений между обеими контактными поверхностями (мы не будем анализировать ее влияние, однако отметим, что сравнение результатов с учетом и без учета осреднения дает любопытную информацию о степени точности решения). Диаграммы выводятся в векторном виде с поузловым осреднением напряжений. Для исходной геометрии распределение давления показано на рис. 6.132, а для модифицированной — на рис. 6.133. Максимальное давление снижено с 79 до 52 МПа. Произошло это, как следовало ожидать, за счет "размазывания" силы по длине контактных пар.

В завершение проанализируем, как влияют параметры проектирования на свойства конструкции. Что касается их действия на целевую функцию, то здесь зависимость тривиальна: чем толще цилиндрический вырез и чем короче ступица, тем меньше ее масса и, соответственно, масса сборки. Более интересно оценить, как размеры влияют на максимальное эквивалентное напряжение. Для этого из контекстного меню пиктограммы **График этапов проектирования** (Design Local Trend Graph) подаем команду **Определить** (Define), после чего в окне **График локальной тенденции** (Local Trend Graph) (рис. 6.134) в списке **Расчетные параметры** (Design variable) выбираем интересующий нас размер (в данном случае это длина втулки) — на графике он будет выступать в качестве параметра. Переключатель **Ось – Y** (Y – Axis) устанавливаем в положение **Ограничение** (Constraint), после чего в выпадающем списке выбираем интересующее нас ограничение (в данном

случае это максимальное эквивалентное напряжение). Параметр, определяющий ограничение, будет ординатой.

Замечание

Корректный перевод терминов: Local Trend Graph (Кривая тренда); Design variable (Переменная проектирования).

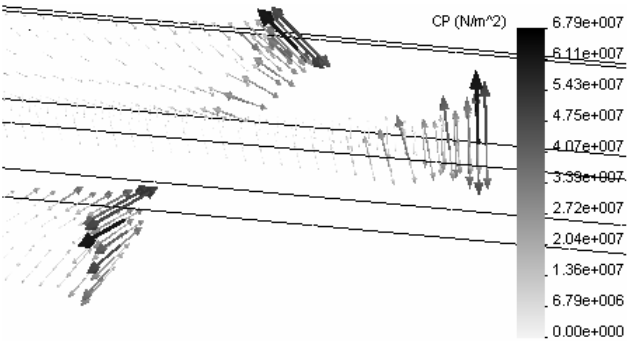


Рис. 6.132. Контактное давление в исходной конструкции

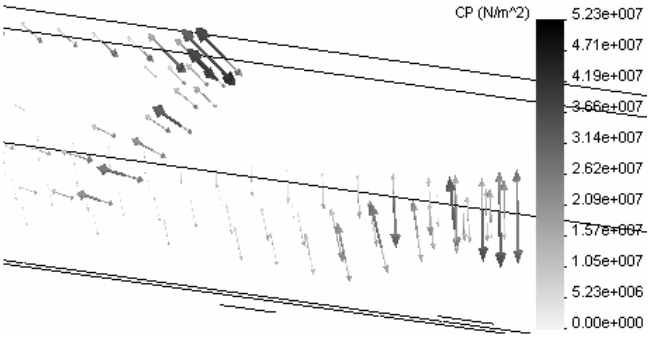


Рис. 6.133. Контактное давление в оптимизированной конструкции

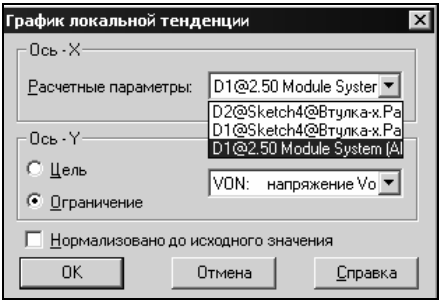


Рис. 6.134. Создание кривой тренда для ограничений

Результат показан на рис. 6.135. Получили, по сути, кривую чувствительности максимального эквивалентного напряжения относительно длины ступицы. Вопреки оптимистическим декларациям, уменьшение длины втулки, равно как и ее диаметра, формально не улучшает конструкцию. Дело в том, что экстремум напряжения диагностируется в пределах всей сборки, в том числе и вале. А в нем наибольшая концентрация наблюдается во впадинах вне ступицы. Отметим, что в оптимизационной процедуре COSMOSWorks ни на каком этапе невозможно отделить параметры, относящиеся к различным деталям сборки. Более того, если материалы деталей имеют различную прочность (или сочетаются материалы, состояние которых должно оцениваться посредством различных критериев прочности), то участвовать в расчете должен коэффициент запаса прочности. Программа в том виде, в котором она существует в настоящий момент, не позволяет этого сделать.

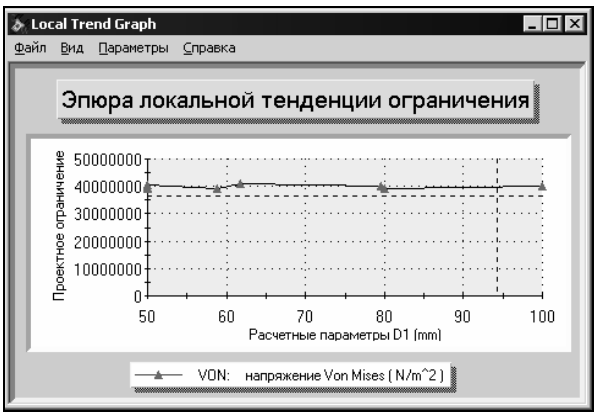


Рис. 6.135. Кривая тренда для ограничения по эквивалентным напряжениям

Завершая раздел, посвященный проектированию шлицевого соединения, напомним, что мы не упоминали традиционные методы Деталей машин, которые используются для подобных объектов. Сравнительный анализ численных методов и эмпирических схем, по сути, тема специального разбора. Заинтересованные читатели могут сделать это самостоятельно на примере данной конструкции.

6.6. Выводы

На этом мы закончим рассмотрение приложений SolidWorks для работы с элементами конструкций. Подробности, касающиеся взаимодействия с Toolbox, как-то: создание новых стандартов, библиотек и типоразмеров, приемы, касающиеся модификации крепежа, придания ему свойств, и т. д.,

мало связаны с расчетной проблематикой и поэтому опущены. Использование GearTrax требует внимательного подбора настроек применительно к требованиям нормативных документов. Вообще говоря, в мире и в России существует достаточное число коммерческих и свободно распространяемых баз конструктивных элементов. Однако абсолютное их большинство не сопровождаются расчетными процедурами. Исключением является приложение MechSoft чешской фирмы Mechsoft, включающее разнообразную номенклатуру объектов машиностроения, а также методик их расчета как в изолированном виде, так и в составе узлов. Имеется также модуль оптимизации. Однако из-за перераспределения сфер влияния, происходящего среди производителей CAD-систем (весной 2004 года разработчики были поглощены фирмой Autodesk), этот продукт демонстрирует тенденцию более тесной интеграции с Autodesk Inventor, практически прекратив развитие функциональности, связанной с SolidWorks. Кроме того, использование MechSoft в отечественной промышленности лимитировано отсутствием гарантии соответствия ведомственных методик проектирования и алгоритмов, задействованных в программе (и это несмотря на то, что ее теоретическая база подробно описана в документации, а различие, как правило, сводится к терминологическим расхождениям).

Еще одно замечание касается того, какие модели зубчатых колес, полученные посредством SolidWorks Toolbox или GearTrax, предпочтительно использовать в моделях изделий. Здесь рекомендации такие. Если модель предназначена только для выполнения конструкторской документации, то разницы нет. Если на ее базе будет выполняться анализ кинематики средствами SolidWorks, то из-за простоты поверхностей модели зубчатых колес из Toolbox более приемлемы. Однако их использование в программах реального кинематического анализа, например COSMOSMotion, приведет к неравномерной передаче движения (поскольку профили зубьев неэвольвентные). Поэтому результат работы GearTrax со сплайновой аппроксимацией эвольвенты даст вполне достоверный результат. Если же модель колеса станет источником для программ механической обработки, то применение GearTrax или аналогов однозначно необходимо.

ГЛАВА 7

Кинематика и динамика (COSMOSMotion)

В этой главе будет рассмотрено приложение COSMOSMotion, предназначенное для моделирования динамических систем в среде SolidWorks. Поскольку продукт построен на базе разработок фирмы ADAMS, используемых, в частности, в программах линии visualNastran и Dynamic Designer фирмы MSC, то приведенная информация будет интересна и пользователям данных продуктов (рис. 7.1).

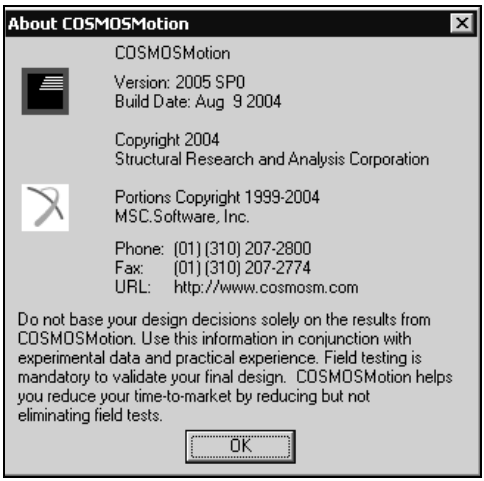


Рис. 7.1. Информационная панель COSMOSMotion

Замечание

Для выполнения расчета использован COSMOSMotion 2005. Описание интерфейса соответствует этой версии.

7.1. Назначение

COSMOSMotion предназначен для имитации движения механизмов с учетом кинематических и силовых факторов. Программа полностью интегрирована в SolidWorks, функционирует на геометрической модели SolidWorks, запись расчетных параметров и результатов также осуществляется в модель SolidWorks.

Мы не будем детально разбирать возможности программы, ограничившись общим описанием функциональности и интерфейса. Причина здесь такова. Программа, в общем, не скрывает большого числа "подводных камней". В отличие от рассмотренных ранее задач прочности и аэрогидродинамики, здесь видимый результат и фактическое состояние вещей отличаются, как правило, незначительно. Достаточно подобрать разумные параметры, определяющие точность и качество отображения результатов. Это утверждение, конечно, справедливо по отношению к тем задачам, которые в принципе "подходят" для программы. Ошибки и погрешности, как правило, достаточно просто идентифицируются после анимации результата. Кроме того, несмотря на кажущуюся актуальность программных продуктов для анализа кинематики и динамики, фактическая их востребованность сейчас невелика. Дело в том, что если пару десятков лет назад применение сложных механизмов было повсеместным, то теперь функции управления взяла на себя микропроцессорная техника, а приводы начали строиться на базе контроллеров. В итоге самые сложные движения могут быть реализованы системами, вполне элементарными с точки зрения кинематики. Поэтому проектирование движения свелось к программированию в той или иной его форме. Область же применения программ сузилась до расчета силовых факторов, действующих в механизмах. Не следует также забывать и о собственных возможностях SolidWorks по симуляции кинематики.

7.2. Теоретическая база

COSMOSMotion есть, по сути, усеченный вариант программы MSC.ADAMS. Это один из наиболее популярных продуктов, предназначенных для расчета кинематики и динамики. В COSMOSMotion включена та часть функциональности ADAMS, которая не требует данных о податливости деталей механизма (и, естественно, не учитывает ее). Программа анализирует сборку SolidWorks, транслируя ее в условную модель механизма с учетом массово-инерционных характеристик деталей. При этом инерционные параметры заимствуются из геометрии деталей SolidWorks, а плотность (масса) может быть назначена независимо от геометрической оболочки. Далее, уже для математической модели строится система дифференциальных уравнений движения, которая за-

тем решается посредством разностных (в настоящий момент в программе имеется три типа решателя) схем. После этого программа преобразует численные результаты в вид, пригодный для отображения. На этом шаге система вновь взаимодействует с реальной геометрией. Отображение расчетной кинематической модели (в виде пиктограмм), а также результатов производится в графическом окне SolidWorks непосредственно на фоне модели сборки SolidWorks.

Это, к сожалению, вся информация, связанная с теоретической базой COSMOSMotion, которой располагают авторы. Ни в учебных пособиях, ни в справочной системе нет никаких сведений об использованном математическом аппарате. На вполне естественный вопрос о том, почему пользователь может доверять результатам, полученным с помощью COSMOSMotion, сайт фирмы SRAC дает ответ, смысл которого следующий: "Вы не должны сомневаться потому, что это разработка фирмы ADAMS, а вера в их опыт и квалификацию не подлежит обсуждению". Поэтому, как и для всех программ численного анализа, рекомендуется расчленять проблему на элементарные составляющие, решать эти задачи, сравнивать с экспериментом или апробированным расчетом, настраивая при этом соответствующие параметры вычислительного процесса. И только убедившись в адекватности "тривиальных" моделей, рассчитывать объект с учетом всех эффектов.

Предупреждение

Об этом напоминает и текст на панели **About** COSMOSMotion (см. рис. 7.1): "Не принимайте решений по поводу вашей конструкции исключительно на базе результатов COSMOSMotion. Используйте их совместно с экспериментальными данными и вашим практическим опытом. Для оценки конечного проекта приоритетны натурные испытания. COSMOSMotion поможет сократить время выхода изделия на рынок за счет сокращения испытаний, но не за счет полного их исключения". Отметим, что эта фраза появилась только в версии 2005 года.

7.3. Интерфейс

COSMOSMotion имеет стандартный интерфейс приложения SolidWorks. У него есть падающее меню, появляющееся после щелчка по позиции **Motion** (Движение) меню **SolidWorks** (его команды рассмотрены далее). Также присутствует **IntelliMotion Browser** (Браузер COSMOSMotion), который находится рядом с вкладкой Менеджер конфигурации SolidWorks и обозначен пиктограммой с зубчатым зацеплением (рис. 7.2).

Браузер является деревом, которое растет из корня **Motion Model** (Модель движения). В нем присутствуют элементы: **Assembly Components** (Компоненты сборок); **Parts** (Детали); **Constraints** (Связи); **Forces** (Силы); **Results** (Результаты). Каждый из них может содержать вложенные объекты, те,

в свою очередь, иметь потомков, и т. д. В дереве доступны манипуляции в стиле drag-and-drop. Они, однако, ограничены перемещением деталей между группами подвижных и неподвижных. Подобно программам типа COSMOSWorks и DesignSTAR, весь процесс расчета можно осуществить, работая исключительно с контекстными меню объектов в браузере. Для неопытных (по отношению, разумеется, к программной среде) пользователей рекомендуем, начиная с корня, последовательно вызывать команды этих меню и изучать их функции, решая, что необходимо сделать на данном этапе. Эти манипуляции следует продолжить до самого низа дерева. Затем нужно выполнить расчет и снова повторить путь, начиная с корня. Содержимое контекстных меню или список доступных команд изменятся применительно к состоянию системы, получившемуся после расчета.



Рис. 7.2. Окно **SolidWorks** с активным приложением COSMOSMotion

Как в некоторых современных программах, например, в рассмотренном ранее COSMOSFloWorks, имеется Мастер проекта (здесь он фигурирует под названием **IntelliMotion Builder**). Он воспроизводит последовательность выполнения анализа, начиная от настройки процесса до экспорта результатов. Далее он будет описан несколько более подробно.

Панель **COSMOSMotion** (она появляется сразу после подключения модуля и "встраивается" среди панелей SolidWorks) показана на рис. 7.3, а расшифровка команд, которым соответствуют кнопки панели, приведена в табл. 7.1.



Рис. 7.3. Панель **COSMOSMotion**

Таблица 7.1. *Кнопки панели* ***COSMOSMotion***

Кнопка	Ярлык		Функция
	**Options**	Настройки	Назначение общих параметров задачи и настроек вычислительного процесса
	**IntelliMotion Builder**	Мастер проекта	Инструмент пошагового моделирования, решения, отображения и экспорта результатов
	**Simulate**	Симулировать	Выполнение расчета
	**Delete Results**	Удалить результаты	Удаление результатов с получением доступа к командам изменения модели
	**Reset Model**	Сброс модели	Возвращение механизма в исходное состояние
	**Fast Reverse**	Быстро назад	Ускоренная анимация в направлении уменьшения времени
	**Reverse**	Назад	Анимация в направлении уменьшения времени
	**Stop Replay**	Приостановить воспроизведение	Приостановка проигрывания анимации
	**Play**	Проигрывать	Выполнение анимации
	**Fast Forward**	Быстро вперед	Ускоренная анимация
	**Find Interferences**	Проверить коллизии	Проверка интерференции деталей с одновременной анимацией
	**Export AVI**	Экспорт AVI	Создание файла в формате AVI по результатам расчета
	**Export VRML**	Экспорт VRML	Создание файла в формате VRML по результатам расчета
	**Export Plots**	Экспорт диаграмм	Экспорт графиков результатов и соответствующих им таблиц в MS Excel
	**Export FEA**	Экспорт в МКЭ	Передача силовых факторов в программу метода конечных элементов
	**Export MSC.ADAMS**	Экспорт в MSC.ADAMS	Передача модели и результатов в MSC.ADAMS
	**Simulation Controls**	Управление симуляцией	Вызов панели инструментов **Симуляция**
	**Message Window**	Окно сообщений	Вывод окна сообщений с протоколом хода вычислительного процесса

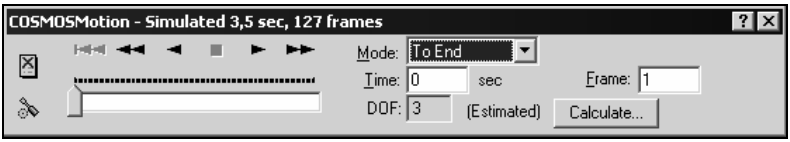


Рис. 7.4. Панель **Simulation**

На рис. 7.4 показана **Simulation Panel** (Панель симуляции). Она содержит кнопку **Delete Simulation Results** (Удалить результаты симуляции), кнопку **Simulation Settings** (Настройки симуляции), инструменты управления анимацией, а также несколько полей:

- **Mode** (Режим) — управление тем, в каком направлении будет выполняться анимация;
- **Time** (Время) — демонстрация времени, соответствующего отображаемому кадру, а также — при вводе величины пользователя — отображение механизма в момент времени, ближайший к назначенному (точное соответствие возможно только в случае присутствия кадра, соответствующего назначенному времени);
- **DOF** (Степеней свободы) — число степеней свободы механизма, рассчитанное системой в ходе симуляции. Тот же расчет, но без полного анализа можно выполнить, нажав кнопку **Calculate** (Вычислить);
- **Frame** (Кадр) — номер отображаемого кадра, а также, аналогично полю **Time**, поле для ввода номера кадра, который требуется показать.

  Внизу панели находится ползунковый регулятор, передвигая который можно переводить механизм в заданное состояние.

В заключение рассмотрим содержимое типового окна, предназначенного для создания соединений. Окна для работы с другими объектами принципиальных отличий не имеют. На этом этапе мы ограничимся рассмотрением единственной вкладки **Definition** (Определение), показанной на рис. 7.5. В ней присутствуют поля:

- **Joint Type** (Тип соединения);
- **Select 1st Component** (Выберите 1-й компонент) — это первый компонент, участвующий в соединении;
- **Select 2nd Component** (Выберите 2-й компонент) — второй компонент, участвующий в соединении;
- **Select Location** (Выберите место приложения) — место, где будет показана пиктограмма движения;
- **Select Direction** (Выберите направление) — объект, определяющий направление действия связи.

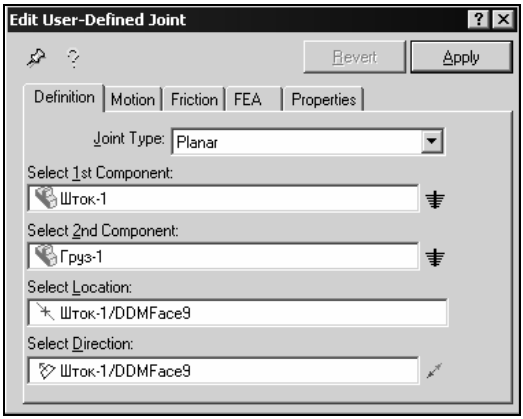


Рис. 7.5. Типовое окно для создания связи

Также доступны две пиктограммы. Первая помечена знаком заземления (**Ground**). После ее нажатия в соответствующем поле появляется неподвижная деталь. Вторая пиктограмма — на ней изображена стрелка (**Flip**) — предназначена для изменения направления действия фактора на противоположное. Содержимое и функциональность остальных вкладок и других окон будут рассмотрены далее применительно к решаемой задаче.

7.4. Функциональные возможности

Программа включает следующие возможности:

- создавать расчетные модели на базе сборок SolidWorks с чтением из нее геометрии, массово-инерционных характеристик деталей и взаимосвязей в сборке;
- поддерживать актуальность расчетных моделей относительно структуры сборки SolidWorks;
- создавать соединения различных типов с предопределенной границей;
- имитировать контактные соединения с возможностью входа и выхода из контакта с учетом контактной податливости и демпфирования;
- создавать виртуальные пружины, амортизаторы и податливые втулки;
- назначать движения и двигатели различных типов с использованием библиотеки функций MSC.ADAMS;
- выполнять настройку вычислительных параметров и решать задачу с использованием различных типов решателей;
- осуществлять визуализацию кинематики механизма с одновременным отображением результатов в виде графиков, векторов, пиктограмм;

- записывать результаты в разнообразных графических форматах, а также импортировать результаты динамического расчета в COSMOSWorks;
- создавать процедуры пользователя с использованием функций API-программы.

7.4.1. Возможности версии 2005 года

Перед окончанием подготовки рукописи стала доступна информация о версии COSMOSMotion 2005.

Основные усовершенствования таковы:

- автоматическое распознавание сопряжений в подсборках SolidWorks с последующей их интерпретацией в кинематической модели;
- автоматическое распознавание сопряжений SolidWorks типа касательности поверхностей и движения точки по поверхности;
- наличие ортотропных втулок, позволяющих назначать различную жесткость в трех направлениях, а также жесткость при кручении;
- проверка интерференции при наличии деталей, имеющих многотельное представление, а также моделирование пространственного контакта таких деталей;
- перенос информации о динамических нагрузках в COSMOSWorks без использования промежуточного текстового файла (информация считывается из файла сборки SolidWorks, в которую записываются расчетные данные).

7.4.2. Команды программы

Общую информацию о возможностях программы можно получить на основе содержания падающего меню. Полная его структура показана на рис. 7.6. В него входят практически все команды программы. Мы ограничимся их перечислением с краткими комментариями. Более информативные сведения о некоторых из них будут приведены применительно к конкретной задаче. Описание остальных доступно в Руководстве пользователя (COSMOSMotion User's Guide), а также в справочной системе программы.

Меню *Motion*

В меню **Motion** (Движение) присутствуют следующие команды.

- **Options** (Настройки) — назначение общих параметров задачи. Содержит вкладки:
  - **World** (Окружение) — определение единиц измерения, гравитационных нагрузок, параметров взаимодействия с SolidWorks при вставке новых деталей;

- **Display** (Отображение) — назначение режимов вывода обозначений в графическом окне со сборкой;
- **Simulation** (Симуляция) — задание времени действия механизма, а также настройки вычислительного процесса;
- **Animation** (Анимация) — параметры анимации;
- **Results** (Результаты) — параметры пиктограмм и символов, которыми отображаются результаты в графическом окне.

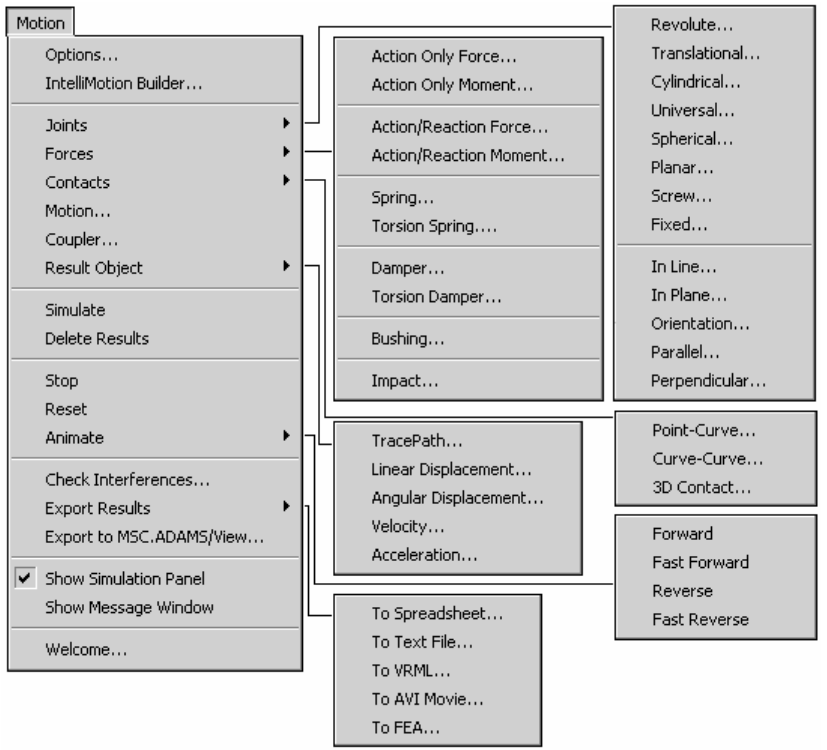


Рис. 7.6. Структура падающего меню

- **IntelliMotion Builder** (Мастер проекта) — окно с набором вкладок, соответствующих основным этапам моделирования и расчета:
  - **Units** (Системы единиц);
  - **Gravity** (Гравитация);
  - **Parts** (Детали);
  - **Joints** (Соединения);

- **Springs** (Пружины);
- **Motion** (Движение) — приложение движения к соединениям;
- **Simulation** (Симуляция) — определение режима симуляции работы механизма;
- **Animation** (Анимация) — параметры анимации, а также ее создание;
- **Interferences** (Интерференции) — диагностика коллизий на базе результатов расчета;
- **VRML** (Virtual reality modeling language) — создание файла анимации в формате VRML.

Отметим, что на вкладках **IntelliMotion Builder** присутствует только минимум функциональности, позволяющий решать базовые задачи. Определенным достоинством является наличие подсказок, правда, достаточно элементарных. Подобно другим программам, после использования Мастера расчетную модель можно изменять произвольным образом (если, конечно, не запускалась процедура решения).

- **Joints** (Соединения) — вызов меню, в котором находятся команды создания кинематических пар.
- **Forces** (Силы) — вызов меню, содержащего команды для создания силовых факторов и объектов (пружин, втулок, демпферов) их порождающих.
- **Contacts** (Контакты) — вызов меню, в котором находятся команды для назначения условий контакта криволинейных (неплоских и некруговых) объектов.
- **Motion** (Движение) — назначение движения одному объекту относительно другого. Доступен выбор из числа заранее определенных движений:
  - **Free** (Свободное);
  - **Displacement** (Перемещение);
  - **Velocity** (Скорость);
  - **Acceleration** (Ускорение).

  Любое из этих движений, за исключением свободного, может подчиняться следующим законам:
  - **Constant** (Постоянный);
  - **Step** (Ступенчатый);
  - **Harmonic** (Гармонический);
  - **Spline** (Сплайновый);

- **Expression** (Выражение) — использование подмножества функций MSC.ADAMS для описания движения.

- **Coupler** (Сцепка) — назначение связи между движением двух кинематических пар (поворотом и/или поступательным движением). При этом одно соединение является родителем, а другое — потомком.
- **Result Object** (Объекты результатов) — вызов меню, в котором находятся команды отображения результатов выполненного расчета.
- **Simulate** (Симулировать) — выполнение расчета.
- **Delete Results** (Удалить результаты) — уничтожение результатов расчета, независимо от того, был ли он выполнен полностью или прерван.
- **Reset** (Сброс) — возвращение механизма в исходное состояние без удаления результатов.
- **Animate** (Анимировать) — вызов меню, в котором находятся команды анимации механизма по результатам расчета.
- **Check Interferences** (Проверить коллизии) — вызов окна, в котором осуществляется визуализация механизма с покадровой проверкой интерференции назначенных деталей.
- **Export Results** (Экспорт результатов) — вызов меню, в котором находятся команды записи результатов в разнообразных форматах.
- **Export to MSC.ADAMS** (Экспорт в MSC.ADAMS) — экспорт данных и/или результатов в программу MSC.ADAMS.
- **Show Simulation Panel** (Отобразить панель симуляции).
- **Show Message Window** (Отобразить окно сообщений) — отображение окна с диагностикой вычислительного процесса. Выводимая в него информация полезна, если расчет прерывается в связи с ошибкой пользователя.
- **Welcome** (Приветствие) — вывод окна, из которого можно получить доступ к Tutorials (Учебным пособиям), представляющим собой набор примеров, а также к информации о новых возможностях программы.

В меню **Motion**, равно как и в других меню, все команды делятся на две группы: доступные в данный момент и недоступные. Первая соответствует состоянию модели, когда расчет не выполнялся (а правильнее, отсутствуют результаты), вторая — когда расчет, пусть и не полностью (не весь интервал времени рассмотрен, или же вычисления были прерваны) сделан. Как правило, в первую группу входят команды создания кинематической модели, назначения настроек вычислительного процесса и, естественно, запуска расчета; во вторую — команды создания результатов, их визуализации и экспорта, анимации и, разумеется, их уничтожения. Поэтому, если некий расчет вы-

полнен, то для получения доступа к процедурам корректировки модели, настройки вычислительных параметров необходимо уничтожить "следы" этого расчета. В отличие, например, от COSMOSWorks, множественные анализы в COSMOSMotion неосуществимы.

Меню *Joints*

Меню **Joints** (Соединения) содержит команды, предназначенные для создания кинематических пар. При создании соединений нужно указывать детали, место приложения соединения и направление. Смысл двух последних параметров изменяется в зависимости от типа соединения. В кинематической паре допускается трение. Важной особенностью данной группы связей является то, что они активны в течение всего периода работы механизма.

Соединения в меню **Joints** разделены на две группы. Та, которая расположена сверху, объединяет физически реализуемые объекты. Снизу — идеализированные явления, именуемые **JPrim** (Joint Primitives). Их функция — дополнять "реальные" соединения в случае недостатка их функциональности. Однако без видимой и обоснованной причины использовать эти опции не рекомендуется. Неким аналогом этих соединений в COSMOSWorks являются граничные условия типа Закрепление в точке или по линии, а также контакт деталей в точке или по линии. Поставить их, в принципе, можно, но ответственность за результат и его интерпретацию всецело лежит на пользователе.

Перечислим реализованные в COSMOSMotion соединения:

- **Revolute Joint** (Шарнир поворота) — детали могут совершать взаимный поворот относительно некоторой оси;
- **Translational Joint** (Поступательное движение) — детали могут перемещаться относительно некоторого направления без поворота;
- **Cylindrical Joint** (Цилиндрический шарнир) — детали могут вращаться и перемещаться относительно некоторой оси;
- **Spherical Joint** (Сферический шарнир) — детали могут поворачиваться относительно трех осей;
- **Universal Joint** (Универсальный шарнир) — кардан;
- **Screw Joint** (Винтовое соединение) — вращательно-поступательное движение, определяемое шагом;
- **Planar Joint** (Плоское соединение) — пара скольжения, когда присутствуют два взаимных перемещения и один угол поворота;
- **Fixed Joint** (Фиксация) — совместное перемещение двух жестких тел как одного целого.

Joint Primitives (Примитивы соединений) могут быть такими:

- **Atpoint Primitive** (Примитив в точке) — поворот относительно трех осей, проходящих через точку в пространстве;
- **Inline Primitive** (Перемещение по линии) — перемещение некоторой точки одной детали по линии относительно другой, состоящее из одной поступательной и трех поворотных степеней свободы;
- **Inplane Primitive** (Перемещение по плоскости) — перемещение некоторой точки одной детали по некоторой плоскости относительно другой, состоящее из двух поступательных и трех поворотных степеней свободы;
- **Orientation Primitive** (Примитив ориентация) — разрешено взаимное поступательное движение деталей во всех направлениях. Взаимные повороты невозможны;
- **Parallel Axis Primitive** (Примитив параллельных осей) — разрешено взаимное смещение деталей так, что две прямые, связанные с каждой из деталей, остаются параллельны, а три линейных перемещения — не ограничены;
- **Perpendicular Primitive** (Примитив перпендикулярность) — сохранение перпендикулярности двух направлений, связанных (по одному) с деталями (при этом два взаимных поворота свободны). Три линейных перемещения разрешены.

Соединения предполагаются абсолютно жесткими. Если нужно учесть эффекты локальной податливости и демпфирования, то объекты, присутствующие в данном меню, неприменимы, и нужно обратиться к понятиям **Bushing** (Втулка) и **Impact** (Проникновение) из меню **Forces** (Силы). Кроме того, если форма взаимодействующих объектов неканоническая, а также, если связь зависит от состояния механизма, то следует применить команды из группы **Contacts** (Контакты).

Меню *Forces*

Меню **Forces** (Силы) содержит команды, предназначенные для имитации силовых факторов. Это могут быть как силы и моменты в явном виде, так и объекты, которые их порождают: пружины, амортизаторы, вязко-упругие втулки, а также имитаторы контактного взаимодействия. Из меню можно получить доступ к следующим объектам:

- **Action Only Force** (Только активная сила) — назначение силы, направление которой остается постоянным в ходе работы механизма. В зависимости от времени сила может быть постоянной, дискретно изменяющейся, гармонической, описываться сплайнами или подчиняться зависимости,

сформулированной пользователем и реализованной на базе встроенных математических функций;

- **Action Only Moment** (Только активный момент) — назначение момента, направление которого не меняется в ходе работы механизма;
- **Action/Reaction Force** (Активно/реактивная сила) — назначение силы, направление которой определяется двумя точками, положение которых может изменяться в ходе работы механизма (если точки принадлежат подвижным деталям). Соответственно изменяется и направление силы;
- **Action/Reaction Moment** (Активно/реактивный момент) — назначение момента, направление которого может изменяться в ходе работы механизма;
- **Spring** (Пружина) — создание виртуальной (хотя на экране она отображается вполне реалистически) пружины растяжения-сжатия;
- **Torsion Spring** (Пружина кручения) — создание виртуальной пружины кручения;
- **Damper** (Демпфер) — создание линейного амортизатора;
- **Torsion Damper** (Демпфер кручения) — создание амортизатора кручения;
- **Bushing** (Втулка) — создание виртуального соединительного объекта, связывающего две детали четырьмя виртуальными же соединительными элементами: одной линейной пружиной и одной пружиной кручения, а также линейным демпфером и демпфером поворота. Можно также приложить начальную силу и момент. В COSMOSMotion 2005 декларирована возможность создания втулок с различной жесткостью при поступательном смещении и при кручении. Пользователю следует иметь в виду, что объект Втулка является заменителем (а не дополнением) кинематических пар;
- **Impact** (Проникновение) — назначение условия взаимодействия деталей: при сокращении расстояния между некими объектами этих деталей больше некоторого предела возникает сила, которая экспоненциально зависит от расстояния, а также включается в работу демпфер.

Меню *Contacts*

Меню **Contacts** (Контакты) содержит команды, предназначенные для имитации контактного взаимодействия. Из меню можно получить доступ к следующим объектам:

- **Point-Curve** (Точка-кривая) — движение точки по плоской кривой без отрыва. В случае незамкнутой кривой при достижении ее конца точка не останавливается;

- **Curve-Curve** (Кривая-кривая) — движение двух жестких тел с сохранением касательности двух кривых, лежащих (в общем случае потенциально) в одной плоскости. Если активна опция **Intermittent Contact** (Прерывистый контакт), то возможен выход из контакта и вступление в контакт;
- **3D Contact** (3D-контакт) — контакт двух тел с учетом всех поверхностей обоих тел.

В процессе расчета и интерпретации результатов следует иметь в виду, что расчет производится не с подлинной геометрией, а аппроксимацией тел многогранниками. Исключением является имитация взаимодействия посредством функции **3D Contact**, где типом аппроксимации управляет опция **Use Precise Geometry for 3D Contact** (Использовать точную геометрию для 3D-контакта) в окне **Simulation** (Симуляция). Точность определяется параметрами **Points Per Curve** (Число вершин на кривой) или **Tolerance** (Допуск).

Меню *Result Object*

Меню **Result Object** (Объекты результатов) содержит команды для отображения результатов как в форме пиктограмм, размещенных на фоне модели, так и графиков зависимости величин от времени:

- **TracePath** (Траектория) — визуализация траектории вершины подвижной детали;
- **Linear Displacement** (Линейное перемещение) — визуализация перемещения точки подвижной детали относительно точки неподвижной детали;
- **Angular Displacement** (Линейное перемещение) — визуализация углового перемещения точки подвижной детали относительно неподвижной детали;
- **Velocity** (Скорость) — визуализация скорости точки подвижной детали относительно неподвижной системы координат;
- **Acceleration** (Ускорение) — визуализация ускорения точки подвижной детали относительно неподвижной системы координат.

Меню *Animate*

Меню **Animate** (Анимировать) содержит команды для анимации работы механизма:

- **Forward** (Вперед) — анимация в направлении увеличения времени с приращением один кадр;
- **Fast Forward** (Быстро вперед) — анимация в направлении увеличения времени с приращением **Fast Increment**, назначаемым на вкладке **Options** | **Animation**;

- **Reverse** (Назад) — анимация в направлении уменьшения времени с приращением один кадр;
- **Fast Reverse** (Быстро назад) — анимация в направлении уменьшения времени с приращением **Fast Increment**.

Меню *Export Results*

Меню **Export Results** (Экспорт результатов) содержит команды для экспорта результатов расчета в другие программы:

- **To Spreadsheet** (В электронную таблицу) — вывод результатов в формате Microsoft Excel. Транслируются как графики, так и, естественно, источник для их построения в виде таблицы. С учетом того, что непосредственный доступ к численным величинам результатов в COSMOSMotion невозможен, данная функция компенсирует этот недостаток;
- **To Text File** (В текстовый файл) — вывод результатов в текстовый файл. Подобно предыдущей функции предоставляет доступ к численным величинам;
- **To VRML** (В VRML) — вывод картинки в формате Virtual reality modeling language (Язык моделирования виртуальной реальности);
- **To AVI** (В AVI) — создание анимации в формате Audio-Video Interleaved;
- **To FEA** (В МКЭ) — экспорт нагрузок движения для расчета в программах метода конечных элементов, в частности, в COSMOSWorks.

Контекстные меню COSMOSMotion Browser

В браузере COSMOSMotion практически всем элементам дерева поставлены в соответствие контекстные меню. Доступ к ним и/или их наполнение зависит от состояния системы: был выполнен расчет в данный момент или нет. Содержание этих меню в целом соответствует командам, которые есть в меню падающем. Оригинальной является единственная команда — это **Material** (Материал), присутствующая в меню корневого объекта дерева **Motion Model**. После ее вызова появляется меню, в котором присутствуют две команды: **Add** (Добавить) и **Edit** (Редактировать). После подачи первой появляется последовательность окон, в которых нужно ввести название материала, а затем величины плотности, модуля упругости и коэффициента Пуассона, характеристики контактной жесткости и коэффициент вязкого демпфирования, а также коэффициенты статического и динамического трения (последние подразумевают, что ответной детали будут присвоен тот же самый материал). Редактирование материала осуществляется по команде **Edit**. Далее появляются, по сути, те же самые окна, что и при создании материала. Изменять можно любое из определенных в момент создания свойств, за исключением названия материала.

В заключение отметим, что материалы в COSMOSMotion никак не связаны с таковыми в SolidWorks и COSMOSWorks, где, как указывалось, для них существует общее хранилище. Причина в том, что характеристики, требуемые для динамического расчета, весьма специфические и, более того, методика их определения достаточно субъективна (с точки зрения субъективного же взгляда авторов). В связи с этим включать и, тем более, использовать новые материалы следует только после проведения адекватных экспериментов, сопровождаемых, по возможности, аналитическим или численным моделированием контактных эффектов.

7.4.3. Интерфейс с COSMOSWorks

COSMOSMotion обладает возможностью передачи динамических нагрузок в COSMOSWorks (в терминах COSMOSWorks они называются нагрузками движения). Для этого в окне **Edit Joint** (Редактировать соединение), которое вызывается по команде **Properties** из контекстного меню соответствующего соединения, нужно определить грани или кромки, которые воспринимают эти нагрузки на первом и на втором компоненте (рис. 7.7). Обратим внимание на то, что манипуляции производятся не с деталями, а с кинематическими парами, т. е. нужно проконтролировать все эти объекты. То же самое следует проделать и с кинематическими и силовыми граничными условиями (**Constraints**). Это, в частности, **Forces** (Силы) как назначенные пользователем, так и возникающие при взаимодействии с пружинами (**Springs**), демпферами (**Dampers**) и втулками (**Bushings**). Возникает естественный вопрос: почему программа не отслеживает эти факторы автоматически? Дело в том, что при создании кинематических пар можно указывать не только объекты, образующие соединения, но и те, которые определяют необходимые направления.

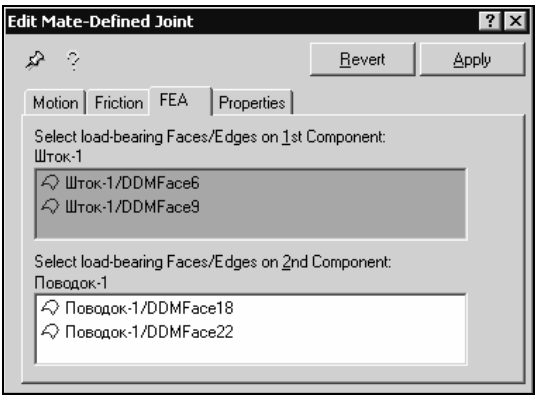


Рис. 7.7. Назначение граней, воспринимающих нагрузки движения

Именно они, а не реальные громки или грани учитываются программой при формировании соединения.

Для того чтобы иметь информацию для экспорта, необходимо выполнить расчет. После подачи команды **Export Results | To FEA** (Экспорт результатов В МКЭ) на экране возникает окно **Unassigned Load Entities** (Объекты, которым не присвоены нагрузки) (рис. 7.8). Из сообщения в окне следует, что некоторые соединения порождают силовые факторы, не ассоциированные с гранями или кромками деталей. Они будут пропущены при экспорте данных. В окне присутствует кнопка **Derive Joint Load Entities from Mates** (Получить информацию о нагруженных компонентах из сопряжений). Эта команда, однако, не всегда дает ожидаемые результаты, а если соединение создано непосредственно в COSMOSMotion, то их не будет вовсе. Так что оптимальным является назначение несущих объектов в диалоговом режиме. Здесь следует отметить, что заботу нужно проявлять о тех деталях, для которых планируется расчет. Анализ в COSMOSWorks на базе нагрузок движения выполняется индивидуально для каждой детали, т. е. сборка в целом не рассматривается и, следовательно, нет необходимости в полноте исходных данных.

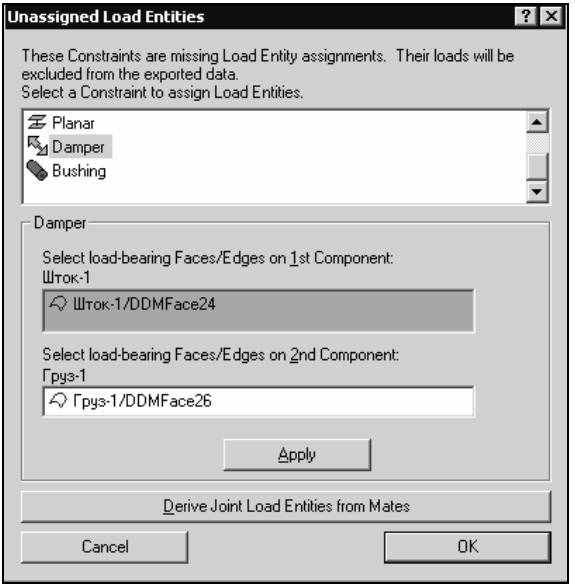


Рис. 7.8. Сообщение об ограничениях, порождающих нагрузки, для которых не назначены воспринимающие их объекты

После того как определены несущие объекты, или принято решение о том, что можно ограничиться неполными данными, возникает окно **FEA** (МКЭ) (рис. 7.9), в котором нужно определить следующие параметры:

- каталог, в который будет записан текстовый файл с информацией о нагрузках;
- **FEA System** (Программа МКЭ) — тип конечно-элементной программы, в формате которой будут готовиться данные;
- группа параметров **Frame** (Кадр), где нужно выбрать интервал кадров, для которого экспортируются результаты;
- **Save Current Frame** (Сохранить текущий кадр) — кнопка, при нажатии которой записывается информация о текущем активном кадре;
- **Save Frame Range** (Сохранить диапазон кадров) — кнопка, при нажатии которой записывается информация, содержащая сведения о диапазоне кадров.

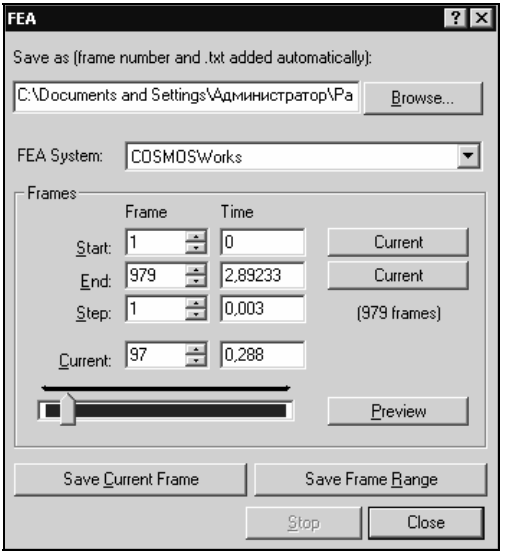


Рис. 7.9. Назначение кадров для экспорта

Импорт данных в COSMOSWorks производится по команде **Import Motion Loads** (Импортировать нагрузки движения), после чего программа запросит файл, в который были записаны результаты динамического анализа. Когда пользователь укажет этот файл, возникнет одноименное окно; в нем будут перечислены компоненты усилий, которые программа предлагает учесть. После того как из их числа будут выбраны необходимые компоненты (надо сказать, что идентифицировать их средствами программы достаточно трудно), они будут записаны в файлы деталей, где автоматически создадутся соответствующие **Study** (Упражнения). Из этого следует важное наблюдение. Статический расчет на базе результатов динамического анализа программа выпол-

няет исключительно на уровне отдельной детали. Это порождает большое количество условностей и допущений, которые могут радикально изменить расчетную модель. Подробности, в которых описаны методические аспекты взаимодействия COSMOSWorks и COSMOSMotion, приведены в [1]. Один из выводов, сделанных по результатам практических расчетов, следующий: при анализе сборок наиболее достоверные результаты получаются при расчете полноценной модели узла, включающей все необходимые детали. Граничные же условия следует переносить в модель сборки COSMOSWorks, не пользуясь описанным интерфейсом или же тщательно проверяя его действия.

И последнее. В версиях программ семейства COSMOS 2005 года предусмотрена возможность переноса нагрузок движения в конечно-элементное приложение, не прибегая к использованию промежуточного текстового файла. Для этого нужно после расчета в COSMOSMotion сохранить файл со сборкой, активизировать COSMOSWorks и воспользоваться командой импорта нагрузок движения.

7.5. Моделирование кулачкового механизма

В данном разделе описано построение механизма на базе торцового кулачка. Объект оформлен в виде сборки SolidWorks (см. рис. 6.45). Она такова, что средствами этой программы невозможно исчерпывающе описать кинематику конструкции. Это обусловлено двумя причинами. Первая — неоднозначность определения площадки контакта между роликом и рабочей поверхностью кулачка. Эта поверхность состоит из двух граней. В какой-то степени (на уровне визуальных эффектов) помочь может использование команды **Переместить компонент** с активной опцией **Физическая динамика**. Вторая причина связана с необходимостью имитировать качение ролика. Здесь, если ограничиться дискретным перемещением объектов, применим аппарат уравнений SolidWorks, однако получить достоверную визуализацию работы механизма невозможно. Не слишком полезен будет и такой инструмент, как SolidWorks Animator. В его основе лежит интерполяция конфигураций сцены на базе некоторого числа опорных положений. При этом никаких инструментов для воздействия на ситуацию между этими положениями нет. Естественно, что ни один из перечисленных алгоритмов не способен даже приблизиться к оценке динамики конструкции.

7.5.1. Постановка задачи

Пространственная модель механизма содержит совокупность взаимосвязей, определяющих взаимное положение компонентов и их взаимодействие при перемещении. Зафиксировано положение поводка (взаимосвязь параллельно-

сти между его боковой гранью и одной из вертикальных плоскостей), ролика — касательность между его цилиндрической поверхностью и плоской частью кулачка, а также взаимное положение груза и штока (взаимосвязь расстояния между горизонтальными гранями деталей). Непротиворечивое сосуществование в модели SolidWorks последовательного касания роликом плоской и синусоидальной рабочих граней невозможно. Мы не вводили фиксацию угла поворота кулачка относительно оси, а также самой оси относительно отверстия в поводке.

Нас не будут интересовать проблемы, связанные с энергетикой системы: анализ потребляемой мощности, потерь энергии и т. д. Более того, ограничимся вращением поводка с постоянной угловой скоростью и сосредоточимся на рассмотрении закономерностей, связывающих жесткость пружины, которая удерживает груз в процессе скольжения по штоку, и демпфера, связывающего эти два объекта в вертикальном направлении. По сути, это — с поправкой на невозможность деформирования деталей — имитация работы подвески одноколесного транспортного средства при наезде его на неровность. Если масса конструкции значительна, а препятствие не слишком велико, то изменения скорости движения при преодолении препятствия не происходит.

С учетом сказанного необходимо построить динамическую модель механизма, в котором кулачок неподвижен, поводок вращается с постоянной угловой скоростью, а шток имеет возможность вертикального перемещения относительно поводка. Ось помещена в шток, причем (в геометрической модели) может свободно вращаться в отверстии штока. При этом торец оси совпадает с плоской гранью штока. Ролик свободно вращается относительно оси, оставаясь связанным со штоком в поперечном направлении. Груз и шток связаны в вертикальном направлении пружиной растяжения-сжатия и линейным демпфером. На базе динамической модели нужно для любого момента времени получить величину контактной силы в кинематической паре "кулачок-ролик", эпюры усилий в пружине и демпфере, ускорения груза, осадку пружины, другую информацию, описывающую кинематические и силовые эффекты в зависимости от времени.

7.5.2. Анализ

С точки зрения исследования динамики, данный механизм является вполне традиционным. Более того, в рамках поставленной задачи — вращение с постоянной угловой скоростью при игнорировании трения, пренебрежение (до определенной степени) податливостью элементов системы — использовать COSMOSMotion для расчета кинематики, в общем, и необязательно. Применяя программы типа MATLAB/Simulink, можно получить результаты не менее точные и не менее наглядные. Кроме того, эти программы более пригод-

ны для оптимального подбора динамических характеристик — т. е. собственно проектирования динамических систем. Однако избегая избыточности используемых инструментов, попытаемся использовать COSMOSMotion не только как инструмент имитации, но и как средство прогнозирования.

Для тех, кто еще не обратил на это внимание, укажем еще один момент: поставленная задача с успехом решается на линейном кулачке. Причем этот подход предпочтительнее с точки зрения вычислительной трудоемкости, ведь имитация вращения и возвратно-поступательного движения, сопровождаемая наличием контактных пар, усложняет работу программы. Если бы кулачок остался линейным, можно было бы обойтись тремя деталями: собственно кулачком, роликом и грузом. Наличие/отсутствие трения при качении ролика по рабочей поверхности кулачка никак не влияет (при определенных условиях) на то, как проявляются динамические характеристики пары "пружина — амортизатор", поэтому цилиндрические шарниры можно было бы исключить из конструкции, а ролик из вращающегося превратить в скользящий. Сделав его скользящим, можно было бы упростить модель контактной пары, ограничившись контактом двух кривых вместо трехмерного взаимодействия. Мы же пошли на усложнение системы для того, чтобы (с разумными допущениями) продемонстрировать работу программы на модели, близкой к "инженерной".

В ходе расчета не будем забывать о том, что геометрическая модель содержала некоторые неопределенности: не удалось однозначно описать взаимосвязи, определяющие взаимодействие ролика с кулачком; ось имеет возможность вращаться как относительно ролика, так и штока. Это весьма нежелательно с точки зрения работы программы. Кроме того, мы не касались вопроса о том, как моделировать пружину и демпфер. Ни тот ни другой объект в геометрической модели не фигурируют.

7.5.3. Решение

Имея дело с интегрированным приложением SolidWorks, активизируем его в окне **Добавления** (рис. 7.10). После нажатия кнопки **OK** программа проверяет наличие лицензии (она, как правило, располагается в виде строки в файле лицензии COSMOSWorks) и при благоприятном исходе появляется другое окно COSMOSMotion — **Add New Parts** (Добавить новые детали), показанное на рис. 7.11. В нем нужно согласиться с предложением программы распределить все детали сборки между двумя множествами: одно объединяет объекты подвижные (**Moving**), второе — зафиксированные (**Ground**), или отказаться от него. Развивая мысль, отметим, что переход объекта в ходе работы программы из одной категории в другую невозможен. Поэтому если деталь совершает прерывистое движение, то ее следует квалифицировать как **Moving**.

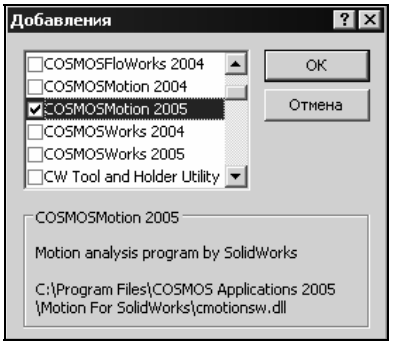


Рис. 7.10. Активизация COSMOSMotion



Рис. 7.11. Предложение автоматически разделить детали на неподвижные и движущиеся

На данном шаге влиять на решение, принимаемое программой, невозможно. Если деталь зафиксирована в сборке, то программа идентифицирует ее как неподвижную. Даже если совокупность сопряжений с другими деталями, в частности с фиксированными, приводит к неподвижности детали, эта деталь все равно будет помещена в категорию подвижных. При этом будет создано ограничение **Fixed** (Зафиксированный).

Результат интерпретации, которую проделал COSMOSMotion, показан на рис. 7.12. Браузер COSMOSMotion в развернутом виде находится в окне справа. Система установила наличие шести деталей, из которых одну (Кулачок гладкий) она квалифицировала как неподвижную, поместив ее в группу **Ground Parts** (Неподвижные детали), а остальные — при соответствующих условиях — могут перемещаться. Это категория **Moving Parts** (Подвижные детали). И те и другие объединены в ветвь дерева **Parts** (Детали). Тире и номер после названия детали подразумевают наличие в сборке нескольких одинаковых деталей (конкретно, соответствующих одному и тому же файлу детали). Поскольку у нас каждая деталь присутствует в единичном экземпляре, то в тексте будет дано только ее название. Так как в системе нет узлов (подсборок), то ветвь **Assembly Components** (Компоненты сборок) листьев не имеет.

"Нематериальные" объекты системы разместились в ветвях **Constraints** (Связи), **Forces** (Силы) и **Results** (Результаты). Листья, по понятным причинам (усилия — ни в каком их виде — в SolidWorks приложить невозможно, а результатам взяться неоткуда), выросли только на первой ветви. Раскрыв дочернюю ветвь **Joints** (Соединения) ветви **Constraints**, увидим множество листьев — соединений, которые диагностировала программа (рис. 7.13 слева, 7.14). Все их нужно досконально проверить на предмет соответствия потребностям пользователя. Щелкнув по первой из пиктограмм (**Fixed**) в ветви **Joints**, получаем информацию о том, что "придумал" компьютер. Выясняется,

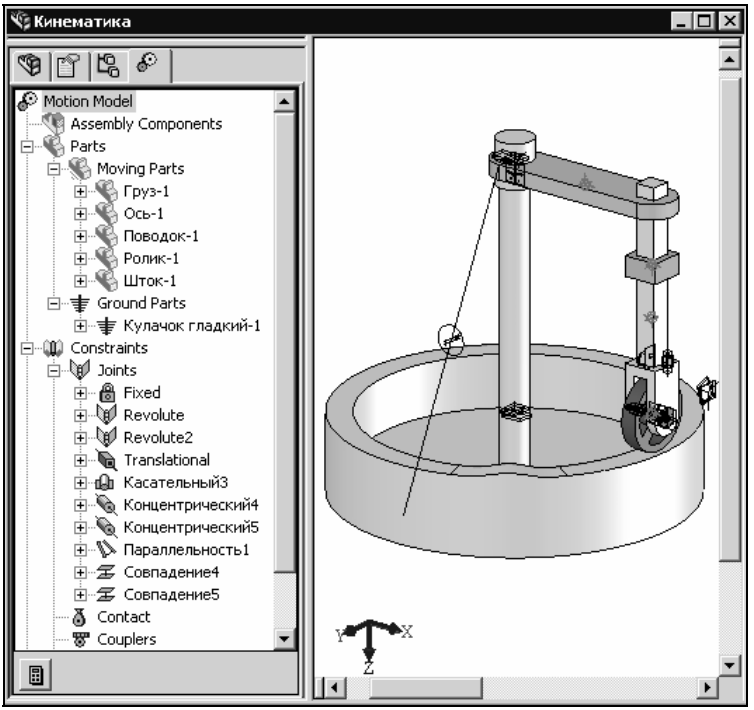


Рис. 7.12. Результат интерпретации исходной модели

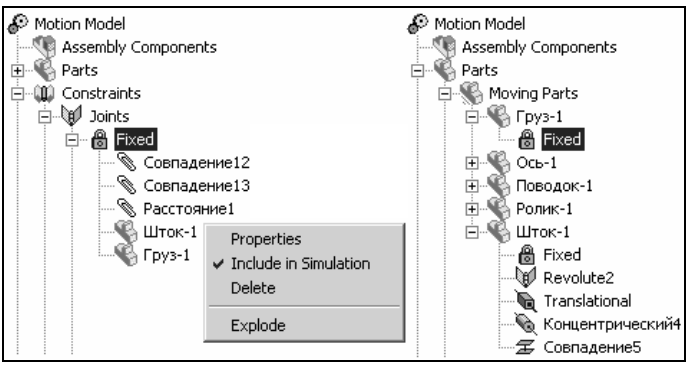


Рис. 7.13. Программная интерпретация сопряжений между штоком и грузом

что он создал кинематическую пару типа **Fixed** (Совместное перемещение) для деталей шток и груз. Именно так были интерпретированы сопряжения, описывающие совпадение двух пар вертикальных ортогональных граней и заданное расстояние между горизонтальными гранями. Алгоритмически это совершенно корректно, но нас это не устраивает. Если щелкнуть по пикто-

граммам **Груз** и **Шток** в ветви **Moving Parts**, то обнаружим, что рассматриваемая кинематическая пара оставила свой след и здесь (рис. 7.13, справа).

Поскольку эта контактная пара в контексте задачи нефункциональна, решаем, что с ней делать. В меню пиктограммы есть четыре команды:

- **Properties** (Свойства);
- **Include in Simulation** (Включить в симуляцию);
- **Delete** (Удалить);
- **Explode** (Расчленить).

Первая скрывает совокупность окон, содержащих параметры, описывающие соединение. В нашей ситуации они не предоставляют возможности получить требуемый результат. Команда **Explode** более полезна. Она расчленяет соединение на три (в данном случае) компонента. Первые два — контактные пары **Совпадение**, третий — пара **Расстояние**. Последняя пара избыточна, поэтому применяем к ней команду **Delete** или (если ее оставить про запас) **Include in Simulation**, снимая соответствующий флажок; тогда ей будет присвоен атрибут **Suppressed** (Погашен), и в расчете она участвовать не будет.

В числе неудачных (с нашей точки зрения) действий программы было создание соединения Касательный между кулачком и роликом и Параллельность — между поводком и одной из вертикальных плоскостей кулачка (рис. 7.14). Понятно, почему избыточно второе соединение, — оно препятствует вращению деталей вокруг оси кулачка. Касательность же имеет локальное действие, связывая ролик с плоской частью рабочей поверхности кулачка. Если его оставить, то в ходе расчета ролик будет катиться (или скользить) сначала по кулачку, а затем проникнет в него (плоскости граней для программы бесконечны). Модифицировать это сопряжение невозможно, поэтому его, а также соединение Параллельность, подавляем.

Когда подготавливалась геометрическая модель, мы стремились в первую очередь реализовать кинематическую схему механизма. Поэтому массовые характеристики деталей могут отличаться от реальных. Не желая изменять геометрическую модель, поступаем следующим образом. Из контекстного меню пиктограммы **Груз** подаем команду **Properties** (Свойства) (рис. 7.15), после чего в окне **Edit Part** (Редактировать деталь) на вкладке **Mass** (Масса) в группе параметров **Mass properties** (Массовые характеристики) выбираем в качестве источника информации параметры пользователя (переключатель **Custom**) и в поле **Mass** назначаем необходимую величину (рис. 7.16).

Значимой функциональностью обладает вкладка **IC's** (Initial Conditions — Начальные условия), содержащая шесть полей — компоненты линейной и угловой скорости (рис. 7.17). Мы не будем менять исходные значения — нули, поскольку, как договаривались, вращение должно происходить с посто-

янной угловой скоростью. Если же назначить начальную скорость, то в отсутствие внешнего привода, даже без трения, при взаимодействии с неровностью скорость будет изменяться.

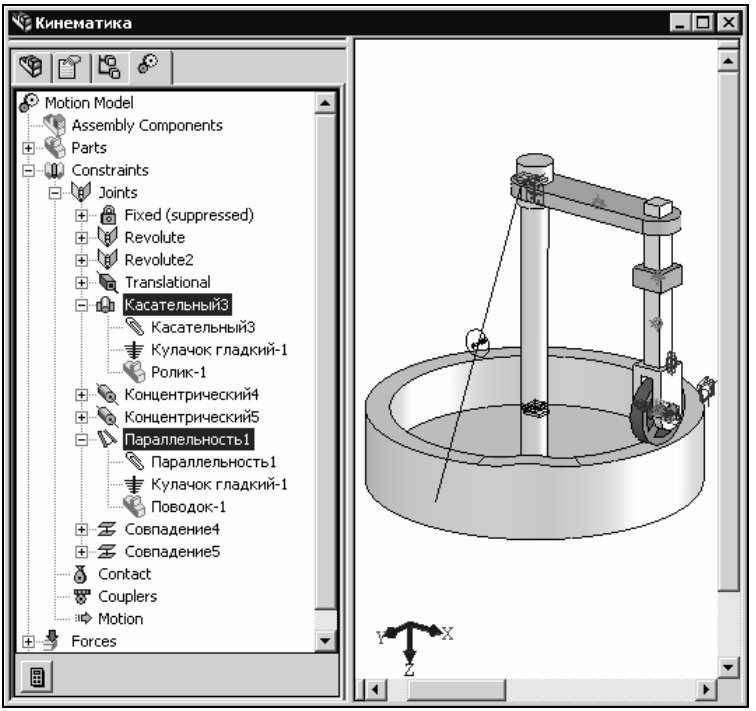


Рис. 7.14. Избыточные соединения

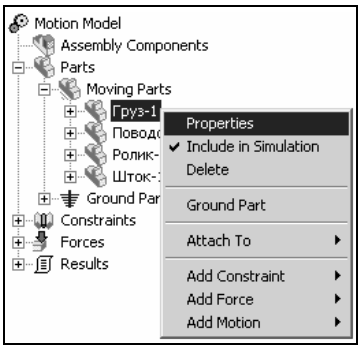


Рис. 7.15. Вызов окна для назначения массы детали

Ту же операцию выполняем для штока, назначая ему массу 10 кг. А ролик и ось в целях облегчения анализа и последующей модификации системы будем

считать невесомыми. Для этого присваиваем деталям массу 0,001 кг (ноль присвоить нельзя). Здесь учитывается, что если привод обеспечивает постоянную скорость вращения поводка, то фактическое отсутствие инерционных характеристик у деталей ось и ролик не влияет на динамические параметры данной системы.

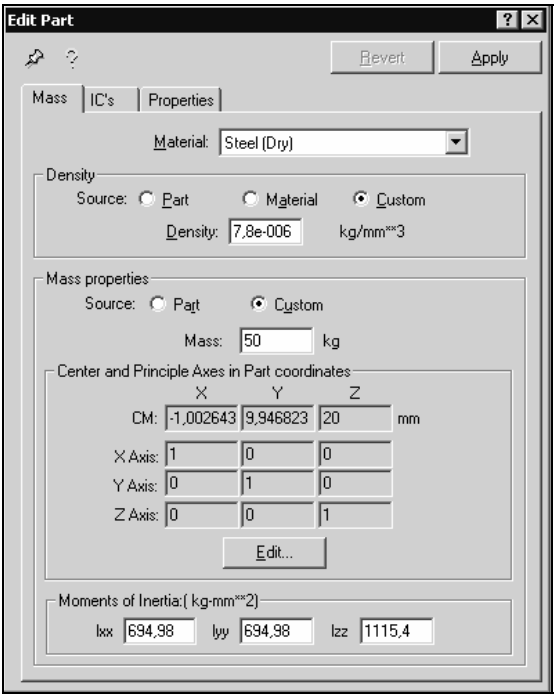


Рис. 7.16. Назначение массы детали в отрыве от фактических характеристик

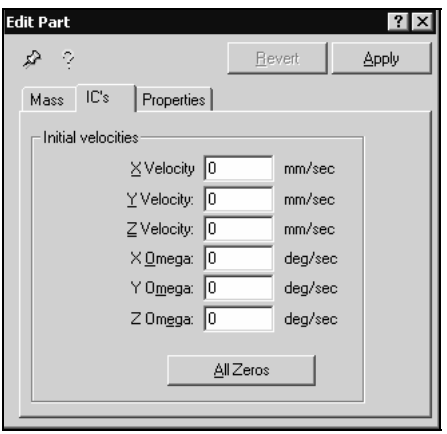


Рис. 7.17. Вкладка для назначения исходных скоростей

В геометрической модели ось могла вращаться относительно ролика. Разрешим эту неопределенность, связав ось со штоком в единый (с точки зрения расчета) объект. Для этого используем команду **Attach to** (Прикрепить к). Последовательность подачи команд очевидна из рис. 7.18. После выполнения этой команды пиктограмма **Ролик**, обозначающая самостоятельную деталь, исчезает из группы **Moving Parts**, помещаясь "за" пиктограмму, обозначающую шток (рис. 7.19).

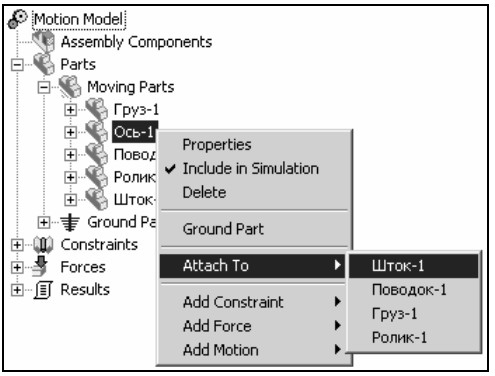


Рис. 7.18. Прикрепление ролика к штоку

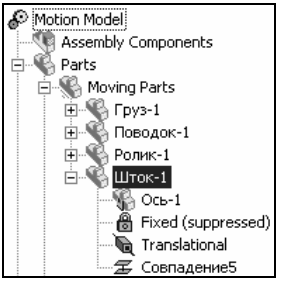


Рис. 7.19. Отображение операции прикрепления оси к штоку

Ранее была проделана операция по расчленению связи между штоком и грузом на три составляющих: два совпадения граней с возможностью взаимного смещения параллельно их плоскости и фиксированного расстояния в вертикальном направлении (с последующим погашением последней из связей). Можно было бы просто удалить это соединение, а затем создать два новых, каждое из которых скрепляло бы вертикальные грани попарно. Последовательность операций показана на рис. 7.20 и 7.21. Для заполнения окна **Insert User-Defined Joint** достаточно было бы указать две детали, причем первую, например, шток щелкнуть по грани, которая участвует в сопряжении (хотя можно указать и любую другую плоскую грань, параллельную сопрягаемой).

В результате предыдущих манипуляций какая-либо связь между кулачком и роликом была потеряна. Восстанавливаем ее, но так, что бы ролик мог — в зависимости от ситуации — касаться кулачка или же выходить из контакта. Для имитации такого рода связей, на первый взгляд, подошло бы одно из трех типов соединения:

- **Point/Curve Contact** (Контакт по точке/кривой) — следование точки по траектории;
- **Curve/Curve Contact** (Контакт кривой по кривой) — касание двух кривых;
- **3D Contact** (3D-контакт) — контакт двух произвольных поверхностей.

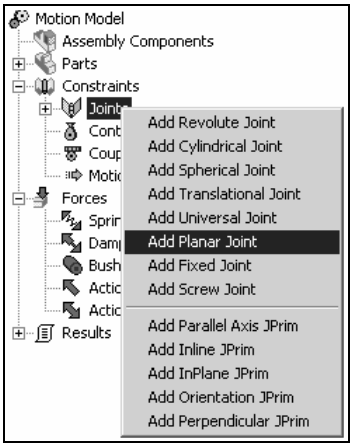


Рис. 7.20. Назначение соединения Параллельность

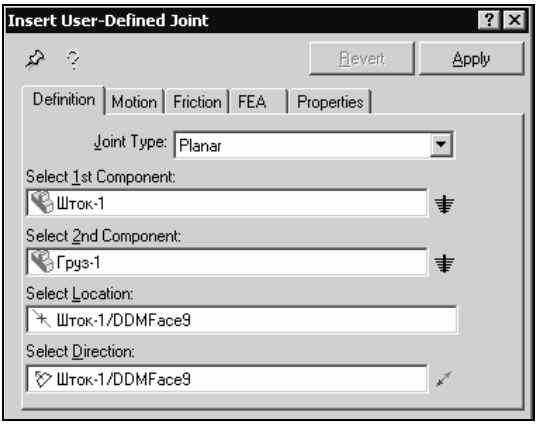


Рис. 7.21. Параметры соединения Параллельность

Ни первый, ни второй вариант в нашей ситуации не пригодны, прежде всего, потому, что не позволяют объектам выходить из контакта. Если бы ролик не вращался и имел угол как объект для соприкосновения, то можно было бы с определенными условностями опробовать вариант **Point/Curve**. **Curve/Curve** же однозначно неприменим: на кулачке и ролике невозможно получить кривые, лежащие в одной и той же плоскости. В связи с этим напомним о сделанном ранее замечании, что задачу принципиально можно свести к случаю линейного кулачка, для которого эти варианты (они легче с точки зрения объема вычислений) более применимы.

Воспользуемся универсальным и наиболее функциональным случаем произвольного контакта, подав соответствующую команду (рис. 7.22). После подачи команды появляется панель, на вкладке **Definition** (Определение) которой нужно заполнить поле **Select Parts that can contact each other** (Выберите детали, которые будут контактировать между собой). Указываем на **Ролик** и **Кулачок** (рис. 7.23). Здесь нужно обратить внимание, что программа не предлагает назначить конкретные объекты (грани или кромки) деталей для контакта. То есть она анализирует взаимное положение деталей относительно друг друга "в целом".

Переходим на вкладку **Contact** (рис. 7.24). Она состоит из двух частей: первая определяет податливость объектов в ходе контакта, вторая — характеристики трения. Характеризуя податливость, можно выбрать пару материалов (это работает, если активна опция **Use Materials**), ввести свои собственные характеристики (флажок снят) или назначить параметр **Coefficient of Restriction** (Коэффициент восстановления формы). Здесь, в первом приближении, суждения такие. Подмножество команд ADAMS, включенное в COSMOSWorks,

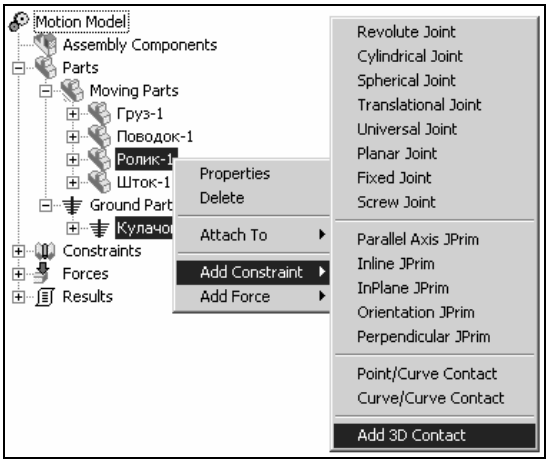


Рис. 7.22. Назначение 3D-контакта

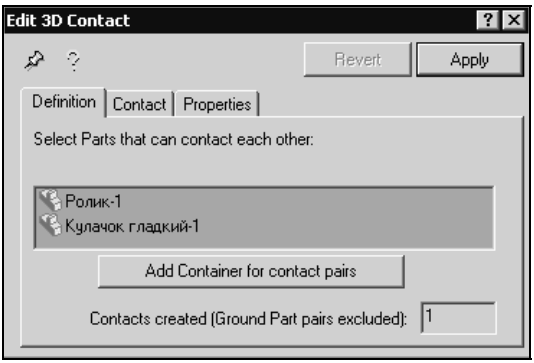


Рис. 7.23. Выбор объектов для 3D-контакта

податливость деталей, если иметь в виду реальную конструкцию, не учитывает. Описанные параметры (в полном соответствии с термином **Materials**) характеризуют абстрактные объекты, изготовленные из неких идеальных материалов и имеющие каноническую форму (сфера + сфера или цилиндр + цилиндр). Податливость же, например, ролика может быть обусловлена "в большей" степени его деформациями как детали, а не деформацией локальной зоны в месте соприкосновения с ответной деталью (например, если ролик имеет тонкий обод на спицах). Если относиться к вопросу серьезно, то рекомендуется исследовать податливость конкретной пары посредством, например, COSMOSWorks, после чего нужно интерпретировать результаты так, чтобы заполнить поля **Stiffness** (Жесткость) и **Exponent** (Экспонента), характеризующие упругое взаимодействие деталей. Что касается полей **Max. Damping** (Максимальное демпфирование) и **Penetration** (Проникновение), то

для прогноза величин, которыми нужно заполнить эти поля, нужен неупругий анализ. Минимизируя эффекты, связанные с податливостью деталей, в качестве материалов для них назначаем **Steel Dry** (Сухая сталь). Руководство пользователя сообщает, что контактное демпфирование описывается как кубическая функция проникновения.

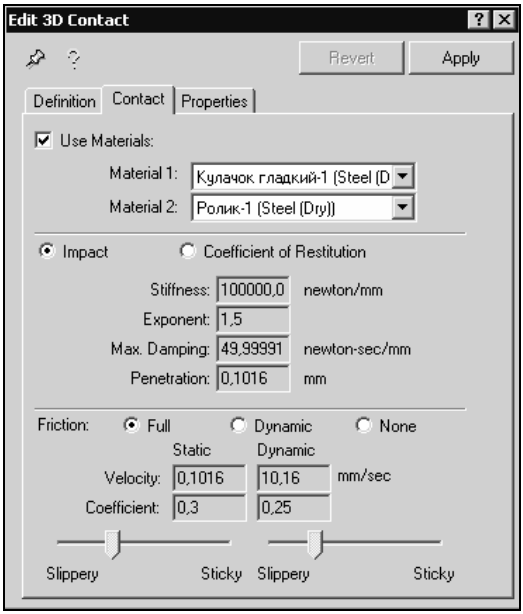


Рис. 7.24. Параметры материалов контактной пары

Параметры, характеризующие трение (статическое и динамическое), также могут быть привязаны к материалам или назначаются независимо от них. В нашей задаче трение, в общем, не играет никакой роли, однако поскольку предполагается качение колеса, то какая-то величина присутствовать должна. Поэтому оставляем значения, предлагаемые системой для данных материалов.

В COSMOSMotion 2005 декларировано автоматическое распознавание сопряжений SolidWorks в виде касательности поверхностей. Для нашего случая это не вполне актуально, поскольку профилированная поверхность кулачка состоит из двух граней, а сосуществование сопряжений для одной поверхности с двумя и более несовпадающими поверхностями невозможно.

Основным упругим элементом в системе будет пружина. Вообще говоря, на этапе проектирования выгодно "сконцентрировать" упругость в единственном объекте. Также, если конечно это не изменяет систему принципиально, следует поступить и с амортизаторами. В данном случае малая (на первый

взгляд) по величине податливость и значительное демпфирование остаются в контактной паре "ролик-кулачок". В отсутствие пружины и демпфера они, как представляются, играют стабилизирующую вычислительный процесс роль (при отрыве ролика и последующем падении в отсутствии податливости возникает теоретически бесконечная сила, нормальная поверхности, а при отсутствии демпфирования — ролик и связанные с ним детали могут прыгать бесконечно). Еще один тип объектов в COSMOSMotion, обладающий податливостью и/или демпфирующими свойствами (причем такие качества они могут проявлять как при линейном взаимодействии, так и при повороте), — это **Bushings** (Втулки или Вкладыши). Эти виртуальные детали можно разместить как бы между гранями двух деталей без изменения геометрии последних.

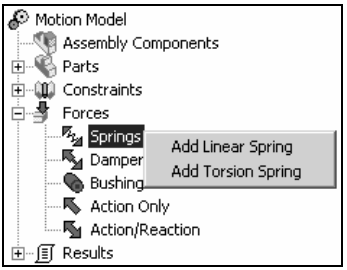


Рис. 7.25. Вставка виртуальной пружины

Пружину создаем, подав команду **Add Linear Spring** (Вставить линейную пружину) из контекстного меню пиктограммы **Springs** (Пружины), расположенной в ветви **Forces** (Силы) (рис. 7.25). После вызова команды появляется окно **Edit Spring** (Редактировать пружину). Характеристики пружины, касающиеся динамического анализа, сосредоточены на вкладке **Definition** (Определение) (рис. 7.26).

- **Force Type** (Тип силы) — оставляем линейную (**Linear**) пружину;
- **Select 1st Component** (Выберите 1-й компонент) — поле заполняется щелчком по штоку;
- **Select 2nd Component** (Выберите 2-й компонент) — поле заполняется щелчком по грузу;
- **Select Point on 1st Component** (Выберите точку на 1-м компоненте) — назначается точка, находящаяся на одном из концов пружины, взаимодействующем с первым из выбранных компонентов. Если при активизации компонента щелчок произвели по его кромке или вершине, то они попадут в данное поле. Чтобы изменить положение конца пружины, нужно сначала очистить поле (для этого используется клавиша <Delete>), а затем щелкнуть по подходящему объекту. Так как груз будет скользить по штоку без

трения, то можно указать любую пару точек, расположенную на прямой, параллельной направлению скольжения;

- **Select Point on 1st Component** (Выберите точку на 1-м компоненте) — назначается точка, находящаяся на конце, взаимодействующем со вторым компонентом;

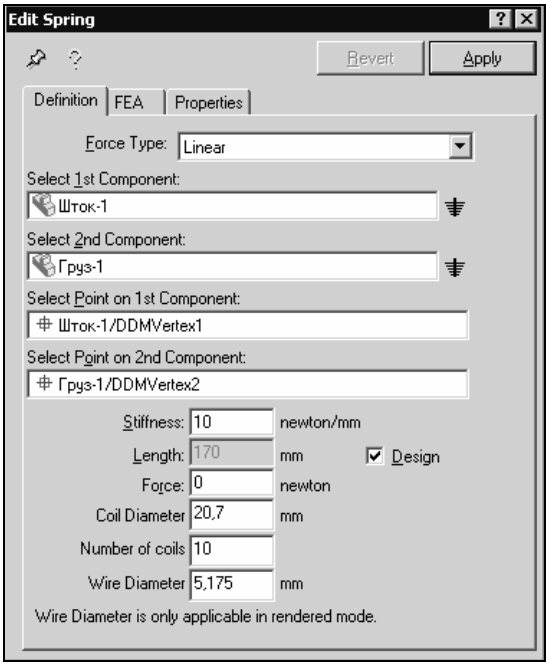


Рис. 7.26. Параметры пружины

- **Design** (Из проекта) — если флажок присутствует, то длина пружины берется из сборки как расстояние между объектами, к которым привязаны концы пружины. Предполагая, что сборка соответствует конструкции в отсутствие каких-либо нагрузок (в том числе гравитационных), флажок оставляем;
- **Stiffness** (Жесткость) — жесткость пружины;
- **Length** (Длина) — длина пружины. Поле доступно для ввода значений, если опция **Design** неактивна;
- **Force** (Сила) — предварительный натяг пружины;
- **Coil Diameter** (Диаметр пружины) — этот и последующие параметры определяют вид пружины на экране. Никакого участия в расчете эти величины не принимают;

- **Number of coils** (Число витков) — число витков отображаемой пружины;
- **Wire Diameter** (Диаметр проволоки) — диаметр прутка, из которого изготовлена отображаемая пружина.

Линейный амортизатор вставляем по аналогии с пружиной (рис. 7.27 и 7.28). В окне **Damper** *(Демпфер)* помимо полей, определяющих детали, которые он соединяет, и точки приложения силы сопротивления, присутствует единственное поле **Damper** для назначения *коэффициента вязкого демпфирования*.

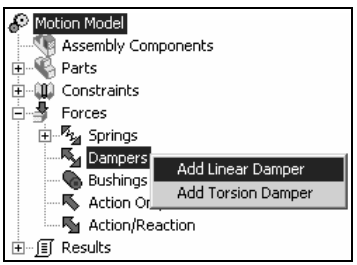


Рис. 7.27. Вставка виртуального амортизатора

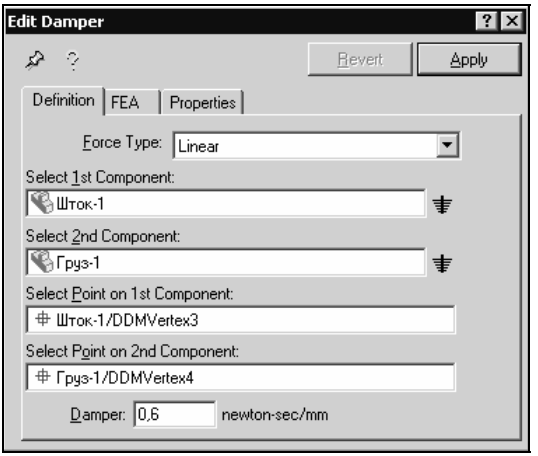


Рис. 7.28. Параметры амортизатора

Придаем элементам системы вращательное движение относительно вертикальной оси. В нашем случае для этого можно взять, в принципе, любую деталь (те силовые факторы, которые зависят от того, как создается усилие поворота, анализироваться не будут), кроме, разумеется, неподвижного кулачка. Наиболее естественно, однако, воздействовать на поводок. Для этого можно, как показано на рис. 7.29, вызвать контекстное меню пиктограммы той детали, к которой будет прикладываться движение. Можно вызвать контекстное меню пиктограммы **Motion** ветви **Constraints** или воспользоваться падающим меню.

Последующие действия вполне в духе этой программы. Щелкая по граням деталей, нужно на вкладке **Definition** (Определение) окна **Edit Motion** (Редактировать движение) заполнить имеющиеся в ней поля (рис. 7.30):

- **Select 1st Component** (Выберите 1-й компонент) — это подвижная деталь;
- **Select 2nd Component** (Выберите 2-й компонент) — это деталь, относительно которой осуществляется движение (помимо щелчка по кулачку,

можно было бы нажать на кнопку с изображением заземления — будет вызван неподвижный кулачок);

- **Select Location** (Выберите место приложения) — место, где будет показана пиктограмма движения;
- **Select Z Axis** (Выберите ось Z) — объект, определяющий ориентацию оси вращения. Это может быть грань — система использует ее нормаль — или кромка. Мы выбрали круглый торец оси кулачка;
- **Select X Axis** (Выберите ось X) — объект, определяющий ось X системы координат, относительно которой производится вращение. В данной ситуации сгодилась и цилиндрическая грань.

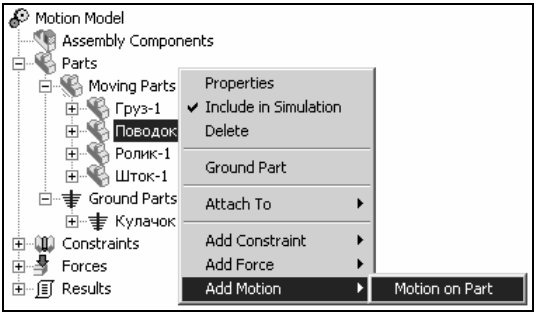


Рис. 7.29. Придание движения поводку

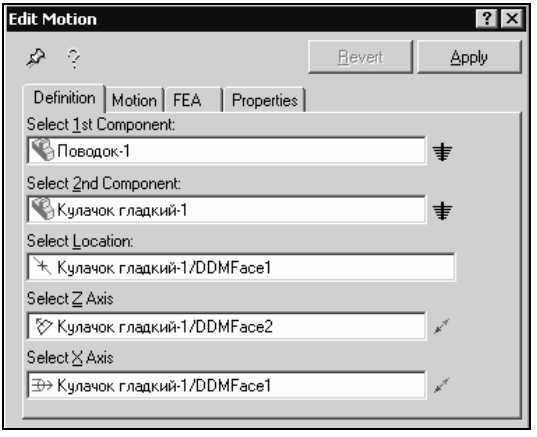


Рис. 7.30. Объекты, определяющие движение

Определяем характеристики движения. Нас не интересуют динамические свойства, проявляемые системой при повороте (зависимость ускорения от крутящего момента или силы и, наоборот, силовых факторов от необходимо-

го ускорения или скорости). Поэтому прикладываем угловую скорость, равномерно увеличивающуюся за некоторое время. Для этого на вкладке **Motion** (Движение) назначаем следующие значения полей, как показано на рис. 7.31:

- **Motion On** (Направление) — направление движения. В данном случае выбираем вращение относительно оси Z;
- **Motion Type** (Вид движения) — тип движения. Выбираем **Velocity** (Скорость). Поскольку выше назначено движение вокруг некоторой оси, то это будет угловая скорость;
- **Initial Displacement** (Начальное перемещение) — исходное состояние механизма нас вполне устраивает, поэтому оставляем ноль;
- **Initial Velocity** (Начальная скорость) — поскольку в качестве вида движения выбрана скорость, а не ускорение, то это поле недоступно;

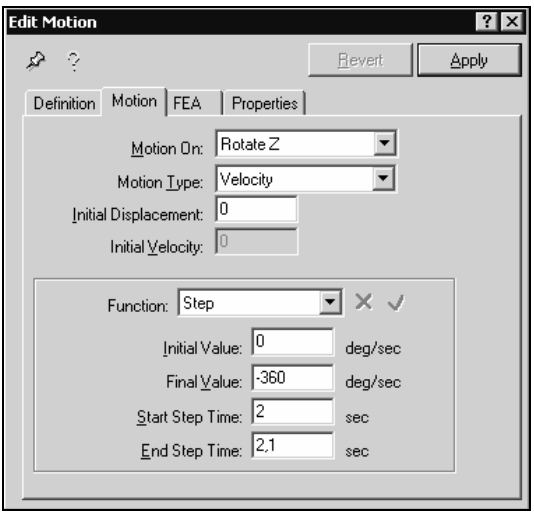


Рис. 7.31. Параметры шага движения

- **Function** (Функция) — тип зависимости скорости от времени или другого параметра. В рамках принятых ранее установок нам подошли бы два варианта: **Constant** (Постоянный) и **Step** (Ступенчатый).

  На данном этапе нужно задуматься о том, как будет происходить движение механизма. В нем присутствует груз, который подвешен на пружине. В начальный момент пружина находится в ненапряженном состоянии, следовательно, после начала расчета произойдет движение груза вниз и возникнет колебательный процесс, который будет через какое-то время остановлен амортизатором. Разнесем по времени два явления: первое —

переход механизма в равновесное состояние со сжатой пружиной. Второе — движение с преодолением препятствия и также (если получится) переход в равновесное состояние. Для этого сначала "освобождаем" механизм и даем поводку постоять на месте достаточное (величина назначается пользователем) время, а затем "начинаем" прикладывать скорость. Поскольку понятие "освободить" в программе никак не формализуется, то просто начнем расчет, и только через некоторое время приложим скорость. Исходя из этих соображений, заполняем оставшиеся поля:

- **Initial Displacement** (Начальное перемещение);
- **Initial Velocity** (Начальная скорость);
- **Function** (Функция) — тип функции, описывающей зависимость скорости (в данном случае) от времени;
- **Initial Value** (Начальное значение) — величина функции в начальный момент времени;
- **Final Value** (Конечное значение) — величина функции в конечный момент времени;
- **Start Step Time** (Время начала шага) — начальный момент времени для данного шага;
- **End Step Time** (Время окончания шага) — конечный момент времени для данного шага.

В зависимости от типа движения и типа функции содержимое вкладки может изменяться. Назначенная продолжительность шага составляет 0,1 с. За это время вращающиеся части разгонятся от неподвижного состояния до скорости 1 об/с.

Модель полностью определена. В браузере отображаются все объекты, связи между ними, назначенные движения и силы. В окне с моделью (рис. 7.32) также показаны пиктограммы, символизирующие соединения, силы и движения. Кроме того, наглядно отображена пружина.

Определяем параметры вычислительного процесса, другие настройки программы, которые не привязаны к конкретной модели. Они сосредоточены в окне COSMOSMotion **Options**, которое активизируется из контекстного меню пиктограммы **Motion Model** (Модель движения) в браузере или из падающего меню. Рассмотрим параметры, влияющие на результат. Первая вкладка — **World** (Окружение) (рис. 7.33).

- Группа **Simulation Units** (Единицы для симуляции), содержит поля:
  - **Force** (Сила) — единицы для силы;
  - **Time** (Время) — единицы для времени.

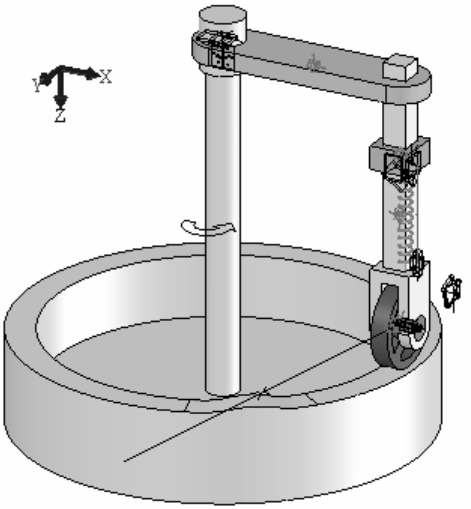


Рис. 7.32. Модель с отображением исходных данных

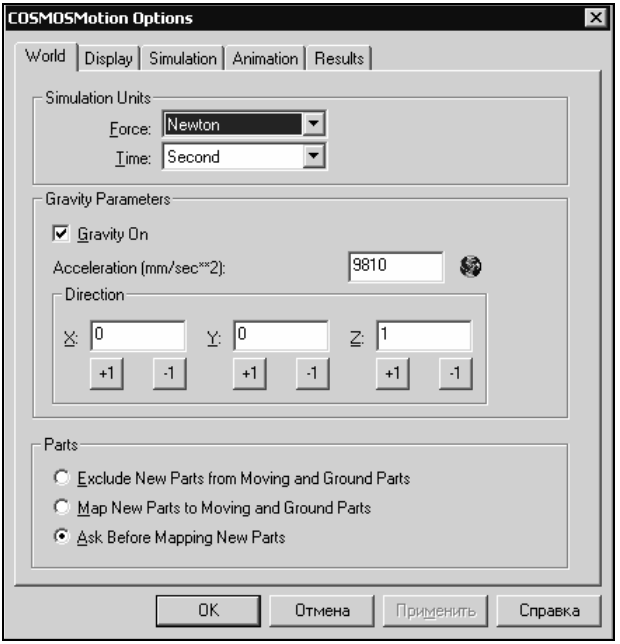


Рис. 7.33. Вкладка **World**

- Группа **Gravity Parameters** (Параметры гравитации) включает параметры:
  - **Gravity On** (Гравитация действует) — параметр, определяющий необходимость учета гравитации;

- **Acceleration** (Ускорение) — величина ускорения, действующего на систему в целом;
- **X**, **Y**, **Z** — поля, содержащие компоненты вектора, определяющего направление гравитационного ускорения. Нажимая кнопки **+1**, **-1**, можно вставлять в соответствующие поля единичные значения.

❒ Свойство **Parts** может принять одно из трех значений:

- **Exclude New Parts from Moving and Ground Parts** (Исключить новые детали из числа подвижных или неподвижных деталей);
- **Map New Parts to Moving and Ground Parts** (Включать новые детали в число подвижных или неподвижных деталей);
- **Ask Before Mapping New Parts** (Запрашивать перед размещением новых деталей).

Следующая вкладка — **Display** (Отображение) влияет исключительно на параметры визуализации, и мы ее рассматривать не будем.

Третья вкладка — **Simulation** (Симуляция) (рис. 7.34) предназначена для настройки вычислительного процесса.

❒ Группа **Simulation parameters** (Параметры симуляции) содержит параметры, характеризующие расчетную модель, но не связанные с ее объектами:

- выпадающий список, определяющий, как назначается временной интервал. Можно выбрать **Duration** (Продолжительность) или **Time Increment** (Шаг приращения). Слева находится поле, в которое нужно ввести необходимое значение;
- **Number of Frames** (Число кадров) — число кадров, для которых запоминаются результаты. На точность расчета этот параметр не влияет. От него зависит, в скольких точках по ходу маршрута запоминаются результаты. Если процесс развивается "рывками", т. е. в нем наличествуют малые интервалы времени, когда происходят относительно большие изменения. Например, если на гладком пути длиной 1 м существует неровность длиной 1 мм, т. е. вероятность, что, будучи правильно обработаны решателем, события, происходящие при взаимодействии с этим объектом, не будут запомнены. Отображены они, соответственно, также будут неправильно. Визуально это проявляется в том, что на графиках существуют разрывы (в решении, понятное дело, разрывов быть не может). В нашей задаче факторы, стимулирующие увеличение данного параметра, — предположение о том, что ролик может отрываться от кулачка, а также некоторая неопределенность в том, что будет происходить в момент перехода ролика с плоской поверхности на выступ;
- **Animate during simulation** (Анимировать в ходе симуляции);

- **Use mass properties stored with Parts if available** (Использовать массовые характеристики, если возможно, ассоциированные с деталями) — ранее мы договорились, что сборка во многом схематична, поэтому опцию делаем неактивной.

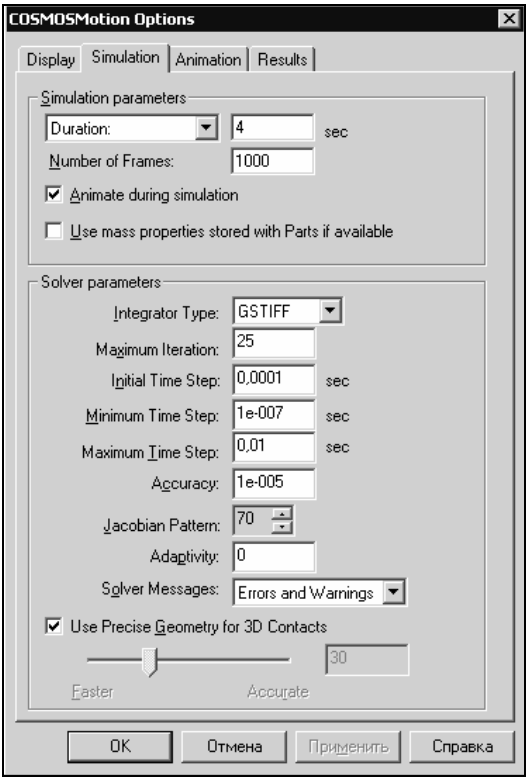


Рис. 7.34. Вкладка **Simulation**

- Группа **Solver parameters** (Настройки решателя) содержит параметры, влияющие на процесс вычислений:
  - **Integrator Type** (Тип интегратора) — тип алгоритма интегрирования уравнений движения;
  - **Maximum Iteration** (Максимальное число итераций) — максимальное число итераций для каждого шага времени;
  - **Initial Time Step** (Начальный шаг по времени) — шаг по времени, который программа устанавливает в момент начала вычислений. Его величина должна быть достаточно малой, чтобы уловить эффекты, появляющиеся в начальный момент времени. Например, как в нашем слу-

чае, начальным событием является колебание груза на пружине, а также — что менее очевидно — колебания, обусловленные податливостью контактной пары "кулачок-ролик", в момент "начала" действия гравитации. Величина шага должна позволить системе "увидеть" и описать эти процессы. Если начальный шаг превышает один период колебаний, то программа может его пропустить. С позиции же здравого смысла, величина шага должна обеспечить корректную аппроксимацию процесса, т. е. быть в несколько раз меньше полупериода;

- **Minimum Time Step** (Минимальный шаг по времени) — эта величина определенным образом связана с точностью вычислений;
- **Maximum Time Step** (Максимальный шаг по времени) — эта величина назначается исходя из требования того, чтобы система не пропустила некое "короткое" событие. Наличие (или вероятность) ударов (в нашем случае, это выход ролика из контакта с последующим возвращением на кулачок) служит основанием для уменьшения шага;
- **Accuracy** (Точность) — параметр, определяющий точность решения. Он участвует в критерии сходимости на каждом шаге времени. Чем он меньше, тем более точным будет расчет. Величина параметра ограничена снизу значением 1e-6. Для последующего уточнения можно уменьшить **Maximum Time Step**;
- **Jacobian Pattern** (Схема якобиана) — параметр, от которого зависит частота обновления якобиана. Если величина равна 100 %, то матрица пересчитывается на каждом шаге. Данная опция функциональна при наличии кинематических пар "curve-curve" с возможностью выхода из контакта;
- **Adaptivity** (Адаптивность) — параметр, участвующий в решении задач с контактной парой "curve-curve". Руководство пользователя рекомендует использовать величину порядка 10e-6 и менее;
- **Solver Messages** (Сообщения решателя) — множество сообщений, выводимых в ходе решения;
- **Use Precise Geometry for 3D Contact** (Использовать точную геометрию для 3D-контакта) — активизация опции уточняет расчет (в противном случае применяется аппроксимация фасетной поверхностью), но увеличивает время. Если опция неактивна, то ползунковым переключателем устанавливается степень точности при аппроксимации контактирующих поверхностей многогранниками.

Еще одна функциональная вкладка — это **Animation** (рис. 7.35). Она определяет состав картинки, отображаемой в режиме анимации, а также качество этого процесса. Мы не будем расшифровывать все параметры, поскольку на

результаты они непосредственно не влияют. Отметим, что величина **End Frame** (Завершающий кадр) ограничена величиной **Number of Frames** из вкладки **Simulation** плюс единица.

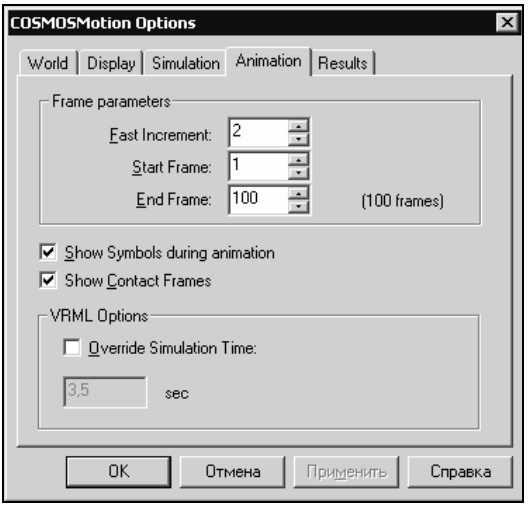


Рис. 7.35. Вкладка **Animation**

Подготовив исходные данные и определив настройки процедуры решения, запускаем вычислительный процесс. Для этого на панели **Simulation Panel** (она появляется по соответствующей команде из падающего меню) нажимаем кнопку **Simulate** (при этом отображаются временны́е параметры расчета) (рис. 7.36) или подаем одноименную команду из падающего меню или из панели COSMOSMotion.

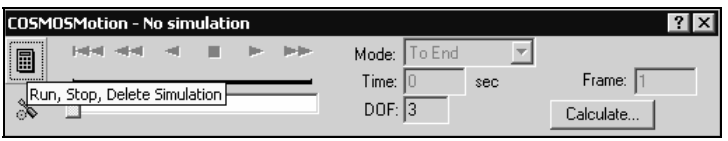


Рис. 7.36. Запуск симуляции из панели **Simulation**

В процессе расчета, если была активна опция **Animate during simulation**, можно наблюдать ход симуляции — он сопровождается движением механизма.

7.5.4. Рассмотрение результатов

После выполнения расчета можно отобразить диаграммы зависимости результатов от времени. Сначала просмотрим наиболее очевидные графики,

например, зависимость угловой скорости и углового ускорения от времени. Выберем для этого деталь Груз, щелкнув по соответствующей ему пиктограмме в браузере. Вызвав затем контекстное меню, выполняем последовательность команд: **Plot** | **Angular Velocity** | **Z Component** (Чертить | Угловую скорость | Составляющую относительно Z) (рис. 7.37). Так же показываем **Angular Acceleration** (Угловое ускорение) (рис. 7.38). Видно, что характер кривых вполне соответствует нашим требованиям: система неподвижна, затем поводок начинает вращаться и возникает ускорение. После достижения заданной скорости она стабилизируется, а ускорение уменьшается до нуля.

