

Андрей Алямовский

SolidWorks Simulation

**как решать
практические задачи**

Санкт-Петербург

«БХВ-Петербург»

2012

УДК 681.3.06
ББК 32.973.26–018.2
А60

Алямовский А. А.

А60 SolidWorks Simulation. Как решать практические задачи. — СПб.: БХВ-Петербург, 2012. — 448 с.: ил. + DVD — (Мастер)

ISBN 978-5-9775-0763-9

Книга посвящена использованию САПР SolidWorks совместно с интегрированными расчетными модулями семейства Simulation: расчетам прочности и устойчивости конструкций в SolidWorks Simulation, решению задач гидрогазодинамики и теплопередачи в SolidWorks Flow Simulation, кинематики и динамики — в SolidWorks Motion. Даны постановка, моделирование, расчет и интерпретация результатов решения для конкретных инженерных задач. Особое внимание уделено слабо освещенным в отечественной литературе задачам геометрически-нелинейного поведения конструкций, моделирования изделий, содержащих фильтры и пористые среды, гидродинамического расчета турбомашин и др. Прилагаемый DVD содержит модели с результатами расчетов и цветные иллюстрации.

Для инженеров, студентов, аспирантов и преподавателей вузов

УДК 681.3.06
ББК 32.973.26–018.2

Группа подготовки издания:

Главный редактор	<i>Екатерина Кондукова</i>
Зам. главного редактора	<i>Евгений Рыбаков</i>
Зав. редакцией	<i>Григорий Добин</i>
Редактор	<i>Елена Кашлакова</i>
Компьютерная верстка	<i>Татьяны Олоновой</i>
Корректор	<i>Наталья Першакова</i>
Дизайн серии	<i>Инны Тачиной</i>
Оформление обложки	<i>Елены Беляевой</i>
Зав. производством	<i>Николай Тверских</i>

Лицензия ИД № 02429 от 24.07.00. Подписано в печать 07.09.2011.

Формат 70×100^{1/16}. Печать офсетная. Усл. печ. л. 36,12.

Тираж 1500 экз. Заказ №

"БХВ-Петербург", 190005, Санкт-Петербург, Измайловский пр., 29.

Санитарно-эпидемиологическое заключение на продукцию № 77.99.60.953.Д.005770.05.09 от 26.05.2009 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.

Оглавление

Введение	7
Список литературы.....	9
Глава 1. Прочность и устойчивость конструкций — SolidWorks Simulation	11
1.1. Расчет витых цилиндрических пружин.....	11
1.2. Расчет прорезных пружин	21
1.3. Расчет линзового компенсатора.....	38
1.3.1. Постановка задачи	38
1.3.2. Расчетные модели	40
1.3.3. Расчет конструкции при действии давления по твердотельной модели	40
1.3.4. Расчет конструкции при действии давления по оболочечной модели	45
1.3.5. Расчет конструкции при действии изгиба по твердотельной модели.....	48
1.3.6. Расчет конструкции при действии изгиба по оболочечной модели.....	52
1.3.7. Выводы	55
1.4. Цилиндрическая оболочка с эллиптическим днищем	56
1.4.1. Постановка задачи	56
1.4.2. Расчет конструкции по оболочечной модели.....	57
1.4.3. Расчет конструкции при действии давления по плоской модели	64
1.4.4. Выводы	68
1.5. Расчет плоских тонких мембран	68
1.5.1. Постановка задачи	69
1.5.2. Расчетная модель	69
1.5.3. Расчет мембраны по линейной и нелинейной модели	70
1.5.4. Определение объема между деформированной поверхностью и плоскостью	73
1.5.5. Выводы	76
1.6. Устойчивость прямоугольной тонкой пластины при сдвиге	76
1.6.1. Постановка задачи	76
1.6.2. Расчетная модель	77
1.6.3. Аналитическое решение.....	80
1.6.4. Расчет по линейной модели	80
1.6.5. Расчет по нелинейной модели	81
1.6.6. Выводы	89
1.7. Расчет гибкой рамной конструкции	89
1.7.1. Постановка задачи	89
1.7.2. Построение расчетной геометрической модели	90
1.7.3. Расчетная модель	93
1.7.4. Результаты и их интерпретация.....	104
1.7.5. Выводы	109