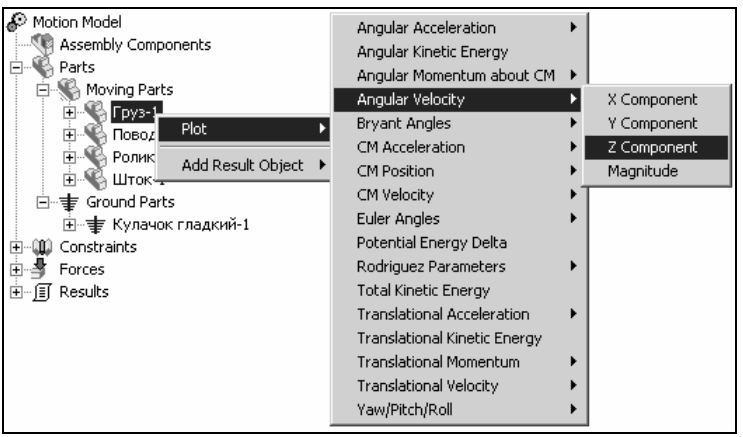


Рис. 7.37. Последовательность команд для отображения угловой скорости

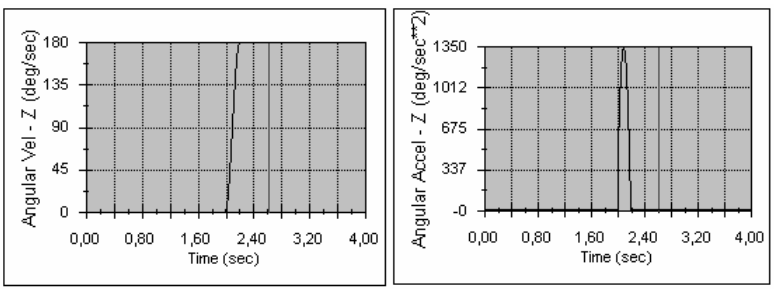


Рис. 7.38. Диаграммы угловой скорости и углового ускорения груза относительно оси кулачка

Для отображения осадки пружины и усилия (рис. 7.39) в ней располагаем указатель над пиктограммой пружины и последовательно подаем команды **Plot** | **Translational Displacement** | **Z Component** (Чертить | Поступательное перемещение | Составляющую относительно Z) и команды **Plot** | **Reaction Force** | **Z Component** (Чертить | Силу реакции | Составляющую относительно Z).

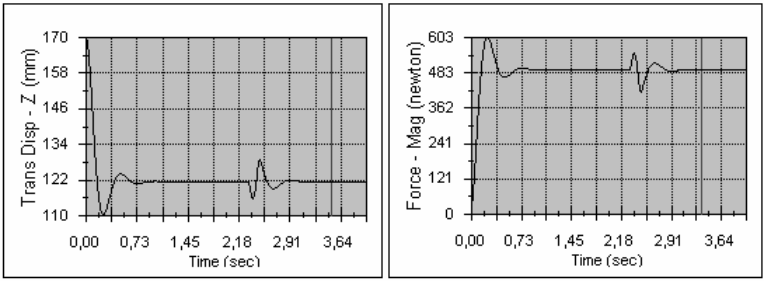


Рис. 7.39. Диаграммы перемещения пружины и усилия в пружине

При попытке показать усилие в контактной паре "ролик-кулачок" выясняется, что сделать это сразу, указав компонент (по аналогии с предыдущими операциями это должен был быть **Constraints** | **Contact3D**) и в его контекстном меню найдя подходящую команду, не удается. Выясняется, что определенное подмножество результатов доступно только после их загрузки. Для этого нужно из контекстного меню некоторой (не обязательно интересующей нас) детали механизма подать команду **Add Result Object** (Включить результаты для объекта), а затем выбрать расчетный параметр (рис. 7.40). В данной ситуации подключим **Reaction Forces** (Силы реакции).

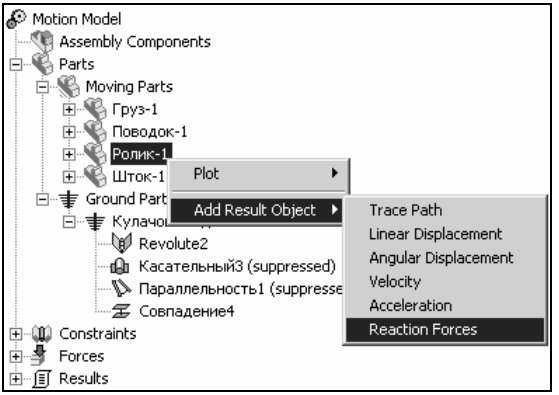


Рис. 7.40. Загрузка силы реакции для ролика

После подачи команды раскрываем в Менеджере COSMOSWorks ветвь **Results** (Результаты), а в ней — ветвь **Reaction Force** (Сила реакции) (рис. 7.41). На этой ветви "растут" листья, каждое из которых "скрывает" группу результатов, относящуюся к силе реакции одной из кинематических пар. Нас интересуют явления в паре "кулачок гладкий — ролик", поэтому вызываем контекстное меню соответствующей пиктограммы, в котором, в свою очередь, выбираем команду **Plot**, а затем — **Z component**. Интегральная величина

контактной силы (**Magnitude**) менее наглядна, поскольку включает в себя компоненты, порождаемые силой трения.

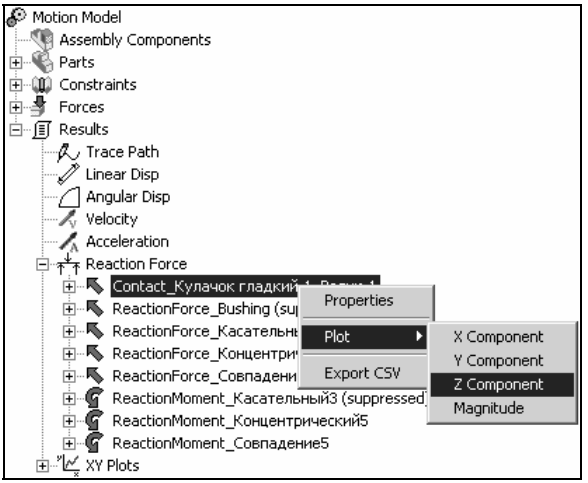


Рис. 7.41. Последовательность команд для компоненты Z контактной силы для ролика

Диаграмма изменения *контактной силы* приведена на рис. 7.42. В отличие от графиков для скоростей и перемещений, на кривой присутствуют значительные осцилляции. Попытаемся выяснить, является это закономерностью или они представляют собой просто "шум". В данной ситуации влиять на качество вычислений можно, увеличивая точность (уменьшая параметр **Accuracy**) или уменьшая максимальный шаг по времени (**Maximum Time Step**). Поскольку параметр точности достаточно мал — его предельная величина 1e-6, то будем последовательно уменьшать максимальный шаг.

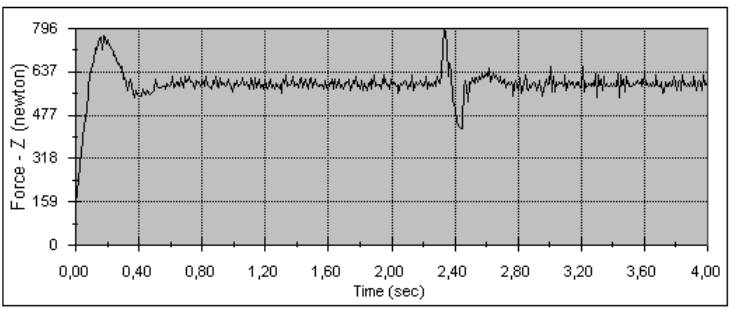


Рис. 7.42. Зависимость контактной силы от времени при максимальном шаге 0,01

На рис. 7.43 показаны графики для вертикальной составляющей контактной силы при максимальном шаге 0,001 и 0,0001. На первом из них шумы еще

заметны, причем зона их появления соответствует неподвижному состоянию ролика. Появляются они в тот момент, когда колебания успокаиваются. При уменьшении максимального шага еще в десять раз кривая (в том масштабе, в котором она показана на рисунке) становится практически гладкой. Если увеличить запрашиваемую точность (уменьшив для этого параметр **Accuracy** до 1e-6), то результат практически не изменится. Более того, уменьшение шага не всегда приводит к увеличению времени расчета. Объяснение здесь, по всей видимости, такое: время, "сэкономленное" на размере шага, затем теряется в процессе субитераций в пределах этого шага.

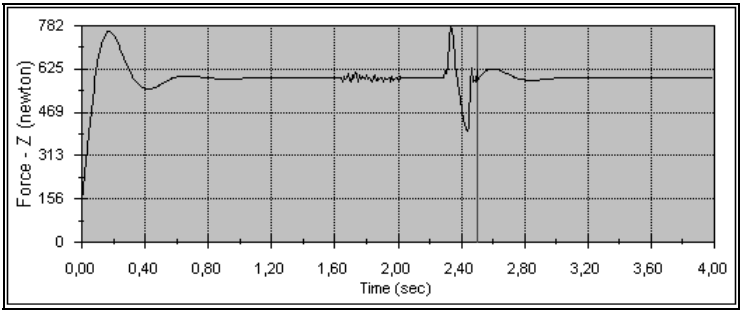


Рис. 7.43. Зависимость контактной силы от времени при максимальном шаге 0,001

На основе анализа кривой можно уверенно утверждать, что соотношение жесткости пружины и демпфирующих свойств амортизатора таково, что при данной скорости вращения поводка (и соответственно линейной скорости ролика) отрыва ролика от кулачка не происходит. При этом гашение колебаний происходит за два периода.

Однако если увеличить масштаб для кривой контактной силы (рис. 7.45), то картина становится менее очевидной. На рис. 7.44 показан фрагмент кривой, соответствующий интервалу времени, в который попадает момент прохождения ролика через линию сопряжения криволинейной и плоской поверхностей

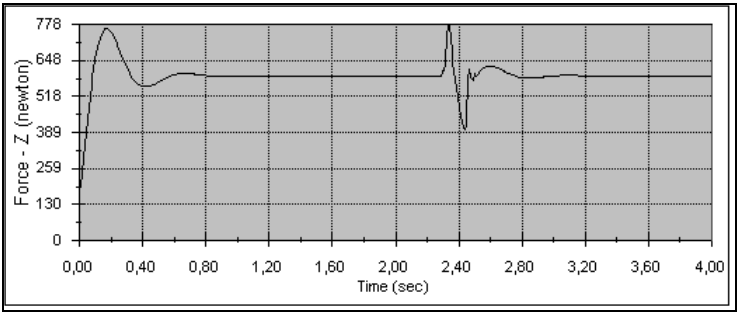


Рис. 7.44. Зависимость контактной силы от времени при максимальном шаге 0,0001

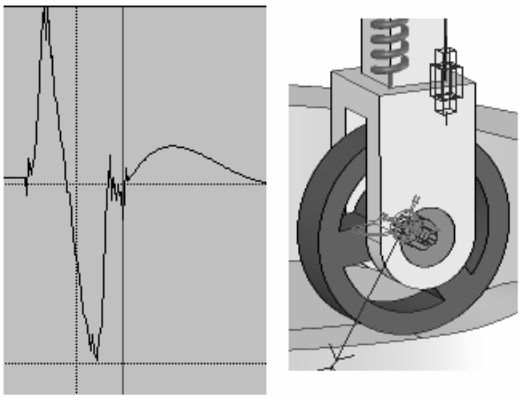


Рис. 7.45. Зависимость контактной силы от времени: момент прохождения через линию сопряжения

кулачка. Налицо скачок силы. Ниже мы попытаемся узнать, есть ли это следствие вычислительной погрешности (объективно присущей численным методам) или же это продукт более значимых явлений.

7.5.5. Модифицирование конструкции

Выясним, не является ли скачок на диаграмме результатом особенностей модели. Предположим, что это результат "удара" ролика при его перекатывании через линию, соединяющую криволинейную и плоскую поверхности. Подобные эффекты появляются при негладкости функции по второй производной. Здесь же мы не можем гарантировать даже равенство первой производной (в ходе преобразования ломаной посредством команды **Разместить сплайн** примыкающие к ней прямолинейные участки не включались во множество преобразуемых объектов). Надо сказать, что в SolidWorks нет достоверных инструментов контроля гладкости поверхностей. Команды **Полосы** и **Отобразить кривизну** дают только приближенную оценку, которой, как выясняется, недостаточно для идентификации "пограничных" состояний.

Воспользуемся методами косвенного контроля. При построении модели контактной пары предполагалось, что взаимодействующие детали обладают локальной податливостью в зоне соприкосновения. Соответствующие параметры настраивались в окне Edit 3D Contact (см. рис. 7.24). Мы остановились на том, что как ролик, так и кулачок приобрели свойства, описывающие сухую сталь. Здравый смысл подсказывает, что если увеличить контактную жесткость, то ударные эффекты станут более выраженными. Более того, для абсолютно жестких тел ускорения и нагрузки в момент прохождения линии сопряжения станут бесконечными. Ограничимся тем, что изменим только параметр контактной жесткости (**Contact3D** | **Contact** | **Stiffness**), увеличив его

в 10 раз. При этом не трогаем сопутствующее свойство **Exponent** (Экспонента), а также характеристики демпфирования. В результате зависимость контактной силы от времени приобретает вид рис. 7.46. Налицо, во-первых, увеличение степени дискретности диаграммы, а во-вторых, как и ожидалось, неконтролируемый рост сжимающей нагрузки в момент перехода с неплоской на плоскую поверхность.

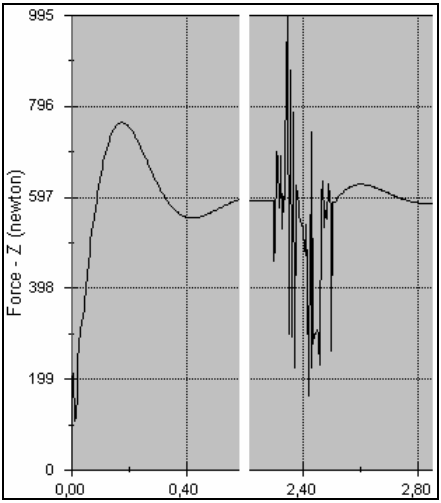


Рис. 7.46. Зависимость контактной силы от времени для "жесткого" контакта: момент прохождения через линию сопряжения

Если учесть, что мы не увеличивали параметр роста сопротивления в ходе проникновения (**Exponent**) и не делали локальный "амортизатор" более жестким (этому соответствует увеличение параметра **Max. Damping** и уменьшение **Penetration**), то вывод однозначен: на кромке, где граничат криволинейная и плоская поверхности кулачка, ролик претерпевает удар. Из этого следует, что в некоторых случаях "чрезмерная" идеализация задачи, например, придание ролику и кулачку жесткости, близкой к "абсолютной", будет отдалять пользователя от принципиальных вопросов. В данной ситуации — это подбор оптимального соотношения параметров упругости и демпфирования для объектов, соединяющих груз и шток. Если высказать субъективную точку зрения, то возникает подозрение, что разработчики программы ввели возможность назначать податливость и амортизирующую способность контактной пары для того, чтобы неявно ввести объекты, стабилизирующие решение для систем, неустойчивых с вычислительной точки зрения.

На рис. 7.47 приведены диаграммы ускорения для ролика и для груза в зависимости от времени. Параметр **Stiffness** равен 1e5, что соответствует сухой стали. Налицо некоторая неустойчивость в диаграмме ускорения ролика. В то

же время, комбинация упругих и демпфирующих свойств обеспечивает эффективное гашение колебаний без передачи осцилляций на груз.

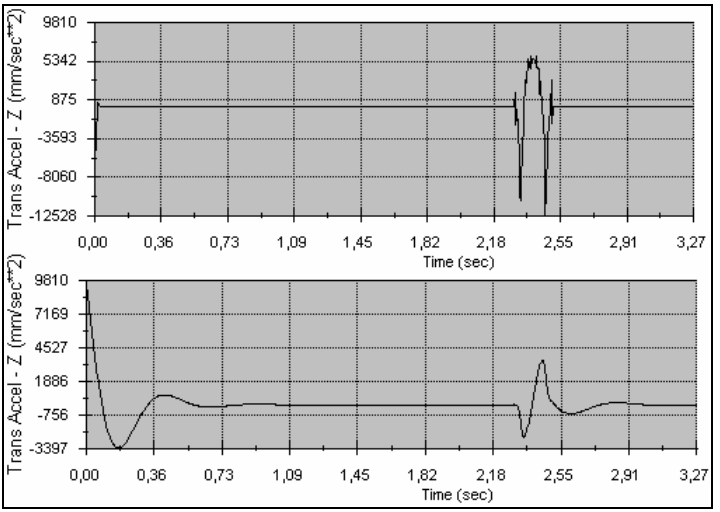


Рис. 7.47. Вертикальное ускорение ролика и груза для "податливой" контактной пары

Диаграммы для "жесткого" контакта приведены на рис. 7.48. На поведение груза (с учетом различий в сетке координат) это не повлияло. Параметры движения ролика изменились существенно.

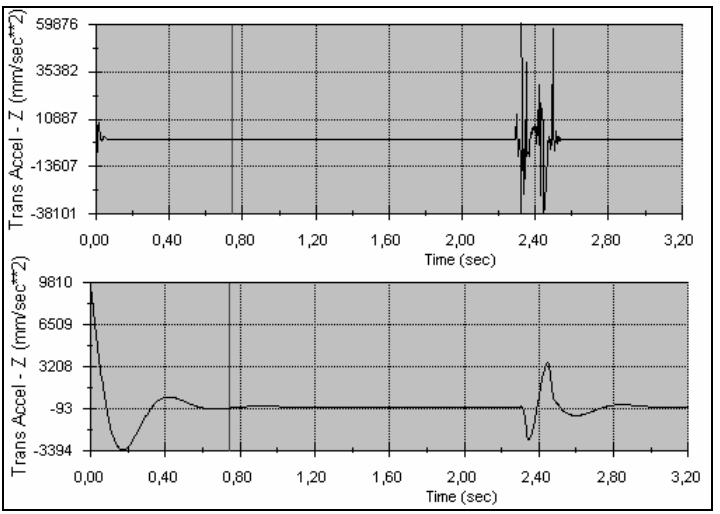


Рис. 7.48. Вертикальное ускорение для ролика и груза для "жесткой" контактной пары

Подводя итог анализу поведения системы при перекатывании ролика через кромку, соединяющую две поверхности, отметим, что если целью задачи является проектирование профиля, обеспечивающего заданный закон движения ("глобальная" задача), то следовало бы в момент создания сплайна на плоскости (команда SolidWorks **Разместить сплайн**) присоединить к криволинейной части смежные с ней отрезки прямой. После того как построенной на базе сплайна поверхностью мы отсекли бы часть развертки цилиндра, была бы получена непрерывная рабочая поверхность. И, соответственно, не было бы (по крайней маре, на первый взгляд) почвы для появления ударных нагрузок (если, конечно, кривизна ролика больше минимальной кривизны вогнутой части сплайна). Это позволило бы сосредоточиться непосредственно на проектировании профиля кулачка, не отвлекаясь на "сопутствующие" моменты. С другой стороны, если целью анализа является исследование явлений, возникающих при перекатывании с одной части профиля на другую, то необходима та модель, которую мы и рассматривали.

Рассмотрим, как меняются динамические характеристики системы в зависимости от скорости вращения деталей относительно вертикальной оси. Все приведенные ранее расчеты выполнялись для 360 град/с. Последовательно увеличивая угловую скорость и выполняя расчет, наблюдаем уменьшение минимальной контактной силы. Зона ее минимума соответствует переходу ролика с вогнутого на выпуклый участок (начало конца подъема) и далее — опять на вогнутую поверхность. В конце концов, минимальная контактная сила уменьшается до нуля, что означает отрыв ролика от кулачка. При этом нулевая величина контактной силы наблюдается на некотором отрезке времени, который растет по мере увеличения угловой скорости. Этот интервал соответствует "полету" ролика. Одновременно с этим в момент окончания данного участка резко увеличивается контактная сила. Таким способом программа имитирует удар при "приземлении". Понятно, что весь этот процесс можно отображать визуально посредством инструментов анимации.

Рассмотрим поведение системы при действии угловой скорости 500 град/с. Диаграмма контактной силы показана на рис. 7.49. Напомним, что жесткость пружины равна 10 Н/мм, а коэффициент вязкого демпфирования амортизатора равен 0,6 Н·с/мм. Поставим следующую цель: подобрать такое сочетание жесткости пружины и динамической вязкости демпфера, чтобы система преодолевала препятствие без отрыва ролика от кулачка. Жесткость пружины — как приоритетный параметр — на первом этапе менять не будем. Чтобы подобные конструкции "лучше" преодолевали препятствия, жесткость амортизатора нужно уменьшать. Если понизить ее в два раза, то закон изменения контактной силы приобретет вид рис. 7.50. Минимальная величина контактной силы не изменилась: ролик все еще отрывается от кулачка. Некий позитивный эффект, тем не менее, наблюдается: максимальная сила (она локали-

зована в зоне подъема кулачка) уменьшилась. Платой за улучшение явилось то, что менее жесткий амортизатор вместо двух качаний породил уже три.

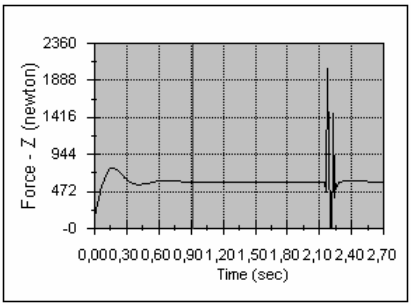


Рис. 7.49. Контактная сила для скорости 500 град/с

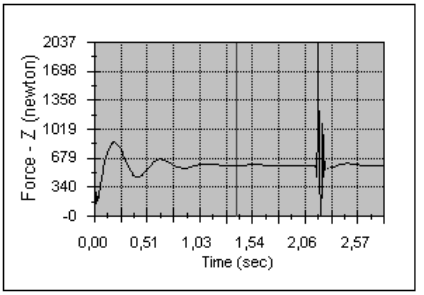


Рис. 7.50. Контактная сила для 500 град/с, пружина 10 Н/мм, демпфер 0,3 Н·с/мм

Дальнейшее уменьшение демпфирующей способности не дает принципиально нового результата и приводит только к тому, что на гашение колебаний требуется все больше времени. Единственный оставшийся инструмент для управления динамикой системы — жесткость пружины. Уменьшаем ее на несколько единиц, а затем подбираем характеристику амортизатора так, чтобы она, с одной стороны, обеспечивала контакт ролика с кулачком (здесь "идеал" — полное отсутствие демпфирования), а с другой — поглощала колебания за меньший период времени или, что, в общем, не одно и то же, за минимальное число колебаний. Подходящая жесткость пружины равна 5 Н/мм, а характеристика амортизатора — 0,2 Н·с/мм (рис. 7.51).

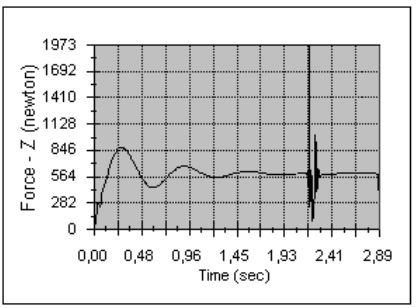


Рис. 7.51. Контактная сила для 500 град/с, пружина 5 Н/мм, демпфер 0,2 Н·с/мм

Для полноты картины отобразим диаграмму осадки пружины и усилия в ней (рис. 7.52). В сравнении с исходным вариантом перемещение в "спокойном" состоянии увеличилось пропорционально уменьшению жесткости, а вот максимальная осадка — более чем в пять раз. Сила, воспринимаемая пружиной

в статическом положении, осталась неизменной, а наибольшая сила увеличилась. Это связано с уменьшением доли нагрузки, воспринимаемой амортизатором. В целом же качество системы ухудшилось по сравнению с первоначальным исполнением: полное успокоение колебаний теперь занимает более двух секунд.

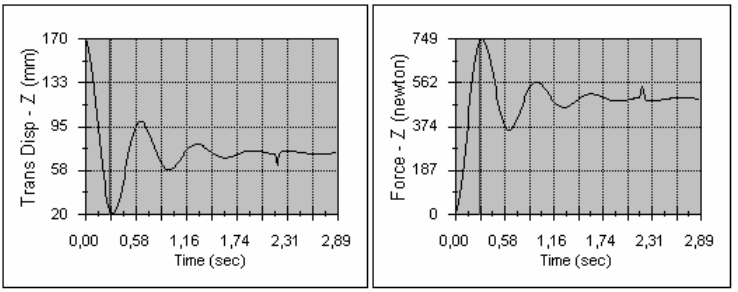


Рис. 7.52. Диаграммы перемещения пружины и усилия в пружине для модифицированной системы

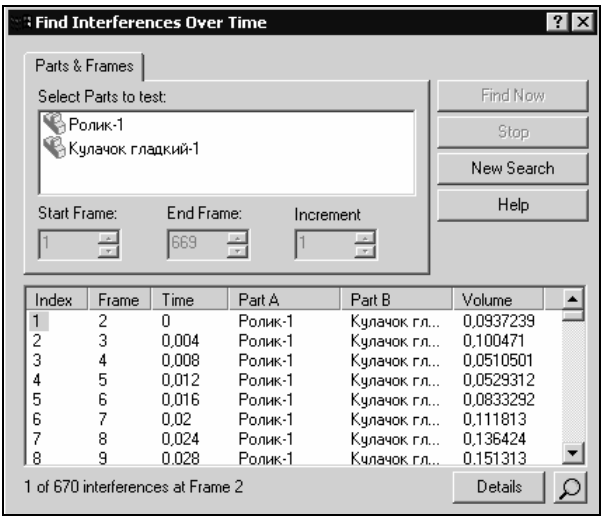


Рис. 7.53. Окно **Find Interferences**

Заслуживает внимания информация, получаемая по команде **Check Interferences** (Проверить коллизии). Она доступна после выполнения расчета. После того как в окне **Find Interferences Over Time** (Проверить коллизии за все время) (рис. 7.53) выбраны (щелчком мыши по детали на экране) компоненты, взаимодействие между которыми нужно проанализировать, следует нажать на кнопку **Find Now** (Найти сейчас). Система выполнит покадровый

анализ интерференции, сопровождаемый анимацией механизма. Полученные величины (столбец **Volume**) представляют собой объем области взаимного проникновения. Поскольку интерференция наблюдается во всех кадрах, следовательно, ролик не выходит из зацепления с кулачком.

Сделаем последний шаг в изучении того, как влияет способ представления кривой на динамические параметры. При создании линейного кулачка подчеркивалось, что сплайн, созданный на базе исходного представления кривой в виде цепочки дуг, имел не гладко изменяющуюся кривизну (см. рис. 6.20). На базе этого сплайна был построен кулачок. Сплайн, проходящий через точки ломаной, является более гладким (см. рис. 6.27). Если построить кулачок, для которого основой является этот сплайн, и контактирующим объектам назначить материал сталь, то получим закон изменения вертикальной составляющей контактной силы в виде рис. 7.54. Сравнив его с тем, который имел место для исходной геометрии (см. рис. 7.45), можно увидеть, что при перекатывании ролика через препятствие диаграмма силы стала несколько более гладкой (параметры вычислительного процесса для обеих конфигураций, естественно, одинаковы).

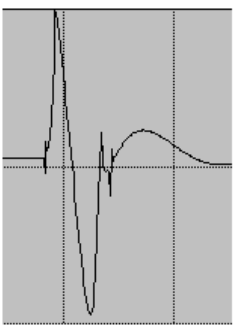


Рис. 7.54. Зависимость контактной силы от времени: момент прохождения через линию сопряжения — "гладкий" кулачок

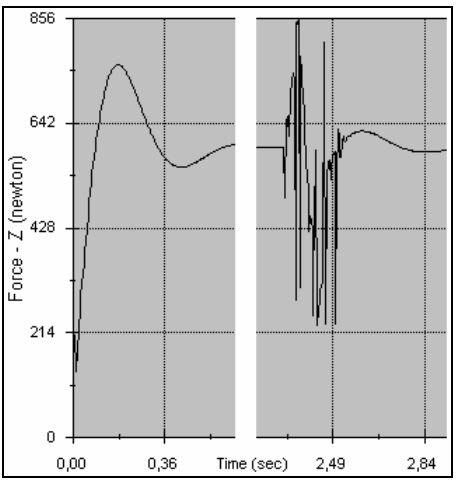


Рис. 7.55. Зависимость контактной силы от времени для "жесткого" контакта: момент прохождения через линию сопряжения

Как и при расчете исходного варианта кулачка, пронаблюдаем, как изменится характер взаимодействия, если сделать контактную пару более "жесткой". Соответствующая диаграмма показана на рис. 7.55. Видим, что осцилляции сохранились, однако точки их появления сместились относительно тех, которые показаны на рис. 7.46. Кроме того, несколько уменьшилась амплитуда

колебаний. Не исчезли следы удара в момент перекатывания ролика через линию сопряжения. Это, как представляется, следствие отсутствия гладкости траектории по второй производной (между сплайном и прямолинейными участками назначено сопряжение **Касательность** и более того).

На базе этого примера можно сделать заключение о том, что анализ моделей с переменной границей контакта и, тем более, с прерывистым контактом требует предельно внимательного отношения к тому, как описываются контактирующие поверхности. Стабилизирующую роль может играть наличие податливости контактирующих объектов. Ее учет позволяет получить решение, которое пригодно для анализа более "существенных" факторов.

7.6. Выводы

Выше был рассмотрен достаточно характерный пример использования COSMOSMotion. Программа позволяет выполнять динамический анализ широкой номенклатуры механизмов. Продукт также полезен при синтезе таких объектов. Здесь, правда, ответственность за создание методики применения программы всецело возлагается на пользователя. В простейшей ситуации эта методика сводится к перебору вариантов, а затем оператор принимает решение о направлении дальнейшего поиска или же о том, что на некотором этапе результат удовлетворяет требованиям.

Как и в большинстве расчетных программ, главная задача — это построение модели, которая с приемлемой погрешностью описывает принципиальные характеристики динамической системы. С точки зрения трудности анализа, наиболее ответственным этапом является оценка соотношения реальной податливости деталей и возможности ее имитировать посредством инструментов программы. Это **Impact Force** (Усилие проникновения), **3D Contact** (3D-контакт) и **Bushings** (Втулки). Последние две функции, по сути, включают в себя функциональность **Impact Force**. Если жесткость объектов такова, что податливостью деталей ("в целом" и локальной ее составляющей) можно пренебречь, то единственной проблемой, требующей неформального подхода, является подбор параметров: вычислительных и физических, которые обеспечивают приемлемую точность решения.

В свете предыдущих рассуждений заключаем, что канонические задачи теории механизмов и машин, связанные с расчетом рычажных и кулачковых механизмов, могут быть решены практически "в лоб", поскольку не требуют специальных навыков. Единственным минусом здесь является небогатый выбор инструментов для построения эпюр скоростей, ускорений, усилий. "Штатные" средства COSMOSMotion, по сути, сводятся к диаграммам в ортогональных координатах. Поэтому приведение их к требованиям ТММ требу-

ет некоторых усилий. Однако программа является очень эффективным инструментом для поверки результатов, полученных графоаналитическим расчетом.

При использовании программы совместно с SolidWorks определенное творчество необходимо при переходе от сборки SolidWorks к модели "реального" механизма. Несмотря на то, что все операции по назначению соединений можно выполнить в COSMOSMotion, весьма желательно корректные взаимосвязи назначить именно в SolidWorks. Интерференцию компонентов также рекомендуется проверить в геометрической САПР. Пересечение деталей, в принципе, допускается при расчете кинематики, но для кинематических пар, где фигурируют контактные эффекты, наличие пространственных конфликтов нежелательно.

ГЛАВА 8

Листовой металл — развертки и заготовки (SolidWorks, BlankWorks)

Задача проектирования изделий из листового металла в практике конструктора встречается достаточно часто. Ее особенность в том, что она теснейшим образом связана с вопросом технологической реализуемости. Функциональность, имеющаяся в SolidWorks, позволяет моделировать формы, допускающие получение точных в геометрическом смысле *разверток*. Более тщательно рассмотрена программа BlankWorks, способная оперировать с поверхностями двойной кривизны, сопровождая получение разверток первичной оценкой технологичности (рис. 8.1).

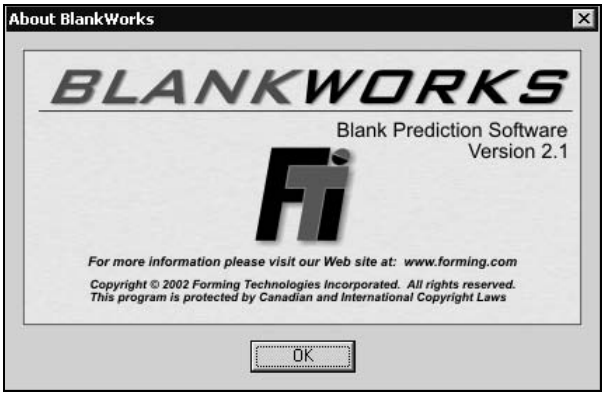


Рис. 8.1. Информационная панель BlankWorks

Замечание

Для построения геометрических моделей использована версия SolidWorks 2005 года. Описание интерфейса соответствует этой версии.

8.1. Назначение

Проектирование изделий, классифицируемых как изделия из листового металла, включает этапы моделирования изделия, получения заготовки и разработки технологического процесса. Рассмотрим их подробнее.

Создание геометрической модели. Наиболее продвинутым является подход, когда модель является пространственным объектом. Этот объект может формироваться как твердое тело или описываться поверхностями. В первом случае применяются специальные функции, имеющиеся в современных геометрических САПР. Второй подход — использование аппарата поверхностного моделирования. Его использование неизбежно для изделий, имеющих форму, которая не может быть реализована посредством процедур первого типа. Мы не затрагиваем ситуацию, когда изделие моделируется как пространственный гибридный объект вида (типичный пример будет рассмотрен далее). Этот подход имеет место на практике, но для решения специальных задач необходимо привести его к одной из предыдущих разновидностей. И, разумеется, речь не идет о случае, когда проектирование выполняется посредством чертежей. Они, за редкими исключениями, имевшими место до появления пространственных САПР, не могут быть источником информации для автоматизированного построения разверток.

Получение заготовки. Нередко этот этап — сознательно или нет — подменяют понятием получения развертки (именно этот термин мы, в силу его употребительности, будем, как правило, использовать далее). Безусловно, есть ситуации, когда эти предметы тождественны, но, в общем случае, это различные понятия. Процедуры, имитирующие эту операцию, интегрированы в геометрические САПР (они, по сути, сопровождают построение самой модели), а также могут быть оформлены как самостоятельные программы. В обоих случаях процесс построения заготовки может сопровождаться более или менее адекватной имитацией этапов технологического процесса.

Разработка технологии. Данный этап тесно связан с фазой проектирования. С одной стороны, это касается технологической реализуемости изделия. С другой стороны, на базе проекта могут быть определены некоторые параметры техпроцесса. Мы ограничимся рассмотрением тех аспектов, которые предполагают первичность конструкторской проработки. Программное обеспечение, предназначенное для симуляции процесса воздействия на материал, останется за рамками данной книги. Его эксплуатация требует специальных познаний, а также солидного объема достоверных экспериментальных данных.

Предметом данной главы являются две процедуры. Первая — подмножество функций SolidWorks, предназначенных для работы с листовым металлом. Они позволяют спроектировать изделие как совокупность геометрических

элементов, присущих тонколистовым изделиям. На любом этапе формирования модели пользователь имеет доступ к заготовке объекта. При ее расчете программа может учитывать поправки на изменение длины заготовки в ходе ее гиба. Возможно также получение заготовки на базе твердотельной модели SolidWorks, сформированной посредством "универсальных" команд. Эти функции мы рассмотрим достаточно бегло, т. к. они не сопровождаются какими-либо расчетами и, в общем, хорошо документированы. Вторая процедура — приложение BlankWorks — разработка фирмы FTI — Forming Technology Incorporated, Канада (**http://www.forming.com**). Информационная панель программы показана на рис. 8.1. Будучи приложением SolidWorks, она использует специальным образом подготовленную поверхностную модель. Результатом его работы также является заготовка. Расчет сопровождается первичной оценкой технологической реализуемости проекта. BlankWorks имеет предка — независимую программу FastBlank, которая обменивается информацией с геометрическими САПР через формат IGES. Несмотря на то, что рассматриваемые продукты объединяет только цель, их совместное рассмотрение даст пользователю весьма содержательную информацию.

8.2. Теоретическая база

Программы, описанные в данной главе, имеют в своей основе принципиально различный математический аппарат. Процедуры SolidWorks построены на базе аналитических методов, BlankWorks имеет базой метод конечных элементов.

8.2.1. Развертки в SolidWorks

Как известно, классификация разверток криволинейных поверхностей в начертательной геометрии делит их на точные, приближенные и условные. Первые подразумевают сохранение всех линейных и угловых размеров, т. е. деформирование материала без растяжения/сжатия (при условии, что толщина стремится к нулю). *Точные развертки* могут быть получены только для определенного класса объектов. Если пользоваться понятиями аналитической геометрии, то к ним относятся поверхности, у которых в любой точке одна из *главных кривизн* равна нулю. Начертательная геометрия требует для развертывающейся поверхности существования в любой точке плоскости, касающейся поверхности по прямой. Разумеется, физический смысл этих определений эквивалентен. Примерами точно развертывающихся поверхностей являются цилиндрические и конические поверхности общего вида, а также линейчатые поверхности с двумя направляющими и плоскостью параллелизма. На рис. 8.2 приведен пример точной развертки объекта (твердого тела), имитирующего линейчатую поверхность. Она представляет собой сочетание

плоских и конических поверхностей. Очевидно, что все гранные поверхности также имеют точную развертку.

Замечание

Здесь и далее на рисунках приводятся реальные модели SolidWorks, а не условные изображения. Последние, возможно, иллюстрировали бы абстрактные понятия более точно, однако мы отдаем приоритет формированию у читателя практических навыков работы с программой.

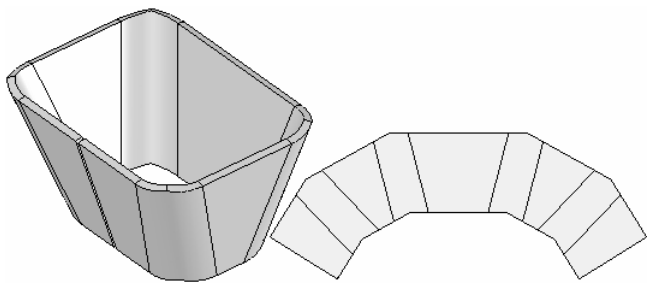


Рис. 8.2. Пример точно развертывающегося объекта

Если же точно развертывающая поверхность аппроксимируется гранной (грани могут быть, например, треугольниками, плоскими четырехугольниками и т. д.), то полученная развертка называется *приближенной*. При уменьшении размеров описывающих ее объектов погрешность аппроксимации (в смысле площади, линейных и угловых размеров) стремится к нулю. Получение приближенной развертки не сопровождается разрывом на гладких гранях. На рис. 8.3—8.5 показан наклонный конус, для которого построена условная развертка методом замены его шестигранной пирамидой, образованной командой **Бобышка по сечениям** с опцией **Тонкостенный элемент**. Как и в предыдущей модели, прямолинейный разрез одной из плоских граней выполнен для того, чтобы обеспечить построение развертки

Последняя группа — *условно развертываемые* поверхности. Здесь приходится прибегать к аппроксимации исходной поверхности теми поверхностями, которые развертываются точно. Сфера, например, описывается совокупностью усеченных конусов вращения или же цилиндрами, обрезанными в виде долек. На рис. 8.6—8.8 приведен пример построения одного из сегментов сферы. Две непересекающихся дуги были получены как сечения сферической поверхности плоскостью, проходящей через ось (наличие самой поверхности необязательно, каждую дугу можно было бы получить как самостоятельный эскиз). Затем была применена команда **Элемент по сечениям сгиба**, в качестве объектов которой выступили эти эскизы. Полученный сегмент является, по сути, разверткой участка цилиндрического тонкостенного тела.

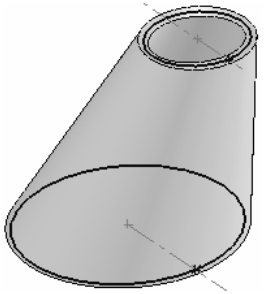


Рис. 8.3. Пример приближенно развертывающегося объекта

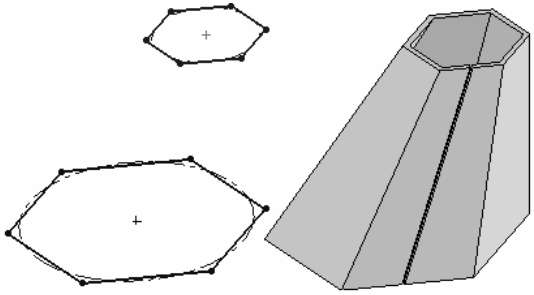


Рис. 8.4. Ход построения пространственной модели

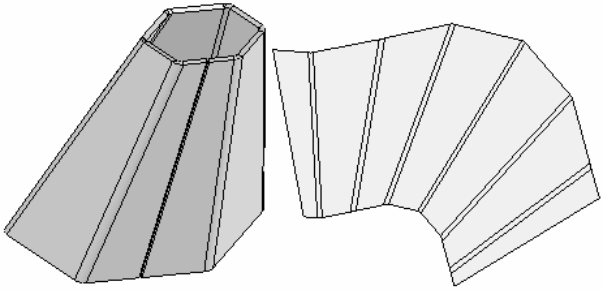


Рис. 8.5. Преобразование объекта программой после ввода развертки и сама развертка

Заканчивая разговор об условных развертках, развернем ту же самую сферу, но по другой схеме. В ней исходный объект заменяется совокупностью усеченных конусов вращения. На рис. 8.9—8.11 проиллюстрирован процесс получения развертки половины одного из таких объектов. Для этого, как и в предыдущем случае, использован **Элемент по сечениям сгиба**, хотя можно было бы построить "точную" развертку", применив для этого (после построения подходящей модели) команду **Сгибы** (этот подход иллюстрирован рис. 8.12—8.15). Напомним, что сферическая поверхность присутствует в

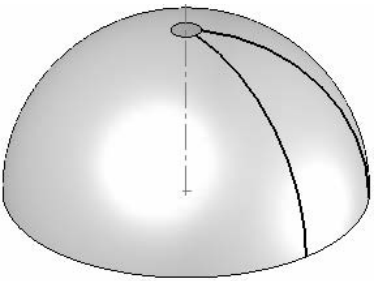


Рис. 8.6. Выделение на сфере участка для развертывания

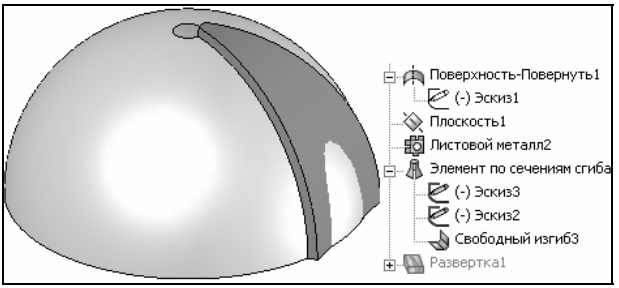


Рис. 8.7. Результат построения развертываемого сегмента



Рис. 8.8. Условная развертка сегмента тонкостенной сферы (поверхность сферы скрыта)

модели исключительно как средство привязки элементов эскиза, формирующих развертываемое тело. Все построения, в принципе, могут быть выполнены без ее использования.

Независимо от размеров граней, описывающих сферу, на условной развертке всегда появляются разрывы. В наших примерах они отсутствуют по причине того, что мы имели дело с единичной деталью. Для построения комплекта разверток, описывающих, например, сферу, нужно было бы иметь множество деталей, каждая из которых содержит единственный сегмент. Сферическую

же поверхность, к которой следовало бы привязать эти развертки, было бы лучше поместить в отдельную деталь, обеспечив ассоциативность деталей (сегментов) через взаимосвязи, назначенные в контексте сборки.

Возвращаясь к теме раздела, отметим, что авторы не обладают исчерпывающими данными об алгоритмах, использованных в SolidWorks. По всей видимости, соответствующие возможности интегрированы в геометрическое ядро

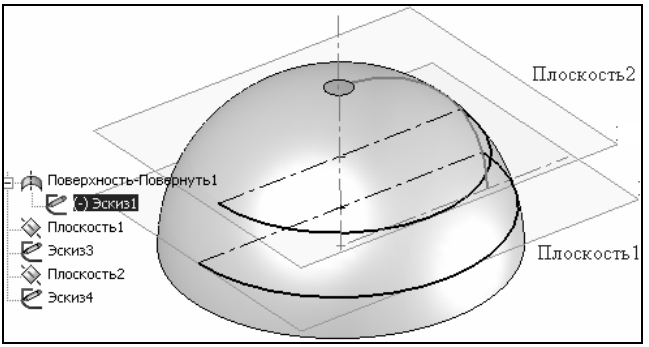


Рис. 8.9. Отрезки сечений сферы горизонтальными плоскостями

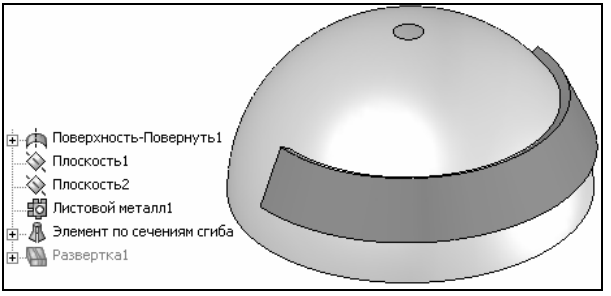


Рис. 8.10. Результат построения развертываемого сегмента



Рис. 8.11. Условная развертка кругового сегмента тонкостенной сферы (поверхность сферы скрыта)

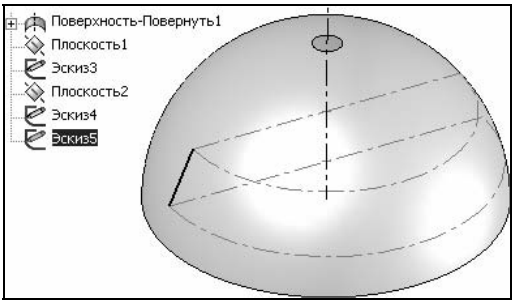


Рис. 8.12. Эскиз для построения усеченного конуса

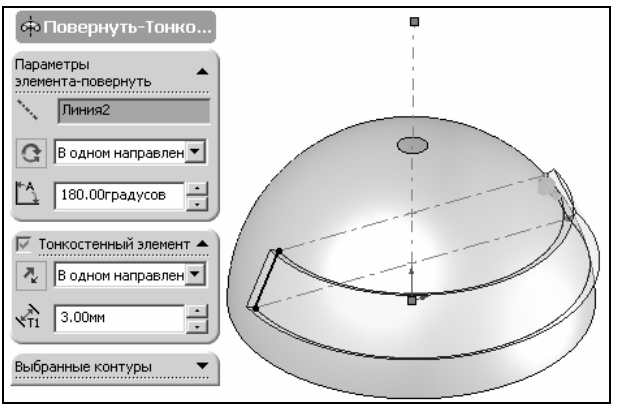


Рис. 8.13. Построение конического тела

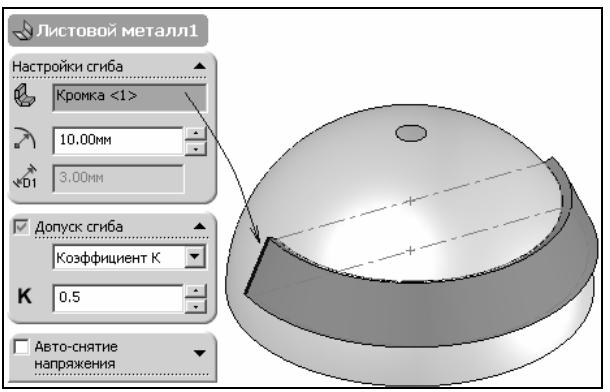


Рис. 8.14. Развертывание конического тела

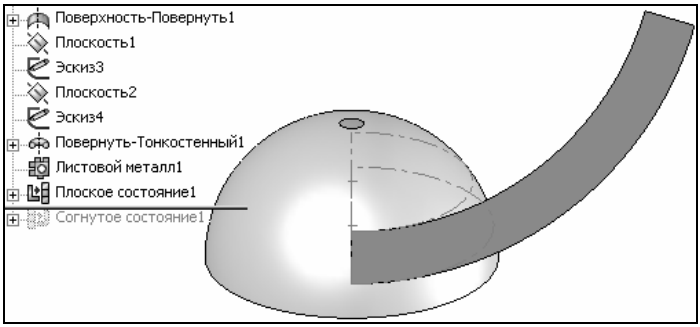


Рис. 8.15. Развертка усеченного конуса вращения

Parasolid, лежащее в основе геометрической САПР. Можно утверждать, что для формирования развертки в нем используются аналитические зависимости. Они позволяют получить однозначное решение (точную развертку) при достаточно скромном объеме вычислений. Единственным исключением является функция **Элемент по сечениям сгиба**. Она предназначена для построения разверток пространственных объектов, полученных на базе двух сечений. Для этого, по всей видимости, на плоскости воспроизводится аппроксимация срединной поверхности полосами, каждая из которых, в свою очередь, разбита на треугольники. Полученную таким способом развертку можно отнести к классу приближенных. В пользу предположения о первичности поверхностной аппроксимации свидетельствует то, что результат работы данной команды, в отличие от других, предназначенных для разверток, никоим образом не зависит от толщины листа или параметров сгиба.

8.2.2. Развертки в BlankWorks

В основе BlankWorks лежит метод конечных элементов. Программа накладывает на поверхность (перед этим она, по всей видимости, автоматически преобразуется в формат IGES) сетку конечных элементов. Элементы могут быть четырех- и треугольными. Как можно предположить, используются безмоментные элементы. Это значит, что они не сопротивляются деформации изгиба и сдвига "из" плоскости. Далее производится совмещение сетки с некоторой плоскостью, перпендикулярной направлению движения виртуального штампа. При этом учитывается возможность упругого и пластического деформирования. Понятно, что так можно решить только прямую задачу — преобразовать криволинейную поверхность в плоскую. Программа, однако, воспроизводит заготовку, что требует решения проблемы проектирования. Для этого, скорее всего, применяется итерационное приближение: модель → заготовка → модель с поправками → заготовка → ... Надо отметить, что данный цикл программа выполняет достаточно быстро.

8.3. Функциональные возможности и ограничения

По функциональности программы дополняют друг друга. Возможности SolidWorks оптимальны для проектирования точно развертывающихся объектов, имеющих твердотельное представление, получения разверток и оформления рабочих чертежей. При построении разверток можно учесть эмпирические закономерности, учитывающие изменение длины заготовки в процессе сгиба.

BlankWorks следует использовать для объектов, содержащих поверхности двойной кривизны. Эта программа не обладает возможностями проектирования и предназначена исключительно для обработки готовых поверхностных моделей SolidWorks.

Поскольку обзор будет достаточно кратким, то совместим рассмотрение функциональности с расшифровкой предназначения элементов интерфейса.

8.3.1. Листовой металл в SolidWorks

Команды для работы с листовым металлом собраны в одноименную панель инструментов. Она показана на рис. 8.16, при этом с нее убраны команды **Вытянутый вырез** и **Простое отверстие**. Они не являются специфическими для листового металла. В SolidWorks имеется два принципиально различных алгоритма формирования объекта, для которого будет получена развертка. Первый — проектирование детали как твердотельного объекта с последующим получением развертки. Для этого используется команда **Сгибы**. При этом деталь должна быть построена так, чтобы процедуры SolidWorks смогли эту развертку построить. Заведомо неприемлемые для обработки объекты следующие:

- деталь, состоящая из нескольких тел;
- разнотолщинная деталь;
- деталь с телом, имеющим поверхность двойной кривизны;
- деталь, у которой эскиз, формирующий профиль, содержит сопряжение прямой и дуги, не связанные сопряжением Касательность;
- деталь, у которой эскиз, формирующий профиль, содержит линии, отличные от прямой и дуги;
- деталь, содержащая пересекающиеся изгибы.

Соответственно и приемы, которые позволяют получить развертываемый объект, следующие:

- при построении деталей рекомендуется использовать элементы, содержащие опцию **Тонкостенный**;
- элемент **Оболочка** следует применять с одинаковой толщиной элементов оболочки;
- желательно использовать минимальное число шагов для построения исходного тела;
- при обработке тел вращения: цилиндров или конусов рекомендуется формировать их так, чтобы система однозначно "понимала" их как тонкостенные тела вращения.



Рис. 8.16. Панель инструментов **Листовой металл**

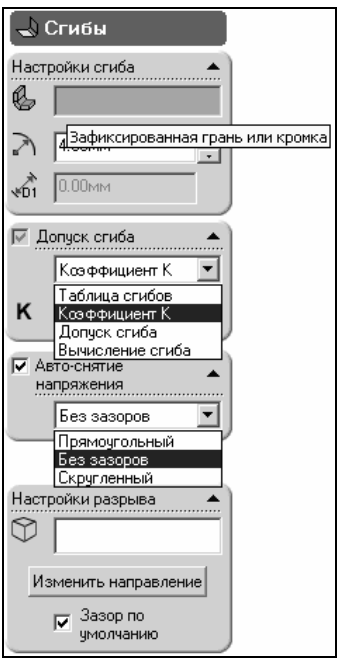
Как упоминалось, базовая функциональность SolidWorks подразумевает работу только с объектами в твердотельном представлении, однако способ построения объекта, вообще говоря, для команды **Сгибы** безразличен. Это может быть, в частности, результат придания толщины поверхности подходящей формы. Соответствующий пример показан ниже.

После подачи команды возникает панель **Сгибы** рис. 8.17. Пользователь должен заполнить следующие поля.

- **Зафиксированная грань или кромка** — объект, который остается неподвижным в процессе построения системой развертки. Это может быть плоская грань или линейная кромка. От того, какой объект выбран, зависит расположение развертки относительно исходной модели, а также — иногда — сама осуществимость операции. Например, в модели половины усеченного конуса (см. рис. 8.14) присутствуют две плоских грани и четыре линейных кромки, однако только последние могут быть базой для развертки.
- **Радиус сгиба** — внутренний радиус, который будет использован системой при построении скругления мест стыка плоских участков. Если в процессе построения радиус окажется настолько велик, что поглотит одну из смеж-

ных граней, то развертка построена не будет. Впоследствии для каждого из гибов может быть назначено индивидуальное значение радиуса.

- **Толщина** — поле в данном контексте не используется.
- **Допуск сгиба** — группа параметров, определяющих, как система будет обрабатывать изменение длины листа в процессе перехода от заготовки к модели. Как известно, в процессе гиба из-за особенностей распределения пластических деформаций (они, как правило, более активно развиваются в зоне внешнего радиуса) происходит изменение (почти всегда — увеличение) длины детали. Этим, собственно, и отличаются термины "развертка" и "заготовка". Если изменения длины срединной поверхности в процессе изготовления детали (в компьютерной модели — при превращении заготовки в деталь) не происходит, то эти понятия тождественны. Система обрабатывает эту ситуацию тремя способами:



- посредством использования параметра **Коэффициент К**, определяющего местоположение срединной (недеформируемой) поверхности относительно толщины листа. Параметр отсчитывается от внутреннего радиуса гиба. Если К равен 1/2, то изменения длины не происходит;
- через **Допуск сгиба** — длину, которую будет иметь круговой участок заданного радиуса и толщины;
- посредством **Вычисление сгиба** — размера, на который уменьшается совокупная длина наружной ломаной кромки объекта после появления в нем сгиба.

Рис. 8.17. Параметры команды **Сгибы**

Кроме того, возможно использование созданных пользователем **Таблиц сгибов**, в которых для любого из указанных способов можно определить величины в зависимости от толщины листа, радиуса и угла гиба. Таблицы могут быть созданы в текстовом файле с расширением btl, а также в формате MS-Excel. В поставку SolidWorks входят образцы таблиц, находящиеся в каталоге, путь к которому прописывается на вкладке **Инструменты** | **Настройки пользователя** | **Месторасположение файлов**. Далее сле-

дует в выпадающем списке **Отобразить папки для** выбрать элемент **Таблицы сгибов**. Как правило, различные таблицы соответствуют определенным материалам или классам материалов. Более подробную информацию о том, как эти таблицы заполняются и используются, можно получить в справочной системе SolidWorks.

Замечание

К сожалению, шаблоны таблиц сгибов, соответствующие русскоязычной версии SolidWorks, сформированы некорректно. Это делает невозможным их использование в программе как для определения параметров гиба, так и для создания посредством команды **Таблица сгибов**. Что касается таблиц, определяющих **Допуск сгиба** и **Вычисление сгиба**, то причиной ошибки является текст "Единицы измерения", присутствующий в ячейке A1 соответствующих файлов MS Excel. Замена его на текст "Единица измерения" устраняет проблему. Примером работоспособной таблицы является файл table4 — metric bend allowance.xls, располагающийся по адресу .../lang/russian/Sheetmetal Bend Tables /bend allowance.

- **Настройки разрыва** — множество кромок, присутствующих в призматических телах, которые должны быть разделены в процессе построения развертки.
- **Изменить направление** — кнопка, после нажатия на которую меняется направление разделения в угле.
- **Зазор по умолчанию** — опция, управляющая необходимостью назначения величины зазора отличного от того, который принят по умолчанию.

Второй подход к созданию объектов из листового материала — использование специальных команд, которые предназначены исключительно для этих целей. Построение начинается с формирования эскиза, после чего подается команда **Базовая кромка/выступ**, которая "сообщает" системе, что объект должен будет подчиняться соответствующим правилам. Панель, содержащая поля, которые определяют исходные параметры детали, показана на рис. 8.18. Оригинальными, относительно команды **Сгибы**, являются поля **Толщина** и **Авто-снятие напряжения**. Последнее поле управляет обработкой зон в углах детали.

Затем становятся доступны команды добавления специальных элементов листового металла в модель детали. Некоторые из них описаны в примерах настоящей главы.

Последний из алгоритмов — построения на базе **Элемента по сечениям сгиба**. Она применяется к двум, в общем случае, пространственным эскизам, содержащим незамкнутые гладкие кривые. В результате получается тело, аналогичное тому, как если бы поверхности, натянутой на эти два сечения, придали бы толщину. Такая поверхность, будь она построена, являлась бы

линейчатой поверхностью с двумя направляющими. Примеры использования данной команды приведены в *разд. 8.2.1*.

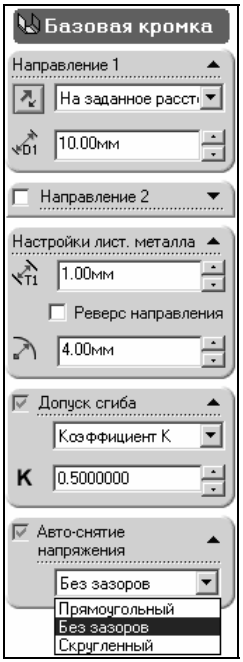


Рис. 8.18. Параметры команды **Базовая кромка/выступ**

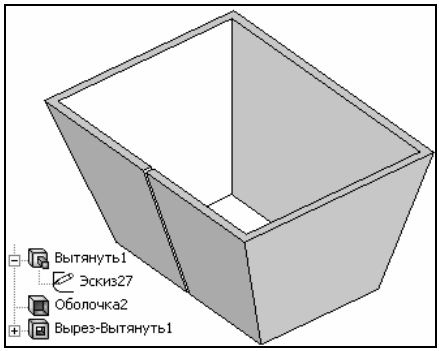


Рис. 8.19. Модель до преобразования ее в деталь из листового металла

Независимо от того, как была построена деталь из листового металла, для отображения ее в плоском состоянии можно использовать команду **Плоский**. Для этого есть и другие способы, например, команда **Разогнуть** позволяет выпрямить выбранные сгибы.

В качестве примера рассмотрим проектирование раструба, показанного на рис. 8.2. Если присмотреться к модели, то обнаружится не вполне корректная обработка кромок на концах сгибов — там появились выступы. В детали до применения к ней команд построения развертки (рис. 8.19) эти выступы отсутствуют. Нежелательны они и в результирующем объекте. Их, разумеется, можно ликвидировать, причем, при определенных условиях, развертка останется доступна.

Попытаемся найти алгоритм, который позволил бы после преобразования модели в деталь из листового металла сохранить верхнюю грань непрерывной. Источник проблем в предыдущей детали, как представляется, в том, что торцовые грани неперпендикулярны стенкам листа. Поэтому в процессе по-

строения развертки система разделяет их на несколько участков. Будем строить твердотельную модель на базе поверхностной. Создаем два незамкнутых сечения (рис. 8.20), а затем используем команду **Поверхность по сечениям**, результат выполнения которой показан на рис. 8.21.

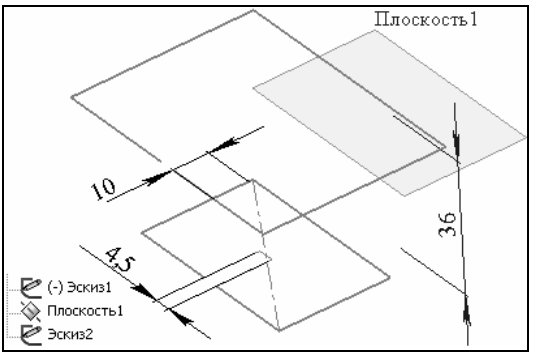


Рис. 8.20. Эскизы для построения вспомогательной поверхности

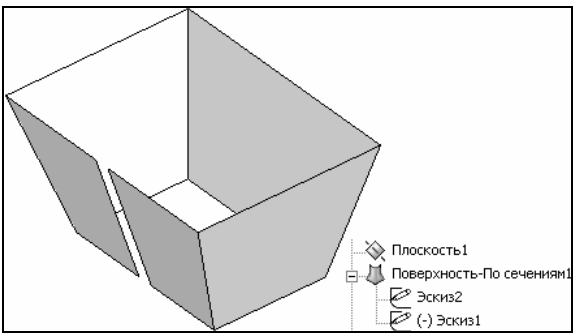


Рис. 8.21. Вспомогательная поверхность

Сопрягаем кромки поверхности скруглением постоянного радиуса (рис. 8.22), после чего придаем поверхности толщину (рис. 8.23).

Подаем команду **Сгибы** (рис. 8.24), используя одну из плоских граней в качестве фиксированной. Коэффициент **К** оставляем равным 0,5, а радиус сгиба по умолчанию можно, в принципе, назначить любым. Однако желательно его взять бóльшим, чем минимальный радиус скругления. Это предотвратит появление незапланированных сгибов. Также следует отключить опцию **Автоснятие напряжения**, чтобы исключить вероятность появления вырезов в зоне углов.

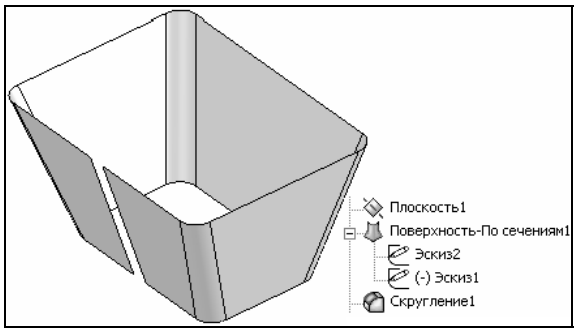


Рис. 8.22. Вспомогательная поверхность со скруглениями

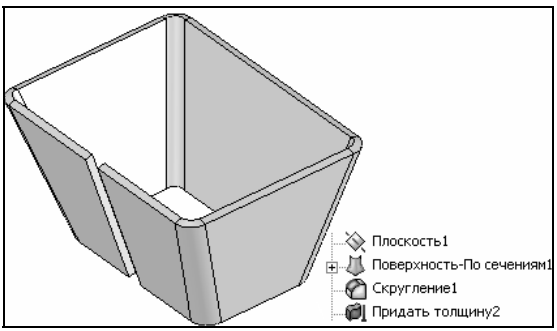


Рис. 8.23. Результат придания толщины поверхности

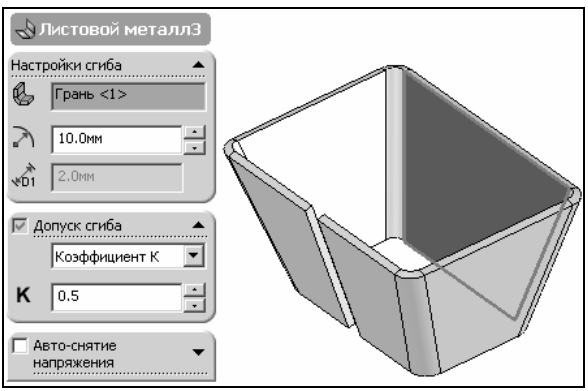


Рис. 8.24. Заполнение панели **Сгибы**

Объект после интерпретации его системой как детали из листового металла показан на рис. 8.26. Изменений в геометрии не произошло, т. е. результат соответствует ожиданиям. Развертку получаем по команде **Плоский** (рис. 8.25).

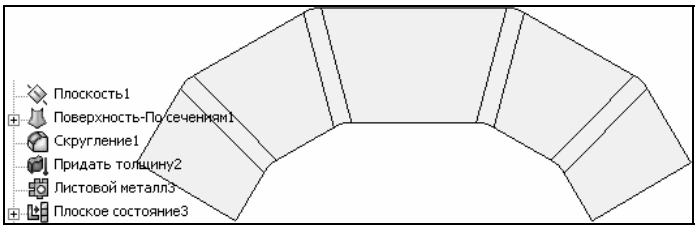


Рис. 8.25. Развертка детали

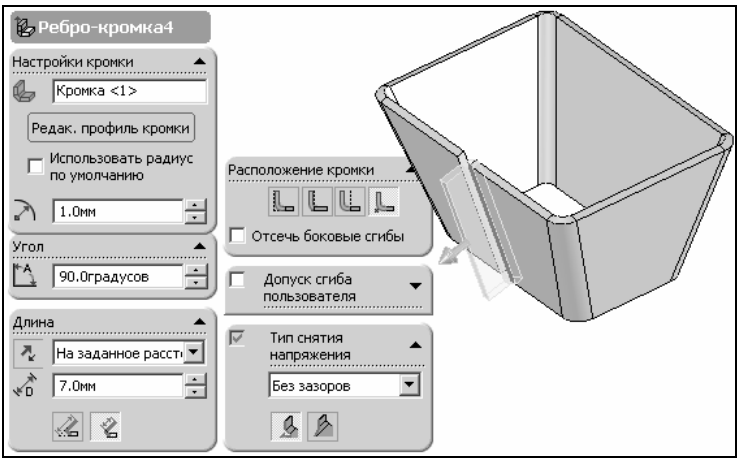


Рис. 8.26. Вставка первого элемента **Ребро-кромка**

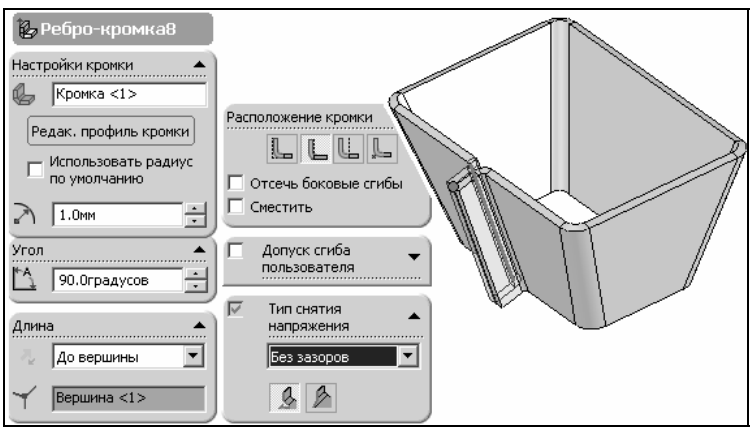


Рис. 8.27. Вставка второго элемента **Ребро-кромка**

Выполним в иллюстративных целях несколько других манипуляций с деталью. На рис. 8.26 показано, как вставляется элемент **Ребро-кромка**. Второй отгиб (рис. 8.27) строим с привязкой к первому, назначая параметр **Длина**

равным **До вершины**. Вставленные объекты не должны пересекаться между собой.

Завершаем работу с моделью, создадим элемент **Каемка**, замыкающий соединение (рис. 8.28). Его параметры также подбираем так, чтобы обеспечить некоторый зазор между новыми объектами и исходным телом.

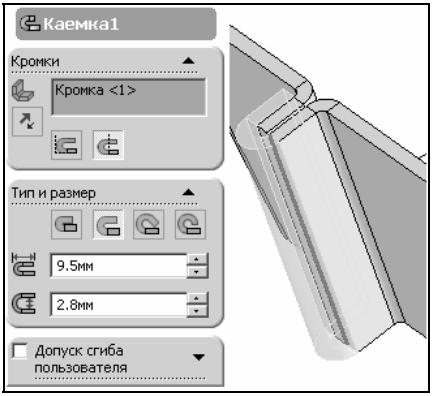


Рис. 8.28. Создание элемента **Каемка**

Результат выполнения команд, а также дерево построения показаны на рис. 8.29. Итоговая развертка приведена на рис. 8.30. Характерным в данном примере является то, что при создании детали последовательно применяются два алгоритма работы с листовым металлом. Первый — развертывание пространственной модели посредством команды **Сгибы**, второй — использование команд, характерных для подхода, где работа начинается с элемента **Базовая кромка**.

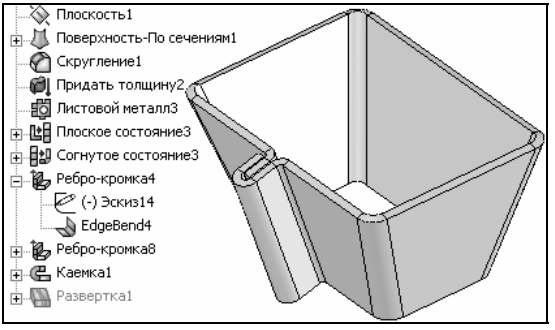


Рис. 8.29. Создание элемента **Каемка**

Завершая раздел, еще раз отметим, что мы рассмотрели весьма ограниченную часть возможностей SolidWorks для работы с листовым металлом. Эта функ-

циональность вполне адекватно описана в документации. К сожалению, содержащиеся в поставке **Таблицы сгибов** содержат неточности (они описаны ранее), характеризуют абстрактные материалы или не заполнены, поэтому для практического использования неприменимы.

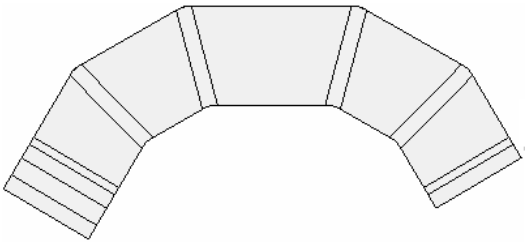


Рис. 8.30. Развертка детали с отгибами

8.3.2. BlankWorks

После подключения BlankWorks как **Добавления** SolidWorks в меню SolidWorks появляется одноименный пункт. При его раскрытии возникают четыре команды (рис. 8.31). Первые три из них продублированы в панели инструментов **BlankWorks** (рис. 8.32). Рассмотрим назначение команд меню.

- **Analyze** (Анализировать) — после подачи этой команды появляется панель **BlankWorks**, в которой присутствуют следующие поля:
  - **Surface Selection** (Выбор поверхности) — назначение поверхностей, для которых будет строиться развертка. Это могут быть как грани собственно поверхностей, так и грани твердого тела. Если в детали необходимо учесть все имеющиеся грани некоторой поверхности, то можно оставить поле пустым. Последнее справедливо, если другие присутствующие в детали поверхности погашены. Программа может воспринимать и несшитые поверхности, однако для контроля отсутствия зазоров и перекрытия желательно иметь их сшитыми;

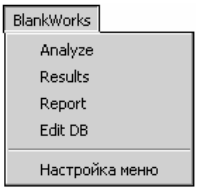


Рис. 8.31. Меню **BlankWorks**

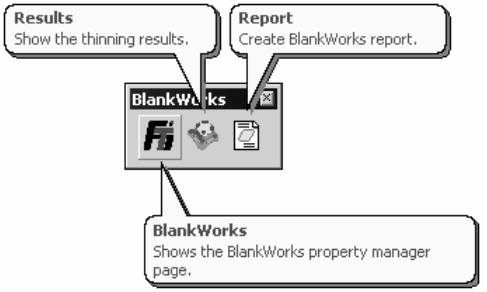


Рис. 8.32. Панель инструментов **BlankWorks**

- **Material type** (Тип материала) — выбор марки материала из числа имеющихся в базе данных программы;
- **Material Thickness** (Толщина материала) — назначение толщины листа материала. Эта величина никак не связана с той информацией, которая может присутствовать в геометрической модели (если, например, деталь была построена как тонкостенная или "из листового металла");
- **Forming Direction | Coordinate system** (Направление формования | Система координат) — назначение системы координат, ось Z которой определяет направление штамповки. Если таковая не указана, в этом качестве будет использоваться ось Z системы координат модели.

Перед выводом панели **BlankWorks** (рис. 8.33) программа анализирует, была ли записана модель SolidWorks на диск — именно файл детали будет служить источником геометрической информации для BlankWorks (скорее всего, необходимые объекты будут преобразованы в формат IGES, после чего программа начнет их обрабатывать). В связи с этим необходимо после внесения изменений в модель SolidWorks сохранить ее на диске.

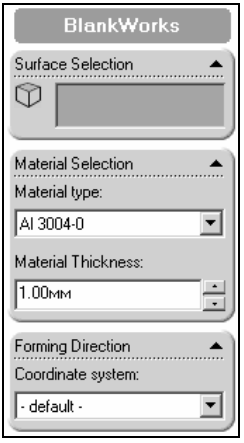


Рис. 8.33. Панель **BlankWorks**

- **Results** (Результаты) — вывод развертки модели, прямоугольного листа ее описывающего, а также детали с распределением прогнозируемого утолщения/утонения.
- **Report** (Отчет) — построение отчета в формате HTML. В него выводится картинка, идентичная отображаемой в качестве результатов, площадь заготовки, ее периметр и размеры минимального описывающего прямоугольника.
- **Edit DB** (Редактировать базу данных) — изменение базы данных по свойствам материалов. Окно базы данных показано на рис. 8.34. В окне присутствует множество характеристик. Реально в данной программе используются только две: **n** — *коэффициент деформационного упрочнения* (показатель степени полинома, аппроксимирующего кривую "напряжение-деформация", определяемый, например, по стандарту ISO 10275, и **r** — *коэффициент перпендикулярной анизотропии* (Lankford coefficient),

получающийся в результате испытаний по ISO 10113. Остальные параметры необходимы для программы FastForm, также разрабатываемой фирмой FTI и имеющей более развитую функциональность.

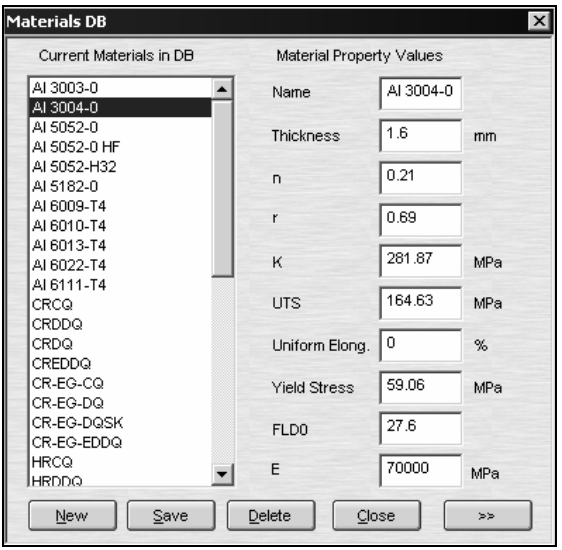


Рис. 8.34. Окно **Materials DB**

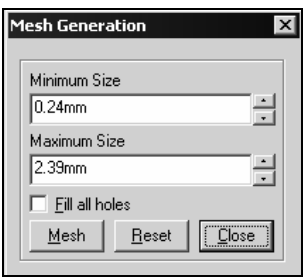


Рис. 8.35. Окно **Mesh Generation**

После нажатия кнопки **OK** панели **BlankWorks** появляется окно **Mesh Generation** (Создание сетки), в котором пользователь должен назначить параметры, управляющие сеткой конечных элементов (рис. 8.35):

- **Minimum Size** (Минимальный размер) — наименьший размер конечного элемента;
- **Maximum Size** (Максимальный размер) — наибольший размер конечного элемента.

На фоне условностей и упрощений, присущих программе, проблема оптимизации сетки не является первостепенной. Как следует из анализа соста-

ва меню, управление сеткой осуществляется только "в целом", локальное уплотнение/разуплотнение не допускается. Поэтому минимальный радиус следует подбирать, во-первых, из условия реализуемости сетки (если программе не удается ее построить, то эту величину рекомендуется уменьшить), а во-вторых, исходя из потребностей получения удовлетворительной точности расчета. Здесь можно руководствоваться только здравым смыслом. Минимальный размер должен обеспечивать аппроксимацию наименьших дуг, как минимум, двумя-тремя элементами. Наибольший же размер следует назначать как 1/3...1/4 максимального размера плоской грани. Как и во всех других программах, базирующихся на сеточных аппроксимациях, эмпирическую оценку точности можно получить, сравнивая результаты расчетов с различной плотностью сетки.

- **Fill all holes** (Заполнить все отверстия) — в случае активизации данной опции программа пытается заполнить все имеющиеся в модели отверстия. Эти действия осуществляются только на уровне сетки, не затрагивая базовые поверхности. Следует отметить, что функция работает достаточно корректно. Заполнение программа, разумеется, выполняет по своей собственной логике, создавая аппроксимацию, близкую к поверхности минимальной площади. Если этот вариант пользователя не устраивает, то он должен "зашить" отверстия посредством инструментов SolidWorks. Функция **Fill all holes** имеет важное побочное действие. Иногда генератор сетки испытывает затруднения в построениях и допускает ошибки в виде щелей. Ручная корректировка сетки невозможна, поэтому активизация данной опции, даже при отсутствии отверстий в явном виде, помогает получить удовлетворительный результат.

Помимо картины пластических деформаций на фоне геометрической модели, программа создает две плоские поверхности. Первая имитирует заготовку, вторая — описывающий ее прямоугольный лист. Чертеж заготовки можно получить стандартными средствами SolidWorks, для чего нужно деталь "перенести" на лист, а затем на получившемся виде скрыть остальные объекты и поставить размеры. Можно поступить проще: удалить ненужные объекты. Какая-либо связь между исходной моделью и результатами работы BlankWorks отсутствует. Более того, при повторении расчета рекомендуется (но не обязательно) уничтожить "последствия" предыдущего анализа в виде двух поверхностей. Если необходимо учесть влияние технологических припусков, то их следует включить в поверхностную модель детали.

Поскольку в документации программы какие-либо сведения о теоретическом базисе, равно как и о пределах применимости, отсутствуют, то суждения можно выносить только на основе интерфейса и результатов расчета. Поскольку программа не требует никакой информации об устройстве формообразующих деталей штампа (пуансон, матрица), его вспомогательных элемен-

тов, а также параметров техпроцесса, то предел ее применимости — оценка размеров заготовки и первичный прогноз технологичности. Причем последнее применимо, скорее всего, к технологическим процессам типа формовки, вытяжки, обжима. Если же предполагается обтяжка, ротационная гибка/формовка или вытяжка, какие-либо операции, связанные с локальным приложением давления, или же деталь получается более чем за один переход, то здесь программа может быть использована только для оценки формы заготовки. Если же техпроцесс предполагает наличие технологических припусков, то их следует включать в модель детали. Заготовка, разумеется, будет получена с учетом этих припусков.

Разрыв металла можно предсказать исключительно по величине прогнозируемого утонения, а появление гофров — только по величине утолщения, безотносительно того, что происходит в зоне сжатия. Более того, если посредством BlankWorks получить заготовку для детали с поверхностью одинарной кривизны, то ее длина — а также все остальные линейные и угловые размеры — будут равны соответствующим размерам на "готовой" детали. Этот свидетельствует о том, что программа использует безмоментные конечные элементы, которые не воспринимают изгиб.

Данные ограничения в значительной степени снимают программы FastForm и FastForm Advanced, также разработанные фирмой FTI. Они учитывают особенности конкретных технологических процессов в значительно большей степени. Существуют также варианты этих продуктов, интегрированные в среду Catia — CatForm и CatStamp.

8.4. Получение заготовки рычага

Рассмотрим задачу получения заготовки для детали, которая имеет твердотельное представление. Она была спроектирована в некотором графическом редакторе, а затем импортирована в SolidWorks без истории построения. Развертка объекта не может быть получена интегрированными инструментами базовой программы, поэтому необходимо использовать специальное приложение.

8.4.1. Постановка задачи

Предыдущие примеры функционирования программы базировались на моделях, при построении которых предполагалось использование BlankWorks или аналога. Эти модели строились в виде поверхностей, которые не имели геометрических неоднозначностей, коротких кромок, узких граней, т. е. могли быть гарантированно аппроксимированы конечными элементами оболочек. Организационно такой подход предполагает независимую работу конструк-

тора оснастки, когда он, по сути, воссоздает геометрию объекта на базе чертежа или модели, взятых у проектировщика изделия. Надо сказать, что существующая на заводах практика, в общем, соответствует этой схеме. Если брать простые изделия, то она вполне приемлема — здесь легче все построить "с нуля", гарантируя пригодность модели для технологических приложений. Для изделий со сложной формой этот путь не всегда удобен. Во-первых, велика трудоемкость, а также присутствует вероятность появления ошибок. Они могут возникнуть на любом шаге последовательности: модель детали конструкторская → чертеж детали → модель детали технологическая → модель оснастки → чертеж оснастки. Есть варианты, когда технологическую модель попросту нельзя воспроизвести по чертежу (присутствуют сплайновые поверхности, поверхности свободной формы и т. д.), а также в ситуации, когда чертежа попросту нет.

К сожалению, доступность твердотельной модели изделия не гарантирует легкую жизнь инструментальщику. Наглядный пример показан на рис. 8.36. Не слишком сложный, на первый взгляд, рычаг, спроектирован так, что конструктору штампа (деталь должна изготавливаться из листа) перед началом основной его работы придется исправить немало ошибок. Модель, допуская (с известными уловками) оформление конструкторской документации, весьма неудачна для следующих этапов жизненного цикла. Мы не будем касаться вероятных проблем, связанных с неудовлетворительной технологичностью отдельных ее элементов, а также затрагивать смежные вопросы, касающиеся обеспечения точности. Это субъект деятельности технологических программных продуктов. Остановимся на простейшей из задач: получить заготовку для штамповки.

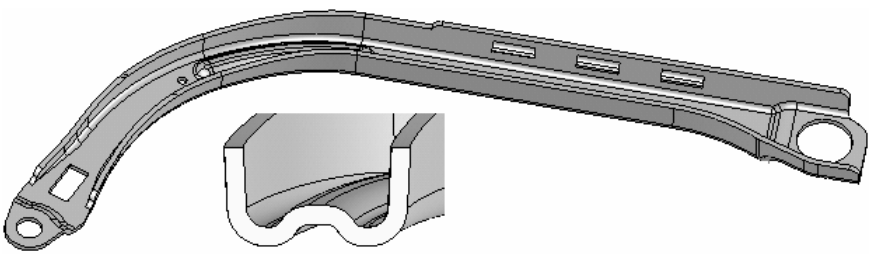


Рис. 8.36. Твердотельная модель рычага

8.4.2. Анализ

Проблемные места, которые не дают возможности "с ходу" построить срединную поверхностную модель, изображены на рис. 8.37. На рисунке слева показана зона, порождающая неоднозначность создания этой модели. Эта

неоднозначность есть следствие более серьезных проблем, связанных с технологической реализуемостью (или, точнее, нереализуемостью) подобных элементов. Рисунок в середине свидетельствует о еще более грубой ошибке — неправильна сама твердотельная модель. И наконец, рисунок справа. На нем показан участок наружной (выпуклой) поверхности детали. Видна узкая грань, которая с высокой вероятностью создаст проблемы при попытке построить срединную поверхность и, если это все-таки получится, в ходе разбиения на конечные элементы.

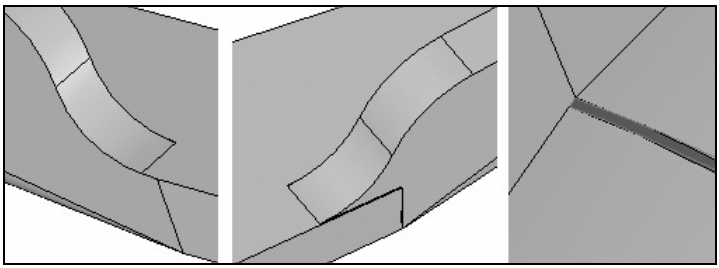


Рис. 8.37. Зоны, порождающие проблемы при реализации поверхностного представления

Приступая к действиям, предположим, что последовательность операций по изготовлению детали подразумевает выполнение отверстий и просечек на уже согнутой заготовке.

8.4.3. Подготовка поверхностной модели

Геометрия детали весьма сложная, поэтому получить искомую срединную поверхность посредством команды SolidWorks **Промежуточная поверхность** нереально. Используем команду **Эквидистанта к поверхности**, используя в качестве источника внутреннюю или наружную поверхности детали. Смещаем, разумеется, только те поверхности, которые нужны для получения заготовки без отверстий. Как и следовало ожидать, получение эквидистанты на базе граней, принадлежащих наружной (выпуклой) поверхности, невозможно. Причина — уничтожение в процессе смещения узких граней при отсутствии системы автоматического восстановления геометрии. Попытка сместить внутренние грани на расстояние, равное половине толщины листа, оказывается успешной. На рис. 8.38 показана получившаяся поверхность. На ней отсутствуют грани, соответствующие проблемным зонам твердотельного представления. Они исключены по двум причинам: принципиальной невозможности получить их, а также технологической нереализуемости объекта.

Для удаления тонкого "отростка" возле прямоугольного отверстия сначала командой **Линия разъема** выделяем его в отдельную грань (фрагмент в центре на рис. 8.38), а затем эту грань удаляем (команда **Грань** | **Удалить**).

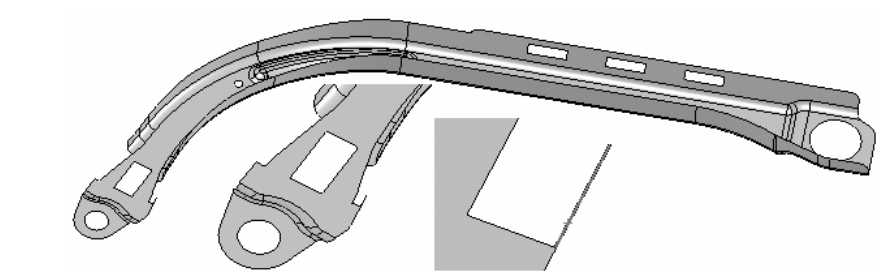


Рис. 8.38. Результат построения поверхности эквидистантой к внутренней части детали

Следующий шаг — заполнение отверстий. Для этого есть, как минимум, два инструмента: первый — команда **Заполнить поверхность**, второй — команда **Не отсекать часть поверхности**. В данной ситуации результаты будут тождественны, однако для криволинейных поверхностей последний вариант более употребителен, поскольку он, по сути, восстанавливает исходную поверхность, используя ее внутреннее представление. Результат выполнения операции показан на рис. 8.39. Получить его можно за одно обращение к команде, указывая все кромки всех заполняемых отверстий.

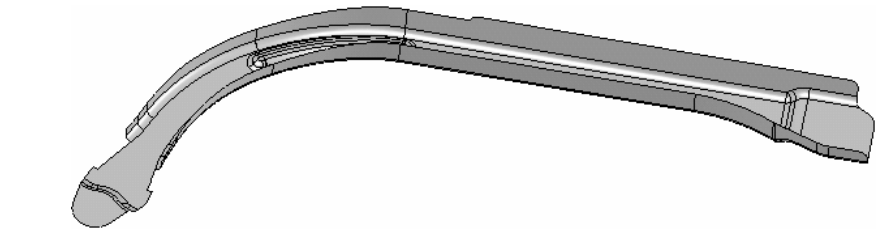


Рис. 8.39. Заполнение отверстий

В отсутствие чертежа или другой документации источником информации о вертикальных размерах могут быть только поверхности, взятые с твердотельной модели. Получаем их копии как эквидистанты с нулевым смещением (рис. 8.40).

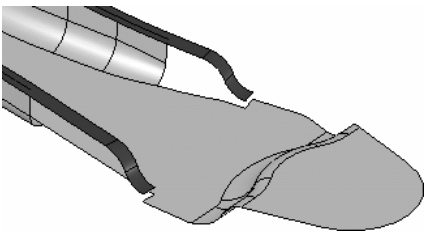


Рис. 8.40. Выделение "ограничителей" в направлении вертикали

Получили вполне ожидаемый недочет: ограничивающая поверхность не стыкуется с уже построенной. "Терапевтических" инструментов для ее удлинения без нарушения содержания изделия нет никаких. Поэтому начинаем "хирургические" манипуляции. Удаляем нижнюю грань ограничивающей полосы — она препятствует созданию связи между этой полосой и искомой поверхностью (полоса, расположенная слева, на рис. 8.41), а затем связываем оставшуюся часть полосы с основной поверхностью. Для этого используем команду **Поверхность по сечениям** с выбором для опции **Начальные/конечные ограничения** значения Касательность к грани или Кривизна к грани. Для правой полосы результат показан на рис. 8.41. Отметим, что эти операции создали отличия между базовым объектом и его поверхностной моделью.

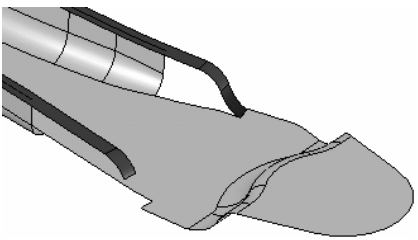


Рис. 8.41. Модификация ограничивающей поверхности

После стыковки граней стали очевидны проблемы, связанные с неоднозначностью перехода от твердотельного представления к поверхностному. Предполагаем, что наружный контур плоской грани в зоне конца гиба является сплайном, один из концов которого связан сопряжением Касательность с линией, по которой сопрягаются плоская и криволинейная поверхности. Создаем на плоской поверхности эскиз, две стороны которого совпадают с кромками этой поверхности, а третья — сплайн. На базе этого эскиза строим плоскую поверхность (рис. 8.42), которую затем сшиваем с имеющимся объектом (рис. 8.43).

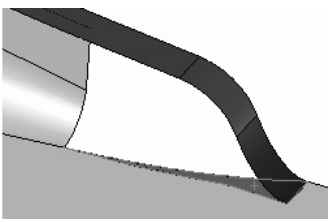


Рис. 8.42. Создание плоской поверхности

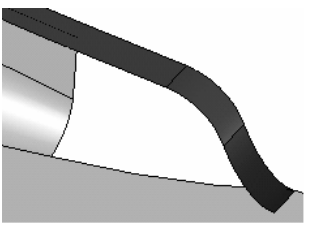


Рис. 8.43. Превращение двух поверхностей в монолитную

Создаем заплату, соединяющую две кромки. Используем команду **Поверхность по сечениям** с сохранением касательности с поверхностями, которым

эти кромки принадлежат (рис. 8.44). Подбирая величину параметра **Закончить касание** | **Длина**, добиваемся приемлемой формы поверхности. Надо сказать, что сохранение касательности при сопряжении с плоской поверхностью по всей длине кромки не достигнуто.

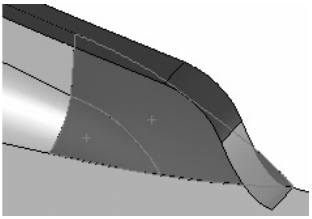


Рис. 8.44. Создание заплаты

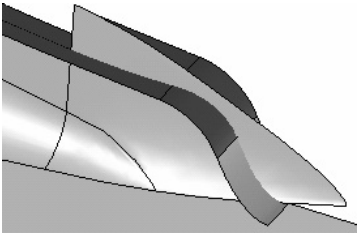


Рис. 8.45. Продление заплаты

Полученная заплата на одном из участков выходит за пределы ограничивающей полосы, а на другом — не примыкает к ней. Командой **Удлинить** выводим кромку за пределы ограничивающей поверхности (рис. 8.45).

На этом шаге потребуется ограничивающая поверхность, построенная ранее. Используем ее как ножницы для ликвидации "излишков" в команде **Отсечь** (рис. 8.46), а затем скрываем ее или удаляем командой **Грань** | **Удалить**.

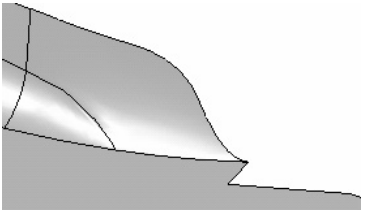


Рис. 8.46. Отсечение излишков на заплате

Неожиданным следствием этой операции стало отсечение "полезного" участка поверхности. Поскольку он плоский, то восстанавливаем его аналогично тому, как это делалось ранее (см. рис. 8.42), а затем подшиваем к базовой поверхности (рис. 8.47 и 8.48).

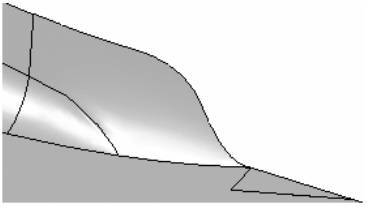


Рис. 8.47. Создание плоского участка поверхности

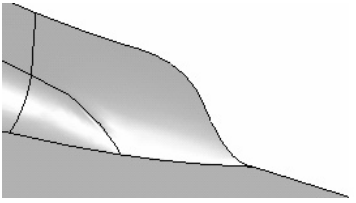


Рис. 8.48. Результат слияния поверхностей

Проделав аналогичные операции для противоположной стороны объекта, получаем поверхностную модель рычага (рис. 8.49 и 8.50), которая пригодна для анализа штампуемости.

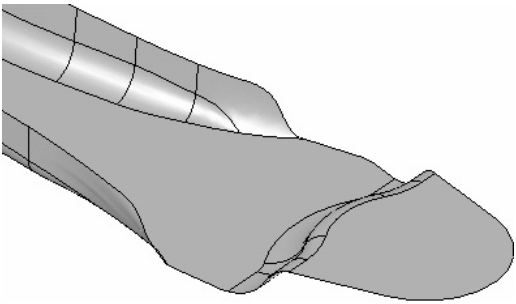


Рис. 8.49. Поверхностная модель рычага — восстановленная часть

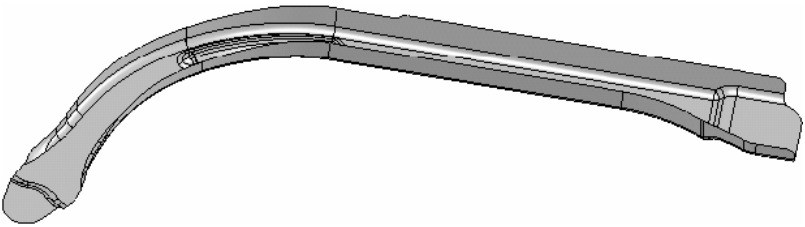


Рис. 8.50. Поверхностная модель рычага

8.4.4. Решение

Имея поверхностную модель, удостоверимся, что деталь аппроксимирована единственным объектом. Для облегчения работы все остальные поверхности удаляем: наилучший инструмент для этого — команда **Удалить тело**, вызываемая из контекстного меню папки **Тела поверхности** в Дереве конструирования SolidWorks. Также не забываем проконтролировать факт того, чтобы ось Z исходной системы координат была направлена вдоль траектории штампа. Если это не так, то создаем локальную систему координат, удовлетворяющую этому требованию.

Последовательность дальнейших операций вполне очевидна:

- подача команды **Analyze** в BlankWorks;
- выбор материала;
- назначение толщины;
- выбор системы координат, определяющей направление движения штампа;

- выбор обрабатываемых поверхностей, но поскольку все они сведены к единственной, то можно в процессе диалога активизировать опцию **All Bodies** (Все тела);
- назначение минимального и максимального размера элемента сетки (желательно, чтобы вдоль каждой из криволинейных образующих располагалось не менее чем 2—3 элемента;
- создание сетки (результат показан на рис. 8.51), причем для страховки можно активизировать опцию **Fill all holes** (Заполнить все отверстия);
- визуальный контроль сетки;
- решение.

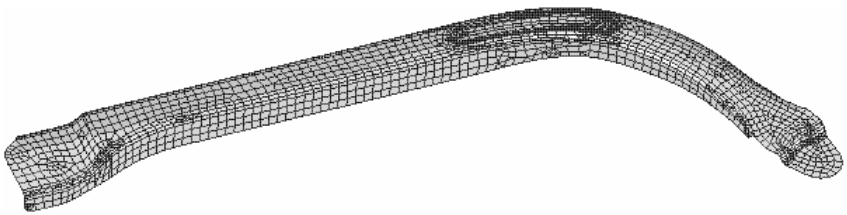


Рис. 8.51. Сетка на модели

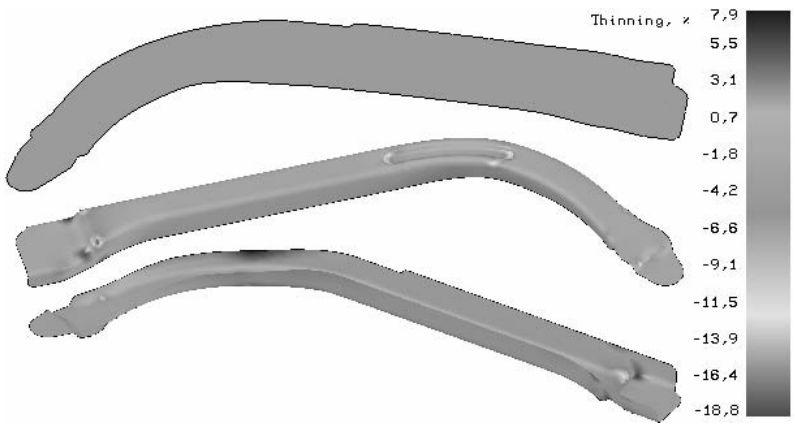


Рис. 8.52. Заготовка листа и распределение деформаций

Результаты расчета: заготовка, а также оценка утолщения/утонения показаны на рис. 8.52. Из-за того что в программе нельзя настраивать палитру цветов на диаграмме, то зоны утолщения и утонения на иллюстрации показаны одинаково темным цветом. Утолщения локализованы в зоне изгиба рычага на краях отгибов. Это свидетельствует об опасности появления гофров. Утонения располагаются на вогнутых поверхностях двойной кривизны. Такое яв-

ление чревато вероятностью разрыва, но для данной детали это, по всей видимости, некритично.

8.4.5. Выводы

Рассмотренная задача относится к категории тех, которые зримо демонстрируют эффективность программ класса BlankWorks. Построение заготовки вручную связано с большим количеством неоднозначностей. Компьютер же — при существовании корректной поверхностной модели — решает задачу в течение нескольких минут. Последовательность "твердое тело → поверхность" для проектирования оснастки может быть приемлема, только если конструктор изделия не забывает о его технологической реализуемости. Надо сказать, что процедуры SolidWorks для работы с листовым материалом устроены так, что она в значительной степени гарантируется. Эти же функции позволяют получить и заготовку листа, но только для поверхностей одинарной кривизны. Если точная развертка невозможна, то на выходе имеем твердотельный объект, способность которого быть развернутым всецело зависит от квалификации конструктора. Поэтому на практике этапы реализации проекта таковы: плоская заготовка → штампованный объект → развертка этого объекта → внесение изменений в заготовку → ...

Как оказалось, наиболее трудоемкой операцией при использовании программы BlankWorks является получение подходящей поверхностной модели. В связи с этим было бы разумно сделать первичным именно это ее представление с последующим получением твердого тела. Такой алгоритм, однако, требует решения организационных вопросов, поскольку конечная цель конструктора — чертежи, а поверхностная модель только промежуточный и не всегда обязательный этап.

8.5. Выводы

Мы проанализировали два подхода к построению заготовок деталей из листового металла. Первый — использование базовых инструментов SolidWorks для обработки объектов, имеющих точные или приближенные развертки. Это призматические детали или объекты на базе поверхностей одинарной кривизны. Здесь функциональности SolidWorks вполне достаточно для решения абсолютного большинства реальных задач. Более того, если оказывается, что развертку построить невозможно, то причиной является технологическая нереализуемость детали. Для работы с поверхностями двойной кривизны следует применять программу BlankWorks или одну из родственных ей, но имеющую более продвинутые возможности. И тот и другой варианты требуют знания адекватных характеристик материала. Это позволит получить прогноз размеров заготовки с наибольшей точностью.

Известны также программы, позволяющие реализовать обе из этих методик. Одним из примеров является приложение Logopress (**http://www.logopress3.com**). Основное его предназначение — проектирование штамповой оснастки, однако в нем также присутствуют функции построения точных и условных разверток. Причем исходная модель может иметь как твердотельное, так и поверхностное представление. Допускается использовать функциональность, предназначенную для обработки точно развертываемых объектов, для обработки деталей, образованных совокупностью плоских элементов листа, но содержащих выштамповки, ребра, другие элементы, делающие неприменимыми стандартные функции SolidWorks. В такой ситуации пользователь должен выделить такие конструктивные элементы, а затем указать системе, что они исключаются из рассмотрения. Важной особенностью программы является способность обрабатывать объекты, импортированные в SolidWorks без сохранения семантики (дерева построения), из других программ пространственного моделирования. Имеющаяся функциональность позволяет восстановить заготовку с минимальной трудоемкостью.

ГЛАВА 9

Светотехнический анализ и проектирование (TracePro, ReflectorCAD)

В главе рассматриваются программные продукты для светотехнического анализа — TracePro (рис. 9.1) и для проектирования отражателей — ReflectorCAD. Акцент сделан на анализе возможностей продуктов, наиболее востребованных в инженерной практике.

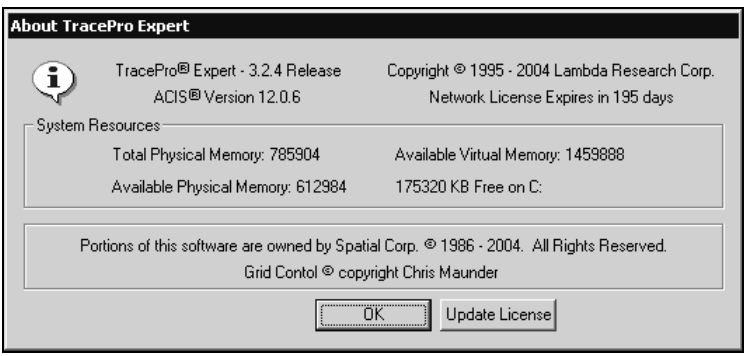


Рис. 9.1. Информационная панель TracePro

9.1. Назначение

Программное обеспечение для моделирования оптических явлений и объектов не слишком часто фигурирует в технических и компьютерных изданиях. С одной стороны, это объясняется недостаточной востребованностью соответствующих инструментов — оптическая и светотехническая промышленность практически не развиваются. Кроме того, в отличие от требований, например, к механическим или тепловым характеристикам, которые определя-

ют функциональность объектов, запросы к светотехническим параметрам не всегда формулируются строго, а, будучи сформулированы, нередко нарушаются. Например, если приглядеться внимательно к бытовым осветительным приборам, можно обнаружить примеры весьма неудачных проектов: низкий КПД, неравномерность светового потока, локальный перегрев. В качестве компенсации потребителю предлагается причудливый дизайн, который и служит основным критерием для выбора. После установки прибора возникает ощущение дискомфорта, формализовать которое очень трудно. Аналогичная ситуация в автомобилестроении: динамика, тормозной путь — объективные востребованные характеристики, качество же подсветки панели приборов — то, на что внимание обращают только после покупки. То же, кстати, касается системы отопления и вентиляции. Базовые технические требования в принципе соблюдены, но ощущение комфорта отсутствует. В автомобильной промышленности у ведущих производителей программное обеспечение для светотехники по значимости стоит на том же уровне, как для динамики и прочности.

Еще один фактор, сдерживающий "потребление" данного типа программ, — банальная неосведомленность об их наличии и функциональности. Разработки последних пяти-семи лет практически не осваиваются в высшей школе — их не было тогда, когда училось и активно работало поколение современных преподавателей.

По функциональности оптические программы можно разделить на несколько групп:

- инструменты для проектирования и расчета детерминированных оптических систем (Straight ray analysis — анализ методом прямых лучей). К ним относятся объективы фотоаппаратов, телескопы, бинокли и т. д. Здесь может быть предсказана траектория каждого светового луча. Одновременно осуществляется управление любым световым лучом;
- программы для расчета оптических систем, где предсказать ход луча невозможно. В английской терминологии этот процесс называется Non-sequential ray tracing — непоследовательная трассировка лучей;
- программы для проектирования светотехники, понимаемой как недетерминированная оптическая система (светильники, автомобильные фары и фонари);
- средства для обработки результатов оптических измерений, подготовки математических моделей источников света.

Первый и последний пункты лежат вне пределов данной книги. Эти задачи интересуют весьма узкий круг специалистов, требуя сугубо специальных знаний. Мы же рассмотрим две программы: TracePro — разработку фирмы

Lambda Research Corporation, (**http://www.lambdares.com**), и ReflectorCAD — разработку Breault Research Organization, Inc. (**http://www.breault.com**). Еще один весьма совершенный инструмент проектирования светотехники LucidShape заслуживает отдельного анализа (**http://www.brandenburg-gmbh.de**).

9.2. Теоретическая база

TracePro — универсальная программа, способная моделировать крайне широкий круг явлений и объектов. Исчерпывающее теоретическое описание, сопровождаемое адекватным набором примеров, потребовало бы специальной монографии. Только руководство пользователя занимает более трехсот страниц. И это при отсутствии примеров реальных задач. Поэтому ограничимся изложением того материала, который позволит осознанно ставить и — на инженерном уровне — решать актуальные проблемы, не требуя навыков научного исследования. Граница, которая разделяет эти уровни — то, чем отличаются задачи геометрической и волновой оптики. Последняя исследует явления интерференции, дифракции, поляризации, других видов зависимости оптических параметров от длины волны. Мы полностью исключим эти моменты из рассмотрения, ограничившись перечислением соответствующих функций программы. Принципиальные вопросы функционирования светотехнических программ были изложены в *разд. 2.4.*

Изложим базовые понятия светотехники, необходимые для оценки функциональности программы. Конкретные факты, связанные с работой процедур, будут сопровождать описание элементов интерфейса.

Сила света в заданном направлении — это световой поток от источника, заключенный в малом телесном угле. Единица измерения — кандела (кд или cd). Также для измерения силы света используется свеча — 1 свеча = 1,0005 кд.

Световой поток — это энергия, излучаемая источником в видимом диапазоне длин волн. Единица измерения светового потока — люмен (лм или lm). Это поток, который излучается источником с силой света 1 кд в телесном угле 1 стерадиан (далее — ср). Световой поток — основная характеристика источника света.

Освещенность — отношение суммарного потока, упавшего на некоторую поверхность, к площади этой поверхности. Единица измерения освещенности — люкс (лк или lux). Это освещенность такой поверхности, на каждый квадратный метр которой равномерно падает поток в 1 лм.

Яркость — это отношение силы света элемента поверхности в заданном направлении к площади его проекции на плоскость, перпендикулярную этому направлению. Единица измерения яркости — кд/м^2. Это яркость поверхности,

которая в перпендикулярном направлении излучает силу света 1 кд с 1 м^2. Также для измерения яркости используется нит — 1 нит = 1,0005 кд/м^2.

Светимость — это отношение потока источника к площади источника. Единица измерения — лм/м^2. Это светимость такой поверхности, которая излучает с 1 м^2 световой поток равный 1 лм.

Иногда для описания оптических процессов используются энергетические величины. Перечислим некоторые из них.

Поток излучения — величина энергии, переносимой полем в единицу времени через заданную площадку. Единица измерения — Вт.

Поверхностная плотность потока энергии (Энергетическая освещенность при освещении поверхности потоком) — величина потока, приходящегося на единицу площади. Единица измерения — Вт/м^2.

Энергетическая яркость — величина потока, излучаемого единицей площади в единицу телесного угла. Единица измерения энергетической яркости — Вт/(ср·м^2).

Плоский ламбертовский излучатель — источник, диаграмма распределения силы света которого имеет вид окружности (рис. 9.2). Этот тип излучения, как правило, используется для моделирования излучения нитью накаливания, поверхностью люминесцентных ламп и т. д.

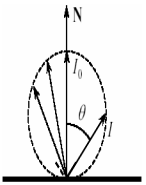


Рис. 9.2. Плоский ламбертовский излучатель

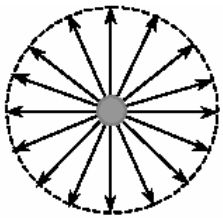


Рис. 9.3. Сферический ламбертовский излучатель

Сферический ламбертовский излучатель — источник, распределение силы света которого одинаково во всех направлениях (рис. 9.3). Этот тип излучения, как правило, используется для моделирования излучения, порождаемого нитью накаливания, поверхностью люминесцентной лампы и т. д.

Угол падения — это угол между лучом, падающим на преломляющую или отражающую поверхность, и нормалью к поверхности в точке падения.

Угол преломления — это угол между преломленным лучом и нормалью к поверхности в точке преломления.

Угол отражения — это угол между отраженным лучом и нормалью к поверхности в точке отражения.

Закон преломления — падающий луч, преломленный луч и нормаль к поверхности лежат в одной плоскости; произведение показателя преломления на синус угла между лучом и нормалью сохраняет свое значение при переходе в следующую среду.

Полное внутреннее отражение — при переходе луча из одной прозрачной среды в другую часть энергии пропускается, а другая — отражается; если свет переходит из оптически более плотной среды в менее плотную, и если синус угла падения больше или равен отношению коэффициента преломления среды, в которую луч попадает, к коэффициенту преломления среды, из которой он идет, то весь световой поток отражается.

Оптическая длина луча — произведение показателя преломления на геометрическую длину пути.

Световой поток, падающий на тело, можно разделить на три составные части: отраженный, поглощенный и прошедший.

Коэффициент отражения — отношение отраженного светового потока к падающему.

Коэффициент поглощения — отношение поглощенного светового потока к падающему.

Коэффициент пропускания — отношение прошедшего светового потока к падающему.

TracePro моделирует не только эффекты зеркального отражения, преломления и пропускания, но и рассеяние при взаимодействии света с поверхностью. На рис. 9.4 показана геометрическая модель, соответствующая самому общему случаю. Падающий на поверхность прозрачного тела световой поток разделяется на пять составляющих:

- поглощенную (она на рисунке не показана);
- зеркально отраженную;
- преломленную;
- отраженную в рассеянном виде;
- прошедшую внутрь тела в рассеянном виде.

Распределением рассеянного света управляет BSDF — Bidirectional Scattering Distribution Function (Двунаправленная функция распределения рассеяния). Это отношение величины энергетической яркости L, излучаемой поверхностью в некоторый телесный угол, к величине энергетической освещен-

ности E, породившей эту яркость. При этом как направление потока энергии, создающего освещенность, так и направление, относительно которого измеряется яркость, определяются двумя углами в сферических координатах:

$$BSDF\left(\theta_i, \psi_i, \theta_s, \psi_s\right) = \frac{dL_s\left(\theta_s, \psi_s\right)}{dE_i\left(\theta_i, \psi_i\right)}.$$

Единица измерения *BSDF* — 1/ср.

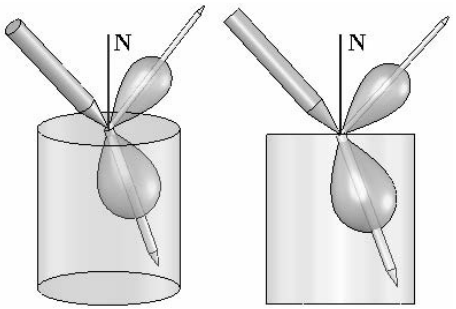


Рис. 9.4. Взаимодействие светового потока с поверхностью прозрачного тела (аксонометрическая и ортогональная проекции)

Поскольку явлений рассеяния при взаимодействии с поверхностью может быть три: при отражении от поверхности, при прохождении через поверхность и при дифракции (это явление мы рассматривать не будем), то фактически необходимо иметь дело с тремя типами распределений:

- *BRDF* (Bidirectional Reflectance Distribution Function) — двунаправленная функция распределения рассеяния при отражении;
- *BTDF* (Bidirectional Transmittance Distribution Function) — двунаправленная функция распределения рассеяния при пропускании;
- *BDDF* (Bidirectional Diffraction Distribution Function) — двунаправленная функция распределения рассеяния при дифракции.

Для BSDF в TracePro предусмотрены различные типы зависимостей, в частности, для изотропных и анизотропных поверхностей. Однако чем более "точной" является оптическая модель, тем на большее число экспериментальных параметров она опирается. Поэтому в реальных задачах светотехники используется только модель *ABg*, описываемая зависимостью вида:

$$BSDF = \frac{A}{B + \left|\vec{\beta} - \vec{\beta}_0\right|^g}.$$

Здесь $\vec{\beta}_0$ и $\vec{\beta}$ — проекции на плоскость раздела сред единичных векторов, направленных вдоль идеально отраженного луча и в направлении, в котором идет рассеянный луч (рис. 9.5).

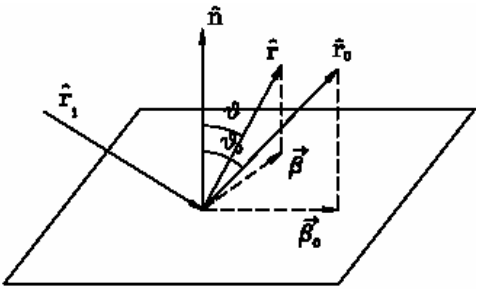


Рис. 9.5. Взаимодействие светового потока с поверхностью прозрачного тела

Коэффициенты в модели *ABg* подчиняются следующим закономерностям:

- *B* должен быть больше нуля, за исключением случая, когда *g* равен нулю;
- если *g* равен нулю, то *BSDF* примет значение $A/(B + 1)$, а доля рассеянной энергии станет равной $\pi \cdot A/(B + 1)$. Это соответствует ламбертовому характеру рассеяния;
- если *g* меньше нуля, то *BSDF* возрастает с увеличением $|\beta - \beta_0|$. Некоторые поверхности обладают такими свойствами.

Величина *g*, как правило, находится между 1 и 3, в зависимости от параметров среды и шероховатости поверхности. Величина *B*, как правило, близка к 0,001 или меньше. Параметр *A* может варьироваться в широком диапазоне.

Еще одно явление, имеющее место при распространении света в неметаллических материалах, — объемное рассеяние. Суть его в том, что в процессе прохождения через материал происходит "размазывание" луча относительно исходного направления. В программе это моделируется анализом вероятности отклонения луча при прохождении некоторого пути. Если предусмотрена возможность расщепления луча в этот момент, то он разделяется, как минимум, на две составляющих, причем первая — прямолинейный луч (потерявший, естественно, часть энергии), а другие лучи начинают нести рассеянную составляющую. Объемное рассеяние формализуется в программе посредством функции SDF — Scattering Distribution Function (Функция распределения рассеяния), представляющей собой отношение рассеянного светового потока в некотором направлении относительно входящего светового потока. Одна из наиболее употребительных моделей основана на функции Henyey-Greenstein:

$$SDF = \frac{1-g^2}{4\pi\left(1+g^2-2g\cos(\vartheta)\right)^{3/2}}.$$

Здесь:

- ϑ — угол между исходным лучом и направлением, в котором вычисляется плотность рассеянной энергии;
- g — *коэффициент анизотропии*, который находится в интервале [–1, +1]. Если g положителен, то рассеянный свет идет преимущественно в направлении падающего луча, если отрицателен — в обратном направлении.

9.3. Интерфейс

TracePro имеет Windows-интерфейс. В пакете предусмотрены **System Tree** (Дерево проекта), падающее меню, **Toolbars** (Панели инструментов). Большинству объектов поставлены в соответствие контекстные меню, вызываемые щелчком правой кнопки мыши при нахождении над объектом или после его активизации. Разумеется, программа имеет контекстно-зависимый Help, однако окна программы соответствующей клавиши не содержат. Поэтому для получения справки нужно или искать название команды, или окна среди статей (**Help Topics**) или, активизировав меню (окно), нажать на кнопку **Help**, после чего курсор принимает форму вопросительного знака. Им нужно указать на исследуемый объект. Для некоторых окон справка доступна после нажатия клавиши <F1> на клавиатуре.

В целом же интерфейс TracePro не слишком выразительный, однако он обеспечивает приемлемую функциональность и производительность.

9.3.1. Дерево проекта

Дерево проекта (аналог SolidWorks — дерево конструирования) TracePro функционально схоже с проводником Windows. По умолчанию оно располагается слева (рис. 9.6), однако подбором настроек его можно перенести вправо. Размеры областей, занимаемых деревом и моделью, можно изменять перемещением разделительной полосы. Дерево содержит объекты, присутствующие в модели, образуя иерархическую структуру в том смысле, что объекты делятся на родителей и потомков. Но уровней всего два: первый — объекты, содержащие поверхности; второй — поверхности. В нижней части ветви, соответствующей объекту или поверхности, показаны назначенные им свойства. Операции в дереве являются вполне традиционными: можно переименовывать, скрывать, удалять объекты. Переупорядочивать, создавать новые, копировать посредством совместно нажатой клавиши <Ctrl> и левой

кнопки мыши нельзя. В отличие от проводника Windows, имена в пределах одного уровня могут дублироваться.

Принципиальным отличием структуры данных TracePro от SolidWorks является отсутствие иерархии объектов. Это значит, что объект, будучи создан, теряет какую-либо связь с остальными. Это происходит, даже если он получен копированием имеющегося. Соответственно уничтожение элемента структуры никак не влияет на то, что остается.

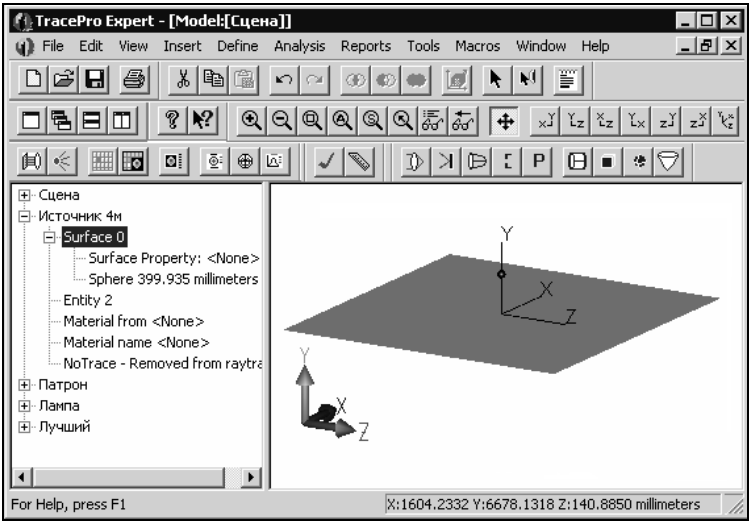


Рис. 9.6. Дерево проекта TracePro

Использование дерева оптимально для выбора объектов, назначения им оптических свойств, а также контроля наличия свойств. Польза дерева для выбора неоспорима в ситуациях, когда нужно выделить грани, находящиеся внутри тел, или близко расположенные грани. Следует отметить, что указание, например, граней непосредственно на экране в TracePro иногда сопровождается неточностями. Это выражается в том, что одновременно с той гранью, на которую направлен указатель мыши, активизируются соседние поверхности. Назначение оптических свойств в дереве возможно для группы однородных объектов. Для этого они выбираются при нажатой клавише <Ctrl>. Забегая вперед, рассмотрим более подробно процесс назначения элементам модели физических характеристик. Свойства можно присваивать как тем объектам, которые могут ими обладать, так и тем, которые находятся в отношении "родитель — потомок". Характерный пример — взаимоотношения тел и поверхностей. Выбрав тело, можно пользоваться окнами, предназначенными для описания параметров поверхностей. Например, назначать

оптические характеристики и даже создавать источник света. Программа автоматически распределяет параметры между объектами соответствующих типов, т. е. источником света в TracePro может быть только поверхность, а материал следует назначить для тел (отдельно рассматривается случай, когда объект состоит их поверхностей). Последнее значит, что если для выбранной поверхности назначается материал, то он будет присвоен телу, которому эта поверхность принадлежит.

9.3.2. Меню

TracePro имеет стандартное падающее меню, а также предоставляет контекстные меню. Как и большинство Windows-программ, падающее меню содержит полное множество команд. Максимальная степень вложенности падающего меню — два. Расшифровка команд будет приведена ниже. Здесь же отметим, что большинство окон форм, появляющихся после вызова команд меню, являются немодальными, т. е. могут функционировать одновременно с другими окнами. Учитывая, что программа допускает одновременное существование нескольких моделей (рассчитываться одновременно они не могут, а попытка это сделать может прекратить работу программы), это требует от пользователя определенного внимания. При переключении между моделями окна форм не отключаются: в них появляются данные, соответствующие активным объектам.

Контекстных меню, по сути, два. Первое появляется после щелчка правой кнопкой мыши над полем для Дерева проекта, второе — над окном, где находится модель. Если соответствующие области пусты, то номенклатура команд в меню приводится в соответствие с доступной функциональностью. Наиболее рационально посредством контекстного меню назначать и контролировать свойства объектов. Для этого нужно выделить их мышью и подать команду **Properties** (Свойства). Все команды контекстных меню имеются в падающем меню и также дублируются в панелях инструментов. Поэтому мы не будем их рассматривать в данном разделе.

9.3.3. Панели инструментов

Панели инструментов TracePro содержат ограниченное подмножество команд. Их содержание не может настраиваться: допускается только включать и отключать отдельные панели. Для этого предназначено окно **Toolbars** (Панели инструментов), вызываемое соответствующей командой из меню **View** (Вид). Панели показаны на рис. 9.7—9.14, а их содержимое расшифровано в табл. 9.1—9.8.



Рис. 9.7. Панель **File**

Таблица 9.1. *Содержимое панели* ***File***

Кнопка	Ярлык		Функция
	**New**	Новый	Создание нового документа
	**Open**	Открыть	Открытие существующего документа
	**Save**	Сохранить	Сохранение активного документа
	**Print**	Печать	Печать активного документа



Рис. 9.8. Панель **Edit**

Таблица 9.2. *Содержимое панели* ***Edit***

Кнопка	Ярлык		Функция
	**Cut**	Вырезать	Вырезает выбранный объект и помещает его в буфер обмена
	**Copy**	Копировать	Копирует выбранный объект с помещением его в буфер обмена
	**Paste**	Вставить	Вставляет содержимое буфера обмена
	**Undo**	Отменить	Отменяет последнюю команду
	**Redo**	Выполнить повторно	Выполняет заново последнюю отмененную команду
	**Intersect**	Пересечь	Операция булевого пересечения
	**Subtract**	Вычесть	Операция булевого вычитания
	**Unite**	Объединить	Операция булевого объединения
	**Translate**	Перенести	Перенос выделенных объектов

Таблица 9.2 *(окончание)*

Кнопка	Ярлык		Функция
	**Select object**	Выбрать объект	Активизация процесса выбора объектов
	**Select surface**	Выбрать поверхность	Активизация процесса выбора поверхностей
	**Edit Notes**	Редактировать заметки	Активизация редактора заметок



Рис. 9.9. Панель **View**

Таблица 9.3. *Содержимое панели* ***View***

Кнопка	Ярлык		Функция
	**Zoom in**	Увеличить	Увеличение активного вида
	**Zoom out**	Уменьшить	Уменьшение активного вида
	**Zoom view with mouse window**	Увеличить в размер рамки	Масштабирование выбранной области с помощью граничной рамки
	**Zoom All**	Масштабировать в размер окна	Изменение масштаба всех объектов в размер окна
	**Zoom to selected objects**	Увеличить выбранные объекты	Изменение масштаба выбранных объектов в размер окна
	**Zoom to cursor**	Увеличить/ Уменьшить вид	Изменение масштаба вида при перетаскивании указателя мыши
	**Named Views**	Именованные виды	Выбор и создание видов модели
	**Previous View**	Предыдущий вид	Вызов предыдущего вида
	**Pan Cursor**	Перемещать	Прокручивает вид при движении указателя
	**XY View**	Вид XY	Поворот модели в ориентацию вида параллельно плоскости XY

Таблица 9.3 *(окончание)*

Кнопка	Ярлык		Функция
	YZ View	Вид YZ	Поворот модели в ориентацию вида параллельно плоскости YZ
	XZ View	Вид XZ	Поворот модели в ориентацию вида параллельно плоскости XZ
	ZY View	Вид ZY	Поворот модели в ориентацию вида параллельно плоскости YZ сзади
	ZX View	Вид ZX	Поворот модели в ориентацию вида параллельно плоскости XZ сзади
	View isometric profile 1	Изометрия 1	Изометрический вид, ориентация 1
	View isometric profile 2	Изометрия 2	Изометрический вид, ориентация 2
	Orbit View	Вращать вид	Вращение вида перемещением указателя



Рис. 9.10. Панель **Insert**

Таблица 9.4. *Содержимое панели* ***Insert***

Кнопка	Ярлык		Функция
	Insert Lens Element	Вставить линзу	Вставка объекта Линза
	Insert Reflector	Вставить рефлектор	Вставка объекта Отражатель
	Insert Tube	Вставить трубу	Вставка объекта Труба
	Insert Baffle Vane	Вставить отражающий конус	Вставка тонкостенного конуса
	Insert Part	Вставить объект	Вставка объекта и файла с расширением sat или oml
	Draw Cylinder	Начертить цилиндр	Вставка цилиндра с параметрами, определяемыми положением курсора

Таблица 9.4 *(окончание)*

Кнопка	Ярлык		Функция
	Draw Block	Начертить призму	Вставка призмы с параметрами, определяемыми курсором
	Draw Sphere	Начертить сферу	Вставка сферы с параметрами, определяемыми курсором
	Draw Cone	Начертить конус	Вставка конуса с параметрами, определяемыми курсором



Рис. 9.11. Панель **Analysis**

Таблица 9.5. *Содержимое панели* ***Analysis***

Кнопка	Ярлык		Функция
	Grid Trace	Трассировка по сетке	Трассировка лучей с расположением их на сетке
	Source Trace	Трассировка от источника	Трассировка лучей, испускаемых источником
	Reverse Trace	Обратная трассировка	Трассировка лучей от поверхностей, обозначенных как **Exit Surface** (Поверхность выхода) к источникам света
	Ray Histories	Истории лучей	Вывод таблицы с информацией о траектории каждого луча
	Incident Ray Table	Таблица входящих лучей	Вывод таблицы лучей, входящих в поверхность
	Irradiance maps	Диаграммы освещенности	Отображение диаграммы освещенности выбранной поверхности
	Polar Iso-Candela	Полярная диаграмма изокандел	Отображение диаграммы изокандел в полярных координатах
	Polar Candela Distribution	Сила света в полярных координатах	Отображение диаграммы распределения силы света в полярных координатах
	Rectangular Candela Distribution	Сила света в ортогональных координатах	Отображение диаграммы распределения силы света в ортогональных координатах



Рис. 9.12. Панель **Tools**

Таблица 9.6. *Содержимое панели* ***Tools***

Кнопка	Ярлык		Функция
	**Audit**	Проверка	Анализ модели на предмет корректности данных
	**Measure geometry**	Измерить геометрию	Измерение расстояний и углов для геометрических объектов



Рис. 9.13. Панель **Windows**

Таблица 9.7. *Содержимое панели* ***Windows***

Кнопка	Ярлык		Функция
	**New Window**	Новое окно	Открыть новое окно для активного документа
	**Cascade Window**	Окна каскадом	Отображение окон каскадом
	**Tile Horizontal**	Отобразить сверху вниз	Отображение окон сверху вниз без перекрытия
	**Tile Vertical**	Отобразить слева направо	Отображение окон слева направо без перекрытия



Рис. 9.14. Панель **Help**

Таблица 9.8. *Содержимое панели* ***Help***

Кнопка	Ярлык		Функция
	**About**	О программе	Информация о программе, версии и авторских правах, доступ к лицензии
	**Help**	Справка	Вывод справки при указании на кнопки, меню и окна

Здесь мы не будем описывать функциональность команд. Те, которые присущи исключительно TracePro, будут подробно рассмотрены. Смысл других, в частности входящих в панели **File**, **View**, **Windows**, **Help**, будет разъяснен далее.

9.4. Функциональные возможности

В данном разделе будут рассмотрены возможности программы в привязке к структуре меню. Мы сосредоточимся на той части возможностей, которые определяют функциональность программы как инструмента оптического анализа. Информация о командах, которые являются типовыми для Windows-приложений, будет ограничена их упоминанием. Определенная часть возможностей программы связана с созданием и модификацией геометрических моделей. Их можно классифицировать по степени уникальности относительно соответствующих процедур универсальных CAD-систем. Те операции, которые в SolidWorks и аналогах выполняются более эффективно, мы будем описывать достаточно поверхностно, полагаясь на то, что читатель знаком с базовой системой проектирования. Если же создаваемый объект специфичен по функциональности, например это линза или концентратор, то информация будет более подробной.

9.4.1. Меню *File*

Меню **File** (Файл) показано на рис. 9.15. Команды **New** (Создать), **Open** (Открыть), **Close** (Закрыть), **Close All** (Закрыть все), **Print** (Печать), **Print Preview** (Предварительный просмотр), **Print Setup** (Настройка печати), **Send** (Отправить) тождественны одноименным из распространенных CAD-систем. Разберем те из них, которые оригинальны относительно других программ.

Open (Открыть)

Открывает файл с моделью. Если предыдущее сохранение осуществлялось вместе с траекториями лучей (см. опцию **Save Ray Data**), то программа делает попытку загрузить эти траектории, взяв их из каталога модели. В случае неудачи выводится диалоговое окно с предложением указать путь к файлу.

Save As (Сохранить как)

Сохранение текущего активного документа в заданном формате. Такими объектами могут быть не только оптические (разумеется, в совокупности с геометрией) модели, но и **Candela Maps** (Диаграммы изокандел), **Irradiance Maps** (Диаграммы освещенности), **Reports and Ray Histories** (Отчеты и

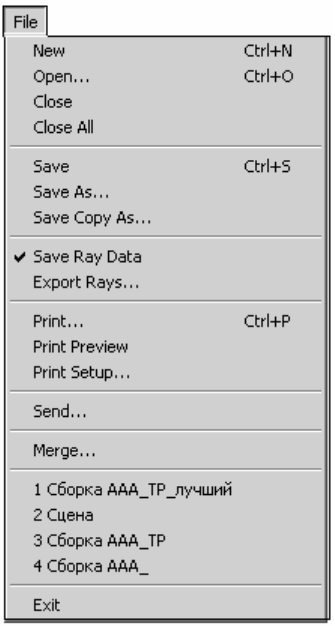


Рис. 9.15. Меню File

истории лучей), **Incident Ray Tables** (Таблица входящих лучей). Оптическая модель может быть сохранена в форматах:

- TracePro *OML* (Optical Modeling Language), базирующийся на формате ACIS;
- ACIS SAT;
- IGES;
- STEP;
- Bitmap;
- Metafile.

Естественно, что пространственное представление геометрических объектов может существовать только в первых четырех форматах. При этом назначенные объектам оптические характеристики сохраняются исключительно в представлениях OML и SAT, а результаты расчетов только в "родном" формате TracePro. Отсюда следует еще одно применение функции **Save As**: если модель собрана в формате SAT, то для записи совместно с результатами следует преобразовать ее в формат OML. Особенности графических интерфейсов для передачи твердотельной и поверхностной информации приведены в *главе 1*.

Способы использования других форматов, за исключением использованных для формирования таблицы входящих лучей *(см. разд. 9.4.6 и 9.6.2)* вполне очевидны и, в общем, какой-либо принципиально важной функциональности не имеют.

Save Copy As (Сохранить копию как)

Принципиальные отличия от предыдущей команды состоят в том, что она действует только для геометрической информации, а также что текущая модель остается активной.

Save Ray Data (Сохранить информацию о лучах)

По сути является опцией, которая может быть активна или нет. Если флажок установлен, то при сохранении модели после расчета будут также сохранены

траектории лучей и, соответственно, результаты расчета. Доступ к последним возможен только при наличии траекторий. Это значит, что при выводе каких-либо результатов в виде таблиц и диаграмм программа обрабатывает результаты заново.

Сохранение лучей возможно, только если расчет производился в режиме Analysis Mode (Режим анализа). Соответственно Simulation Mode (Режим симуляции) подразумевает потерю результатов после выгрузки файла. Программа записывает информацию о лучах в файл, одноименный с файлом модели, но с расширением ray или, для последних версий — rayx, который помещается в тот же каталог.

Export Rays (Экспортировать лучи)

Экспортирует лучи в форматах ACIS, IGES, STEP. Эта операция может быть выполнена только для лучей, достигших некоторой поверхности. Для этого нужно эту поверхность активизировать, используя для этого, например, Дерево проекта. Затем командой **Ray Sorting** меню **Analysis** отобразить достигшие ее лучи, после чего подать команду **Export Rays**. В диалоговом окне **Сохранить копию** следует выбрать формат данных. Если используется ACIS или STEP, то при считывании в SolidWorks каждый луч будет помещен в отдельную деталь. Понятно, что сотни и тысячи лучей породят соответствующее число файлов (размер каждого составит около 35 Кбайт), и обработка сборки, включающей все эти детали, будет весьма проблематична. Если же лучи сохранены в IGES-формате, то восстановление произойдет в одну деталь. В процессе чтения данных в SolidWorks можно выбрать формирование лучей как кривых или трехмерных эскизов. Для этого в окне SolidWorks **Параметры импорта** нужно активизировать опцию **Импортировать как 3D-кривые** или **Импортировать как эскиз(ы)** соответственно. Последующие действия программы подчиняются следующим закономерностям:

- если обмен осуществляется посредством ACIS или STEP, то каждый луч, как упоминалось, будет помещен в отдельную деталь. При этом, если его траектория состоит из отдельных участков (имело место отражение или преломление), то вариантов два: каждый из отрезков будет представлен отдельной Импортированной кривой или же все они будут помещены в единый Трехмерный эскиз;
- если передача происходит через IGES-формат, то или каждый отрезок каждого луча станет Импортированной кривой, или же все будет собрано в единый Трехмерный эскиз.

Нужно отметить, что даже если лучи представлены Импортированными кривыми, они все равно остаются прямыми линиями, и к ним применимы все манипуляции SolidWorks, предназначенные для линий.

Merge (Слить)

К текущей активной модели TracePro присоединяет модели из оптических, в том числе линзовых CAD-систем, хранимые в соответствующих форматах, а также модели в формате ACIS. После подачи команды выводится диалоговое окно, в котором можно задать ориентацию и положение импортируемой модели относительно текущей. После выполнения операции ассоциативная связь между моделью-источником и местом ее вставки теряется. Практическое значение данная опция имеет при импорте оптических систем, сформированных в линзовых редакторах типа OSLO или ZEMAX, когда можно минимальными усилиями обеспечить совпадение систем координат TracePro и соответствующей системы.

9.4.2. Меню *Edit*

Меню **Edit** (Редактировать) показано на рис. 9.16. Команды **Undo** (Отменить), **Redo** (Выполнить повторно), **Copy** (Копировать), **Paste** (Вставить), **Delete** (Удалить), **Clear All** (Очистить все) по форме и содержанию вполне традиционны. Рассмотрим специфические функции TracePro.

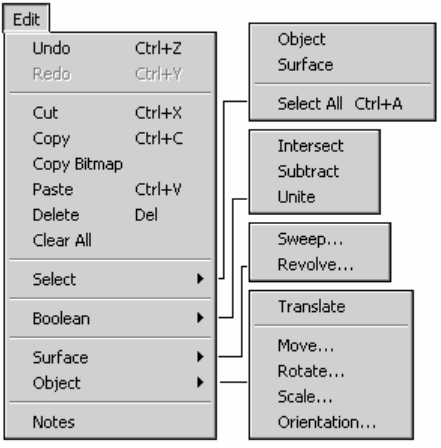


Рис. 9.16. Меню **Edit**

Select (Выбрать)

TracePro не идентифицирует автоматически выбираемый объект. Поэтому до его указания необходимо назначить его тип. В рамках основной функциональности — дополнительные возможности выбора предоставляются командой **Measure** (Измерить) — смысл имеют только понятия "объект" и "поверхность". Последняя — примитив, которому могут быть назначены оптиче-

ские характеристики, присущие поверхностям. В противоположность поверхностям из CAD-систем, допускающим существование на одной поверхности нескольких граней, в TracePro она может быть исключительно непрерывной. Самостоятельно поверхности не существуют — они должны входить в "объект". В TracePro — это одна или совокупность поверхностей, которые могут образовать, а могут и не позволить сформировать твердое тело. В явном виде этот факт в Дереве проекта никак не отображается, но специальные функции, например **Healing** (Лечение), позволяют в некоторых случаях диагностировать тела. После подачи команды начинает работать инструмент, аналогичный фильтрам в CAD-программах. Его действие прекращается после подачи некоторых других команд или после отжатия одноименной кнопки на панели инструментов.

Если выбран объект, образованный совокупностью поверхностей, то последующее присвоение характеристик, присущих именно поверхностям, будет выполняться для всех поверхностей данного объекта.

Boolean (Булева операция)

Реализует булевы операции: **Intersect** (Пересечь); **Subtract** (Вычесть); **Unite** (Объединить). Операндами называются объекты, являющиеся телами или состоящие из поверхностей. В первом варианте действие команды вполне очевидно. Если реализуется вычитание, то второй из выбранных объектов (они активизируются указателем мыши при нажатой клавише <Ctrl>) вычитается из того, который активизирован первым. Можно применять команду к комбинации поверхностей, когда несколько поверхностей объединяются в один объект или внутри объекта — в одну поверхность. После выполнения команды информация о топологии исходных объектов пропадает — TracePro не параметрическая система.

Surface (Поверхность)

Создает поверхность или тело на базе поверхности, принадлежащей объекту. Для того чтобы получить доступ к командам, необходимо сначала активизировать возможность выбора поверхностей, а затем собственно и саму поверхность. Далее следует подать команду и заполнить соответствующие позиции в диалоговом окне. Одновременно с созданием объектов-поверхностей программа делает попытку присоединить их к родительским телам. Две команды **Sweep** (Вытянуть) и **Revolve** (Повернуть) позволяют создавать призматические (с учетом уклона — конические или пирамидальные) тела и тела вращения (сектора). Мы ограничимся этой информацией, поскольку для тех, кто привык к использованию универсальных графических пакетов, данная функциональность TracePro покажется весьма скудной. Поэтому лучше освоить

интерфейс между привычной CAD-системой и расчетным приложением, а функции TracePro применять, в основном, для позиционирования объектов и для создания примитивов — источников света, линз, специальных преломителей и отражателей.

Object (Объект)

Группа команд для перемещения/копирования объектов.

- **Translate** (Перенести) — перенос активного объекта или группы объектов параллельно плоскости экрана. Осуществляется указателем мыши, координаты исходного положения указателя и его текущие координаты в пространстве выводятся в полосе внизу окна TracePro. Соответственно никакие привязки или точное управление координатами невозможно. Если перенос осуществляется при нажатой клавише <Ctrl>, то объекты копируются.
- **Move** (Переместить) (рис. 9.17) — перемещение активного объекта или группы объектов. Перемещать можно в режимах:
  - **Relative** (Относительно) — на величину вектора;
  - **Absolute** (Абсолютная координата) — перенос центра объекта в заданную точку;
  - **Distance** (Расстояние) — в направлении вектора на заданное расстояние.

  Действие осуществляется после нажатия кнопок **Apply** (Применить) или **Copy** (Копировать). Очевидно, что во втором случае исходные объекты останутся на месте, а в новое положение будут вставлены их копии. Эти копии унаследуют все оптические характеристики, включая параметры источников света, которые были назначены для родительских объектов.

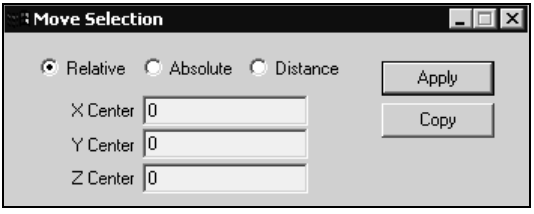


Рис. 9.17. Окно **Move**

- **Rotate** (Повернуть) (рис. 9.18) — поворот активного объекта или группы объектов. Вращать можно (этим управляет параметр **Axis**) относительно осей X, Y, Z глобальной системы координат, относительно осей объекта

Object X, **Y**, **Z**, а также относительно произвольного вектора — **Customize**. Если активизировать опцию **Origin of Object WCS** (Начало системы координат объекта), то программа заполнит соответствующие поля координатами центра объекта. Вращение будет производиться относительно оси, проходящей через центр объекта параллельно заданному вектору.

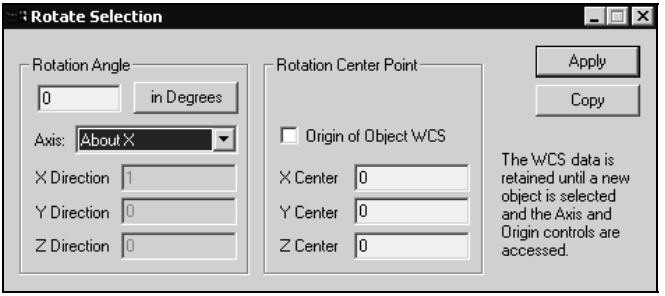


Рис. 9.18. Окно **Rotate**

- **Scale** (Масштабировать) (рис. 9.19) — масштабирование объекта относительно его собственного центра (опция **Scale position** (Центр масштабирования) неактивна) или относительно начала координат (флажок установлен). Можно выполнить масштабирование с различными коэффициентами в направлении осей объекта или глобальной системы координат.

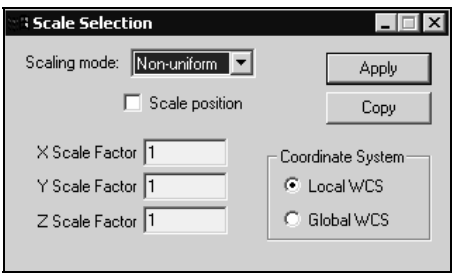


Рис. 9.19. Окно **Scale**

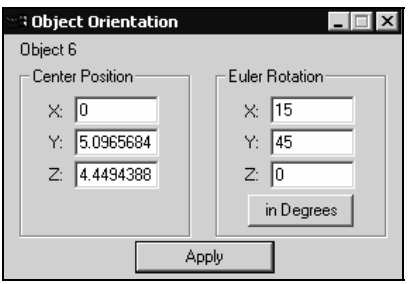


Рис. 9.20. Окно **Object Orientation**

- **Object Orientation** (Ориентация объекта) (рис. 9.20) — в этом окне назначается положение центра объекта относительно начала координат и его ориентация относительно глобальной системы координат. Для этого используются величины *углов Эйлера*. Особенность данного окна в том, что содержащиеся в нем параметры являются свойствами объекта, в то время как описанные окна задают параметры команд.

Notes (Заметки)

Редактирование ассоциированного с моделью текстового документа. Загружается простейший текстовый редактор. После выхода из него текст помещается в файл модели. Если модель сохраняется в любом из форматов отличных от OML, то содержание документа теряется.

9.4.3. Меню *View*

Меню **View** (Вид) показано на рис. 9.21. Команды **Status Bar** (Строка состояния), **Render** (Закрасить), **Hidden Line** (Скрыть невидимые линии), **Display All** (Отобразить все), **Named Views** (Именованные виды), **Previous View** (Предыдущий вид), **Pan** (Перемещать), **Zoom** (Масштабировать) аналогичны имеющимся в других CAD-системах.

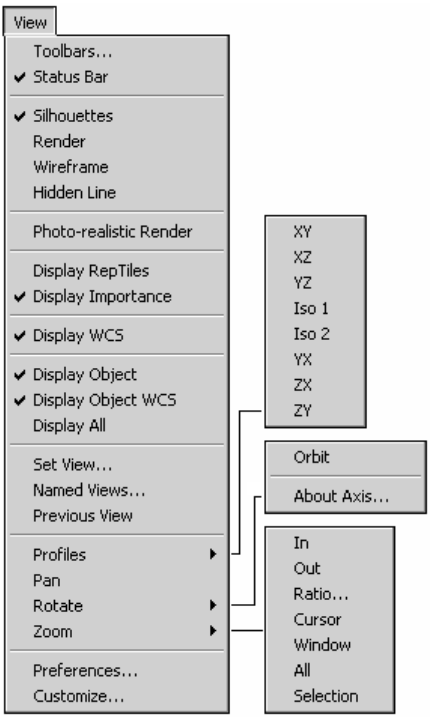


Рис. 9.21. Окно **View**

Silhouettes (Силуэт)

В популярных CAD-системах аналогичный режим называется "каркасное представление".

Wireframe (Каркасное представление)

Осуществляется показ триангуляции образующих элементы модели поверхностей. Значимой функциональности эта информация не имеет.

Photo-realistic Render (Фотореалистичная закраска)

Для активизации опции необходима специальная лицензия, которая в стандартную поставку не входит. Эта функция предназначена для визуализации фотореалистичного состояния модели с учетом результатов трассировки лучей.

Display RepTiles (Показать геометрию RepTile)

На фоне модели в каркасном виде выводится ячеистая (чешуеподобная) структура, параметры которой присвоены некоторой плоской поверхности. Для того чтобы иметь эту возможность, необходимо некоторой поверхности назначить соответствующие параметры (**Apply Properties** | **RepTile**). В известной на момент написания книги версии TracePro 3.2.2 граница области RepTile описывается прямоугольником заданных размеров, не совпадая с границами реальной поверхности.

Display Importance (Показать выборку по значимости)

Выводит на экран объекты, входящие в выборку по значимости. Эта выборка может быть назначена для любой поверхности командой **Apply Properties** | **Importance Sampling**. В окне модели показываются контуры областей, принадлежащих выборке, а в середине этих областей находится текст "IT" (рис. 9.22).

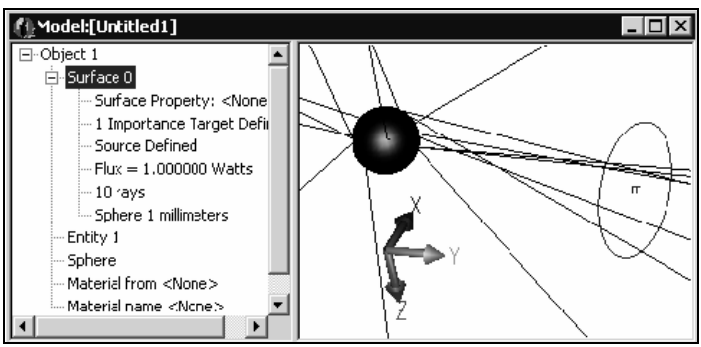


Рис. 9.22. Вид модели с отображением Importance Sampling

Display WCS (Показать рабочую систему координат)

Вывод на экран осей системы координат, связанной с моделью.

Display Object WCS (Показать рабочую систему координат объекта)

Вывод на экран осей системы координат, связанной с текущим объектом.

Set View (Установить вид)

Настройка параметров текущего вида. Назначаются (рис. 9.23):

- **Eye Position** (Положение наблюдателя);
- **Target Position** (Положение цели);
- **Up Vector** (Направление вверх);
- **Perspective View** (Перспективный вид).

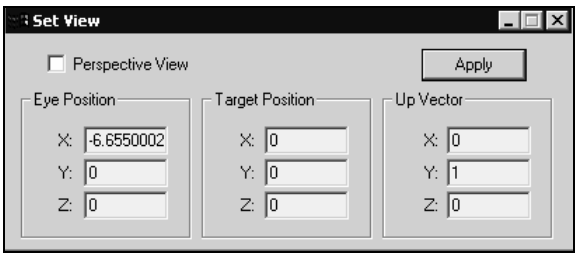


Рис. 9.23. Панель **Set View**

Named Views (Именованные виды)

Установка модели в соответствии с одним из имеющихся или запоминание текущего вида. Активизация вида выполняется по двойному щелчку мыши при нахождении указателя над требуемым названием. В списке выбора присутствует строка *Normal To (Перпендикулярно к...) — ее выбор позволяет установить модель так, чтобы нормаль к экрану была перпендикулярна выбранной плоской грани.

Profiles (Стандартные виды)

Выбор одного из стандартных видов для отображения модели. Доступны виды спереди и сзади относительно глобальной системы координат модели, а также два изометрических вида.

Rotate (Вращать)

Поворот вида. Команда имеет два режима работы:

- **Orbit** (Орбитальное) — поворачивает модель при движении указателя. Вращение осуществляется относительно геометрического центра модели,

поэтому если она протяженная, а на экране виден только ее фрагмент, то получить желаемое весьма затруднительно;

- **About Axis** (Вокруг осей) — поворачивает модель относительно оси, параллельной одной из осей системы координат модели и проходящей через точку с заданными координатами. Поворот выполняется дискретно.

Preferences (Параметры)

Параметры отображения модели и лучей по умолчанию. Панель имеет следующие вкладки.

- **Model Units** (Единицы измерения) (рис. 9.24) — определяет единицы измерения, влияющие на последующие действия. Смена единиц измерения не приводит к изменению текущей модели, а также — при экспорте в нейтральных форматах — в принимающей системе восприняты будут единицы, в которых данный объект был создан.

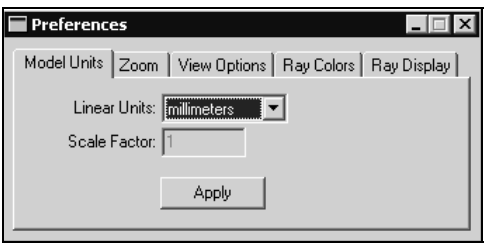


Рис. 9.24. Вкладка **Model Units**

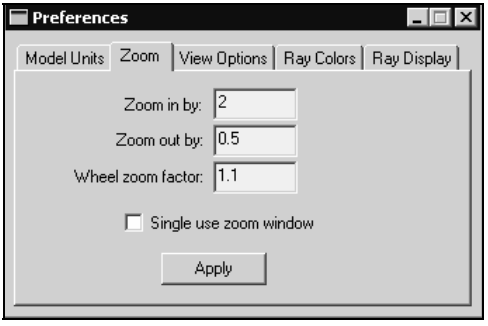


Рис. 9.25. Вкладка **Zoom**

- **Zoom** (Масштаб) (рис. 9.25) — определяет параметры масштабирования для команд Увеличить, Уменьшить, также настраивает соответствие скорости масштабирования и шага поворота колеса мыши, управляет режимом действия команд масштабирования: прекращение действия после однократного выполнения или продолжение до подачи новой команды.
- **View Options** (Настройки отображения) (рис. 9.26). Окно вкладки содержит следующие поля:
  - **Prompt before entering Simulation Raytrace** (Предупредить о входе в Режим симуляции) — если активизирован режим симуляции, предоставляющий ограниченную функциональность, то при попытке начать расчет последует напоминание;
  - **Update analysis after selection change** (Обновить результаты после выбора нового объекта) — если расчет выполнен, и пользователь про-

сматривает результаты в виде диаграмм, то при указании на новую поверхность содержание диаграммы будет обновляться автоматически, если опция активна. В противном случае следует использовать команду **Refresh** (Обновить) из меню Windows или клавишу <F5>. В этом же меню присутствует опция **Auto Update** (Обновлять автоматически), которая имеет приоритет над полем **Update analysis...**. Если число трассируемых лучей составило несколько десятков тысяч и используется компьютер с процессором Pentium 4, то программа обрабатывает результаты с приемлемой задержкой. Поэтому обновление результатов желательно выполнять автоматически;

- **Display AutoUpdate remainder** (Показывать напоминание об обновлении) — если предыдущая опция неактивна, то при установке флажка в данном поле будет выводиться сообщение о необходимости вручную обновить содержимое активных окон с результатами;
- **Update raytrace progress every ... rays** (Обновлять протокол трассировки каждые ... лучей). В процессе трассировки на экране возникает окно, в котором динамически отображается число рассчитанных лучей. Данное поле управляет кратностью выводимой величины;
- **Open System tree with ... % of the Model Window** (Дерево проекта при создании модели будет составлять ... %).

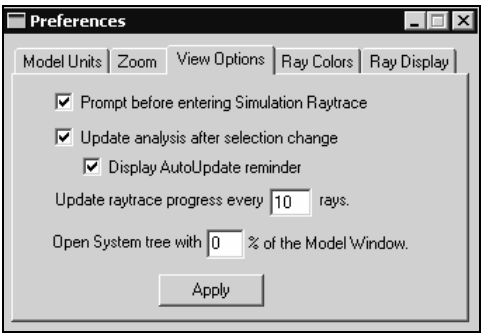


Рис. 9.26. Вкладка **View Options**

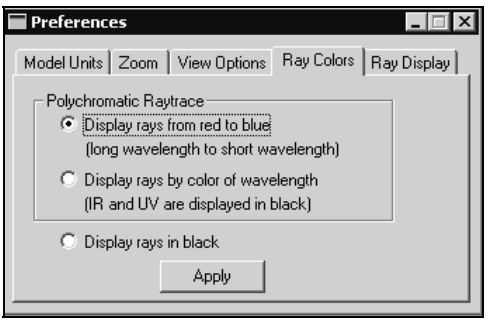


Рис. 9.27. Вкладка **Ray Colors**

- **Ray Colors** (Цвета лучей) — задание цветовой палитры при отображении траекторий лучей в зависимости от информации, которую "несет" луч. Окно (рис. 9.27) содержит следующие поля:
  - **Display rays from red to blue (long wavelength to short wavelength)** (Раскрасить лучи от красного до синего — от длинной волны до короткой);

- **Display rays by color of wavelength (IR and UV are displayed in black)** (Раскрасить лучи в соответствии с длиной волны — инфракрасные и ультрафиолетовые будут черными);
- **Display rays in black** (Все лучи — черные) — эта опция актуальна, если картинки с результатами будут напечатаны на монохромном оборудовании. Детальная настройка палитры выполняется в окне **Ray Colors** (Цвета лучей) в меню **Analysis** (Анализ).

❒ **Ray Display** (Визуализация лучей) — определяет параметры процесса визуализации лучей. Окно (рис. 9.28) содержит следующие поля:

- **Set default for menu: Analysis | Display Rays** (Установить по умолчанию в меню Анализ | Показать лучи) — определяет, будут ли лучи показаны после открытия модели. Если компьютер недостаточно мощный, то рекомендуется флажок снять;

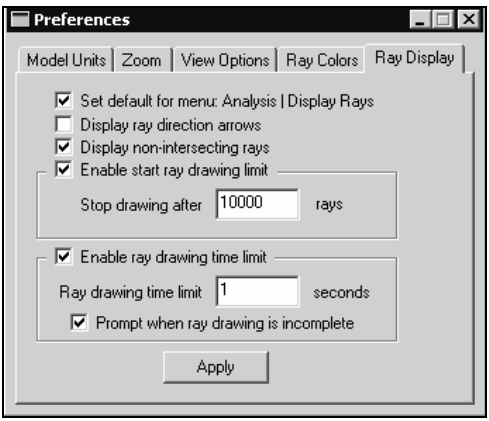


Рис. 9.28. Вкладка **Ray Display**

- **Display ray direction arrows** (Показать стрелки, обозначающие направления лучей);
- **Display non-intersecting rays** (Показать невзаимодействующие лучи) — если какие-либо лучи не взаимодействуют ни с какими объектами, то их можно не показывать;
- **Enable start ray drawing limit** (Остановить визуализацию лучей по числу лучей) — если число трассируемых лучей велико, то вычерчивание всех траекторий может затруднить интерпретацию результатов. Практика показывает, что показывать более тысячи лучей бесполезно. Также — для сложных моделей с большим числом преломлений/отражений/рассеяний вычерчивание сотен тысяч траекторий занимает ощу-

тимое время. Следует отметить, если изменить число показываемых лучей после выполнения расчета, то эффекта это иметь не будет;

- **Enable ray drawing time limit** (Остановить визуализацию лучей по времени) — комментарии, в общем, те же, что и для предыдущей опции. Однако поскольку количество лучей на экране — более объективный индикатор пригодности картинки для анализа, рекомендуется назначить время достаточно большим (несколько секунд), но отображать столько лучей, сколько необходимо для комфортного восприятия результатов. С этими двумя параметрами перекликается функциональность окна **Ray Sorting** (Сортировка лучей) меню **Analysis** (Анализ), имеющего локальное действие;
- **Prompt when ray drawing is incomplete** (Сообщить, если визуализация лучей неполная) — если процесс вычерчивания траекторий прерван по исчерпании числа лучей или лимита времени, то на экран выводится соответствующая диагностика.

Customize (Настройки)

Глобальные настройки программы. Окно (рис. 9.29) содержит следующие поля:

- **Properties Database** (База данных по свойствам) — путь к файлу, содержащему информацию о свойствах материалов и поверхностей. По умолчанию это TracePro.mdb, расположенный в каталоге с исполняемым файлом программы;
- **Data Directory** (Директория с данными) — каталог по умолчанию, в котором программа будет открывать файлы с моделями и куда будет предлагать сохранить модель;
- **Auto load scheme** (Автоматически загрузить язык Scheme) — автоматически загрузить язык приложений TracePro;
- **Place System Tree on...** (Расположить Дерево модели...) — управляет расположением Дерева модели в окне TracePro. Вариантов два: слева и справа;
- **On starting TracePro...** (При запуске TracePro...) — назначение модели, открываемой при запуске программы. Варианты: открыть пустую модель; загрузить наиболее часто используемую; сообщить о намерении загрузить наиболее часто используемую; не открывать никакую;
- **On opening models...** (При открытии моделей...) — обработка скрытых ранее объектов при открытии модели. Доступны варианты: **Display all objects** (Показать все объекты) и **Display visible objects** (Показать види-

мые объекты). Если, например, модель содержит несколько вариантов некоторого объекта, то рассчитываться может только один из них, а остальные должны быть исключены из анализа. При этом для простоты восприятия задачи желательно скрыть необрабатываемые объекты. Однако при повторной загрузке модели они могут стать видимыми и потребовать новых манипуляций по их скрытию. Отметим здесь, что видимость и функциональность (участие объекта в анализе) никоим образом не связаны;

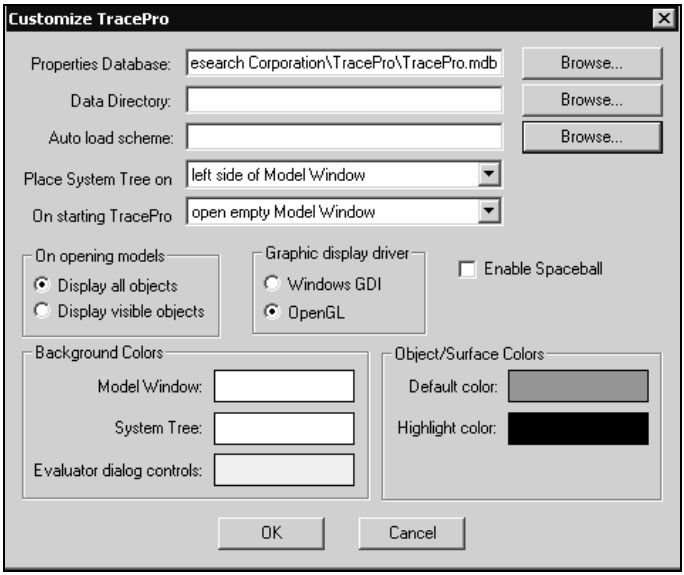


Рис. 9.29. Вкладка **Customize**

- **Graphic display driver** (Графический драйвер) — графический интерфейс TracePro поддерживает две системы: OpenGL и Windows GDI. Первый обеспечивает большую производительность, но есть вероятность (на практике этого не наблюдалось), что при отображении моделей и результатов могут возникнуть проблемы. В таком случае нужно попробовать Windows GDI;
- **Enable Spaceball** (Активизировать Spaceball) — использовать устройство Spaceball вместо мыши;
- **Background Colors** (Цвета фона) — группа полей для назначения цвета фона модели, Дерева проекта и полей, допускающих подстановку математических выражений;
- **Object/Surface Colors** (Цвета объектов/поверхностей) — назначение цвета объектов и поверхностей и активных объектов и поверхностей.

9.4.4. Меню *Insert*

Меню **Insert** (Вставить) показано на рис. 9.30. Оно содержит команды создания объектов оптических систем: разнообразных линз, отражателей, твердотельных примитивов, вставки моделей TracePro, а также источников света. Меню имеет следующие команды.



Рис. 9.30. Меню **Insert**

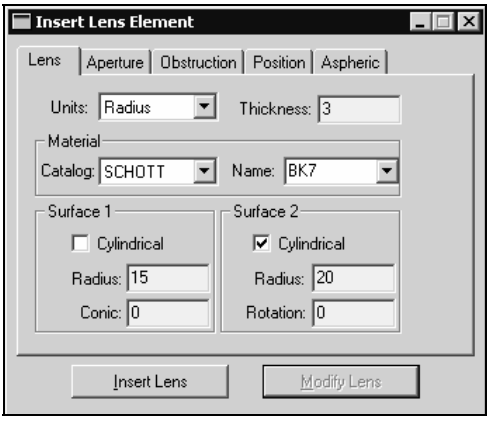


Рис. 9.31. Вкладка **Lens**

Lens Element (Объект Линза)

Создание линзы. Могут вставляться линзы, имеющие поверхности вращения, в частности, асферические и/или цилиндрические поверхности. В линзах допустимы отверстия, их можно смещать и поворачивать. Особенностью панели для линз является то, что все вкладки относятся к одному и тому же объекту. Окно содержит несколько вкладок.

- **Lens** (Линза) (рис. 9.31). Глобальные характеристики линзы. Окно вкладки содержит следующие поля:
  - **Units** (Единицы расчета) — нужно сделать выбор между тем, как будет назначаться кривизна линзы: величиной **Radius** (Радиус) или параметром **Curvature** (Кривизна);
  - группа параметров **Material** (Материал), включающая поля **Catalog** (Каталог) и **Name** (Название);
  - две группы параметров **Surface** (Поверхность), определяющих тип и геометрию поверхностей линзы. Если флажок у опции **Cylindrical** (Цилиндрическая) отсутствует, то эта поверхность будет сферической, в противном случае — цилиндрической. Геометрия сферической поверхности определяется параметрами **Radius** (Радиус) и **Conic** (Кони-

ка). Сферическая поверхность, воспроизводимая программой, описывается уравнением:

$$z = \frac{c_v \rho^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K) c_v^2 \rho^2}} + \sum_{j=1}^{29} A_j \rho^j .$$

Здесь $\rho^2 = x^2 + y^2$, c_v — кривизна, K — константа коники. A_j — коэффициенты полинома, определяющего асферическую составляющую кривизны.

Из уравнения ясно, что осью сферической поверхности будет ось Z, а начало координат совпадает с точкой пересечения этой оси с первой из поверхностей. Если же некая поверхность цилиндрическая (опция **Cylindrical** активна), то поле **Rotation** определяет поворот поверхности относительно оси Z. На рис. 9.32 показана линза, построенная в соответствии с параметрами рис. 9.31, а также согласно содержимому вкладок, описанных далее.

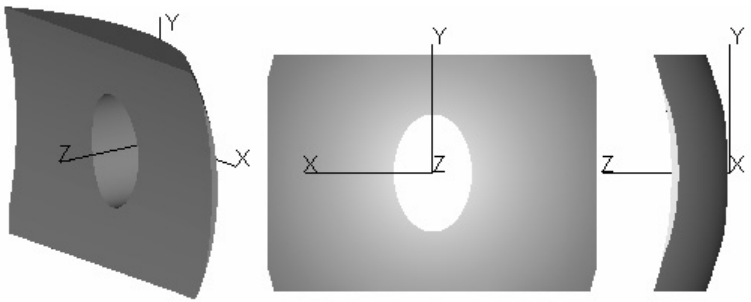


Рис. 9.32. Пример объекта, созданного командой **Lens**

- **Aperture** (Апертура) (рис. 9.33). Параметры наружного профиля линзы. Окно содержит следующие поля:
  - **Shape** (Форма) — форма наружного профиля. Можно выбрать: **Circle** (Круг); **Rectangle** (Прямоугольник); **Ellipse** (Эллипс). Здесь следует отметить, что при моделировании линзы программа сначала строит "полный" объект в соответствии с содержимым вкладки **Lens**, а затем обрезает ее согласно параметрам данной вкладки (скошенные углы на иллюстрации — следствие этого алгоритма);
  - **Semi-Diameter X, Semi-Diameter Y** (Полудиаметр X, Y). В зависимости от типа контура — полудиаметр окружности, половины сторон прямоугольника, полуоси эллипса;
  - **Decenter X, Decenter Y** (Смещение центра X, Y) — координаты центра контура апертуры относительно исходной системы координат);

- **Gamma** (Гамма) — угол поворота апертуры относительно оси Z исходной системы координат.

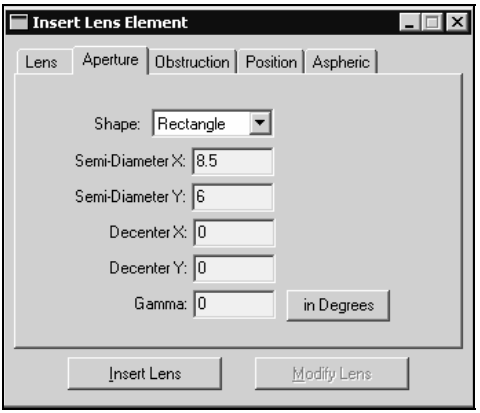


Рис. 9.33. Вкладка **Lens**

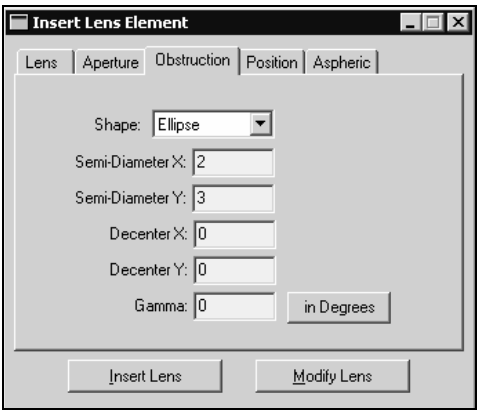


Рис. 9.34. Вкладка **Obstruction**

- **Obstruction** (Препятствие) (рис. 9.34) — здесь назначаются параметры отверстия, которое программа выполняет в линзе. Все они идентичны параметрам, которые присутствуют во вкладке **Aperture**.
- **Position** (Расположение) (рис. 9.35) — положение и ориентация линзы (совместно с элементами, ее образующими) относительно начала координат. Назначаются следующие поля:
  - **First Surface Center** (Центр первой поверхности) — группа параметров, определяющих координаты центра первой поверхности;

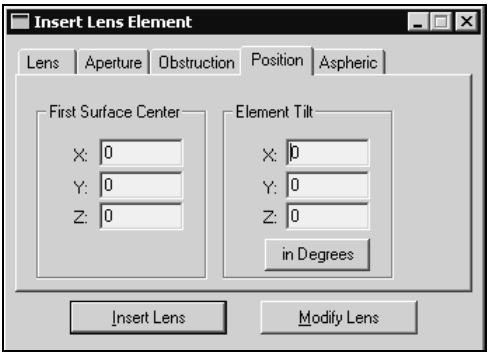


Рис. 9.35. Вкладка **Position**

  - **Element Tilt** (Ориентация элемента) — группа параметров, определяющих углы поворота линзы относительно осей системы координат,

связанной с линзой. Это значит, что программа сначала перемещает линзу в заданную точку, а затем поворачивает ее относительно осей линзы.

- **Aspheric** (Асферичность) (рис. 9.36) — коэффициенты полинома, определяющего асферичность поверхностей линзы.

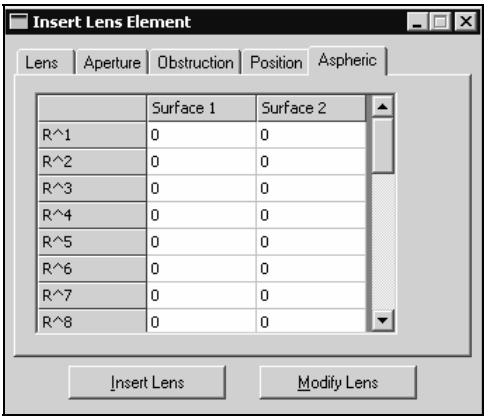


Рис. 9.36. Вкладка **Aspheric**

Fresnel Lenz (Линза Френеля)

Создание линзы Френеля. Окно (рис. 9.37) содержит следующие поля:

- **Ring width** (Ширина кольца) — ширина каждого из колец, образующих преломители. Это поле связано с полем **Lines/Unit**;
- **Lines/unit** (Колец на единицу длины) — число колец на единицу длины;
- **Thickness** (Толщина) — полная толщина тела (т. е. включая высоту гребешков);
- **Outer radius** (Наружный радиус) — радиус апертуры линзы;
- **Catalog** (Каталог) — название каталога с марками материалов;
- **Name** (Название) — марка материала;
- **Wavelength** (Длина волны) — длина волны, на базе которой будет рассчитываться коэффициент преломления;
- **Object distance** (Расстояние до объекта) — расстояние от объекта, излучение которого должно фокусироваться. Если объект находится в бесконечности, то следует подставить 0;
- **Image distance** (Расстояние до образа) — расстояние до образа (точки фокуса), на котором фокусируются лучи;

- **Origin** (Начало) — координаты исходной точки объекта. В этом качестве используется центр гладкого круга;
- **Rotation** (Ориентация) — углы поворота объекта относительно осей исходной системы координат;
- Кнопка **in Degrees/in Radians** (Градусы/Радианы), определяющая единицы измерения углов.

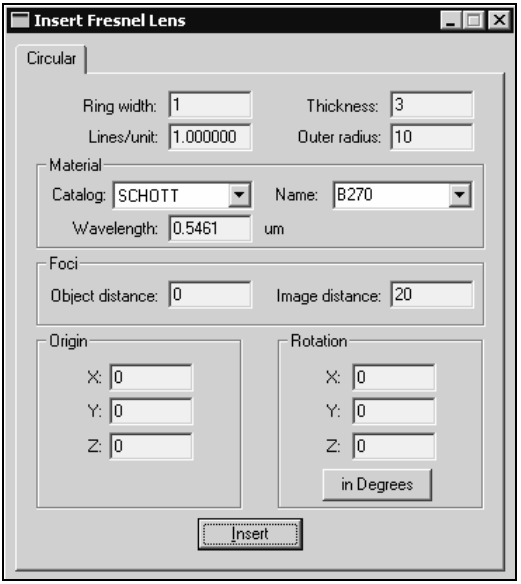


Рис. 9.37. Окно **Fresnel Lens**

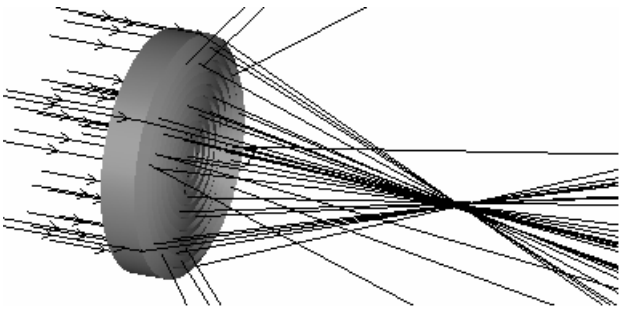


Рис. 9.38. Линза Френеля и результат трассировки лучей

На рис. 9.38 показана линза, построенная на базе параметров рис. 9.37, а также результат трассировки лучей. Коллимированный световой пучок фокусируется. При этом настройки расчета и, соответственно, параметры модели

таковы, что часть световой энергии при взаимодействии с гребешками претерпевает внутреннее отражение. Поэтому часть лучей идет мимо фокуса.

Reflector (Отражатель)

Создание рефлектора. Могут вставляться отражатели, у которых отражающие поверхности являются поверхностями вращения или цилиндрическими поверхностями, имеющими в качестве образующей окружность, эллипс, круг, параболу. Генерируемые объекты являются телами. Их можно смещать и поворачивать относительно осей глобальной системы координат. Система не придает никаким поверхностям оптических свойств, поэтому их нужно назначать самостоятельно. Параметры различных типов отражателей сгруппированы во вкладки с соответствующими названиями.

- **Conic** (Коник) — вставляется объект с гладкой с поверхностью вращения, являющейся коникой. Окно вкладки (рис. 9.39) содержит поля:
  - **Shape** (Форма) — тип получаемой внутренней поверхности. Доступны: **Spherical** (Сферическая); **Parabolic** (Параболическая); **Elliptical** (Эллиптическая); **Hyperbolic** (Гиперболическая);
  - **Thickness** (Толщина) — толщина объекта, получаемого приданием внутренней поверхности данной толщины;
  - **Hole radius** (Радиус отверстия) — радиус отверстия в глухой части объекта;
  - **Calculate** (Вычислять) — из последующих трех (для гиперболоида — четырех) параметров один является избыточным. Данное поле содержит список, из которого нужно выбрать, что является зависимой (расчетной) величиной;
  - **Length** (Длина) — размер внутренней образующей в направлении оси вращения;
  - **Focal length** (Фокусное расстояние) — в зависимости от типа объекта может быть: для параболоида — фокусное расстояние; для эллипсоида — **Focal len. 1** (Первое фокусное расстояние) и **Focal len. 2** (Второе фокусное расстояние); для гиперболоида — **Front** (Передний) и **Back** (Задний);
  - **Origin** (Начало); **Rotation** (Ориентация) — эти параметры тождественны тем, которые имеются в линзе Френеля.

На рис. 9.40 показана геометрия объекта Conic, а также результаты трассировки лучей от сферического нормально излучающего источника, расположенного в фокусе. Внутренняя поверхность параболоида — идеальный отра-

жатель. Геометрия отражателя соответствует параметрам, приведенным на рис. 9.39.

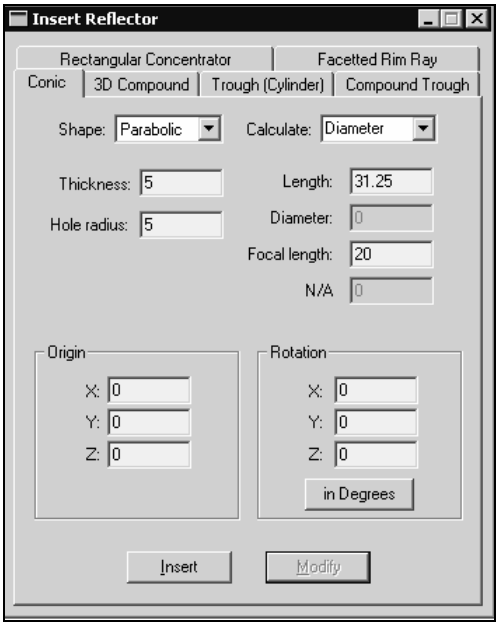


Рис. 9.39. Вкладка **Conic**

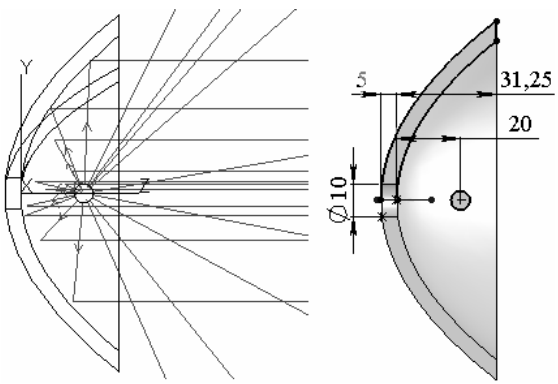


Рис. 9.40. Объект Conic в оптической системе и его геометрические параметры, соответствующие параболическому рефлектору

Если же выбрать форму отражателя в виде эллипсоида, то при помещении источника в один из фокусов эллипса лучи, как и следовало ожидать, соберутся в другом (рис. 9.41).

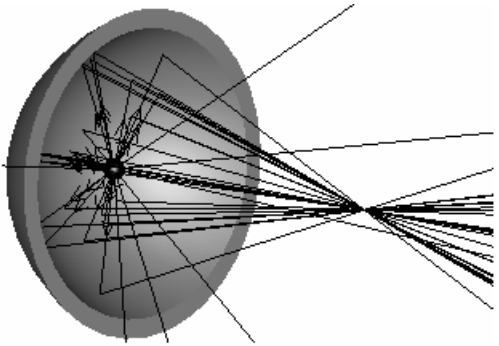


Рис. 9.41. Объект Conic с параметрами эллипсоидального рефлектора в оптической системе

Compound Trough (Составной желоб)

Вставляется цилиндрический объект, состоящий из двух симметричных тел. Внутренний контур сечений может быть параболой или эллипсом. При этом сечения имеют степень свободы в направлении, перпендикулярном оптической оси. Окно вкладки (рис. 9.42) содержит следующие поля:

- **Shape** (Форма) — тип получаемой внутренней поверхности. Доступны: **Parabolic** (Параболическая) и **Elliptical** (Эллиптическая);
- **Front depth** (Глубина передняя), **Back depth** (Глубина задняя) — расстояние от фокуса до переднего и заднего торцов тела;
- **Lateral focal shift** (Поперечное смещение фокуса) — вертикальное смещение образующей относительно исходного положения (оно характеризуется тем, что внутренние образующие обеих тел расположены на одной и той же кривой). Величина может быть положительной (смещение внутрь) и отрицательной (смещение наружу);
- **Thickness** (Толщина) — толщина объекта, получаемого приданием внутренней поверхности данной толщины;
- **Length** (Длина) — длина объекта;
- **Axis tilt** (Наклон оси) — угол поворота верхней и нижней образующих относительно оси, перпендикулярной сечению и проходящей через точку пересечения образующей кривой с осью объекта. Величина может быть положительной (верхнее сечение вращается против часовой стрелки, а нижнее — в противоположном направлении) и отрицательной;
- **Focal length** (Фокусное расстояние) — в зависимости от типа объекта может быть: для параболоида — фокусное расстояние; для эллипсоида — **Focal len. 1** (Первое фокусное расстояние) и **Focal len. 2** (Второе фокусное расстояние);

- **Origin** (Начало), **Rotation** (Ориентация) — эти параметры тождественны тем, которые имеются в описанных выше объектах.

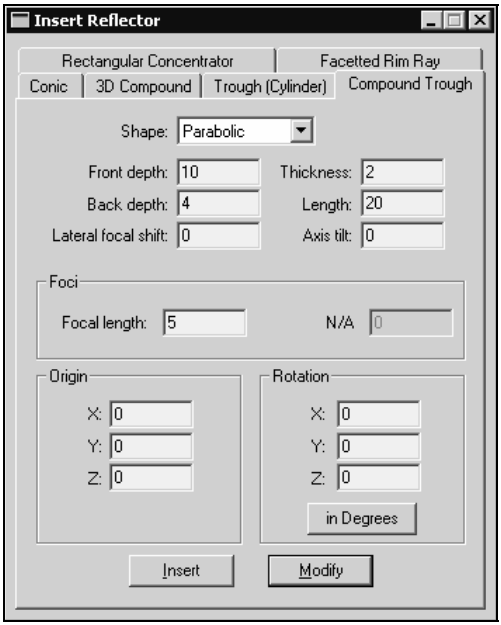


Рис. 9.42. Вкладка **Compound Trough**

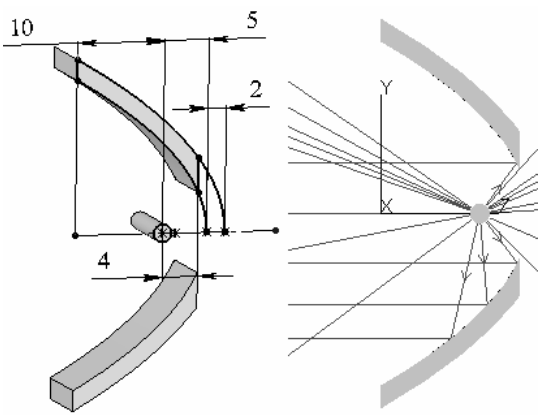


Рис. 9.43. Геометрические параметры объекта Trough и трассировка лучей в оптической системе

На рис. 9.43 приведена геометрия объекта Trough (дополнительно показан и цилиндр, поверхность которого будет источником света), а также результаты трассировки лучей в данной оптической системе. Внутренняя поверхность

параболоида — идеальный отражатель. Геометрия отражателя соответствует параметрам, приведенным на рис. 9.42.

На рис. 9.44 приведены результаты трассировки лучей для оптических систем с различным значением параметра **Lateral focal shift**.

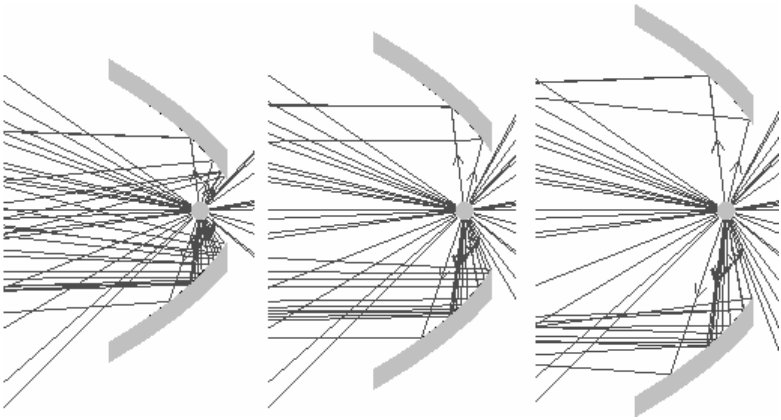


Рис. 9.44. Оптические системы на базе объекта Trough
со смещением образующих внутрь, без смещения, со смещением наружу

3D Compound (Составной 3D)

Синтезируется тело вращения, образованное поворотом параболы или эллипса вокруг оси, не проходящей, в общем случае, через фокус кривой. Набор параметров, за исключением отсутствия поля **Axis tilt** (Наклон оси), тождествен объекту **Compound Trough**. Эквивалентны и алгоритмы построения поперечного сечения фигур. Вид объекта с параметрами рис. 9.46 и траекториями лучей от сферического источника показан на рис. 9.45.

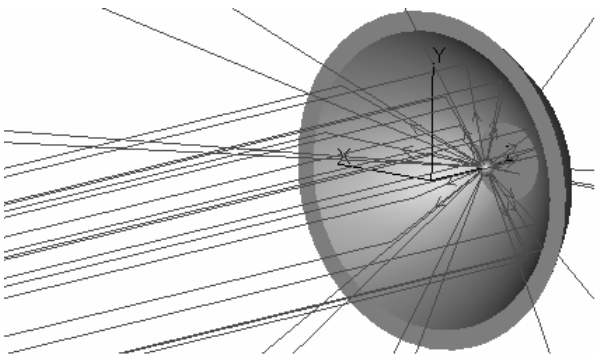


Рис. 9.45. Оптическая система на базе объекта **3D Compound**

Trough (Cylinder) (Желоб — цилиндр)

Цилиндрическое тело, в сечении которого находится коника. Окно вкладки (рис. 9.46) содержит следующие поля:

- **Shape** (Форма) — тип получаемой внутренней поверхности. Доступны: **Spherical** (Сферическая); **Parabolic** (Параболическая); **Elliptical** (Эллиптическая); **Hyperbolic** (Гиперболическая);
- **Length** (Длина) — поперечный размер объекта;
- **Thickness** (Толщина) — толщина объекта, получаемого приданием внутренней поверхности данной толщины;
- **Depth** (Глубина) — размер внутренней образующей в проекции на оптическую ось;
- **Slit width** (Ширина паза), **Slit length** (Высота паза) — размеры прямоугольного отверстия в тыльной части объекта;
- **Focal length** (Фокусное расстояние) — зависимая от типа объекта величина;
- **Origin** (Начало); **Rotation** (Ориентация) — эти параметры тождественны описанным для некоторых из предыдущих объектов.

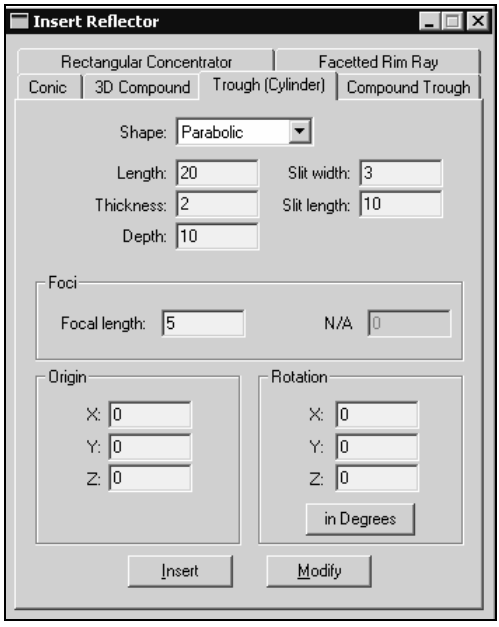


Рис. 9.46. Вкладка **Trough (Cylinder)**

На рис. 9.47 показана геометрия объекта Trough, а также результаты трассировки лучей от цилиндрического нормально излучающего источника, расположенного в фокусе. Внутренняя поверхность параболоида — идеальный отражатель. Геометрия отражателя соответствует параметрам, приведенным на рис. 9.46.

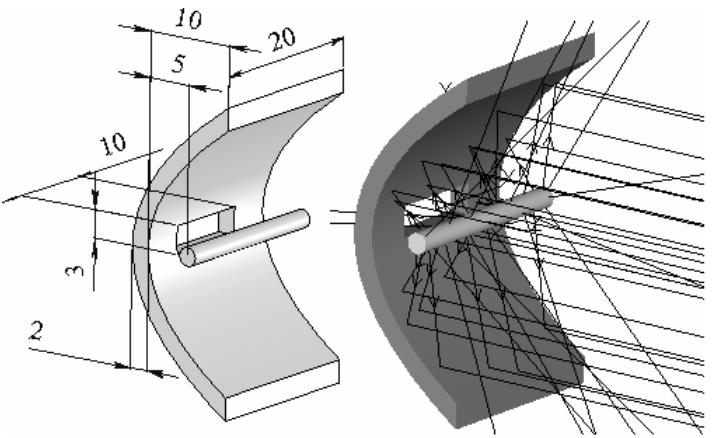


Рис. 9.47. Геометрические параметры объекта Trough и трассировка лучей в оптической системе

Rectangular Concentrator (Прямоугольный концентратор)

Вставляется объект, состоящий из двух отражателей типа **Compound Trough**. Внутренний контур сечений может быть параболой или эллипсом. Фокусы кривых совпадают. Большинство параметров (рис. 9.48) соответствующей вкладки идентичны тем, которые определяют **Compound Trough**. Оригинальными являются поля, характеризующие положение второго фокуса.

На рис. 9.49 приведены геометрические параметры объекта, соответствующие величинам полей окна на рис. 9.48. В фокус помещено тело, образованное двумя пересекающимися цилиндрами. Оба они излучают свет нормально поверхности, поэтому лучи от горизонтального цилиндра будут отражаться от верхней и нижней поверхностей, образованных параболой с фокусным расстоянием 5. Вертикальный цилиндр излучает световой поток, который взаимодействует с боковыми цилиндрическими поверхностями — для них использовалась парабола с фокусным расстоянием 15. Результат трассировки лучей показан на рис. 9.50. Отображены только лучи, которые достигают прямоугольного экрана, расположенного перпендикулярно оптической оси. Все лучи, которые отразились от концентратора, идут параллельно этой оси. Те же, которые не взаимодействуют с отражателем, направлены перпендикулярно излучающим поверхностям.

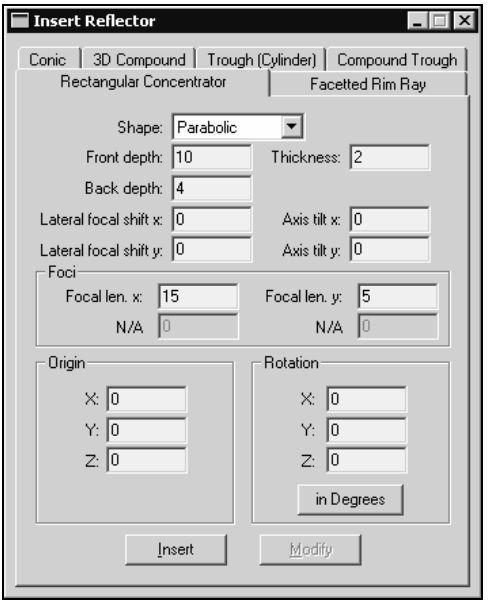


Рис. 9.48. Вкладка **Rectangular Concentrator**

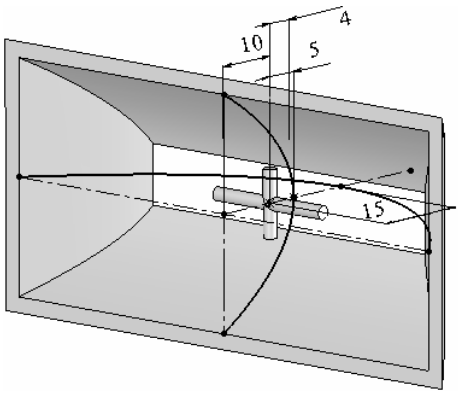


Рис. 9.49. Геометрические параметры объекта Rectangular Concentrator

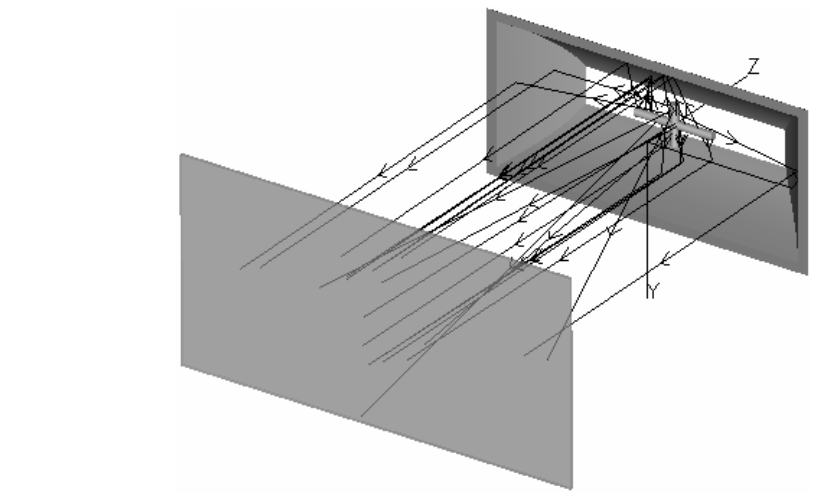


Рис. 9.50. Трассировка лучей в оптической системе, содержащей непрозрачный экран

Facetted Rim Ray (Фасетный отражатель краевых лучей)

Объект предназначен для создания отражателя, обеспечивающего равномерную освещенность плоской круглой грани под действием света, излучаемого

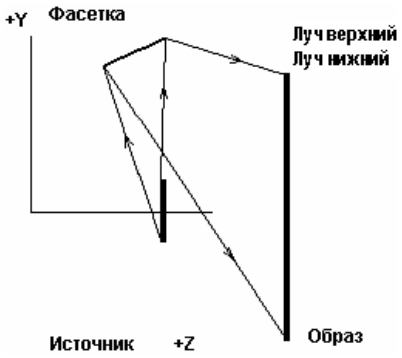


Рис. 9.51. Схема построения поверхности фасетного отражателя

плоской же круговой поверхностью. Отражатель является гранной аппроксимацией поверхности вращения или цилиндрической поверхности. Поэтому каждая внутренняя грань (фасетка) является равносторонней трапецией (прямоугольником). Предполагается, что излучение происходит равномерно во все стороны (поле **Angular Distribution** вкладки **Surface Source** принимает значение Uniform). Следует отметить, что задача не имеет точного решения, поэтому в программе используется следующий алгоритм: проблема приводится к плоской и решается для сечения объектов плоскостью YZ, проходящей через оптическую ось (рис. 9.51). Каждая фасетка — отрезок — располагается так, чтобы луч, испущенный верхней точкой отрезка-излучателя при попадании в крайнюю левую точку фасетки, после отражения направился в нижнюю точку цели. Луч же, испущенный верхней точкой источника и направленный в крайнюю правую точку фасетки, после отражения попал в верхнюю точку отражателя. Первое условие требует подбора длины образующей, поскольку построение начинается с точки на максимальном диаметре (верхней правой). Понятно, что при равномерном излучении с поверхности каждая ее точка служит источником бесконечного числа лучей, равномерно распределенных внутри полусферы, из которых только один участвует в формировании ячейки. Окно вкладки, определяющей форму фасетного отражателя (рис. 9.52), содержит следующие поля:

- **Shape** (Форма) — тип фигуры. Доступны: **Circular** (Окружность) и **Trough** (Желоб);
- **Thickness** (Толщина) — толщина стенки объекта;
- **Facets/Row** (Фасеток/Ряд) — число граней по окружности для кругового отражателя;
- **Length** (Длина) — длина корытоподобного (Trough) отражателя;
- **Height** (Полувысота) — половина высоты (радиус) внутренней поверхности отражателя;

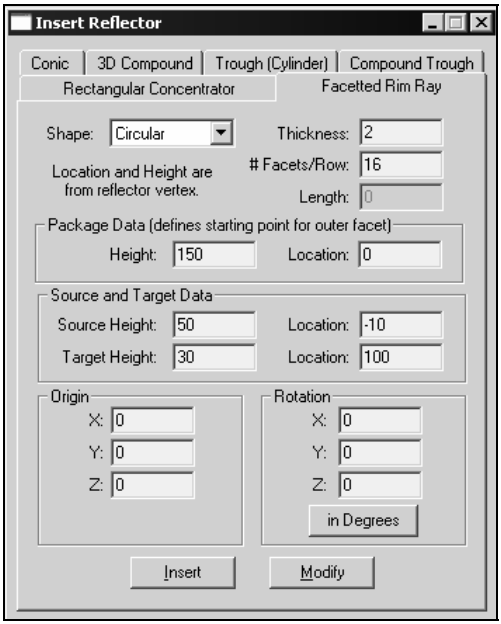


Рис. 9.52. Вкладка **Facetted Rim Ray**

- **Location** (Положение) — координата вдоль оси Z (оптической оси) крайней правой точки (вершины) отражателя;
- **Source Height** (Высота источника) — половина высоты (радиус) излучающей поверхности;
- **Source Location** (Положение источника) — координата Z источника света относительно вершины отражателя. Таким образом, если источник находится внутри поверхности рефлектора, то он имеет отрицательную координату;
- **Target Height** (Высота цели) — половина высоты (радиус) излучающей поверхности;
- **Target Location** (Положение цели) — координата Z источника света относительно вершины отражателя. Таким образом, если источник находится внутри поверхности рефлектора, то он имеет отрицательную координату;
- **Origin** (Начало) — координаты исходной точки объекта. В этом качестве используется центр гладкого круга;
- **Rotation** (Ориентация) — углы поворота объекта относительно осей исходной системы координат;
- **in Degrees/in Radians** (Градусы/Радианы) — кнопка, определяющая единицы измерения углов.

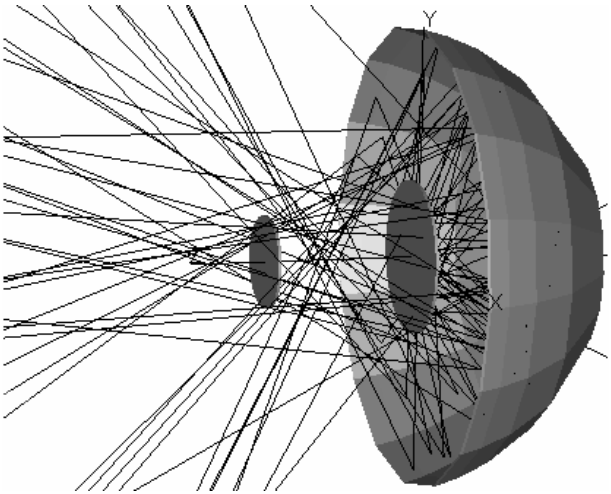


Рис. 9.53. Оптическая модель, содержащая фасетный отражатель и траектории лучей

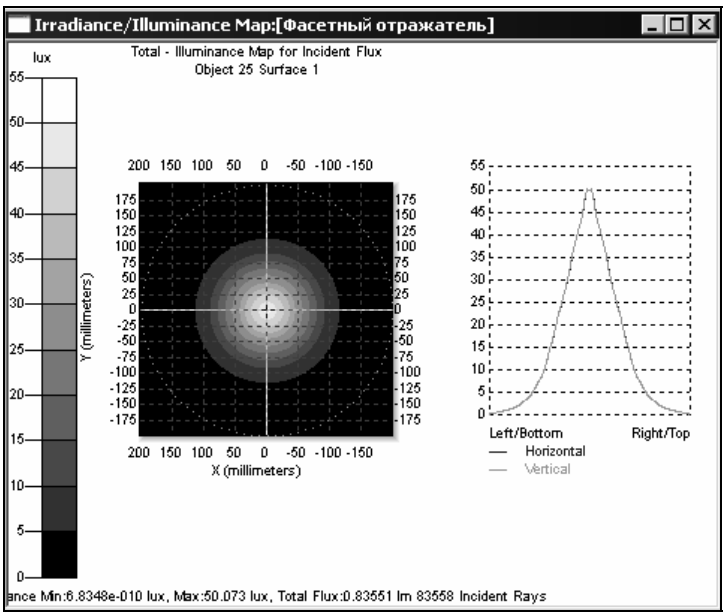


Рис. 9.54. Освещенность плоскости, проходящей через цель

На рис. 9.53 показана оптическая система, состоящая из фасетного отражателя, построенного в соответствии с параметрами рис. 9.52, а также источника и цели, размеры и положение которых назначены такими, как показаны на этой же иллюстрации. Для усложнения вопроса радиус источника принят достаточно большим, составляя 1/3 от радиуса рефлектора, а цель несколько

меньше — 1/5 его радиуса. Если бы форма рефлектора точно соответствовала задаче, то все лучи должны были бы сойтись на цели. Очевидно, что реальная конструкция несколько отличается от требуемой. Более точную информацию можно получить на диаграмме освещенности плоскости, проходящей через цель (рис. 9.54). Для этого создан достаточно протяженный объект (на картинке он не показан), грань которого совпадает с гранью цели, ближайшей к рефлектору. На диаграмме видно, что световой поток концентрируется в точке, лежащей на оптической оси. Если вычислить коэффициент полезного действия устройства, то окажется, что при излучении с поверхности источника 1 лм на цель попадает 0,12 лм при непрозрачном источнике и 0,133, если лучи свободно проникают сквозь источник (именно этот вариант приведен на иллюстрациях). Учитывая, что через отверстие в тыльной части отражателя "уходит" 0,17 лм и это, по сути, неизбежно, то КПД составляет соответственно 12 и 14 %. Нельзя сказать, что это высокий результат.

9.4.5. Меню *Define*

Меню **Define** (Назначить) совместно с дочерними меню показано на рис. 9.55. Оно содержит команды создания объектов оптических систем: разнообразных линз, отражателей, твердотельных примитивов, вставки моделей TracePro, а также источников света. Меню имеет следующие команды.

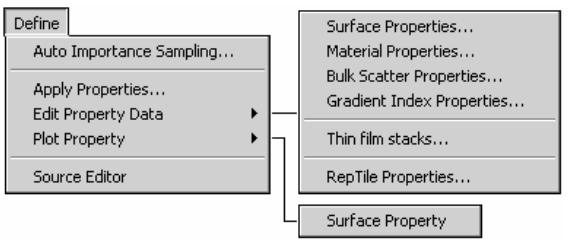


Рис. 9.55. Меню **Define**

Auto Importance Sampling (Автоматическая выборка по значимости)

Автоматическая выборка по значимости — процедура автоматизации назначения целей, определяемых последовательностью прохождения пробных лучей через оптическую систему. Эта процедура, как правило, применяется для анализа устройств детерминированной оптики: объективов, телескопов и т. д., т. е. систем, где можно прогнозировать ход каждого луча (если при этом не учитывается рассеяние). Этот прогноз включает неявную интерполяцию траекторий лучей, траектории которых лежат "между" некоторыми характерны-

ми лучами. Такого типа системы, как правило, обладают свойством осевой симметрии, а ее элементы (линзы, зеркала) не содержат составных поверхностей. Как и во всех задачах, связанных с использованием выборки по значимости, использование данной функции будет иметь смысл исключительно для оптических систем, в которых имеет место рассеяние на поверхностях. Поэтому нужно тщательно контролировать содержимое вкладки **Thresholds** (Пороговые значения) окна **Raytrace Options** (Параметры трассировки), чтобы предотвратить подавление рассеянных лучей, несущих относительно малую долю энергии.

Панель, в которой назначаются исходные данные для этого процесса, приведена на рис. 9.56. Ее функция состоит в определении нескольких лучей, которые проходят через характерные точки оптической системы. На базе этих траекторий программа формирует цели, сопоставляя их с поверхностями объектов оптической системы. Панель содержит поля, определяющие параметры лучей, проходящих через характерные точки цели:

- **Target Shape** (Форма цели) — переключатель, определяющий тип мишени: **Annular** (Круговая); **Rectangular** (Прямоугольная);
- **Position** (Координата), **Direction** (Направление) — параметры лучей, при прохождении которых компьютер будет формировать цели для объектов системы. Здесь, как и везде в данной программе, направление луча определяется вектором, первая точка которого — начало системы координат, а конец — точка **Direction**;
- **Gut Ray** (Внутренний луч) — луч, попадающий в центр апертуры (центр первой поверхности первого объекта) и затем проходящий через центр экрана, на котором формируется изображение;

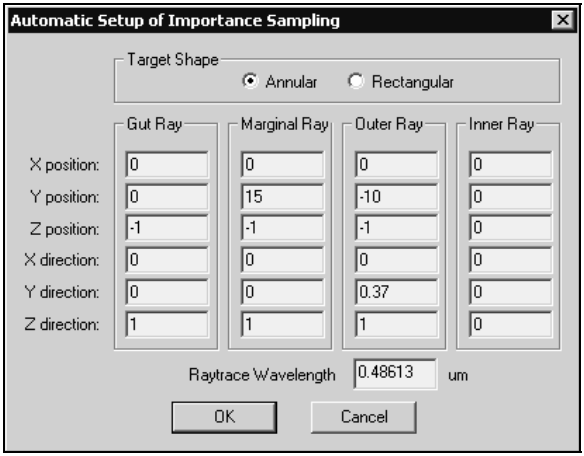


Рис. 9.56. Панель **Auto Importance Sampling**

- **Marginal Ray** (Краевой луч) — луч, попадающий на край апертуры и проходящий через центр экрана;
- **Chief Ray** (Главный луч) — луч, который после прохождения через оптическую систему падает на край экрана. Главных лучей может быть два или один. Для кольцевой мишени назначаются **Outer Ray** (Наружный луч) и **Inner ray** (Внутренний луч). Для прямоугольной — **Height Ray** (Луч по высоте) и **Width Ray** (Луч по длине). Для круговой мишени достаточно заполнить поля колонки;
- **Raytrace Wavelength** (Длина волны при трассировке) — длина волны, для которой производится расчет целей.