1.8. Расчет предельного состояния вращающегося вала с изгибом.....	110
1.8.1. Постановка задачи	110
1.8.2. Расчетная модель	111
1.8.3. Результаты расчета и их интерпретация.....	118
1.8.4. Выводы	125
1.9. Нелинейный расчет узла крепления датчика давления в осесимметричной постановке.....	126
1.9.1. Постановка задачи	126
1.9.2. Расчетная модель конструкции как твердотельной осесимметричной системы.....	127
1.9.3. Результаты и их интерпретация.....	137
1.9.4. Выводы	143

Глава 2. Гидрогазодинамика и теплопередача — SolidWorks Flow

Simulation 145

2.1. Дозвуковое обтекание крыла при различных углах атаки	145
2.1.1. Постановка задачи	146
2.1.2. Плоская нестационарная модель для бесконечного крыла.....	147
2.1.3. Стационарная модель для крыла конечного размаха	159
2.1.4. Крыло конечного размаха при 0,8 М	170
2.1.5. Модифицированная расчетная модель	172
2.1.6. Выводы	178
2.2. Исследование течения в фильтрующей установке.....	178
2.2.1. Постановка задачи	178
2.2.2. Получение характеристик пористой среды.....	180
2.2.3. Расчет течения в колонне.....	201
2.2.4. Выводы	216
2.3. Тепловой расчет сушилки гальванотехнического производства.....	216
2.3.1. Постановка задачи	216
2.3.2. Расчетная модель	219
2.3.3. Результаты	235
2.3.4. Выводы	243
2.4. Моделирование холодильной витрины.....	243
2.4.1. Постановка задачи	243
2.4.2. Анализ возможности упрощения расчетной модели.....	248
2.4.3. Расчетная модель	265
2.4.4. Результаты	275
2.4.5. Расчет с учетом влажности	279
2.4.6. Выводы	284
2.5. Тепловая модель офисного помещения	284
2.5.1. Постановка задачи	284
2.5.2. Построение расчетной модели	285
2.5.3. Результаты и их интерпретация.....	316
2.5.4. Выводы	333

2.6. Гидравлическая модель центробежного насоса	333
2.6.1. Постановка задачи	335
2.6.2. Расчетная модель	336
2.6.3. Базовый расчет	345
2.6.4. Анализ сходимости	351
2.6.5. Расчет при различных расходах	356
2.6.6. Учет кавитации	358
2.6.7. Выводы	363
2.7. Исследование гидропривода буровой установки	364
2.7.1. Постановка задачи	364
2.7.2. Расчетная модель	365
2.7.3. Результаты и их интерпретация	372
2.7.4. Выводы	375
2.8. Газодинамика автомобильного турбокомпрессора	376
2.8.1. Постановка задачи	376
2.8.2. Расчетная модель	377
2.8.3. Результаты и их интерпретация	387
2.8.4. Выводы	396
Глава 3. Кинематика и динамика — SolidWorks Motion	397
3.1. Кинематика устройства сортировки	397
3.1.1. Постановка задачи	397
3.1.2. Подготовка геометрической модели	398
3.1.3. Построение модели движения	399
3.1.4. Выводы	420
3.2. Имитация троса в модели движения	421
3.2.1. Постановка задачи	421
3.2.2. Подготовка геометрической модели	421
3.2.3. Построение модели движения	422
3.2.4. Выводы	429
Приложения	431
Приложение 1. Матрица функциональности SOLIDWORKS FLOW SIMULATION	433
Приложение 2. Физический смысл понятий, описывающих тепловое состояние с точки зрения человека	439
Приложение 3. Описание компакт-диска	443

Введение

В течение последних десяти лет SolidWorks уверенно присутствует среди наиболее востребованных систем автоматизированного проектирования в машиностроении. Сфера его применения непрерывно расширяется за счет смежных отраслей: приборостроения, строительства, разработки товаров бытового назначения.

Есть немало причин для объяснения этого факта. Главная — развитая базовая функциональность в совокупности с разумным интерфейсом, простотой конфигурирования, приемлемой ценой. SolidWorks непрерывно развивается, причем движение происходит и за счет развития имеющихся возможностей, и через расширение круга решаемых задач: собственно моделирования и проектирования, оформления документации, управления проектами, описания технологических процессов, подготовки управляющих программ для оборудования с программным управлением и т. д.