Процесс автоматического назначения целей рассмотрим на примере оптической системы, показанной на рис. 9.57 и 9.61. Исходная модель построена в линзовой программе OSLO. Если не вдаваться в подробности функционирования, то она собирает параллельный пучок света в точку на экране. Результаты трассировки коллимированного светового потока (использовалась функция **Grid Raytrace**, подробности о которой приведены ниже) показаны на рис. 9.57—9.59. Материал всех объектов, за исключением экрана — оптическое стекло. Поверхности не обладают свойством рассеяния. Для уточнения характера процесса исследуем зависимость результата от величины параметра **Flux Threshold** (Пороговое значение потока). Другие настройки, определяющие пороговые значения, при которых считается, что луч "умирает", показаны на рис. 9.60 и не изменяются. Также следует активизировать режим расщепления лучей после взаимодействия с поверхностью (рис. 9.62). На первом рисунке **Flux Threshold** = 0,1, на втором — 0,01, на третьем — 0,00001.

Видно, что при уменьшении порогового значения происходит увеличение числа лучей, траектории которых отклоняются от ожидаемой. Источник "отклонения" — расщепление светового потока на проникающий (преломленный) и отраженный. В данной задаче к цели "идет" только первая часть, а вторая, по сути, характеризует потери, а также порождает дефекты изображения (мы не будем рассматривать способы ликвидации таких эффектов, основным из которых является нанесение специальных покрытий). Этот анализ не имеет прямого отношения к работе и процедуре назначения цели. Дело здесь в том, что при учете рассеяния будут возникать лучи, не отличимые от тех, которые появляются при взаимодействии с идеальной поверхностью. Поскольку именно рассеянными лучами управляет функция **Importance Sampling**, то при визуальном контроле следует учитывать наличие расщепления лучей, не связанного с рассеянием.

Несмотря на то, что мы уже рассмотрели панель **Auto Importance Sampling**, манипуляции по автоматическому назначению целей начинаются с того, что

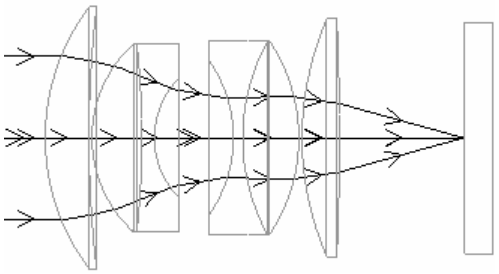


Рис. 9.57. Трассировка лучей при **Flux Threshold** = 0,1

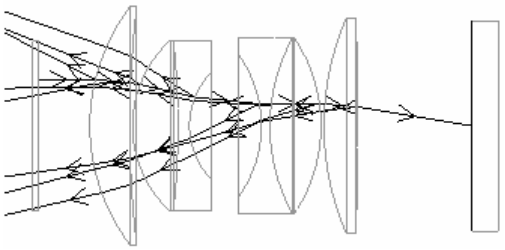


Рис. 9.58. Трассировка лучей при **Flux Threshold** = 0,01

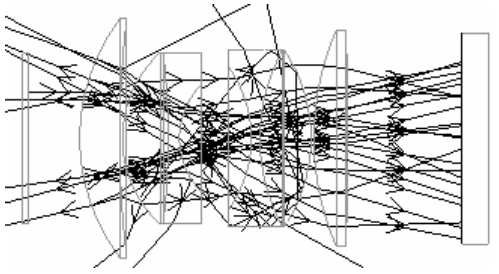


Рис. 9.59. Трассировка лучей при **Flux Threshold** = 0,00001

выполняется трассировка единственного луча, "прошивающего" систему в необходимой последовательности. Для того чтобы эта трассировка принесла желаемый результат, необходимо параметру **Flux Threshold** присвоить достаточно большую величину (т. е. игнорировать возможность прекращения его распространения), присвоив ей значение порядка 0,1, а также отключить опцию **Ray Splitting** (Расщепление луча). Далее следует (при отсутствии каких-либо активных объектов или поверхностей) активизировать вкладку **Prescription** (Предписание), показанную на рис. 9.60, в которой нужно заполнить поля **Origin** (Начало) и **Direction Vector** (Направляющий вектор), определяющие пробный луч. Отметим, что в данной модели начало координат находится в центре поверхности наружной линзы. Поэтому начало луча поместим на

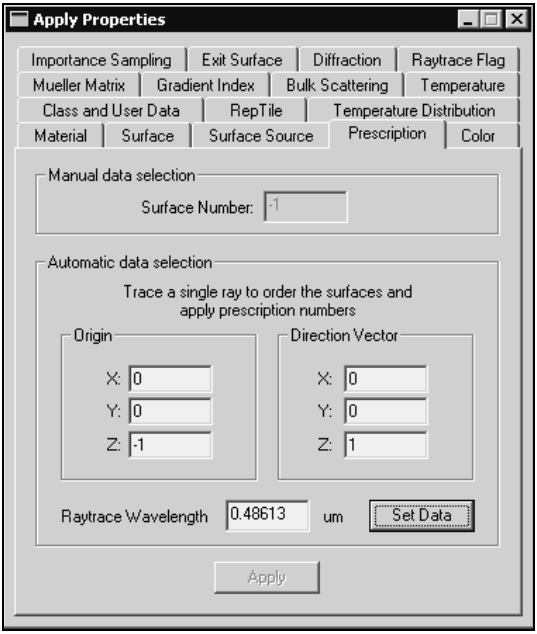


Рис. 9.60. Вкладка **Prescription**

ось системы снаружи и направим его вдоль оси внутрь. Учитывая, что система осесимметрична, а луч идет вдоль оси, прохождение луча через все объекты — при корректно назначенных оптических свойствах — гарантировано. Трассировка (без отображения луча) происходит после нажатия кнопки **Set Data**. Если все же луч не дойдет до цели, то значит потери чересчур велики, и следует назначить материалам параметры идеального преломления, а поверхностям — полное отсутствие оптических свойств и повторить выполнение команды. После этого каждой из поверхностей, встретившейся на пути луча, будет присвоен порядковый номер, который записывается в поле **Prescription Number** (Номер предписания). Его можно наблюдать в Дереве проекта (см. рис. 9.61), а также в поле **Surface Number** вкладки **Prescription**. Если же пользователя не устроит результат, то номера поверхностей в последовательности можно изменить, внеся соответствующее значение в поле и нажав кнопку **Apply**.

Следующий этап — трассировка пробных лучей с подбором координат их начала и направления. Цель — установление данных о лучах **Gut Ray**, **Marginal Ray** и **Outer Ray**. С учетом того, что мы имеем осесимметричную систему, это необходимая номенклатура параметров. Перед этим настраиваем режимы трассировки, заполняя (изменяя) поля вкладок **Options** (Настройки) — рис. 9.62 и **Thresholds** (Пороговые значения) — рис. 9.63.

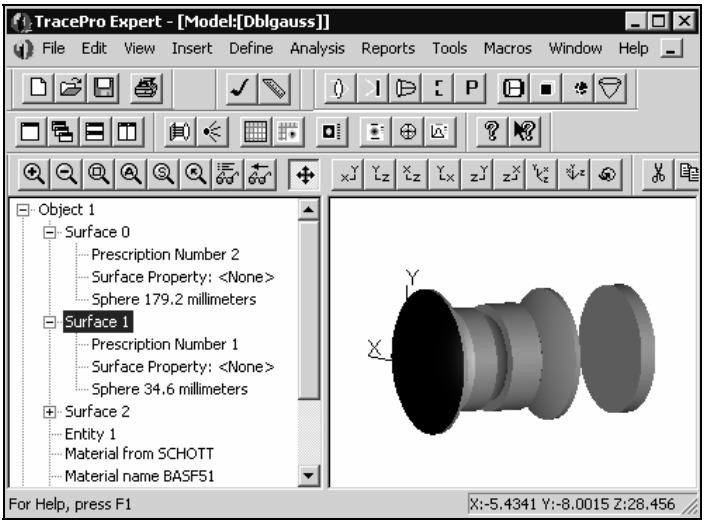


Рис. 9.61. Результат автоматического определения последовательности прохождения луча

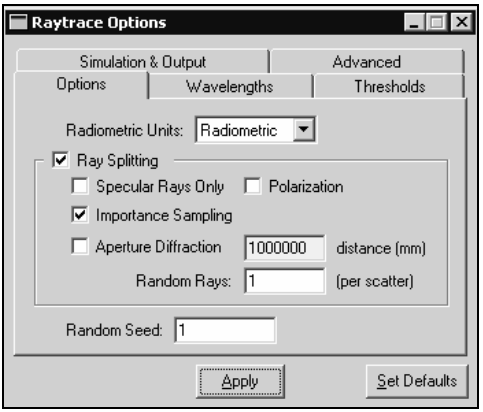


Рис. 9.62. Настройки режима трассировки

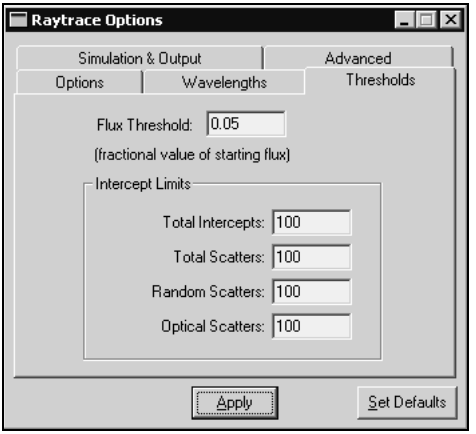


Рис. 9.63. Настройки пороговых значений

Для запуска пробных лучей используется функция **Grid Raytrace** (Трассировка на сетке). Параметры для луча **Gut Ray**, проходящего через оптическую ось, очевидны и не приводятся. Результат трассировки показан на рис. 9.64. Параметры лучей **Marginal Ray** и **Outer Ray** и соответствующие траектории с учетом рассеяния показаны на рис. 9.65—9.68.

Подобрав параметры пробных лучей, переносим их в панель **Auto Importance Sampling** (см. рис. 9.56) и нажимаем кнопку **OK**. Система для каждой

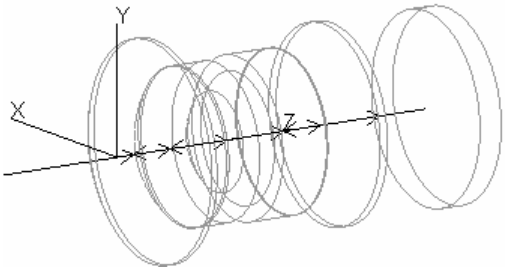


Рис. 9.64. Траектория луча **Gut Ray**

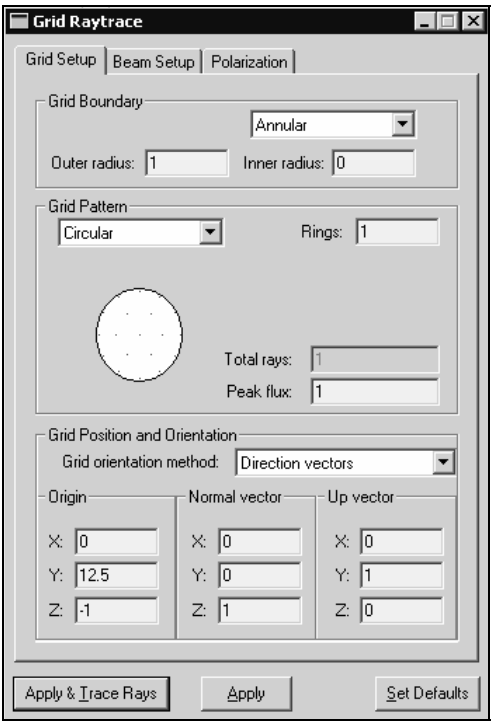


Рис. 9.65. Настройки вкладки **Grid Setup** для трассировки луча **Marginal Ray**

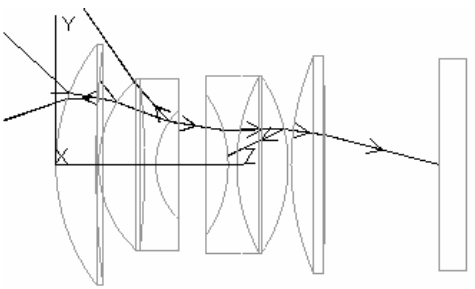


Рис. 9.66. Траектория луча **Marginal Ray**

из встретившихся на пути пробных лучей поверхности создает **Target** (Цель), параметры которой помещаются на вкладку **Importance Sampling**. Если характерные лучи были заданы корректно, то в окне **Message/Macro** появляется сообщение об удачном результате (рис. 9.69), содержащее информацию о числе поверхностей, для которых назначены цели. Размеры и ориентацию цели можно оценить не только по модели, но и численно (рис. 9.72).

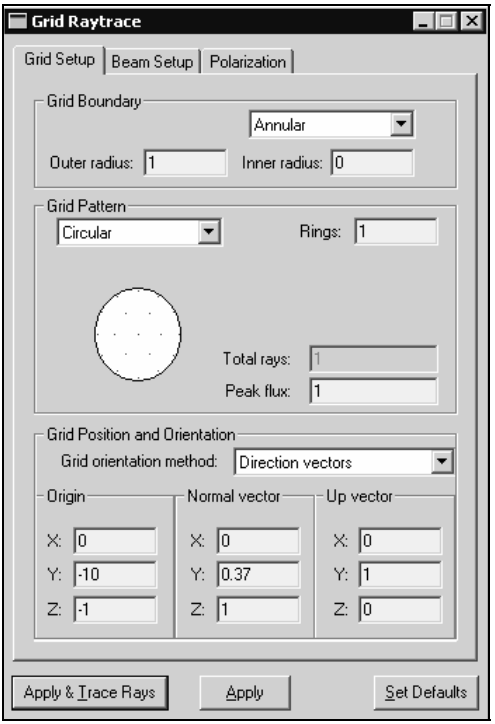


Рис. 9.67. Настройки вкладки **Grid Setup** для трассировки луча **Outer Ray**

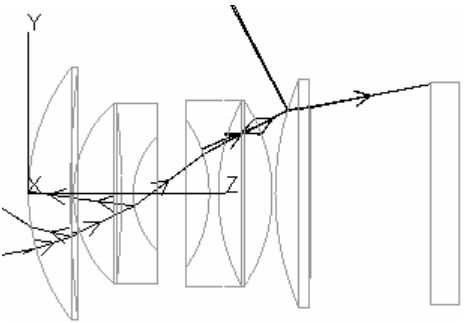


Рис. 9.68. Траектория луча **Outer Ray**

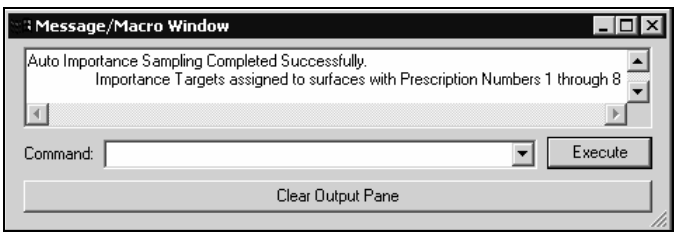


Рис. 9.69. Диагностика удачной трассировки лучей при формировании **Importance Targets**

Полученные цели можно визуализировать командой **Display Importance** из меню **View**. В результате на экране появится картинка, подобная рис. 9.70.

На этом заканчивается назначение порядка прохождения лучей через систему и соответствующих этому процессу целей. Следующий шаг — использование целей. Это подразумевает описание каждого из этапов взаимодействия света с поверхностями, а конкретнее — числа рассеянных лучей, на которые расщепляется луч при прохождении через поверхность. Этой характеристикой

является параметр **Rays** (Лучи). Он задается персонально для каждой из целей каждой поверхности. Данная величина только косвенно характеризует число потомков, однако, разумеется, чем параметр больше, тем больше лучей направляется в данный телесный угол. Для примера выделим некую поверхность (рис. 9.71) и назначим число лучей 1000 (рис. 9.72). Не забудем одновременно установить параметр **Flux Threshold** (Пороговое значение потока) достаточно малым (в данной ситуации — 5e-7), чтобы предотвратить "аннигиляцию" лучей.

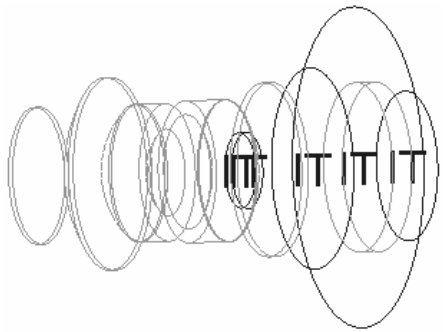


Рис. 9.70. Визуализация Importance Targets

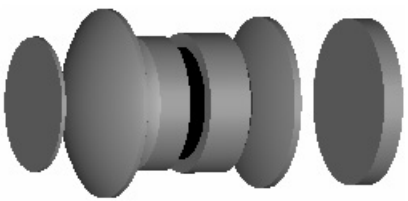


Рис. 9.71. Выделение поверхности для назначения Importance Targets

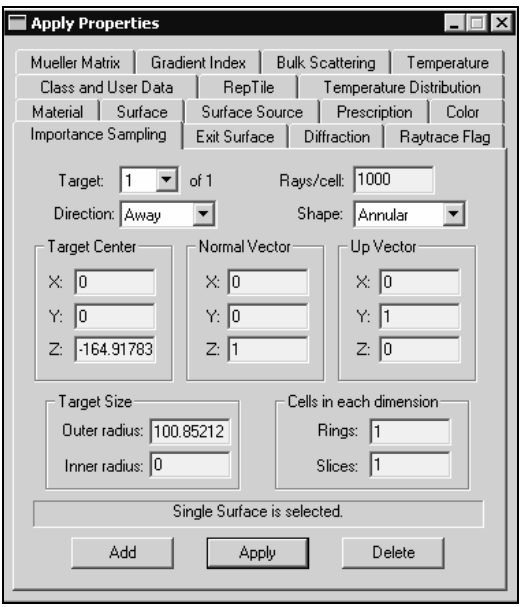


Рис. 9.72. Координаты цели, ее ориентация, размеры, а также число лучей, которые будут потомками исходного луча

Результаты трассировки без учета наличия целей и при активной опции **Importance Sampling** показаны на рис. 9.73. Отметим, что задача поставлена так, что источником испускается единственный луч (для этого введен дополнительный цилиндрический объект, поверхность которого является излучающей). В связи с малым пороговым значением и практически неограниченным числом допустимых преломлений/отражений, а также с учетом возможности расщепления, число лучей на выходе из системы достигает нескольких сотен. Видно, что при активизации целей формируется пучок лучей, выходящих из поверхности, для которой параметр **Rays** назначен относительно большим. При этом если в исходном варианте рассеяние происходило преимущественно в плоскости, проходящей через луч и оптическую ось,

то в следующем варианте происходит выход светового потока из этой плоскости.

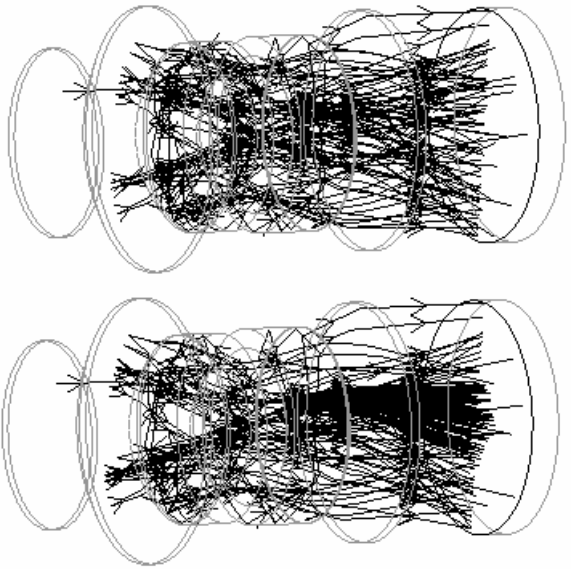


Рис. 9.73. Траектории лучей с исходными настройками и при активной опции **Importance Sampling**

В данной задаче мы не будем затрагивать численные оценки описанных действий. Это будет сделано в последующем примере.

Apply Properties (Назначить свойства)

Основная панель, в которой назначаются оптические свойства объектов и источников света. Присвоить оптические свойства можно персонально для любого из них, выбрав группу однородных объектов (тел или поверхностей), а также используя схему родитель-потомок. Последнее возможно исключительно для тел. Если выбрать тело (из дерева проекта или, после нажатия кнопки **Select Object**, в графическом окне) и попытаться присвоить поверхностные характеристики, то они будут назначены всем поверхностям объекта.

Число вкладок на панели **Apply Properties** достаточно велико. Будем рассматривать их последовательно на примере модели рассеивателя (рис. 9.74, слева). Источником света является горизонтальный цилиндр, имитирующий спираль лампочки. Колбу мы не помещаем в модель, поскольку ее учет не влияет на идеологию расчета (но на абсолютных величинах результатов он определенным образом сказывается). Спираль помещена в фокус параболи-

ческого рефлектора. Параболическую поверхность окружает цилиндр. Мы ввели его в модель для того, чтобы отсечь световой поток, идущий в стороны, облегчая тем самым интерпретацию результатов. Далее на пути света расположен рассеиватель. Он образован параллелепипедом, на внутреннюю поверхность которого помещены линзовые элементы (рис. 9.74). В нашем случае это полусферы, т. е. центры сфер находятся на внутренней плоскости параллелепипеда. Сферы помещены на квадратной сетке. При радиусе сфер 5 мм шаг сетки составляет 6 мм. На рис. 9.74 помещены результаты для одного из промежуточных этапов построения рассеивателя. Вкратце алгоритм (в SolidWorks) таков:

1. Строится параллелепипед.
2. Строится сфера с центром в одном из его углов.
3. Формируется линейный массив сфер.
4. Формируется массив из линейного массива.
5. Дважды выполняется зеркальное отображение объекта.

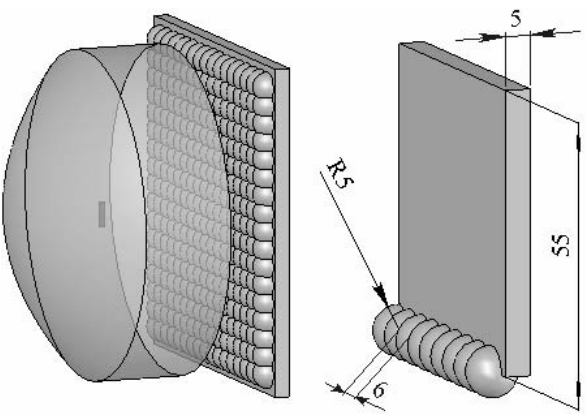


Рис. 9.74. Оптическая система и элемент рассеивателя

Модель транслируется из SolidWorks в TracePro через формат ACIS. Дальнейший шаг — анализ и "лечение" модели, корректировка геометрии. Следующее действие — присвоение оптических свойств объектам. Для этого используются соответствующие вкладки.

- **Material** (Материал) — выбор материала из числа присутствующих в базе данных программы. Поля вкладки (рис. 9.75) описаны далее:
  - **Catalog** (Каталог) — список каталогов, в которых находятся марки материалов. Наиболее употребительные каталоги: SCHOTT, OHARA, HOYA, Hikari — оптические стекла; PLASTIC — прозрачные пластмассы; Coating — оптические покрытия; Birefringent — двоякопреломл-

ляющие материалы. Большинство материалов содержит информацию о зависимости коэффициентов преломления и поглощения от длины волны;

- **Name** (Название) — марка материала, выбираемого из числа имеющихся в базе данных;
- **Wavelength** (Длина волны) — длина волны (Нм), для которой будет вычисляться коэффициент преломления;
- **Index** (Коэффициент преломления), который для данного материала берется из базы данных;
- **Absorption Coef** (Коэффициент поглощения) — коэффициент поглощения данного материала, вычисляемый в интервале 0...1;
- **Transmission** (Коэффициент пропускания) — доля светового потока, прошедшего через заданную пользователем толщину материала. Изменение длины, на которой вычисляется эта величина, не меняет собственно физические свойства материала, а служит исключительно инструментом контроля;
- **Current Material on Selected Object** — поле, в котором отображаются каталог, и марка материала, присвоенная данному объекту;
- кнопка **Apply** (Применить) — после нажатия этой кнопки характеристики выбранного материала присваиваются объекту;

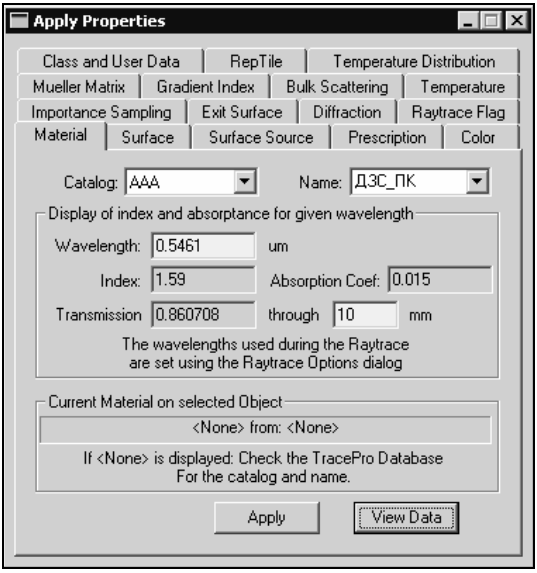


Рис. 9.75. Вкладка **Material**

- кнопка **View Data** (Просмотреть данные) — после нажатия кнопки выводится панель, в которой можно просматривать и редактировать параметры материала, создавать новые каталоги и материалы. При этом если были предприняты эти действия, то данный материал назначен объекту не будет. Для этого нужно воспользоваться кнопкой **Apply**.

Обратим внимание, что материал можно назначать только объекту (или группе объектов), причем ответственность за то, является ли объект телом, которое только и может обладать свойствами материала (преломлять, пропускать свет), лежит исключительно на пользователе. После назначения объекту параметров некоторого материала система не теряет связи с базой данных, т. е. изменив в базе характеристики и повторив расчет, получим новый результат. То же самое относится к свойствам поверхностей.

Данную опцию мы применяем для назначения в приведенной модели характеристик рассеивателя.

- **Surface** (Поверхность) — выбор и назначение поверхности или группе поверхностей характеристик из числа присутствующих в базе данных Поля вкладки (рис. 9.76) в большинстве своем тождественны имеющимся на вкладке **Material**. Исключение — описательное поле **Reference Data**

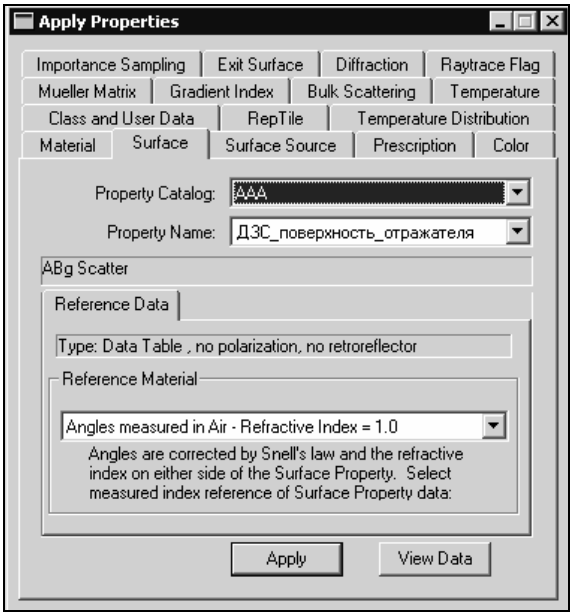


Рис. 9.76. Вкладка **Surface**

(Справочные данные) и поле **Reference Material** (Ссылочный материал). В этом поле назначается, будет ли влиять коэффициент преломления материала на отражающие свойства. Традиционно используются параметры воздуха с коэффициентом преломления 1.

Свойства поверхностей можно назначать как одной или нескольким поверхностям, так и объектам. В последнем случае всем поверхностям выбранного объекта будут присвоены заданные характеристики.

Просмотреть численные величины, определяющие свойства, можно, нажав кнопку **View Data**. В появившейся панели (мы рассмотрим ее в *разд. 9.4.5*) можно увидеть все параметры, изменить их, а также вывести информацию о других типах и марках. Если свойства изменить, то новый расчет будет выполняться на базе новых характеристик. Если в панели свойств вывести другую марку, то она не будет применена к текущей активной поверхности (поверхностям). Сделать это можно только в окне **Apply Properties**.

В модели рис. 9.74 мы назначим рефлектору (выбрав его как объект) поверхностные свойства, соответствующие зеркалу с определенной долей поглощения и рассеяния. Также всем поверхностям цилиндра, имитирующего спираль (выбрав его как объект), назначаем свойство **Perfect Absorber** (Абсолютный поглотитель) из каталога **Default** (По умолчанию). Отметим здесь, что мы не стали пытаться присвоить свойство поглощения материалу цилиндра. Во-первых, это невозможно, потому что цилиндр не является телом. Во-вторых, и это существенно, объем вычислений при манипуляции с телом будет несколько больше, поскольку программе придется просчитывать длину пути луча.

- **Bulk Scattering** (Свойство рассеяния) — присвоение выбранному объекту параметров рассеивания (рис. 9.77). Они выбираются из номенклатуры свойств, введенных ранее. Просмотр численных величин, определяющих соответствующее свойство, производится в панели **Bulk Scatter Property Editor** (ее содержание мы также проанализируем в *разд. 9.4.5*). Назначение свойства осуществляется исключительно посредством кнопки **Apply**. Естественно, что присвоение свойства данного типа имеет смысл исключительно для объектов, являющихся телами.
- **Surface Source** (Источник на поверхности) — назначение поверхности или группе поверхностей параметров источника света (рис. 9.78). Если выбрано несколько поверхностей или активизирован объект, то каждому из них будут присвоены характеристики, приведенные на вкладке. Если более конкретно, то заданная сила света не делится между всем множеством источников, а присваивается каждой из поверхностей. Здесь, кстати, следует обратить внимание, что в TracePro нет "объемных" источников

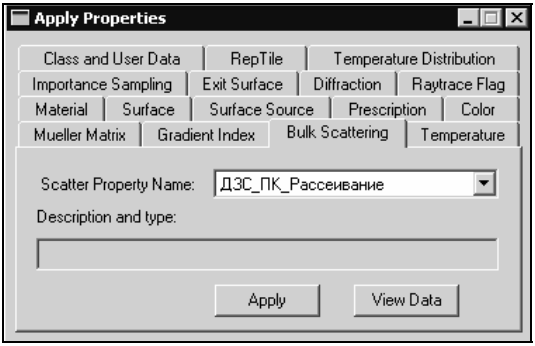


Рис. 9.77. Вкладка **Bulk Scattering**

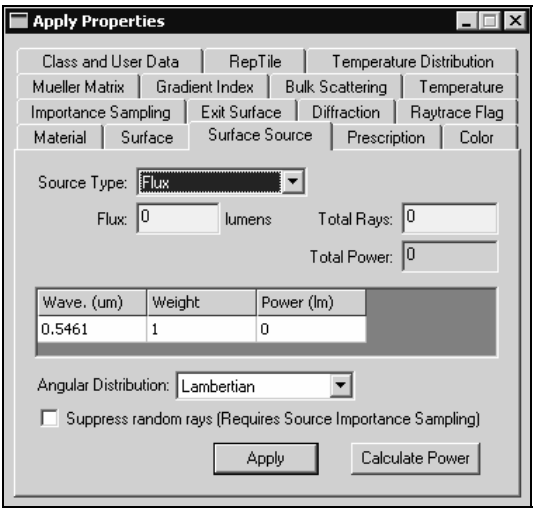


Рис. 9.78. Вкладка **Surface Source**

излучения (в отличие, например, от программы COSMOSWorks, где тепловая мощность может быть атрибутом тела, равномерно выделяясь в его объеме). Опции, связанные со светотехническим анализом, мы рассмотрим более подробно. Ту часть, которая касается переноса энергии излучением — конспективно. Вкладка имеет следующие поля:

- **Source Type** (Тип источника) — можно принимать следующие значения: **Flux** (Поток) — в зависимости от того, в каких единицах — фотометрических или радиометрических — решается задача, имеет размерность люмены или ватты; **Irradiance** (Яркость) — в данном контексте это поверхностная плотность потока излучения, измеряемая в люксах или в Вт/м^2; **BlackBody** (Черное тело) — излучение черного тела; **GrayBody** (Серое тело) — излучение серого тела;

- **Flux** (Поток) — собственно величина параметра, тип которого определен в предыдущем пункте;
- **Total Rays** (Всего лучей) — число лучей, испускаемых поверхностью. Эта величина никак не связана с мощностью, т. е. можно большую мощность передать малым числом лучей и наоборот. Однако соображения здравого смысла подсказывают, что если излучающих поверхностей в модели несколько, то количество лучей (относительно других поверхностей) должно зависеть от мощности источника и, что менее значимо, площади излучающей поверхности;
- **Total Power** (Полная мощность) — вычисляемый параметр, характеризующий мощность источника. Он имеет смысл в ситуации, когда имеется излучение с различными длинами волн, а также если назначается плотность излучения. Тогда с учетом площади источника рассчитывается мощность, отдаваемая поверхностью. Для этого применяется кнопка **Calculate Power** (Рассчитать мощность);
- **Wave** (Длина волны), **Weight** (Весовой коэффициент), **Power** (Мощность) — параметры излучения. Содержание первых двух столбцов определяется в панели **Raytrace Options**, третий столбец — вычисляемый. Отметим, что весовые коэффициенты не обязаны в сумме составлять единицу. Это, однако, весьма желательно, поскольку возникает противоречие между назначенной мощностью в поле **Flux** и вычисленной, которая отображается в поле **Power**;
- **Angular Distribution** (Угловое распределение) — тип распределения мощности излучения в пространстве. Может принимать значения: **Lambertian** (Ламбертово); **Normal to Surface** (Нормально поверхности); **Surface Absorptance** (Поверхностное поглощение); **Uniform** (Однородное). Излучение **Lambertian** характеризуется распределением интенсивности по закону косинуса. Это значит, что она пропорциональна косинусу угла между нормалью к поверхности и направлением, в котором испускается энергия. Данный тип распределения, как правило, наиболее адекватно описывает излучение поверхностей накаливания. Типы **Uniform** и **Normal to Surface** в комментариях не нуждаются. Вариант **Surface Absorptance** предназначен для ситуации, когда излучаемость поверхности прямо связывается с ее поглощающей способностью, которая может зависеть от длины волны. Именно последний вариант может сделать данную функцию актуальной.

Активизировав объект — цилиндр спирали, — вызываем контекстное меню объекта, подаем команду **Apply Properties** и на панели выбираем вкладку **Surface Source**. Если на вкладке **Options** (Настройки) панели **Raytrace Options** (Параметры трассировки) для поля **Radiometric Units**

выбрать значение **Photometric** (Фотометрические), то световой поток будет измеряться в люменах. Если цилиндр образован единственной поверхностью, то назначаем величину полного светового потока, излучаемого источником света. Если цилиндр образован несколькими поверхностями, то нужно в поле **Flux** ввести соответствующую долю светового потока. Необходимо также задать некоторое число лучей, излучаемых объектом. Сколькими лучами можно обеспечить требуемую точность — это тема отдельного разговора *(см. разд. 9.5)*, поэтому, поскольку расчет демонстрационный, назначаем не слишком большую величину. В подобных задачах наиболее близким к действительности является ламбертово распределение излучения. Однако если бы источник был сферическим, то результаты для всех типов распределения были бы практически тождественны. Поскольку рассматривается величина интегрального светового потока, а также не предполагается учитывать зависимость оптических характеристик от длины волны, то расчет мощности не нужен (как упоминалось, результат этой операции носит исключительно справочный характер).

Некоторым затруднением может стать недоопределенность информации о нормали к поверхности. Очевидно, что у каждой поверхности может быть две коллинеарных нормали. Луч света может быть направлен как в одну, так и в другую сторону. Изменить направление нормали можно посредством команды **Reverse Surfaces** (Развернуть поверхности). Для твердотельных объектов таких проблем (в реальных задачах) не возникает, поэтому, несмотря на кажущуюся простоту представления объектов поверхностями, использование твердых тел имеет определенные преимущества. Еще одна особенность поверхностного представления объектов в TracePro — то, что нельзя присвоить сторонам поверхностей различные свойства, т. е. для рефлектора сделать одну поверхность отражающей, а другую — поглощающей.

Еще одно поле, присутствующее на вкладке **Surface Source**, — это **Suppress Random Rays** (Подавить случайные лучи). Смысл его в том, что для поверхности, являющейся источником, назначаются **Targets** (Цели) — круглые или прямоугольные виртуальные объекты, в которые и будут направляться лучи, исходящие от источника. Если быть более корректным, то не "направляются" нужные лучи, а "отсекаются" бесполезные до тех пор, пока не будет набрано необходимое число нужных.

Targets создаются на вкладке **Importance Sampling**, а на данной вкладке только активизируются (рис. 9.79). В конкретной задаче эта опция малополезна по той причине, что практически любой луч, исходящий от спирали, может быть "полезным". Поэтому рассмотрим другой пример. Модель показана на рис. 9.80. Там же выведены траектории лучей, испущенных одной из граней малого куба по ламбертовому закону. В нижней части ил-

люстрации показаны только те лучи, которые достигли грани большого куба. Из 50 испущенных лучей цели достигли только 6. Если для грани-источника назначить **Importance Targets**, как показано на рис. 9.81, то все лучи "постараются" пройти через цель (на рисунке это круг), а на грань большого куба попадет существенная их часть (нижняя часть рисунка). Подробности, касающиеся использования **Importance Targets**, изложены далее.

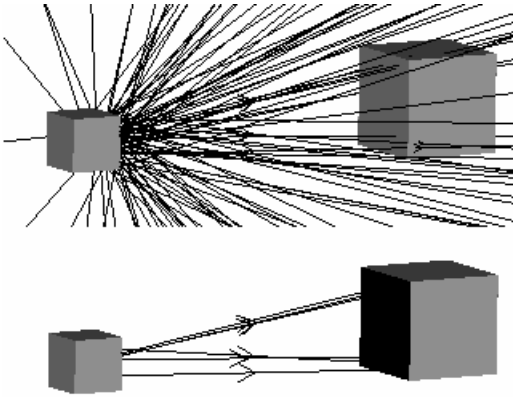


Рис. 9.79. Результаты трассировки без активизации опции **Importance Sampling**

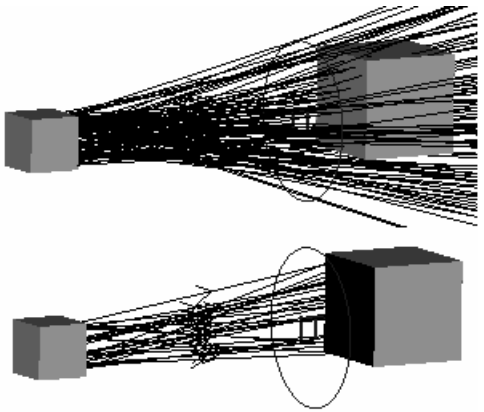


Рис. 9.80. Результаты трассировки с активной опцией **Importance Sampling**

Отвлечемся от разбора команд программы. Рассмотрим более подробно понятие **Importance Sampling** (Выборка по значимости) — назначение целей для данной поверхности. В разделе, посвященном описанию команды **Auto Importance Sampling**, было начато обсуждение вопроса о способах применения выборки по значимости. Назначение этой функции — выделить для за-

данной поверхности одну или несколько целей (круглых или прямоугольных областей), чтобы программа преимущественно направляла лучи, испущенные или отраженные данной поверхностью через заданные цели. Понятно, что не всеми лучами можно управлять по этому принципу. В предыдущем пункте рассматривался случай, когда программа отбрасывала лучи, идущие от источника вне заданных областей. Возможен и другой вариант. Если поверхность обладает свойством рассеяния, то программа может повышать вероятность попадания рассеянной составляющей энергии в заданный целью телесный угол. Чем рассеянная составляющая больше (относительно доли светового потока отраженной зеркально), тем эффективнее эта опция. Как упоминалось, цели можно назначать автоматически, для чего программа отслеживает путь некоторого количества предопределенных лучей. Из описания этого алгоритма следует, что такой подход пригоден исключительно для детерминированных оптических систем, таких как объективы. В светотехнических же объектах траектории близких лучей могут отличаться радикально. Характерный пример — конструкции, содержащие рассеиватели с линзовыми элементами. На одну и ту же линзу могут попасть лучи с самой различной историей. После взаимодействия с линзой весьма близкие по направлению лучи могут разойтись в пределах значительного телесного угла.

По этой причине алгоритмизировать выделение целей (по сути, предсказать траектории лучей) невозможно. Для некоторых поверхностей делать это бессмысленно, а для некоторых — нереально. В частности, для объекта рис. 9.82 все лучи, испущенные спиралью, а также почти все лучи, отраженные рефлектором, могут быть "полезны". В то же время, практически все лучи после отражения от поверхности рефлектора попадут на тот или иной линзовый элемент, но поскольку их может быть много десятков, то пытаться связать с ними соответствующее количество целей или же создать цель, объединяющую их, не слишком рационально. Тем не менее даже в этой ситуации можно до некоторой степени повысить эффективность расчета, используя данную функцию.

Importance Sampling (Выборка по значимости)

Вкладка **Importance Sampling** (Выборка по значимости) показана на рис. 9.81. Она содержит следующие поля:

- **Target** (Цель) — номер цели (объекта), в который будут направлены лучи. При создании новой цели номер ей присваивается автоматически. Величина номера не играет никакой роли. Посредством этого поля выбирается цель для просмотра и редактирования;
- **Rays/cell** (Лучей/ячейку) — число лучей, которые должны пройти через цель. Окончательный результат не всегда соответствует ожиданиям по

причине того, что в цель попадают лучи, направляющиеся не из поверхности, для которой эта цель назначена. Кроме того, программа не дает возможности непосредственно контролировать это число. Косвенный способ — расположить на цели или, что ближе к реальности, непосредственно за целью объект, для соответствующей поверхности которого можно установить число попавших на него лучей. В процессе анализа рекомендуется постепенно увеличивать этот параметр, наблюдая за сходимостью процесса;

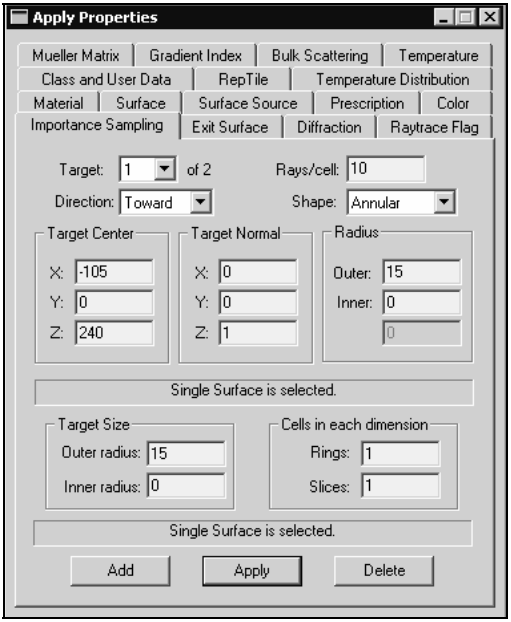


Рис. 9.81. Вкладка **Importance Sampling**

- **Direction** (Направление) — определяет, куда будут следовать лучи: от объекта к цели или наоборот. Список выбора предоставляет, соответственно, два варианта: **Toward** (Вперед), т. е. от поверхности к цели, и **Away** (Обратно) — от цели к объекту;
- **Shape** (Форма) — форма контура цели. Может принимать значения **Annular** (Кольцеобразная) и **Rectangular** (Прямоугольная). Круглые цели управляются параметрами: **Target Center** (Центр цели); **Target Normal** (Нормаль цели); **Outer Radius** (Наружный радиус); **Inner Radius** (Внутренний радиус). Если эта величина равна нулю, то цель становится кругом. Для прямоугольной цели нужно назначить координаты трех точек: **First Corner** (Первый угол); **Second Corner** (Второй угол); **Third Corner** (Третий угол), которые определяют ее размеры и ориентацию;

- группа параметров, определяющих степень подробности при разбиении цели: для круглой — **Rings** (Кольца), **Slices** (Сегменты); для прямоугольной — **XCells**, **YCells** (Ячеек по X и Y). Эти параметры определяют, на сколько областей расчленяется цель. Тогда назначенное число лучей (**Rays/cell**) запускается в каждый такой участок. Эта опция предназначена для ситуаций, когда цель велика настолько, что распределение светового потока по ней может быть неоднородно. Чтобы эту неоднородность уменьшить, производится деление на ячейки, после чего лучи запускаются персонально в каждую такую ячейку;
- кнопки **Add** (Добавить), **Apply** (Применить), **Delete** (Удалить) предназначены для создания новой цели, редактирования одной из имеющихся (она выбирается из числа появляющихся в списке **Target**) и уничтожения текущей выбранной.

На рис. 9.82 показан рассеиватель с двумя целями, которые назначены для его наружной поверхности. Параметры одной из них показаны на рис. 9.81. Эти цели соответствуют двум из четырех квадратных поверхностей, имитирующих датчики. Эти датчики регистрируют освещенность. Поскольку спираль расположена горизонтально, а ее центр находится на оси Z, то световой поток распределяется симметрично относительно плоскостей YZ и ZX. Данная конфигурация позволит оценить результат действия функции **Выборка** по значимости, а также собственно эффективность различных подходов для интерпретации результатов, касающихся конкретных точек.

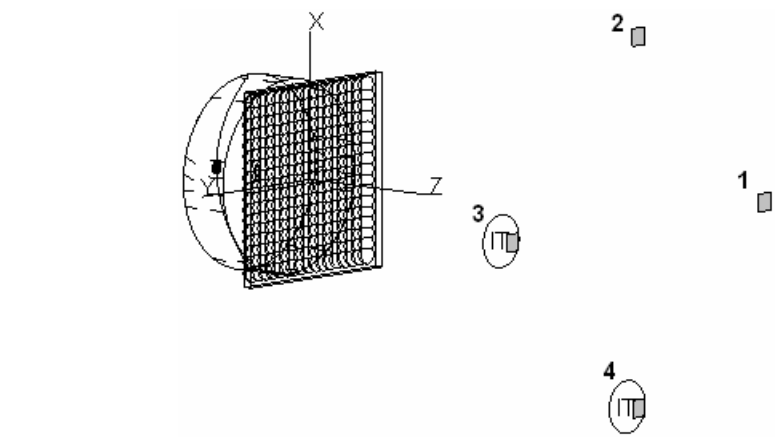


Рис. 9.82. Оптическая система с целями, назначенными для наружной поверхности рассеивателя

Характеристики поверхности приведены на рис. 9.83. Поглощение отсутствует. Рассеянная составляющая составляет 20 %, причем рассеяние происходит в достаточно узком пространственном угле.

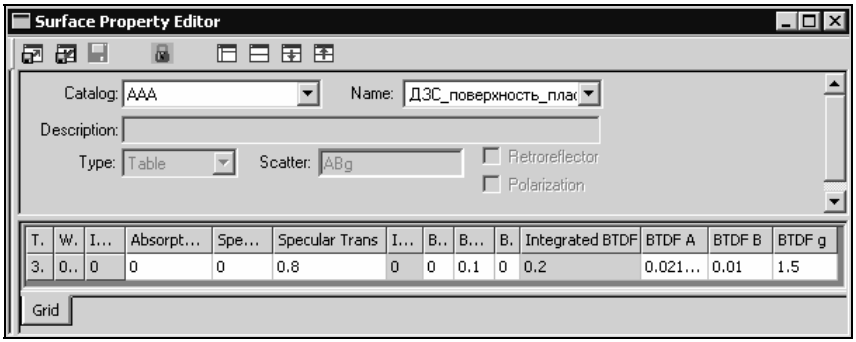


Рис. 9.83. Характеристики поверхности

Проведем вычислительный эксперимент, который должен ответить на следующие вопросы.

- Приводит ли использование функции **Importance Sampling** к увеличению или же потере точности?
- Ускоряется ли расчет в том смысле, что сходимость достигается при меньшем количестве лучей, или же при эквивалентном числе лучей расчет требует меньше времени?
- Как соотносятся настройки вычислительного процесса, определяющие **Thresholds** (Пороговые значения)?

  Вычисления производились для числа лучей 25, 50, 75, 100, 125 тысяч. Расчеты выполнялись для пороговых значений прекращения хода луча 0,01 % и 1 %. Другие константы, превышение которых приводит к остановке луча, показаны на рис. 9.63 (**RayTrace Options** | **Thresholds**). Освещенность вычислялась на основе информации о световом потоке, падающем на квадратные грани. Частное от деления светового потока на площадь есть средняя освещенность объекта.

  На рис. 9.84 показаны результаты для точек 1 и 3, которые находятся в плоскости, проходящей через ось оптической системы и ось спирали при пороговом значении потока 0,01 %, а на рис. 9.85 — в плоскости, перпендикулярной оси в точках 2 и 4. Следующие два рисунка (рис. 9.86 и 9.87) есть результаты расчета с пороговым значением 1 %.

Совместный анализ результатов приводит к следующим выводам:

- различия в динамике результатов для расчета с активной выборкой по значимости и без нее практически отсутствуют;
- при больших пороговых значениях (более активном отсечении лучей малой мощности) флуктуации величин освещенности менее значимы, чем при меньших;

- существует определенная систематическая погрешность в расчете освещенности. Она характеризуется различием результатов в областях 1, 3 и 2, 4 соответственно. При достаточно большом числе лучей она не превышает 10 %, однако тенденции к полному устранению не проявляется.

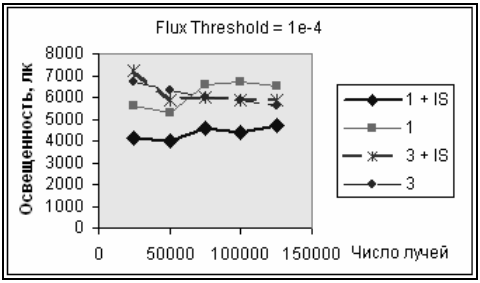


Рис. 9.84. Динамика изменения результата в областях 1 и 3 при пороговом значении 0,01 %

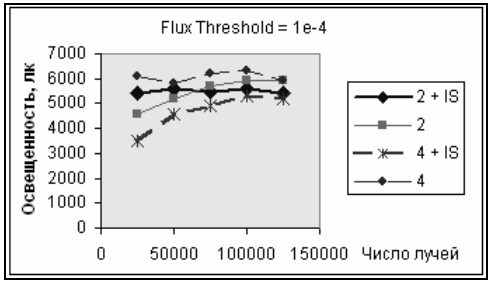


Рис. 9.85. Динамика изменения результата в областях 2 и 4 при пороговом значении 0,01 %

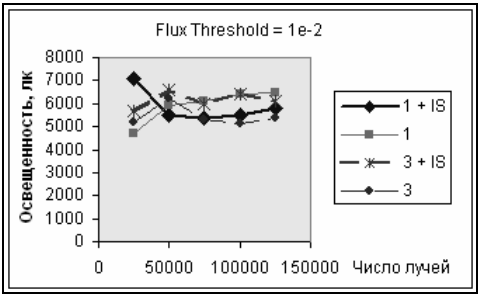


Рис. 9.86. Динамика изменения результата в областях 1 и 3 при пороговом значении 1 %

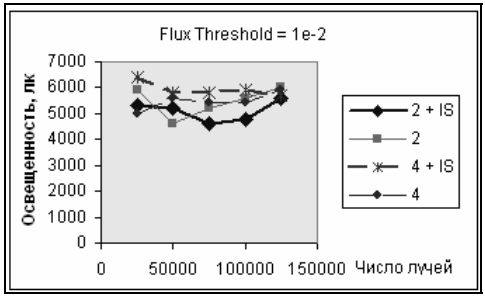


Рис. 9.87. Динамика изменения результата в областях 2 и 4 при пороговом значении 1 %

Как представляется, источником неэффективности функции **Importance Sampling** в данном примере является относительно малая доля рассеянного потока, а также высокая его концентрация в направлении зеркального луча. Поверхности, склонные к равномерному рассеянию, могут быть более подходящими для этой процедуры.

Краткое резюме таково: данную задачу и круг проблем, к которому она относится, можно решать без использования опции **Выборка по значимости**.

Столкнувшись с вопросом об интерпретации результатов расчета освещенности в предопределенных точках, доведем его решение до логического завершения. Создав в центрах точек грани конечного размера (достаточно малые относительно предполагаемого градиента функции и достаточно большими, чтобы иметь необходимое для осреднения результатов число лучей, попав-

ших на объект), можно рассчитать величину освещенности. Однако несмотря на то, что результат получен осреднением по некоторой области, и число лучей, в общем, весьма велико, налицо наличие стохастической компоненты в результате. Попробуем обратиться к "естественному" способу выделения искомой величины освещенности — анализу диаграммы освещенности. Подробности о настройке ее параметров и особенности интерпретации изложены далее. Сама диаграмма показана на рис. 9.94. Здесь же мы приведем график, аналогичный тем, которые строились для освещенности виртуальных датчиков (рис. 9.88). Выводы вполне очевидны:

- сходимость результата при увеличении числа лучей происходит более выражено и достигается при меньшем числе лучей;
- активизация процедуры **Importance Sampling** порождает увеличение стохастической составляющей, а также усиливает различие в результатах между точками, попавшими в цели и вне их;
- погрешности в результатах (измеряемые как различие между симметричными точками и флуктуация при изменении числа лучей) сопоставимы с погрешностью в процессе выделения искомой величины в точке на диаграмме и неоднозначностью, возникающей при настройке параметров диаграммы.

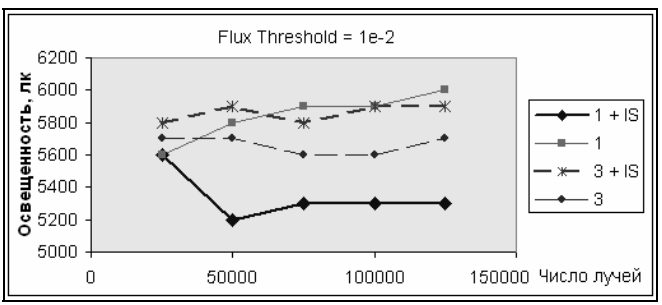


Рис. 9.88. Динамика изменения результатов для освещенности, снятой с экрана в точках 1 и 3

Корень причин, обусловивших эти эффекты, — факт того, что картина освещенности экрана должна быть весьма гладкой. Поэтому процесс осреднения, имеющий место в ходе построения диаграмм (как освещенности, так и большинства остальных), в данной ситуации приводит к нивелированию случайных компонентов результата и, соответственно, меньшей его чувствительности к всевозможным подробностям.

Exit Surface (Поверхность выхода)

Exit Surface (Поверхность выхода) — вкладка показана на рис. 9.89. Она предназначена исключительно для управления одной опцией. Ее смысл рас-

шифровывается в надписи на панели: выбранная поверхность будет использована для сбора данных при расчете в режиме симуляции. Это значит, что для поверхностей, у которых эта опция не активна, никакие результаты получены быть не могут. Если поверхность назначена как поверхность выхода, то можно использовать ее как источник света для обратной трассировки. При этом следует назначить **Number of reverse rays** (Число обратных лучей), имея определенную для этой поверхности **Importance Target** (Значимая цель).

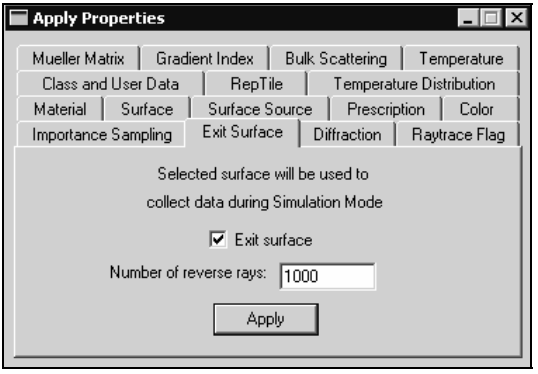


Рис. 9.89. Вкладка **Exit Surface**

Color (Цвет)

Color (Цвет) — назначение цвета выбранным поверхностям и объектам. На вкладке, показанной на рис. 9.90, можно выбрать один из фиксированных цветов, а можно и определить собственный по системе RGB, используя для этого ползунковые регуляторы. Если активен объект, то можно сделать его прозрачным, активизировав опцию **Object Transparency** (Прозрачность объекта). Для компонентов цвета (**Red**, **Green**, **Blue**) можно индивидуально назначить коэффициент прозрачности (чем он больше, тем прозрачнее объект). Цифра в интервале от нуля до единицы вводится с клавиатуры. Ни цвет, ни прозрачность, присваиваемые объектам на данной вкладке, никакого отношения к оптическому анализу не имеют, а служат исключительно для придания картинке на экране эстетического вида. Следует отметить, что придание сложным объектам параметров прозрачности заметно снижает производительность при манипуляциях с ними.

Рассмотрим понятие **RepTile** (Чешуя), являющееся одним из оригинальных инструментов TracePro. **RepTile** — это присвоение гладкой грани характеристик поверхности, на которой находятся периодически повторяющиеся геометрические объекты. Причина появления опции такова. Существует боль-

шое число задач, в которых на гладкую поверхность некоторого тела нанесены достаточно малые повторяющиеся объекты. В автомобильной светотехнике это, например, внутренняя поверхность катафотов (световозвращателей), представляющая собой семейство вершин куба, расположенных на гексагональной сетке. Рассеиватели в стоп-сигналах и фонарях заднего хода на внутренних поверхностях могут содержать массивы сферических линзовых элементов, образующих прямоугольную сетку. Панели жидкокристаллических мониторов образуют сетку повторяющихся элементов, оптические характеристики которых отличаются от поверхности, на которую они нанесены. Если такого типа объекты воспроизводить с абсолютной достоверностью (в геометрическом смысле), то время расчета с точностью, адекватной информации о модели, сделает крайне трудоемким процесс проектирования, а при числе элементов несколько тысяч, по сути невозможным. Если допустить, что для более-менее приемлемого учета параметров какого-либо оптического элемента нужно, чтобы через него прошло несколько десятков лучей, испущенных (отраженных) от всех "значимых" объектов оптической системы (их число может достигать десяти и более), то минимальное число лучей, которое следует назначить для источника, имеет порядок: $103 \cdot 102 \cdot 10 = 10^6$. Если принять во внимание наличие рассеянной составляющей отражения, а также собственно статистический характер испускания лучей источниками, то можно выйти за рамки возможностей персональных компьютеров. Есть и

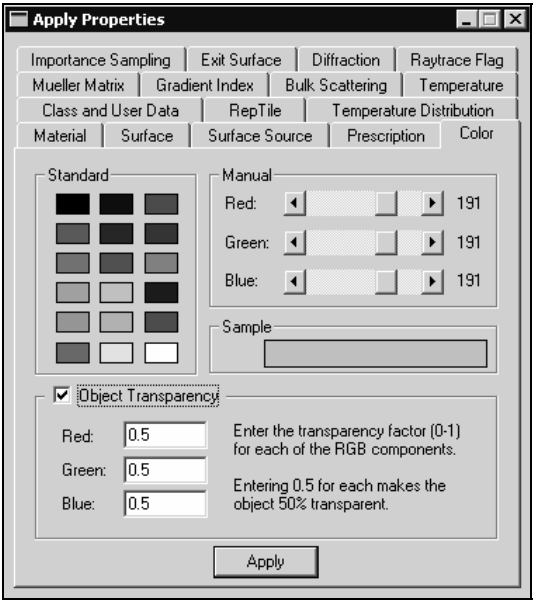


Рис. 9.90. Вкладка **Color**

еще один аспект. Системы с повторяющейся геометрией весьма трудоемки в проектировании. Например, для светотехники с рассеивателями в дополнение к "традиционным" параметрам — форме отражателя и рассеивателя — добавляются параметры формы и расположения линзовых элементов. Здесь на сложность алгоритмизации поиска системы, удовлетворяющей техническим требованиям, накладываются проблемы подготовки многочисленных вариантов геометрических моделей. Несмотря на непрерывно растущую функциональность геометрических САПР, создание полностью параметрических моделей подобных объектов не всегда возможно.

Перечисленные проблемы в значительной степени снимает функция **RepTile** (Чешуя). Она позволяет придать плоским (это существенное ограничение) прямоугольным или круглым поверхностям (что тоже не всегда удобно) оптические характеристики поверхности, образованной повторяющимися элементами канонической формы. Информация о типах повторяющихся

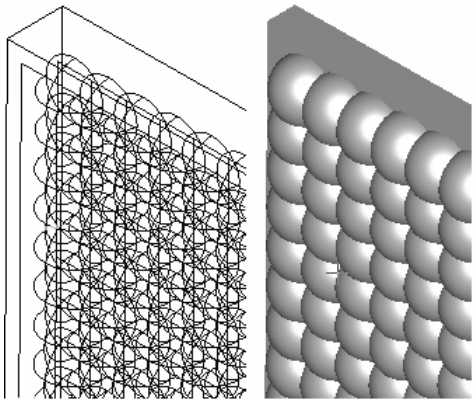


Рис. 9.91. Сравнение реальных объектов и тел с поверхностями RepTile — аксонометрическая проекция

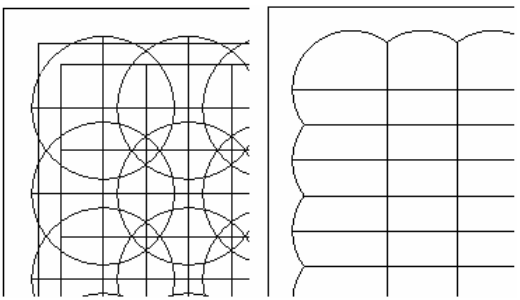


Рис. 9.92. Сравнение реальных объектов и тел с поверхностями RepTile — ортогональная проекция

объектов и методика их создания изложены далее. Все их объединяет то, что повторяющиеся объекты, соответствующие выпуклостям и впадинам, выполняются за счет тела, поверхности которого присваивается свойство RepTile. Это значит, что если бы объект был построен с "реальной" поверхностью, то габариты остались бы теми же, что и с виртуальной. Пример показан на рис. 9.91 и 9.92. Справа — поверхность подлинная с выпуклой "чешуей", слева — с имитацией выпуклых линзовых элементов (их условное изображение выводится по команде **View** | **Display RepTiles**.

RepTile (Чешуя)

"Наложение" свойств на реальные поверхности производится посредством вкладки **RepTile**. Ее содержимое, соответствующее модели рис. 9.74, показано на рис. 9.93. Вкладка содержит данные, объединенные в группы **Property Data** (Информация о свойствах) и **Boundary and Orientation** (Границы и ориентация).

- **Name** (Название) — название свойства, выбираемого из выпадающего списка с ранее определенными свойствами RepTile. Ниже расположены два безымянных поля. Первое из них предназначено для диагностических сообщений, второе — для типа поверхности RepTile.

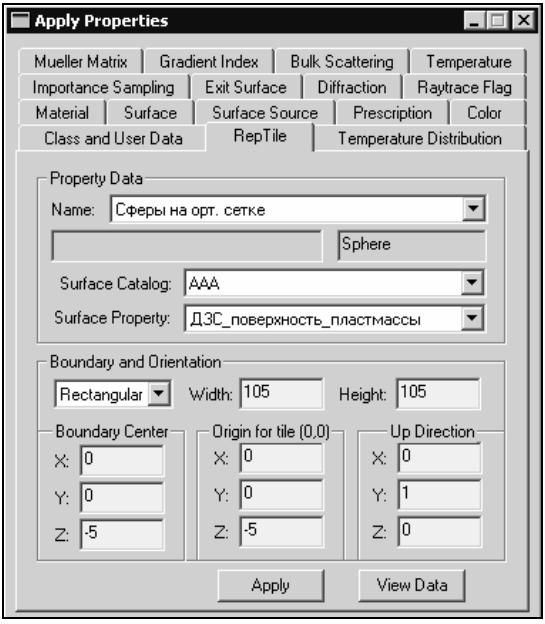


Рис. 9.93. Вкладка **RepTile**

- **Surface Catalog** (Каталог поверхностей) — из данного каталога будут выбираться типы поверхностей для присвоения свойств поверхностям на чешуйках. Из этого следует, что поверхностям, находящимся между и вне чешуек (последний вариант имеет место, если размеры области с геометрией RepTile меньше, чем габариты поверхности, на которую она наложена) можно присвоить параметры, отличные от чешуек.
- **Surface Property** (Свойство поверхности) — тип поверхности, выбираемый из **Каталога поверхностей** и назначаемый для чешуек.
- **Boundary and Orientation** — выпадающий список, из которого можно выбрать тип формы чешуйчатой области. Доступны **Rectangular** (Прямоугольная) и **Circular** (Круговая) области. Это значит, что произвольный плоский многоугольник не может быть однозначно описан свойством RepTile.
- Размеры области, которые, в зависимости от ее формы, требуют ввода параметров **Width** (Ширина), **Height** (Высота), **Radius** (Радиус). Руководство пользователя рекомендует избегать ситуаций, когда виртуальная область выходит за габариты поверхности, на которую она накладывается.
- **Boundary Center** (Центр области) — координаты центра области, занятой чешуей.
- **Origin for tile (0, 0)** (Положение ячейки с координатами 0, 0) — координата точки, принадлежащей поверхности, в которую будет помещена чешуйка с координатами 0, 0.
- **Up Direction** (Направление вверх) — направление вектора, определяющего верх чешуйчатой поверхности. Предполагается, что ось Z нормальна к ней и направлена вдоль хода лучей; ось Y направлена вверх; ось X — ортогональна к первым двум осям с образованием правосторонней тройки векторов.

На рис. 9.94 и 9.95 показаны результаты двух расчетов. Первый выполнен для "подлинной" геометрии, когда рассчитывается объект со сферическими линзовыми элементами, во втором на ближнюю по отношению к источнику грань наложена виртуальная чешуйчатая поверхность. Сама оптическая система: источник, отражатель, экран — та же, что и в предыдущих примерах — показана на рис. 9.82. Если судить по картине освещенности экрана, то сходство результатов на феноменологическом уровне вполне удовлетворительное. С учетом того, что продолжительность расчета для варианта с имитацией в 1,5—2 раза меньше, чем для исходного, а также принимая во внимание простоту изменения параметров чешуек и, конечно же, элементарную технологию построения первичной модели, использование чешуйчатых поверхностей вполне оправданно.

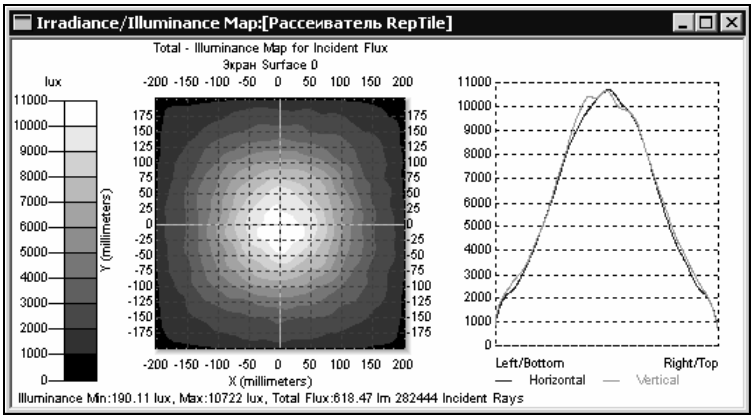


Рис. 9.94. Освещенность экрана оптической системой с "подлинным" рассеивателем

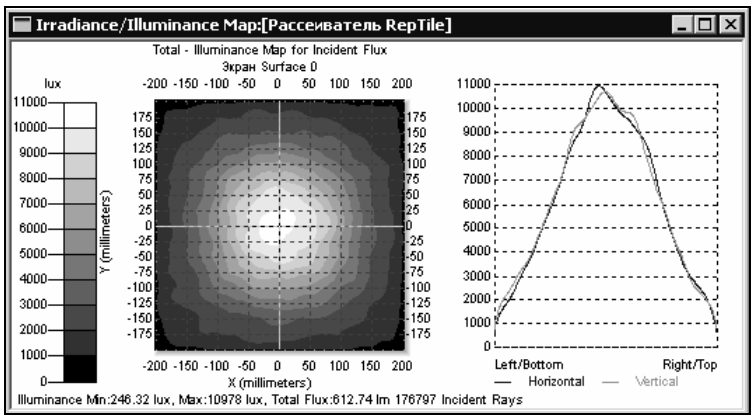


Рис. 9.95. Освещенность экрана оптической системой с гладким рассеивателем, на который наложена чешуйчатая поверхность

Мы рассмотрели вкладки, в которых назначаются свойства, необходимые для расчета светотехники. Вкладки, перечисленные ниже, содержат информацию, необходимую для имитации эффектов, не относящихся к светотехническому анализу. Поэтому ограничимся их кратким описанием:

- **Mueller Matrix** (Матрица Мюллера) — предназначена для ввода компонентов матрицы Мюллера, используемой при моделировании явлений поляризации;
- **Gradient Index** (Переменный коэффициент преломления) — ввод параметров материалов, имеющих переменный коэффициент преломления;
- **Diffraction** (Дифракция) — признак необходимости учета дифракции;

- **Temperature** (Температура), **Temperature Distribution** (Распределение температуры) — назначение температуры при анализе объектов, имеющих материалы и поверхности с зависящими от температуры свойствами;
- **Class and User Data** (Информация пользователя) — описание объекта, не влияющее на оптические параметры.

Edit Property Data (Редактировать данные о свойствах)

Совокупность команд, предназначенных для создания и редактирования свойств поверхностей и материалов (рис. 9.96): **Surface Properties** (Свойства поверхностей); **Material Properties** (Свойства материалов); **Bulk Scatter Properties** (Характеристики рассеяния); **Gradient Index Properties** (Характеристики переменного коэффициента преломления); **Thin film stacks** (Пакеты тонких пленок); **RepTile Properties** (Свойства чешуйчатых поверхностей). Система помещает информацию в файл формата Microsoft Access (расширение mdb) с именем tracepro, который размещается в каталоге с исполняемым файлом программы.

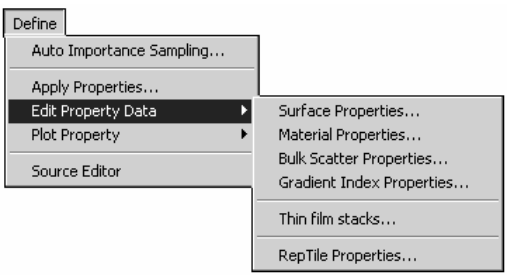


Рис. 9.96. Меню **Edit Property Data**

Surface Properties (Свойства поверхности) — создание, просмотр и редактирование характеристик поверхностей (рис. 9.97). Свойства объединяются в каталоги, причем критерии группировки всецело формулируются пользователем. Свойства можно добавлять как в уже имеющиеся в поставке программы каталоги, так и во вновь созданные. Вкладка имеет следующие кнопки и поля.

- Группа кнопок вверху таблицы (без надписей). Значимой функциональностью обладают первые четыре:
  - **Import a property** (Импорт свойства) — считывание свойства, параметры которого находятся в текстовом файле, путь к которому нужно выбрать в появившемся окне. После выбора файла свойство (если, конечно, его параметры заданы корректно) записывается в текущий активный каталог. Данная функция используется при обмене моделями между пользователями. Информация о свойствах, присвоенных объек-

там, не записывается в расчетную модель, а каждый раз считывается из базы данных. Поэтому при передаче моделей с оригинальными (отсутствующими в базовой поставке TracePro свойствами) следует прилагать их к модели (см. команду **Export a property**) и восстанавливать в базе данных;

- **Export a property** (Импорт свойства) — запись данных, соответствующих текущему активному свойству, в текстовый файл;
- **Save the property** (Сохранение свойства) — запись параметров, определяющих свойство, после редактирования в базу данных;
- **Lock/Unlock the property** (Заблокировать/разблокировать свойство) — запрещает или разрешает редактировать свойство. После активизации свойства его корректировка по умолчанию запрещена.

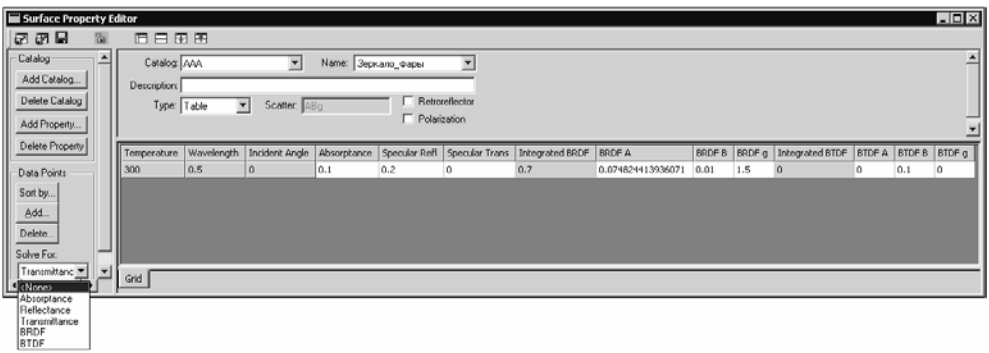


Рис. 9.97. Окно **Surface Property Editor**

❒ Группа кнопок **Catalog** включает в себя следующие:

- **Add Catalog** (Добавить каталог) — создание группы свойств. Понятие "каталог" здесь никак не связано с одноименным в файловой системы Windows;
- **Delete Catalog** (Удалить каталог) — уничтожение каталога со всеми содержащимися в нем свойствами;
- **Add Property** (Добавить свойство) — создание свойства, определяющего параметры поверхности. При нажатии кнопки возникает панель (рис. 9.98), в которой нужно ввести название свойства, а затем из выпадающего списка **Scatter Model** (Модель рассеяния) выбрать способ описания поверхностного рассеяния:
  - **None** — рассеяние отсутствует;
  - **ABg** — обратный степенной закон;

- **Elliptical ABg** — эллиптический обратный степенной закон;
- **Elliptical Gaussian** — эллиптический Гауссов закон распределения;
- **Table BSDF** — функция рассеяния, заданная таблицей;
- **Asymmetric Table BSDF** — асимметричное рассеяние, заданное таблицей.

Можно (но не обязательно) назначить параметры **Temperature** (Температура) и **Wavelength** (Длина волны).

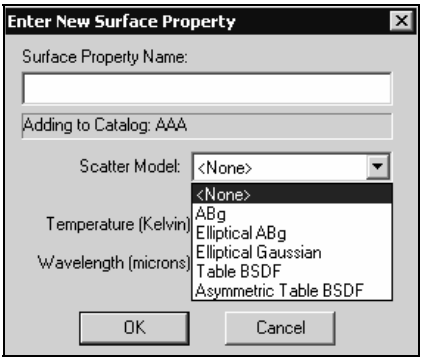


Рис. 9.98. Окно для создания нового свойства поверхности с выбором способа имитации рассеяния

- Группа **Data Points**, содержащая кнопки **Sort by** (Сортировать по), **Add** (Добавить), **Delete** (Удалить). Эти кнопки предназначены для операций с параметрами температуры, длины волны, ориентацией осей анизотропии оптических свойств и т. д. Эти характеристики в задачах светотехники, как правило, не актуальны:
  - **Solve For** (Решать для) — соблюдение закона о том, что совокупность долей поглощенного, отраженного, пропущенного света, а также составляющих светового потока, рассеянного при отражении и пропускании, в сумме должна быть равна единице. После нажатия этой кнопки происходит вычисление параметров, определяющих недостающий компонент. При этом введенные ранее величины теряются;
  - **Catalog** (Каталог) — выпадающий список с названиями каталогов, имеющихся в базе данных;
  - **Name** (Название) — выпадающий список в названиями свойств, имеющихся в выбранном каталоге;
  - **Description** (Описание) — текстовое поле, содержащее информацию о свойстве. В расчете оно не участвует;

- **Type** (Тип) — способ интерполяции данных. Предусмотрены **Fresnel** (Френель), **Table** (Табличный), **Stack** (Слоистый), **Grating** (Дифракционная решетка), **Anisotropic** (Анизотропный) и **Coating DLL** (Тонкопленочный DLL) способы. Для задач светотехники применим только табличный способ, позволяющий назначить свойства в зависимости от температуры, длины волн и угла падения;
- **Scatter** (Рассеяние) — способ моделирования рассеяния. Варианты способов приведены выше. Тип рассеяния назначается во время создания свойства и далее его изменить нельзя;
- **Retroreflector** (Ретроотражатель) и **Polarization** (Поляризация) — признаки учета соответствующих явлений.

Определив тип рассеяния и способ интерполяции данных, необходимо заполнить таблицу. В ней присутствуют столбцы, содержимое которых можно редактировать (белое поле) и те, которые содержат справочную информацию (серый фон). При табличном способе представления свойств поверхности таблица имеет столбцы:

- **Temperature** (Температура) — температура, которой соответствуют свойства в строке;
- **Wavelength** (Длина волны) — длина волны, которой соответствуют свойства в строке;
- **Incident Angle** (Угол падения) — угол падения, которому соответствуют свойства в строке;
- **Absorptance** (Коэффициент поглощения) — доля поглощенного света (изменяется в интервале от 0 до 1);
- **Specular Reflection** (Зеркальное отражение) — доля зеркально (без рассеяния) отраженного света;
- **Specular Transition** (Зеркальное пропускание) — доля пропущенного без рассеяния света;
- **Integrated BRDF** (Интегральная BRDF) — доля света, отраженного с рассеянием;
- **BRDF A**, **BRDF B**, **BRDF g** — коэффициенты функции, определяющей рассеяние при отражении (в данном случае — по модели ABg);
- **Integrated BTDF** (Интегральная BTDF) — доля света, пропущенного с рассеянием;
- **BTDF A**, **BTDF B**, **BTDF g** — коэффициенты функции, определяющей рассеяние при пропускании (в данном случае — по модели ABg).

Material Properties (Свойства материала) — создание, просмотр и редактирование характеристик материалов. Кнопки и поля в окне (рис. 9.99 и 9.100) имеют много общего с окном **Surface Properties**, поэтому рассмотрим только оригинальные элементы. В зависимости от принятого метода интерполяции коэффициента преломления как функции длины волны эти элементы могут отличаться:

- **Interpolation** (Интерполяция) — способ интерполяции. В задачах светотехники, где не учитывается связь между коэффициентом преломления и длиной волны рекомендуется выбрать значение **Table** (Табличный);

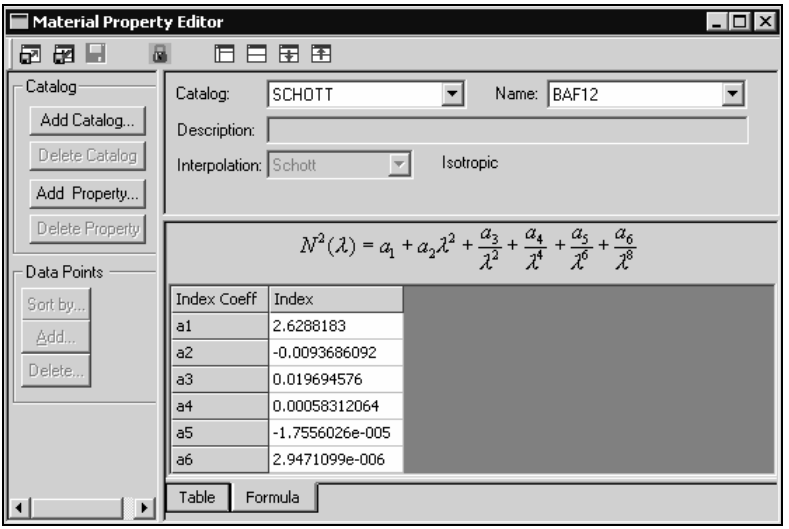


Рис. 9.99. Окно для создания и редактирования свойства материала, коэффициент преломления которого зависит от длины волны аналитически

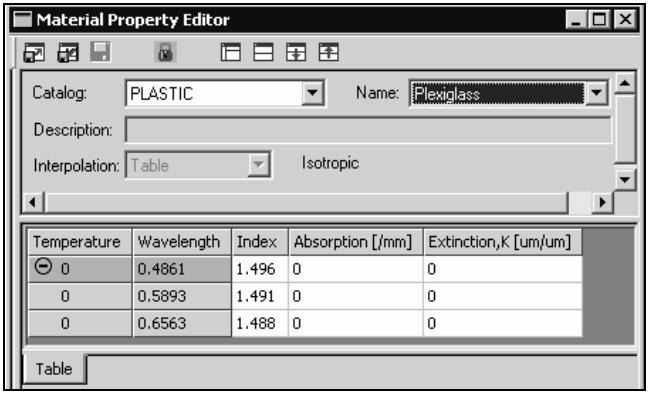


Рис. 9.100. Окно для создания и редактирования свойства материала, коэффициент преломления которого зависит от длины волны и температуры таблично

- **Index Coeff** (Константы для коэффициента) — имена коэффициентов полинома, описывающего зависимость между длиной волны и коэффициентом преломления;
- **Index** (Константа) — величины констант;
- **Temperature** (Температура) — температура, для которой назначаются параметры;
- **Wavelength** (Длина волны) — длина волны, для которой назначаются параметры;
- **Index** (Коэффициент преломления);
- **Absorption** (Поглощение) — коэффициент поглощения при прохождении светом пути длиной один миллиметр;
- **Extinction** (Затухание) — коэффициент затухания. Если в расчете не учитывается зависимость поглощения от длины волны, то следует назначить ноль.

Поглощение в материале определяется *законом Ламберта*, который выражается формулой:

$$\Phi_T = \Phi e^{\alpha t},$$

где Φ_T — пропущенный световой поток; Φ_0 — исходный световой поток; α — коэффициент поглощения; t — толщина, мм. Поглощенный поток Φ_A определяется по формуле:

$$\Phi_A = \Phi_0 (1 - e^{-\alpha t}).$$

Например, для толщин 1 и 2 мм пропущенный световой поток в зависимости от коэффициента поглощения будет принимать значения, показанные в табл. 9.9.

Таблица 9.9. *Зависимость доли пропущенного света от длины пути луча в поглощающей среде*

Коэффициент поглощения	Пропускание	
	через 1 мм	через 2 мм
0,0001	0,9999	0,9998
0,001	0,9990	0,9980
0,01	0,9901	0,9802
0,1	0,9048	0,8187
1	0,3679	0,1353

Из таблицы видно, что даже при коэффициенте поглощения равном единице (на расстоянии 1 мм) более 30 % светового потока проникает через материал.

В светотехнических расчетах, когда оптические характеристики материала не зависят от длины волны и температуры, следует выбрать табличный способ аппроксимации, ограничившись единственной строкой. Как можно было заметить, ни в каком из вариантов таблицы не было параметров, определяющих объемное рассеяние в материале. В программе эти характеристики описываются вне привязки к свойствам материалов, являясь самостоятельной группой свойств. **Bulk Scatter Properties** (Характеристики *объемного рассеяния*) — назначение, просмотр и редактирование характеристик, определяющих объемное рассеяние в материалах (рис. 9.101). В отличие от параметров поверхностей и материалов, эти свойства не группируются в каталоги. Вкладка имеет следующие кнопки и поля:



Рис. 9.101. Окно для создания и редактирования параметров объемного рассеяния

- **Name** (Название) — выпадающий список с названиями свойств;
- **Description** (Описание) — текстовое поле, содержащее информацию о свойстве;
- **Edit Enable** (Разрешить редактирование) — признак возможности редактировать свойство;
- **Type** (Тип) — способ аппроксимации рассеяния (после создания свойства редактированию не подлежит);
- **Wavelength** (Длина волны) — длина волны, которой соответствуют свойства в строке;
- **Anisotropy (g)** (Анизотропия, g) — коэффициент анизотропии в рассеянном потоке. Изменяется в интервале [–1, 1], причем положительная величина соответствует продвижению луча вперед, отрицательная — назад, равенство нулю — равномерное рассеяние;
- **Scatter Coeff. (1/mm)** (Коэффициент объемного рассеяния, 1/мм) — число "актов" рассеяния при прохождении лучом длины 1 мм в материале (величина, обратная этому коэффициенту, — длина прямолинейного участка на траектории луча);

- **Add Bulk Scatter** (Добавить свойство рассеяния) — при нажатии кнопки возникает панель (рис. 9.102), в которой нужно ввести название свойства, а затем из выпадающего списка **Bulk Scattering Type** (Тип объемного рассеяния) выбрать способ описания рассеяния: **Henyey-Greenstein** (Хэни — Гринштейна); **GegenbauerABg** (ABg Гегенбауэра); **User DLL** (Процедура пользователя).

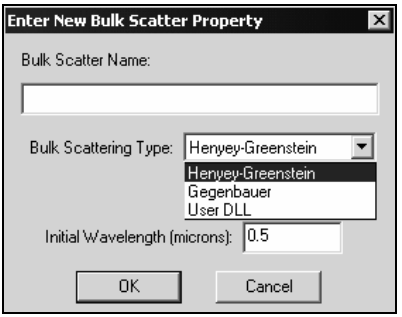


Рис. 9.102. Окно для создания нового свойства рассеяния с выбором способа аппроксимации

Перечисленные ниже характеристики описывают эффекты, не учитываемые в светотехнических инженерных расчетах, поэтому мы ограничимся только их упоминанием:

- **Gradient Index Properties** (Параметры переменного коэффициента преломления);
- **Thin Film Stacks** (Пакеты тонких пленок).

RepTile Properties (Свойства чешуйчатых поверхностей) — создание свойств чешуйчатых поверхностей. Напомним существо функции **RepTile**. Ее идея — заменить реальную геометрию поверхности твердого тела виртуальной ее моделью, которая будет — на феноменологическом уровне — производить эквивалентный оптический эффект. Пример использования этой опции приведен ранее. Окно для создания и редактирования свойств чешуйчатых поверхностей показано на рис. 9.103. Параметры окна описывают поверхность, которая воспроизводит геометрию, показанную на рис. 9.104. Это сферы, радиусом 0,5 мм, центры которых находятся на глубине 0,5 мм от поверхности, которой будет назначено соответствующее свойство. Это значит, что сферы будут касаться этой поверхности. Окно (в зависимости от типа имитируемой поверхности) имеет следующие кнопки и поля:

- **Name** (Название) — выпадающий список с названиями свойств;
- **Description** (Описание) — текстовое поле, содержащее информацию о свойстве;

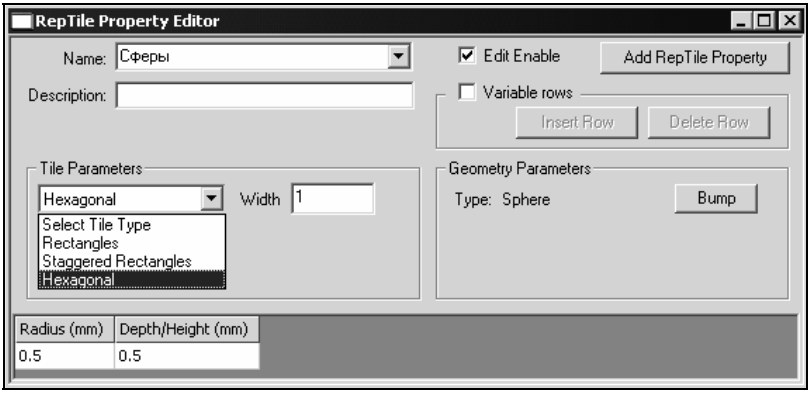


Рис. 9.103. Окно для создания и редактирования поверхностей **RepTile**

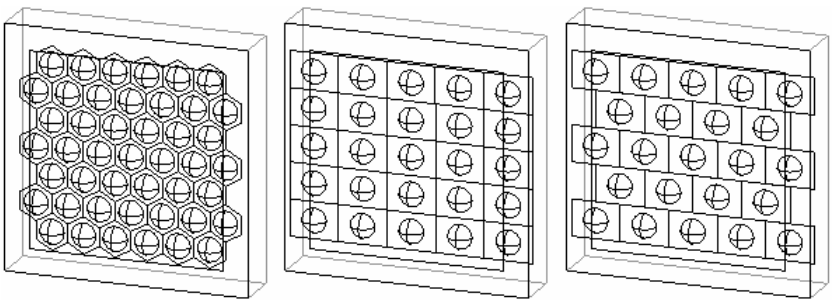


Рис. 9.104. Расположение чешуйчатых поверхностей на гексагональной, прямоугольной сетках и на прямоугольной сетке со смещением

- **Edit Enable** (Разрешить редактирование) — признак возможности редактировать свойство;
- **Add RepTile Property** (Добавить свойство RepTile) — создать новое свойство. При нажатии на эту кнопку возникает меню рис. 9.106 с предложением выбрать желаемый тип поверхности;
- **Variable rows** (Изменяющиеся ряды) — назначение параметров рядов, в которых расположены имитируемые объекты;
- **Insert Row** (Добавить ряд), **Delete Row** (Удалить ряд) — манипуляции с рядами;
- **Tile Parameters** (Параметры чешуек) — взаимное расположение чешуек. Параметр может принимать значения (соответствующие иллюстрации показаны на рис. 9.103 и 9.104): **Rectangles** (Прямоугольное) — прямоугольная сетка; **Staggered Rectangles** (Прямоугольное со смещением) — прямоугольники, смещенные на половину ширины; **Hexagonal** (Гексагональное) — гексагональная сетка;

- **Width** (Ширина) — в данной ситуации — шаг гексагональной сетки;
- **Geometry Parameters/Type** (Геометрические параметры/Тип) — тип объектов, помещаемых на поверхность. Назначается при создании свойства и редактированию не подлежит;
- **Bump/Hole** (Выпуклость/Вогнутость) — признак того, образуют ли объекты выступы или впадины (рис. 9.105).

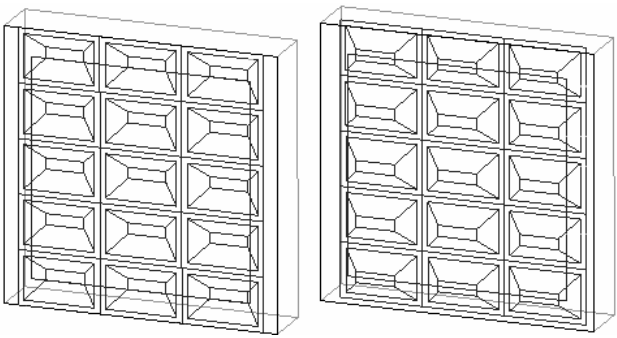


Рис. 9.105. Вогнутые и выпуклые чешуйки

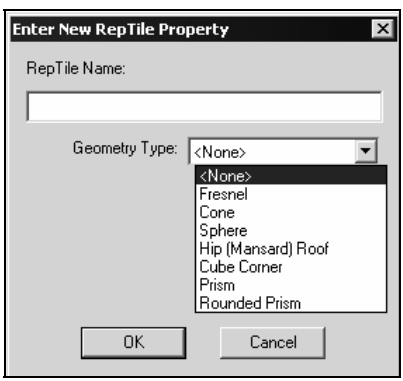


Рис. 9.106. Типы чешуйчатых поверхностей

Полная номенклатура поверхностей доступна в окне рис. 9.106, которое появляется после нажатия кнопки **Add RepTile Property** (Добавить свойство RepTile). Создавать можно поверхности следующего типа:

- **Fresnel** (Френель) — кольца Френеля;
- **Cone** (Конус) — конус вращения, в общем случае, усеченный с фасками на основании;
- **Sphere** (Сфера) — полусфера;

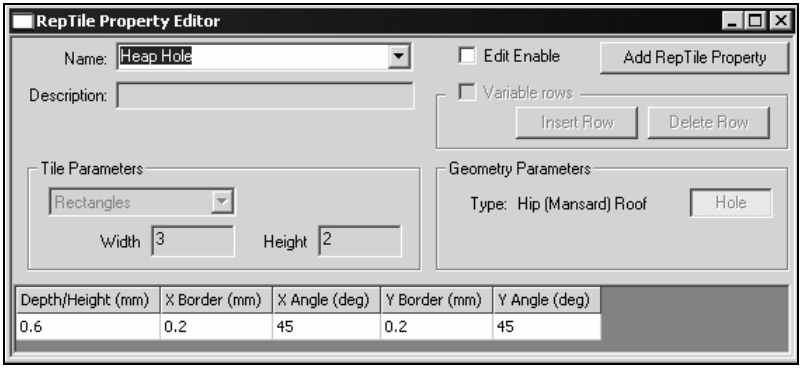


Рис. 9.107. Поверхность типа Hip, образующая впадины

- **Hip (Mansard Roof)** (Вальма/Мансардная крыша) — призма с прямоугольным основанием, у которой грани могут иметь уклон (геометрия показана на рис. 9.105, а ее описание — на рис. 9.107);
- **Cube Corner** (Угол куба) — выпуклый угол куба, располагающийся на гексагональной сетке, проходящей через вершины;
- **Prism** (Призма) — прямоугольная призма с наклонными гранями;
- **Rounded Prism** (Скругленная призма) — прямоугольная призма с треугольным сечением, которое скруглено.

В зависимости от типа поверхности меняется номенклатура параметров, которыми эта поверхность описывается.

Таблица 9.10. *Возможность изменения параметров в зависимости от типа поверхности*

Геометрия	Выпуклость/ Вогнутость	Изменение по рядам/ кольцам	Тип сетки			
			Кольцевая	Прямоугольная	Прямоугольная со смещением	Гексагональная
Fresnel Lens	+	+	+			
Cone	+	+		+	+	+
Sphere	+	+		+	+	+
Hip Roof	+	+		+	+	
Prism		+		+	+	
Rounded Prism		+		+	+	
Cube Corner				+	+	

На рис. 9.108 показаны траектории лучей, полученные в результате трассировки коллимированного пучка. При прохождении их через прозрачное тело, у которого поверхности, на которую падает световой поток, придано свойство RepTile с параметрами, данными на рис. 9.103. Видно, что фактически свет взаимодействует с виртуальными объектами, испытывая эффекты отражения и преломления (ни поверхности чешуек, ни поверхности, оставшейся плоской, рассеивающие свойства не присваивались).

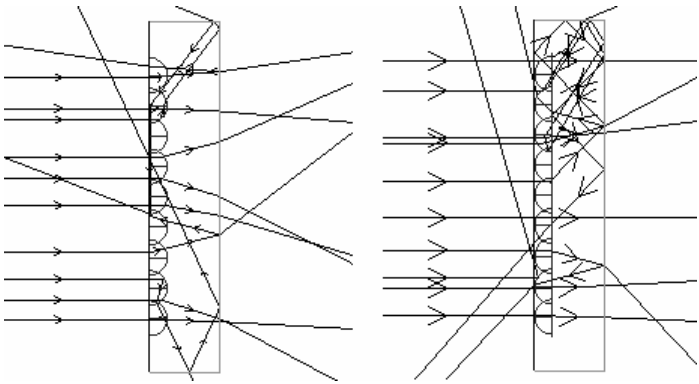


Рис. 9.108. Траектории лучей, проходящих через призму, на которой находятся вогнутые (слева) и выпуклые (справа) виртуальные полусферы

Plot Property (Графическое отображение свойства)

Замечание

Начиная с версии TracePro 3.2, эта команда перенесена в окно **Surface Property Editor**, где она находится на вкладке **Plot** внизу графического окна. Настройки, определяющие выводимую в это окно информацию, расположены в окне, которое появляется после нажатия кнопки **Plot Options** в левой части окна **Surface Property Editor**.

После подачи этой команды осуществляется выход в подменю, состоящее из единственной команды **Surface Property** (Свойства поверхности). Она вызывает окно (рис. 9.109), предназначенное для графического отображения зависимости между углом падения луча на некоторую поверхность, разделяющую две среды (или длиной волны света, который этот луч несет), и оптическими параметрами контактирующих сред с учетом поверхности раздела. Чтобы понять физику процесса, рассмотрим рис. 9.110. На нем показано взаимодействие коллимированного светового пучка, исходящего из воздуха и падающего на пластмассовый (материал — акрил) прозрачный цилиндр. Параметры точности расчета (вкладка **Analysis** | **Raytrace Options** | **Thresholds**) подобраны так, чтобы не отсекать лучи, несущие более 0,5 % исходной энергии.

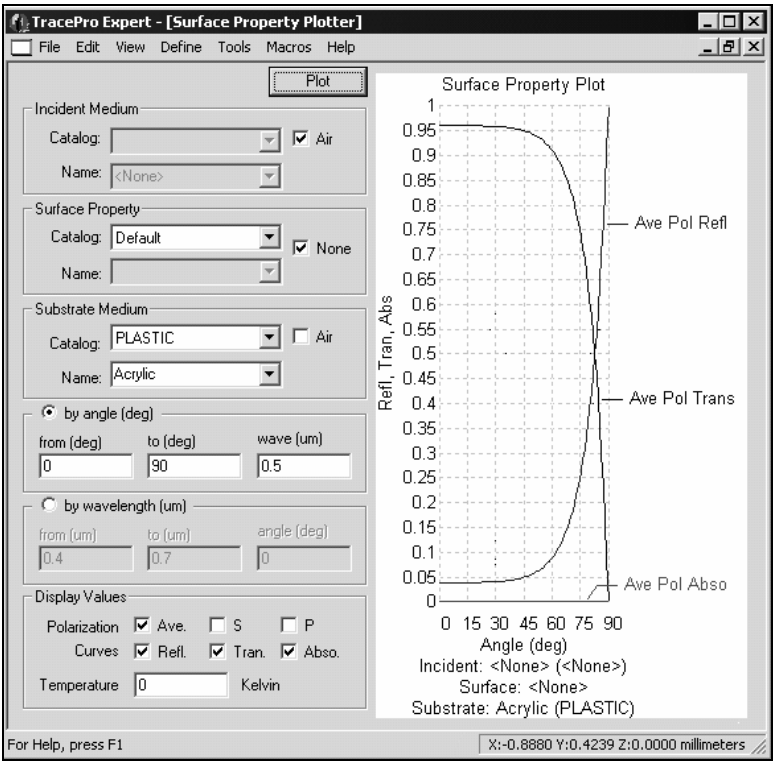


Рис. 9.109. Окно **Surface Property Plotter**

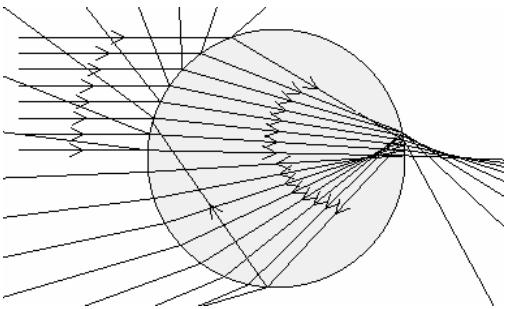


Рис. 9.110. Взаимодействие пучка лучей с прозрачным цилиндром

Поэтому практически все лучи, попадающие на поверхность как из воздуха, так и из материала, расщепляются (настройки на вкладке **Analysis** | **Raytrace Options** | **Options**), причем каждый из разделившихся лучей несет свою долю энергии. Визуальную оценку этих долей можно произвести на базе соответствующих графиков. Настройки окна **Surface Property Plotter**, показанного на иллюстрации, соответствуют данной задаче. Рассмотрим его содержание.

- **Plot** (Чертить) — кнопка, после нажатия которой графики приводятся в соответствие с содержимым полей и настройками.
- Группа параметров **Incident Medium** (Среда, из которой исходит):
  - **Catalog** (Каталог) — каталог материалов;
  - **Name** (Название) — название материала, который будет образовывать среду, из которой идет световой поток;
  - **Air** (Воздух) — признак того, что свет идет из воздуха.
- Группа параметров **Substrate Medium** (Среда, из которой исходит), содержимое которой аналогично группе **Incident Medium**.
- Группа параметров **Surface Property** (Свойство поверхности):
  - **Catalog** (Каталог) — каталог поверхностей;
  - **Name** (Название) — название свойства поверхности;
  - **None** (Отсутствует) — признак того, что параметры поверхности не учитываются;
  - **by angle** (по углу) — признак того, что абсциссой является угол;
  - **from** (от) — угол, соответствующий началу координат;
  - **to** (до) — угол, соответствующий концу исследуемого интервала, измеряется в градусах;
  - **by wavelength** (по длине волны) — признак того, что абсциссой является длина волны света;
  - **from** (от) — длина волны, соответствующей началу координат, измеряется в нанометрах;
  - **to** (до) — длина волны, соответствующая концу исследуемого интервала, измеряется в нанометрах.
- Группа параметров **Display Values** (Отображаемые значения):
  - **Polarization** (Поляризация) — направление поляризации. Если активна опция **Ave**. (Средн.), то производится осреднение по всем направлениям, т. е. отображается весь световой поток;
  - **Curves** (Графики) — отображаемые компоненты светового потока:
    - **Refl**. (Отраженный);
    - **Tran**. (Пропущенный);
    - **Abso**. (Поглощенный).
  - **Temperature** (Температура) — температура, для которой берутся характеристики для отображения.

Из диаграмм следует, что если луч переходит из оптически менее плотной среды (воздух) в более плотную, то при увеличении угла падения уменьшается доля прошедшего через поверхность света и увеличивается доля отраженного. В пределе (луч параллелен поверхности) отражается весь световой поток. Обратим внимание, что даже если луч входит из воздуха в среду и при этом ортогонален поверхности, то в материал проникает только около 96 процентов, а оставшаяся часть отражается. То же наблюдается при выходе луча из среды, т. е. при прохождении луча через идеально прозрачную пластину с идеальными поверхностями на другую ее сторону проходит не более 92 процентов светового потока. Этот факт описывается уравнениями Френеля и является объективным свойством диэлектрических сред.

Для сравнения рассмотрим обратную задачу: луч выходит из среды в воздух (рис. 9.111). Настройки расчета для ясности приняты такими, что луч исчезает после двух столкновений с поверхностью. Соответствующая модели диаграмма распределения падающей, отраженной и поглощенной энергии показана на рис. 9.112. Видно, что при росте угла падения, начиная с некоторого момента, свет претерпевает полное внутреннее отражение и в полость не попадает.

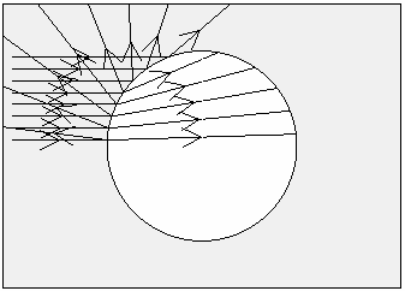


Рис. 9.111. Взаимодействие пучка лучей с цилиндрической полостью

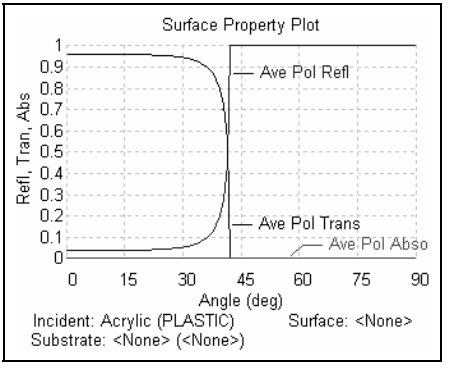


Рис. 9.112. Распределение энергии при выходе света из среды

Отдельный и весьма неоднозначный момент — как моделировать оптические явления на границе сред с учетом поверхностного рассеяния. Это тема специального исследования, однако некоторые рекомендации можно найти на Web-сайте фирмы-производителя программы.

9.4.6. Меню *Analysis*

Меню **Analysis** (Анализ) совместно с дочерними меню показано на рис. 9.113. Оно содержит команды для настройки параметров расчета, запуска программы на расчет и вывода результатов. Команды меню описаны далее.

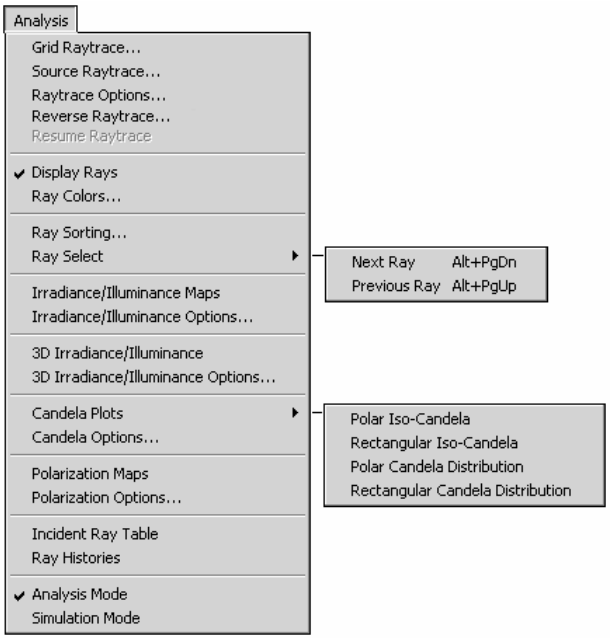


Рис. 9.113. Меню **Define**

Grid Raytrace (Трассировка на сетке)

Создание виртуальной сетки, из вершин которой будут испускаться лучи. Это значит, что, по сути, создается источник света, не привязанный к какому-либо объекту. Настроив параметры сетки, можно, не выходя из окна, выполнить трассировку лучей. Окно (рис. 9.114) содержит следующие вкладки.

- **Grid Setup** (Настройка сетки) — назначение формы сетки, способа разбиения области, которую она занимает, параметров излучения и его направления. Вкладка имеет следующие поля:
  - Группа **Grid Boundary** (Граница сетки). В ней находится выпадающий список, содержащий значения **Rectangular** (Прямоугольная) и **Annular** (Кольцевая), а также поля, определяющие размеры сетки. Для прямоугольной это:
    - **Y half-height** (Половина размера по Y);
    - **X half-height** (Половина размера по X).
  - Группа **Grid Pattern** (Шаблон сетки). В ней находится выпадающий список, определяющий структуру сетки, а также **Y points** (Точки по Y) и **X points** (Точки по X) — число строк/столбцов для прямоугольной

сетки или **Rings** (Кольца) — число концентрических колец для круговой.

Отметим, что если модель имитирует источник рассеянного света, следует использовать стохастические модели. Для этого подходит шаблон **Random** (Стохастический) и **Dithered Rect.** (Размытый прямоугольник). Последний является потомком регулярной сетки, у которой узлы смещены относительно идеального положения случайным образом. Попытка использовать "правильные" сетки при анализе периодических структур могут повлечь принципиальные искажения результатов.

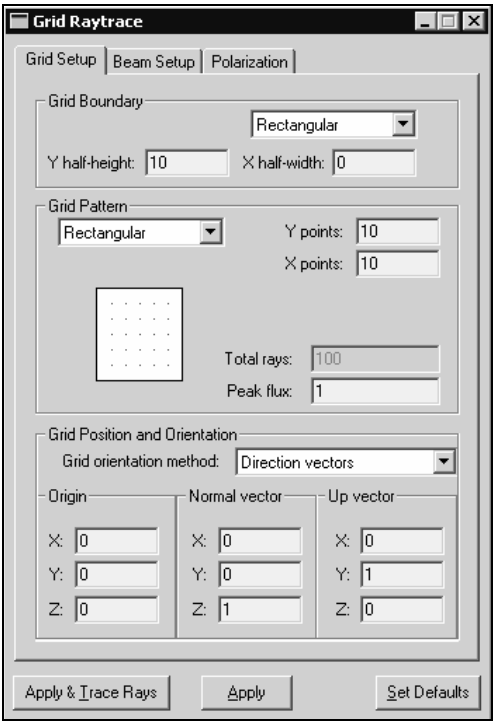


Рис. 9.114. Вкладка **Grid Setup**

- **Total rays** (Всего лучей) — число испускаемых лучей, которое равно числу узлов сетки, за исключением сетки с шаблоном типа **Random** (Случайный), где его нужно назначать в явном виде.
- **Peak flux** (Максимальный поток) — поверхностная плотность потока излучения. Несомый каждым лучом световой поток для однородного пучка вычисляется по формуле:

$$F = Peak\ \ flux \cdot A / N,$$

где A — площадь сетки, N — число лучей. Для неоднородного потока действует зависимость:

$$F = f(x, y) \cdot Peak\ flux \cdot A / N ,$$

где $f(x, y)$ — функция распределения энергии в сечении пучка.

- Группа параметров **Grid Position and Orientation** (Положение сетки и ориентация), в которой находятся следующие поля и кнопки:
  - **Origin** (Начало) — координаты центра сетки;
  - **Normal vector** (Вектор нормали) — направление нормали к сетке, выходящей из ее центра;
  - **Up vector** (Вектор вверх) — направление вектора, выходящего из центра сетки, который определяет вертикаль в ее плоскости;
- **Apply & Trace Rays** (Применить и выполнить трассировку лучей) — фиксация установленных настроек и трассировка лучей;
- **Apply** (Применить) — фиксация установленных настроек;
- **Set Defaults** — запоминание текущих настроек в качестве настроек "по умолчанию".

❒ **Beam Setup** (Настройка пучка) — определение характера распределения энергии по сечению пучка, распределение энергии пучка в пространстве и ориентации пучка. Вкладка (рис. 9.115) имеет следующие поля:

- **Spatial profile** (Профиль в пространстве) — форма энергетического профиля пучка, которая может быть **Uniform** (Постоянная) или **Gaussian** (гауссова);
- **Spatial weighting** — способ реализации гауссова профиля;
- **Beam waist** (Перетяжка) — параметры гауссова профиля;
- **Angular profile** — распределение энергии в пространстве;
- **Angular weighting** — способ реализации распределения энергии в пространстве;
- **Half angle** — половина величины пространственного угла. Если ноль, то пучок коллимированный;
- **Beam Orientation** — направление пучка. Наличие этого параметра говорит о том, что лучи могут быть не перпендикулярны плоскости сетки.

❒ Вкладку **Polarization** (Поляризация), определяющую свойства поляризованного света, мы рассматривать не будем.

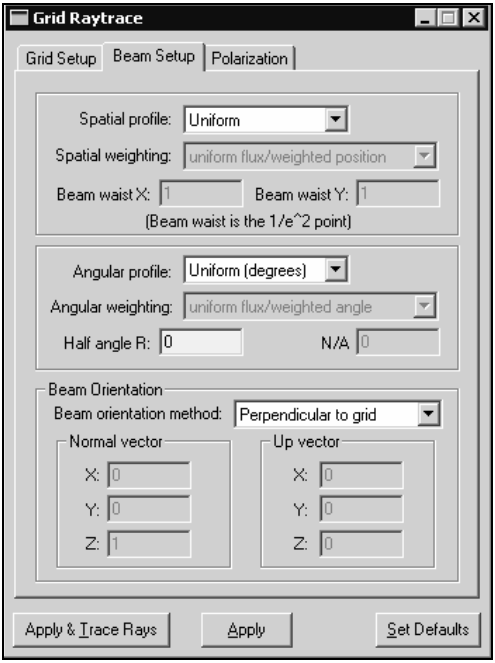


Рис. 9.115. Вкладка **Beam Setup**

Заканчивая рассмотрение функции **Grid Raytrace**, отметим, что во многих задачах светотехники ее применимость достаточно ограничена. Причина в том, что световой поток крайне редко имеет каноническую форму. Определенным исключением является излучение лазеров, жидкокристаллических систем. В то же время при выполнении проектировочных расчетов, когда наличие упрощений позволяет выделить базисные тенденции в оптических процессах, эти процедуры могут быть полезны.

Source Raytrace (Трассировка от источника)

Трассировка лучей, идущих от источника, в качестве которого принята одна или несколько поверхностей. Процесс может выполняться в режимах **...using discrete wavelengths** (Используя дискретные длины волны) и **...using continuous wavebands** (Используя непрерывное изменение длины волны) (рис. 9.116). Понятно, что если свойства объектов, а следовательно, и результат не зависит от длины волны, то следует использовать первый режим. Подчеркнем, что трассировка лучей на базе сетки не имеет никакого отношения к этой команде.

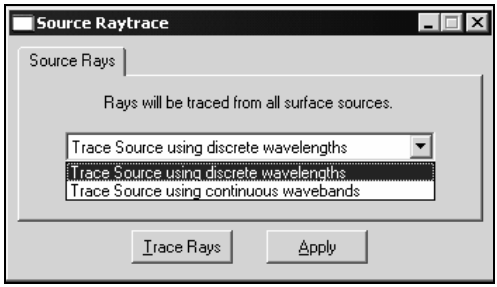


Рис. 9.116. Окно **Source Raytrace**

Raytrace Options (Настройки трассировки)

Назначение параметров, определяющих вычислительный процесс и состав результатов. Окно содержит следующие вкладки.

- **Options** (Настройка) — глобальные настройки вычислительного процесса. Вкладка (рис. 9.117) имеет следующие поля и кнопки:
  - **Radiometric Units** — тип единиц, используемых для исходных данных и результатов. Доступны **Radiometric** (Радиометрическая) и **Photometric** (Фотометрическая) системы единиц. В задачах светотехники, как правило, используется последняя, хотя, с точки зрения расчета, принципиальной разницы между ними нет. Более того, выполнив расчет в одной системе, можно, изменив этот параметр, результаты наблюдать в другой;
  - **Ray Splitting** (Расщепление лучей) — признак того, что эффекты рассеяния и разделения энергии луча при взаимодействии с поверхностью на отраженную и преломленную, будут моделироваться расщеплением лучей. Носимая этими лучами энергия будет соответствовать той, которая испускается в соответствующих направлениях. Следует активизировать этот режим при наличии в модели эффектов рассеяния, существенно влияющих на результат. Использование этого режима способно существенно увеличить время счета и требуемую память. Поэтому при отработке модели функцию рекомендуется отключать;
  - **Specular Rays Only** (Только отраженные лучи) — отсекает лучи, несущие рассеянный свет;
  - **Importance Sampling (Ray Splitting Only)** (Выборка по значимости) — активизация функции Выборка по значимости (она возможна только при учете расщепления лучей);
  - **Polarization (Ray Splitting Only)** (Поляризация) — учет поляризации (возможен только при учете расщепления лучей);

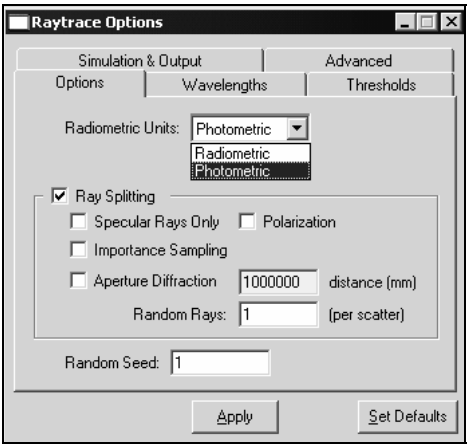


Рис. 9.117. Вкладка **Options**

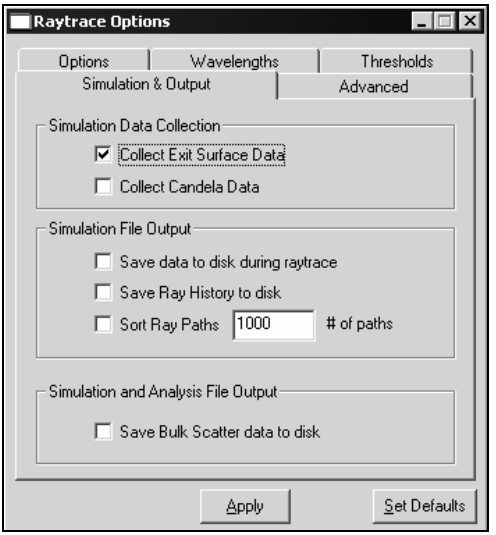


Рис. 9.118. Вкладка **Simulation & Output**

- **Aperture Diffraction (Ray Splitting Only)** (Апертурная дифракция) — учет дифракции на диафрагме (возможен только при учете расщепления лучей);
- **Random Rays** (Случайные лучи) — количество случайных лучей, на которые расщепляется луч в режиме **Ray Splitting** в ходе рассеяния. С одной стороны, чем этих лучей больше, тем точнее расчет. С другой — если луч многократно взаимодействует с различными объектами, то общее число лучей в системе растет экспоненциально. Поэтому оптимальной величиной можно считать один или два;
- **Random Seed** (Начальное случайное число) — число, служащее исходным для генератора случайных чисел при создании исходных лучей;
- **Apply** (Применить) — применение настроек для активной модели;
- **Set Defaults** (Установить по умолчанию) — запоминание текущих настроек в качестве параметров по умолчанию.

❒ **Simulation & Output** (Результаты при симуляции) — настройка номенклатуры результатов, генерируемых в режиме симуляции. Соответственно, если работа осуществляется в режиме **Analysis** (Анализ), то данные настройки игнорируются. Вкладка (рис. 9.118) имеет следующие поля:

- **Collect Exit Surface Data** (Накапливать данные для поверхностей выхода) — признак того, что для поверхностей, помеченных как Exit Surface *(см. разд. 9.4.5)* собирается информация о попавших на нее лучах, что позволяет сгенерировать для них диаграммы освещенности;

- **Collect Candela Data** (Накапливать данные для диаграмм изокандел) — признак того, что для лучей, вышедших за пределы модели, накапливается информация, необходимая для построения диаграмм силы света;
- **Save data to disk during raytraee** — признак того, что в процессе трассировки на диск будет записана информация для импорта в другую модель;
- **Save Ray History to disk** — то же самое для информации о движении лучей;
- **Sort Ray Paths** — то же самое для траекторий лучей;
- **Save Bulk Scatter data to disk** — то же самое для рассеянных лучей.

❒ **Thresholds** (Пороговые величины) — настройка пороговых значений, при достижении которых ход луча прекращается. Вкладка (рис. 9.119) имеет следующие поля.

- **Flux Threshold** (Пороговое значение потока) — доля светового потока, несомая лучом (исходная величина равна единице), при достижении которой луч игнорируется;
- Группа параметров **Intercept Limits** (Предел для числа пересечений), определяющая после скольких этапов взаимодействия с объектами или скольких актов рассеяния происходит прекращение распространения луча. Назначаются лимитирующие параметры:
  - **Total Intercepts** (Полное число пересечений);
  - **Total Scatters** (Полное число рассеяний);
  - **Random Scatters** (Полное число случайных рассеяний);
  - **Optical Scatters** (Полное число оптических рассеяний).

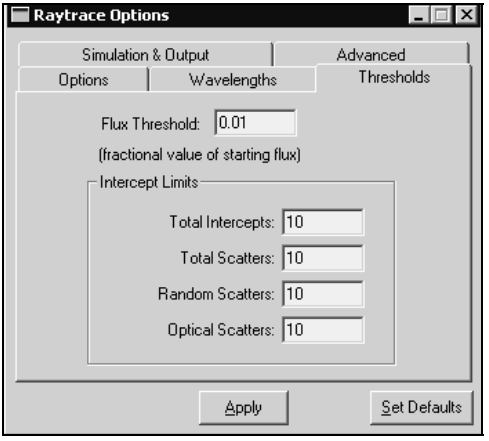


Рис. 9.119. Вкладка **Thresholds**

Не рекомендуем добиваться чрезмерной "жизнеспособности" луча, за исключением случаев, когда интерес представляют побочные оптические эффекты. В режимах же отработки модели или проектирования оптической системы следует поддерживать эти параметры на минимально необходимом уровне. Разумеется, чем большая доля света распределяется посредством рассеяния (и соответственно, чем в большей степени пользователя интересует влияние этих эффектов), тем более длительным должен быть жизненный цикл луча.

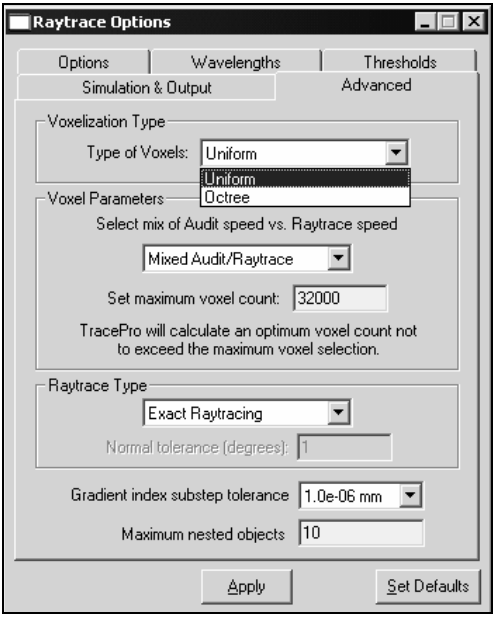


Рис. 9.120. Вкладка **Advanced**

- **Advanced** (Расширенные) — настройки параметров, управляющих производительностью программы. Вкладка (рис. 9.120) имеет следующие поля:
  - **Type of Voxels** (Тип вокселей) — способ разбиения области, занимаемой моделью (в нее входят как собственно объекты, так и пространство между ними), на области в форме параллелепипедов. Членение может быть однородным — параметр принимает значение **Uniform** (Однородный) или получаться рекурсивно — **Octree** (Октаэдрическое дерево). Декларируется, что этот способ может уменьшить затраты памяти и ускорить вычисления для расчетных схем, когда небольшие объекты расположены в значительном по размеру пространстве или же сцена содержит объекты, существенно отличающиеся по габаритам. Наглядный пример: источник света, освещающий удаленный экран. Документация

также рекомендует использовать эту настройку для активной опции **Faceted Splines** (Кусочные сплайны);

- **Voxel Parameters** (Параметры вокселей) — определяет степень подробности при разбиении области. Чем она больше, тем дольше длится этап подготовки модели (Audit), но тем меньше предполагаемое время счета. Как правило, справедлива и обратная зависимость;
- **Set maximum voxel count** (Максимальное число вокселей) — максимальное число вокселей, которое допускается для генерации. Учитывая, что каждый воксель занимает 4 байта, можно оценить необходимую память. Данный параметр не рекомендуется изменять, не имея на то серьезных оснований;
- **Raytrace Type** (Тип трассировки) — определяет способ аппроксимации сплайновых (или воспринимаемых как сплайновые) поверхностей. Если параметр принимает значение **Exact Raytracing**, то поверхность воспринимается в том виде, в каком она сгенерирована системой (или импортирована), если выбрать значение **Faceted Splines** (Кусочные сплайны), то поверхность аппроксимируется сплайновыми сегментами с точностью представления ориентации нормали, назначаемой в поле **Normal tolerance** (Погрешность для нормали). Эта опция может принести позитивный эффект, если модель содержит относительно малое число неканонических поверхностей и взаимодействует с большим числом лучей. Если же число таких поверхностей велико, а лучей через каждую из них проходит немного (поверхности, покрытые линзовыми элементами), то эффективность нуждается в дополнительной оценке. Понятно, что данную опцию следует активизировать, только если в модели имеются поверхности, которые нужно упрощать. Информацию о способе представления поверхности можно почерпнуть из Дерева проекта;
- **Gradient index substep tolerance** (Допуск шага для учета переменного коэффициента преломления);
- **Maximum nested objects** (Максимальная вложенность объектов) — назначение максимального числа объектов, находящихся внутри других объектов. Увеличение параметра порождает рост запрашиваемой оперативной памяти.

Reverse Raytrace (Обратная трассировка)

Трассировка лучей в обратном порядке. Это значит, что цель (ее поверхность) является источником лучей, после чего программа запускает их в направлении назначенных для этой поверхности **Importance Targets** (Значимые цели).

Resume Raytrace (Возобновить трассировку)

Продолжение трассировки лучей, если ее ход был прерван командой **Cancel**. Если после прекращения расчета программа была остановлена, а затем вновь запущена, то рестарт не получится.

Display Rays (Показать лучи)

Демонстрация траекторий лучей после трассировки (даже если она была прервана). Состав картины и способ отображений регулируется командами **View | Preferences | Ray Colors**, **Ray Display** и **Analysis | Ray Colors**, **Ray Display**.

Ray Colors (Цвета лучей)

Сопоставление доли передаваемой лучом энергии и цвета луча.

Ray Sorting (Классификация лучей)

Выборка отображаемых лучей по заданным критериям. Окно команды показано на рис. 9.121. Оно содержит следующие поля.

- **Sort Type** (Способ отбора) — критерий, по которому отбираются лучи для отображения. Он может принимать значения:
  - **All Rays** (Все лучи);
  - **Selected Surface** (Выбранная поверхность) — лучи, достигшие выбранной поверхности;
  - **Specular** (Зеркальные) — лучи, претерпевшие зеркальное отражение;
  - **Single Scatter** (Единичное рассеяние) — лучи, претерпевшее единичное рассеяние;
  - **Multiple Scatter** (Множественное рассеяние) — лучи, претерпевшее более чем одно рассеяние.
- **Wavelength** (Длина волны) — отображение лучей, несущих заданную длину волны.
- **% Starting Rays to Display** (% от числа испущенных лучей) — отображение назначенной доли лучей, выраженной в процентах от числа испущенных. Эта опция чрезвычайно полезна для обеспечения наглядности картинки.
- **Flux Display Range (as a fraction of Peak Flux)** (Диапазон мощности потока в долях от исходного потока) — отображение лучей, несущих заданный интервал интенсивности светового потока. Интервал определяется параметрами **Max** (Максимум) и **Min** (Минимум).

- **Update** (Обновить) — регенерация изображения в соответствии с назначенными параметрами.

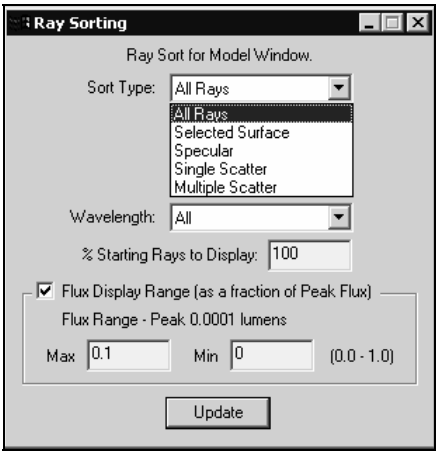


Рис. 9.121. Окно **Ray Sorting**

Ray Select (Выбор луча)

Отображение луча, выбираемого из таблицы **Ray History Table** (Таблица истории лучей).

Irradiance/Illuminance map (Диаграмма облученности/освещенности)

Вывод на экран диаграммы освещенности/яркости для выбранной поверхности. Множественный выбор объектов процедура не допускает. Если активна опция **View** | **Preferences** | **Update analysis after selection change**, то после активизации другой поверхности происходит автоматическое обновление диаграммы. В противном случае нужно использовать команду **Refresh** (Обновить).

Irradiance/Illuminance options (Настройки диаграммы облученности/освещенности)

Выбор типа выводимых результатов и способа их отображения. Окно (рис. 9.122) имеет следующие поля.

- **Quantities to plot** (Отображаемые значения) — выбор типа отображаемых результатов. Доступны **Irradiance** (Освещенность), **Radiance** (Яркость), **CIE (x,y)** и **CIE (u1,v1)** (Диаграмма МКО — Международной комиссии по освещению).

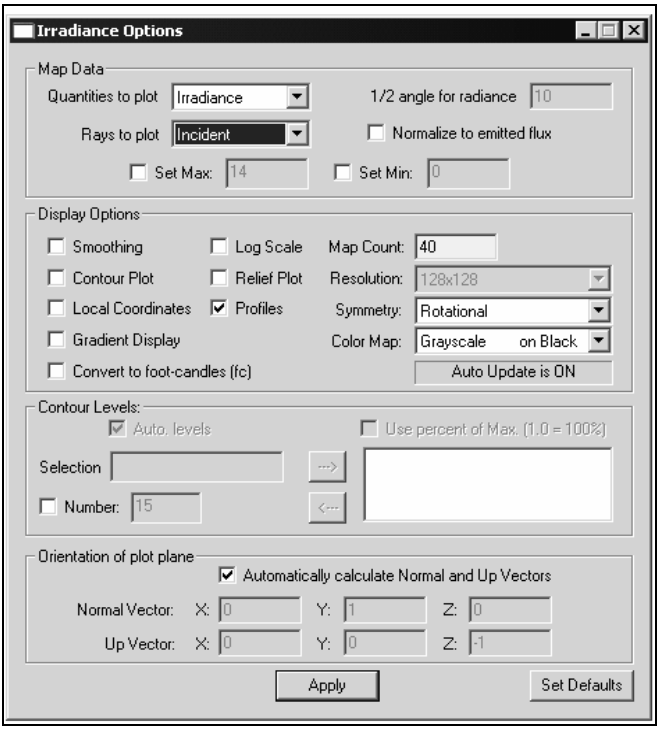


Рис. 9.122. Окно **Irradiance/Illuminance Options**

- **1/2 angle for radiance** (1/2 угла) — величина пространственного угла для расчета яркости объекта в заданном направлении.
- **Rays to plot** (Выводить лучи) — выбор типа лучей, формирующих картину освещенности. Доступны **Absorbed** (Поглощенные) и **Incident** (Входящие) лучи. Например, если выбрана первая группа и нас интересует освещенность идеально прозрачной поверхности, то эта освещенность будет равна нулю, поскольку поглощение отсутствует.
- **Normalize to emitted flux** — нормализует величину потока, попавшего на поверхность, относительно суммарной величины потока, излучаемого всеми источниками. Эта опция полезна для вычисления коэффициента полезного действия оптической системы.
- **Set Max/Min** (Установить макс./мин.) — настройка границ отображаемого интервала для выводимой функции.
- **Smoothing** (Сглаживание) — сглаживание изображения с использованием кривой гауссова распределения.
- **Contour Plot** (Контурная диаграмма) — изображение в виде изолиний. При его активизации автоматически включается режим сглаживания.

- **Local Coordinates** (Локальные координаты) — признак того, отображается диаграмма в системе координат модели или в системе координат грани.
- **Gradient Display** (Плавное изображение) — сглаживание перехода между цветами на палитре и, соответственно, на диаграмме. Влияет исключительно на эстетические параметры картинки.
- **Convert to foot-candles** (Преобразовать в канделы на квадратный метр).
- **Log Scale** (Логарифмический масштаб) — приведение шкалы на палитре к логарифмическому масштабу.
- **Relief Plot** (Пространственная диаграмма) — отображение графика в виде пространственной диаграммы.
- **Profiles** (Сечения) — отображение сечений диаграммы парой ортогональных плоскостей, проходящих через заданную точку.
- **Map Count** (Единиц на диаграмме) — число ячеек на диаграмме вдоль каждого из направлений. При отсутствии сглаживания программа осредняет результат в пределах каждой ячейки. Если же используется сглаживание, то параметр определяет степень сглаживания.
- **Resolution** (Разрешение) — определяет размер сетки, используемой для сглаживания.
- **Symmetry** (Симметрия) — учет вероятной симметрии при отображении диаграммы. TracePro не контролирует наличие симметрии, поэтому данная опция действует исключительно на результат, осредняя соответствующие параметры согласно выбранной схеме. Эта схема должна соответствовать наличию соответствующей симметрии геометрии и оптических характеристик. Контроль за этим всецело возлагается на пользователя. Доступны следующие типы осреднения:
  - **None** (Отсутствует);
  - **Left/Right** (Лево/Право) — осредняются результаты, относящиеся к левой и правой половинам области;
  - **Up/Down** (Верх/Низ) — осредняются результаты, относящиеся к верхней и нижней половинам области;
  - **Quadrant** (Квадрант) — комбинация двух предыдущих методов.
- **Rotational** (Осевая) — осреднение величин, находящихся на одинаковом расстоянии от центра диаграммы.
- **Color Map** (Цветовая палитра) — доступны различные варианты цветного и черно-белого изображения.
- **Contour Levels** (Число контуров) — число уровней на контурной диаграмме.

- **Normal Vector** (Вектор нормали) — координаты вектора нормали к поверхности, для которой отображается результат. Если поверхность криволинейная, то она проецируется на плоскость перпендикулярную этому вектору.
- **Up Vector** (Вектор вверх) — вектор, определяющий ориентацию поверхности относительно направления вверх на диаграмме. Он будет поставлен в соответствие направлению Y на диаграмме.
- **Automatic calculation** (Автоматической вычисление) — автоматическое вычисление нормального вектора и вектора, определяющего соответствие верха диаграммы и направления на модели.
- **Apply** (Применить) — обновление диаграммы в соответствии со сделанными настройками.
- **Set Defaults** (Установить по умолчанию) — после нажатия кнопки и последующей записи модели на диск сделанные настройки становятся настройками по умолчанию, действующими при последующих запусках TracePro.

Интерпретация результатов на основе этой и других диаграмм есть весьма нетривиальное занятие. Варьирование параметров **Smoothing**, **Map Count** и **Symmetry** может приводить к качественному изменению картины освещенности. Подробности, касающиеся этих проблем, описаны в *разд. 9.5.5.*

3D Irradiance/Illuminance map (3D-облученность/освещенность)

Визуализация светового потока, попавшего на поверхности объекта, с отображением модели в трехмерном виде. Визуализация объекта в целом или выбранных поверхностей с закраской поверхностей, зависящей от плотности светового потока, попавшего на эти поверхности. При анализе картинки следует быть внимательным, поскольку вид закраски определяется исключительно плотностью потока, на него попавшего, а не яркостью, т. е. не зависит от положения наблюдателя. Визуализация выполняется без шкалы, т. е. числовые величины недоступны.

3D Irradiance/Illuminance options (Настройки 3D-диаграммы облученности/освещенности)

Выбор способа отображения результатов и способа их отображения. Окно (рис. 9.123) имеет следующие поля:

- **Rays to plot** (Выводить лучи) — выбор типа лучей, формирующих картину освещенности/яркости. Доступны **Absorbed** (Поглощенные) и **Incident** (Входящие) лучи;

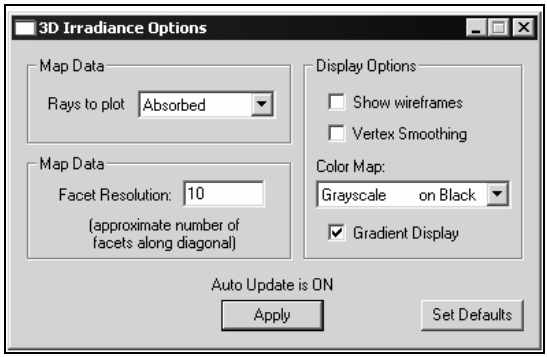


Рис. 9.123. Окно **3D Irradiance Options**

- **Facet Resolution** (Разрешающая способность граней) — число фасеток, на которые разбивается поверхность при отображении. Как предполагается, выполняется кусочная интерполяция плотности закраски в пределах зон, на которые разбита поверхность. Этот параметр влияет исключительно на визуальные свойства, никакой связи с расчетом он не имеет. Можно предположить, что в качестве базовой схемы разбиения поверхности используется внутреннее представление объекта в геометрическом ядре TracePro (наблюдать его можно при визуализации модели в режиме Wireframe — соответствующая команда находится в меню **View**). В ряде ситуаций картина освещенности такова, что изменение плотности светового потока в пределах грани весьма отдаленно связана с тем, как программа строит на ней каркас. Поэтому результат, полученный посредством данной функции, выглядит не слишком привлекательно;
- **Show wireframes** (Показать каркас) — визуализация ребер фасеток, на которые разбита грань;
- **Vertex Smoothing** (Сглаживание в вершинах) — интерполяция освещенности в пределах фасеток на основе ее величины, осредненной в вершинах;
- **Color Map** (Цветовая палитра) — выбор вида цветовой палитры для отображения;
- **Gradient Display** (Плавное изображение) — сглаживание перехода от тона к тону или от цвета к цвету.

Candela Plots (Диаграммы силы света)

Отображение распределения силы света. Доступны следующие типы диаграмм:

- **Polar Iso-Candela** (Полярные изоканделы);
- **Rectangular Iso-Candela** (Ортогональные изоканделы);

- **Polar Candela Distribution** (Полярное распределение силы света);
- **Rectangular Candela Distribution** (Полярное распределение силы света).

Candela Options (Настройки диаграммы силы света)

Окно, содержащее настройки для определения ориентации системы координат диаграмм относительно модели, а также параметры самих диаграмм в зависимости от их типа. Рассмотрим содержимое окна применительно к рассмотренной ранее модели оптической системы рассеивателя (см. рис. 9.74 и 9.124). Оно имеет следующие вкладки.

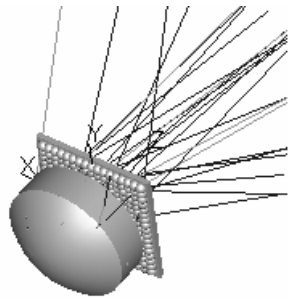


Рис. 9.124. Оптическая система и трассировка лучей

- **Orientation and Rays** (Ориентация и лучи) — параметры, связывающие систему координат модели и систему координат диаграммы. Вкладка (рис. 9.125) содержит следующие поля:
  - **Normal Vector** (Вектор нормали) — направление, определяющее "ось" пространственного угла, для которого отображается распределение силы света;
  - **Up Vector** (Вектор вверх) — направление вектора, выходящего из начала координат, который соответствует вертикали на диаграмме;
  - **Ray Selection** (Выбор лучей) — выбор категории лучей, порождающих световой поток для отображения на диаграмме. Доступны следующие поля:
    - **Use missed rays for Candela Data** (Использовать ушедшие лучи для диаграммы силы света) — диаграмма формируется на основе информации о световом потоке, который покинул оптическую систему;
    - **Use exiting rays from selected surface (Analysis Only)** (Использовать лучи, вышедшие из выбранной поверхности, только в режиме Анализа) — диаграмма формируется на основе информации о световом

потоке, который излучен выбранной поверхностью. В понятие "излучен" включено отражение, преломление, рассеяние, т. е. любые способы взаимодействия света с поверхностью;

- **Use incident rays from selected surface or Exit Surface** (Использовать лучи, попавшие на выбранную поверхность или на поверхность выхода) — диаграмма формируется для светового потока, попавшего на выбранную поверхность.

- **Symmetry** (Симметрия) — учет вероятной симметрии при отображении диаграммы. Возможности аналогичны одноименной опции в панели **Irradiance/Illuminance options**.

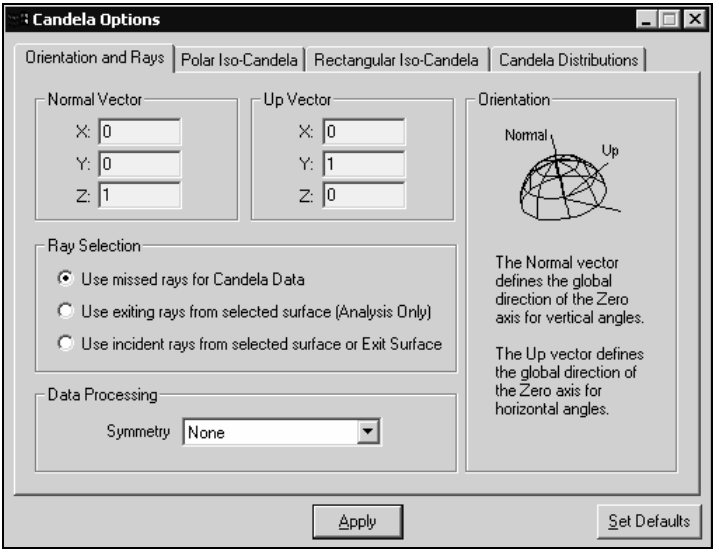


Рис. 9.125. Окно **Candela Options**, вкладка **Orientation and Rays**

- **Polar Iso-Candela** (Полярные изоканделы) — параметры диаграммы силы света на сетке с полярными координатами (рис. 9.126). Поля на диаграмме, за исключением параметра **Angular width** (Угловой размер), аналогичны присутствующим на вкладке **Irradiance/Illuminance options**. Проблемы интерпретации результатов также соответствуют тем, которые сопровождают диаграммы освещенности *(см. разд. 9.5.5)*. В данном случае они заключаются в подборе величины сглаживания.

Если отобразить диаграмму изокандел в соответствии с параметрами рис. 9.126, то она будет иметь вид рис. 9.127. Прокомментируем результат. Телесный угол, для которого отображается информация, соответствует полусфере

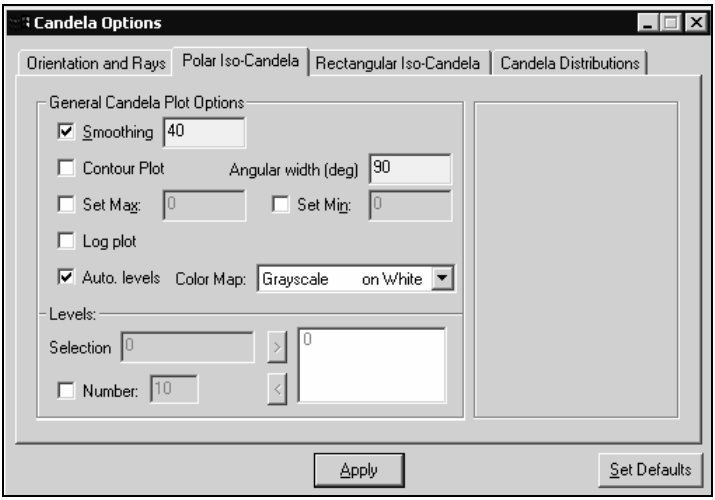


Рис. 9.126. Окно **Candela Options**, вкладка **Polar Iso-Candela**

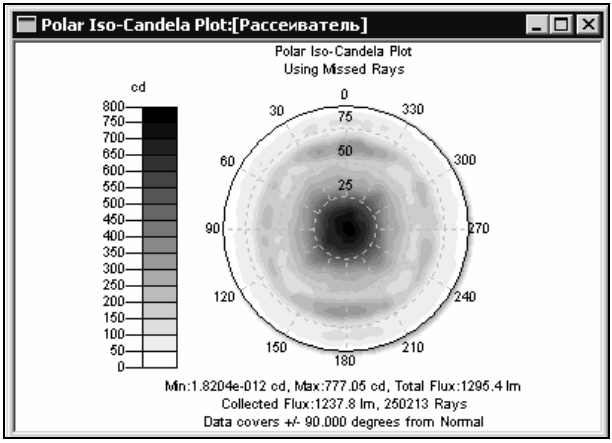


Рис. 9.127. Диаграмма изоканделл в полярных координатах

(**Angular width** равен 90°), следовательно, мы рассматриваем световой поток, попавший за рассеиватель. Поскольку для параметра **Ray Selection** выбрано значение **Use missed rays**, то результат формируется всеми лучами, попавшими в заднюю полусферу (это определяется параметром **Normal Vector**), т. е. потоком как пропущенным через рассеиватель, так и прошедшим мимо. В телесном угле шириной ±30° сила света изменяется почти в два раза, а при угле порядка ±60° присутствует локальный максимум. На полярной диаграмме это затемненное кольцо, окружающее светлую полосу. Этот эффект порождают лучи, прошедшие вне рассеивателя. На диаграмме показано число лу-

чей, попавших в отображаемый телесный угол, а также переносимый ими световой поток.

- **Rectangular Iso-Candela** (Ортогонгальные изоканделы) — параметры отображения диаграммы силы света на сетке с ортогональными координатами (рис. 9.128). Оригинальные относительно предыдущих диаграмм поля таковы:
  - **3D Plot** (3D-диаграмма) — отображение диаграммы поверхностью в пространстве;
  - **Angle convention** (Соглашения об углах) — смысл угловых величин. Можно выбрать следующие:
    - **Orthogonal angles** (Ортогональные углы) — углы, отсчитываемые в ортогональной неподвижной системе координат;
    - **Type A Goniometer, Type B Goniometer** — углы, измеряемые в системах координат, которые связаны с гониометрами типов A и B.

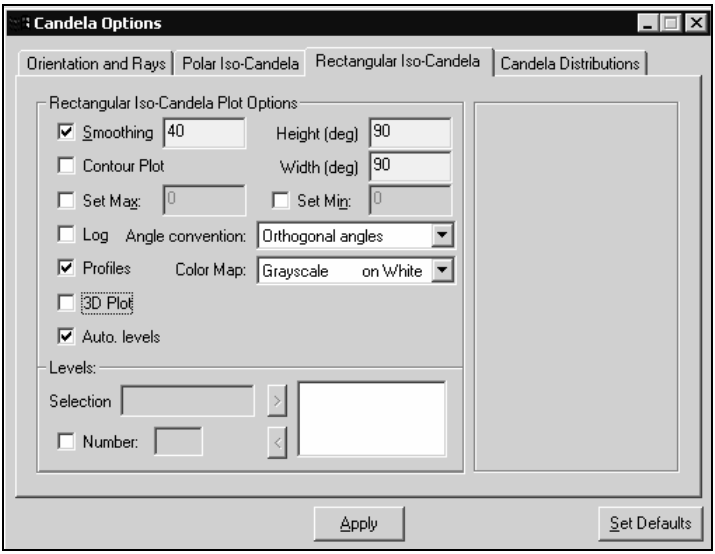


Рис. 9.128. Окно **Candela Options**, вкладка **Rectangular Iso-Candela**

Диаграмма на ортогональной сетке с параметрами, показанными на рис. 9.128, представлена на рис. 9.129. Одновременно с визуализацией в виде закрашенных областей присутствуют ее ортогональные сечения (результат активизации опции **Profiles**). Если активизировать опцию **3D Plot**, то диаграмма отобразится в виде пространственной фигуры (рис. 9.130).

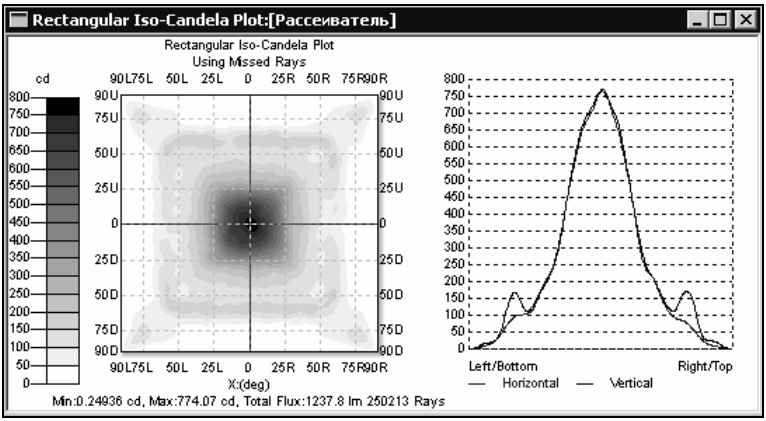


Рис. 9.129. Диаграмма изокандел в ортогональных координатах

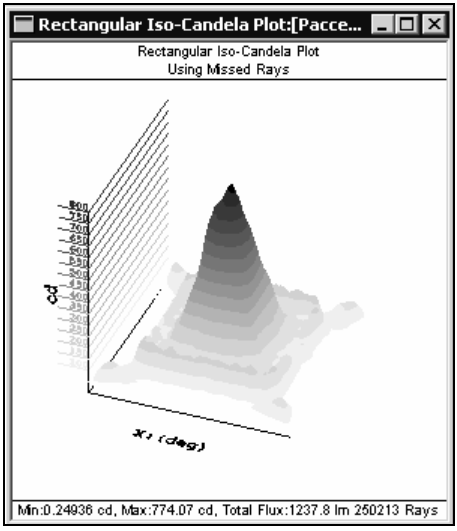


Рис. 9.130. Диаграмма изокандел в ортогональных координатах, трехмерное отображение

Candela Distributions (Распределение силы света)

Настройки для диаграмм, отображающих распределение силы света в виде кривых в полярных или ортогональных координатах (рис. 9.131). Эти кривые, по сути, являются сечениями диаграмм, рассмотренных выше. Поля, отличные от диаграмм изокандел, таковы:

- **cd/klm** — масштабирование шкалы силы света относительно 1000 лм;
- **Number of horizontal angles** (Число горизонтальных углов) — число сечений пространственного угла плоскостями, проходящими через ось;

- **Luminaire format** (Светотехнический формат) — отображение диаграммы в формате, принятом в светотехнике;
- **3D Plot** (3D-диаграмма) — отображение диаграммы поверхностью в пространстве;
- **Angular width** (Угловая ширина) — размер пространственного угла, из которого собирается информация для диаграммы.

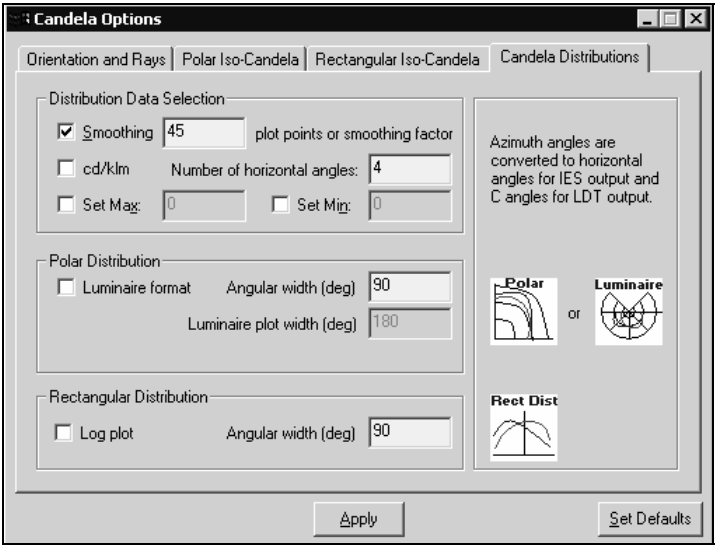


Рис. 9.131. Окно **Candela Options**, вкладка **Candela Distributions**

Распределение силы света при отображении углов на сетке в полярных и ортогональных координатах показаны на рис. 9.132 и 9.133. Для получения графиков использовались настройки, показанные на рис. 9.131. По сравнению с диаграммами, которые получены закраской областей, данный способ отображения может давать дополнительную информацию. Определяющим фактором для получения адекватных результатов, как и ранее, является подбор корректного соотношения между точностью расчета (грубо — числом лучей), параметром **Smoothing** (Сглаживание) и учетом симметрии. Все это, разумеется, должно соотноситься с характером модели.

Заключая рассмотрение диаграмм изокандел, обратим внимание на то, что эти графики для коллимированных источников света бессмысленны (поскольку весь световой поток направлен вдоль одной линии), причем это не зависит от площади пучка. Для узких же пучков (направленных в малый пространственный угол) они не слишком достоверны, поскольку требуют большого числа испускаемых лучей.

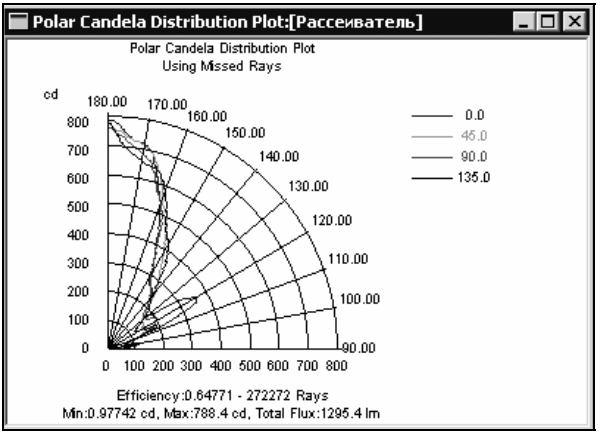


Рис. 9.132. Распределение силы света в полярных координатах

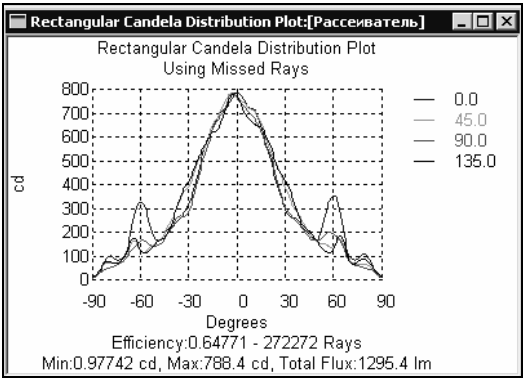


Рис. 9.133. Распределение силы света в ортогональных координатах

Polarization Maps (Диаграмма поляризации)

Отображение эллипса поляризации.

Polarization Options (Настройки поляризации)

Настройки для диаграммы поляризации.

Incident Ray Table (Таблица входящих лучей)

Таблица, содержащая информацию о лучах, попавших на выбранную поверхность. Доступны номер луча, длина волны, "передаваемый" лучом световой поток, координаты начала и конца, другие параметры. Выбранный луч можно визуализировать. Наиболее важная функция данной таблицы — соз-

дание виртуального источника света. Он "аккумулирует" лучи, прошедшие через выбранную поверхность. Лучи экспортируются в текстовый файл командой **File** | **Save as**, после чего источник (фактически те же лучи) импортируются в модель командой **Insert** | **Source**.

Ray Histories (Истории лучей)

Таблица, содержащая траекторию луча с информацией о каждом из его отрезков. Выбор луча в таблице осуществляется посредством соответствующих кнопок.

Analysis Mode (Режим анализа)

Признак того, что трассировка будет выполняться в режиме анализа. Это позволяет иметь в качестве результатов всю расчетную информацию.

Simulation Mode (Режим симуляции)

Признак того, что трассировка будет выполняться в режиме симуляции. Это позволяет иметь в качестве результатов только часть расчетных данных, состав которых определяется настройками (см. описание вкладки **Simulation & Output**, рис. 9.117). Эти недостатки компенсируются сокращением запросов к оперативной памяти.

9.4.7. Меню *Reports*

Меню **Reports** (Отчеты) показано на рис. 9.134. Оно содержит команды для вывода интегральной информации о свойствах объектов, числовых параметрах светового потока и протокол использования ресурсов аппаратуры.

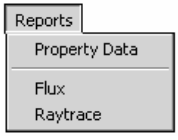
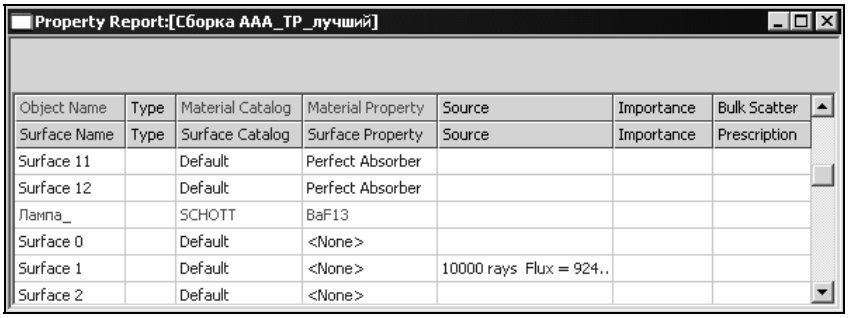


Рис. 9.134. Меню **Reports**

Property Data (Информация о свойствах)

Вывод сводной таблицы, содержащей информацию о свойствах, присвоенных каждому из объектов модели, включая параметры поверхностей этих объектов (рис. 9.135). Мы не будем расшифровывать содержание этой таблицы, поскольку все позиции были описаны ранее.



Property Report:[Сборка AAA_TP_лучший]

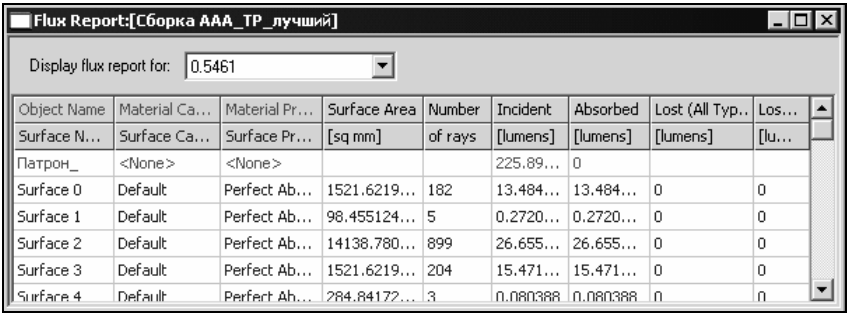
Object Name	Type	Material Catalog	Material Property	Source	Importance	Bulk Scatter
Surface Name	Type	Surface Catalog	Surface Property	Source	Importance	Prescription
Surface 11		Default	Perfect Absorber			
Surface 12		Default	Perfect Absorber			
Лампа_		SCHOTT	BaF13			
Surface 0		Default	<None>			
Surface 1		Default	<None>	10000 rays Flux = 924..		
Surface 2		Default	<None>			

Рис. 9.135. Таблица **Property Report**

Flux (Поток)

Вывод сводной таблицы, содержащей информацию о результатах взаимодействия светового потока с каждым из объектов модели (включая детализацию по поверхностям) (рис. 9.136). Выводятся следующие величины:

- **Surface Area** (Площадь поверхности);
- **Number of rays** (Число лучей) — число лучей, попавших на поверхность;
- **Incident** (Входящий) — световой поток, попавший на объект;
- **Absorbed** (Поглощенный) — световой поток, поглощенный при взаимодействии с объектом;
- **Lost** (Потерянный) — поток, потерянный при взаимодействии с объектом с покомпонентным отображением.



Flux Report:[Сборка AAA_TP_лучший]

Display flux report for: 0.5461

Object Name	Material Ca...	Material Pr...	Surface Area	Number	Incident	Absorbed	Lost (All Typ..	Los...
Surface N...	Surface Ca...	Surface Pr...	[sq mm]	of rays	[lumens]	[lumens]	[lumens]	[lu...
Патрон_	<None>	<None>			225.89...	0		
Surface 0	Default	Perfect Ab...	1521.6219...	182	13.484...	13.484...	0	0
Surface 1	Default	Perfect Ab...	98.455124...	5	0.2720...	0.2720...	0	0
Surface 2	Default	Perfect Ab...	14138.780...	899	26.655...	26.655...	0	0
Surface 3	Default	Perfect Ab...	1521.6219...	204	15.471...	15.471...	0	0
Surface 4	Default	Perfect Ab...	284.84172...	3	0.080388	0.080388	0	0

Рис. 9.136. Таблица **Flux Report**

Raytrace (Трассировка)

Протокол использования аппаратных средств: информация о времени счета, задействованной оперативной и виртуальной памяти.

9.4.8. Меню *Tools*

Меню **Tools** (Инструменты) с раскрытием некоторых команд показано на рис. 9.137. Оно содержит вспомогательные команды для анализа полноты модели, измерений, некоторые опции для модификации геометрии.

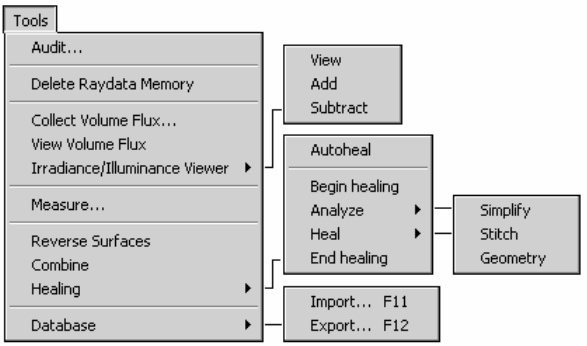


Рис. 9.137. Меню **Tools**

Audit (Аудит)

Проверка расчетной модели на предмет присутствия в базе назначенных ее элементам оптических свойств. Если эта команда не вызвана в явном виде, то перед началом трассировки она запускается автоматически. Далее, в ходе трассировки в окне **Message/Macro** (Сообщения/Макро) отображается протокол аудита. На рис. 9.138 приведен характерный пример. Первое сообщение свидетельствует о том, что одной из поверхностей присвоено оптическое свойство, отсутствующее в базе данных. Это результат переноса файла с расчетной моделью без экспорта/импорта оптических свойств, которые она использует. Остальные два сообщения говорят, что некий участок луча принадлежит одновременно двум объектам. Это, скорее всего, результат интерференции тел в некоторой области.

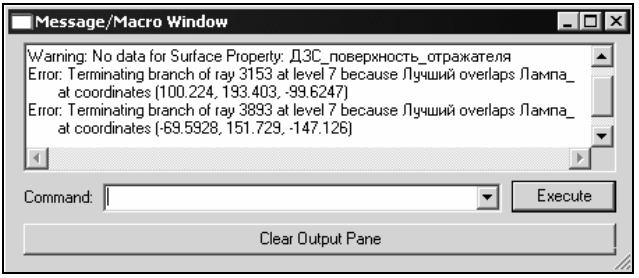


Рис. 9.138. Результат выполнения команды **Reports**

Delete Raydata Memory (Удалить из памяти информацию о лучах)

Освобождение оперативной памяти, занятой данными о лучах. Рекомендуется выполнить, если результат трассировки принципиально не устраивает пользователя. Одновременно будет ликвидирован доступ ко всем диаграммам, графикам и т. д.

Collect Volume Flux (Собрать поток в объеме)

Создание виртуальной сетки из параллелепипедов для сбора информации о распределении светового потока.

View Volume Flux (Отобразить поток в объеме)

Визуализация распределения светового потока в некотором параллелепипеде, на который была наложена сетка.

Irradiance/Illuminance Viewer (Просмотр диаграмм облученности/освещенности)

Просмотр **Irradiance/Illuminance maps** (Диаграммы облученности/освещенности), записанных ранее в файл. Можно объединить информацию из двух диаграмм посредством команд **Add** (Сложить) и **Subtract** (Вычесть). Настройки диаграмм при их совместном отображении подчиняются определенным правилам [30].

Measure (Измерить)

Измерение расстояний между характерными элементами объектов. Доступны отдельные объекты и их пары:

- **Vertex — Vertex** (Вершина — вершина);
- **Vertex — Edge** (Вершина — кромка);
- **Vertex — Surface** (Вершина — поверхность);
- **Edge — Edge** (Кромка — кромка);
- **Edge — Surface** (Кромка — поверхность);
- **Surface — Surface** (Поверхность — поверхность).

Reverse Surface (Развернуть поверхность)

Разворот нормали к поверхности. Как правило, нормали к поверхностям, ограничивающим тело, направлены наружу. В некоторых ситуациях, когда тело, не ограниченное в пространстве, имеет полость, необходимо указывать это обстоятельство посредством данной команды.

Combine (Объединить)

Создание объекта из совокупности других объектов, имеющих поверхностное представление. Программа соединяет все поверхности выбранных объектов в один объект, а затем пытается создать из него тело. В случае удачи (факт этого никак не диагностируется) после присвоения объекту материала он будет восприниматься программой как тело, т. е. иметь возможность преломлять, поглощать и рассеивать свет. Данная команда может быть полезна при импорте геометрии, которая в исходном состоянии не являлась твердым телом или же не была воспринята TracePro как тело. Во избежание потерь времени на дальнейшие безрезультатные манипуляции, следует сразу после модификации объекта присвоить ему свойства прозрачного материала, провести трассировку нескольких лучей и установить факт наличия преломления. Если оно отсутствует, то исходной информации недостаточно для формирования тела. Причины традиционны: наличие щелей, перекрытие кромок, перехлестывание граней.

Healing (Лечение)

Совокупность команд для автоматического изменения дефектной геометрии. Зачастую импортированные объекты, в частности, имеющие твердотельное представление, содержат дефекты геометрии: узкие, накладывающиеся или пересекающиеся грани, несшитые поверхности и т. д. Причина здесь может быть как субъективная — некорректные действия пользователя при создании исходной геометрии, — так и объективная — несоответствие точности представления геометрии в графической и в расчетной средах. Некоторые ошибки, в общем, мало влияют на результат: в процессе трассировки производится отсечение лучей, которые встречают проблемные элементы. Негативным следствием этого факта является замедление расчета из-за того, что обработка лучей в проблемных зонах затруднена, а также непрогнозируемая потеря точности (которая, скорее всего, не слишком значима). Хуже, однако, если объект, представлявший в исходной CAD-системе твердое тело, в TracePro в качестве такового не воспринимается. По этой причине он может преломлять свет и обладать другими оптическими характеристиками, присущими телу. С определенной вероятностью нивелировать эти проблемы может использование перечисленных далее команд.

- **Autoheal** (Автоматическое лечение) — последовательное применение операций, описанных ниже. Перед подачей команды следует выбрать объект, содержащий проблемные поверхности.
- **Begin/End healing** (Начать/Закончить лечение) — эти команды необходимо подать перед началом выполнения команд лечения и после того, как операции выполнены.

- **Heal** (Лечить) — команды модификации модели. Доступны следующие операции:
  - **Simplify** (Упростить) — упрощение геометрии с целью приведения объекта к канонической форме с учетом некоторой (программно определенной) погрешности. Например, сфера, имеющая "точное" представление в CAD-системах, в TracePro может (с не слишком большой, но ненулевой вероятностью) быть воспринята как сплайновая поверхность. Это повлечет усложнение расчета и создаст систематическую ошибку в результатах. Справедливо и обратное утверждение: незначительные отклонения от канонической формы могут присутствовать в модели вполне целенаправленно (например, асферичность в линзах). Есть вероятность того, что они исчезнут после применения данной команды к подобному объекту;
  - **Stitch** (Сшить) — соединение граней, которые должны (с учетом некоторой погрешности) иметь некоторую кромку;
  - **Geometry** (Геометрия) — недокументированная, но, вероятно, полезная опция.
- **Analyze** (Проверять) — команды для проверки наличия в объекте дефектов. Рекомендуется использовать их перед подачей команд на изменение геометрии.

Database (База данных)

Экспорт/импорт свойств, присутствующих в модели. Рекомендуется при передаче моделей сторонним пользователям сопровождать их файлом со свойствами. Это гарантирует актуальность данных, а также гарантирует от проблем, связанных с отсутствием свойств, назначенных элементам модели, в базе данных того, кто эту модель будет анализировать. Необходимость использования этой процедуры порождена тем, что в файл модели записывается исключительно информация о присвоении объектам неких свойств, но не их содержание.

9.4.9. Меню *Macros*

Меню **Macros** (Макрос) содержит команды для создания, просмотра и выполнения макрокоманд, записанных на языке Scheme.

9.4.10. Меню *Window*

Меню **Window** (Окно) содержит команды для манипуляции с окнами.

9.4.11. Меню *Help*

Меню **Help** (Справка) содержит команды для получения справочной информации о программе, а также обеспечивает доступ к процедуре обновления лицензии (рис. 9.139).

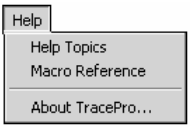


Рис. 9.139. Меню Help

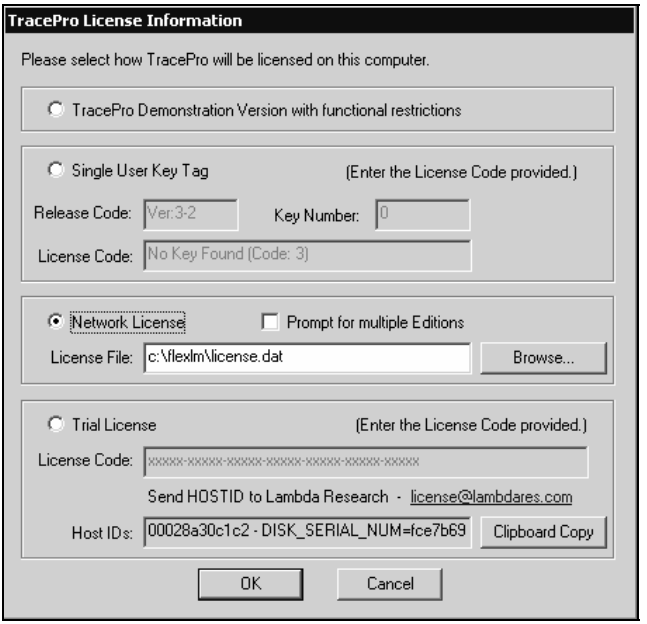


Рис. 9.140. Окно TracePro License Information

Help Topics (Разделы справки)

Содержимое справочной системы.

Macro Reference (Ссылки по макро)

Справка по макроязыку Scheme.

About TracePro (О TracePro)

Вывод информации о продукте. Появившееся окно (см. рис. 9.1) содержит кнопку **Update License** (Обновить лицензию), нажав которую можно увидеть окно **TracePro License Information** (Информация о лицензии TracePro) (рис. 9.140). Если у пользователя есть коммерческая лицензия, то в поле **Network License** следует прописать путь к файлу license.dat; если таковой нет, активизировать опцию **TracePro Demonstration Version with functional restrictions** (Демонстрационная версия с функциональными ограничениями),

что позволит работать с демонстрационными моделями, которые прилагаются к программе. Не рекомендуется изменять место размещения файла лицензий, поскольку этот факт необходимо фиксировать также в Менеджере лицензий FLEXlm. Поэтому при получении обновления лицензии новый файл следует записать на место предыдущего и перезагрузить компьютер.

В окне **TracePro License Information** в поле **HOST IDs** можно увидеть номер сетевой карты компьютера, на котором установлена программа. Именно к нему привязана сетевая лицензия. Отображаемый номер диска практического значения, как правило, не имеет.

9.5. Последовательность анализа

В качестве примера последовательного использования возможностей TracePro рассмотрим светотехнический анализ секции противотуманного огня заднего фонаря автомобиля "Газель". Геометрическая модель была создана в Catia V4, после чего она транслировалась в TracePro[1].

9.5.1. Подготовка геометрической модели

Конструкция (рис. 9.141 и 9.142) имеет следующие детали:

- нить накала — цилиндрическое тело вращения;
- колба лампы — тело вращения;
- цоколь лампы — тело вращения с двумя лысками;



Рис. 9.141. Конструкция фонаря — вид сзади



Рис. 9.142. Конструкция фонаря — вид сзади без корпуса

[1] Конструкция и геометрическая модель являются разработкой ООО "Димитровградский завод светотехники". В данном разделе использованы материалы, полученные при содействии сотрудников ООО ДЗС Н. Ф. Широбокова, Е. И. Платова, С. Ю. Силаевой.

- корпус секции — его имитирует объект в поверхностном представлении. В число поверхностей включены только внутренние отражающие грани "реального" корпуса. Это сделано для облегчения трансляции модели между графической системой и расчетной программой. Поскольку поверхности, ограничивающие тело, являются сплайнами, это дает существенную экономию вычислительных ресурсов и повышает вероятность успешной передачи данных;
- рассеиватель — тело сложной формы, имеющее на внутренней поверхности линзовые элементы со сплайновыми поверхностями;
- экран — тело, ограниченное сплайновыми поверхностями и повторяющее форму внутренней верхней части рассеивателя.

Как упоминалось, секция была разработана в Catia V4, причем корпус, рассеиватель и экран создавались в контексте сборки, а следовательно, имеют общую систему координат. Остальные детали связывались с перечисленными в составе сборки. Поэтому операции сопряжения, перемещения и т. д. в TracePro неуместны.

Рассмотрим процедуру передачи геометрии из Catia V4 в TracePro на примере рассеивателя. Общими форматами для TracePro и Catia V4 являются STEP и IGES. На первом этапе попытаемся использовать IGES. Каждую из деталей будем, разумеется, транслировать индивидуально. Сохранив рассеиватель в Catia в формате IGES, считываем его в TracePro. Результат показан на рис. 9.143 и 9.144. Как видим, и это не лучшее начало: в Дереве проекта возникло множество объектов вместо единственного ожидаемого. Явно лишними являются кривые (в Дереве они обозначены как CRV). Их мы просто удаляем. Кроме того, на модели возникают две сферические поверхности. Их мы тоже уничтожаем. Затем, активизировав все оставшиеся в дереве объекты (для чего используем клавишу <Ctrl>), подаем команду **Tools** | **Combine**. Результат показан на рис. 9.145.

Замечание

Начиная с версии 3.2, TracePro опционно комплектуется трансляторами для обмена с Catia V4, Catia V5, Pro/ENGINEER.

Если увеличить модель и посмотреть изнутри (рис. 9.146), то увидим, что визуально линии пересечения граней выглядят неопределенными. Это значит, что смежные кромки поверхности, общими на самом деле не являются. Они или перехлестываются (как, судя по всему, происходит в данном случае), или образуют зазор. Такая геометрия для оптического анализа непригодна. Используем функциональность TracePro для лечения импортированных объектов.

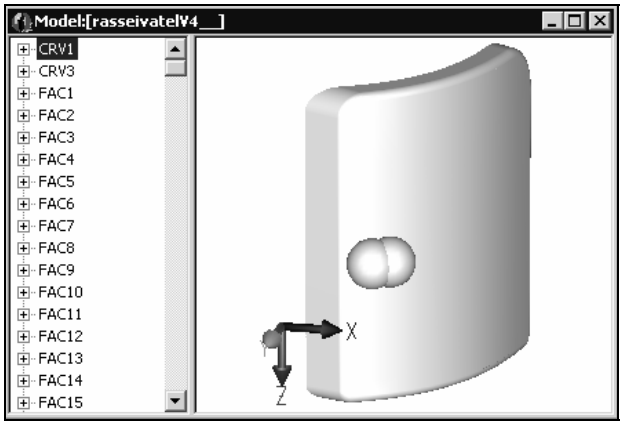


Рис. 9.143. Результат импорта модели рассеивателя в TracePro

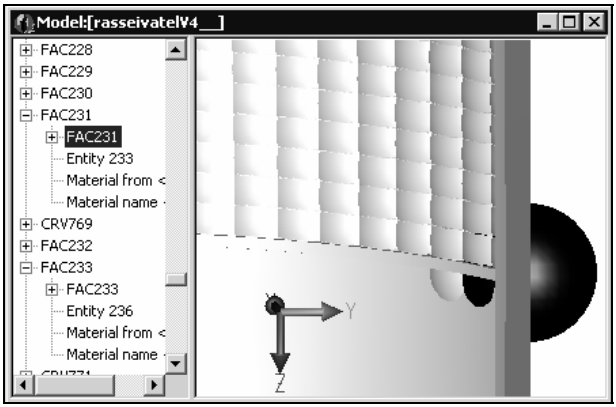


Рис. 9.144. Дефектные элементы модели

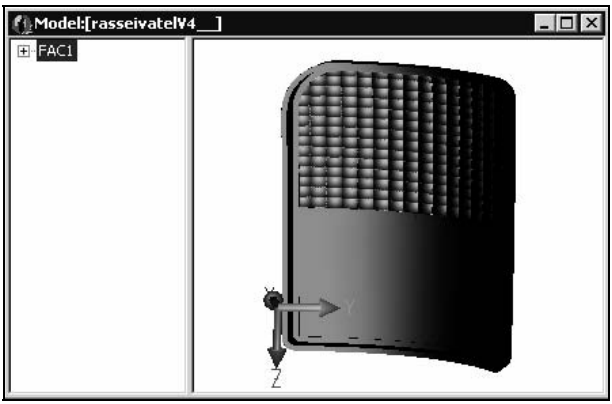


Рис. 9.145. Модель после объединения граней

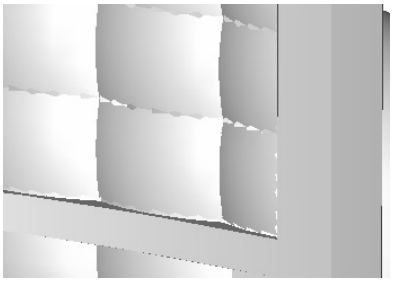


Рис. 9.146. Некорректная стыковка граней

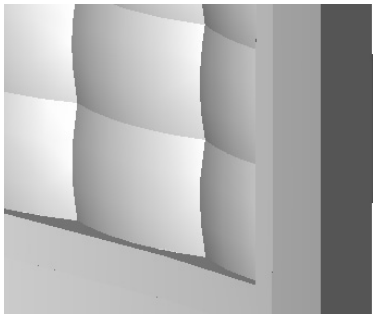


Рис. 9.147. Модель после лечения

В меню **Tools** | **Healing** последовательно подаем команды:

1. **Begin Healing** (Начать лечение).
2. **Stitch** (Сшить).
3. **Geometry** (Геометрия).
4. **End Healing** (Закончить лечение).

Мы не стали применять команду **Simplify**, "подгоняющую" поверхности под канонические. Дело в том, что последствия ее применения предсказать достаточно трудно, а рассматриваемые объекты имеют сплайновые поверхности. Результат показан на рис. 9.147. Картинка выглядит вполне приемлемо.

Единственным объективным критерием "твердотельности" объекта в TracePro является восприятие его системой в этом качестве. Для данной программы — это формирование траектории луча с учетом преломления. Вставляем в модель некий объект, например, призму, располагая ее так, чтобы одна из граней проецировалась, например, на линзовые элементы. После этого делаем эту грань источником света с ориентацией лучей нормально грани. Выполнив трассировку лучей, убеждаемся, что преломление имеет место (рис. 9.148).

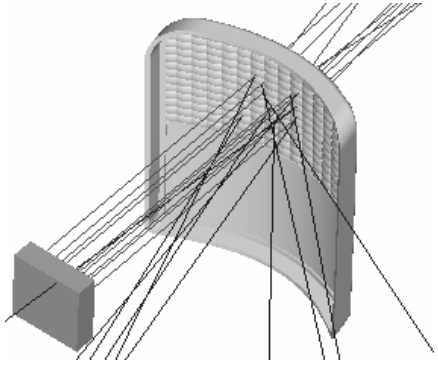


Рис. 9.148. Трассировка лучей в пробной модели

Аналогичным операциям подвергаем все объекты, имеющие твердотельное представление. Если деталь моделируется только поверхностями, то критерий качества несколько менее жесткий. В худшем случае в месте перехлеста граней будет происходить отклонение лучей от ожидаемой траектории. Учитывая, что подобные зоны имеют весьма малую площадь, влияние этих лучей на результат не будет существенным.

После считывания файлов деталей в TracePro и последующей их обработки, создаем на их базе файлы с расширением oml. Затем, открыв новый файл TracePro, переносим в него эту информацию посредством команды **Insert | Part**.

Объединив детали в одном файле, убеждаемся, что полученная модель идентична той, которая была в базовой графической системе. Для проверки можно выполнить измерения расстояния между элементами различных деталей.

Отвлечемся на некоторое время от проблем, связанных с переносом информации в TracePro, и попробуем те же операции выполнить в SolidWorks. Результат считывания рассеивателя в формате IGES показан на рис. 9.149. Предпринять что-либо для придания ей "нормального" состояния весьма затруднительно.

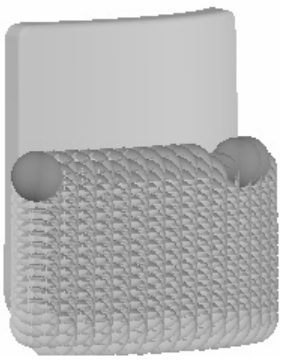


Рис. 9.149. Результат импорта рассеивателя в SolidWorks в формате IGES

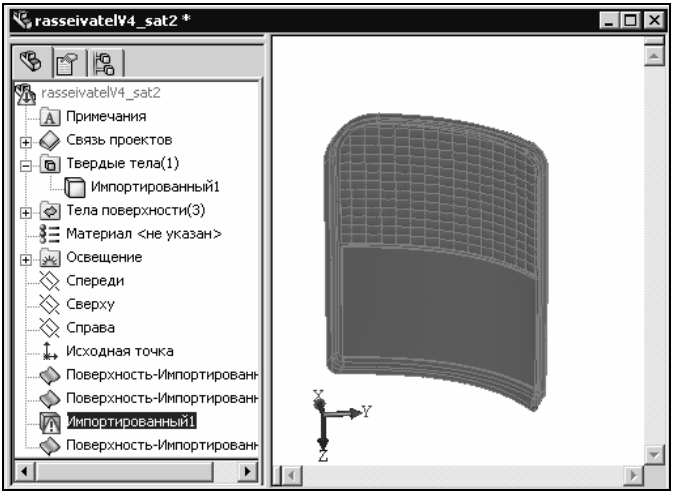


Рис. 9.150. Результат импорта рассеивателя в SolidWorks из TracePro в формате ACIS

Если же модель после лечения ее в TracePro передать в SolidWorks через формат ACIS, то результат импорта будет иметь вид рис. 9.150. Налицо проблемы двух типов. Первая — наличие нескольких изолированных поверхностей. Убедившись в том, что они дублируют те, которые присутствуют в теле, которому соответствует пиктограмма **Импортированный**, их можно просто

удалить. Второе затруднение связано с появлением над пиктограммой **Импортированный** в Дереве конструирования SolidWorks знака, свидетельствующего о наличии ошибок.

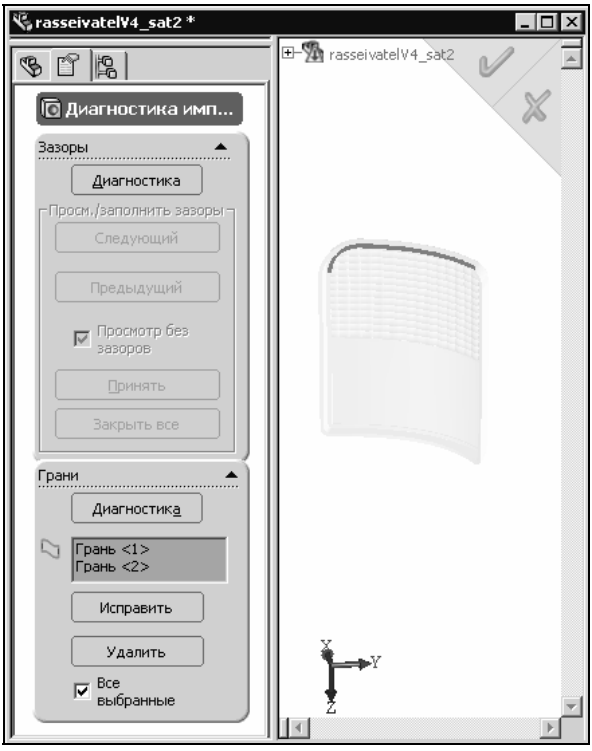


Рис. 9.151. Диагностика импортирования и исправление модели в SolidWorks

В SolidWorks также есть инструменты для исправления ошибок импорта. Это команда **Диагностика импортированной геометрии** (рис. 9.151). Она позволяет заполнить зазоры и исправить грани. Применим ее к элементу **Импортированный**. Если оценивать модель визуально, то ошибок теперь нет. Подобно тому, как это делалось в TracePro, попытаемся найти критерий корректности твердотельной модели и оценить модель на соответствие этому критерию. Объект является телом, если по отношению к нему применимы операции для тел. Попробуем сделать в рассеивателе вырез (рис. 9.152). Для этого создаем некоторую плоскость, и, создав на ней эскиз, подаем команду **Вытянутый вырез**. Поскольку попытка удается, то мы имеем право считать твердотельную модель корректной.

Отдавая себе отчет в том, что использованные методы трансляции и корректировки объектов не являются строго формализованными и обоснованными,

сделаем некоторые выводы. Несмотря на достаточную мощность инструментария для импортирования файлов разнообразных форматов, в данном случае SolidWorks потерпел неудачу. В то же время программа TracePro оказалась в состоянии получить работоспособную модель. При необходимости ее можно использовать в качестве вспомогательного инструмента для обработки проблемных объектов. Дальнейшие манипуляции, если они, конечно, необходимы, следует выполнять в SolidWorks. Отметим, что весьма часто специальные расчетные программы обладают инструментами для трансляции внешних объектов в более удобные форматы. Например, одной из опций COSMOS-DesignSTAR является транслятор из Catia V5 в формат Parasolid. Последний, в свою очередь, является базовым для SolidWorks.

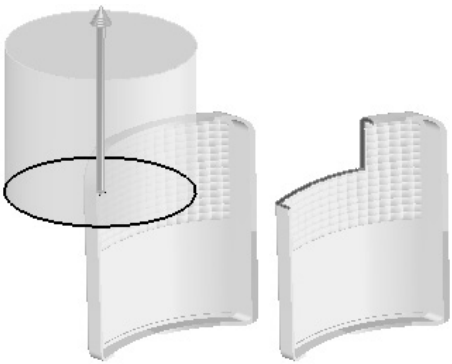


Рис. 9.152. Выполнение выреза и результат операции

9.5.2. Назначение оптических характеристик

Последовательно активизируем объекты в Дереве проекта, назначая оптические характеристики материалам и/или поверхностям.

1. Нить накала. Всем ее поверхностям присваиваем свойство поверхности **Perfect Absorber** (Абсолютное поглощение). По этой причине материал можно оставить неопределенным.
2. Колба лампы. Для колбы назначаем материал — одним из типов стекла. Поверхностям следует назначить, например, тип **Lens**, однако из-за того, что предусматриваемые этим свойством коэффициенты поглощения и поверхностного рассеяния достаточно малы (по сравнению с аналогичными для поверхности корпуса и рассеивателя), то эту операцию можно опустить.
3. Цоколь лампы. Аналогично нити накала поверхности будут поглотителями, а материал — неопределенным.

4. Корпус секции. Поскольку он имеет поверхностное представление, назначать материал бессмысленно. Поверхности корпуса можно разделить на две группы: имеющие зеркальные свойства и матовые зеркала. Эти свойства присваиваем поверхностям, ограничивающим параболический отражатель. База данных TracePro содержит большое число различных типов зеркал. Однако идентифицировать свойство, соответствующее конкретной технологии, крайне трудно. Поэтому были выполнены работы по идентификации коэффициентов ABg модели *(см. разд. 9.2)*.
5. Рассеиватель. Материал (поликарбонат) выбираем из базы TracePro. Сложнее с характеристиками объемного рассеяния. TracePro не предоставляет практически ничего подходящего для этого случая. Данные параметры подбирались на основе анализа совокупности экспериментов над изделиями, изготовленными из аналогичных материалов.
6. Экран. Подобно нити и цоколю, для всех поверхностей тела выбираем свойство абсолютного поглощения.

9.5.3. Назначение источников света

Источником света назначаем цилиндрическую поверхность тела, имитирующего спираль. В качестве закона распределения силы света в пространстве выбираем ламбертовское распределение. Здесь нужно сделать замечание. В реальной лампе накаливания свет излучает поверхность спирали, причем это происходит в направлении оси спирали. Часть этой энергии поглощается, а часть проходит через витки. Более того, в связи с тем, что светимость поверхности тела накаливания зависит от температуры, а внутренние витки нагреваются больше, чем крайние, то светимость поверхности идеализированного тела также должна уменьшаться ближе к концам цилиндра. Однако, учитывая весьма существенные погрешности, присущие другим этапам моделирования, с этим фактом можно смириться. Зачастую некие поверхности, монолитные в исходной модели, после трансляции расчленяются на несколько граней. В этой ситуации интегральный световой поток нужно распределить между частями пропорционально их площади.

9.5.4. Параметры вычислительного процесса

Данная задача характеризуется высокой вычислительной трудоемкостью. Это обусловлено, в частности, наличием множества сплайновых поверхностей, а также достаточной степенью вложенности объектов и существенным (предполагаемым) влиянием процессов рассеяния на результат. Продолжительность расчета может составить несколько часов. Поэтому уделяем достаточное время настройке вычислительного процесса. Подаем команду **Raytrace**

Options (Параметры трассировки) и переходим на вкладку **Options** (Настройки) (рис. 9.153). Здесь активизируем опцию **Ray Splitting** (Расщепление луча), что, несмотря на рост объема вычислений и необходимой памяти, способствует более точному воспроизведению явлений рассеяния.

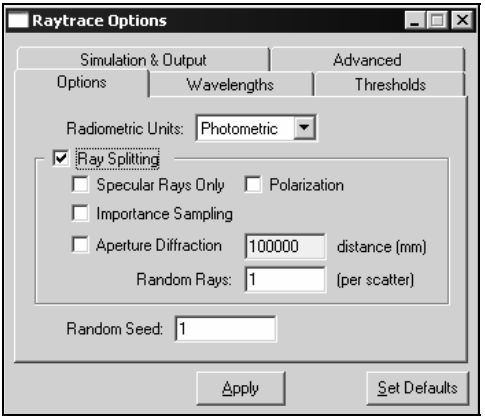


Рис. 9.153. Учет возможности расщепления лучей

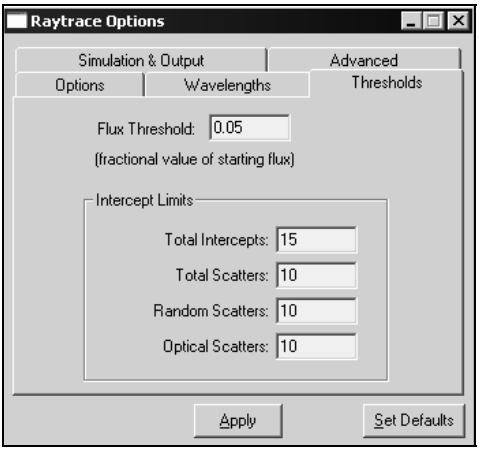


Рис. 9.154. Настройка параметров, определяющих момент прекращения хода луча

На вкладке **Thresholds** (Пороговые значения) (рис. 9.154) настраиваем параметры так, чтобы, с одной стороны, компоненты рассеянного света "потерялись" бы только после того, как они перестали нести достаточную по сравнению с "прямыми" лучами долю энергии, а с другой стороны, сохранили размерность задачи в разумных пределах. Здесь важно такое соображение. Если бы нас интересовала освещенность или сила света вне планируемой рабочей зоны (например, анализировались паразитные эффекты в оптических приборах), то лучи следовало бы оставить более "жизнеспособными".

И наконец, на вкладке **Advanced** (Расширенные) (рис. 9.155) выбираем способ вокселизации — октаэдрическое дерево. Этот способ наиболее эффективен в ситуации, когда оптическая система имеет существенно различные по размеру объекты, а также когда расстояние между объектами существенно больше их размеров. Например, если бы секция освещала удаленную поверхность, имеющую габариты в несколько метров, то использование данной опции привело бы относительно равномерного разбиения пространства на параллелепипеды к двух- и более кратной экономии времени счета. В данном случае интерес представляет только распределение силы света, поэтому способ вокселизации не слишком критичен.

Еще одно соображение касается того, как программа должна обрабатывать сплайновые поверхности: воспринимать их такими, какие они есть в модели,

или же строить на их базе виртуальную фасетную поверхность, которую затем и задействовать в расчете. Несмотря на кажущуюся привлекательность второго варианта, он в данном случае нерационален. Дело в том, что затраты времени на преобразование нескольких сотен граней перекроют экономию на вычислениях для упрощенной геометрии. Если бы "сложных" поверхностей было несколько, то выбор фасетной аппроксимации имел смысл.

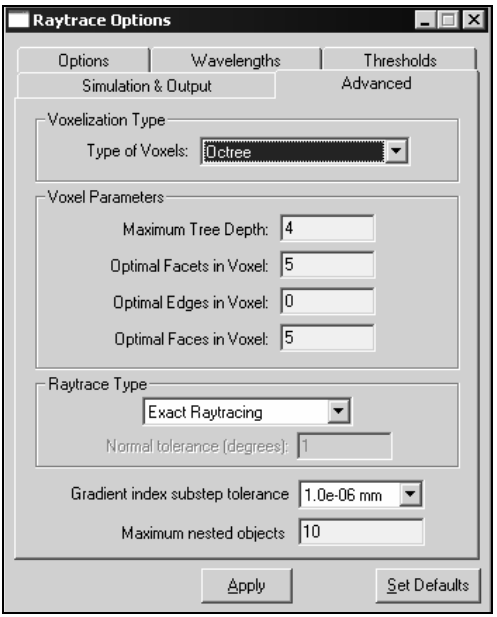


Рис. 9.155. Определение способа разбиения пространства на воксели

9.5.5. Представление результатов

Результирующие диаграммы изоканделa показаны на рис. 9.156 и 9.157. В первом случае сборка не имеет рассеивателя, во втором — он включен в модель. Производилось сравнение результатов расчета и данных, полученных в результате испытаний натурных образцов. Первая конфигурация соответствует эксперименту с точностью, которая сопоставима с разбросом экспериментальных результатов, полученных для нескольких образцов. Различие же между практическими и теоретическими результатами при наличии рассеивателя весьма существенное. Причина здесь в неадекватных характеристиках поверхностного и объектного рассеяния для пластмассы. Надо сказать, что эти характеристики, по крайней мере в отечественной практике, весьма редко используются. Более того, информацией о сколь-нибудь воспроизводимой методике их определения авторы не располагают. В этой ситуации сравнение

результатов анализа посредством TracePro и данных натурного эксперимента при условии их выполнения на базе менее сложных конструкций может быть основой для оценки необходимых свойств объектов.

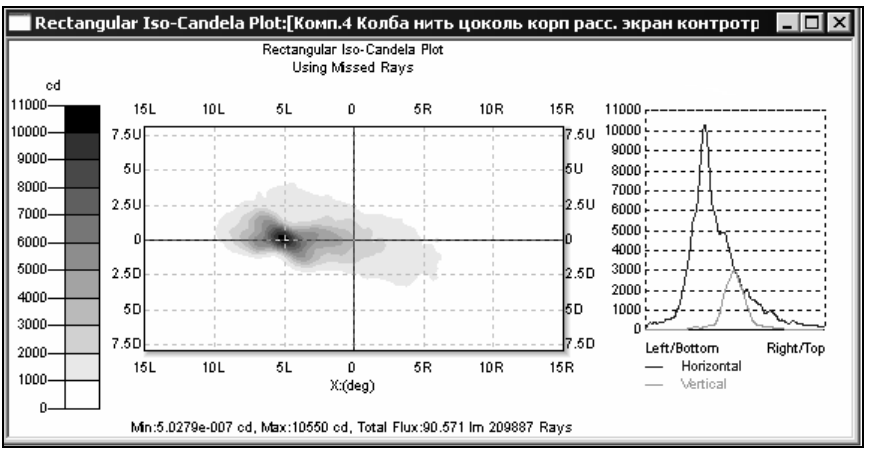


Рис. 9.156. Сила света для конструкции без рассеивателя

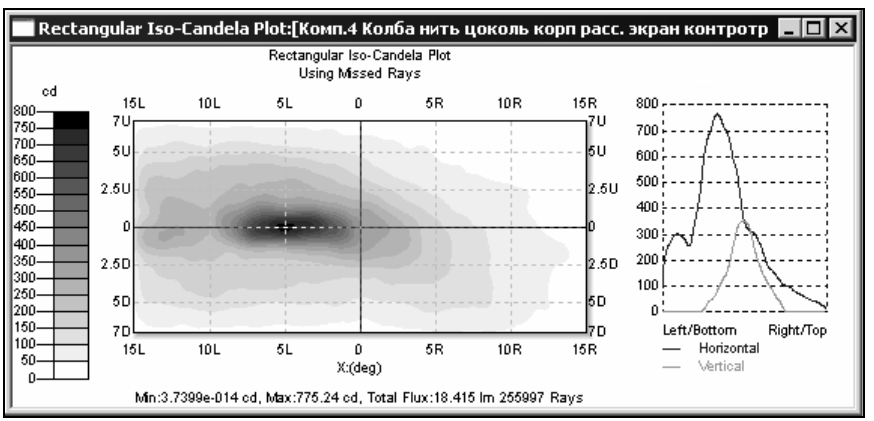


Рис. 9.157. Сила света для конструкции с рассеивателем

Как упоминалось, подбор параметров отображения диаграмм освещенности, силы света и т. д. — весьма неоднозначная проблема. Для предыдущего примера в силу его высокой сложности мы опустили описание этой процедуры. Поэтому процедуру интерпретации результатов рассмотрим на более простой задаче. Она состоит в расчете и анализе освещенности апертуры и диска за ней (рис. 9.158). Поскольку все лучи параллельны между собой (коллимированный пучок), то освещенная зона на кольце должна иметь выраженную

границу, т. е. освещенность должна изменяться дискретно. Снаружи освещенной зоны освещенность должна быть равна нулю. Внутри же кольца результат должен отсутствовать, т. е. на диаграмме должен быть также ноль. Поскольку источник света (его характеристики приведены на рис. 9.159) задан его освещенностью (это математическая абстракция), действующей нормально плоской поверхности, то освещенность видимых (для лучей) объектов должна быть такой же, как у источника.

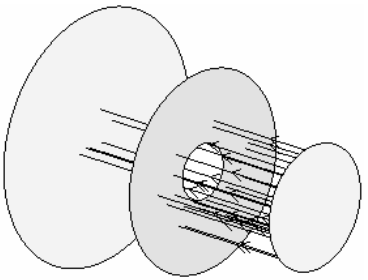


Рис. 9.158. Расчетная модель и трассировка лучей

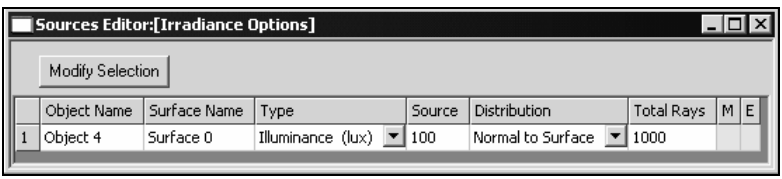


Рис. 9.159. Свойства источника света

На воспринимаемый результат влияют, во-первых, параметры расчета и, во-вторых, то, как численный результат преобразуется в диаграмму. В силу элементарности задачи можно утверждать, что решение (насколько это возможно в рамках идеологии программы) является "точным". Поэтому все видимые отклонения от точного решения обусловлены исключительно постпроцессором. Будем последовательно выделять факторы, влияющие на видимый результат. Это: **Smoothing**, **Map Count**, **Symmetry**.

На первом этапе рассмотрим результаты расчета 1 000 лучей. На рис. 9.160 показана диаграмма освещенности кольца с параметрами: **Smoothing** — включен; **Map Count** = 10; **Symmetry** = None. Учитывая, что ожидаемая картина будет соответствовать двум прямоугольникам, ширина каждого из которых должна быть равна ширине кольца, высота соответствовать 100 люкс, то результат (или, может быть, его отображение) следует признать неудовлетворительным. Откровенных дефектов три: нет выраженного скачка освещенности по внешнему контуру светового пятна; нет такого же скачка по контуру отверстия и последнее — отклонение от ожидаемого результата в пределах

кольца. Первые два случая имеют общие корни: программа осредняет значения освещенности в пределах квадратной ячейки, которая разделяется участками с дискретно меняющимися параметрами. Однако если осреднение по контуру светотеневой границы хотя бы как-то можно оправдать, то отображение освещенности в месте, где ее в принципе нет, не есть позитивный момент. Что же касается отклонения результата на кольце, то, по сравнению с вышеупомянутыми дефектами, оно, в рамках точности, присущей численным методам, не слишком значимо.

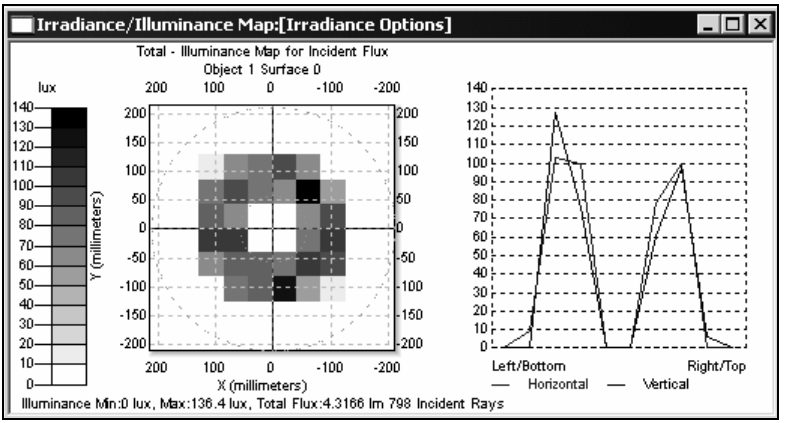


Рис. 9.160. Освещенность апертуры: **Smoothing** — выключен; **Map Count** = 10; **Symmetry** = None

Попытаемся повысить "точность" отображения, увеличив до 20 параметр **Map Count**. Результат показан на рис. 9.161 в плоском виде, а на рис. 9.162 — в пространственном (активизирована опция **Relief Plot**). Улучшения в виде ликвидации размазывания на краях не произошло, а вот различия между полученным результатом и тем, что фактически имеет место, заметно усугубились. Здесь мы столкнулись с вечной проблемой идентификации: как отделить сигнал от шума. Число лучей, попавших на кольцо, становится сопоставимо с числом ячеек сетки, а учитывая случайный характер координаты луча, увеличивается влияние стохастичности на результат. Весьма наглядно это проявляется в отличии вертикального сечения диаграммы от горизонтального: чем больше ячеек осреднения, тем больше различие между ними в результате.

Попытаемся учесть факт наличия у системы осевой симметрии в смысле геометрии и оптических свойств. Назначение для поля **Symmetry** значения Rotational приводит к картинкам: рис. 9.163 для **Map count** = 10 и рис. 9.164 — для 20. В первом случае диагностируем только незначительное улучшение, но во втором — картина весьма близка к ожидаемой.