В этой связи позиционирование системы как инструмента корпоративного масштаба становится все более аргументированным, не заставляя небольшие и средние коллективы приспособляться под идеологию масштабных задач.

История существования SolidWorks в России идет параллельно с историей внедрения идеологии трехмерного проектирования с оформлением конструкторской документации. Можно даже говорить, что утверждение этого подхода во многом произошло под влиянием SolidWorks. Дело в том, что подобные инструменты делают несостоятельной аргументацию консервативно настроенного персонала, построенную на утверждениях о сложности современных САПР, их неадаптированности к требованиям отечественных стандартов.

Схожие процессы наблюдаются сейчас в отношении массового потребителя (насколько это понятие применимо к инженерной деятельности) относительно инструментов компьютерного инженерного анализа. В начале века их использование было или безусловной необходимостью, или же уделом энтузиастов. Сегодняшнее состояние "общественного мнения" таково, что данные инструменты стали вполне обыденными. Тому есть ряд причин, в целом обоснованных, например, стремление повысить качество и сократить сроки. Есть, разумеется, и негатив, связанный с разрывом поколений, когда наработанные методики не могут быть воспроизведены с приемлемыми затратами.

Об актуальности компьютерного анализа можно судить по тому, что предыдущие издания автора, персональные и в соавторстве, посвященные использованию интегрированных расчетных модулей семейства Simulation: собственно Simulation (ранее — COSMOSWorks); Flow Simulation (ранее — COSMOSFloWorks) и SolidWorks Motion (ранее COSMOSMotion) — оказались вполне востребованными. Как показала практика, публикации (заслуживающие внимания) на эту тему разделяются на несколько категорий. Одна — для, условно говоря, начинающих, где объясняется интерфейс, растолковываются базовые понятия численного анализа. На сей момент с этим вполне справляются справочные системы, а также интегрированные

фирменные учебные пособия, которые содержат модели и описания последовательности действий. Лицензионным пользователям доступны методически выверенные учебные курсы, сопровождаемые печатными изданиями (на данный момент на английском языке). Весь этот массив информации в совокупности более чем достаточен для качественного овладения собственно программами и, на базовом уровне, теорией.

Следующая категория книг акцентирует внимание на математике и механике, а иногда и на алгоритмах реализации этих сущностей. Существует обширный пласт отечественной и переводной литературы, выпущенной в подавляющем большинстве в 80–90-х годах прошлого века. Для освоения фундаментальных вопросов лучше обратиться именно к этим изданиям. Актуальную информацию следует искать в специализированной периодике и иностранной, по большей части, литературе.

Эта книга, в совокупности с последними изданиями автора, призвана заполнить, а местами и сформировать, нишу "практических руководств". Здесь под "практикой" понимаются не столько манипуляции с программой (хотя и они тоже), но мотивирование ее инструментов для решения реальных задач. Последние не подгонялись под имеющийся инструмент, а возникли и потребовали решения. Как представляется, для субъекта, нацеленного именно на практическое использование данных инструментов, полезным будет воспроизвести всю последовательность действий, включая побуждения исполнителя к тем или иным решениям. В этом смысле в содержании присутствует некий "плюрализм", подразумевающий неоднозначность решения и возможность отрицательного результата.

Автор отдает себе отчет в невозможности иметь одинаково хорошую квалификацию во всем спектре обсуждаемых вопросов, поэтому в непрофильных для него сферах материал излагается скорее с позиции "квалифицированного пользователя" с хорошим здравым смыслом, чем прикладного специалиста. Однако на собственно факты это не влияет: они могут по-разному толковаться, но их содержание в значительной степени не зависит от автора. В любом случае приветствуется обратная реакция, в том числе и позитивная критика.

Как упоминалось, материал построен на реальных задачах. В абсолютном большинстве они возникли в ходе технической поддержки и обучения. Понятно, что исходного материала было намного больше, но из него отобраны наиболее показательные примеры, не имеющие прямых аналогов в предыдущих книгах или же обладающие каким-то сходством, но несущие новую информацию или демонстрирующие новую функциональность.