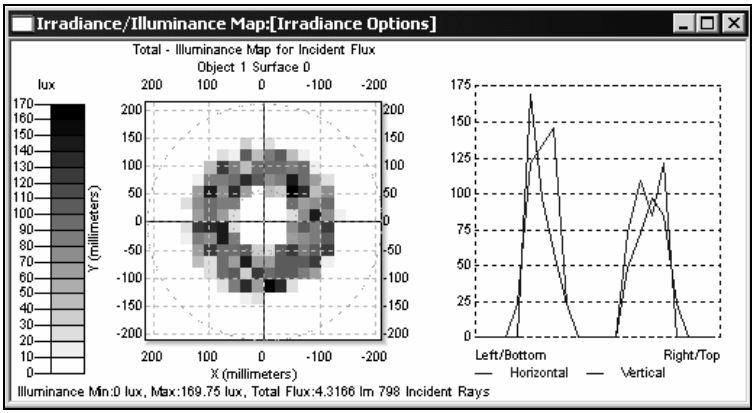


Рис. 9.161. Освещенность апертуры: **Smoothing** — выключен; **Map Count** = 20; **Symmetry** = None

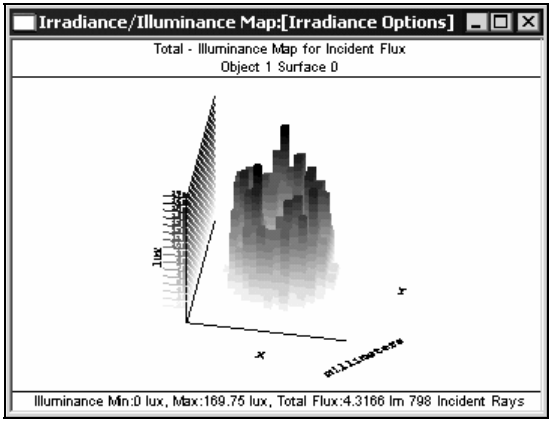


Рис. 9.162. Освещенность апертуры — пространственное отображение

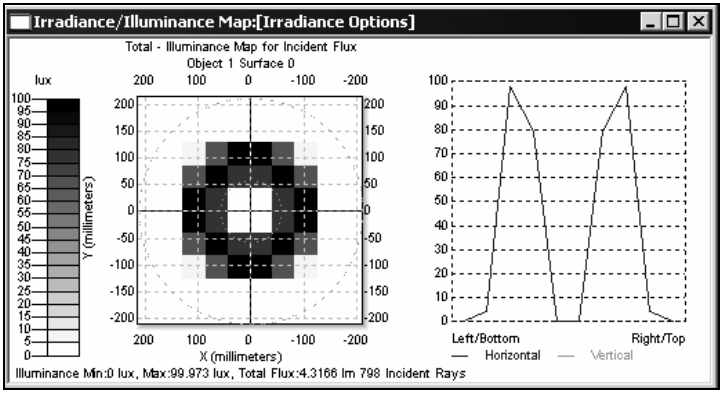


Рис. 9.163. Освещенность апертуры: **Smoothing** — выключен; **Map Count** = 20; **Symmetry** = Rotational

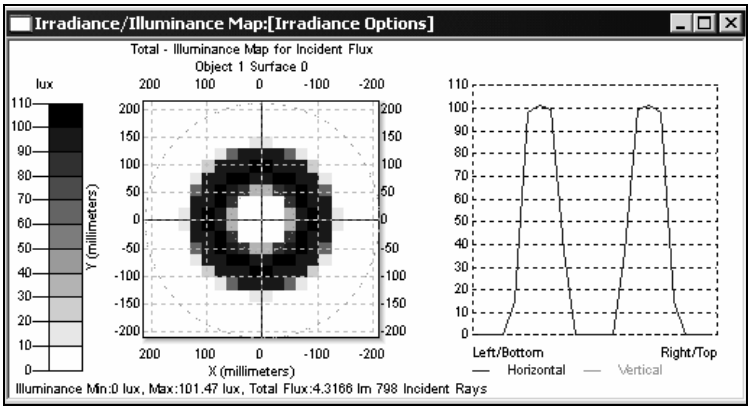


Рис. 9.164. Освещенность апертуры: **Smoothing** — выключен; **Map Count** = 20; **Symmetry** = Rotational

Активизировав опцию **Smoothing**, выполним ту же последовательность действий, подбирая **Map Count**. Если он равен 10 (рис. 9.165), картина совершенно неудовлетворительна, а при **Map Count** = 20 (рис. 9.166) наблюдается небольшое улучшение. Дальнейшая динамика, обусловленная увеличением этого параметра, в конце концов, приводит к превалированию шума над сигналом. Однако в режиме сглаживания этот порог несколько выше.

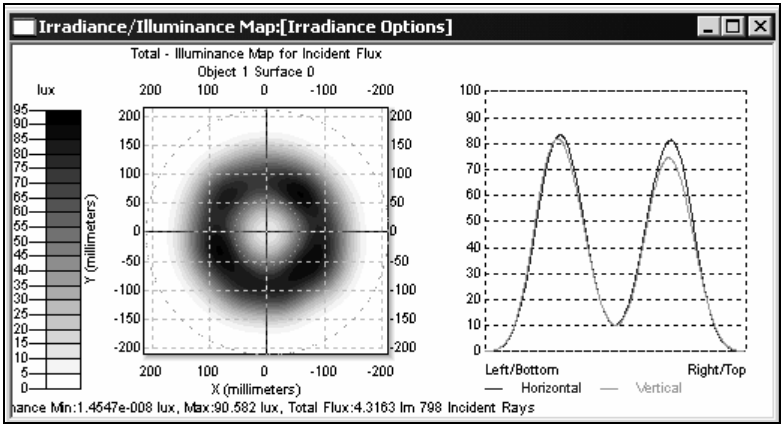


Рис. 9.165. Освещенность апертуры: **Smoothing** — включен; **Map Count** = 10; **Symmetry** = None

Учет симметрии, как и при отображении без сглаживания, позволяет существенно улучшить качество результатов. Постепенно увеличивая **Map Count** (рис. 9.167—9.169), выходим на уровень, когда, с одной стороны, переход между освещенной и неосвещенной областями достаточно выражен, а с другой — освещенность в пределах кольца имеет малые флуктуации.

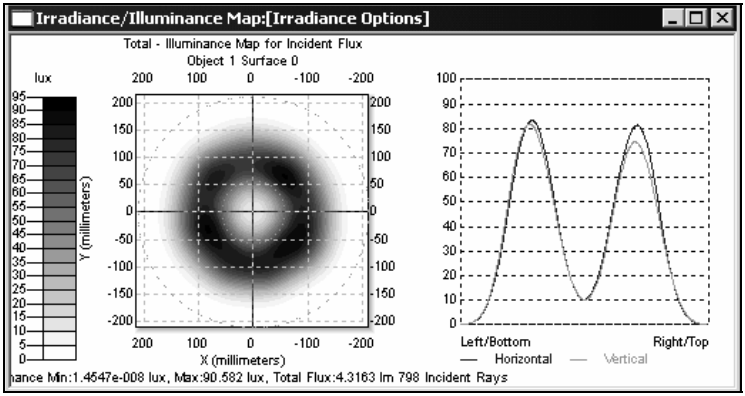


Рис. 9.166. Освещенность апертуры: **Smoothing** — включен; **Map Count** = 20; **Symmetry** = None

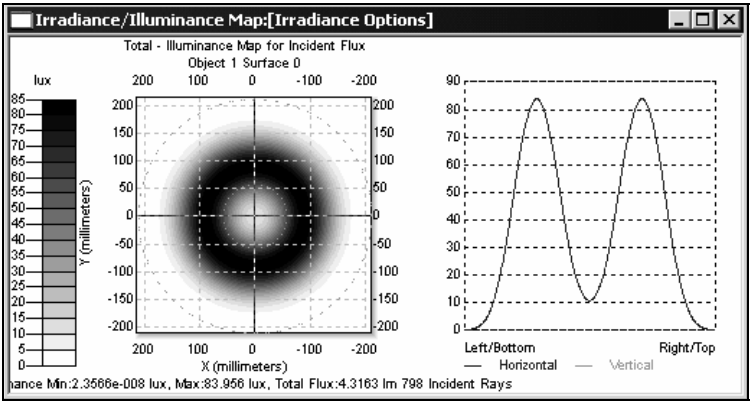


Рис. 9.167. Освещенность апертуры: **Smoothing** — включен; **Map Count** = 10; **Symmetry** = Rotational

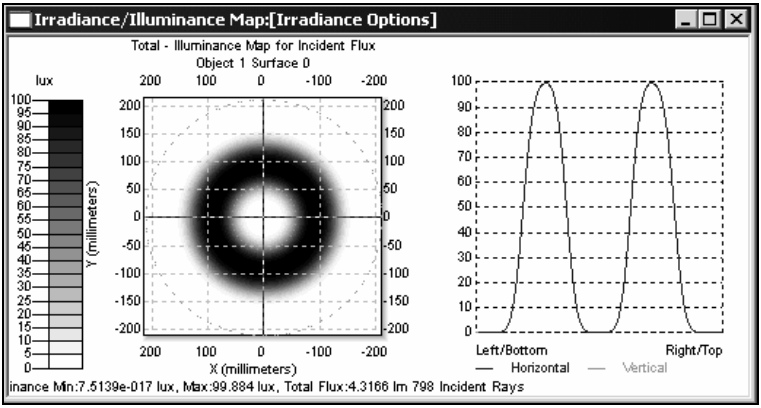


Рис. 9.168. Освещенность апертуры: **Smoothing** — включен; **Map Count** = 20; **Symmetry** = Rotational

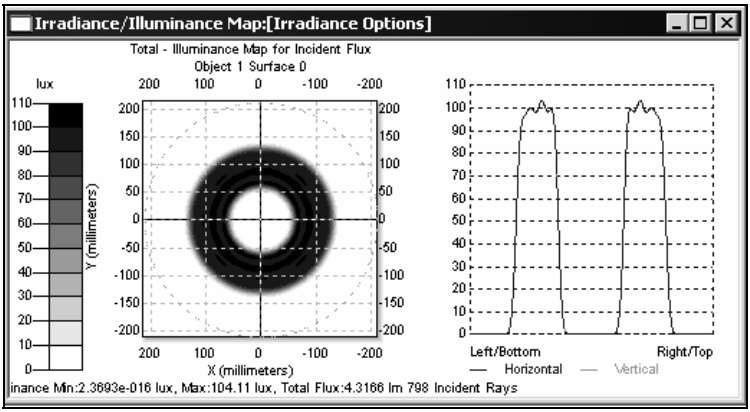


Рис. 9.169. Освещенность апертуры: **Smoothing** — включен; **Map Count** = 50; **Symmetry** = Rotational

Повторим анализ в той же последовательности, но при числе лучей равном 100 000. Если сглаживание отсутствует, то диаграммы выглядят, как показано на рис. 9.170—9.173. При большом размере ячейки осреднения вид результата мало отличается от того, который был для одной тысячи лучей. Порог же, где влияние шума становится значимым, переместился в область большего **Map Count**. В данной ситуации оптимальная величина близка к 40 (рис. 9.172), а ее дальнейшее увеличение приводит к неадекватному восприятию результата.

Подведем некоторые итоги:

- для систем с дискретным изменением освещенности исследуемых объектов предпочтительны диаграммы без сглаживания;

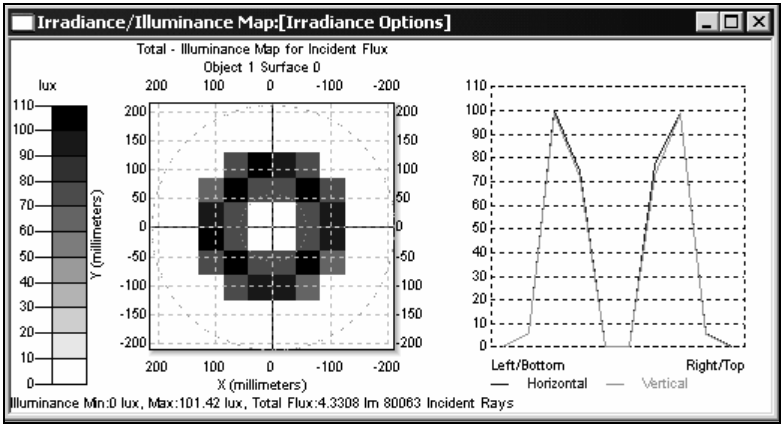


Рис. 9.170. Освещенность апертуры: **Smoothing** — выключен; **Map Count** = 10; **Symmetry** = None

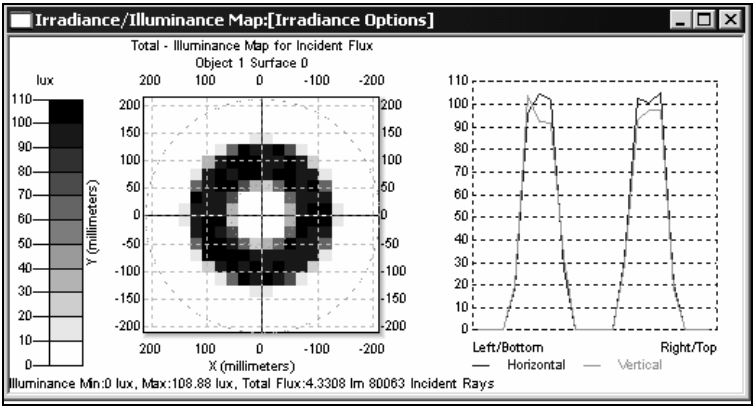


Рис. 9.171. Освещенность апертуры: **Smoothing** — выключен; **Map Count** = 20; **Symmetry** = None

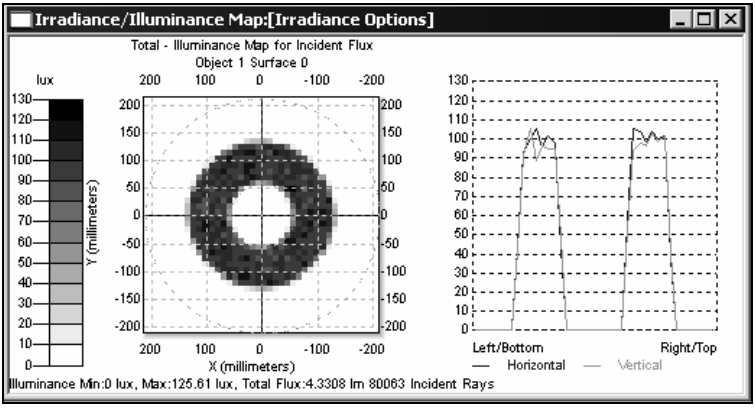


Рис. 9.172. Освещенность апертуры: **Smoothing** — выключен; **Map Count** = 40; **Symmetry** = None

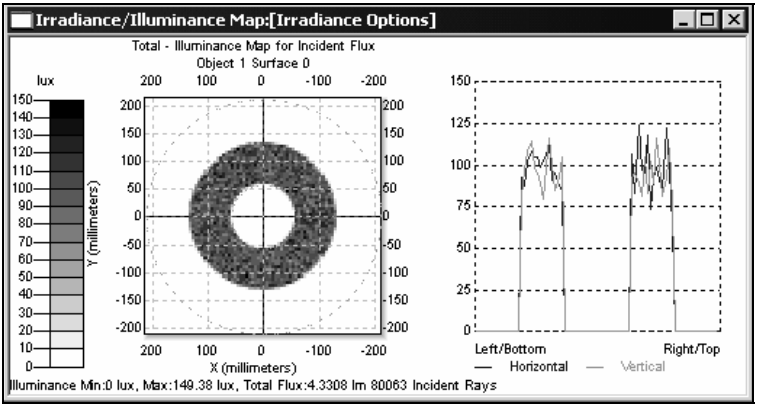


Рис. 9.173. Освещенность апертуры: **Smoothing** — выключен; **Map Count** = 80; **Symmetry** = None

- если оптическая система обладает симметрией, то этот факт нужно использовать на этапе интерпретации результатов;
- чем больше число лучей, тем большее значение параметра **Map Count** обеспечивает картину адекватную реальности;
- однозначные рекомендации по подбору параметров диаграммы отсутствуют. Необходимо последовательно увеличивать **Map Count** до тех пор, пока флуктуации не станут оказывать влияние на результат. Здесь, разумеется, есть весьма неоднозначный момент: что считать флуктуацией?

Рассмотрим вторую часть задачи: анализ освещенности диска за апертурой. Если в предыдущей конфигурации световой поток излучался нормально поверхности диска, то здесь выбрано ламбертово распределение (рис. 9.174), что дает плавную картину освещенности. В то же время на кольце присутствует теневая зона, что может создать трудности при визуализации диаграммы освещенности.

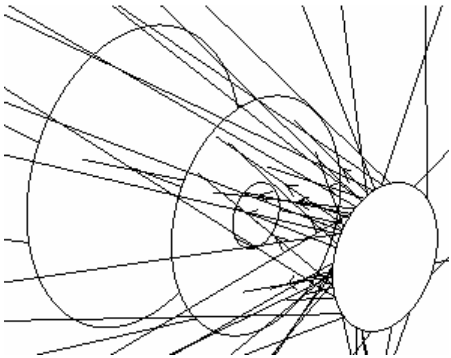


Рис. 9.174. Трассировка лучей от ламбертового источника

Мы не будем воспроизводить все этапы подбора настроек диаграммы, которые дают подходящий эффект. Несмотря на наличие аналитического решения (получить которое достаточно сложно), выполним анализ с большим количеством лучей (500 000), а диаграмму освещенности отобразим как без учета сглаживания, так и в гладком виде (рис. 9.175 и 9.176). В обоих случаях учтем осевую симметрию, а параметр **Map Count** подберем из тех соображений, чтобы шум, с одной стороны, присутствовал, но в то же время, его влияние было бы не слишком значимо. Обе диаграммы (дискретная и сглаженная) получились весьма похожи. Примем их за эталон, а далее установим число лучей в 100 раз меньше (5 000), выполним расчет и отключим учет симметрии.

Подберем параметр **Map Count** так, чтобы картина освещенности и ее сечения (они, кстати, более информативны) были максимально близки к "образ-

цам" (рис. 9.175 и 9.176). Выясняется, что для этой задачи (в отличие от предыдущей) сглаживание весьма полезно. Оно позволяет при малом количестве лучей представить результаты в более-менее правдоподобном виде (рис. 9.177 и 9.178).

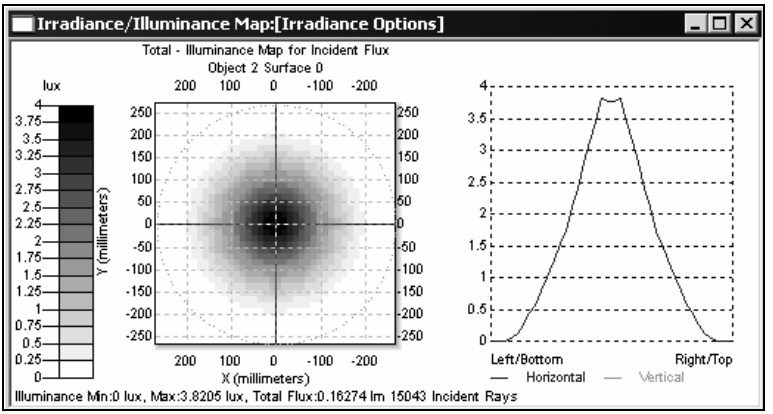


Рис. 9.175. Освещенность диска: **Smoothing** — выключен; **Map Count** = 40; **Symmetry** = Rotational

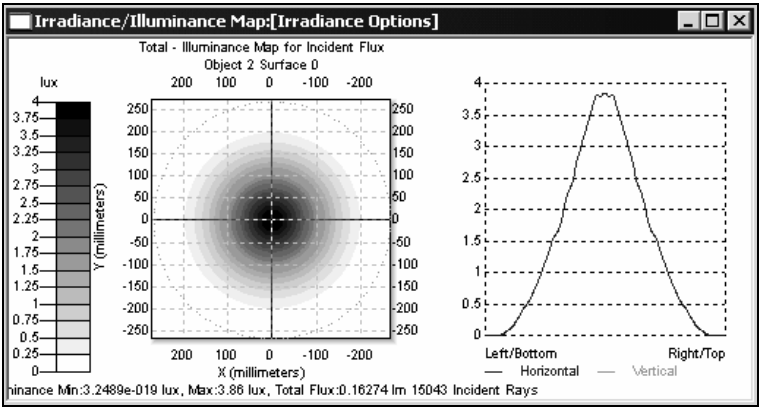


Рис. 9.176. Освещенность диска: **Smoothing** — включен; **Map Count** = 65; **Symmetry** = Rotational

Познакомившись с этими рассуждениями, пользователь программы вправе задать вопрос — а как все-таки надо делать: учитывать сглаживание или нет? Однозначно ответить нельзя. В первой задаче оно было скорее вредно. Во второй — имело смысл. Нужно, однако, понимать, что в действительности строгие дискретные светотеневые границы отсутствуют. Доля энергии, переносимой рассеянным (на поверхностях или в объеме) светом, весьма велика, поэтому режим сглаживания, как правило, имеет право на использование.

В то же время, как показывает практика, уловить момент превращения шума из несущественного фактора в значимый легче посредством анализа дискретных диаграмм.

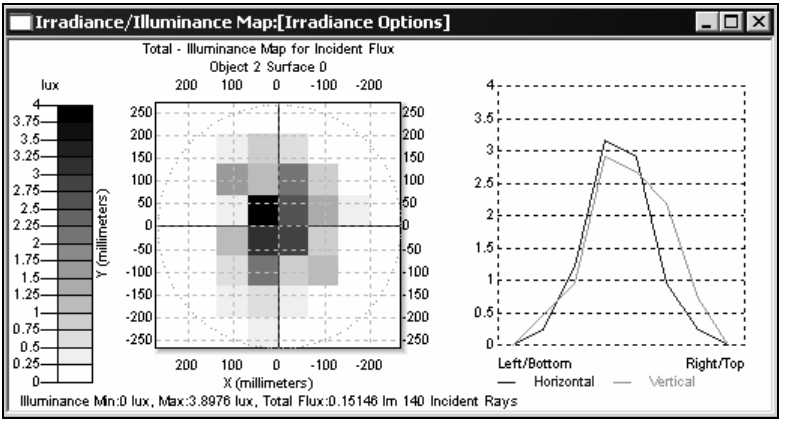


Рис. 9.177. Освещенность диска: **Smoothing** — выключен; **Map Count** = 8; **Symmetry** = None

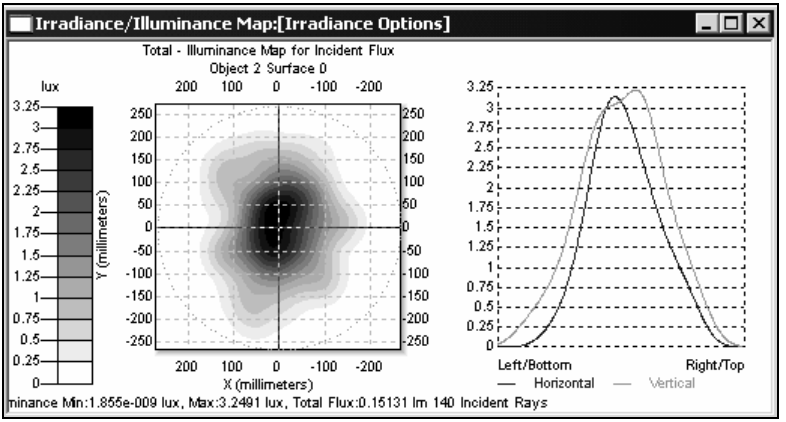


Рис. 9.178. Освещенность диска: **Smoothing** — включен; **Map Count** = 10; **Symmetry** = None

Мы извиняемся перед читателем за столь подробное изложение, на первый взгляд, второстепенных моментов: казалось бы, результат получен, а остальное — дело техники. Как и в ситуации с другими программами, основанными на численных методах, этап интерпретации результатов не менее значим, чем стадия подготовки расчетной модели. В данном случае, как выясняется, у пользователя степеней свободы больше, чем, например, в алгоритмах метода конечных элементов. Там результат жестко привязан к конечно-элементной сетке, оставляя возможность выбора между визуализацией с ос-

реднением по элементам или по узлам. В TracePro же "сетка" для расчета и "сетка" для результатов практически не взаимодействуют. Учитывая изрядное количество настроек, сопровождающих все этапы решения, даже простейшие задачи требуют систематических навыков.

9.6. Практика использования

Рассмотрим ряд задач, иллюстрирующих возможности программ оптического анализа. Как упоминалось выше, будет использоваться только та часть функциональности, которая предназначена для решения задач геометрической оптики и фотометрии. Аспекты, связанные с явлениями волновой оптики, а также затрагивающие вопросы проектирования оптических приборов, выходят за рамки данной книги, поскольку требуют специального рассмотрения.

Данные примеры касаются актуальных инженерных проблем: разработки промышленных осветительных устройств, модификации конструкции детали с точки зрения светотехники, расстановки светотехнического оборудования. Также рассматривается программный продукт для проектирования отражателей автомобильных фар.

9.6.1. Проектирование осветительных приборов

Первая из прикладных задач — проектирование промышленного светильника. Она характеризуется тем, что можно строго сформулировать требования и построить алгоритм, реализующий оптимальный проект.

Постановка задачи

Конструкция светильника, если отвлечься от незначимых подробностей, образована тремя деталями: лампой, патроном и отражателем (рис. 9.179). Для патрона задана геометрия. Для лампы, помимо геометрии, определен световой поток. Для отражателя известны максимальные габариты, сформулированы требования к технологии изготовления, качеству реализации отражающих поверхностей.

Назначение осветительного прибора — создание заданной картины освещенности объектов. Однако в качестве объективной характеристики светильника принято использовать кривую силы света (в терминах TracePro — диаграмму изокандел в полярных координатах). Классификация светильников по типу кривых приводится в ГОСТ 17677—82 (Светильники. Общие технические условия). Ясно, что данные кривые являются плоскими сечениями пространственных объектов. В нашем случае светильник и источник света — осесимметричные объекты, порождающие осесимметричный световой поток. Для

более четкого понимания задачи отобразим распределение силы света как тело (рис. 9.180). Для наглядности в диаграмме выполнен вырез четверти.

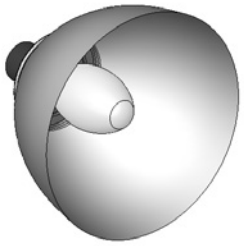


Рис. 9.179. Конструкция светильника

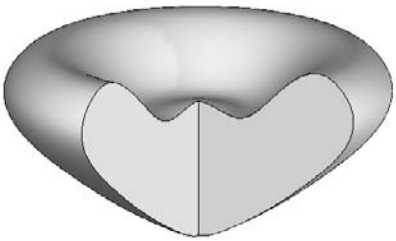


Рис. 9.180. Диаграмма изокандел в пространственном виде с четвертью выреза

Анализ

Цель данного анализа — модификация конструкции для обеспечения требуемого распределения светового потока. Имея в виду использование алгоритмической оптимизации, проанализируем доступные для варьирования параметры конструкции.

Форма отражателя. Предполагаем, что его внутренняя поверхность будет поверхностью вращения. Следующий вопрос — о том, как будет описана ее образующая: ломаной или гладкой кривой. Первый вариант предпочтителен с точки зрения скорости вычислений, а также обеспечения технологической реализуемости проекта. Например, легко формулируются ограничения на переменные проектирования — размеры, гарантирующие отсутствие поднутрений. Да и сами размеры описывают модель более предсказуемо. Определенным недостатком является то, что ломаная в качестве образующей при малом числе сегментов несколько сужает диапазон возможных проектов, а также то, что появление углов усложняет (некритически) технологический процесс. Мы будем использовать аппроксимацию сплайном. Негативное следствие — увеличение объема вычислений в программе — можно преодолеть подбором настроек алгоритма (об этом ниже). Однако обостряется проблема корректного задания сплайна. Можно выделить две тенденции: с одной стороны, увеличение порядка сплайна предоставляет возможность более широкого охвата разнообразных вариантов; противоположная тенденция — увеличение размерности оптимизационной задачи, вероятность появления локальных оптимумов, неустойчивости оптимизационного алгоритма. С учетом того, что алгоритм оптимизации будет функционировать не в автоматическом режиме, нужно очень жестко лимитировать размерность задачи.

Условимся, что в зоне патрона форма рефлектора не может меняться. Тогда сплайн, проходящий через четыре точки, один из концов которого неподви-

жен, может породить весьма широкий диапазон вариантов. Примем также, что вершины сплайна могут перемещаться только в радиальном направлении. Таким образом, число степеней свободы, описывающих форму, три: $D1$, $D2$, $D3$ — диаметры, на которых находятся вершины. Договоримся, что расстояние в направлении оси между вершинами одинаково. Чтобы "облегчить" работу алгоритма, исключить затраты времени на расчет заведомо неприемлемых вариантов, введем ограничение:

$$D0 < D1 < D2 < D3,$$

где $D0$ — диаметр, на котором находится ближайшая к патрону вершина. Остальные вершины пронумерованы так, что чем больше номер, тем дальше от патрона она находится. Это условие не исключает полностью возможности появления поднутрений у отражателя. Более строгий контроль подразумевает наложение ограничений на направление касательных во всех вершинах сплайна. Для внутренних точек сделать это в SolidWorks (до версии 2005 года) непросто. Поэтому понадеемся на "разум" алгоритма и гармонию природы. Форма образующей для исходного проекта, а также данные о переменных проектирования, описывающих форму, приведены на рис. 9.181. Как представляется, степень подробности в описании геометрии рефлектора более чем достаточна для реализации всех технологически реализуемых вариантов конструкции с осесимметричным отражателем.

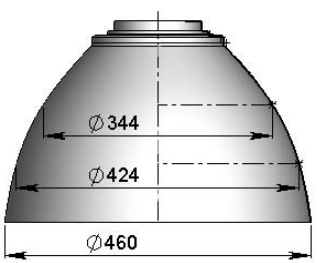


Рис. 9.181. Параметры, описывающие форму

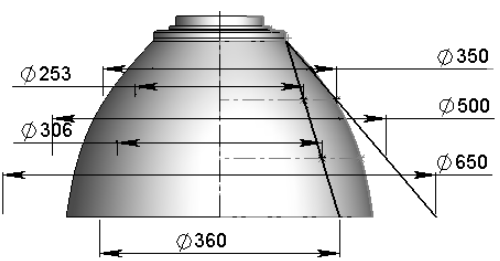


Рис. 9.182. Параметры, описывающие предельные значения

На рис. 9.182 показаны предельные положения образующих. Примем, что это прямые линии, проходящие через конечную точку сплайна. Тогда каждый из варьируемых диаметров должен оставаться между этими образующими — так устанавливаются интервалы изменения переменных, определяющих форму. Для соблюдения этого требования на каждый из размеров следует наложить интервальное ограничение. Эти диапазоны будут использоваться в оптимизационном алгоритме и как ограничения, и как база для процесса поиска решения.

Положение источника света. Перемещение лампы в осевом направлении радикально изменяет распределение светового потока и, соответственно, искомую диаграмму изокандел. Таким образом, появилась четвертая степень свободы. Интервал ее варьирования определяется тем, чтобы лампа находилась внутри рефлектора. Разумеется, патрон сопровождает лампу при любых перемещениях.

Оптические характеристики объектов. Понятно, что оптические параметры лампы применительно к данной, весьма локальной проблеме, не могут быть изменены. Номенклатура источников света, которые можно использовать в данной конструкции, также не слишком разнообразна. Более реалистична попытка варьировать отражающие свойства рефлектора. Однако алгоритмическое описание этого процесса — крайне неформальная задача. В физической модели TracePro как минимум три параметра описывают процесс рассеяния света и один — соотношение между долей зеркально отраженного и рассеянного светового потока. Понятно, что доля поглощенного света в данной задаче должна быть минимальна. Абсолютная же ее величина влияет на распределение светового потока не слишком существенно.

Руководствуясь этими соображениями, а также тем, что реализовать на практике поверхность по заданным параметрам отражения, по сути, невозможно, исключаем оптические параметры поверхности из числа тех, которые будут учитываться алгоритмом. В то же время игнорировать возможность управления функциональностью осветительных приборов через оптические характеристики материалов и поверхностей в данной задаче нельзя.

Алгоритм решения

Подготовка исходных данных о свойствах материалов. На первом этапе присвоим рефлектору характеристики, моделирующие материал с достаточно малым рассеянием (рис. 9.183). Собственно доля идеально отраженного света — 29 % не слишком велика, но рассеянная часть — 55 % распределяется весьма узким пучком. Отдельный вопрос о доле поглощенного света. Ее влияние на вид распределения светового потока не является определяющим, но интерес может представлять коэффициент полезного действия изделия. Если для улучшенного проекта он будет отличаться (в худшую сторону) от исходного варианта, то это будет причиной переформулировать критерий оптимальности. Для колбы лампы назначаем материал — оптическое стекло. Поверхности патрона назначаем свойства полного поглощения.

Подготовка расчетной модели. Геометрическая модель выполняется в SolidWorks в виде сборки и транслируется в TracePro в формате STEP. Варианты отражателя будем создавать в SolidWorks как конфигурации, опре-

деляемые параметрами — переменными проектирования — и передавать в TracePro. Изменять положение источника света и патрона будем непосредственно в программе оптического анализа, используя имеющиеся в ней функции.

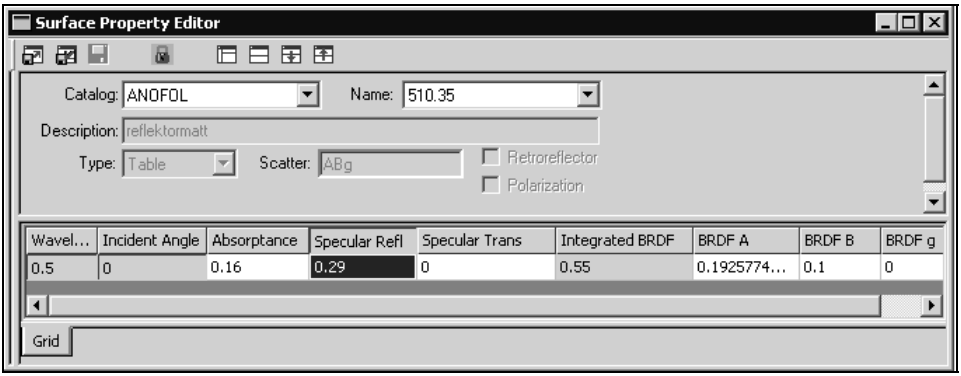
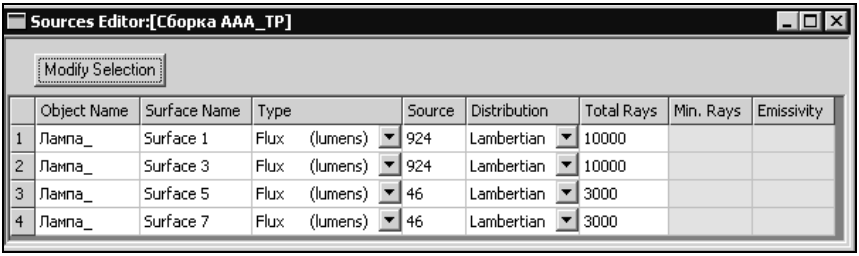


Рис. 9.183. Оптические характеристики поверхности отражателя

Источник света — газоразрядная лампа с рассеивающей колбой. Ее имитация в программе не является тривиальным шагом. В отличие от ламп накаливания, где источником света является нить, поверхность которой и есть излучатель, здесь свет излучается люминофором от источника внутри колбы. Воспроизвести этот процесс в деталях непросто, поэтому назначим наружной поверхности лампы вне патрона излучающую способность с распределением светового потока в полупространстве по ламбертовскому типу. Для этого в панели **Properties** | **Surface Source** (Свойства | Поверхностный источник) полю **Angular Distribution** (Угловое распределение) присваиваем значение **Lambertian** (Ламбертово). Отдельный вопрос — о том, как распределяется интенсивность светового потока по поверхности лампы. Если экспериментальные данные отсутствуют, то иного варианта, кроме как предположить однородное по площади распределение, нет. Тем не менее, учитывая, что критерий качества для конструкции не является следствием строгих закономерностей, в расчете примем именно это допущение. Излучающую наружную поверхность лампы программа разбивает на четыре части. Поэтому общий световой поток распределяем по этим поверхностям пропорционально их площади. Абсолютная величина светового потока в данной задаче незначима, поскольку нас интересует только распределение светового потока. На рис. 9.184 показан **Sources Editor** (Редактор источников) — таблица с данными об источниках света. Общий световой поток составляет 20 000 лм. Эти параметры будут использоваться в дальнейших расчетах, когда абсолютная величина силы света представляет интерес. Здесь же предположим, что интегральный световой поток равен 1 лм.



	Object Name	Surface Name	Type	Source	Distribution	Total Rays	Min. Rays	Emissivity
1	Лампа_	Surface 1	Flux (lumens)	924	Lambertian	10000		
2	Лампа_	Surface 3	Flux (lumens)	924	Lambertian	10000		
3	Лампа_	Surface 5	Flux (lumens)	46	Lambertian	3000		
4	Лампа_	Surface 7	Flux (lumens)	46	Lambertian	3000		

Рис. 9.184. Редактор источников света

Еще один вопрос, требующий принятия решения, формулируется так: что происходит, если луч света, будучи испущенным с поверхности лампы, отразится от рефлектора так, что попадет обратно на лампу и, взаимодействуя с колбой, окажется внутри нее? Ответ на него является темой для отдельного рассмотрения. Мы же договоримся, что если луч света попадет в колбу, то при взаимодействии с покрытием ее внутренней части он будет рассеиваться по ламбертовскому закону, а также частично поглощаться. Зеркального отражения происходить не будет. Характеристики данной поверхности приведены на рис. 9.185. Они взяты из библиотеки TracePro.

Замечание

Поскольку эффект преломления и объемного поглощения света учитывается только для колбы, то остальные объекты могут иметь как твердотельное, так и поверхностное представление. Исходя из соображений минимизации трудоемкости подготовки исходной геометрии, а также ее модификации, отражатель будем описывать поверхностью, а патрон — твердым телом.

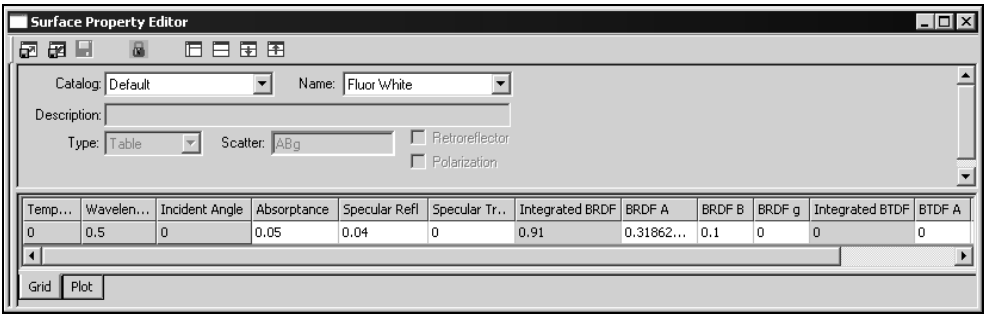


Рис. 9.185. Свойства внутренней поверхности колбы

Настройка вычислительного процесса. Получение оптимального проекта требует большого числа итераций. Относительно высокая точность расчетов необходима по двум причинам. Первая причина очевидна: чем точнее расчет каждого шага — тем точнее решение. Вторая связана с устойчивостью

оптимизационного алгоритма. Принятие решения о том, каким должен быть следующий шаг, базируется на результатах предыдущих шагов (в зависимости от типа алгоритма — всех или какого-либо числа последних). На некотором этапе разница в результатах расчетов становится сопоставима с точностью отдельного шага. Однако, учитывая, что реализация алгоритма оптимизации предполагает вмешательство оператора, не будем слишком привередливы к точности каждого отдельного этапа. Объем вычислений может быть радикально сокращен, если при отображении результатов учесть осевую симметрию, активизировав опцию **Symmetry | Rotational** (Симметрия | Осевая) в окне, определяющем настройки для диаграмм. Еще один фактор — точность всех этапов должна быть одинакова. Практические расчеты показали, что 25—30 тысяч лучей в данной задаче вполне хватит для получения точности, достаточной для работы алгоритма оптимизации.

Решая задачу о взаимодействии луча света с поверхностью, TracePro анализирует геометрические параметры в точке входа/выхода луча. Эта процедура сопровождается тригонометрическими вычислениями. Для ускорения процесса программа (без участия пользователя) делит поверхности на две группы: те, для которых существует аналитическое выражение (плоскости, сферы, цилиндры, параболоиды и т. д.), и сплайновые поверхности. В последнем случае используются численные алгоритмы, которые, разумеется, намного более трудоемки, чем расчеты по формулам. Для уменьшения объема вычислений в TracePro можно использовать алгоритм фасетчатой аппроксимации сплайновых поверхностей. Для его активизации необходимо полю **Raytrace Type** (Тип трассировки), расположенному на вкладке **Advanced** (Расширенные) окна **Raytrace Options** (Параметры трассировки), присвоить значение **Faceted Splines** (Фасетные сплайны).

Очевидно, что такое упрощение вносит определенную погрешность в результат расчета. В конкретной задаче она не превышает нескольких процентов, а ее влияние совершенно несопоставимо с достигаемым эффектом. Получаемое ускорение достигает десяти раз. Понятно, что это явление имеет место только при решении задач, где объекты содержат сплайновые поверхности.

Критерий оптимальности. Формулировка критерия качества проекта в подобных задачах весьма расплывчата: "диаграммы должны быть похожи". Понятно, что их эквивалентности достичь не удастся никогда. Отсюда следует, что нужно формализовать меру "сходства". Примем, что критерием оптимальности является минимум суммы площадей, не принадлежащих одновременно обеим диаграммам изокандел. На рис. 9.186 эти площади выделены более темным цветом. Здесь нужно иметь в виду, что площадь диаграмм (правильнее, площадь, ограниченная кривыми), формируемых программой, для каждого расчета различна. Сравнение же имеет смысл, только если площади одинаковы.

Замечание

Здесь, вообще говоря, присутствуют некоторые нюансы, связанные с оценкой потерь энергии.

Рекомендации по нивелированию этого эффекта приведены ниже.



Рис. 9.186. Минимизируемая площадь на диаграммах изокандел

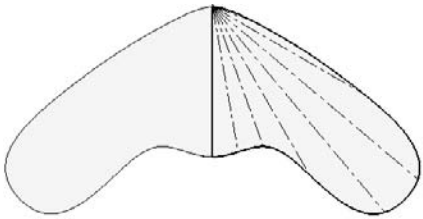


Рис. 9.187. Модель диаграммы изокандел

Интерпретация результатов. К сожалению, TracePro не может выводить диаграммы в виде, пригодном для математического анализа или для экспорта в другие программы. Доступна только картинка, на которой можно идентифицировать значение в произвольной точке. Поэтому, чтобы выполнить какие-либо операции с диаграммой, необходимо воспроизвести ее в виде кривой в одной из программ, поддерживающих обработку графиков. Наиболее эффективно использовать специальные математические программы. Постараемся, однако, не выходить за пределы имеющегося программного обеспечения. В SolidWorks создадим твердотельную модель диаграммы на базе эскиза (рис. 9.187). Сплайн на эскизе проходит через точки, расположенные на лучах, угол между которыми постоянный. В нашем случае он принят равным 10°. Длины лучей-радиусов равны силе света в соответствующих направлениях. Имеем, по сути, кривую в плоских полярных координатах.

Следующий шаг — нормализация площади так, чтобы она была равна какой-либо заданной величине, например 100 мм^2. Используя аппарат конфигураций SolidWorks, создаем варианты диаграмм — "идеальную" и промежуточные, соответствующие различным исполнениям конструкции. Пробная и идеальная диаграммы, площадь которых одинакова (это достигается масштабированием), соединяются в одной детали (рис. 9.187), которая становится объектом для расчета площади граней, не принадлежащих одновременно обеим моделям.

Реализация алгоритма оптимального проектирования. Математическая сторона использованного алгоритма оптимизации была описана ранее.

Примером интеграции алгоритма в расчетную систему является модуль Optimization программы COSMOSWorks. В данном случае интеграция невозможна, поэтому оптимизационный процесс, по сути, является "ручной" реализацией математического алгоритма. Не вникая в подробности математики, последовательность действий пользователя следующая:

1. В SolidWorks формируется параметрическая геометрическая модель диаграммы изокандел.
2. Строится конфигурация, соответствующая "идеальной" диаграмме.
3. Формируется параметрическая модель светильника (рефлектор, лампа, патрон, сборка).
4. Строится конфигурация, соответствующая исходному проекту светильника.
5. Модель сборки передается в TracePro.
6. На базе экспортированной геометрии в TracePro строится оптическая модель исходного варианта светильника.
7. Выполняется ее оптический анализ, выводится диаграмма изокандел исходной модели.
8. Диаграмма изокандел "материализуется" в виде детали SolidWorks (в TracePro с диаграммы снимаются величины силы света в заданных направлениях и переносятся в модель SolidWorks), которая затем масштабируется с получением заданной площади поверхности.
9. Из оптической модели удаляется отражатель, а лампа с патроном возвращается в исходное положение.
10. На основе результатов предыдущих шагов, применяя алгоритм оптимизации, получаем новый пробный проект (диаметры, на которых расположены точки сплайна, и положение источника света).
11. Геометрические параметры пробного варианта вводятся в модель отражателя в SolidWorks с получением новой конфигурации.
12. Отражатель экспортируется в оптическую модель светильника в TracePro, лампа и патрон перемещаются в положение, определяемое новым проектом.
13. Выполняется оптический анализ пробного проекта, выводится диаграмма изокандел.
14. В SolidWorks для детали, имитирующей диаграмму, строится новая конфигурация, в которую переносятся величина силы света в заданных направлениях. Диаграмма масштабируется для получения площади заданной величины.

15. Вычисляется площадь, не принадлежащая одновременно диаграмме "идеальной" и диаграмме для пробной конструкции. Величина площади есть целевая функция.
16. Анализируется сходимость процесса. Если требуемая точность (в простейшем случае — разность между значениями целевой функции на соседних шагах) не достигнута, то возвращаемся на шаг 9.

При реализации алгоритма важным требованием является неизменность параметров оптического анализа, точности расчета (числа лучей), параметров отображения диаграмм изокандел, других настроек на всех этапах расчета.

Внесение изменений в конструкцию

Исходный и условно-оптимальный проекты (форма отражателя и положение источника света) показаны на рис. 9.188. Соответствующие им диаграммы распределения силы света изображены на рис. 9.189 и 9.190.

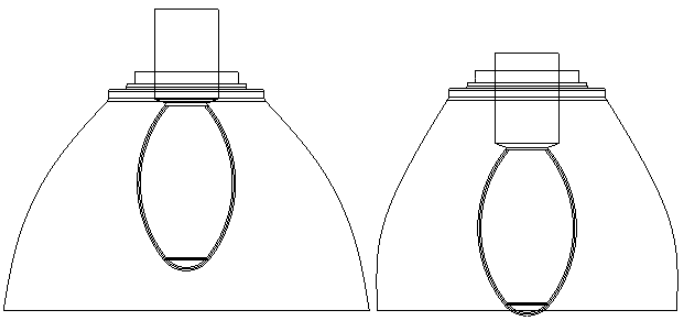


Рис. 9.188. Исходная и модернизированная конструкции

Определенный интерес представляет зависимость целевой функции (напомним, что это площадь "отклонения" диаграммы реальной от диаграммы "идеальной") от номера итерации (в терминах программы COSMOSWorks это **График этапов проектирования** (Design History Graph)). График показан на рис. 9.191. Видно, что разброс величины целевой функции на первых итерациях весьма значителен. Объяснение этому лежит на поверхности: используется метод прямого поиска, где сначала происходит формирование исходного многогранника. Его вершины находятся методом случайного поиска. Поэтому на первом этапе генерируются весьма неочевидные варианты. Первые четыре варианта и соответствующие им диаграммы изокандел показаны на рис. 9.192. Далее, "нащупав" траекторию улучшения, алгоритм "исследует" задачу вполне целенаправленно. В итоге целевая функция уменьшается с 79,2 до 44,8 мм^2.

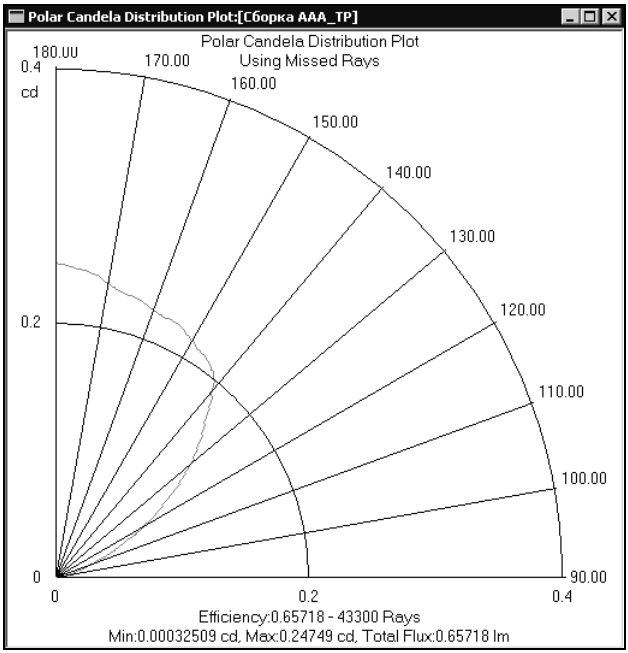


Рис. 9.189. Диаграммы изокандел для исходной конструкции

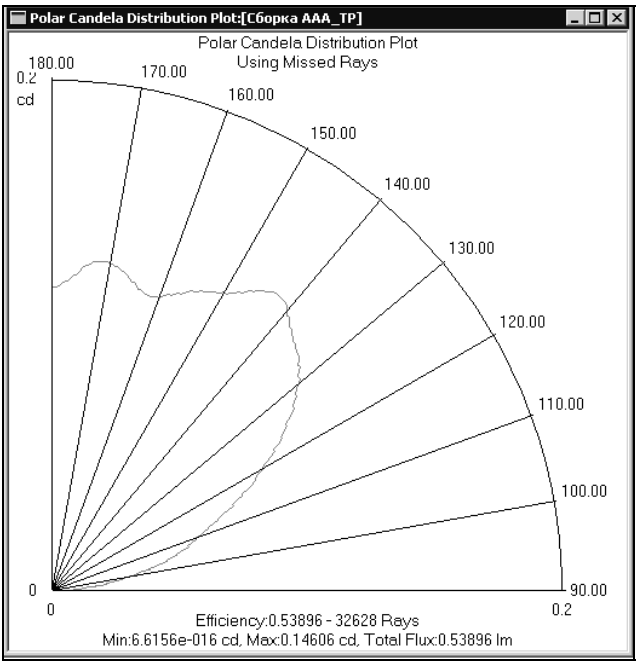


Рис. 9.190. Диаграммы изокандел для модернизированной конструкции

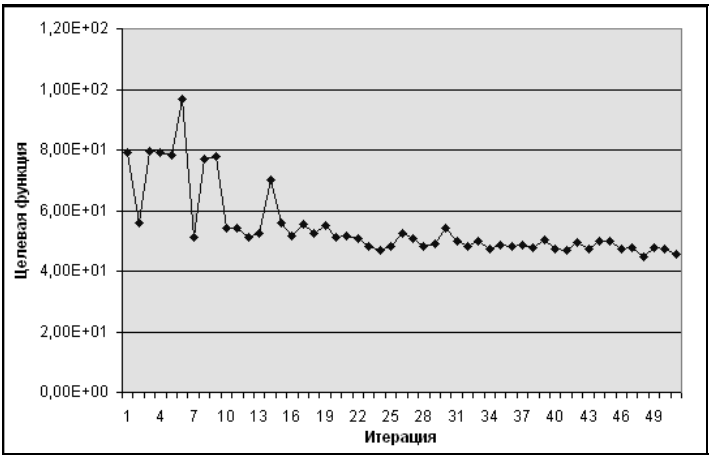


Рис. 9.191. Зависимость целевой функции от номера итерации

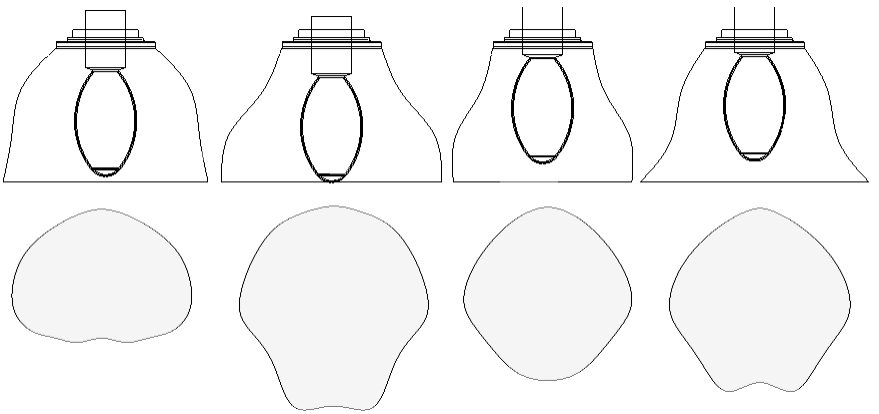


Рис. 9.192. Начальные варианты конструкции и диаграммы силы света

Оценка результатов модификации и прогноз функциональности

Сравнение диаграмм изокандел — "идеальной" и соответствующей условно-оптимальному проекту показывает, что изменения существенно приблизили проект к цели. Достичь же полного соответствия не удалось, причем можно уверенно утверждать, что потенциал данной конструкции исчерпан. Вероятность нахождения существенно лучшего варианта в рамках ограничений рассмотренной схемы ничтожно мала. Необходимо расширить круг поиска, рассматривая варианты с иными источниками света, негладкими поверхностями отражателя, дополнительными отражателями, в том числе встроенными в источник света, и т. д.

Еще один, менее очевидный, вывод — модернизированный вариант обладает заметно меньшим коэффициентом полезного действия. Для простоты анализа световой поток источника был принят равным 1 лм. На отображаемых диаграммах внизу отображается величина светового потока, вышедшего из осветительной системы (**Total Flux**). Для исходного варианта конструкции она составляет 0,657 лм, а для модернизированного — 0,539. Учитывая, что геометрическая модель построена так, что свет может испускаться только через раструб отражателя (между патроном и отражателем зазоров нет), то КПД соответственно равен 54 и 66 %. Причин уменьшения может быть две: в измененной системе свет активнее взаимодействует с отражателем и бóльшая доля светового потока попадает внутрь лампы и поглощается. Первый эффект является очевидной платой за сужение рефлектора и, в общем, неустраним. Второй — негативное следствие модернизации — мы попытаемся нивелировать. Если предположить, что поверхность лампы излучает не по ламбертовскому закону, а нормально поверхности, то значительная доля лучей вернется обратно на лампу. Отсюда следуют два вывода. Первый — что ламбертов закон распределения светового потока, излучаемого поверхностью, в данной ситуации способствует более высокому КПД (это, однако, объективная закономерность и на нее влиять невозможно). Второй вывод — нужно попробовать отклонить лучи, падающие на рефлектор под углом близким к нормали к его поверхности. Одно из решений — превратить поверхность в совокупность рассеивающих отражателей (рис. 9.193). Диаграмма изокандел для такой конструкции приведена на рис. 9.194. КПД увеличился только на 1 %.

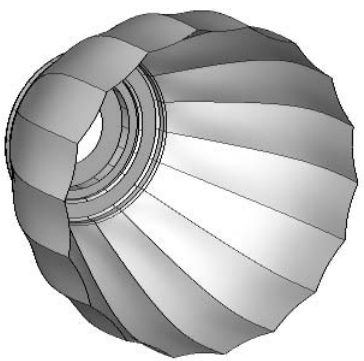


Рис. 9.193. Волнистый рефлектор

Менее трудоемкое, но несколько более действенное решение — увеличить рассеивающие свойства поверхности гладкого отражателя. Соответствующая диаграмма распределения силы света показана на рис. 9.195. КПД относительно "более" зеркальной поверхности увеличился на 2 %. При этом диаграмма изокандел приблизилась к искомой. Количественная оценка этого

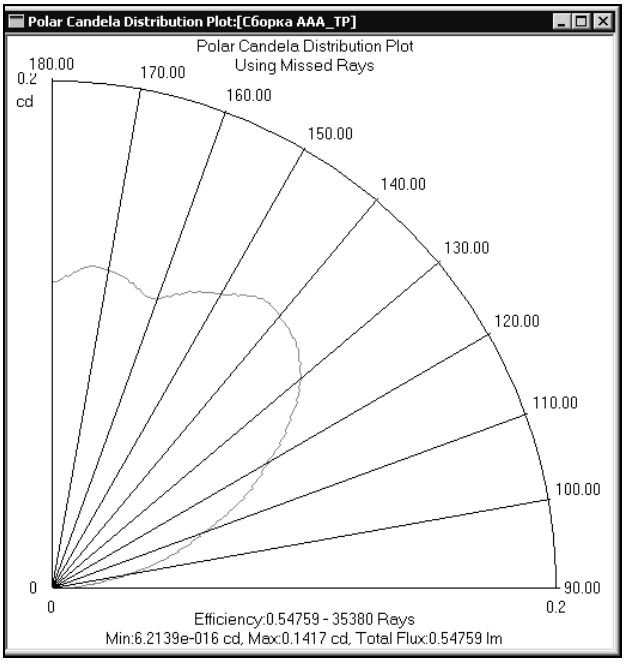


Рис. 9.194. Диаграмма изокандел для волнистого рефлектора

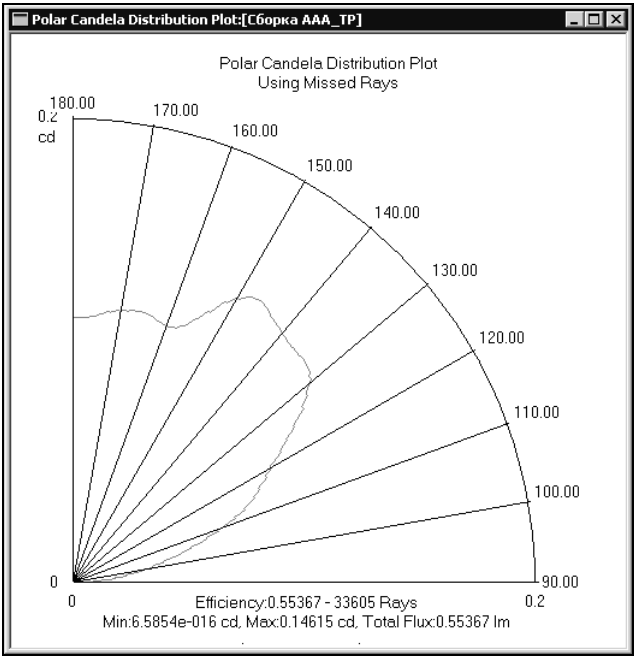


Рис. 9.195. Диаграммы изокандел для рефлектора с рассеивающей поверхностью

приближения — величина целевой функции. Она равна 42,0 мм^2, что на 2,8 мм^2 меньше, чем для рефлектора с менее рассеивающей поверхностью.

Выводы

Рассмотренная задача является показательным примером того, как можно изменять конструкцию посредством формальных процедур оптимального проектирования. Она же иллюстрирует тезис, что математические алгоритмы не всегда могут подменить творчество конструктора. К сожалению, описанная реализация алгоритма, требуя постоянного участия оператора, обладает высокой трудоемкостью и непригодна для решения задач даже с относительно малым — более 5—7 — числом переменных проектирования.

Что же касается использования инструментов оптимального проектирования при разработке светотехники, то параметризации может, как правило, подвергаться только геометрия. Включить, например, в число варьируемых переменных характеристики поверхности (поглощения, отражения, рассеяния) в принципе можно. Недостаток же один — реализовать объект с заданными свойствами крайне трудно.

9.6.2. Оптимизация освещенности плоской поверхности

Имея светотехническую модель светильника, решим задачу расстановки приборов с целью создания комфортной освещенности некоторой плоской поверхности.

Постановка задачи

Типовая задача светотехники — расстановка светотехнического оборудования с целью создания заданной освещенности неких областей. Как правило, нормируется минимальная освещенность в заданных точках или в пределах некоторой области. При этом могут назначаться два критерия: заданная величина освещенности на площадках, перпендикулярных к направлению на источник или группу источников света, сосредоточенных в некотором месте; или освещенность, нормальная к рабочей поверхности. Иногда ограничения накладываются на максимальную освещенность. И — несколько реже — два этих критерия выдвигаются одновременно. Исходя из здравого смысла, а также с учетом эргономики, во многих ситуациях освещенность должна быть как можно более равномерной. Сформулируем задачу так, чтобы максимально вычленить сущностные моменты.

Будем исследовать вопрос о том, как изменяется распределение освещенности плоской поверхности (будем считать, что это пол) светильниками, распо-

ложенными на другой плоскости (потолке) в зависимости от их размещения. Расстояние между полом и потолком — 4 метра. Ось светильника расположена вертикально. Световой поток, излучаемый лампой, — 20 000 лм. Поглощение при взаимодействии света с отражателем и лампой приводит к тому, что на выходе из светильника световой поток уменьшается до 11 000 лм. Между светильниками и полом никаких объектов нет. Взаимодействие света со стенами не учитывается.

Анализ

При постановке задачи вопрос о том, как светильники располагаются на потолке, не конкретизировался. Можно предположить, что наиболее однородная освещенность достигается, если приборы располагаются на треугольной сетке. Мы не будем этот факт доказывать, однако в качестве аргумента укажем, что если принять расстояние между светильниками 1 000 мм, то в треугольной сетке (где треугольники, разумеется, равносторонние) наиболее удаленная от источников точка — центр тяжести фигуры — будет находиться на расстоянии 577 мм, а в квадратной сетке — на 707 мм. Эти расстояния измеряются в плоскости фигур. Понятно, что если точки измерения расположены вне плоскости источников, то неравномерность освещенности областей, расположенных под светильниками и между ними, нивелируется, но — в актуальном диапазоне высот помещения — не исчезают.

Поскольку нас не интересует влияние стен и, вообще, размеров помещения, то простейший выход — разместить "много" светильников. Тогда на некотором расстоянии от границ области, в которой они расположены, "краевым эффектом" можно будет пренебречь. Мы не будем пытаться прогнозировать ширину этой зоны — на диаграмме освещенности она выделяется элементарно.

С учетом сказанного, можно было бы сформулировать задачу оптимального проектирования в том смысле, какой она имела в предыдущем разделе: минимизировать различие освещенности в пределах некоторой области при ограничении на ее минимальное значение. Единственная переменная проектирования — размер ячейки треугольной сетки. Практический же смысл такого поиска весьма сомнителен. Поэтому ограничимся расчетом и сравнением нескольких вариантов.

Еще один момент — какую освещенность оценивать? Как упоминалось, это может быть освещенность площадок, нормальных источнику света, или собственно освещенность пола. Первый вариант актуален, когда источники света сосредоточены вблизи наблюдателя, а дистанция до освещаемой области существенно больше, чем расстояние между светильниками. Понятно, что этот подход в описанной задаче неработоспособен. Источников много, они рассредоточены в пространстве, а наблюдатель не может находиться на потолке.

Поэтому будем принимать во внимание исключительно освещенность пола как горизонтальной плоскости.

Подготовка расчетной модели

Расчетная модель сцены включает в себя два компонента: собственно источники света и их позиционирование относительно пола. Очевидное, на первый взгляд, решение: вставлять в сцену "подлинные" геометрические модели светильников (разработка которых описана в предыдущем разделе) приводит к негативным последствиям. Первое — рост требуемой памяти из-за того, что программа должна обрабатывать много объектов (светильников несколько десятков), что порождает большое число лучей, траектории которых нужно запоминать. Это сопровождается ростом объема вычислений (задача решается для каждого светильника заново), что делает невозможным интерактивный подбор лучших вариантов. Частично уменьшить эти затруднения можно, подобрав настройки вычислительного процесса. Первая из них должна нивелировать тот факт, что отражатель образован сплайновой поверхностью, а это увеличивает объем математических вычислений. Здесь, как и в задаче оптимизации формы отражателя, сплайн аппроксимируем гранной (иначе говоря, фасетной) поверхностью — для опции **Raytrace Type** (Тип трассировки) выбрано значение **Faceted Splines** (Кусочные сплайны) (рис. 9.196).

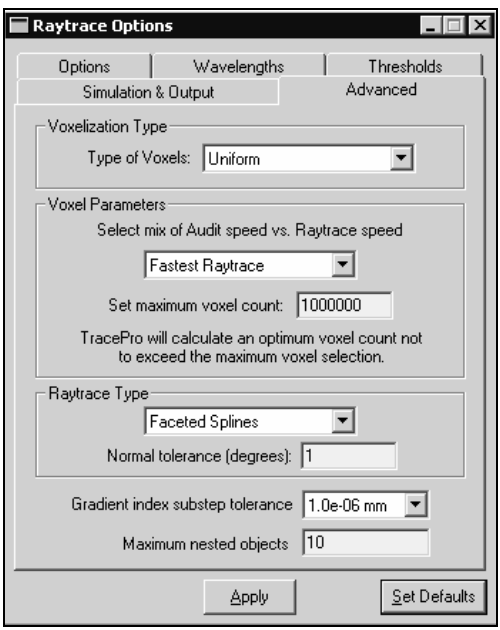


Рис. 9.196. Настройки, оптимизирующие расчет больших моделей

Отвлекаясь на время от задачи, отметим, что использование этой опции приводит и к нежелательным побочным эффектам. Если поверхностей, которые требуют преобразования, много (несколько сотен), а число лучей, которые попадают на каждую из них, невелико (несколько десятков), то время на пересчет геометрической модели может нивелировать эффект от экономии в процессе вычислений. Данная ситуация имеет место при расчете изделий автомобильной светотехники типа тормозных фонарей, задних противотуманных и габаритных огней.

Остается другая проблема: большое различие размеров пола и деталей лампы. Одной из фундаментальных основ TracePro является разбиение пространства, занимаемого объектами, на воксели (Voxel). Они могут располагаться равномерно (полю **Type of Voxels** присвоено значение **Uniform**) или же с переменной плотностью по октаэдрической схеме (для **Type of Voxels** выбрано значение **Octree**). Соответствующая совокупность параметров показана на рис. 9.197. Эти настройки в значительной степени нивелируют описанные проблемы, ускоряя расчет. В предельном случае, когда единичный "подлинный" светильник освещает удаленный объект больших размеров, время счета отличается в 5—7 раз.

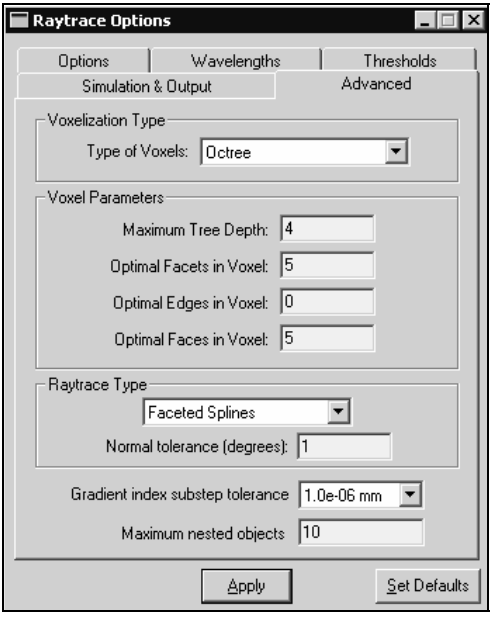


Рис. 9.197. Настройки для переменной плотности вокселизации

Радикальное же решение проблем лежит в другой плоскости. Необходимо заменить детализированный источник света его обобщенным описанием. Оно

представляет собой совокупность лучей, прошедших через некий объект, внутри которого располагается их источник. Последовательность создания источника света такая:

1. В модель, содержащую источник, вставляется объект, этот источник охватывающий. Один из вариантов — сферическая поверхность.
2. Выполняется трассировка лучей (рис. 9.198).

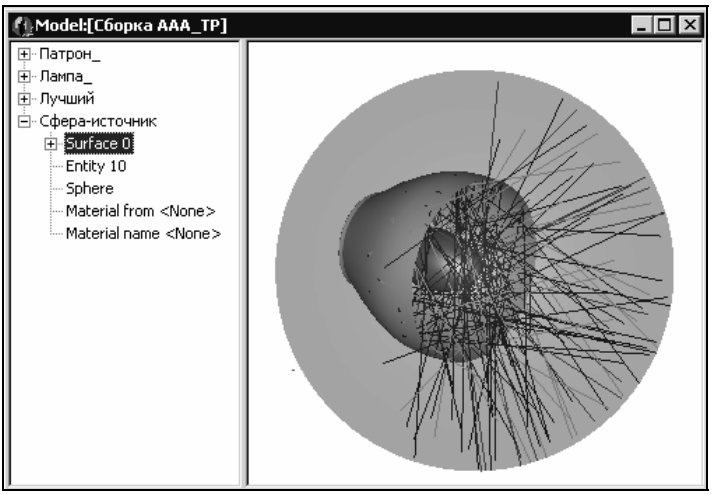
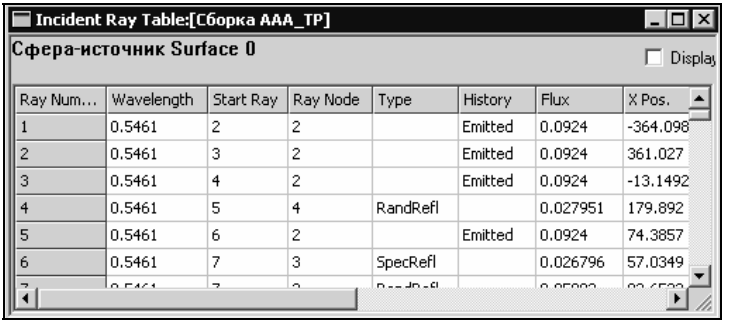


Рис. 9.198. Лучи, отсортированные по критерию вхождения во вспомогательную сферу

3. Отображаются только те лучи, которые достигают введенной выше поверхности (**Analysis** | **Ray Sorting** | **Sort Type** | **Selected Surface**). Следует учитывать, что лучи, которые будут трассироваться в модели реальной и дойдут до поверхности, сохранятся и в модели виртуальной.
4. Формируется таблица, содержащая выделенные лучи (**Analysis** | **Incident Ray Table**) — рис. 9.199.



Ray Num...	Wavelength	Start Ray	Ray Node	Type	History	Flux	X Pos.
1	0.5461	2	2		Emitted	0.0924	-364.098
2	0.5461	3	2		Emitted	0.0924	361.027
3	0.5461	4	2		Emitted	0.0924	-13.1492
4	0.5461	5	4	RandRefl		0.027951	179.892
5	0.5461	6	2		Emitted	0.0924	74.3857
6	0.5461	7	3	SpecRefl		0.026796	57.0349

Рис. 9.199. Таблица входящих лучей

5. Командой **File** | **Save As** вызывается окно **Save Incident Ray Data** (рис. 9.200). Поля в окне настраиваются так, чтобы записанный файл можно было использовать в качестве источника света в TracePro.

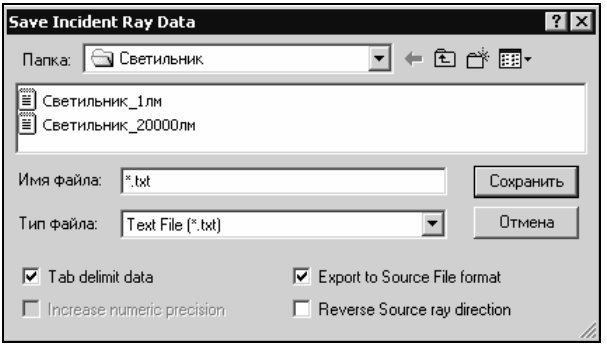


Рис. 9.200. Запись информации о входящих лучах в формате источника света

Вставка источника в модель сцены производится командой **Insert** | **Source**. Возникающее окно (рис. 9.201) содержит поле, в которое прописывается путь к файлу источника. Одновременно можно ввести **Center Position** (Положение центра) и **Rotation** (Ориентация) объекта. Впрочем, эти параметры всегда можно изменить.

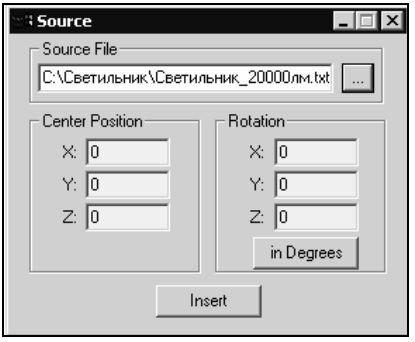


Рис. 9.201. Окно **Источник**

В итоге получаем модель сцены, для которой можно выполнить трассировку лучей (рис. 9.202).

Эта условность позволяет сократить требуемую память в несколько раз, время расчета — в десятки. Однако при наличии всего нескольких десятков светильников подобные задачи, не отличаясь высокой сложностью, требуют для модели с "подлинными" источниками несколько гигабайт оперативной памяти. При этом обеспечивается только минимально необходимая точность ана-

лиза. Сравнить результаты расчета освещенности по двум моделям: "подлинной" и "облегченной" можно по рис. 9.203 и 9.204.

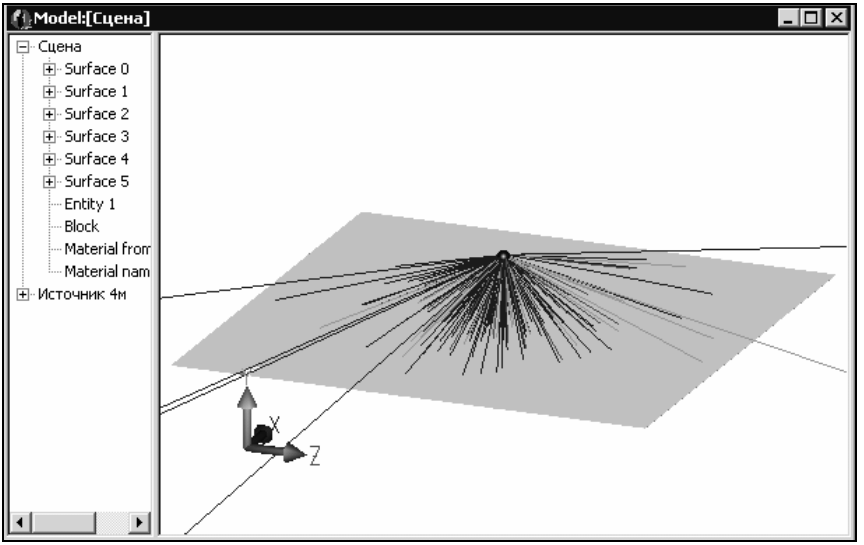


Рис. 9.202. Сцена, содержащая имитатор источника света

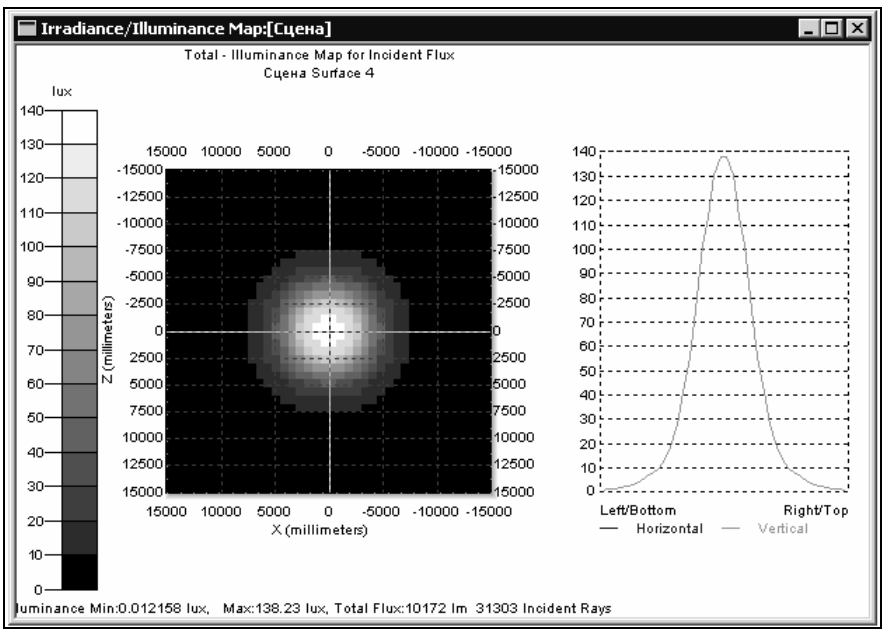


Рис. 9.203. Освещенность пола при освещении "подлинным" светильником

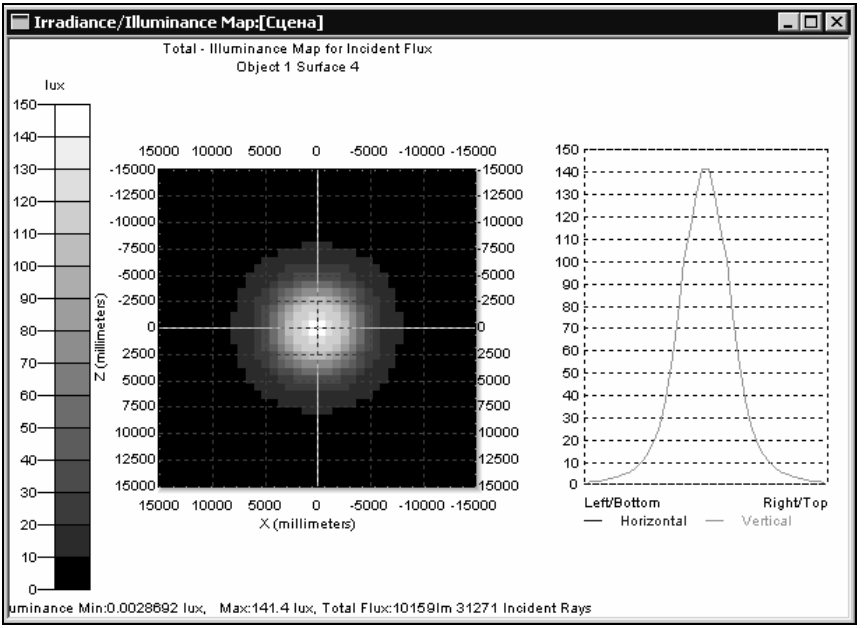


Рис. 9.204. Освещенность пола при освещении имитаций источника

Еще один способ сократить память для хранения траекторий лучей — расчет в режиме **Simulation Mode** (Симуляция). Его особенность состоит в том, что в процессе трассировки запоминаются только те лучи, которые достигают заданных поверхностей. Это не позволяет формировать диаграммы изокандел, отображать лучи — доступны будут только картины освещенности назначенных поверхностей. Однако изоляция "бесполезных" лучей, даже в конкретном, не самом показательном примере, уменьшает затраты памяти почти в два раза.

Если для некоторой поверхности активизирована опция **Exit surface** (Поверхность выхода) — рис. 9.205, то лучи, ее достигшие, будут участвовать в анализе. Далее активизируется опция, управляющая тем, что последующий расчет будет выполняться в режиме симуляции: **Analysis** | **Simulation Mode** (рис. 9.206). После подачи команды на расчет — **Analysis** | **Source Raytrace** — возникает панель с предупреждением об ограничениях функциональности (рис. 9.207).

Простота геометрии объектов формируемой сцены позволяет создавать их непосредственно в программе TracePro. Пол можно создать командами **Insert** | **Primitive Solid** | **Block** (Вставка | Элементарное тело | Параллелепипед) или ... | **Thin Sheet** (Тонкий лист). В первом случае это будет пространственное тело, во втором — плоская прямоугольная поверхность. С вычисли-

тельной точки зрения оба варианта равноценны. Светильник заменяется его имитацией, после чего размножается командами из окна **Edit** | **Object** | **Move** (рис. 9.208). В нем доступны две операции: **Apply** (Применить) и **Copy** (Копировать). Размещая объекты-источники на некоторой сетке, можно сначала последовательно скопировать их для получения ряда, а затем, используя групповой выбор объектов клавишами <Ctrl> или <Shift>, скопировать ряды. Так получены расчетные модели сцен с расстоянием между центрами источников 5,8; 8,7 и 12,6 м (рис. 9.209). Число источников подбиралось из условия, чтобы в центре пола существовала зона, свободная от влияния краевых эффектов. То есть картина освещенности была тождественна той, которая имела бы место при бесконечном числе светильников в каждом направлении.

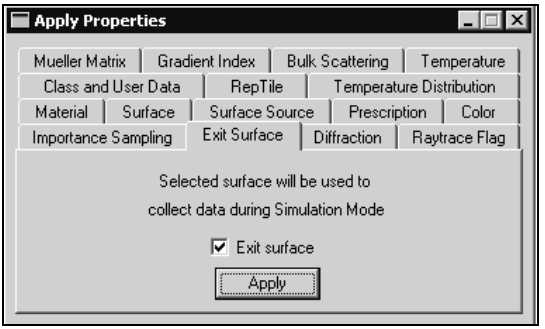


Рис. 9.205. Выбор поверхности для включения в режим симуляции

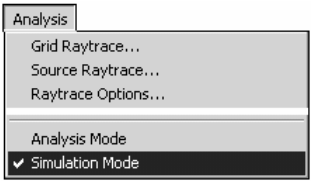


Рис. 9.206. Активизация режима симуляции

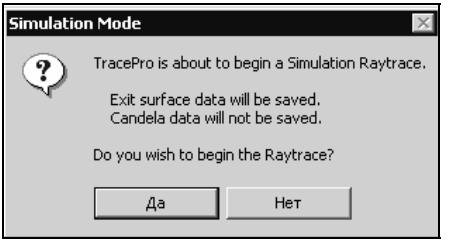


Рис. 9.207. Предупреждение об ограниченной функциональности режима симуляции

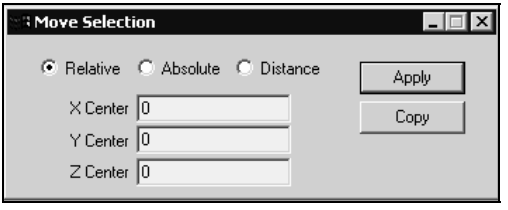


Рис. 9.208. Окно с командами перемещения/копирования объектов

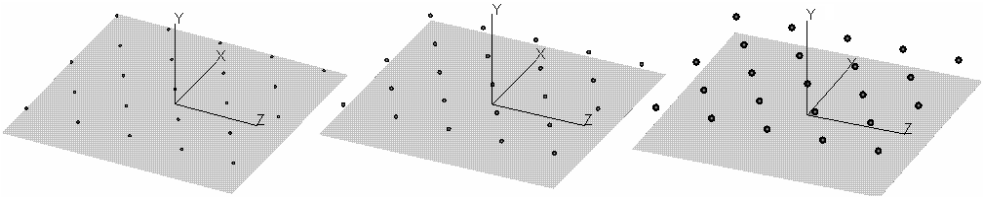


Рис. 9.209. Расчетные модели сцен с различным расстоянием между источниками

Вычислительный процесс

Оптимизация расчетной модели позволяет за несколько минут рассчитывать сцену, содержащую 20—30 источников с суммарным числом лучей более 500 000. При этом требуемая оперативная память не превышает 500 Мбайт, а время решения — нескольких минут. Это позволяет осуществлять анализ результатов и модификацию модели в режиме, близком к интерактивному.

Оценка результатов

Поскольку алгоритмическая оптимизация не используется, рассчитаем несколько моделей, отличающихся различным расстоянием между светильниками. Затем подберем параметры отображения диаграмм освещенности (**Analysis** | **Irradiance/Illuminance Options**) так, чтобы соблюсти компромисс между степенью подробности кривых и точностью, обеспечиваемой имеющимся числом лучей. Окно показано на рис. 9.210. Обратим внимание на величину **Map Count** (Плотность диаграммы) и параметр **Smoothing** (Сглаживание). Последний отключаем, поскольку, если он активен, то из-за сглаживания можно упустить значимые изменения освещенности. Рассматриваемая нами площадка ограничена, поэтому вносимая погрешность может оказать влияние даже на ситуацию в центре диаграммы. Также активизируем опцию **Symmetry** (Симметрия), выбирая значение **Quadrant** (Квадрант). Она учитывает наличие симметрии картины освещенности относительно двух перпендикулярных плоскостей, каждая из которых, в свою очередь, ортогональна плоскости пола. Последнее — при равном числе лучей — существенно увеличивает достоверность отображаемых картин.

Результаты для сцен с шагом между источниками 5,8; 8,7 и 12,6 м (соответствующие модели приводились ранее) показаны на рис. 9.211—9.213 соответственно. Выработаем критерии качества для оценки проекта с точки зрения эргономики:

- чем ближе минимальная освещенность к некоторой заданной величине, тем лучше;
- чем меньше разница между максимальной и минимальной освещенностью, тем лучше.

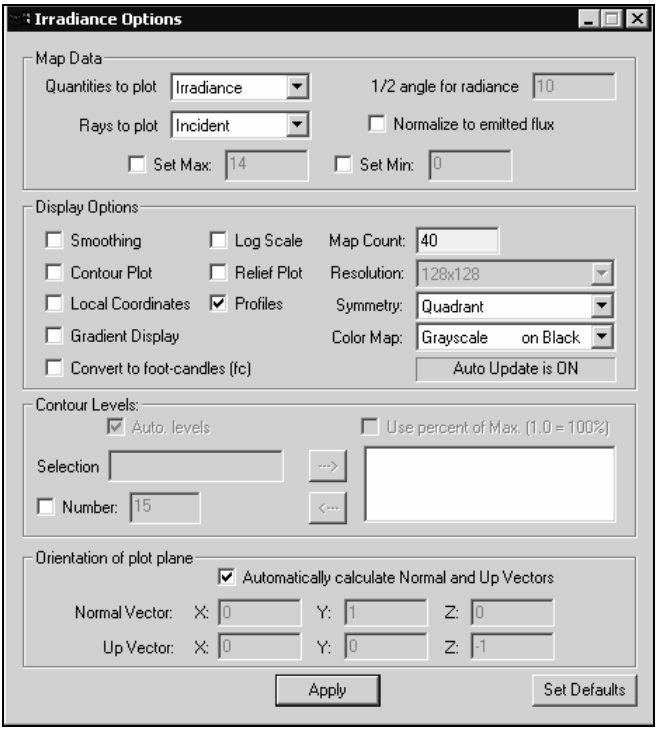


Рис. 9.210. Окно с параметрами отображения диаграммы освещенности

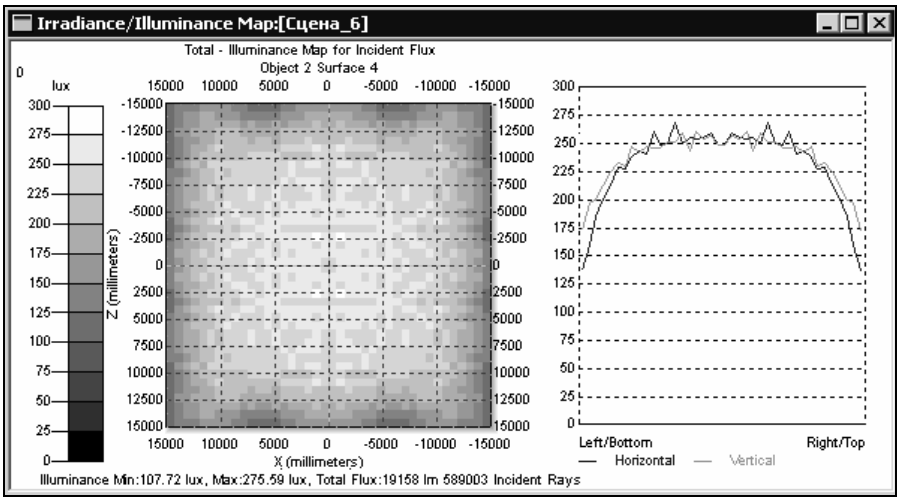


Рис. 9.211. Освещенность пола при расстоянии между источниками 5,8 м

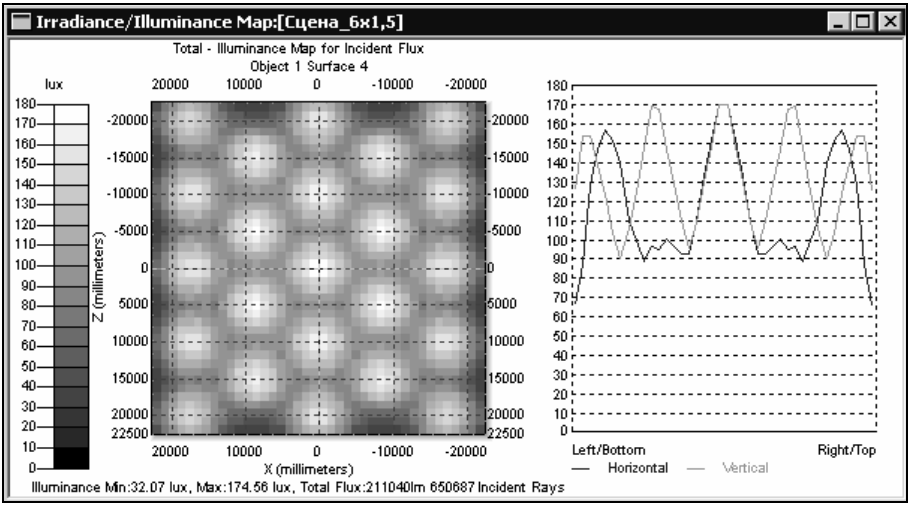


Рис. 9.212. Освещенность пола при расстоянии между источниками 8,7 м

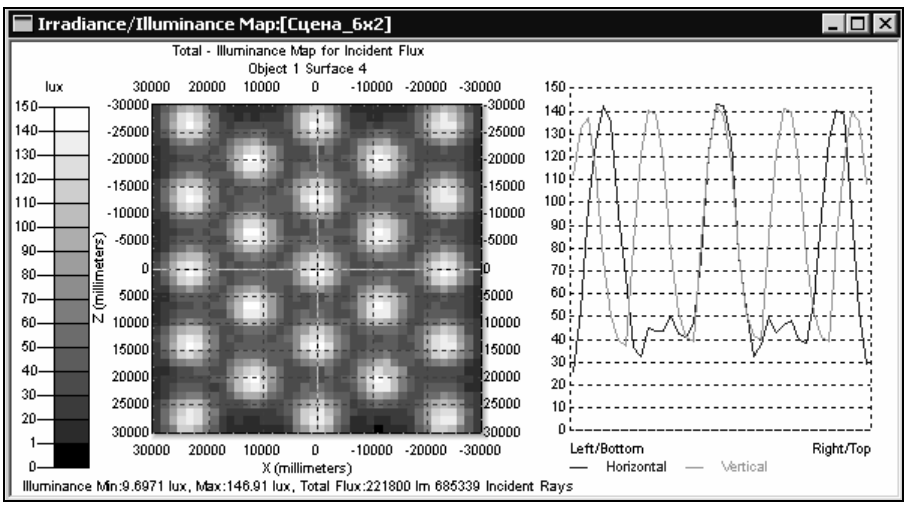


Рис. 9.213. Освещенность пола при расстоянии между источниками 12,6 м

Рассматривая диаграммы, приходим к выводу, что при увеличении расстояния между светильниками максимальная освещенность уменьшается. При этом на начальном этапе максимум локализован между светильниками. С увеличением расстояния он смещается под светильник. Минимальная освещенность уменьшается, причем разница между максимальной и минимальной освещенностью возрастает при удалении источников света друг от друга: при 5,8 м они практически одинаковы, при 12,6 м — они отличаются более чем в три раза.

Попытаемся систематизировать сведения о зависимости освещенности от расстояния между светильниками. Мы пришли к выводу, что средняя по объекту и, тем более, максимальная освещенность не являются исчерпывающими характеристиками проекта. Создадим диаграмму, отобразив на ней две кривых: соответствующую освещенности непосредственно под светильником и под точкой, находящейся в середине между светильниками (рис. 9.214). При достаточно малом расстоянии освещенность между светильниками больше, чем непосредственно под ним. Если увеличивать расстояние, то освещенность уменьшается достаточно быстро и, начиная с некоторого момента, ее максимум смещается под источник. После этого наибольшая освещенность стабилизируется, приближаясь асимптотически к той, которая создается под изолированным светильником — в нашем случае это порядка 140 люкс. Понятно, что минимальная освещенность будет стремиться к нулю. Нужно отменить, что расстояние между светильниками, при котором освещенность вне зоны краевого эффекта постоянна, не зависит от интегральной силы света источника. Это есть исключительно функция расстояния от светильников до объекта и, преимущественно, — распределения силы света. В начале кривой есть участок, где диапазон флуктуации освещенности в пределах рабочей зоны достаточно мал. При этом расстояние между светильниками имеет вполне приемлемую величину.

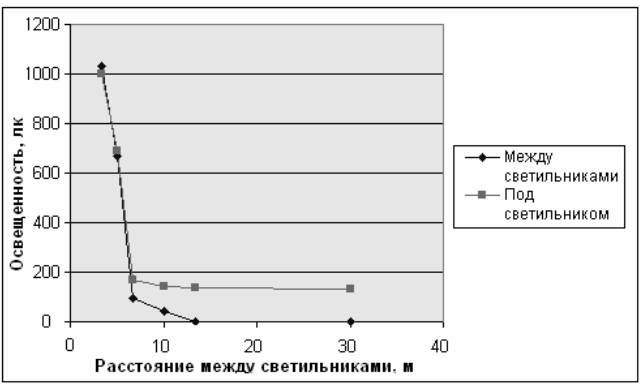


Рис. 9.214. Освещенность между и под светильниками в зависимости от расстояния между ними

Можно модифицировать диаграмму, взяв в качестве ординаты площадь, приходящуюся на один светильник (рис. 9.215). В соответствии с ожиданиями начальный участок диаграммы стал более крутым. Причина — при увеличении расстояния между светильниками площадь, освещаемая (условно) каждым из них, растет квадратично, а средняя освещенность, соответственно, уменьшается. Такого типа графики полезны для оценки числа устройств, потребных для освещения заданной площади.

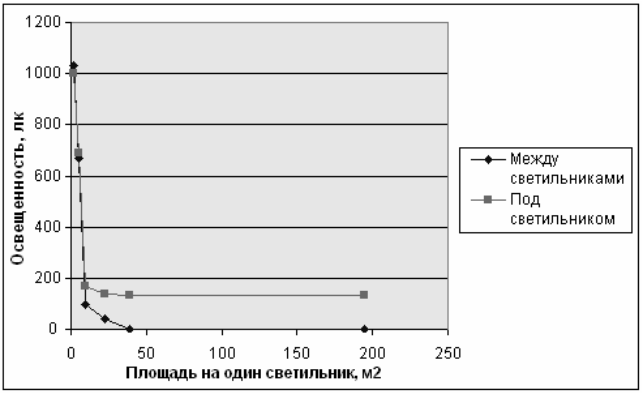


Рис. 9.215. Освещенность между светильниками и под ними в зависимости от площади, приходящейся на один светильник

Выводы

Рассмотренная задача демонстрирует два момента. Первый связан с тем, как можно подбором рациональной вычислительной модели и настроек программы критически уменьшить размерность задач, в которых имеется множество источников света. Она становится доступной для решения на персональных компьютерах "средней" мощности. Источники, разумеется, должны иметь существенно неоднородное распределение силы света. Также задача есть характерный пример того, как можно получить детальную картину освещенности объектов (не только плоских) на базе информации о характеристиках светильников, а на базе этих результатов — эмпирические зависимости, которые можно использовать в отсутствие программы TracePro.

9.6.3. Модификация конструкции с учетом светотехнических параметров

Рассмотрим задачу модификации изделия с целью удовлетворения заданным светотехническим параметрам[1]. Ее ключевая особенность в том, что проблема не имеет строгого математического решения, а эвристический алгоритм характеризуется высокой степенью неоднозначности.

Постановка задачи

Конструкция автомобильного прикуривателя показана на рис. 9.216 и 9.217. Он состоит из корпуса, изготовленного из прозрачной пластмассы (поликар-

[1] Конструкция прикуривателя является разработкой ЗАО "Старооскольский завод автотракторного оборудования". В данном разделе использованы материалы, полученные при содействии сотрудника ЗАО СОАТЭ Харебина Е. В.

боната), собственно прикуривателя (в модели он заменен цилиндром с отбортовкой), патрона с лампочкой и непрозрачного кожуха, надеваемого на корпус. Прикуриватель вставляется в круглое отверстие в приборной панели. Диаметр отверстия несколько меньше наружного кольца, которое остается видимым из салона автомобиля.

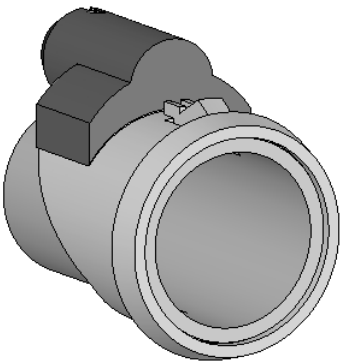


Рис. 9.216. Конструкция прикуривателя — аксонометрия

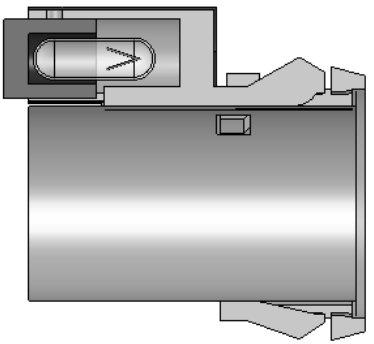


Рис. 9.217. Конструкция прикуривателя — фронтальный разрез

Проблема состоит в том, что яркость наружного кольца в исходном варианте изделия имеет существенную неравномерность. Различие в яркости между верхней и нижней зонами достигает 20-ти раз. Технические требования регламентируют определенное соотношение между яркостью зоны вверху кольца и точками, расположенными внизу под углом ±15° к вертикали. Необходимо изменить конструкцию корпуса так, чтобы яркость в нижней части была не меньше, чем яркость в верхней. При этом минимально допустимая яркость в нижних точках известна. С эстетической точки зрения желательно, чтобы яркость по окружности кольца изменялась достаточно плавно. Модификация корпуса не должна нарушать существующую схему разъема пресс-формы, а также требовать изменения геометрии металлических деталей конструкции. Кроме того, достаточно жесткие ограничения накладываются на габаритные размеры детали. В частности, размеры наклонной части в осевом направлении не должны увеличиваться.

Анализ

Описанная задача не имеет единственного решения. Поэтому однозначный алгоритм, позволяющий улучшить проект, отсутствует. Здесь можно использовать два подхода. Первый — радикально переработать геометрию для удовлетворения светотехническим требованиям. Второй — метод последовательной модификации объекта с приближением к заданным условиям. В силу

имеющихся ограничений, а также приоритета функциональности над эстетикой традиционно используется метод "доводки".

Очевидно, что, приступая к поиску вариантов, нужно выделить управляющие параметры. На величину и распределение яркости на наружном кольце влияет ряд факторов:

- геометрия корпуса — световой поток достигает заданной области на кольце после того, как отразится от поверхности корпуса или от металлического цилиндра внутри него. При взаимодействии с поверхностями, а также при прохождении внутри пластмассы световой поток рассеивается. Такой эффект приводит к тому, что заданных точек могут достичь лучи, не направленные непосредственно "в" них. Соответственно, чем дальше от источника света находится контрольная точка, тем меньше доля светового потока, который на нее попадает. При этом потери энергии растут быстрее, чем расстояние. Учитывая, что даже при отсутствии потерь зависимость падения освещенности объекта (для неколлимированного светового пучка) от дистанции может быть квадратичной, то управление освещенностью объектов, по-разному удаленных от источника, достаточно сложная проблема. Форма корпуса оказывает влияние на распределение световых потоков различными способами: собственно расстоянием от заданного объекта до источника, наличием совокупности отражающих или преломляющих поверхностей. При определенной ориентации поверхностей может достигаться эффект полного внутреннего отражения (характерный пример — световоды), что создает возможность направлять достаточно интенсивные световые потоки в заданные области;
- оптические характеристики материала и примыкающих объектов — параметры материала, влияющие на распределение света, делятся на две группы. Первая — свойства собственно вещества: параметры поглощения и рассеяния света при прохождении его в материале. Единственный доступный в конкретной ситуации способ управления этими характеристиками — изменение объемной доли красителя в пластмассе. Как представляется, ее увеличение подавляющим образом сказывается на потерях энергии, не влияя на рассеяние. Это значит, что увеличение процентного содержания красителя приводит исключительно к уменьшению яркости анализируемой поверхности, при этом (с учетом большего количества отражений на поверхностях, сопровождаемых рассеянием и поглощением) чем дальше от источника света находится точка измерений, тем меньше величина попавшего на нее светового потока и тем больше уменьшение яркости. Вторая группа характеристик — те, которые связаны со свойствами поверхностей. Как упоминалось, взаимодействие светового потока с поверхностью сопровождается преломлением, отражением, рассеянием и поглощением энергии. Если свет падает на поверхность из воздуха, то

увеличение доли рассеяния и поглощения приводит к тому, что внутрь (для одного и того же угла падения) попадает меньше энергии. Если же луч выходит из среды в воздух, то — для идеально гладкой поверхности — возможно преломление (с выходом светового потока в воздух) или полное внутреннее отражение (это зависит от угла падения и коэффициента преломления материала — чем он больше, тем больше угол падения луча, при котором достигается полное внутреннее отражение). Поэтому если геометрия такова, что происходит полное внутреннее отражение, то увеличение шероховатости поверхности приводит к уменьшению доли светового потока в направлении, которое соответствует идеальному отражению. Если же полного внутреннего отражения нет, то увеличение рассеяния приводит к тому, что свет на шероховатой поверхности возвращается внутрь нее в большей степени. Также на распределение светового потока оказывает влияние металлический цилиндр прикуривателя. Взаимодействие света с его поверхностью сопровождается частичным отражением и рассеянием;

- параметры источника света — поскольку источник света задан, то главным управляющим параметром является его расположение источника света. Однако перемещение лампы может привести к существенной переработке конструкции. Естественно, остаются и другие степени свободы: собственно сила света источника и характеристики распределения излучаемого им светового потока. Мощность лампы никак не влияет на траектории световых лучей. Что же касается распределения силы света, то, поскольку изделие не является оптическим прибором, то должны использоваться вполне стандартные лампы, вписывающиеся в заданные габариты.