Ряд задач являются каноническими, то есть посвящены типовым объектам. Этот материал продолжает тему верификации программы — сравнения с аналитикой, экспериментом или результатами "доказанных" численных расчетов.

Автор выражает благодарность всем, кто способствовал появлению материала и собственно книги: пользователям программ, читателям, службе поддержки SolidWorks Corporation, коллегам из фирмы SolidWorks Russia.

На прилагаемом DVD-диске содержатся цветные иллюстрации. Также там размещены модели, соответствующие изложенному материалу.

Список литературы

1. Расчет на прочность деталей машин: Справочник / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. — 4-е изд. М.: Машиностроение, 1993.
2. Расчет упругих элементов машин и приборов / Пономарев С. Д., Андреева С. Л. М.: Машиностроение, 1980.
3. Прочность, устойчивость, колебания: Справочник в 3-х т. Т. 2 / Под ред. И. А. Биргера и Я. Г. Пановко. — М.: Машиностроение, 1968.
4. Е. Г. Малявина. Теплотери здания: Справочное пособие. М.: Авок-Пресс, 2007.



Глава 1

Прочность и устойчивость конструкций — SolidWorks Simulation

Глава содержит две группы задач. Первая — это задачи верификации в более (элементарная геометрия и постановка) или менее (реальная геометрия и близкие к практике условия нагружения) "чистом" виде. Значительное внимание уделено вопросам устойчивости, в том числе и в геометрически нелинейной постановке.

Подробно рассматриваются достаточно тонкие моменты, связанные с численным анализом пружин. Показано, как приблизиться к идеализированным результатам, получаемым методами "Сопrotивления материалов", обсуждаются отличия реальных и условных моделей.

Применительно к задачам, связанным с расчетом оболочек, на различных примерах анализируется применимость различных оболочечных и твердотельной аппроксимаций, а также способы их реализации в SolidWorks Simulation.

Практических примеров здесь два: рамная конструкция с криволинейными профилями сложной формы, соединенными податливыми связями, и расчет кала, передающего крутящий момент в деформированном состоянии. Последняя задача потребовала привлечения нелинейного решателя и специальных приемов для достоверной имитации работы узла.

1.1. Расчет витых цилиндрических пружин

Рассмотрим цилиндрическую пружину на рис. 1.1. Ее средний диаметр $D_0 = 14$ мм; диаметр витков $d = 2$ мм; число рабочих витков круглого сечения $n = 9$; шаг $t = 5$ мм. Как видно, в модели отсутствуют поджатые витки, а для приложения граничных условий используются поверхности, образовавшиеся в результате "сошлифовки" концов. Такие упрощения приняты, чтобы максимально приблизить геометрию к расчетной модели, на базе которой строятся известные аналитические оценки [1].

Свойства материала (стали) показаны на рис. 1.2.

Рассчитанная в соответствии с упомянутым изданием податливость пружины в осевом направлении $\lambda = 0,150$ мм/Н. Соответственно жесткость $K = 6,67$ Н/мм.

Граничные условия состоят в заделке одной из сошлифованных граней во всех направлениях, а грани, к которой приложена осевая нагрузка — только в плоскости, перпендикулярной оси. Последнее несколько увеличивает жесткость виртуальной пружины, препятствуя изменению ее радиального размера, но предотвращает перекашивание. Это существенно искажает картину напряженно-деформированного состояния и приводит к отклонению численной модели от аналитической идеализации. В расчете используем нагрузку 10 Н.

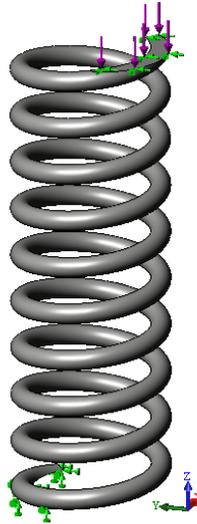


Рис. 1.1. Модель пружины с граничными условиями

Материал Детализация	
Имя исследования	БП (-Взведенный затвор-)
Имя материала	Простая углеродистая сталь
Источник материала	Материал SolidWorks
EX	2.1E+011 N/m ²
NUXY	0.28
GXY	7.9E+010 N/m ²
DENS	7800 kg/m ³
SIGXT	3.9983E+008 N/m ²
SIGYLD	2.2059E+008 N/m ²
ALPX	1.3E-005 /Kelvin
KX	43 W/(m.K)
C	440 J/(kg.K)