Алгоритм решения

Подготовка данных о свойствах материалов. Исходный вариант изделия сопровождается полной информацией о геометрии. Однако сведения о характеристиках пластмассы как "абстрактного" материала, так и данные, учитывающие особенности конкретной технологии, являются неполными. Единственной достоверной характеристикой, имеющейся в справочниках, является коэффициент преломления. В некоторых источниках можно найти коэффициент поглощения (пропускания). Однако его величина, как правило, приводится в процентах без указания базы (толщины образца), для которой она измерена. Окна с назначенными для пластмассы оптическими параметрами приведены на рис. 9.218. Для промежуточных проектировочных расчетов будем использовать материал с несколько меньшим (0,015 мм) поглощением без рассеяния. В этом случае более наглядно проявляется эффект изменений, вносимых в конструкцию.

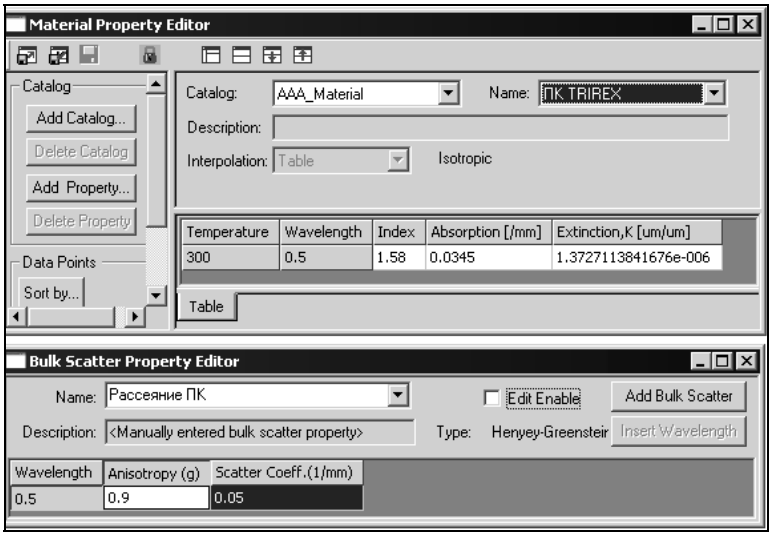


Рис. 9.218. Оптические характеристики пластмассы

Для управления светотехническими параметрами используется поверхность типа "шагрень", которая увеличивает рассеивающие свойства. Экспериментальные оптические характеристики таких объектов неизвестны. Для пластмасс также недоступна объективная информация о влиянии объемной доли красителя на поглощение света.

По упомянутой причине был проведен подбор характеристик, определяющих рассеяние и поглощение света при его прохождении в материале пластмассы, а также при взаимодействии с поверхностью. В последнем случае рассматривались следующие виды поверхностей:

- гладкая поверхность пластмассы — принято, что она не обладает рассеивающими свойствами и не поглощает свет;
- поверхность пластмассы под шагрень — принято, что поверхность не поглощает свет. Параметры рассеяния (ориентировочная оценка) приведены на рис. 9.219;
- металлическая поверхность прикуривателя — при взаимодействии света с поверхностью происходит поглощение, зеркальное отражение и рассеяние (рис. 9.220).

Подготовка расчетной модели. Геометрическая модель выполняется в SolidWorks, после чего передается в TracePro в формате STEP. Модель содержит объекты, влияющие на светотехнические параметры:

- источник света, состоящий из спирали и колбы — колба моделируется твердотельным объектом. В качестве материала принимаем оптическое



Рис. 9.219. Оптические характеристики шагрени

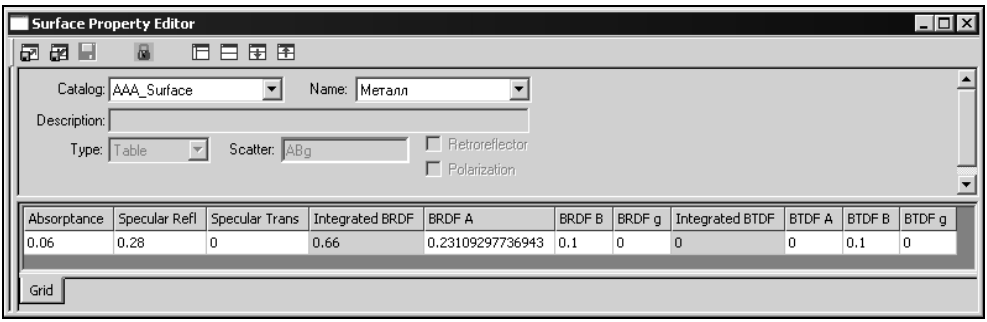


Рис. 9.220. Оптические характеристики поверхности металлического цилиндра

стекло. Спираль имеет V-образную форму и образована двумя пересекающимися цилиндрами. Спираль моделируем совокупностью поверхностей, назначая им свойства абсолютного поглощения. Сила света, излучаемого спиралью — 8 лм;

- корпус подсветки представляет собой пространственный объект, при этом его поверхность состоит из участков, имеющих различные в общем случае оптические характеристики;
- патрон лампы и кожух, частично закрывающий корпус в зоне лампы — первый моделируется как непрозрачный твердотельный объект. Вторая деталь строится как совокупность поверхностей, для которых также назначаем свойство абсолютного поглощения;
- прикуриватель — имитируется поверхностью, описывающей наружный контур. Параметры поверхности приведены ранее;
- автомобильная панель — представляем ее как поверхность кольцевой формы, назначая ей свойство абсолютного поглощения.

Настройка вычислительного процесса. Поскольку главная цель данной задачи — проектирование, то необходимо искать компромисс между двумя

противоречивыми требованиями. С одной стороны, большая точность вычислений приводит к более аргументированным выводам о способах изменения конструкции, с другой — чрезмерный интервал между вариациями делает процедуру проектирования крайне неудобной. Еще один фактор — при сравнении различных вариантов точность расчета для всех должна быть одинакова. Поскольку в искомые точки приходит крайне незначительная доля лучей, испускаемых источником, минимально необходимое число лучей должно быть не менее 200 000.

Интерпретация результатов. Вычисленную яркость будем отображать как по кольцу в целом, так и в заданных точках. При отображении результатов на криволинейных объектах возможно появление систематической погрешности из-за несоответствия границ сетки и кромок объекта, для которого выводятся результаты. Если же при визуализации используется интерполяция (опция **Smoothing** (Сглаживание) окна **Irradiance Options** активна), то для узких криволинейных граней картина освещенности (яркости) практически теряет связь с реальностью.

Еще одно замечание. Геометрия объектов такова, что только доли процента от общего числа испущенных источником лучей попадают на кольцо. Соответственно результаты для малых зон и в конкретной точке осредняются с большой погрешностью. Поэтому прибегнем к очевидному приему. Создадим три квадратных поверхности (рис. 9.221), центры которых расположены в точках, для которых нормируется яркость. Они должны быть настолько велики, чтобы собирать достаточное число лучей, но при этом квадраты не должны выходить за границу кольца. Плоскость, на которой расположены виртуальные датчики, не должна совпадать с поверхностью кольца.

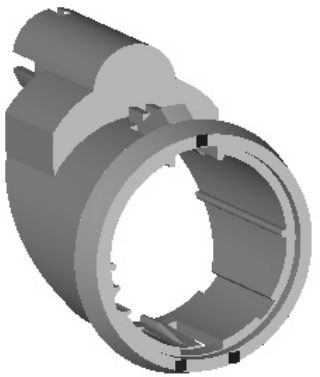


Рис. 9.221. Дополнительные поверхности для получения и оценки результатов

Отображение результатов на искусственно созданных гранях также не лишено недостатков — система производит разбиение области отображения как

минимум на две зоны в каждом направлении. Поэтому вычисление интегральной характеристики яркости требует осреднения величин по всей площади квадрата.

Расчет исходного варианта. Выполним расчет исходного варианта для двух типов материала корпуса. Распределение яркости по наружному кольцу для конструкции из пластмассы с меньшим коэффициентом поглощения 1,5 %/мм и без учета рассеяния показано на рис. 9.222. При этом яркость в точке 1 составляет 90—100 нит (рис. 9.223), а в точках 2 и 3: 10—15 нит. Обращает на себя внимание малое число лучей, попавших в контрольные точки (12, 2 и 3 соответственно). Поэтому даже осредненная по их площади яркость представляет собой достаточно грубую оценку реальной ситуации. Что же касается вопроса о распределении яркости по ширине кольца, то полученных результатов информации недостаточно для обоснованных выводов.

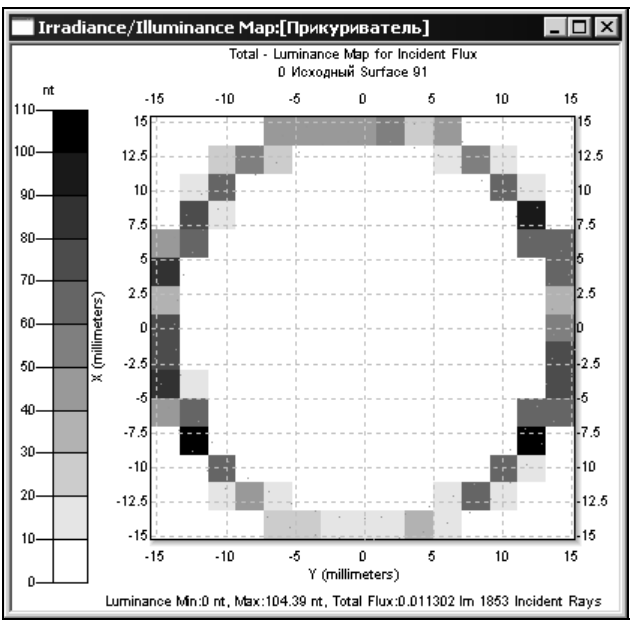


Рис. 9.222. Распределение яркости для корпуса из поликарбоната с меньшим коэффициентом поглощения

Если увеличить коэффициент поглощения пластмассы до 3,5 %/мм и ввести объемное рассеяние в пластмассе, то картина изменится следующим образом (рис. 9.224 и 9.225).

Яркость в точке 1 составляет 70—80 нит, а в точках 2 и 3 — 5 и 2 нит, соответственно. Очевиден вывод: увеличение поглощающих и рассеивающих ха-

рактеристик материала влияет на яркость точек кольца тем в большей степени, чем ближе они находятся к источнику света.

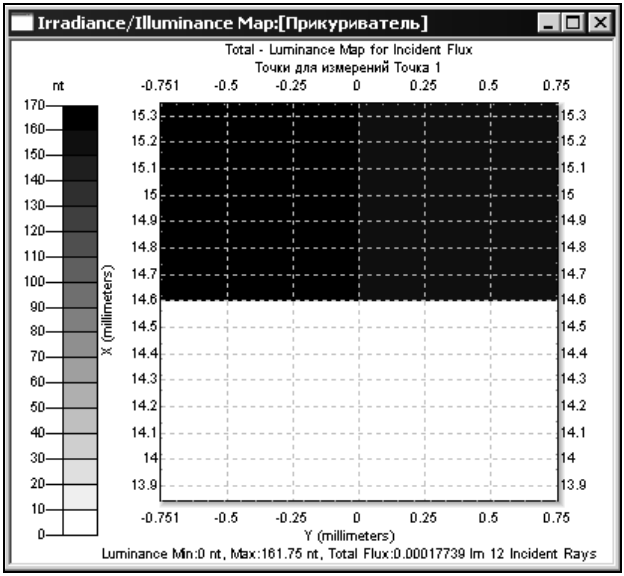


Рис. 9.223. Яркость в контрольной точке 1

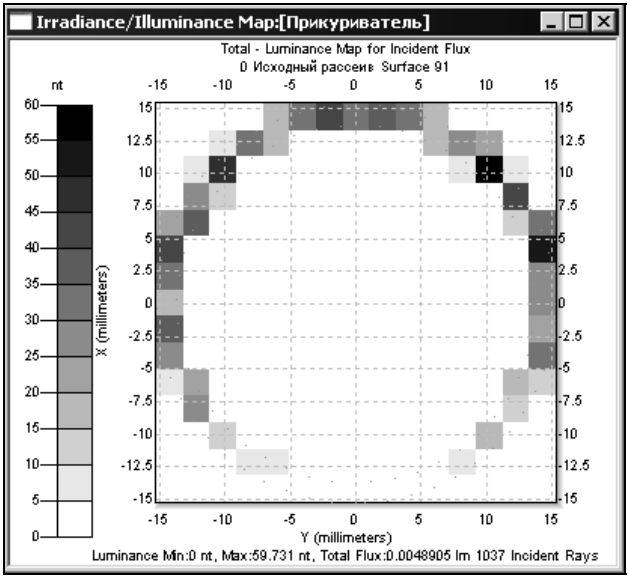


Рис. 9.224. Распределение яркости для корпуса ПК с коэффициентом поглощения и учетом рассеяния в объеме

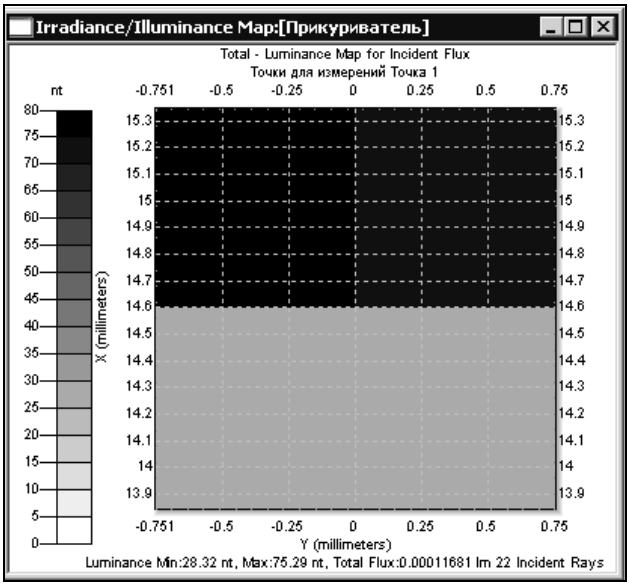


Рис. 9.225. Яркость в контрольной точке 1 для пластмассы с бóльшим коэффициентом поглощения и учетом рассеяния в объеме

Внесение изменений в конструкцию

Задача в целом и конструкция корпуса в частности не допускают применения алгоритмических методов оптимального проектирования, т. е. практически невозможно однозначно выделить параметры, влияющие на целевую функцию (распределение яркости), и построить алгоритм поиска значений этих параметров для удовлетворения заданным требованиям. В определенной степени исключением являются оптические характеристики материалов, в частности коэффициенты поглощения и рассеяния. Однако, как подчеркивалось, отсутствие достоверных величин для конкретного материала и сопутствующего конкретному изделию технологического процесса, а также информации, позволяющей однозначно реализовать заданные свойства в материале, лишают проектировщика даже этой возможности.

Как известно, распространенные методы оптимизации не допускают алгоритмического внесения новых (исключения имеющихся) геометрических элементов в конструкцию. Поэтому действия по улучшению изделия будут выполняться по схеме: рассмотрение текущего состояния → принятие решения об изменении → корректировка геометрической модели → оптический анализ → рассмотрение нового состояния → .... Помимо параметров, связанных с формой, варьируемыми параметрами будут оптические характеристики материалов и поверхностей.

Поскольку число параметров, влияющих на результат весьма значительно, то в целях облегчения интерпретации результатов, а также для выделения наиболее значимых необходимо принять решение о последовательности внесения модификаций. Выше подчеркивалось, что изменение характеристик поглощения не позволяет соблюсти необходимый баланс между яркостью в заданных точках. Поэтому, прежде всего, нужно увеличить долю светового потока, попадающего на нижнюю часть кольца. Для получения информации о состоянии исходного проекта рассмотрим траектории лучей, достигших кольца (рис. 9.226 и 9.227).

На иллюстрациях отображена только часть лучей, что не мешает сделать обоснованные выводы:

- на верхнюю часть кольца попадает значительно больше света, чем на нижнюю;
- перед тем как попасть на часть кольца в районе контрольной точки 1, лучи отражаются от поверхности металлического цилиндра;
- лучи, попадающие в зоны контрольных точек 2 и 3, имеют "прямые" траектории, которые складываются из участков, где свет проходит через цилиндрический объем корпуса и — для некоторой доли потока, — отражаясь от металлического цилиндра. Никакие другие зоны корпуса не участвуют в передаче светового потока ни в контрольные точки, ни — даже — на наружное кольцо.

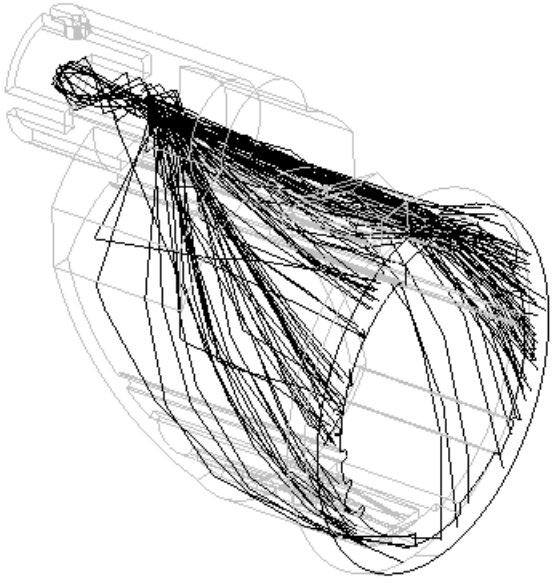


Рис. 9.226. Траектории лучей, попавших на наружное кольцо — аксонометрия

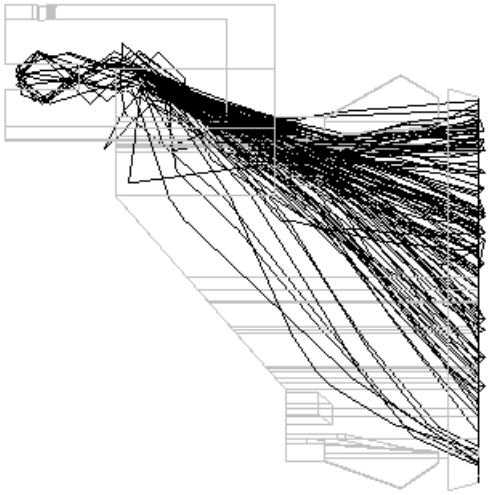


Рис. 9.227. Траектории лучей, попавших на наружное кольцо — фронтальный вид

Сосредоточимся на анализе последнего пункта. Из него следуют два пожелания: собрать больше лучей, идущих вдоль имеющихся траекторий, и направить на кольцо часть энергии, которая "уходит" в других направлениях. Для того чтобы сделать картину более очевидной, в начале этапа модификации откажемся от учета рассеяния света в материале и примем меньший коэффициент поглощения.

Еще раз покажем лучи, которые попали на кольцо, и рассмотрим вид сзади (рис. 9.228).

Видно, что до кольца доходят только лучи, которые непосредственно попадают в цилиндрическую часть. А попадают только те, которые направлены в сектор, вершина которого находится в окрестности спирали, а границы совпадают с касательными к цилиндру. Отсюда вывод: наличие наплыва существующей формы не влияет на долю светового потока, попадающего на кольцо. Здесь же подтверждается тезис о том, что лучи достигают кольца в результате эффекта полного внутреннего отражения.

Попытаемся изменить форму наплыва так, чтобы он служил своего рода концентратором светового потока. Вид модифицированной детали показан на рис. 9.229, а распределение яркости на кольце — на рис. 9.230. Анализируя диаграмму, учитываем, что эффект от изменений следует оценивать в сравнении с рис. 9.222 (по принципу эквивалентности оптических характеристик).

Как упоминалось, приоритетная цель данного этапа — повышение общей доли светового потока, попавшего на кольцо. Текущий шаг принес ее увеличение с 0,0109 до 0,0126 лм.

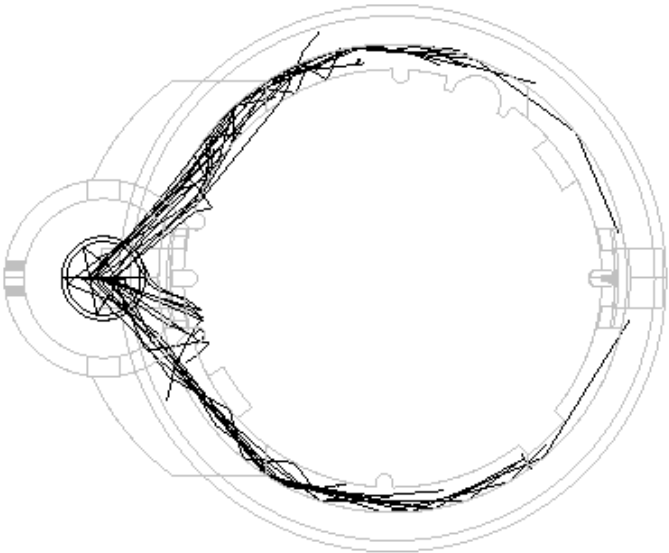


Рис. 9.228. Траектории лучей, попавших на кольцо. Профильный вид

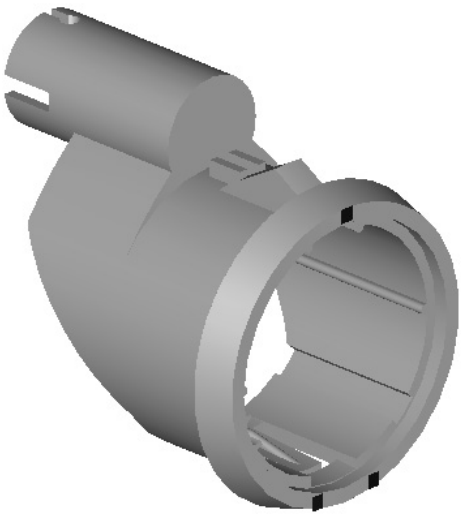


Рис. 9.229. Корпус с модифицированной формой наплыва

Следующий шаг — увеличение светового потока, попавшего внутрь цилиндра. Естественное решение — использование собирающих линз. Они, во-первых, увеличивают площадь, с которой световой поток направляется внутрь окружности цилиндра, а во-вторых, формируют световой пучок так, что бóльшая его доля может претерпеть полное внутреннее отражение от

стенок цилиндра. Модифицированный профиль показан на рис. 9.231, а траектории лучей — на рис. 9.232.

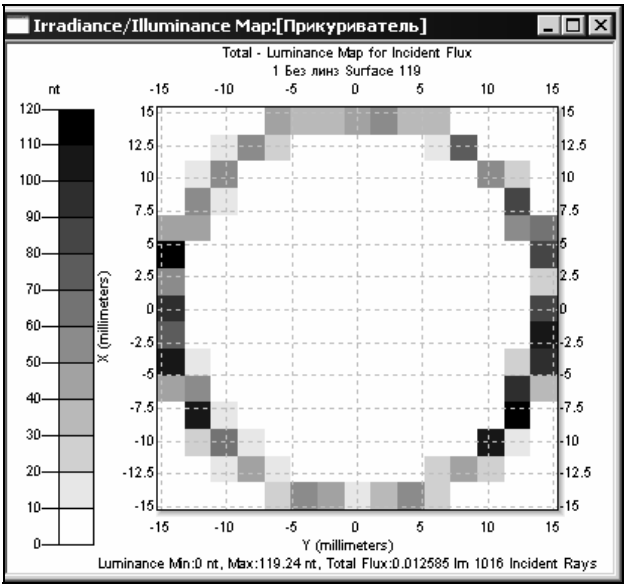


Рис. 9.230. Распределение яркости с учетом изменения формы наплыва

При подборе параметров линз пришлось вносить изменения в результаты предыдущего шага, изменяя профиль наплыва. В совокупности данные коррективы позволили увеличить суммарный световой поток на кольце до 0,0149 лм. Отметим, что увеличение общей величины светового потока на кольце происходит в значительной степени за счет повышения освещенности нижней его части (в том числе и в окрестности контрольных точек), в то время как величина световой энергии, падающей на верхнюю часть, изменяется незначительно. Распределение яркости после выполнения описанных изменений показано на рис. 9.233.

Однако внесенные модификации, позволив направить больше энергии по уже "проложенным" светом траекториям, практически не повлияли на ситуацию в других зонах. Картина, показанная на рис. 9.226 и 9.227, сохранилась в принципе. Изменить ситуацию можно за счет активизации эффекта полного внутреннего отражения на наклонном торце цилиндра. В исходном варианте угол наклона к вертикали (с учетом, разумеется, положения источника света) слишком велик, и полного внутреннего отражения не происходит. При изменении этого угла следует учитывать геометрические ограничения на размер цилиндра в осевом направлении. Поэтому из потенциальных вариантов модификации следует предпочесть те, которые сохраняют данный размер. Угол

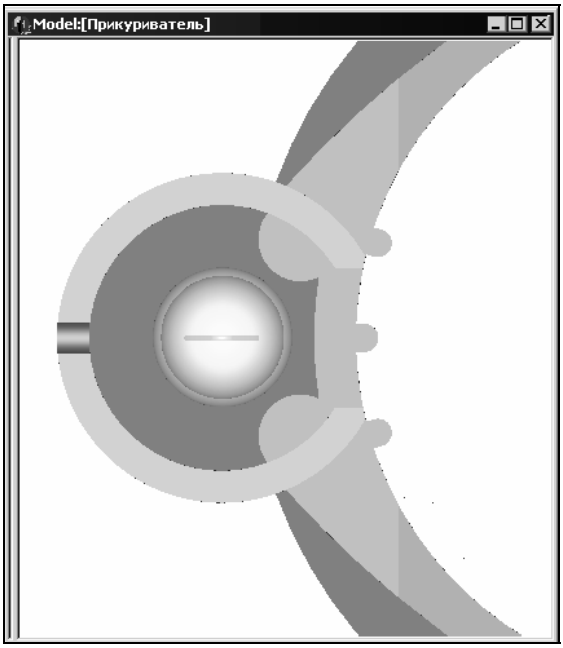


Рис. 9.231. Модифицированный профиль наплыва и собирающие линзы

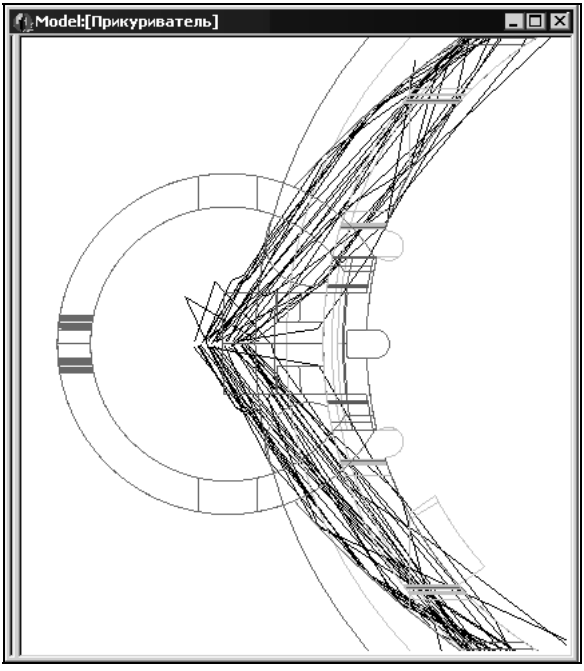


Рис. 9.232. Траектории лучей при прохождении через линзы и зону сопряжения

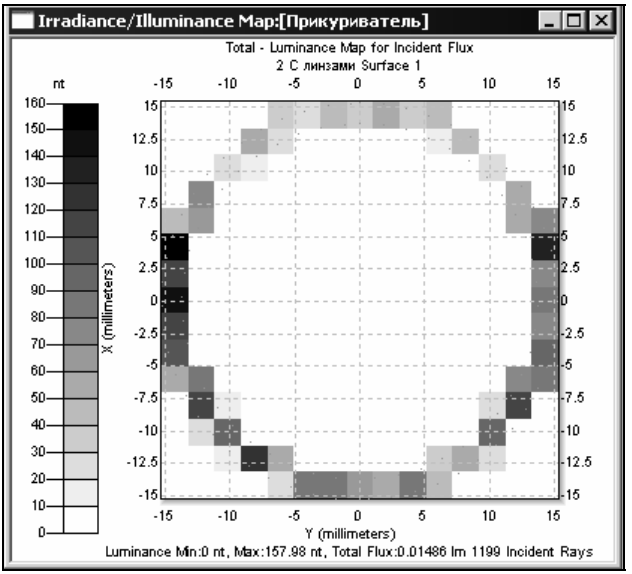


Рис. 9.233. Распределение яркости после ввода собирающих линз

падения лучей (измеряемый относительно нормали к грани) увеличиваем за счет поворота грани относительно оси, принадлежащей грани и пересекающий продольную ось. Вид профиля, а также траектории лучей, попавших на кольцо, показаны на рис. 9.234.

На рис. 9.235 показано распределение яркости для измененной конструкции. Произошло увеличение светового потока на кольце до 0,0168 лм.

Подведем промежуточные итоги, характеризующие ситуацию в контрольных точках, с учетом того, что модель учитывает поглощение в минимальной степени. До модификации световой поток в точках 1, 2, 3 был 17.7e-5, 3.27e-5, 3.67e-5 лм соответственно. На данном этапе — 15.4e-5, 38.3e-5, 41.9e-5 лм. Подчеркнем, что критерием здесь выступает интегральная характеристика — световой поток. Учесть же его распределение в пределах контрольной точки по причине приблизительности модели весьма затруднительно. Картина распределения яркости достаточно оптимистична, однако ввод характеристик, соответствующих более интенсивному поглощению, а также учитывающих рассеяние в материале, приводит к тому, что максимум яркости смещается в зоны, находящиеся на лучах ±40° относительно вертикали в верхнем полукольце (рис. 9.236).

Попытаемся нивелировать это явление. Был опробован подход с использованием вырезов, на которых располагаются призматические преломители, а также ввод профилированных щелей, способствующих (за счет эффекта внутреннего отражения) перераспределению светового потока по окружности

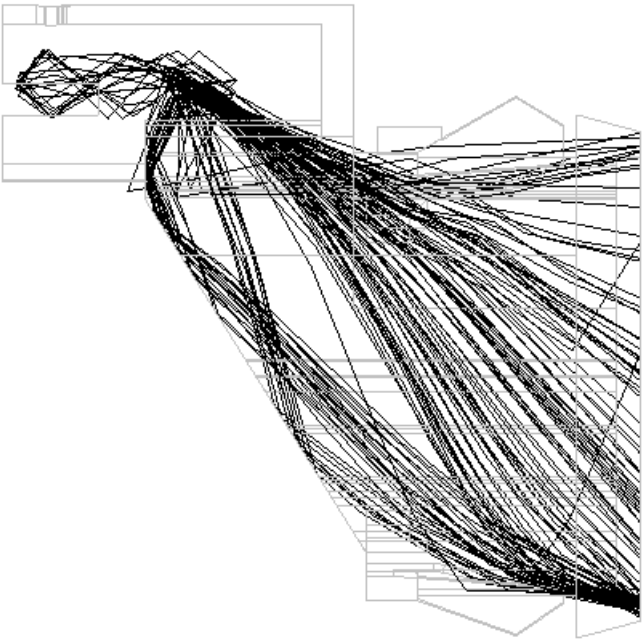


Рис. 9.234. Деталь с уменьшенным углом наклона задней грани: траектории лучей, достигших кольца

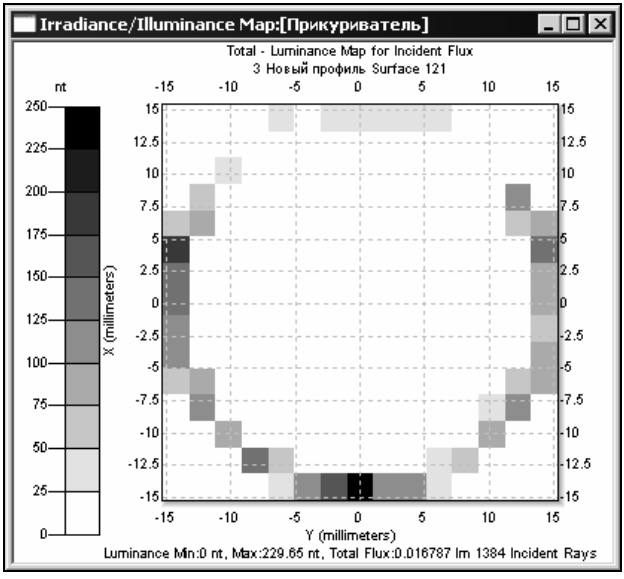


Рис. 9.235. Распределение яркости для конструкции с модифицированным профилем наклонного торца

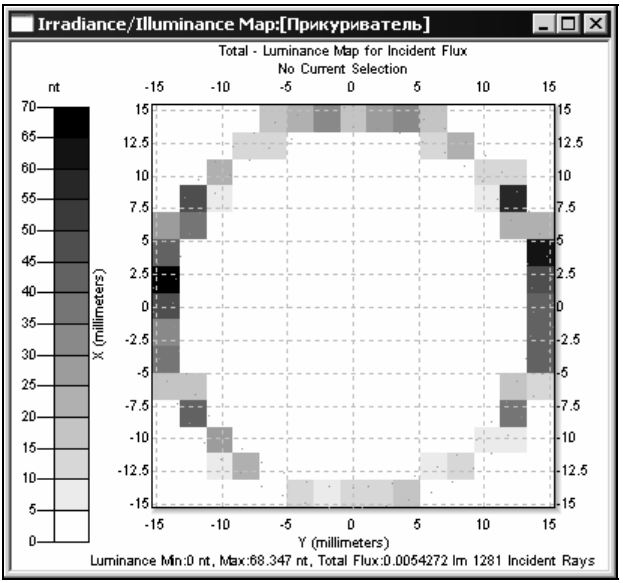


Рис. 9.236. Распределение яркости для конструкции с модифицированным профилем наклонного торца, увеличенным поглощением при учете рассеяния

цилиндра и, соответственно, в нижнюю часть корпуса (рис. 9.237). Одновременно были выделены поверхности, через которые проходит свет на пути к зонам, яркость которых нужно уменьшить (рис. 9.238). Таким поверхностям на оптической модели были назначены характеристики, соответствующие обработке под "шагрень". На щелях это дальние от источника света грани: ближние должны быть отражающими.

Картина распределения яркости показана на рис. 9.239.

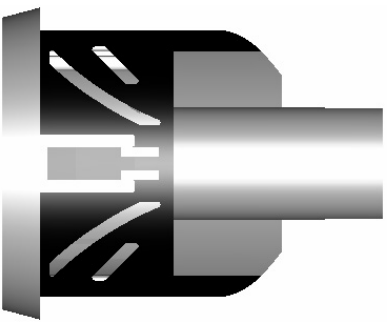


Рис. 9.237. Форма щелей

Продолжим рассматривать влияние рассеивающих свойств поверхностей на распределение яркости кольца. В дополнение к уже обозначенным, можно

выделить поверхности, увеличение рассеяния на которых может несколько улучшить требуемые характеристики (рис. 9.240 и 9.241).

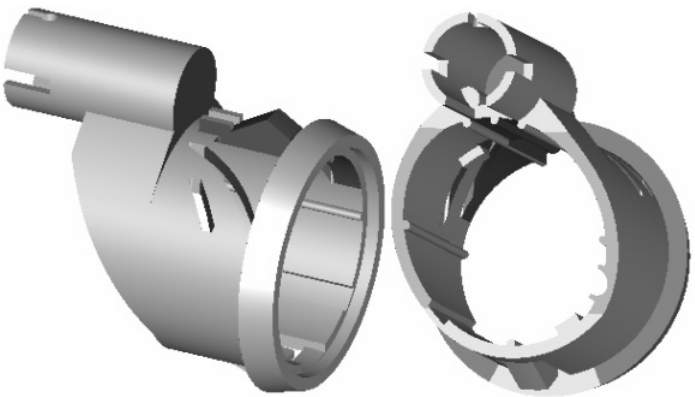


Рис. 9.238. Поверхности с шагренью (выделены более темным оттенком)

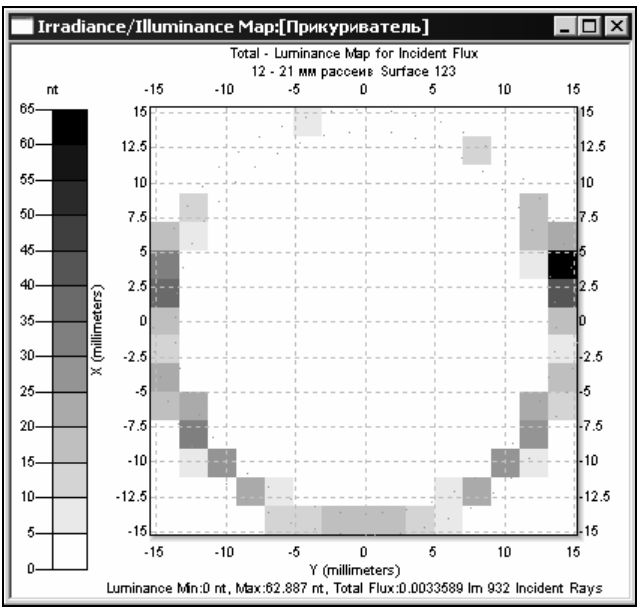


Рис. 9.239. Распределение яркости для модели со щелями и поверхностями под "шагрень"

В ходе анализа траекторий лучей было выявлено еще одно обстоятельство. Большинство лучей, достигающих наружного кольца, испускается верхней частью спирали (рис. 9.242). В связи с этим сделана попытка перенести источник света вверх и оценить влияние этого действия.

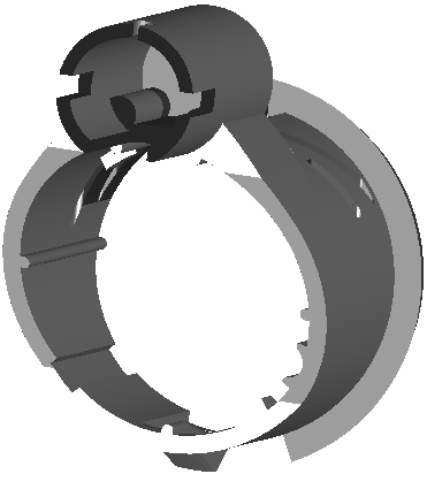


Рис. 9.240. Дополнительные рассеивающие поверхности (показаны более темным цветом)

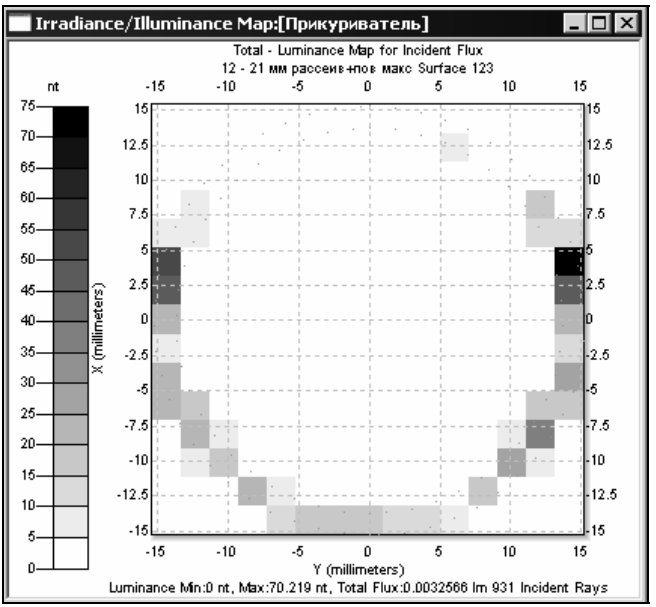


Рис. 9.241. Распределение яркости для детали с увеличением доли рассеивающих поверхностей

Распределение яркости после переноса колбы и спирали на 1 мм вверх показано на рис. 9.243. Очевидно существенное перераспределение светового потока с увеличением доли, попадающей на нижнюю часть кольца.

Сравнивая величины светового потока в точках 2 — 3.95e-5 и 3 —4.56e-5 лм констатируем, что в результатах присутствует асимметрия, которую также

можно диагностировать и на картине распределения яркости. Ее причина — наличие круговой канавки, которая препятствует распространению светового потока. С учетом функционального назначения можно несколько уменьшить ее глубину, увеличив тем самым проходное сечение. С противоположной стороны также присутствует канавка, но прямоугольной формы. Ее глубину изменить нельзя.

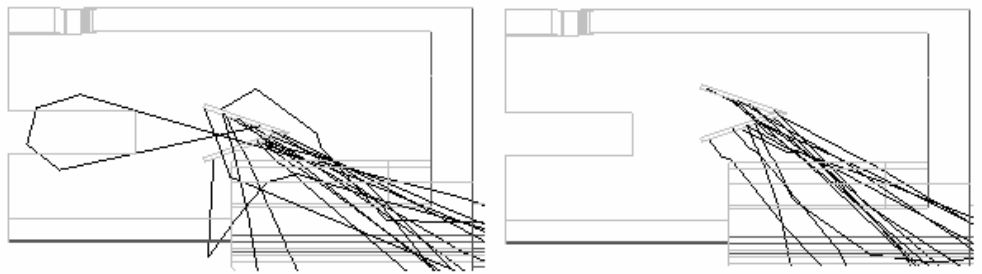


Рис. 9.242. Траектории лучей, попавших на кольцо. Слева — исходное состояние, справа — спираль поднята

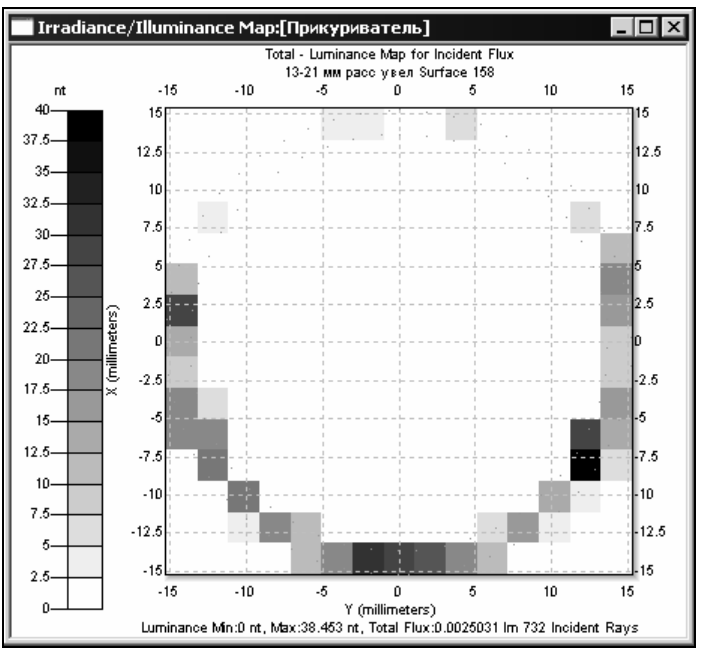


Рис. 9.243. Распределение яркости после переноса источника света на 1 мм вверх

Оценка результатов модификации и прогноз функциональности

В результате модификации получаем окончательный прогноз распределения яркости (рис. 9.244). Ее максимум (относительно исходной конструкции) переместился в низ кольца. Световой поток, попадающий в точки 2 и 3, составляет 5.58e-5 и 4.52e-5 лм.

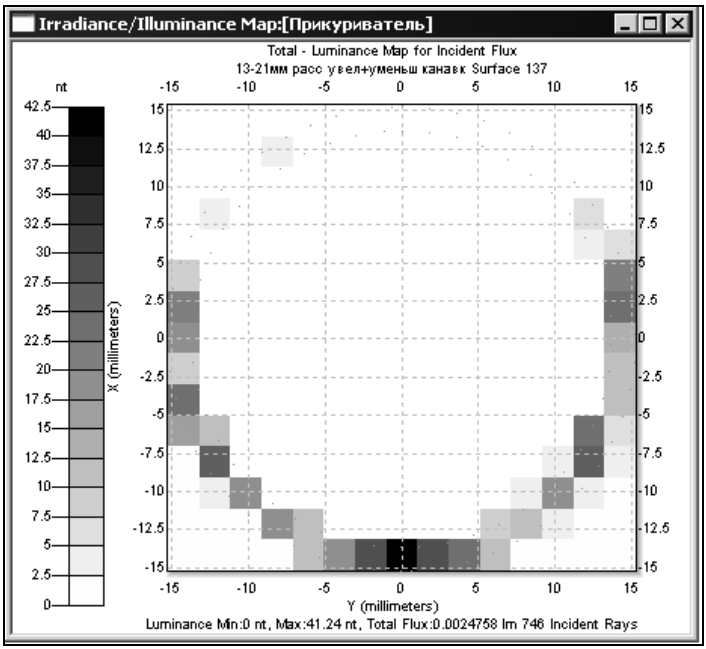


Рис. 9.244. Распределение яркости после уменьшения глубины канавки

Сравним результаты для модернизированной конструкции с результатами для исходной. Световой поток в точке 1 уменьшился с 10.4e-5 лм практически до нуля. Световой поток в точках 2 и 3 увеличился с 1.0e-5 и 4.0e-6 лм до 5.58e-5 и 4.52e-5 лм соответственно. При этом прогнозируемая яркость в точках 2 и 3 увеличилась с 5—15 нит до 30—40 нит при одновременном уменьшении яркости в точке 1. Последнюю — в рамках имеющейся точности анализа — предсказать затруднительно в связи с весьма малой расчетной величиной.

Как упоминалось, рассеивающие свойства поверхностей являются одним из важнейших факторов, влияющих на распределение светового потока. В данной задаче это усиливается тем, что по пути к зонам, яркость которых необходимо увеличить, свет многократно взаимодействует с поверхностями кор-

пуса. В связи с этим на объекте можно выделить три группы поверхностей (рис. 9.245):

- поверхности, которые находятся "на пути" лучей, идущих в "хорошие" зоны, нужно делать максимально качественными (оттенок слева на палитре);
- поверхности, взаимодействуя с которыми свет идет в точки, где яркость следует уменьшить, нужно выполнять так, чтобы обеспечивалось рассеяние (оттенок в центре палитры);
- качество обработки остальных поверхностей не имеет принципиального значения и должно определяться соображениями технологичности и конструктивными требованиями (оттенок справа на палитре).

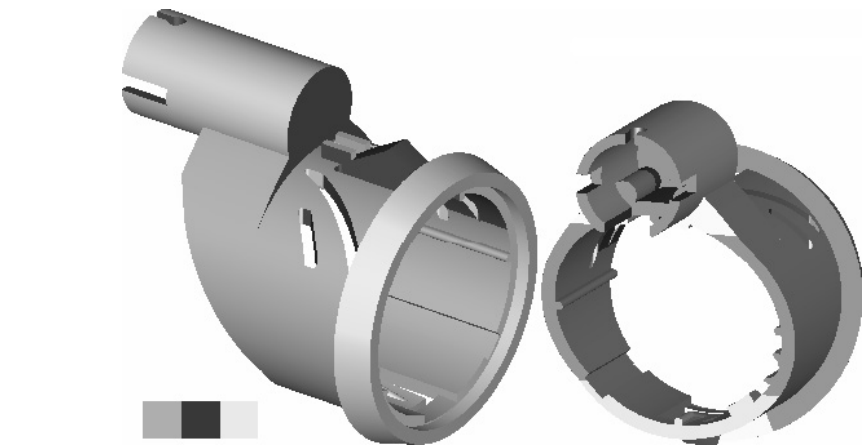


Рис. 9.245. Классификация поверхностей по требованиям к типу и качеству обработки

Выполненная классификация поверхностей, помимо влияния на светотехнические характеристики, представляет интерес с точки зрения оптимизации затрат на обеспечение качества изготовления. Например, можно снизить трудоемкость, уменьшая класс чистоты не влияющих на результат (и, разумеется, на эстетические характеристики) участков поверхности.

Выводы

Представленная задача является характерной иллюстрацией ситуации, когда подходы, основанные на аналитических/эмпирических закономерностях весьма нерациональны, а метод "проб и ошибок" возможен исключительно в сочетании с виртуальным экспериментом. На фоне того, что критерий качества обладает значительной степенью неопределенности, ориентирами являются не строгие численные величины, а оценки "лучше — хуже". Вполне ти-

пичными являются и проблемы, возникающие при интерпретации результатов, крайне чувствительных к качеству и полноте исходных данных.

9.6.4. Автоматизация проектирования и расстановки осветительных устройств

В последние несколько лет в автомобильной светотехнике происходит активное внедрение фар так называемой свободной формы. Характерной чертой этих конструкций является отсутствие рассеивателя. При этом заданное распределение светового потока обеспечивается подбором источника света и отражателя. Рассеиватель изготавливается полностью или частично гладким, выполняя, как правило, защитные и декоративные функции. Это является радикальным отличием от подавляющего большинства изделий, использовавшихся ранее. В них рефлектор имел параболическую форму, а источник света располагался в фокусе (или с заданным смещением относительно фокуса, как, например, в комбинированных фарах ближнего/дальнего света), обеспечивая равномерно направленный световой поток или прогнозируемое распределение силы света. Без применения компьютерных технологий разработка фар свободной формы практически невозможна. Наличие рассеивателя с призматическими преломляющими элементами дает возможность управлять направлением лучей (при условии, что они идут параллельно друг другу), применяя более-менее простой математический аппарат. При этом вполне удовлетворительный результат можно получить без использования компьютера или же посредством достаточно примитивных программ. Понятно, что такой подход критически зависит от уровня квалификации исполнителя и требует длительного (до нескольких месяцев) времени.

Надо сказать, что мода на фары свободной формы получила логическое развитие в конструкциях задних фонарей, когда пластмассовые рассеиватели лишились линзовых оптических элементов — функционально они были заменены соответствующим образом спроектированной поверхностью отражателя, специально подобранным источником света. Более сложные конструкции иногда содержат несколько отражателей.

В данном разделе мы рассмотрим пример использования специального программного обеспечения для проектирования осветительных устройств, не содержащих рассеивателей. Это продукт ReflectorCAD фирмы Breault Research Inc., США. Как представляется, это есть инструмент начального уровня, который призван продемонстрировать технологические возможности фирмы, специализирующейся на проектировании светотехнических устройств. Тем не менее его возможности достаточно обширны, а метод работы весьма показателен и заслуживает подробного рассмотрения.

Мы будем решать задачу проектирования источника, обеспечивающего заданное распределение света в пространстве. В отличие от случая, описанного в *разд. 9.6.1*, осевая симметрия будет отсутствовать, а в качестве целевой функции выступит распределение освещенности. Проблемы начинаются уже на этапе формулировки задачи оптимального проектирования. Параметризовать проект так, чтобы гарантировать не только получение одного или нескольких локальных оптимумов, но и соответствие, как минимум, одного из них заданным требованиям, весьма проблематично. Причина здесь в том, что отражатель будет содержать несколько граней, число и форму которых предсказать заранее не всегда возможно. Если иметь дело с ограниченным классом изделий, например фарами дальнего света, то есть шанс построить более-менее универсальный алгоритм. Предполагаемая ReflectorCAD полная свобода выбора цели делает неосуществимой "полную" автоматизацию процесса построения рефлектора и требует непрерывного участия оператора. В то же время функциональность программы существенно ускоряет работу на этапах назначения цели, подготовки вариантов изделия, получения и интерпретации результатов.

Вторая задача, которая будет решаться в этом разделе, — расстановка фар для освещения некоторой зоны так, чтобы, с одной стороны, удовлетворить ограничениям на минимальную величину освещенности, а с другой — обеспечить достаточную ее равномерность. Эта проблема будет решаться совместным использованием двух программ. ReflectorCAD станет источником геометрической информации об источнике, а TracePro — инструментом синтеза сцены и ее светотехнического анализа.

Постановка задачи

На рис. 9.246 показана геометрическая модель сцены, содержащей лесозаготовительную машину и обслуживаемую рабочую зону. В пределах рабочей зоны нормируется минимальная освещенность в некоторых точках горизонтальной площадки. Контролируемые значения представляют собой пару величин: освещенность (в люксах) площадок, нормальных к направлению света, и площадок, находящихся на земле. Если второй показатель контролируется по диаграмме освещенности рабочей зоны, то для отображения результатов на площадках, нормальных к лучу, следует эти площадки построить. С целью сокращения объема вычислений они выполнены в виде плоских квадратных поверхностей. Их размер подбирается, с одной стороны, достаточно малым, чтобы локализовать переменную составляющую функции освещенности, а с другой — достаточно большим, обеспечивая сбор необходимого числа лучей, образующих надежную базу для осреднения результата. На иллюстрации возле площадок показаны две цифры: большая — нормальная освещенность, меньшая — освещенность земли.

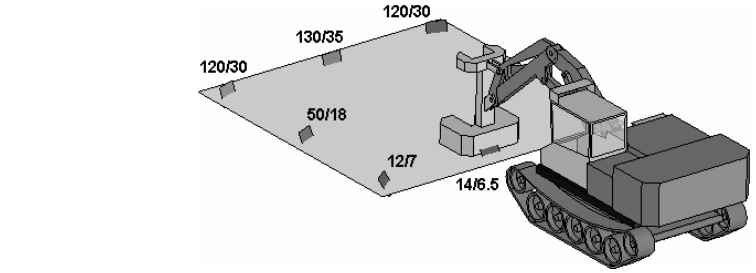


Рис. 9.246. Сцена, содержащая лесозаготовительную машину и площадки с нормируемой освещенностью

Программа ReflectorCAD не позволяет управлять освещенностью непосредственно. Это, в общем, и понятно: для того чтобы эту освещенность рассчитать, нужно иметь освещенные объекты. Модель усложняется, и алгоритм теряет универсальность. Иное дело — диаграмма силы света, испускаемого источником. Она инвариантна относительно сцены и является объективной характеристикой светотехнического устройства. Чтобы сформировать эталонную диаграмму, определим параметры пространственного угла, в который направлен световой поток. Для этого построим модель угла (рис. 9.247) в виде пирамиды, вершина которой совпадает со спиралью лампы. Ребра проходят через центры четырех нормируемых площадок — здесь предполагается, что одна фара освещает прямоугольную поверхность, ограниченную этими площадками. Примем, что оптическая ось источника направлена вдоль биссектрисы пространственного угла (под биссектрисой подразумевается линия пересечения биссекторных плоскостей). Таким образом, параметры пространственного угла таковы: угол по вертикали равен 21°; по горизонтали сверху — 17°; снизу — 31°.

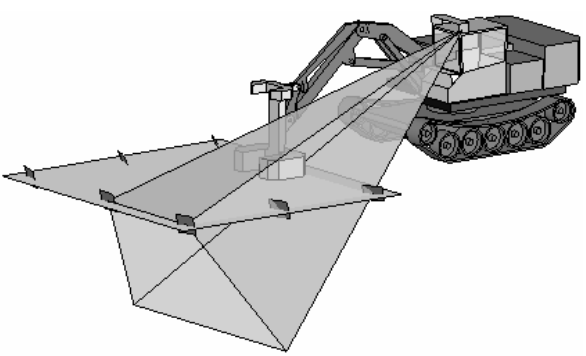


Рис. 9.247. Формирование пространственного угла, в котором действует источник света

Озаботимся еще одним фактом. Точность позиционирования источника света и, в частности, назначение направления оптической оси в реальности не мо-

жет быть абсолютной. Примем, что оптическая ось может перемещаться внутри некоторого пространственного угла, ограниченного конусом с углом при вершине 5°. Это значит, что поле допуска для каждого из упомянутых размеров равно (в первом приближении) ±2,5°. Пространственный угол, построенный на базе максимальных величин углов, показан на рис. 9.248. Размер угла в вертикальной плоскости равен (приблизительно) 26°, а углы на верхней и нижней гранях составляют 22 и 36°. Именно для этой области будет нормироваться распределение силы света.

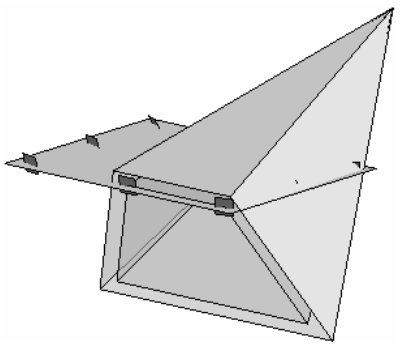


Рис. 9.248. Пространственный угол, для которого нормируется сила света

Формируем критерий оптимальности проекта. В конечном счете нам, как упоминалось, нужно получить заданные величины освещенности. Программа же позволяет управлять силой света. Получить аналитическую зависимость между силой света и освещенностью для данной области весьма затруднительно. Поэтому задача оптимального проектирования сводится к следующей: достичь такого распределения силы света, чтобы отклонение освещенности в заданных точках от номинала было как можно более равномерным. Задача при этом решается для конкретного источника света — пусть это будет стандартная автомобильная лампа H1 с нормируемой силой света 1 550 лм. Учтем, что освещенность площадки, нормальной к выходящему из лампы радиус-вектору, обратно пропорциональна квадрату длины этого вектора (а ближайшая к источнику нормируемая площадка находится примерно в два раза ближе, чем дальняя), а также поскольку (в первом приближении) требуемая освещенность обратно пропорциональна расстоянию до источника. Поэтому в итоге получаем, что с увеличением угла по вертикали сила света должна возрастать пропорционально кубу этого угла. Что же касается горизонтального угла, то здесь нормируемая освещенность имеет практически одинаковую величину.

При постановке задачи проектирования мы вполне сознательно оперируем не слишком строгими понятиями. В отличие от задачи оптимизации формы от-

ражателя светильника, где как сама проблема, так и алгоритм решения, позволяли найти однозначные формулировки, здесь будет использоваться инструмент, погрешность которого перекрывает достаточно смелые аппроксимации. Более того (об этом ниже), путь от теоретической модели к конструкции содержит столько допущений, что математически оптимальный проект после реализации это качество, скорее всего, утратит.

Возможности специального программного обеспечения

Программа ReflectorCAD предназначена для проектирования сегментных отражателей по критерию распределения силы света. Принципиальные особенности программы таковы:

- анализируемые источники света — лампы, имитируемые нормированным распределением светового потока в пространстве. Программа не допускает создания собственных источников света. Оператор управляет координатами источника и его ориентацией в пространстве. Система учитывает один или два источника, которые могут функционировать раздельно или одновременно;
- отражатель образован совокупностью четырехугольных граней (сегментов), являющихся элементами поверхности второго порядка. Каждый сегмент программа разбивает на субсегменты, число которых определяет точность расчета. Между сегментами можно автоматически создать перемычки, однако в расчете они не участвуют. В исходном состоянии все сегменты располагаются на некоторой базовой поверхности. В процессе проектирования они от нее отклоняются;
- оптические характеристики поверхностей и материалов учитывают только пропускание и отражение с возможностью задания коэффициента отражения рефлектора как конструкции и интегрального коэффициента пропускания прозрачного материала (по сути, колбы лампы). Рассеяние при взаимодействии света с поверхностью или в объеме материала никак не учитывается, т. е. качественного влияния на распределение света оптические параметры никак не оказывают. Очевидным следствием этих упрощений является то, что игнорируются все явления, связанные со вторичным отражением при распространении рассеянных лучей. Последние могли бы попадать на другие сегменты, взаимодействовать с колбой лампы и т. д.;
- результаты оптического расчета — распределение силы света (диаграмма изокандел), отображаемая индивидуально для сегмента или для оптической системы в целом. Та доля светового потока, которая выходит из оптической системы, не взаимодействуя с отражателем, в расчете не участвует;

- целью проектирования является подбор формы и ориентации каждого сегмента так, чтобы обеспечить заданное распределение силы света, отраженного этим сегментом. Это значит, что возможно только удовлетворение локальных критериев качества (сегменты не взаимодействуют между собой ни функционально, ни — что является очевидным следствием этого — как факторы, влияющие на параметры конструкции). Оптимальность изделия в целом никак не гарантируется. Критерий оптимальности (распределение света) формулируется исключительно в диалоговом режиме, причем пользователь назначает цель только посредством визуальных инструментов — это не позволяет сформулировать строгий критерий оптимальности;
- результатом решения является сегментная поверхность, грани которой могут быть связаны перемычками. Эта поверхность может быть экспортирована в специальные оптические программы или же записана в формате IGES.

Проектирование отражателя свободной формы

В связи с тем, что программа ReflectorCAD не является инструментом повседневного использования, не будем полностью воспроизводить ее интерфейс и углубляться в подробности эксплуатации. Ограничимся описанием решения конкретной задачи (проектирование отражателя с заданным распределением силы света), акцентируя внимание на принципиальных вопросах. Приведенная последовательность не является единственно возможной, в процессе проектирования возникают циклы, тупиковые ветви, разветвления. Здесь же приведена только канва алгоритма.

Окно программы показано на рис. 9.249. Оно содержит падающее меню, панель инструментов с пиктограммами, скрывающими за собой некоторые команды, а также два окна: левое содержит информацию о рефлекторе, правое — диаграмму изокандел и сопутствующие результаты. Отображаются следующие параметры рефлектора: прямоугольные габариты; эллиптический контур; контур внутреннего отверстия; сетка для привязки сегментов; контуры сегментов, при активизации которых подсвечиваются вершины; линии уровня, отображающие высоту сегмента относительно базовой поверхности.

В окне с результатами выводится диаграмма изокандел как для оптической системы в целом, так и для произвольного сегмента (после его активизации в левом окне). Диаграмма сопровождается шкалой. Если активен некий сегмент, то показываются контуры области, в которую программа будет стремиться ориентировать световой поток, а также точка — в программе она называется **Aim Balance Point** (Точка баланса цели). Изменяя положение этой точки, можно указывать системе место, в которое следует этот поток направить "более активно" (кавычки подчеркивают факт отсутствия строгого кри-

терия оптимальности). Также отображаются угловые размеры анализируемой области. Метка **Total Flux** (Результирующий поток) содержит величину светового потока, который выходит из рефлектора, отразившись от него или же от выбранного сегмента.

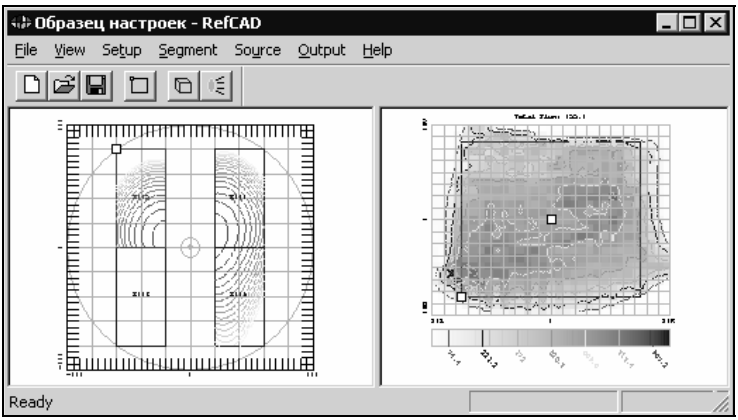


Рис. 9.249. Окно программы ReflectorCAD

После создания объекта первый шаг, как водится, — назначение единиц измерения. Поскольку программа американская, то изначально она настроена на дюймовую систему. Посредством команды **Setup | System Units** (первое слово здесь, как и везде в книге, пункт падающего меню, последнее — название команды) изменяем ее на метрическую (рис. 9.250).



Рис. 9.250. Назначение единиц измерения длины

Назначаем параметры базовой поверхности отражателя (рис. 9.251). Она является коникой, габариты которой ограничены эллипсом, и имеет внутри эллиптическое, в общем случае, отверстие. Кроме того, эту поверхность можно импортировать из программы оптического анализа ASAP (фирмы Breault Research). Поверхность характеризуют следующие параметры:

- группа параметров **Conic Section** (Коническое сечение), включающая **Radius of Curvature** (Радиус кривизны) и **Conic Constant** (Константна коники). Последней присвоена величина –1 — это значит, что будет генерироваться парабола;

- группа параметров **Outer Aperture** (Наружная апертура), состоящая из полей **Half Width** (Полуширина) и **Half Height** (Полувысота). Это длины полуосей эллипса, описывающего габариты отражателя;
- группа параметров **Inner Aperture** (Внутренняя апертура), описывающая размеры отверстия в отражателе для размещения лампы.

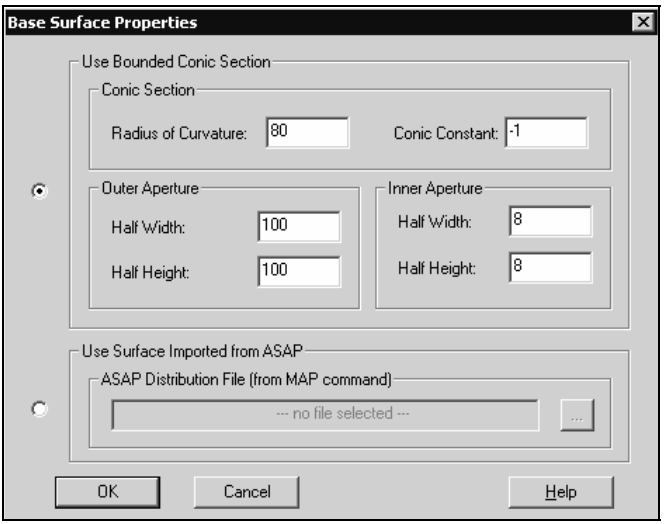


Рис. 9.251. Назначение параметров базовой поверхности

Здесь возникает естественный вопрос: как соотносится наличие нескольких вариантов базовой поверхности, а также возможность выбора фокусного расстояния с постановкой задачи оптимизации. Последняя, при наличии цели и ограничений, должна иметь одно или несколько фиксированных решений (глобальный и локальный оптимумы). Здесь практика использования программы показывает, что тип поверхности — это качественный параметр, который однозначно оказывает влияние на результат, т. е. поиск решения осуществляется в классе форм, определенных типом коники. Радиус же кривизны (удвоенное фокусное расстояние) есть количественный параметр, изменение которого, в принципе, не должно оказывать влияние на результат (программа подбирает параметры поверхности в пределах ограничений, присущих ее типу). Как правило, это справедливо, однако — при значительных вариациях радиуса кривизны и одинаковых целях и ограничениях — иногда получались отличающиеся результаты.

Помимо размеров базовой поверхности следует назначить габариты рабочей области, в пределах которой будут размещаться сегменты. Независимо от ее размеров полученный отражатель будет обрезан очерком базовой поверхности, параметры которого назначаются в окне рис. 9.252.

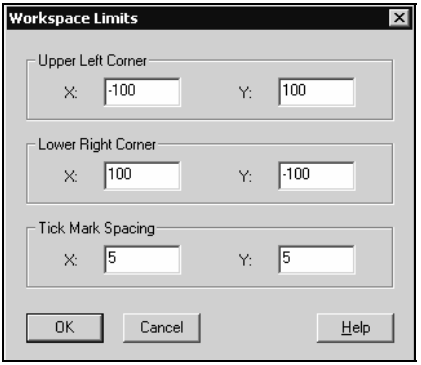


Рис. 9.252. Назначение габаритов рабочей области

Если распределение светового потока имеет канонический характер (описывается прямоугольником с максимумом интенсивности в центре), то полезно назначить **Aiming Defaults** (Цель по умолчанию). В соответствующем окне (рис. 9.253) вводятся координаты **Aim Region Center** (Центр области цели) и **Aim Region Spread** (Протяженность области цели). Отметим, что независимо от того, что назначено по умолчанию, при изменении цели вручную результат для поверхности будет тем же самым. Важными характеристиками являются две опции: **Cross aim horizontally** (Пересекать цель по горизонтали) и **Cross aim vertically** (Пересекать цель по вертикали), управляющие ориентацией сегмента. Если, например, активна опция **Cross aim horizontally**, луч, попавший на левую часть сегмента, должен будет направиться на правую сторону мишени, и наоборот. То, какой вариант будет лучшим, зависит от желаемого характера распределения света.

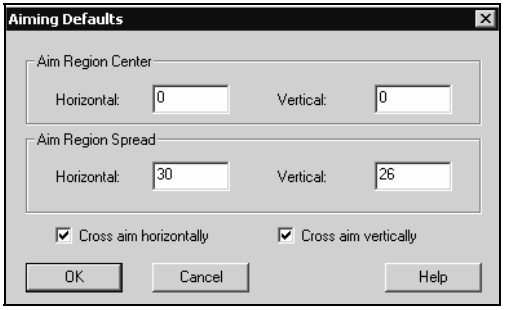


Рис. 9.253. Назначение параметров цели

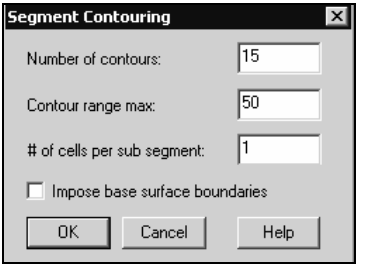


Рис. 9.254. Параметры отображения рефлектора

Характеристики отображения рефлектора определяются в окне **Segment Contouring** (Оконтуривание сегмента) (рис. 9.254), где назначаются следующие параметры:

- **Number of contours** (Число контуров) — число отображаемых уровней в направлении оси;
- **Contour range max** (Максимальный отображаемый диапазон) — наибольшая отображаемая величина отклонения от базовой поверхности;
- **# of cells per sub segment** (Число ячеек на субсегмент) — определяет степень подробности при вычерчивании линий уровня;
- **Impose base surface boundaries** (Накладывать границы базовой поверхности).

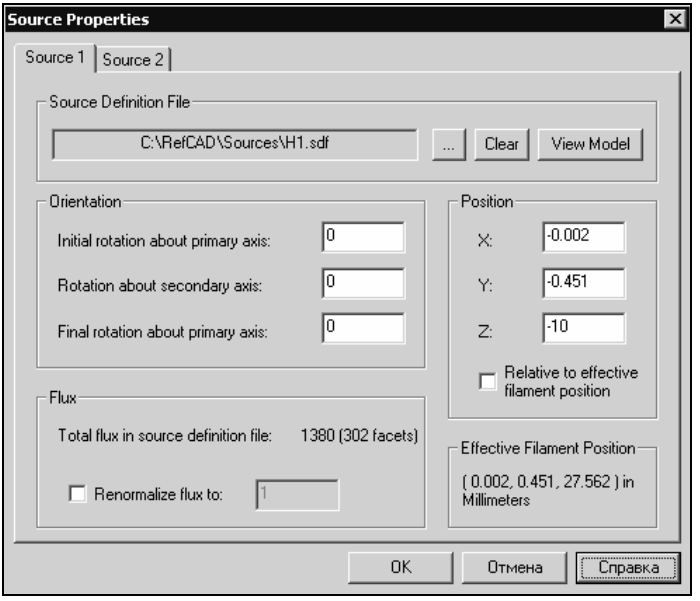


Рис. 9.255. Выбор источника и определение его положения

Вставка источника заключается в выборе соответствующего файла из библиотеки, поставляемой в комплекте с программой. Эта операция выполняется в окне **Source Properties** (Свойства источника) (рис. 9.255). В этом же окне определяется положение источника и его ориентация. Окно содержит следующие параметры.

- **Source Definition File** (Адрес файла источника) — выбор файла, содержащего информацию о распределении света от лампы. Увидеть источник можно, нажав кнопку **View Model** (Просмотреть модель). После этого будет показана картинка, содержащая вид лампы, информацию о мощности и световом потоке, положение системы координат и положение нити относительно системы координат лампы. После выбора источника координаты нити отображаются в поле **Effective Filament Position**. Обратим вни-

мание на то, что центр нити в источнике H1 не располагается на оси лампы.

- Группа полей **Orientation** (Ориентация), в которой назначаются три угла Эйлера, фиксирующие ориентацию системы координат источника относительно системы координат фары. Группа включает следующие поля:
  - **Initial rotation about primary axis** (Начальный угол поворота относительно главной оси) — угол поворота источника относительно его оптической оси;
  - **Rotation about secondary axis** (Поворот относительно вторичной оси);
  - **Final rotation about primary axis** (Вторичный угол поворота относительно главной оси) — угол поворота относительно собственной оси источника, который выполняется после первых двух поворотов.
- Группа полей **Position** (Положение), в которой назначаются координаты лампы относительно системы координат рефлектора или, если активна опция **Relative to effective filament position** (Относительно эффективного положения нити), относительно нити.
- Группа полей **Flux** (Поток), содержащая информацию о мощности источника:
  - **Total flux in source definition file** (Полный поток в файле источника) — метка с фактической величиной светового потока, а также число граней, аппроксимирующих источник;
  - **Renormalize flux to 1** (Нормализовать поток к единице) — мощность источника принимается равной единице. Это полезно для оценки эффективности конструкции в целом, а также влияния отдельных сегментов.

Характеристики области, на которой отображается диаграмма изокандел, определяются в окне **Output Properties** (Параметры вывода). В нем присутствуют следующие параметры (рис. 9.256).

- Группа полей **Vertical Range** (Вертикальный диапазон), в которой заполняются перечисленные поля:
  - **Top** (Верх) и **Bottom** (Низ) — угол, определяющий верхнюю и нижнюю границу области. Акцентируем внимание на том, что эти величины определяют исключительно размер области отображения. Параметры цели назначаются в окне **Aiming Defaults**. Поэтому с точки зрения здравого смысла, размеры **Vertical Range** должны быть несколько больше цели, чтобы иметь возможность оценить величину отклонений (как в хорошем фотоаппарате область в видоискателе должна перекрывать размер кадра);

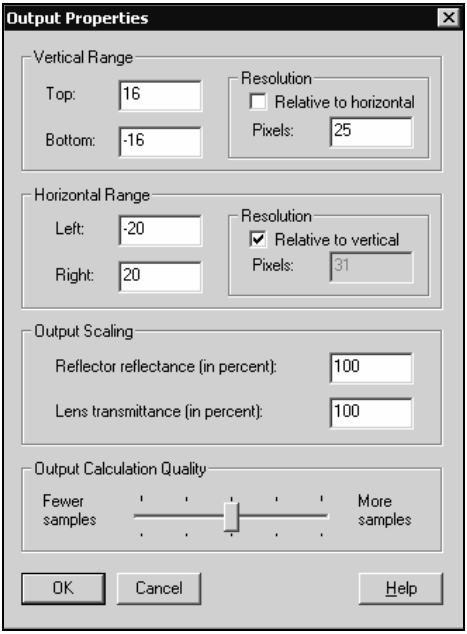


Рис. 9.256. Назначение параметров отображения диаграммы силы света

- **Resolution/Relative to horizontal** (Разрешение/Относительно горизонтали) — признак того, что для осреднения результата будет использоваться горизонтальное направление (если флажок снят);
- **Resolution/Pixels** (Разрешение/Пикселов) — число прямоугольных ячеек по горизонтали, по площади которых будет выполняться осреднение при визуализации. Этот и предыдущий параметры не имеют отношения к точности расчета, а определяют исключительно эстетические характеристики диаграммы. Рекомендации по подбору данных величин аналогичны тем, которые приводились для параметра Smoothing, фигурирующего в программе TracePro при визуализации диаграмм освещенности и силы света.

❒ Группа полей **Horizontal Range** (Вертикальный диапазон), смысл которых идентичен группе **Vertical Range**.

❒ Группа **Output Scaling** (Масштабирование при выводе), определяющая характеристики материалов и поверхностей, включает в себя следующие поля:

- **Reflector reflectance (in percent)** (Отражательная способность рефлектора, %) — доля светового потока, отражаемого поверхностью рефлектора. Как упоминалось, возможность имитировать рассеяние отсутствует;

- **Lens transmittance (in percent)** (Пропускающая способность линз, %) — доля светового потока, пропущенного всеми имеющимися в конструкции прозрачными объектами. Эффекты частичного отражения, рассеяния при взаимодействии с поверхностью и в объеме материала не моделируются. Данное упрощение и то, которое упомянуто выше, никоим образом не умаляют достоинств программы. В ходе проектировочного расчета влияние этих факторов можно выделить более наглядно.

❒ Ползунковый переключатель **Output Calculation Quality** (Качество вычисления результата) предназначен для определения степени членения сегментов при расчете светового потока. Увеличение параметра повышает точность, но увеличивает время для пересчета диаграммы. Данная величина определенным образом связана с параметром **Resolution**, характеризующим размер ячейки осреднения. Иметь, например, малые ячейки осреднения и грубую дискретизацию рефлектора нерационально.

В окне рис. 9.256 параметры назначены так, чтобы описать область прямоугольной формы, которая аппроксимирует необходимую нам трапецию.

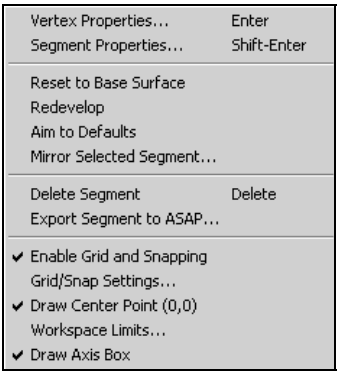


Рис. 9.257. Контекстное меню для рефлектора и его сегментов

Содержимое описанных окон соответствует задаче проектирования рефлектора. Некоторые окна не приводятся, поскольку на функциональность и результат они прямо не влияют. В программе присутствуют два контекстных меню. Первое сопровождает окно с условным изображением рефлектора. Оно показано на рис. 9.257. Расшифруем команды этого меню с их основными функциями:

❒ **Vertex Properties** (Свойства вершины) — назначение координат выбранной вершины активного сегмента. При этом можно назначать вершине признак того, что она будет восприниматься как базовая. Это значит, что

ее координаты не будут изменяться в процессе поиска программой оптимальной формы сегмента. У каждого сегмента может быть только одна базовая вершина, причем при создании сегмента базовой становится первая из созданных вершин;

- **Segment Properties** (Свойства сегмента) — назначение названия активного сегмента, а также числа граней его аппроксимирующих. Не следует злоупотреблять величиной данного параметра, поскольку это утяжеляет геометрическую модель при трансляции ее в CAD-систему или в программу оптического анализа;
- **Reset to Base Surface** (Вернуть на базовую поверхность) — размещение активного сегмента на базовой поверхности;
- **Aim to Defaults** (Цель по умолчанию) — придание активному сегменту формы, которая приводит распределение силы света в соответствии с целью, назначенной по умолчанию (она назначается в окне **Aiming Defaults**, показанном на рис. 9.253);
- **Mirror Selected Segment** (Зеркально отобразить выбранный сегмент) — зеркальное отображение активного сегмента относительно вертикальной или горизонтальной оси с одновременным зеркальным преобразованием целевой точки сегмента или без этого;
- **Delete Segment** (Удалить сегмент);
- **Export Segment to ASAP** (Экспортировать сегмент в ASAP) — экспорт выбранного сегмента в программу оптического анализа ASAP;
- **Enable Grid and Snapping** (Включить сетку и привязку);
- **Grid/Snap Settings** (Настройки сетки и привязки);
- **Draw Center Point** (Отображать точку центра);
- **Workspace Limits** (Габариты рабочей области) — назначение габаритов рабочей области (см. рис. 9.251);
- **Draw Axis Box** (Чертить прямоугольник с осями).

Второе меню (рис. 9.258) предназначено для управления параметрами желаемой диаграммы распределения силы света. Команды в меню таковы:

- **Move** (Переместить) — активизация режима перемещения области цели выбранного сегмента;
- **Swap Corners** (Переставить углы) — каждому углу сегмента соответствует некоторый угол на области цели. Подача этой команды переназначает связь между углами сегмента и углами цели.

Остальные команды в большинстве соответствуют одноименным в меню для области с изображением сегментов.

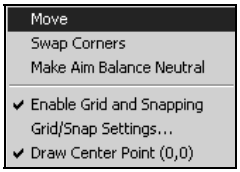


Рис. 9.258. Контекстное меню для диаграммы силы света

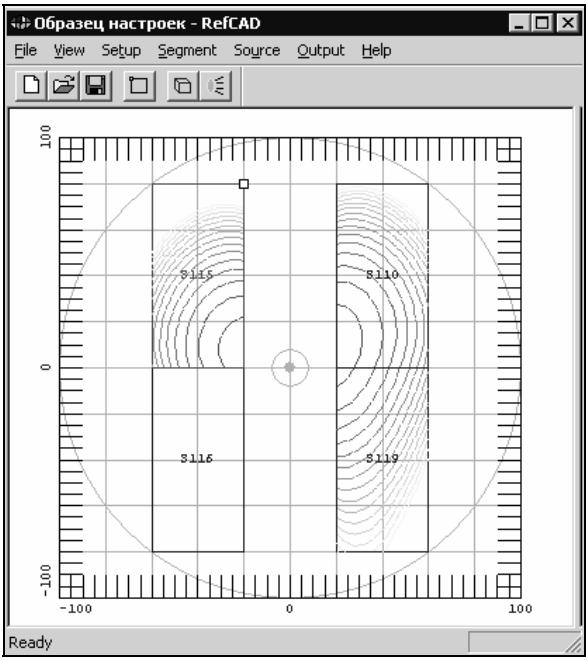


Рис. 9.259. Условное изображение рефлектора, состоящего из сегментов

Процесс проектирования состоит в размещении сегментов с последующей корректировкой желаемого распределения силы света. На рис. 9.259 показаны четыре сегмента. Характеристики источника и свойства базовой поверхности соответствуют показанным на рис. 9.251 и 9.255. Сегмент S116 (левый нижний) расположен точно на базовой поверхности (использована команда **Reset to Base Surface**). Соответствующая этому сегменту диаграмма силы света отображена на рис. 9.260. Если взять сегмент S115 (левый верхний) и побудить его отражать в соответствии с целью по умолчанию (**Aim to Defaults**) (рис. 9.253), то производимая им сила света будет распределена согласно рис. 9.261. Видно, что полученный результат не слишком удовлетворителен с точки зрения требований к диаграмме. Различие в силе света между верхней и нижней частями диаграммы недостаточно велико. Кроме того, рас-

пределение света не удовлетворяет требованию о том, чтобы вверху диаграмма была у́же, чем внизу.

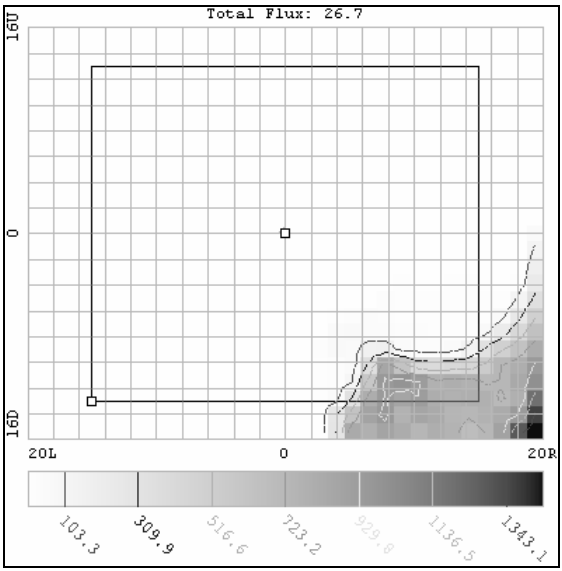


Рис. 9.260. Сила света сегмента S116, расположенного на базовой поверхности

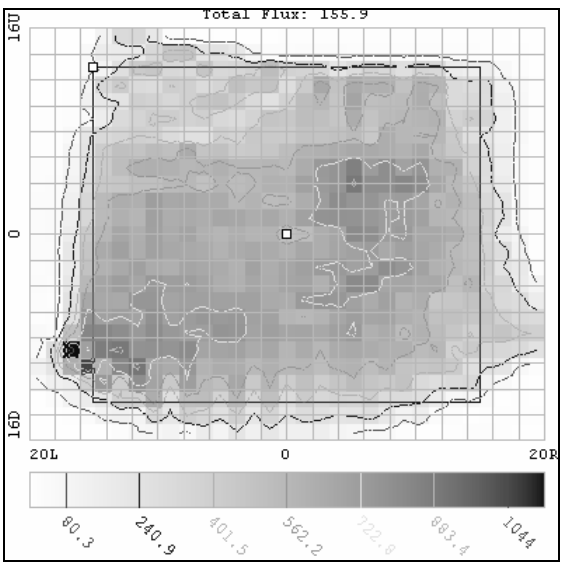


Рис. 9.261. Сила света сегмента S115, спроектированного в соответствии с целью по умолчанию

Для сегмента S110, находящегося в правом верхнем углу, цель модифицируем вручную, приведя ее к трапецеидальной форме, а точку баланса цели (**Aiming Balance Point**) переместим вверх так, чтобы максимум силы света находился несколько ниже желаемой границы области, в которую направлен световой поток. Эти действия оказывают положительный эффект (рис. 9.262). Наблюдаемая вертикальная асимметрия не должна пугать: если слева расположить симметричный сегмент, то суммарная диаграмма станет уравновешенной.

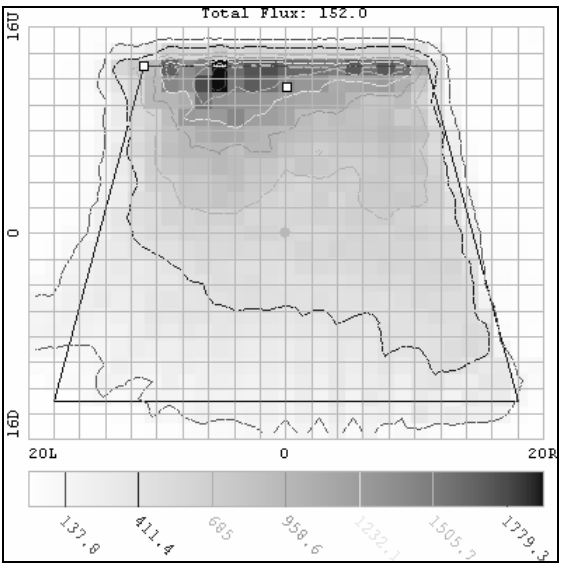


Рис. 9.262. Сила света сегмента S110, спроектированного в соответствии с целью, назначенной оператором

Получив удовлетворительный результат для некоторого сегмента в верхней полуплоскости, развиваем успех. Для этого создаем симметричный ему относительно оси X сегмент без сохранения симметрии точек цели (т. е. он должен светить туда же, куда и его предок). Настройки команды построения зеркальной копии показаны на рис. 9.263, а результирующая диаграмма изокандел — на рис. 9.264. Видно, что эта и предыдущая диаграммы имеют значительное сходство. Более того, линии, находящиеся на границах сегментов, практически совпадают (это диагностируется по рис. 9.259). Последний факт имеет причиной то, что, во-первых, верхний сегмент создавался, начиная с вершины, лежащей на оси X, а во-вторых, что программа корректно выполнила преобразование.

В заключение этапа работы с пробной моделью покажем ее вид в пространстве. Для этого нужно подать команду **Generate 3D View** (Отобразить трехмер-

ный вид), после чего настроить параметры отображения и повернуть модель для получения наглядного изображения (рис. 9.265). Обратим внимание, что на лампе, показанной габаритным цилиндром, закраской отображается распределение испускаемого светового потока.

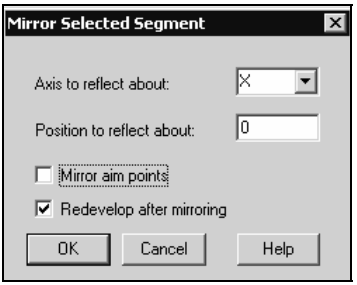


Рис. 9.263. Построение симметричного относительно оси X сегмента с сохранением точки цели

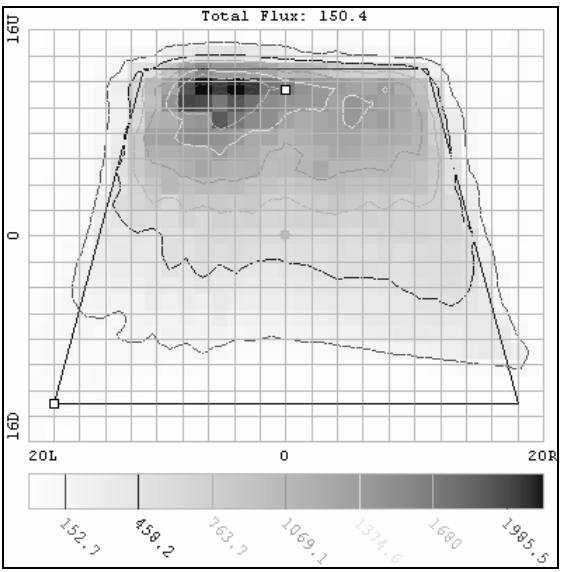


Рис. 9.264. Сила света сегмента S119 симметричного S110 относительно горизонтальной оси

Используя навыки, выработанные на тестовых моделях, приступим к проектированию фары, причем на первом этапе попробуем присвоить всем сегментам идентичные цели (см. рис. 9.253). Тогда последовательность действий следующая:

1. Назначаются параметры базовой поверхности (исходя из предполагаемых габаритов фары и соображений здравого смысла).

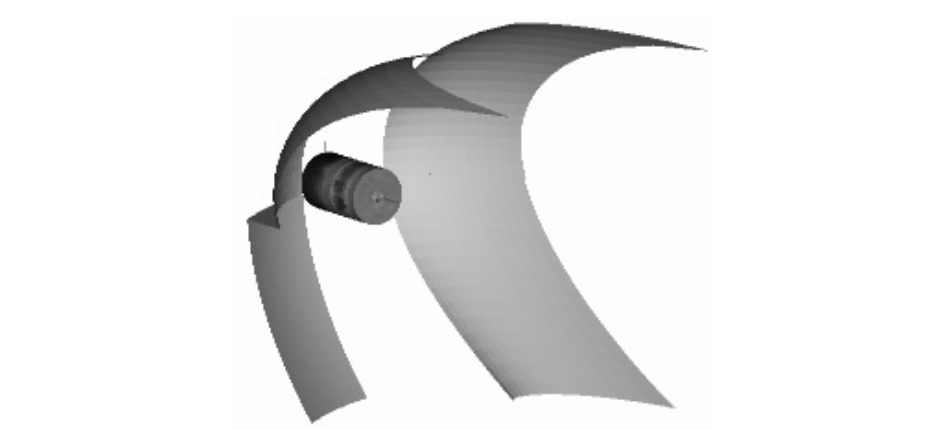


Рис. 9.265. Вид модели из четырех сегментов и источника света

2. Назначается источник света, который позиционируется так, чтобы центр нити накала лампы находился на оптической оси конструкции (это делается постольку, поскольку на данном этапе нет аргументов в пользу смещения спирали). Координата спирали вдоль оптической оси на первом этапе подбирается исходя из эмпирических соображений.
3. Сегментами заполняется один из квадрантов области, занимаемой конструкцией. Для каждого сегмента корректируется четырехугольник цели и точка баланса.
4. Выполняется зеркальное отображение всех сегментов относительно вертикальной оси, сопровождаемое зеркальным преобразованием цели. Затем производится зеркальное отображение всех сегментов относительно горизонтальной оси с сохранением цели.

В итоге получаем фронтальный вид рефлектора с линиями уровня, подобный показанному на рис. 9.266.

Помимо параметров формы сегментов есть другие степени свободы, влияющие на функциональность. В рамках данной программы это тип базовой поверхности, радиус ее кривизны, положение и ориентация лампы. Совместное их рассмотрение с одновременным подбором формы сегментов является, если пытаться использовать математически строгие алгоритмы, крайне сложной задачей. Эмпирические же методики являются своего рода искусством и неформализуемы. Попытаемся найти золотую середину. Примем следующую последовательность действий. На первом этапе для некоторой комбинации числовых параметров (они должны удовлетворять соображениям конструктивной реализуемости) спроектируем подходящий сегментный рефлектор. После этого будем подбирать комбинацию остальных переменных проектирования, руководствуясь более-менее строгими критериями. Ограничим но-

менклатуру параметров проектирования радиусом кривизны, осевой координатой нити лампы, а также углом поворота относительно оси. Поскольку распределение силы света должно быть симметричным относительно вертикальной плоскости, то угол поворота может равняться нулю или 90 градусам (несмотря на то, что центр нити накала мы разместили на оси, контакты к нити образуют зоны затенения). Далее выполняем расчет вариантов с дискретным варьированием осевой координаты и радиуса кривизны. Программа способна автоматически обновлять все сегменты (команда **Segment | Redevelop All Segments**) с сохранением области цели и точки баланса. Природа задачи и алгоритма, реализованного в программе, такова, что варьирование радиуса кривизны не приводит к существенным изменениям в геометрии сегментов (они смещаются с базовой поверхности, а форма их подбирается программой так, чтобы получить заданное распределение силы света). Бóльшую чувствительность конструкция проявляет к положению источника света. Целевая функция образована двумя составляющими: полной величиной светового потока и максимальным значением силы света. Мы не формулируем здесь строгий критерий оптимальности (в том числе и потому, что эти две величины взаимосвязаны), однако пожелания таковы: лучшая конструкция та, где при "большом" световом потоке максимум силы света достигает наибольшего значения.

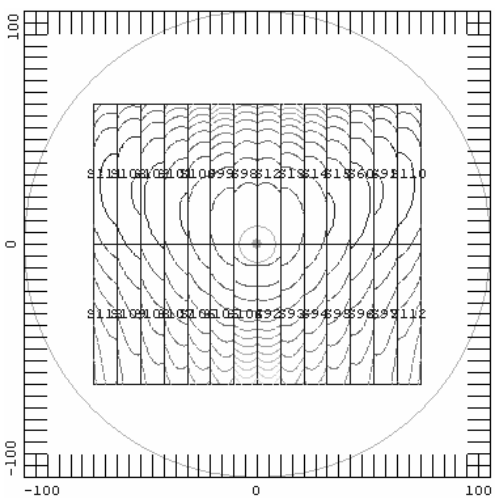


Рис. 9.266. Условное изображение рефлектора с заданным распределением силы света

Результирующая диаграмма силы света для спроектированного на основе этих соображений рефлектора показана на рис. 9.267. Обратим внимание на такие моменты. Полный световой поток, который отражен рефлектором и попал в область диаграммы, равен 1 115 лм, что меньше светового потока,

излучаемого лампой — 1 380 лм. На диаграмме присутствуют два локальных максимума, расположенные симметрично вертикальной оси сверху.

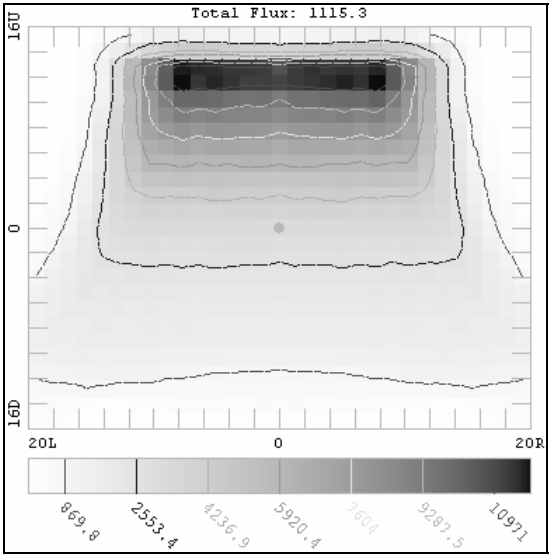


Рис. 9.267. Распределение силы света для проекта рефлектора

Геометрическая модель рефлектора показана на рис. 9.268. Видно, что сегменты имеют значительную кривизну в горизонтальных плоскостях, а между сегментами присутствуют достаточно большие межсегментные перегородки. Наименее удачной является форма сегментов, примыкающих к вертикальной плоскости симметрии. Сверху они образуют впадину, а снизу — большой выступ. И то и другое делают конструкцию весьма нетехнологичной и малоэстетичной.

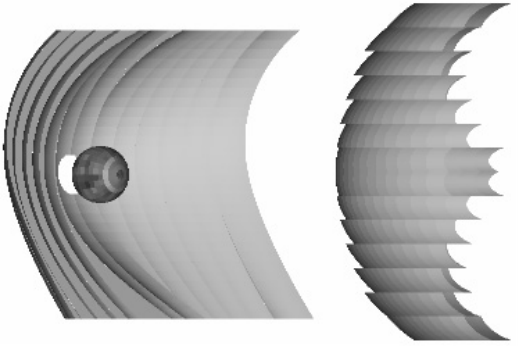


Рис. 9.268. Модель сегментного рефлектора с заданным светораспределением — аксонометрическая проекция и вид сверху

Тем не менее исследуем светотехнические параметры конструкции более подробно.

Для этого экспортируем геометрическую модель отражателя в TracePro, вставим реалистичный источник света и выполним расчет. При помещении лампы в модель TracePro следует обращать внимание не только на ее координату вдоль оптической оси, но и на то, что в библиотеке источников света TracePro степень подробности их моделирования такова, что учитывается и смещение центра спирали относительно оси. Поскольку в модели ReflectorCAD спираль находилась на оси, то и здесь следует воспроизвести это обстоятельство.

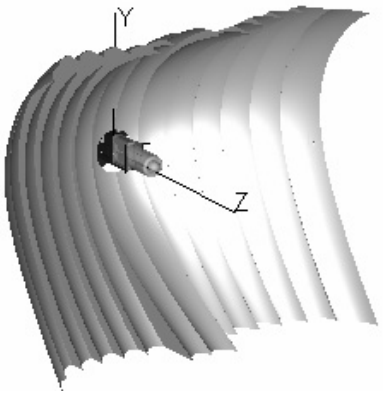


Рис. 9.269. Расчетная модель фары в TracePro

В ходе передачи поверхностной информации в TracePro возникают серьезные интерфейсные проблемы (подробности в следующем разделе). Получив модель (рис. 9.269), выполняем расчет с достаточной (200 000 лучей) точностью. Результирующая диаграмма изокандел показана на рис. 9.270.

Выделим причины появления определенных отличий между диаграммами из TracePro и ReflectorCAD. Учтем здесь, что в TracePro световой поток от спирали лампы составляет номинальную для ламп типа H1 величину 1 550 лм. Наиболее значимым фактором является несоответствие между алгоритмами расчета в этих программах. TracePro базируется на непоследовательной трассировке лучей. При этом в модель включаются абсолютно все объекты и явления. Несоответствие между реальностью и расчетом возникает исключительно из-за некорректного описания геометрии и неточности в определении характеристик объектов. Более тонкие факторы, в частности, определяющие процесс рассеяния, могут порождать принципиальные различия между моделью и объектом. Последнее в данном примере неактуально. ReflectorCAD, насколько можно судить по описанию и результатам работы программы, использует упрощенную аналитическую модель. Источник взаимодействует

непосредственно с субсегментами, после чего формируется соответствующая этому участку поверхности составляющая светового потока. При этом не учитывается влияние, а если точнее, сам факт наличия межсегментных перегородок, и, более того, сегменты "функционируют" независимо друг от друга и неспособны к взаимному затенению. Эти гипотезы позволяют реализовать эффективный алгоритм оптимизации, что можно сделать только на базе аналитических методов расчета целевой функции. Данные факторы, скорее всего, обуславливают различие в интегральной величине светового потока, попавшего в заданный телесный угол, для TracePro и ReflectorCAD. Несмотря на большую мощность источника света, световой поток, рассчитанный TracePro, меньше, чем у ReflectorCAD. Определенный вклад может внести различие в параметрах источников. В ReflectorCAD это виртуальный точечный источник с интенсивностью, изменяющейся в зависимости от направления в пространстве. В TracePro это реальная лампа, имеющая излучающий цилиндр конечной длины и стеклянную колбу. Несмотря на высокую степень стандартизации автомобильных ламп, конкретные их варианты могут отличаться по размеру спирали.

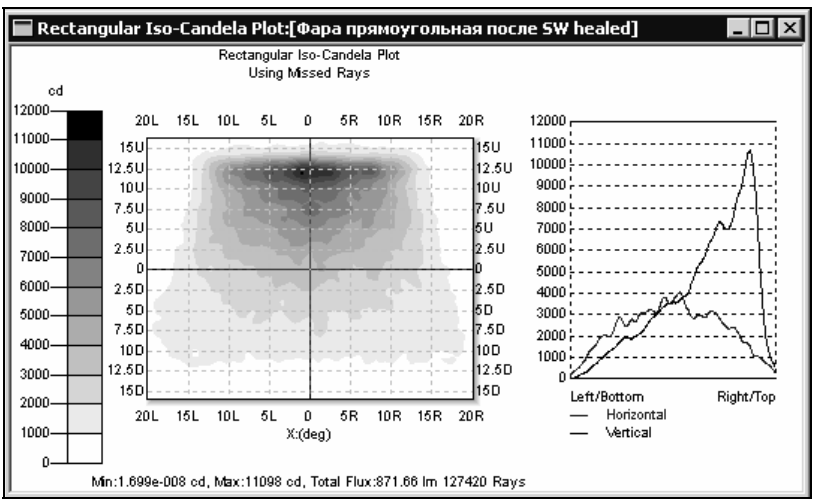


Рис. 9.270. Распределение силы света для проекта рефлектора после расчета в TracePro

Руководствуясь заключением о большей достоверности диаграммы TracePro, будем принимать решения на ее базе. Судя по ней, распределение силы света существенно отличается от желаемого. Прежде всего, это ощутимая неравномерность силы света в горизонтальном сечении. В пределах нормируемой ширины телесного угла она достигает двух раз. Диаграмма имеет выраженный горб на вертикальной оси, причем точки в этом сечении имеют максимальное значение силы света для всех горизонтальных сечений. Второй нега-

тивный момент — недостаточный градиент силы света по вертикали. Это гарантированно приведет к тому, что вместо желаемого увеличения освещенности заданной прямоугольной области при удалении от источника мы получим ее уменьшение.