Рис. 1.2. Свойства материала пружины

Сетка конечных элементов показана на рис. 1.3. Используются элементы второго порядка (с параболическим полем перемещений), причем плотность сетки подобрана так, чтобы по диаметру проволоки располагалось два ребра конечных элементов. Так создается возможность, по крайней мере, в первом приближении, аппроксимировать распределение касательных напряжений в поперечном сечении скручиваемого стержня.

Поле вертикальных перемещений на фоне деформированного вида показано на рис. 1.4 и дает возможность оценить жесткость упругого элемента. В качестве базовой величины вертикального перемещения рекомендуется взять среднее или сред-

неквадратичное соответствующих результатов с грани, к которой приложена сила. Для этого используется команда **Выбранный список** (List Selected), в качестве аргумента для которой используется соответствующая грань. Результат показан на рис. 1.5.

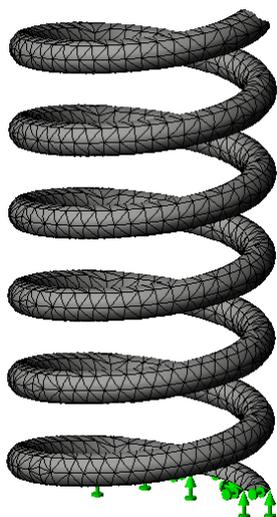


Рис. 1.3. Фрагмент сетки конечных элементов

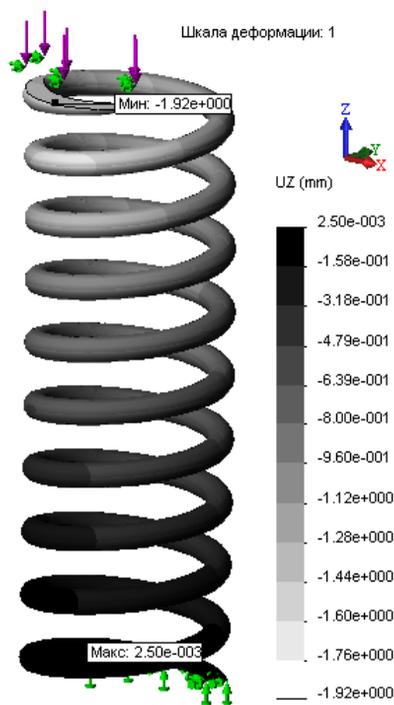


Рис. 1.4. Распределение осевых перемещений

Жесткость пружины, рассчитанная на базе этих результатов, составляет 5,49 Н/мм. Возникает вопрос об однородности осевых перемещений (отсутствию перекашивания), а также степени влияния относительно больших (об этом может последовать соответствующее предупреждение программы) перемещений. Второй фактор оценивается проще: активизируется опция **Большие перемещения** (Large displacement), предполагающая расчет с постепенно возрастающей нагрузкой. Максимальное вертикальное перемещение составило 1,81 мм, что говорит о незначительном влиянии изменения жесткости пружины в ходе деформирования на результирующую жесткость. Здесь следует учитывать, что относительно большая величина перемещений обусловлена геометрией конструкции, в то время как деформации вполне укладываются в понятие "малых".

Что касается "перекашивания", то оно достаточно существенно, о чем свидетельствует рис. 1.6. Причиной является эксцентриситет приложения силы в совокупности с "разрешением" нагруженной грани изменять ориентацию.