Попытаемся улучшить характеристики отражателя, внеся минимальные изменения в конструкцию. Как упоминалось, четыре центральных сегмента имеют не слишком удачную форму. Они же обладают не лучшей функциональностью. На рис. 9.271 показана часть светового потока, формируемого сегментом, примыкающим к оси симметрии сверху справа. Максимум силы света смещен относительно верхней границы, да и большая часть светового потока сконцентрирована на широте 11—12 градусов. Попытаемся сосредоточить свет в верхнем правом углу (правый сегмент будет светить вправо). Область цели (рис. 9.272) выполним в виде параллелограмма, правая сторона которого совпадает с границей назначенного телесного угла, а точку баланса расположим вблизи верхней границы. Нижний правый сегмент возле оси симметрии получим зеркальным отражением геометрии с сохранением точки баланса, а затем оба этих сегмента отобразим относительно вертикальной оси, сопровождая это преобразованием точки баланса.

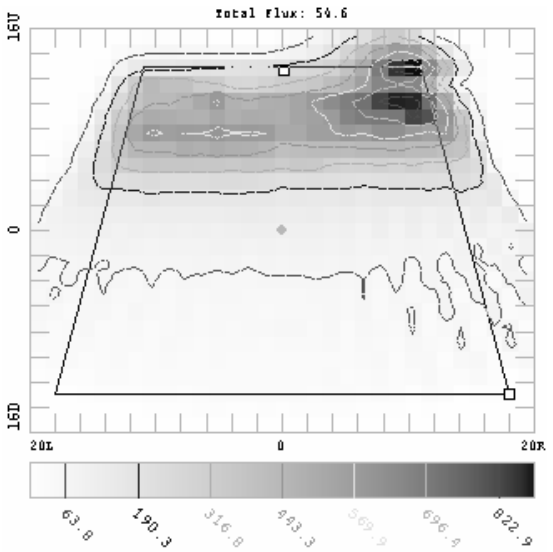


Рис. 9.271. Распределение силы света правого центрального верхнего сегмента

Результирующая диаграмма силы света показана на рис. 9.273. При сохранении положения максимумов произошел их рост с 11 000 до 13 000 кандел. Одновременно световой поток в большей степени сконцентрировался возле границ заданной области. На первый взгляд, это уводит нас в сторону от кри-

терия оптимальности — желательно получить такое распределение силы света, чтобы по ширине области она была постоянна. Однако, прогнозируя тенденции, выявленные при расчете предыдущей модели в TracePro, смещение максимумов в стороны от оси симметрии, будет нивелировано в более подробной модели.

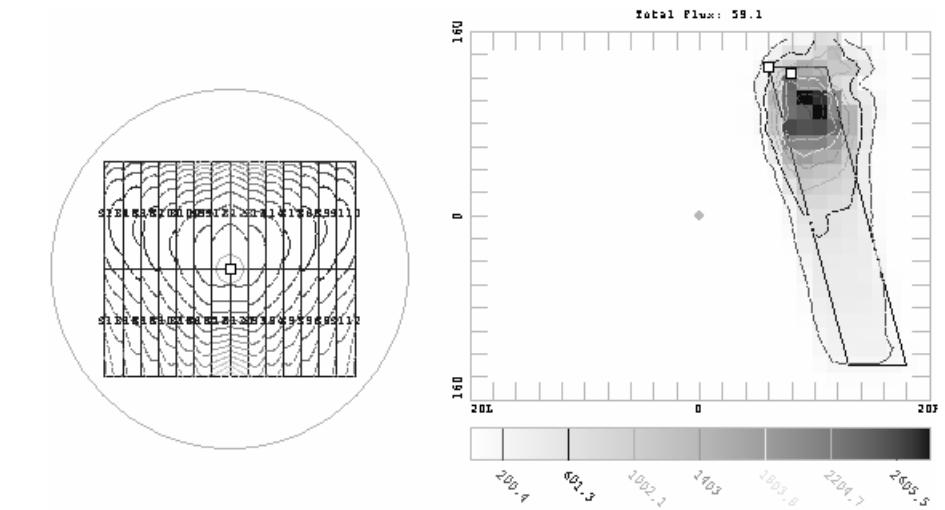


Рис. 9.272. Распределение силы света модифицированного сегмента

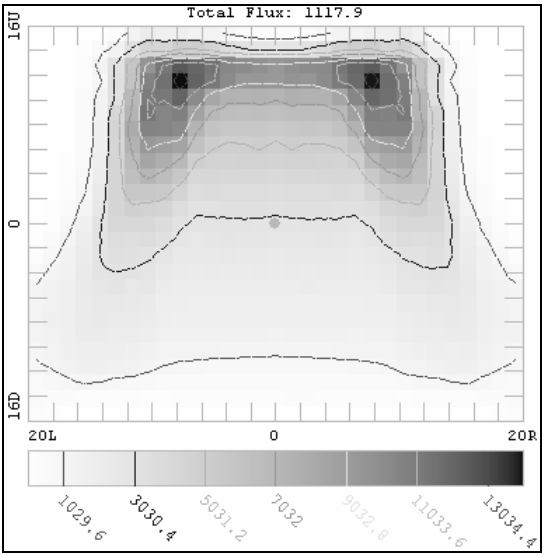


Рис. 9.273. Сила света модифицированной фары

Геометрическая модель отражателя показана на рис. 9.274. Налицо определенное улучшение формы центральных сегментов. Показатель — уменьшение площади межсегментных перегородок, что наиболее выражено у нижней пары сегментов. Это результат того, что размещение сегмента и области цели по одну сторону от вертикальной плоскости привело к тому, что программа сориентировала нормаль к поверхности сегмента в сторону от оси симметрии, а также уменьшила его кривизну в горизонтальной плоскости.

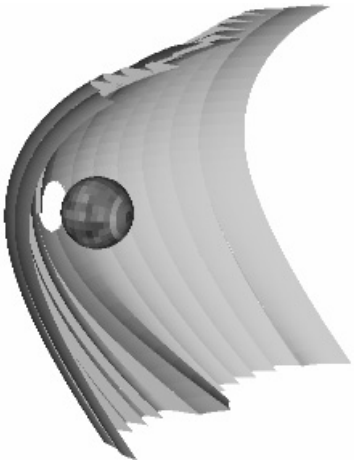


Рис. 9.274. Геометрическая модель модифицированного отражателя

Перенеся поверхности в TracePro (здесь мы еще раз откладываем обсуждение интерфейсных проблем), поместив источник света, выполняем "полноценный" оптический анализ. Полученная диаграмма изокандел показана на рис. 9.275. На ней также наблюдается увеличение доли светового потока возле верхней границы назначенной области (кривая вертикального сечения приобрела больший наклон к горизонтальной оси). Кроме того, выровнялись горизонтальные сечения — это признак того, что по линиям широт сила света распределена более равномерно (в предыдущем варианте в центре горизонтального сечения имелся глобальный максимум, здесь же он стал локальным).

До сей поры как при расчете в ReflectorCAD, так и в TracePro, предполагалось, что поверхность рефлектора является идеальным отражателем. Попытаемся уловить тенденции, сопровождающие увеличение рассеяния. На диаграмме рис. 9.276 показаны результаты расчета при внедрении в поверхность рассеяния и незначительного (5 %) поглощения. Эти параметры соответствуют не слишком качественной отражающей поверхности. Абстрагируясь от абсолютных величин, выделяем два ожидаемых, в общем, момента. Первый,

скорее положительный, — распределение силы света в горизонтальном направлении стало более равномерным. Второй, менее желательный, — градиент силы света по вертикали уменьшился. Эти неизбежные в реальности явления необходимо минимизировать. Тогда процесс управления оптическими характеристиками изделий станет более эффективным — данная задача решаема только с качественными отражателями.

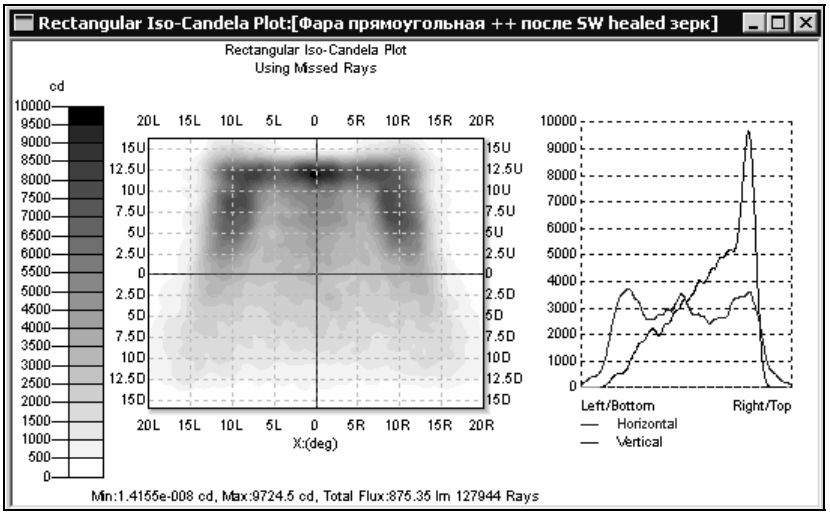


Рис. 9.275. Распределение силы света модифицированного рефлектора после расчета в TracePro

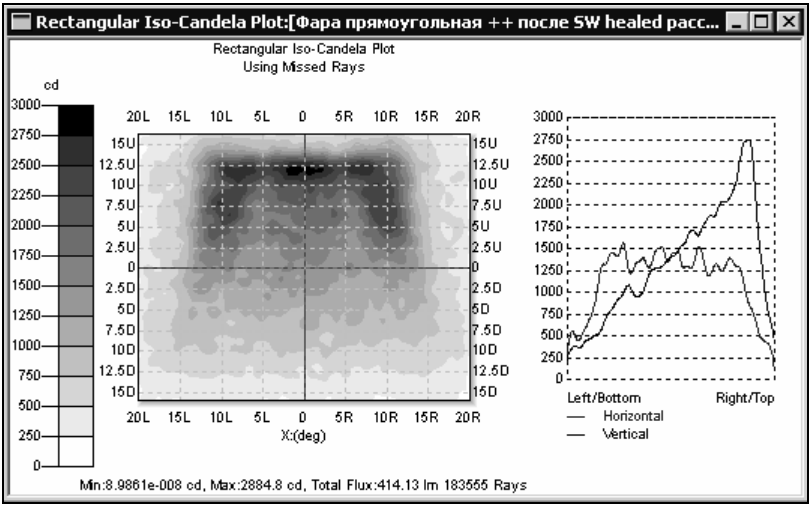


Рис. 9.276. Сила света модифицированного рефлектора с учетом рассеяния

Доработка конструкции и решение интерфейсных проблем

Опишем процесс передачи информации из ReflectorCAD в TracePro. Ранее мы его опустили по причине того, что он не имеет непосредственного отношения к светотехнике. В практическом же использовании программ различных производителей эта процедура является обыденной. Поэтому материал данного раздела может быть полезен пользователям многих расчетных программ. Для передачи геометрии из ReflectorCAD в используемые нами программы можно воспользоваться только форматом IGES. Очевидный шаг — попытаться считать данные непосредственно в TracePro. Результат показан на рис. 9.277. Система не сумела идентифицировать факт наличия единого объекта: каждый сегмент и межсегментная перегородка является отдельным объектом. Если присмотреться внимательнее (рис. 9.278), то будут заметны щели (зазоры) между сегментами и перегородками между ними. Здравый смысл заставляет предположить, что если есть зазоры, то могут быть и пересекающиеся грани. Это, в общем-то, некритично: часть лучей остановится, не дойдя до цели, и вклад этих дефектов в результирующую погрешность будет весьма незначителен. Более весóм другой факт: отсутствует отверстие под лампу, а все, что о нем напоминает, — круговой контур, имеющий, кстати, разрыв.

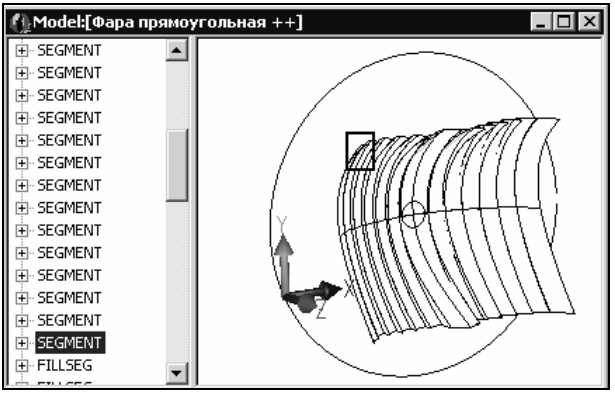


Рис. 9.277. Результат экспорта из ReflectorCAD в TracePro



Рис. 9.278. Левый верхний угол импортированной в TracePro модели: зазор между гранями

Попытаемся использовать функциональность TracePro для лечения объекта. Как упоминалось, в программе имеется функция **Healing** (Лечение), которая оперирует с объектами. В нашем случае число объектов равно числу поверхностей, поэтому соединяем все их в один объект командой **Combine** (Объединить). Как и следовало ожидать, в процессе лечения диагностировано наличие дефектных смежных кромок, более того, все закончилось прерыванием команды с сообщением об ошибке геометрического ядра ACIS. Если более внимательно присмотреться к модели, то обнаружится, что четыре перего-

родки имеют серьезные дефекты (рис. 9.279). Источник явления в том, что контуры граней являются пересекающимися замкнутыми кривыми, в силу чего каждый такой сегмент должен быть представлен, как минимум, двумя гранями. В ходе трансляции система дает сбой. Ни эту проблему, ни дефект, связанный с отсутствием отверстия в TracePro, устранить невозможно. Это характерный пример ситуации, когда доступ к универсальной программе геометрического моделирования с развитыми интерфейсными возможностями абсолютно необходим: расчетные инструменты, даже самые продвинутые, все-таки имеют ограничения. Восстанавливаем модель в SolidWorks, причем на первом этапе пытаемся включить автоматическое сшивание поверхностей. В Дереве конструирования SolidWorks возникает импортированный объект с ошибками. Попытка его скорректировать — на сей раз командой SolidWorks **Исправить** с последовательным заполнением зазоров и исправлением граней — позитивного результата не имеет. Причина все та же: терапевтические процедуры здесь бесполезны. Поэтому возвращаемся назад, считывая на сей раз модель без сшивания (параметры импорта приведены на рис. 9.280).

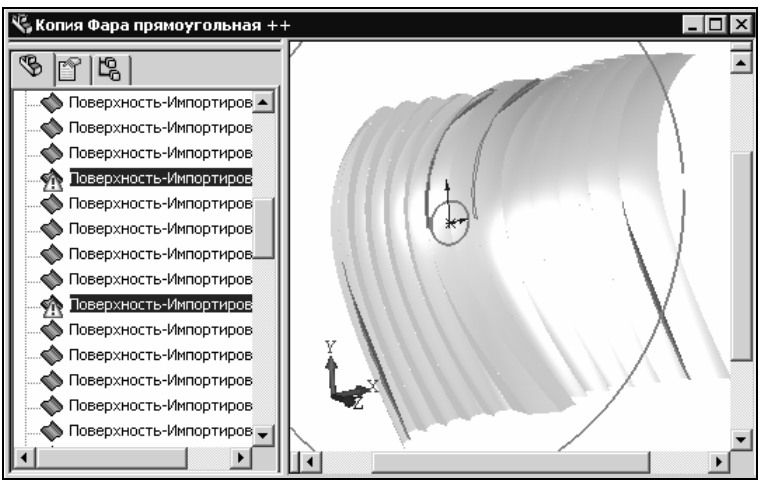


Рис. 9.279. Дефектные перегородки

Удаляем неприемлемые поверхности, а затем пробуем получить новую перегородку на базе имеющихся кромок как **Поверхность по сечениям**. Из-за того, что область, ограниченная кромками, неодносвязная (кромки пересекаются), то команда не выполняется. Приходится использовать алгоритм, пригодный для самого общего случая. Создаем плоскость, проходящую через перегородку (используя для этого вершины, которые должны лежать на сегменте), проецируем прилегающие кромки на эскиз в этой плоскости, обрезаем проекции так, чтобы получить замкнутый контур, и создаем плоскую

грань (рис. 9.281). Для представления поверхности в SolidWorks выбран режим **Каркасное представление**, поэтому структура сегмента (наличие субсегментов) стала видима.

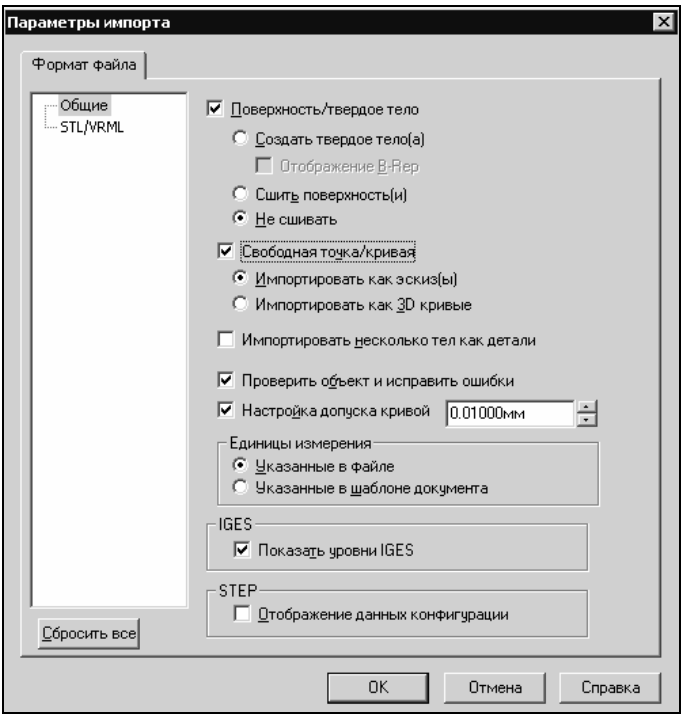


Рис. 9.280. Параметры импорта модели без сшивания

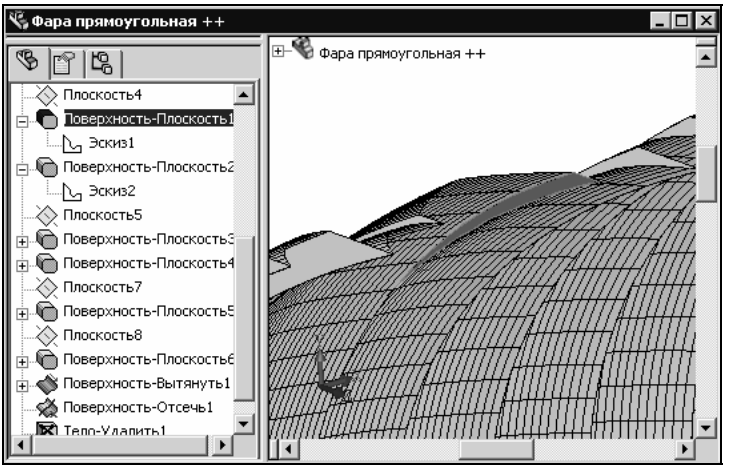


Рис. 9.281. Участок новой перегородки

Повторив эту последовательность, получаем набор поверхностей, которые, в принципе, должны были бы образовать единый объект. Однако попытка сшить поверхности в одну посредством одноименной команды SolidWorks терпит неудачу. Здесь приходится признать, что штатные инструменты SolidWorks не в состоянии с разумными затратами эту проблему решить: здесь пришлось бы уничтожать практически все межсегментные перегородки (т. к. даже сшить их с примыкающими сегментами не удается) и построить заново на базе примыкающих кромок.

После выполнения отверстия модель из SolidWorks передаем в TracePro, используя для этого формат ACIS (IGES опять оказывается неэффективным), после чего соединяем поверхности в единый объект и "лечим" его. На сей раз эта манипуляция оказывается успешной — проверить это можно, передав модель назад в SolidWorks, где она будет воспринята (при активизации опции автоматического сшивания) как единая поверхность. Не слишком приятным побочным результатом трансляции через формат ACIS явилось расчленение поверхностей сегментов на поверхности, каждая из которых соответствует субсегменту. Однако ни с точки зрения объема памяти, ни объема вычислений, критическим обстоятельством это не стало.

Имея монолитный объект, можно за один прием назначить ему оптические характеристики, затем вставить в расчетную модель источник и выполнить расчет. Результат трассировки лучей приведен на рис. 9.282. Не самый надежный, но весьма показательный критерий непрерывности поверхности — отсутствие лучей "просачивающихся" через щели между несшитыми гранями. Здесь они отсутствуют.

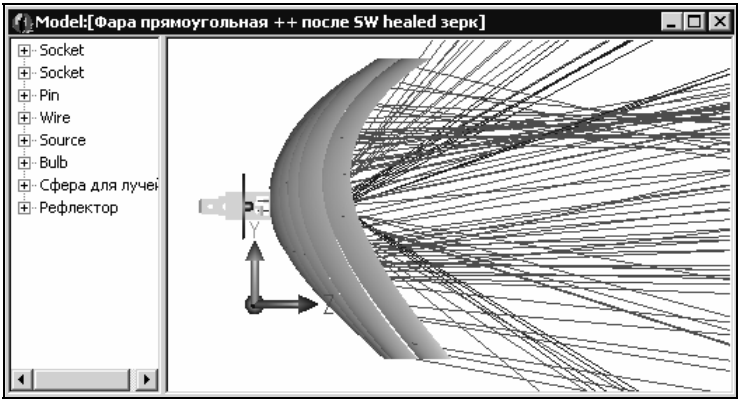


Рис. 9.282. Траектории лучей — вид сбоку

Резюмируем факты и суждения на тему передачи геометрии между оптическими программами и САПР. При использовании промежуточных форматов

типа IGES, реже ACIS и Parasolid, возникают интерфейсные проблемы, связанные с различием точности представления геометрии в различных программах. Расчетные модули, даже при наличии процедур автоматической корректировки, не всегда в состоянии довести геометрическую модель до приемлемого качества. Для этого следует иметь универсальные CAD-продукты. Однако они тоже не всегда являются панацеей. Поэтому чем шире номенклатура имеющихся программ, тем лучше. Есть, конечно, системы, ориентированные на доработку моделей, но полезными являются и те, для которых исправление ошибок есть побочная функция. Как упоминалось, помимо рассмотренной ранее TracePro, характерным примером является COSMOSDesignSTAR, в котором присутствует процедура импорта геометрии из Catia V5. Поскольку внутренним представлением модели в расчетной программе является Parasolid, то после считывания геометрия может быть передана в универсальные CAD типа SolidWorks, SolidEdge, TopSolid, T-Flex и т. д.

Функционирование фары в контексте конструкции

Проверим, как спроектированная фара работает в контексте конструкции. Поскольку трактор будет иметь несколько фар, то лучше создать соответствующий источник света (процедура описана в *разд. 9.6.2*), а затем использовать в модели не реальные устройства, а их виртуальные аналоги. Они будут представлять собой совокупность лучей, испущенных изолированной фарой. Затем командой **Insert** | **Source** вставляем источник света в модель. В процессе вставки программа запрашивает координаты точки, куда будет помещено начало координат источника. Можно сразу ввести требуемые величины, но для того, чтобы сделать процедуру более понятной, оставим нули. Система координат модели, в которую будут собираться источники, показана на рис. 9.283. Источник в тонированной модели мы не видим, поскольку он находится в начале координат.

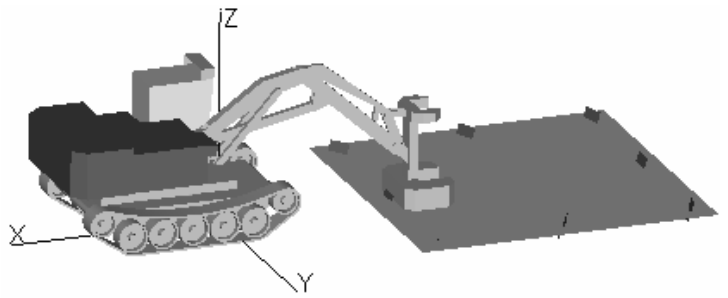


Рис. 9.283. Система координат модели

Если отобразить сцену в каркасном виде, то модель приобретает вид рис. 9.284 (показан фрагмент вблизи имитации фары) слева. Выясняется, что ориентация фары (ось Z — оптическая ось; ось Y направлена вверх) не совпадает с системой координат трактора. Последовательно поворачивая фару относительно осей Y и X модели (команда **Edit** | **Object** | **Rotate**), направляем фару вперед. Параметры преобразований показаны на рис. 9.285 и 9.286 соответственно, а результат — на рис. 9.284 в центре и справа.

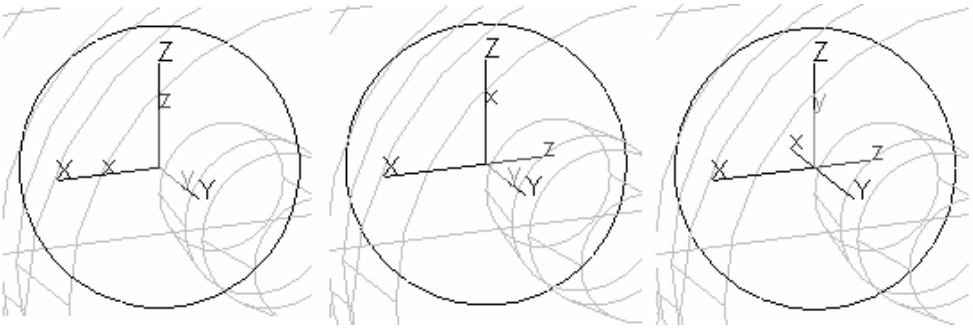


Рис. 9.284. Имитация фары после вставки в модель, а также ход преобразований

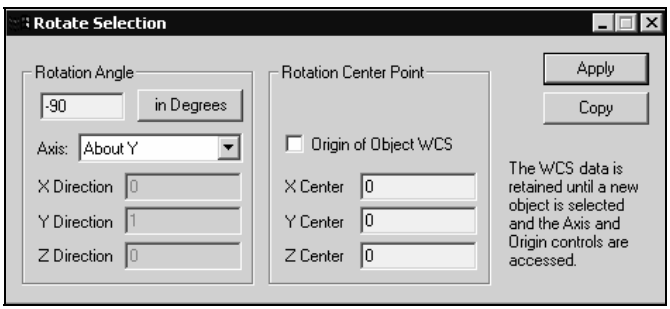


Рис. 9.285. Параметры поворота относительно оси Y

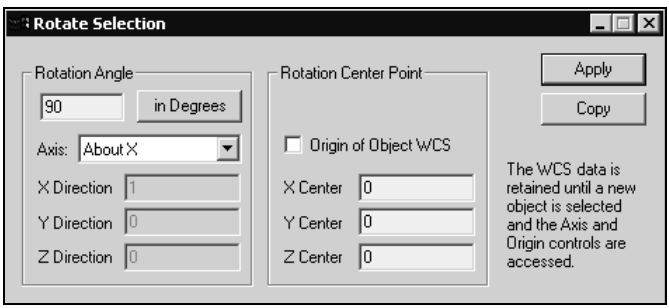


Рис. 9.286. Параметры поворота относительно оси X

Следующее действие — направить оптическую ось фары вдоль оси телесного угла, на базе которого проектировался источник (рис. 9.247). Для этого нужно повернуть фару на –28,8° относительно оси Y трактора — это угол, который ось телесного угла составляет с горизонтальной плоскостью. Настройки команды поворота показаны на рис. 9.287, а результат — ориентация осей фары относительно трактора — на рис. 9.288.

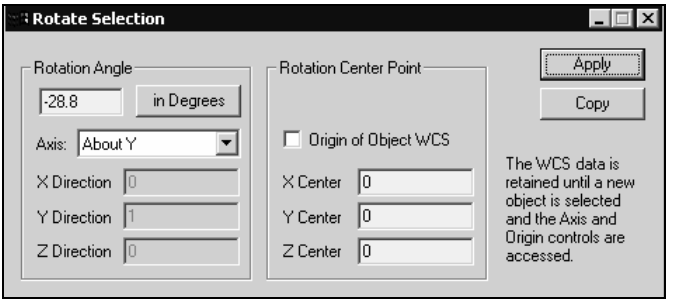


Рис. 9.287. Параметры поворота относительно оси Y при совмещении оси фары с биссектрисой телесного угла

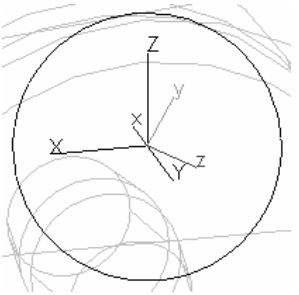


Рис. 9.288. Ориентация осей фары

Последний шаг на этапе установки фары — помещение ее в назначенное место конструкции. На первом этапе, чтобы результаты были более наглядными, соблюдая требуемую высоту установки фары, расположим ее симметрично относительно части площадки, для которой разрабатывался проект. Для этого используем команду **Edit** | **Object** | **Move**. Ее параметры показаны на рис. 9.289.

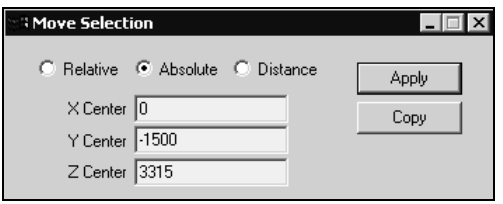


Рис. 9.289. Координаты фары

Далее можно выполнить трассировку лучей. Для экономии вычислительных ресурсов можно ограничить набор объектов, для которых будет собираться информация о попавших лучах (тем самым исключены будут все лучи, которые в итоге попали на другие объекты или ушли за пределы модели). Для этого в окне, вызываемом командой **Define** | **Apply Properties** | **Exit Surface**, активизируем соответствующий флажок. После этого можно запустить расчет в режиме **Simulation Mode**. Результат трассировки лучей показан на рис. 9.290 (для того чтобы лучи показать, необходимо использовать режим

Analysis Mode). Закрашенная сфера, из которой исходят лучи, — это модель виртуального источника.

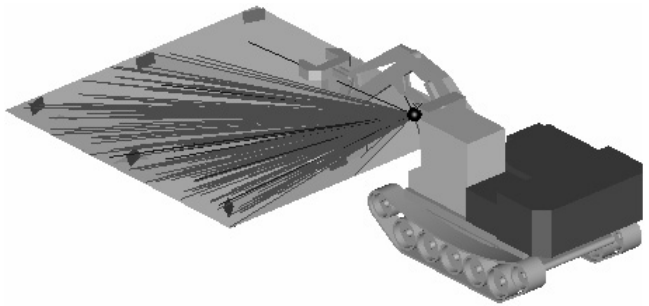


Рис. 9.290. Траектории лучей, испущенных изолированной фарой

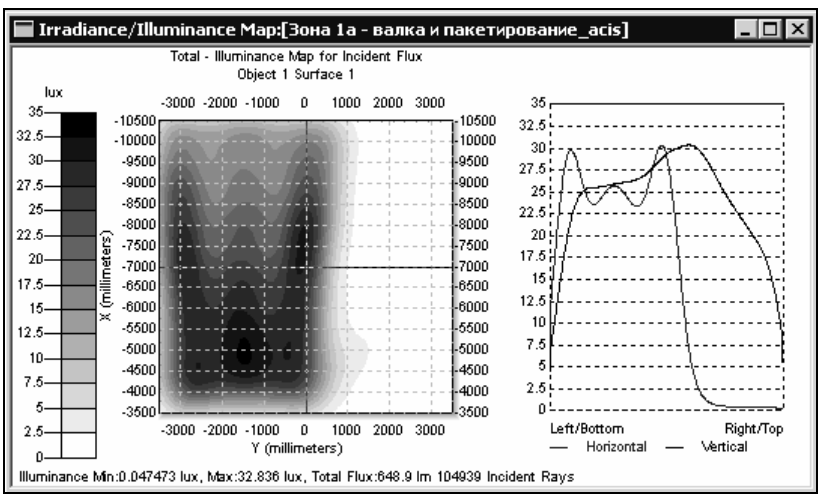


Рис. 9.291. Освещенность рабочей зоны одной фарой без учета тени

На рис. 9.291 показана диаграмма освещенности грунта. Поскольку в расчете не учитывалось наличие трактора, то он и не оставил "следов" на диаграмме. Проанализируем результат. Полного соответствия распределения освещенности заявленным требованиям достичь не удалось. Осредненная по ширине диаграммы освещенность незначительно растет при увеличении расстояния от трактора, только вверху (на удалении 8—9 метров начинается уменьшение освещенности). Мы же хотели, чтобы освещенность росла по мере удаления от источников. Однако достижение даже этого результата можно признать удовлетворительным, поскольку он получен для единственной фары. Есть также неприятный момент, связанный с непостоянством освещенности по ширине. На поперечном сечении диаграммы наблюдается разница поряд-

ка 20 %. Если ослабить принятые условности, сущность которых сводится к тому, что объекты окружения не "работают", а лучи, попав на грунт, поглощаются, то вторичные эффекты могут нивелировать эти различия. Кроме того, если параметры зеркальной поверхности рефлектора сделать такими, чтобы они "повысили" составляющую рассеяния, то освещенность в горизонтальных сечениях должна стать более равномерной.

Сравнивая абсолютные величины с нормативными, убеждаемся, что наибольшее отклонение от требуемой величины освещенности наблюдается в зонах наиболее удаленных от источника: в правом и левом углах. При этом освещенность там примерно в два раза меньше требуемой. В других точках различие меньше. Поставим вторую фару, расположив ее в блоке на кабине справа, а первую перенесем в блок слева. То есть, несмотря на то, что освещать они должны, по сути, одну и ту же зону, мы постарались максимально их разнести. Это сделано, чтобы уменьшить вероятность появления зон тени. Здесь вновь встает вопрос о том, как направлять фары. Мы будем ориентироваться на телесный угол, в котором должен концентрироваться световой поток. Несмотря на то, что у нас уже есть расчетные данные о нем, мы ограничимся использованием той формы угла, которая использовалась при постановке задачи (внутренняя пирамида на рис. 9.248). Располагаем ее в сборке SolidWorks так, чтобы вершина совпала с нитью накала лампы, левый (по ходу движения) верхний угол в основании пирамиды помещаем в точку, где находится датчик, а ребро в основании размещаем в плоскости грунта. Тем самым однозначно определено положение пирамиды и, соответственно, "ось" телесного угла. Зафиксировав ось, можно задать углы, которые она составляет с плоскостями системы координат. Согласно описанной выше методике, можно направить источник вдоль этой оси. Эти операции проделываем для обеих фар.

Учтем наличие рабочих органов трактора, присвоив всем его поверхностям свойства абсолютного поглощения. В результате получаем картину освещенности согласно рис. 9.292. Она представляет, по сути, "удвоенную" диаграмму для единственной фары.

Продолжим вставлять источники. Для освещения левой половины рабочей зоны размещаем фары в блоке перед двигателем. Поскольку высота, на которой они находятся, почти в полтора раза меньше, чем у левого блока, то для достижения требуемой освещенности пришлось использовать три фары. Это привело к опережающему росту освещенности вблизи трактора, однако достичь норматива удалось и в дальних точках (рис. 9.293).

Приведенная диаграмма получена при активизации режима сглаживания. Для диагностики фактических величин отключим эту опцию. Абсолютные величины освещенности грунта и площадок, нормальных направлению света (в связи с распределенным в пространстве расположением источников света

площадки ориентированы нормально лучам, выходящим из точки, расположенной в центре машины сверху), приведены на рис. 9.294. Все требования, нормирующие минимальные значения освещенности, удовлетворены.

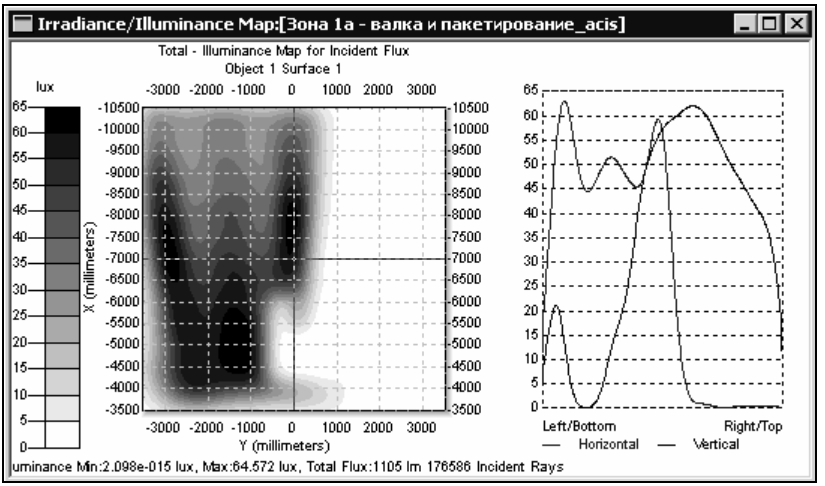


Рис. 9.292. Освещенность рабочей зоны двумя фарами с учетом тени

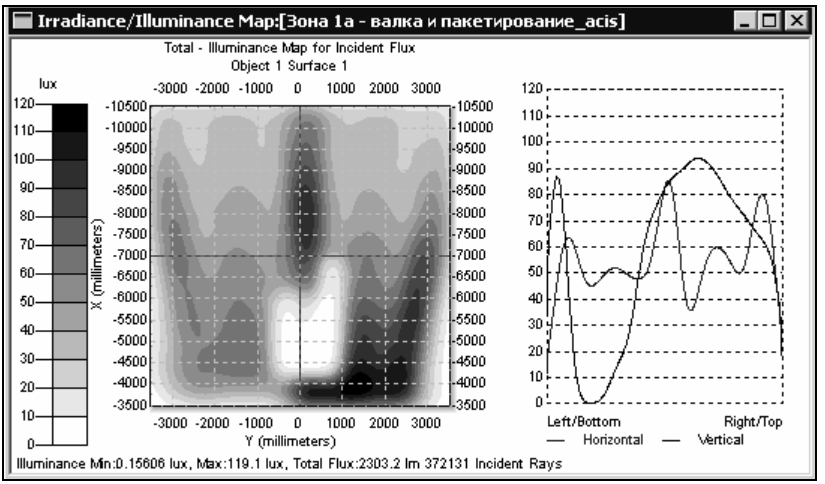


Рис. 9.293. Освещенность рабочей зоны пятью фарами, расположенными слева и справа

Завершим анализ тем, что попытаемся оценить влияние перераспределения света за счет взаимодействия с окружением. Присвоим всем поверхностям модели трактора параметры, соответствующие глянцевой белой краске. Она характеризуется низким (10 %) поглощением и достаточно "концентрирован-

ным" отражением. Интересующая нас освещенность (рис. 9.295) вдали от оператора, по сути, не изменилась, а вот в непосредственной близости от трактора увеличилась почти в полтора раза. Понятно, что произошло это за счет отражения света от поверхностей рабочих органов. Это не слишком хороший эффект: возможно появление бликов, оказывающих — на фоне недостаточной яркости удаленных объектов — слепящее воздействие на оператора.

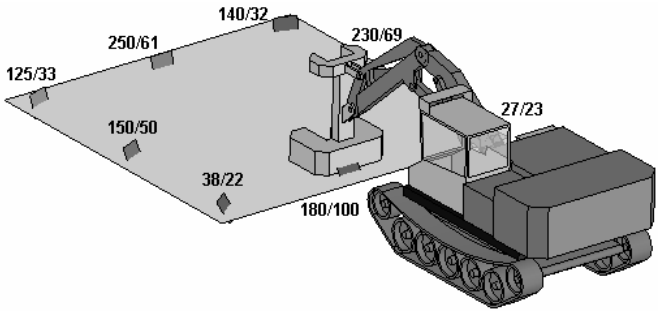


Рис. 9.294. Прогнозируемые величины освещенности в направлении луча и в вертикальном направлении

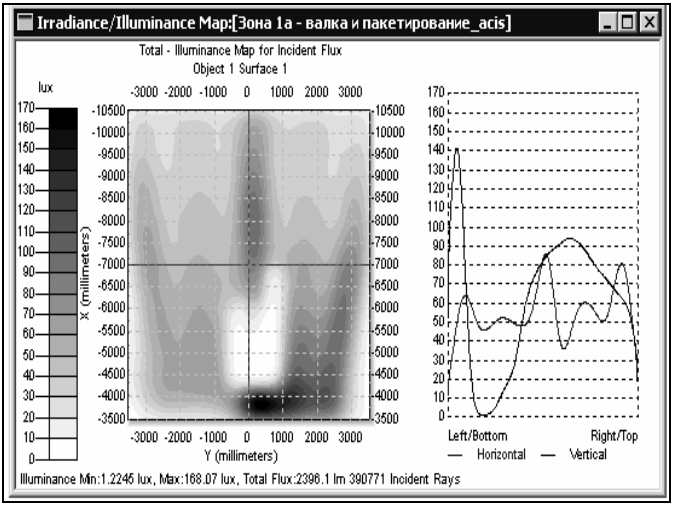


Рис. 9.295. Освещенность рабочей зоны при возможности отражения света от оборудования

Выводы

В данном разделе описана задача проектирования фары применительно к назначенным нормативам распределения освещенности. Светотехническое проектирование выполнялось в программе ReflectorCAD для трансляции геомет-

рической информации, а также для создания модели техники и рабочей зоны использовался SolidWorks. Поверочный расчет и анализ функционирования с учетом влияния параметров реальных объектов производился в TracePro. Несмотря на определенные затруднения в реализации интерфейса, полученные результаты демонстрируют возможность совместной эксплуатации подобных программ. Учитывая — при наличии адекватных программных средств — невысокую трудоемкость проектирования сегментных фар, а также наличие современных технологий производства, то можно для большинства ситуаций создавать адекватные осветительные устройства. Они смогут соответствовать техническим требованиям по минимальной освещенности или силе света и, в то же время, будут демонстрировать приемлемую эффективность, понимаемую как приемлемое превышение нормируемых снизу значений.

9.7. Выводы

Рассмотренные программы светотехнического проектирования и анализа являются универсальными инструментами для решения широкого круга задач. Их "экологическая ниша" находится там, где необходимо иметь численную оценку параметров. Эта возможность кардинально отличает их от продуктов типа 3ds max, Maya, Mental Ray, LightWave и других, менее популярных программ, ориентированных, в первую очередь, на визуальную достоверность картинки. С другой стороны, есть немалое число программ, которые решают специфические задачи освещенности помещений, дорог, моделирования наружного освещения зданий. Преимуществом последних является солидная база данных по материалам, источникам света, а также интерфейс, оптимизированный под данные проблемы. Однако при весьма малом отклонении параметров задачи от "оптимальных" для конкретной программы возникают серьезные проблемы. TracePro в состоянии решить практически любую задачу светотехнического анализа. Принципиальное ограничение, в общем, только одно: трудность получения адекватных характеристик материалов и поверхностей. В этой связи применение упомянутых программ рендеринга, на первый взгляд, снимает эту проблему. Однако используемые ими данные имеют весьма малое отношение к физической реальности, маскируя эстетичной картинкой весьма условный результат. Продукты уровня TracePro стимулируют пользователя к объективному восприятию действительности. Они также идеальны для освоения основ оптики и светотехники в процессе изучения соответствующих дисциплин.

Напомним, что при рассмотрении TracePro мы ориентировались на задачи светотехники. Вопросы же, затрагивающие влияние длины волны и температуры на свойства и процессы, были проигнорированы. Здесь остается широкое поле для заинтересованного исследователя.



ГЛАВА 10

Оптимизация работы механических САПР

Системы автоматизированного проектирования, в которые включены модули численного анализа, являются одними из наиболее ресурсоемких программных комплексов. Исторически именно они направляли развитие вычислительной техники. Сложность проблем (иногда не слишком обоснованных), которые хочется решить, почти всегда превосходит возможности компьютеров. Действия пользователя должны быть направлены на достижение компромисса между рациональной эксплуатацией доступных программ и своевременным обновлением технических средств.

10.1. Рекомендации по повышению производительности CAD-систем

Производительность при работе с CAD-системой зависит от аппаратного и от программного обеспечения. Важным фактором является правильная настройка операционной системы и программ, а также корректная реализация моделей и чертежей. Мы будем рассматривать этот вопрос на примере SolidWorks, однако, с учетом поправок на реализацию интерфейса, эти рекомендации в значительной степени применимы для систем "среднего" уровня типа Solid-Edge, AutoDesk Inventor, T-Flex. Для таких систем, как Catia, Pro-Engineer и Unigraphics, изложенные сведения также весьма актуальны.

10.1.1. Аппаратное обеспечение

Сформулируем запросы к аппаратным средствам, необходимым для комфортной эксплуатации геометрических моделировщиков, а также действия по созданию подходящей программной среды.

- Оперативная память — критическим фактором при работе с большими сборками и/или их чертежами является объем оперативной памяти. Адресное пространство Windows 2000 составляет 2 Гбайт оперативной памяти, Windows XP — 4 Гбайт, причем при стандартных настройках только три из них могут использоваться прикладными программами. 1 Гбайт резервируется системой для ядра Windows. Идентифицировать нехватку оперативной памяти достаточно просто, если открыть окно диспетчера задач Windows (рис. 10.1). Ключевыми пунктами в нем являются позиции **Физическая память** | **Всего** (это физический объем, имеющейся в системе оперативной памяти) и **Выделение памяти** | **Всего** (используемый в данный момент объем оперативной памяти). Последняя величина одновременно отображается в окне **Файл подкачки**. Если используемая память превышает оперативную, то происходит резкое замедление обработки информации, из-за чего падает загрузка центрального процессора. Визуально это отображается на кривой загрузки процессора, которая отображается в соответствующем окне. Отметим, что при недостатке оперативной памяти (из-за физической ее нехватки или некорректной настройки программ) никакие усилия по увеличению производительности процессора значимых результатов не принесут.

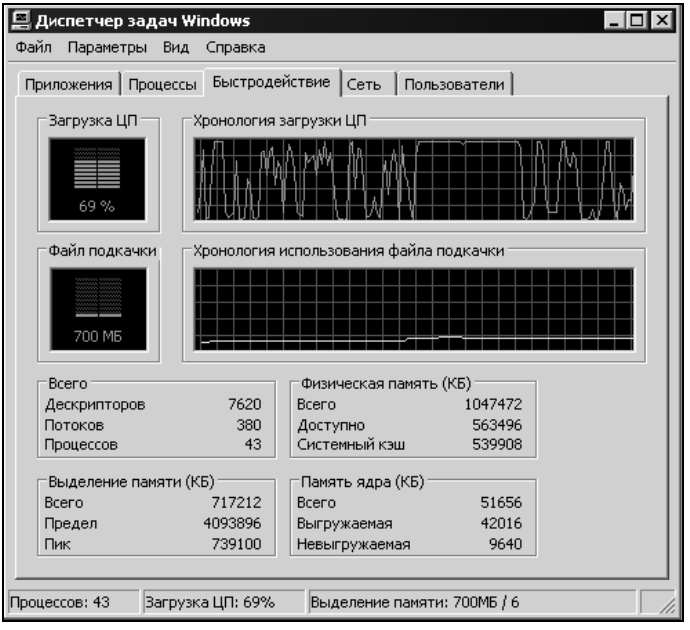


Рис. 10.1. Окно с информацией о ресурсах системы

- Процессор — следующим критическим параметром является производительность процессора. Главной здесь является даже не тактовая частота

(чем она выше, тем, разумеется, лучше), но производительность для математики с плавающей запятой. С этой точки зрения использование процессоров Intel Celeron весьма нежелательно. Кроме того, важно обеспечить соответствие тактовой частоты процессора и частоты системной шины.

- Винчестер — работа с большими сборками и расчеты сопровождаются обменом с дисковой памятью. Эти процессы могут порождаться как SolidWorks и приложениями, так и операционной системой. Разумеется, следует использовать диски и интерфейсы, обеспечивающие наибольшую скорость передачи данных. Наиболее грубым показателем является скорость вращения диска винчестера. Чем она больше, тем лучше. Операционная система использует виртуальную память, локализация и размер которой назначаются в одноименном окне (рис. 10.2), вызываемом из окна **Параметры быстродействия**. Рекомендуется, во-первых, назначить достаточный объем памяти, а во-вторых, использовать для нее самостоятельный жесткий диск, на который следует направить временные файлы SolidWorks (путь настраивается на вкладке **Месторасположение файлов** | **Файл событий**). Перед применением этих настроек крайне желательно дефрагментировать диск, а также не использовать его для других приложений. Что же касается дефрагментации диска, на котором хранятся исходные данные, то она может дать определенный эффект, однако не приводит к дефрагментации памяти виртуальной. Для этого применяются специальные программы.

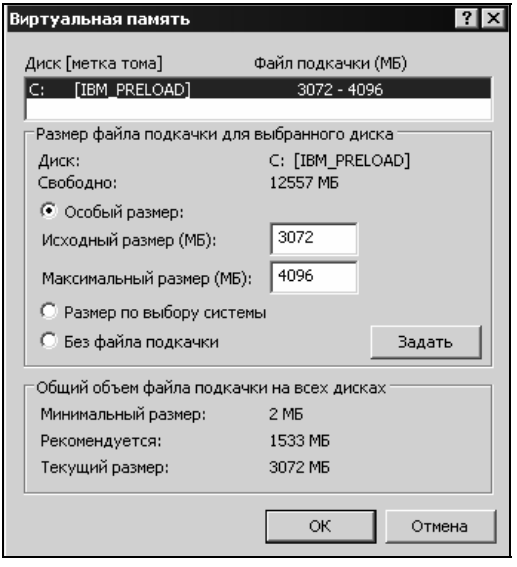


Рис. 10.2. Настройка адреса и размера файла подкачки

- Видеокарта — помимо объема оперативной памяти, критическое снижение быстродействия может произойти при несоответствии параметров аппаратного ускорения устройства и установленных программ. Это, в частности, касается аппаратной поддержки графического языка OpenGL. В SolidWorks она активизируется опцией **Настройки пользователя** | **Качество изображения** | **Использовать программу OpenGL**. Изменение состояния опции возможно только при отсутствии загруженных в SolidWorks объектов. Аппаратное ускорение используется, если флажок снят. Если при отсутствии открытых файлов снять флажок не удается, то причин может быть три:
  - SolidWorks в принципе несовместим с видеокартой по режимам аппаратного ускорения OpenGL;
  - драйвер видеокарты не может взаимодействовать с программой;
  - настройки видеокарты таковы, что они не реализуют аппаратной поддержки OpenGL совместно с SolidWorks. В последнем случае следует установить в максимальное значение ползунковый переключатель **Аппаратное ускорение** на вкладке **Диагностика** окна, отвечающего за состояние видеокарты (рис. 10.3), после чего попытаться снять флажок переключателя **Использовать программу OpenGL**. Отметим, что некоторые другие настройки видеокарты также делают невозможным аппаратное ускорение графики в SolidWorks, а возврат их в состояние "по умолчанию" не приводит систему в исходное состояние. Здесь может помочь только переустановка драйвера карты.

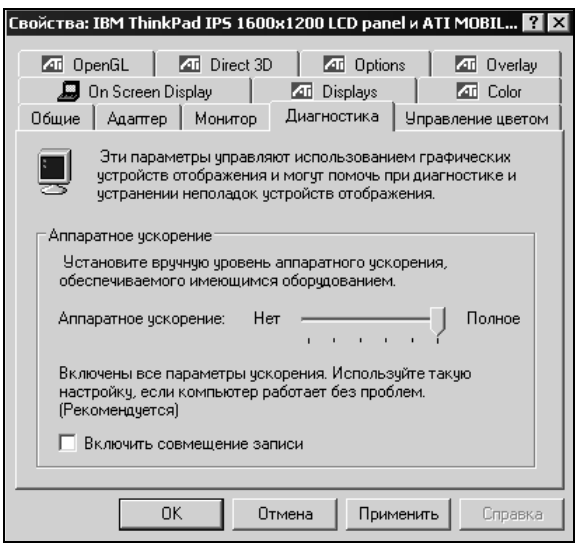


Рис. 10.3. Управление аппаратным ускорением при обработке графики

В спорных ситуациях, связанных с расстановкой приоритетов, в вопросе: "Кто виноват в медленной работе: процессор или графическая система?" выводы можно сделать на основе анализа загрузки процессора. Если оперативной памяти достаточно, то следует выполнить какие-либо манипуляции с моделью или чертежом (перемещение, вращение, масштабирование), и если процессор не загружен полностью, а операции выполняются без существенного замедления, то графическая система имеет достаточную производительность. Если процессор загружен на 100 %, а отклик происходит с запаздыванием, то, скорее всего, процессор выполняет ту работу, которую должна делать видеокарта. Здесь следует учесть, что в режиме закраски большую часть операций должна, как правило, выполнять видеокарта, а в режиме каркасного представления, скрытия невидимых линий, при манипуляциях с чертежами — процессор.

Определенную гарантию корректного функционирования видеосистемы дает использование видеокарт, рекомендованных фирмой SolidWorks. Результаты тестирования некоторых устройств опубликованы на Web-сайте фирмы. Они не содержат информации о производительности, а ограничены перечислением устройств, прошедших и не прошедших тесты, а также рекомендации по использованию драйверов. Надо сказать, что информация на этой страничке обновляется не слишком часто, да и перечень устройств не содержит ряд весьма популярных моделей. Схожие данные о работоспособности видеокарт применительно к TracePro можно найти на сайте фирмы Tech Soft America, являющейся разработчиком графического инструментария для многих CAD-продуктов: **http://www.hoops3d.com**. SolidWorks также использует эти средства. Вообще говоря, запросы к видеосистеме расчетных приложений могут не совпадать с требованиями базовой графической системы, и факт пригодности устройства для отображения моделей и чертежей недостаточен для того, чтобы оно могло корректно воспроизводить графику, сопровождающую расчеты.

10.1.2. Настройки операционной системы

Для оптимизации работы CAD-систем следует максимально исключить использование всевозможных визуальных эффектов в Windows. Ответственной за это является вкладка **Визуальные эффекты** окна **Параметры быстродействия** Windows (рис. 10.4). Тем не менее революционного эффекта изменение этих настроек не дает.

Соображения, связанные с виртуальной памятью, приведены выше. Еще один фактор, который может оказаться значимым, влияние технологии многопотоковой обработки Hyper-threading на производительность. Этот вопрос не был проанализирован авторами, однако наибольшую выгоду эта опция, как пред-

ставляется, может принести только при одновременной работе нескольких программ (например, расчета и просмотра видео). То же касается использования многопроцессорных систем. Для SolidWorks увеличение числа процессоров практически не дает эффекта. Определенная выгода может быть достигнута для расчетных приложений (см. далее).

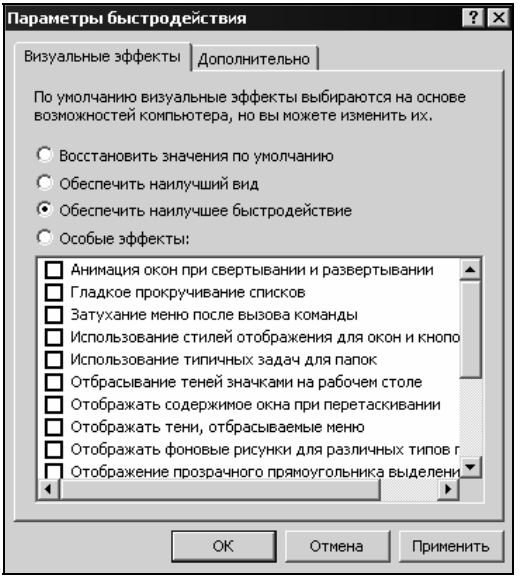


Рис. 10.4. Настройка вкладки **Визуальные эффекты** для повышения быстродействия CAD-систем

10.1.3. Настройки SolidWorks

Настройки, определяющие быстродействие SolidWorks, могут быть универсальными, а также влиять на функционирование программы в отдельных режимах. Они сосредоточены в окне **Настройки пользователя**. Рассмотрим их подробнее.

- Общие настройки — поля, влияющие на производительность во всех режимах, обведены, им присвоены значения, обеспечивающие максимальное быстродействие (рис. 10.5—10.8). Если активен какой-либо расчетный модуль, то настоятельно рекомендуется отключить опцию **Сохранить инфо авто-восстановления...** на вкладке **Резервные копии** во избежание ее активизации в ходе выполняемого процесса. Это может привести к его аварийному завершению. В абсолютном большинстве случаев действие настроек группы **Качество изображения** ограничивается SolidWorks и не влияет на визуализацию в расчетных приложениях. Используемые в них

графические инструменты могут не иметь никакого отношения к оболочке и, более того, требовать отличных от нее настроек для графических карт.

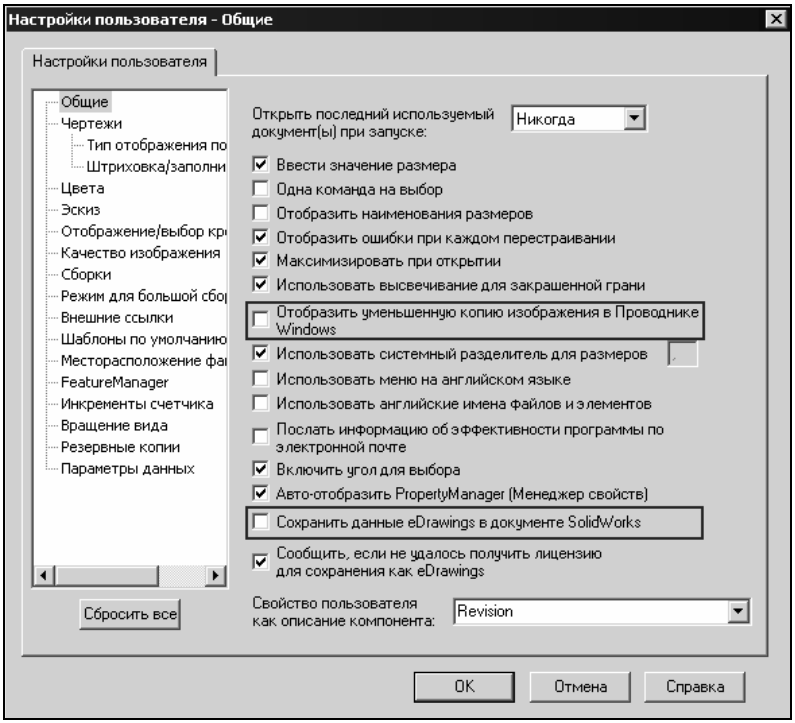


Рис. 10.5. Назначение опций на вкладке **Общие** для повышения быстродействия SolidWorks

- Настройки для режима деталей — для деталей применимы универсальные настройки, которые показаны в предыдущем пункте. Специальные же рекомендации таковы:
  - при создании массивов использовать опцию **Геометрический массив**;
  - создавать скругления одинакового радиуса одновременно;
  - локализовать и устранять ошибки перестроения и ошибки в импортированной геометрии;
  - использовать инструмент **Статистика элемента** для выявления наиболее трудоемких для перестроения элементов, которые затем модернизируются, переводятся (временно) в состояние погашения или перемещаются вниз по дереву, обеспечивая легкость модернизации предыдущих элементов;

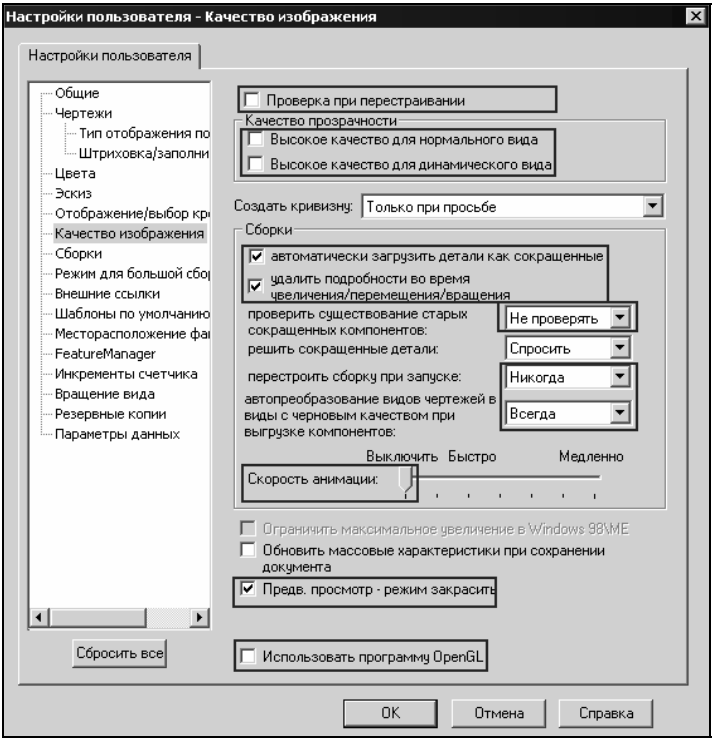


Рис. 10.6. Назначение опций на вкладке **Качество изображения** для повышения быстродействия SolidWorks

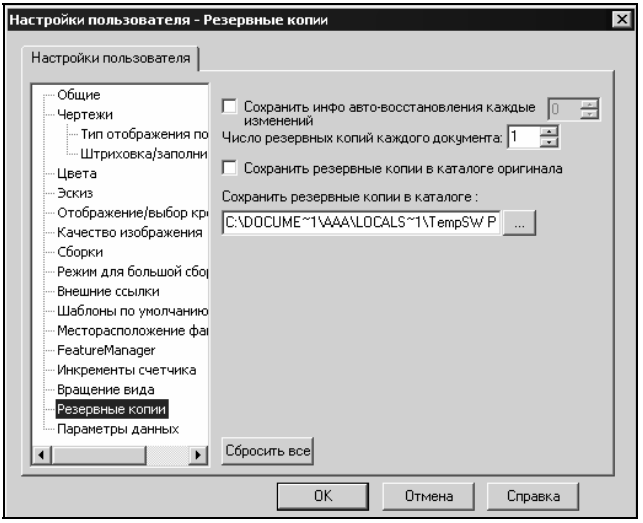


Рис. 10.7. Назначение опций на вкладке **Резервные копии** для повышения быстродействия SolidWorks

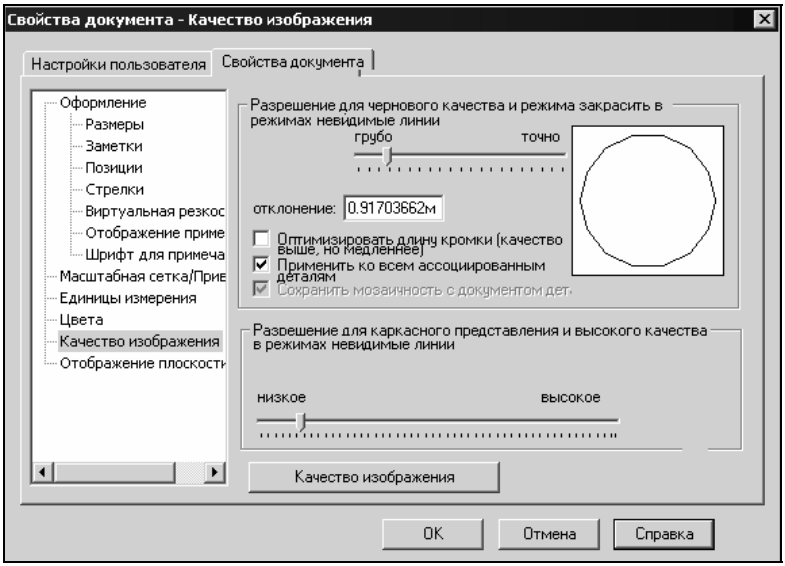


Рис. 10.8. Назначение опций на вкладке **Качество изображения | Свойства документа** для повышения быстродействия SolidWorks

- блокировать или разрывать внешние ссылки (команда **Список внешних ссылок** контекстного меню корневой пиктограммы в Дереве конструирования) на сложные объекты.

❒ Настройки для режима сборки — несколько уменьшить запросы к производительности компьютера можно, работая в режиме **Большая сборка** (рис. 10.9). При этом, с одной стороны, в оперативную память не загружается часть информации, касающейся сборки, а с другой, активизируются опции, определяющие упрощенное изображение при манипуляциях с моделью. Кроме того, можно порекомендовать:

- разделять сборку на узлы;
- устранять ошибки перестроения для деталей и сопряжений.

Обратим внимание на то, что работа в режиме легковесной сборки может привести к некорректной работе расчетных приложений. Поэтому перед активизацией соответствующих модулей следует загрузить все подлежащие анализу детали.

❒ Настройки для режима чертежа — в SolidWorks доступен ряд инструментов для управления соотношением "качество/производительность":

- создание **Отсоединенных чертежей** (в версиях до 2004 года — режим **RapidDraft**), которое позволяет работать в чертеже (с определенными ограничениями в выборе инструментов) без загрузки файлов детали.

Запись в отсоединенном виде не требует параллельной передачи стороннему пользователю модели объекта. Применение данного режима может привести к увеличению размеров файла чертежа;

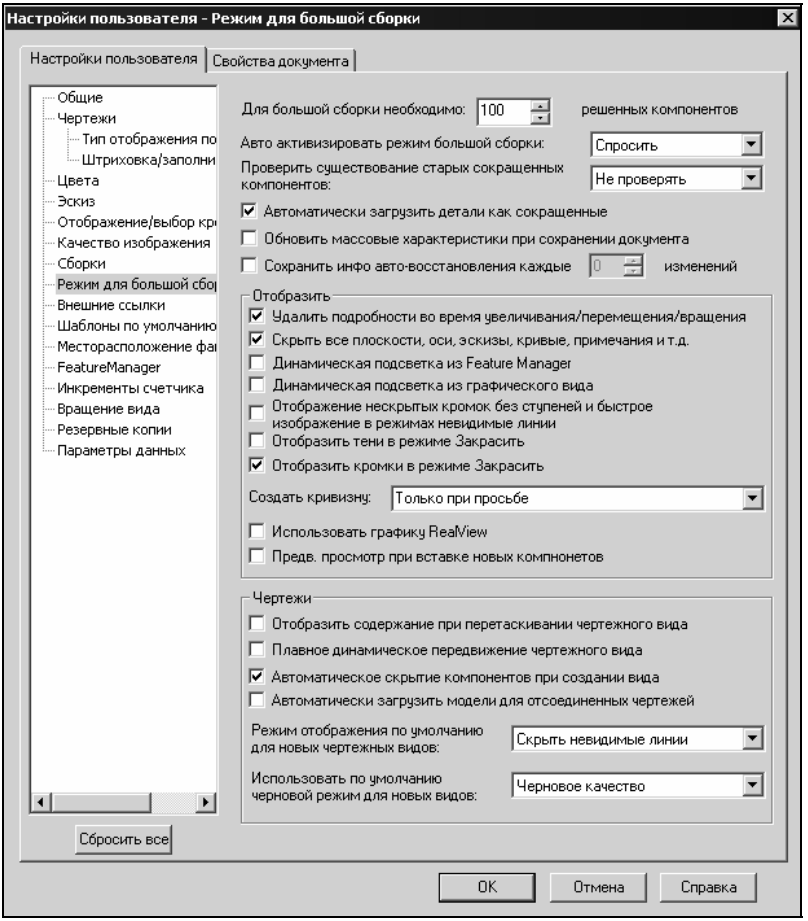


Рис. 10.9. Окно для настройки режима **Большая сборка**

- работа в режиме **Сокращенного чертежа** — активизация соответствующей опции при открытии чертежа сборки приводит к тому, что модели деталей будут загружаться в память по мере необходимости. Соответственно чертеж большой сборки будет открываться намного быстрее;
- использование параметра **Черновое качество** для отображения видов на чертежах — активизировав опцию **Инструменты** | **Параметры** | **Настройки пользователя** | **Тип отображения** | **Качество отображе-**

ния для новых видов | **Черновое качество**, можно сократить время на создание и модификацию создаваемых видов. При этом, однако, некоторые команды, предназначенные для оформления чертежей, функционируют некорректно. Поэтому в черновом качестве лучше отображать уже готовые объекты.

Как можно видеть, здесь упомянуты средства повышения производительности как работы в SolidWorks без подключения расчетных модулей, так и те, которые прямо или косвенно влияют и на них.

10.1.4. Специальные манипуляции

Если в сборке используется много деталей из листового материала, а также детали, являющиеся импортированными геометрическими объектами (или содержащими таковые), то можно рекомендовать следующую последовательность операций:

1. Поместить проблемные детали в какую-либо сборку (без всяких привязок, кучно).
2. Для каждой детали создать Деталь производного компонента, подавая одноименную команду из меню **Файл**.
3. Необходимую сборку создавать из полученных деталей, которые будут точными ассоциативными копиями исходной.
4. В силу предыдущего пункта, необходимо исходные детали сохранять и изменения вносить именно в нее.

10.1.5. Использование сетевых дисков

Не рекомендуется хранить элементы сборок, а также рабочие файлы расчетных программ на сетевых дисках. Скорость обмена с ними намного меньше, чем с локальными устройствами. Если же такая необходимость присутствует, то следует использовать системы PDM, причем режим взаимодействия с ними настраивать так, чтобы создавать локальные копии всех компонентов сборки на индивидуальном рабочем месте.

10.2. Рекомендации по повышению производительности CAE-систем

Настройки оборудования и режима работы программ расчетных модулей во многом совпадают с приведенными для графической системы. Это обусловлено тем, что большинство программ реализованы как интегрированные при-

ложения (в данном случае для SolidWorks). Они используют функции API базовой системы и, соответственно, обладают схожими с ней параметрами.

10.2.1. Аппаратное обеспечение

Рекомендации по выбору конфигурации компьютера приведены далее. В этом разделе упомянем только об одной особенности функционирования графики в CAE-программах. Некоторые видеокарты содержат возможности по аппаратному ускорению, сглаживанию изображений, шрифтов и т. д., которые приводят к дефектам при выводе расчетных моделей (сеток) или диаграмм с результатами. В этой ситуации советуем постепенно уменьшать уровень аппаратного ускорения (см. рис. 10.3) вплоть до отключения аппаратной поддержки OpenGL. Иногда проблема решается установкой свежих драйверов. Рекомендации по выбору драйверов для некоторых типов видеокарт находятся на сайте **http://www.solidworks.com**.

10.2.2. Настройки операционной системы

Настройки операционной системы, оптимальные с точки зрения производительности расчетов, в общем, совпадают с приведенными для SolidWorks. Сводятся они к тому, чтобы максимально сократить требования к ресурсам, не влияющим на функциональность программ. Настоятельно рекомендуем отключить все детекторы антивирусов, поскольку они сканируют не только файлы с моделями, но проверяют, по сути, все десятки и сотни мегабайт данных, циркулирующих между процессором и постоянной памятью. Еще одно замечание касается наличия у пользователей прав доступа к папкам и файлам. На этапе изучения системы и отладки расчетных приложений следует предоставить пользователям административные права, поскольку ограничения в доступе к папкам, в которые записаны программы, а также исполняемые файлы, подключаемые библиотеки, файлы с данными и результатами, могут привести к трудно диагностируемым ошибкам. Начинающие пользователи не смогут провести грань между сбоями системы и своими собственными оплошностями.

10.2.3. Настройки расчетных программ

Если программа допускает такую возможность, а также при наличии ресурсов, следует адресовать рабочие файлы и файлы с результатами на отдельный жесткий диск (см. рекомендации для SolidWorks). Например, в COSMOSWorks этот путь прописывается в поле **Настройки** | **Результаты** | **Рабочий каталог**. Некоторые программы, в частности TracePro, всю информацию пи-

шут в папку, в которой находится геометрическая модель. Если же в системном блоке присутствует только один винчестер, то он должен иметь достаточно свободного места и регулярно подвергаться дефрагментации.

10.2.4. Использование сетевых дисков

Какой-либо обмен по сети в ходе расчета порождает его критическое замедление. Организация работы с данными, хранящимися в системах PDM, архивах, к которым организован коллективный доступ, требует весьма ответственного отношения. Наилучший путь — создание локальных копий всех объектов расчетной модели (в случае SolidWorks — деталей и узлов сборки), выполнение анализа и помещение результатов в PDM в виде отчетов, представляющих собой изолированные (не ассоциированные с моделью) файлы.

10.3. Оптимальный выбор аппаратного обеспечения

Приведенные выше рекомендации по настройкам SolidWorks позволяют в общих чертах сформулировать требования к аппаратному обеспечению CAD-систем. Одновременное использование CAE (в силу того, что программы интегрированы) вносят в них определенные поправки. Рассмотрим влияние каждого из компонентов системы на функциональность программного обеспечения, рассмотренного в книге[1].

10.3.1. Процессор и материнская плата

Рекомендации здесь просты: процессор должен быть, во-первых, ориентирован на выполнение операций с плавающий запятой (это особенно актуально для расчетных систем), а во-вторых, иметь как можно большую тактовую частоту. По первой из причин не рекомендуются Intel Celeron, а по второй — Intel Centrino (это технология мобильных ПК, которые на момент публикации имели по сравнению с обычными Pentium-процессорами меньшее быстродействие). Кроме того, Intel Celeron не рекомендуется потому, что объем его кэш-памяти меньше, чем у Pentium (128 Кбайт по сравнению с 512 Кбайт). Надо обращать внимание на информацию о технологическом процессе изготовления процессоров. Так, ядро Prescott изготавливается по технологии 90 нм (0,09 мкм) и имеет объем кэш второго уровня 1 Мбайт, а ядро Northwood по технологии 130 нм (0,13 мкм) и имеет объем кэш второго уровня только 512 Кбайт. Однако различие в скорости расчетов между ними дале-

[1] Использованы материалы интернет-конференций и сетевого журнала: **http://www.CadCamNet.com**.

ко не очевидно. Рабочие станции на базе процессоров Intel Xeon могут использоваться для установки CAD/CAE-систем. В этой ситуации рекомендуется приобретать продукцию известных производителей, которая сконфигурирована применительно к конкретным графическим пакетам и позволяет начать работу без затрат времени на настройку и адаптацию оборудования. Соответствующая информация имеется на Web-сайтах производителей, например, **http://www.ibm.com**.

Полноценными данными, позволяющими сравнить линейки Intel и AMD, авторы не располагают, однако при сопоставимой частоте (физической, а не эквивалентной) эти изделия демонстрируют схожие показатели. Результаты тестов показывают, что качественного различия в производительности вычислений между Pentium 4 и Pentium III (при одинаковой частоте) практически нет. С другой стороны, линия Pentium III прекратила развитие, поэтому здесь вопрос выбора давно снят. Подбор материнской платы нужно осуществлять с учетом пропускной способности шины и параметров оперативной памяти (об этом ниже).

Раздумий на тему того, не стоит ли с учетом перспективы приобрести 64-разрядную систему (процессор и материнскую плату) сегодня быть не должно. Все CAD/CAE-системы на персональных компьютерах используют только 32-разрядную адресацию и "продвинутые" аппаратные средства могут принести, как минимум, лишние хлопоты, или — вполне вероятно — критическое замедление работы, поскольку 32-разрядные программы будут функционировать в режиме эмуляции. Если учесть, что адаптация UNIX-приложений под Windows потребовала (при создании полноценных вариантов этих программ) нескольких лет, то ваш компьютер вряд ли, даже физически, проживет столько времени. Еще одним аргументом не в пользу 64-разрядных процессоров является тот факт, что его преимущества могут проявиться только в сочетании с адекватной операционной системой. На момент сдачи книги в печать 64-разрядная WinXP находилась в стадии бета-тестирования. В связи с этим возможность построения согласованного комплекса: компьютер + ОС + набор прикладных программ практически нереализуема.

Приобретение двухпроцессорных систем может дать определенный эффект, однако, за исключением COSMOSWorks 2004 и более поздних его версий, остальные CAE-программы, о которых мы говорим, не поддерживают параллельных вычислений (по крайней мере, производители продуктов, описанных здесь, в явном виде такую возможность не декларируют). В любом случае двукратного ускорения расчетов получить не удастся. Если же проанализировать статистику работы пользователя, то выяснится, что большую часть времени занимает подготовка геометрической и расчетной модели. На этом этапе, как показывают опубликованные в Интернете результаты тестов, достигается 25 % прироста скорости в манипуляциях со сложными моделями в

режиме закрашивания. Это происходит за счет разделения между процессорами операций: один обрабатывает геометрические данные, другой — управляет графикой. Стоимость же такого системного блока почти в полтора раза выше, чем для однопроцессорной системы. Поэтому логичнее иметь два компьютера: один для графики и создания расчетной модели (с приличной видеосистемой и "средними" памятью и процессором), другой — для счета (с "работоспособной" графикой и "продвинутыми" вычислительными ресурсами).

Влияние технологии Hyper-threading было описано ранее. Вывод, в общем, элементарен. На момент публикации почти все компьютеры бизнес-класса эту опцию поддерживали, поэтому она не помешает. Объективная же статистика ее использования отсутствовала. Кроме того, читатель должен понимать, что разработчики программ не имеют возможности обновлять парк компьютеров одновременно с выходом каждой технической новинки. Поэтому результат ее появления (в виде оптимизированной программы) может сказаться спустя год и более после того, как она станет массовым продуктом.

10.3.2. Оперативная память

Оперативной памяти должно быть достаточно для размещения в ней всей необходимой оперативной информации. Если это невозможно, следует обращение к виртуальной памяти. Этот процесс может контролироваться программой (на это способны, например, SolidWorks и COSMOSWorks) или быть неуправляемым (показательный пример — TracePro). Последний вариант — это, по сути, катастрофа. Пользователю, скорее всего, придется прервать работу программы с потерей, как минимум, полученной на этот момент расчетной информации. Поэтому, если диагностика (см. рис. 10.3) показывает систематическое обращение программы к диску (загрузка процессора в ходе счета ни в один из моментов не достигает 100 %), убедитесь, что заданные вами параметры расчета соответствуют имеющимся ресурсам и попытайтесь оптимизировать настройки. Но если перед запуском расчетного приложения память, задействованная для хранения геометрии, была близка к размеру оперативной, то дальнейшие действия, скорее всего, окажутся безрезультатными. Минимальный размер оперативной памяти, при котором становится возможным осуществление анализа элементарных моделей — 512 Мбайт. Более-менее работоспособной является система с 1 Гбайт.

На втором месте по значимости — частота (пропускная способность, измеряемая в Гбайт/с) оперативной памяти (при условии того, что материнская плата в состоянии эту частоту реализовать). Разумеется, лучше приобретать "фирменную" память (производители некоторых материнских плат приводят на Web-сайтах список сертифицированных устройств), поскольку есть при-

меры, когда устройства "noname" порождали систематическое зависание компьютера. Однако гораздо чаще все работает без сбоев. Сейчас используются три типа чипов: DDR (Double Data Rate), SDRAM (Synchronous Data Random Access Memory), RDRAM (Rambus DRAM) и DDR2. Вторые дороже и несколько быстрее. Однако даже brand-name графические станции на базе процессора Pentium комплектуются памятью SDRAM. Более дорогая RDRAM устанавливается совместно с процессорами Xeon. Что касается возможности корректировки ошибок — ECC (ее иногда называют контролем четности), которой обладают некоторые типы чипов, то она для персональных графических станций в сочетании с описанными здесь программами не является необходимой. Если все-таки принято решение использовать эту функцию, то следует контролировать ее поддержку материнской платой. Например, чипсет материнской платы Intel 875P (одно из популярных устройств) поддерживает контроль четности, а чипсеты Intel 865G, PE, P — не поддерживают. Отметим, что brand-name устройства комплектуются памятью с контролем четности. Память типа DDR2 потенциально обладает большим быстродействием, чем DDR, однако в реальности это преимущество весьма малозаметно и не компенсирует значительный рост стоимости. Более того, некоторые чипы типа DDR2 демонстрируют характеристики, худшие по сравнению с аналогичными по частоте устройствами DDR. Снижение производительности обусловлено большими значениями параметров, входящих в группу "тайминги памяти".

Для достижения максимальной пропускной способности памяти рекомендуется двухканальный режим, который также должен поддерживаться чипсетом материнской платы. Например, при одноканальном режиме пропускная способность памяти DDR400 (DDR SDRAM PC 3200) составляет (на чипсете 875P) 4,2 Гбайт/с, а в двухканальном возрастает до 6,4 Гбайт/с.

10.3.3. Видеокарта

При выборе видеосистемы под базовую CAD-программу желательно руководствоваться рекомендациями поставщика программного обеспечения, по крайней мере, в той их части, где перечислены "в принципе" работоспособные (и, соответственно, неработоспособные) устройства. Под "работоспособностью" здесь понимается полноценная аппаратная поддержка OpenGL. Если устройство не способно к этому (а критерием может быть исключительно эксперимент), то оно пригодно только для отображения простейших геометрических моделей. Для более-менее сложной графики в режиме закраски замедление относительно "средних" по цене и/или производительности (эти параметры, как будет сказано ниже, коррелируют весьма слабо) карт, работающих с OpenGL, может достигать более чем трех раз. Судя по некоторым признакам (явным — отсутствию в требованиях к аппаратуре поддержки

OpenGL, замедлению при работе в режиме прозрачности), ряд расчетных программ не поддерживает аппаратное ускорение графики, поэтому параметры видеокарты для них, по большому счету, безразличны. Эти случаи мы не будем принимать во внимание, поскольку заранее предсказать это трудно, да и геометрические модели нужно выполнять с максимальной эффективностью.

Анализ публикаций, практика авторов показали, что оптимальным выбором для CAD/CAE-систем являются устройства среднего ценового диапазона (около $100 — 200). Дело в том, что наиболее дорогими являются, естественно, самые новые модели. Развитие же видеокарт идет по следующим направлениям: первое — увеличение тактовой частоты графического процессора, второе — развитие аппаратных функций для обработки трехмерных сцен, когда для некоторого набора граней определяется видимость и выполняется закраска и — третье — когда то же самое производится с учетом текстуры поверхности. С точки зрения графических САПР и расчетных программ приоритетным является первый показатель: чем выше скорость обработки всех функций, тем лучше. Что касается определения видимости сложных сцен, то ускорение достигается, только если графическая подсистема конкретной САПР использует те функции, которые реализованы аппаратно. Универсальные графические программы — достаточно консервативные продукты, у которых производительность графики — важный, но не главный приоритет. Поэтому графическая часть не переписывается сразу же за появлением неких технических новинок. Поставщики видеопроцессоров, зная об этом, гораздо более активно взаимодействуют с производителями игр, ведь жизненный цикл этих программ намного меньше времени существования версии универсальной САПР. Еще прозрачнее ситуация с CAE-системами. Численность собственно программистов в коллективе разработчиков редко когда превышает 20—30, а некоторые программы разрабатываются менее чем десятью программистами. Поэтому отслеживать мельчайшие изменения в технике нереально, да, в общем, и не нужно: как правило, расчетные модели не порождают сложных для визуализации сцен (в последнее время некоторые фирмы в качестве подключаемых модулей используют продукты сторонних разработчиков, предназначенные для качественного рендеринга объектов). Кроме того, можно утверждать, что алгоритмы отображения моделей в каркасном виде, в режиме скрытия невидимых линий, при работе с чертежами реализованы на уровне математического процессора, а роль графики — просто отобразить результат (совокупность линий).

Что касается использования в САПР функциональности графических устройств, связанной с обработкой текстур, то некое движение произошло только в последние один-два года. Например, SolidWorks 2004 и более поздние его версии способны взаимодействовать с некоторыми моделями линии

Nvidia Quadro (модель FX 1000 является младшей в семействе популярных профессиональных карт, сертифицированных фирмой Dassault System), позволяя накладывать на поверхность объектов текстуры, которые пользователь должен брать из специальной библиотеки. Понятно, что ни одна из расчетных программ такой возможностью не обладает: нового пользователя этим не привлечешь, а старого, не расширяя функциональности, не удержишь.

Известные результаты тестов, опыт эксплуатации программ показывают, что — при наличии аппаратной поддержки языка OpenGL — разница в производительности устройств в диапазоне цены $100 — 1000 редко превышает два с половиной — три раза, причем она больше всего проявляется для режима закраски деталей со сложной геометрией. При работе со сборками в режиме каркасного отображения различия сглаживаются, а если требуется показать результаты расчетов CAE-систем, то и вовсе нивелируются. Более того, "передовые" устройства содержат массу программных настроек, изменение которых порождает разнообразные дефекты изображений с расчетными диаграммами и моделями.

Одним из значимых критериев при выборе графической карты является поддержка ею (и, соответственно, материнской платой) восьмикратной скорости графического порта AGP 8X. Здесь, однако, тоже есть исключения — на мобильных компьютерах стандартом является AGP 4X. Последнее замечание — о необходимом объеме видеопамяти. Размер более 128 Мбайт является бесполезным, а 64 Мбайт — достаточным. Вообще говоря, при работе САПР видеопамять больше 64 Мбайт может потребоваться только для работы с двумя мониторами одновременно (если, разумеется, карта поддерживает эту опцию) при использовании 32-битного представления цвета.

Со второй половины 2004 года началось внедрение графической шины PCI Express (Peripheral Components Interconnect). В отличие от шины AGP (Accelerated Graphics Port), которая является последовательной, PCI Express позволяет масштабировать производительность посредством организации нескольких независимых каналов передачи данных. Системы, включающие PCI Express, не могут поддерживать AGP — и наоборот. Поэтому обновление имеющихся компьютеров видеокартой с шиной PCI Express невозможно, равно как невозможно использовать хорошо зарекомендовавшие себя устройства для AGP в комплекте с материнской платой, содержащей новую шину. В настоящее время для шины PCI Express выпущены карты семейств ATI, NVIDIA и 3DLabs. Отметим, что устройств дешевле $200 в их номенклатуре нет. Более того, младшие модели видеокарт базируются на процессорах, идентичных тем, которые используются в изделиях для шины AGP. Соответственно преимущества PCI Express для CAD/CAE-систем, требующих прежде всего вычислительную эффективность (в том числе и в ходе визуализации), на данном этапе неочевидны.

10.3.4. Жесткий диск

В ходе работы расчетных программ, использующих сеточные аппроксимации (COSMOSWorks, COSMOSFloWorks), метод Монте-Карло (TracePro) идет интенсивный обмен с винчестером. Объем записываемых/считываемых данных может достигать сотен мегабайт. Как правило, в программах не предусмотрена возможность управлять этим процессом за счет изменения соотношения между количеством информации, хранимой в постоянной и оперативной памяти. Поэтому используется виртуальная память, распределяемая операционной системой. В ней размещается информация, как порождаемая при работе с геометрическими моделями, так и рабочие данные расчетных модулей. Как упоминалось, при нехватке памяти оперативной система пытается разместить данные в памяти виртуальной или на диске. Если в программе, например, COSMOSWorks реализован управляемый обмен с диском (т. е. COSMOSWorks "сам" взаимодействует с диском), то работоспособность может в какой-то степени сохраниться. В других программах обменом управляет Windows, поэтому расчет, по сути, останавливается.

Выводы, в общем, ясны. Весьма желательно иметь достаточной по объему жесткий диск с высоким быстродействием и скоростью обмена с процессором. Однако, как бы ни была велика эта скорость, она не компенсирует нехватку оперативной памяти. По данным, известным на момент публикации, предпочтительно иметь винчестер, подключенный по интерфейсу SATA 150. Он обеспечивает быстродействие не худшее, чем более дорогие SCSI-устройства. Если же диск подключается через интерфейс UATA, то скорость вращения шпинделя не должна быть менее 7200 об/мин. Также диски имеют характеристику "Объем буфера", которая может влиять на повышение производительности. Объем буфера желательно иметь не менее 4 Мбайт.

10.3.5. Монитор

Параметры монитора практически не влияют на функциональность программ, однако эргономические параметры крайне важны для пользователя. Квалифицированный специалист и недешевая программа заслуживают траты нескольких "лишних" сотен долларов, чтобы обеспечить адекватную производительность труда. Тем, кто подбирает конфигурацию системы для работы с современной САПР, рекомендуем использовать жидкокристаллический монитор с разрешением не менее 1280×1024 точек. Большее разрешение (например, на портативных компьютерах профессионального класса) позволяет получить более качественную картинку в режиме закраски, но приводит к тому, что линии на каркасных моделях становятся очень тонкими. Размер экрана по диагонали не должен быть меньше 17 дюймов, причем если диагональ равна 20 дюймов и более, то разрешение 1600×1200 точек крайне жела-

тельно. Скорость регенерации изображения современных мониторов достигла такой величины, что при любых мыслимых манипуляциях с моделями и результатами дефекты визуализации практически не ощутимы. Параметры цветовой палитры, диапазон регулировок яркости, на наш взгляд, более приоритетны, поскольку от них зависит комфорт пользователя.

10.4. Выводы

Практически все CAD/CAE-системы при решении конкретных задач требуют тщательной настройки. Причем требования, выдвигаемые на этапах работы с моделью, чертежом и в ходе расчетов, могут быть различны. Определенные отличия существуют и в запросах, предъявляемых различными расчетными модулями. Поскольку программное обеспечение, как правило, обновляется достаточно регулярно, то и аппаратные средства должны быть адекватны. Здесь существует некая область, где соотношение "цена/производительность" имеет разумную величину, доступную даже для индивидуального пользователя.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Описание компакт-диска

Папка **swviewer** содержит бесплатную программу, предназначенную для просмотра файлов (деталей, сборок и чертежей), выполненных в программе SolidWorks.

Папка **Иллюстрации** содержит полноцветные иллюстрации к книге. Все иллюстрации упорядочены по каталогам, названия которых соответствуют названиям глав.

Папка **Модели** содержит выборку моделей, результаты расчета которых приведены в книге. Все модели упорядочены по каталогам, названия которых соответствуют названиям глав.

ПРИМЕЧАНИЕ:

Файлы с расширениями sldprt, sldasm могут быть открыты посредством программы SolidWorks, однако расчетная модель нуждается в соответствующем приложении — это COSMOSWorks или COSMOSMotion.

Другие файлы открываются посредством программ, описанных в соответствующих главах:

- COSMOSDesignSTAR — расширение DgxAsm;
- TracePro — расширение oml;
- ReflectorCAD — расширение rdf.

Список литературы

1. Алямовский А. А. SolidWorks / COSMOSWorks Инженерный анализ методом конечных элементов. — М.: ДМК Пресс, 2004.
2. Багриновский К. А., Годунов С. К. Разностные схемы для многомерных задач. ДАН СССР, 1957, т. 115, № 3, 431—433.
3. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы: Пер. с англ. — М.: Мир, 1984.
4. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация: Пер. с англ. — М.: Мир, 1985.
5. Годунов С. К., Забродин А. В., Иванов М. Я., Крайко А. Н., Прокопов Г. П. Численное решение многомерных задач газовой динамики. — М.: Наука, 1976.
6. Григолюк Э. И., Шалашилин В. И. Проблемы нелинейного деформирования. — М.: Наука, 1988.
7. Марчук Г. И. Методы вычислительной математики. — М.: Наука, 1989.
8. Оден Дж. Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред: Пер. с англ. — М.: Мир, 1976.
9. Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгдел К. Оптимизация в технике: В 2-х кн. Пер. с англ. — М.: Мир, 1986.
10. Родионов С. А. Основы оптики. Конспект лекций. — СПб.: СПб ГИТМО (ТУ), 2000.
11. Самарский А. А. Теория разностных схем. — М.: Наука, 1983.
12. Самарский А. А., Попов Ю. П. Разностные схемы газовой динамики. — М.: Наука, 1975.
13. Сиванов И. Как компьютер рассчитывает изображения. Технологии программного рендеринга. **— http://www.fcenter.ru**.
14. CAD/CAM/CAE Observer. — CAD/CAM Media Publishing, Латвия, 2004. N 1–3.
15. Chung T.J. Finite element analysis in fluid dynamics. NY, McGraw-Hill, 1977.
16. COSMOSDesignSTAR 4.5 Basic User's Guide. Structural Research and Analysis Corporation, USA, 2004.
17. COSMOSDesignSTAR 4.5 Nonlinear User's Guide. Structural Research and Analysis Corporation, USA, 2004.

18. COSMOSWorks Online User's Guide. Structural Research and Analysis Corporation, USA, 2004.
19. Glowinski R., P. Le Tallec. Augmented Lagrangian methods and operator-splitting methods in non-linear mechanics. SIAM, Philadelphia, 1989.
20. Hackbush W. Multi-grid methods and applications. Springer-Verlag, NY, 1985.
21. Hirsch C. Numerical computation of internal and external flows. John Wiley & Sons, Chichester, 1988.
22. Introducing COSMOSWorks. Structural Research and Analysis Corporation, USA, 2004.
23. McDonald P. W. The computation of transonic flow through two-dimensional gas turbine cascades. ASME Paper 71-GT-89, 1971.
24. Patankar S. V. Numerical heat transfer and fluid flow. Hemisphere, Washington, 1980.
25. Rizzi A. W., Inouye M. Time split finite volume method for three-dimensional blunt-body flows. AIAA Journal, v.11, pp. 1478—1485, 1973.
26. Roache P. J. Fundamentals of computational fluid dynamics. Hermosa Publishers, Albuquerque, New Mexico, USA, 1998.
27. Saad Y. Iterative methods for sparse linear systems. PWS Publishing Company, Boston, 1996.
28. TracePro. User's Manual. Release 3.0. — Lambda Research Corporation, USA, 2003.
29. TracePro. User's Manual Supplement. Release 3.1. — Lambda Research Corporation, USA, 2003.
30. TracePro. User's Manual Supplement. Release 3.2. — Lambda Research Corporation, USA, 2004.

Предметный указатель

3D

3D Contact 482

A

ABg 548
ACIS 138
Aliasing 55
Analysis Mode 559
ANSYS 139
Autodesk Inventor 138

B

BRDF 55, 547, 621
BSDF 546
BTDF 55, 547, 621
Bushings 486

C

CadKey 138
CamTrax 378
CATIA 139
Check Interferences 506
Coefficient of Restriction 483
Conditions Initial 479
COSMOSMotion 455

D

Damper 488
Damping 484
Dynamic Designer 455

E

Export Results 472

G

GearTrax 416

I

IDEAS 139
IGES 138, 529
Impact Force 508
Import Motion Loads 473
IntelliMotion:
◊ Browser 457
◊ Builder 458
Inventor 416
IronCAD 138

J

Joint:
◊ Cylindrical 466
◊ Fixed 466
◊ Planar 466
◊ Primitives 466
◊ Revolute 466
◊ Screw 466
◊ Spherical 466
◊ Translational 466
◊ Universal 466
JPrim 466

M

Mechanical Desktop 138
MechSoft 454
MicroStation 138
Motion 457
◊ Model 457

N

NASTRAN 139

P

Parasolid 138
Parts:
◊ Ground 477
◊ Moving 477

PATRAN 139
Penetration 484

R

Ray:
◊ splitting 53
◊ tracing 53
Raytracing:
◊ nonsequential 543
◊ reverse 53
RepTile 625

S

SDF 548
Simulation Mode 559
SolidEdge 138, 416
SolidWorks:
◊ Animator 474
◊ Toolbox 377
Spring Linear 486
STEP 138

T

Toolbox Browser 413

V

Vellum Solids 138
Visual Nastran 455

А

Автокрепежи 414
Алгоритм вокселизации 55
Амортизатор линейный 488

Б

Балка 398
Болт 64
Браузер:
◊ COSMOSMotion 457
◊ Toolbox 414

В

Вкладка:
◊ Animation 495
◊ Contact 483
◊ Simulation 493
Втулка 468, 486

Г

Граничные условия, контактные 72
Грузоподъемность 412

Д

Демпфер 488
Дерево проекта TracePro 549
Деформация 66
Длина луча оптическая 546

Ж

Жесткая связь 63

З

Закон:
◊ Ламберта 623
◊ преломления 546
Зацепление:
◊ внутреннее 429
◊ червячное архимедово 418
Звездочка 419
Зондирование 67
Зубья:
◊ круговые 417
◊ эвольвентные 419

И

Излучатель ламбертовский:
◊ плоский 545
◊ сферический 545
Излучение 65

К

Колесо:
◊ коническое 417
◊ прямозубое 415
◊ цилиндрическое косозубое 417
◊ цилиндрическое прямозубое 417
◊ червячное 418
Конвекция 64
Конструкции сварные 411
Конструкционная сталь 398
Коэффициент:
◊ анизотропии 549
◊ вязкого демпфирования 488
◊ деформационного упрочнения 529
◊ объемного рассеяния 624
◊ отражения 546
◊ перпендикулярной анизотропии 529
◊ поглощения 546, 621, 623
◊ преломления 623
◊ пропускания 546
Кривая:
◊ времени 28, 74, 136
◊ отклика 65
◊ тренда 69
Кривизна главная 512
Критерий прочности 28
Кулачок:
◊ круговой 378
◊ линейный 378
◊ торцовый 379

Л

Лечение 659

М

Материал:
◊ анизотропный 136
◊ вязкоэластичный 73
◊ гиперупругий 136
◊ гиперэластичный 73
◊ изотропный 71
◊ нелинейно-упругий 73
◊ ортотропный 71
◊ пластичный 73, 136
◊ ползучий 73
◊ трансверсально-изотропный 408
◊ упругий 136
Матрица:
◊ жесткости 24
▫ глобальная 27
▫ элемента 27
◊ Якоби 25
Менеджер:
◊ COSMOSWorks 61, 498
◊ конфигурации 457
Меню:
◊ Animate 469
◊ Contacts 468
◊ Export Results 470
◊ Forces 467
◊ Joints 466
◊ Motion 462
◊ Result Object 469
Мертвая опора 120
Метод:
◊ p-адаптивный 60
◊ длины дуги 29
◊ излучательности 55
◊ комплексов 46
◊ конечных объемов 32
◊ конечных элементов 22
◊ многогранника 46
◊ Монте-Карло 54
◊ Ньютона — Рафсона 30
▫ модифицированный 30
◊ перемещений 29
◊ последовательных нагружений 137
◊ прямого поиска 43, 60
◊ сил 29
Минимум глобальный 41
МКЭ 22
Модель:
◊ Друкера — Прагера 136
◊ Мизеса 136
◊ Треска 136
Модуль:
◊ Optimization 691
◊ Routed Systems 121
Момент инерции сечения 402
Мощность тепловая 65

Н

Нагрузка:
◊ дистанционная 63
◊ ударная 62, 135
◊ эквивалентная динамическая 412
Напряжение 66
◊ эквивалентное 28
Нелинейность:
◊ геометрическая 133
◊ контактная 134
◊ физическая 133

О

Область:
◊ допустимая 41
◊ невыпуклая 41
Оболочка 61
Ограничения 69
◊ неравенства 40
◊ равенства 40
Оптимизация:
◊ безусловная 40
◊ параметрическая 39, 70
◊ условная 40
Освещенность 544
◊ энергетическая 545
Основание податливое 64
Отражение:
◊ зеркальное 621
◊ полное внутреннее 546
Отчет 67

П

Панель:
◊ COSMOSMotion 458
◊ Simulation 460, 496
Передача:
◊ клиновая 419
◊ поликлиновая 419
◊ цепная 419
Переменная проектирования 40, 68
Перемещение 66
Плотность потока энергии, поверхностная 545
Поддержка упругости 64
Подход:
◊ Лагранжа 35
◊ Эйлера 35
Посадка горячая 72
Поток:
◊ излучения 545
◊ световой 544
◊ тепловой 65
Программа:
◊ ASAP 739
◊ BlankWorks 510
◊ COSMOSWorks 58
◊ DesignSTAR 132
◊ FastBlank 512
◊ FastForm 530, 532
◊ ReflectorCAD 733
◊ TracePro 542
Программирование:
◊ нелинейное 40
◊ оптимальное 39
Пропускание зеркальное 621
Профиль эвольвентный 415, 417
Пружина 63, 486

Р

Работоспособность 412
Развертка 386, 510
◊ приближенная 513
◊ точная 512
◊ условная 513
Рассеяние:
◊ объемное 624
◊ поверхностное 619
Расчет:
◊ подшипника 412
◊ усталостный 70
Ремень зубчатый 419
Ресурс 412

С

Сварная деталь 121
Светимость 545
Сетка 61
Сила:
◊ контактная 64, 65, 499
◊ реакции 65
◊ света 544
◊ тяжести 63
◊ центробежная 63
Сплайн 389, 501, 504
Срок службы 412

Соединение шлицевое 419, 431
Стандарт:
◊ ABA-PGT 428
◊ ANSI 398
◊ DIN 398, 413, 428
◊ ISO 398413
◊ JIS 413, 428
◊ ГОСТ 413
Сценарий проектирования 68

Т

Таблица сгибов 521
Температура 64
Толкатель 380
Точка маршрута 121
Трансмиссия 414, 417
Трассировка:
◊ лучей 53
◊ обратная 53
◊ распределенная 53

У

Угол:
◊ отражения 546
◊ падения 545
◊ преломления 546
◊ Эйлера 563
Упражнение 61
Условие:
◊ Куна — Таккера 49
◊ симметрии 74
Усталость 135

Ф

Фирма:
◊ ADAMS 455
◊ Autodesk 454
◊ Breault Research 733
◊ Camnetics 378, 416
◊ FTI 512
◊ MSC 455
◊ SRAC 58, 132
Форма собственная 69
Формат:
◊ Bitmap 558
◊ IGES 558
◊ Metafile 558
◊ OML 558
◊ SAT 558
◊ STEP 558
Функция:
◊ барьерная 44
◊ негладкая 40
◊ разрывная 40
◊ целевая 40, 68
◊ штрафная 44

Ч

Частота собственная 69
Червяк 418

Ш

Шестерня корригированная 428
Шкив 419
Шпилька 63
Штрафная функция, внешняя 60

Э

Элемент:
◊ управления 62
◊ конструкций 411

Я

Якобиан 25
Яркость 544
◊ энергетическая 545