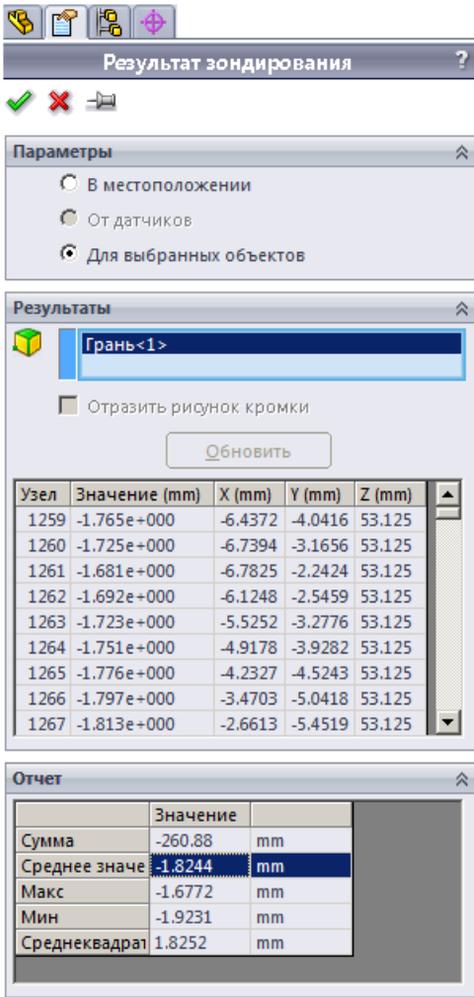


Рис. 1.5. Получение среднего значения вертикального перемещения

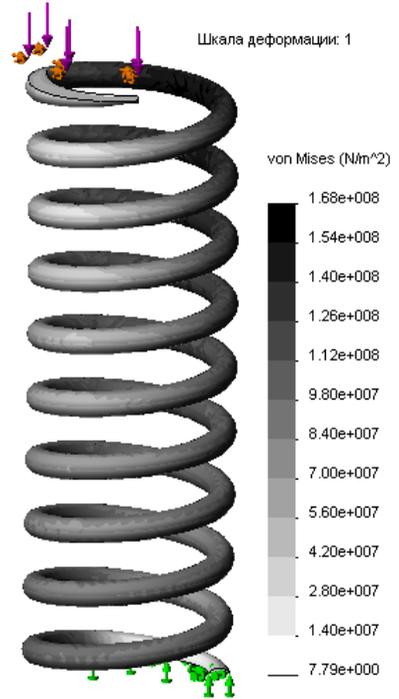


Рис. 1.6. Распределение эквивалентных напряжений

Попытаемся модифицировать заделки с целью предотвращения поворота нагруженной грани. Вместо "просто" силы вводим дистанционную нагрузку в варианте "жесткая связь". При этом точка приложения силы находится на оси пружины (для чего, само собой, пришлось предварительно создать справочную систему координат с началом на оси пружины в плоскости торца) (рис. 1.7). Совместно с имеющейся заделкой "в плоскости" это исключает как смещение, так и поворот относительно осей, лежащих в плоскости грани. Дистанционная нагрузка прикладывается в варианте **Жесткая связь** (Rigid connection), что делает объект воздействия недеформируемым. Последний факт, в принципе, не противоречит гипотезам, использованным при получении аналитического решения.



Рис. 1.7. Приложение дистанционной силы

Как видно на рис. 1.8, эффект перекашивания радикально уменьшен. Поэтому можно оценить упругие свойства в сравнении с аналитикой: податливость $\lambda = 0,155$ мм/Н, что очень близко к известной оценке.

В процессе расчета (при решении системы линейных уравнений) программа может выдавать диагностическое сообщение, информирующее о желательности учета больших перемещений (рис. 1.9). Попробуем активизировать соответствующую опцию в окне свойств **Исследования**. Как видно на рис. 1.10, результат изменился весьма незначительно. Это совпадает с общепринятыми рекомендациями: поскольку деформирование модели не сопровождается изменением жесткости, то модель "малых перемещений" (базовое ее отличие от уточняющей методики заключается в одномоментном приложении нагрузок) вполне адекватна задаче. Поэтому следует (в конкретном, разумеется, случае) отвечать отрицательно (иначе программа активизирует обсуждаемую опцию и перезапустит решатель).

Попробуем более традиционную схему заделок, применив ее к упрощенной геометрической модели пружины. Чтобы предотвратить перекашивание, применяем следующую схему граничных условий (рис. 1.11): один торец фиксируем во всех направлениях, а второй — в двух (кроме вертикального). В последнем случае используется система координат, связанная с горизонтальной плоскостью, то есть фиксируются перемещения в направлениях, которые ей параллельны. Сила же перпендикулярна этой плоскости.

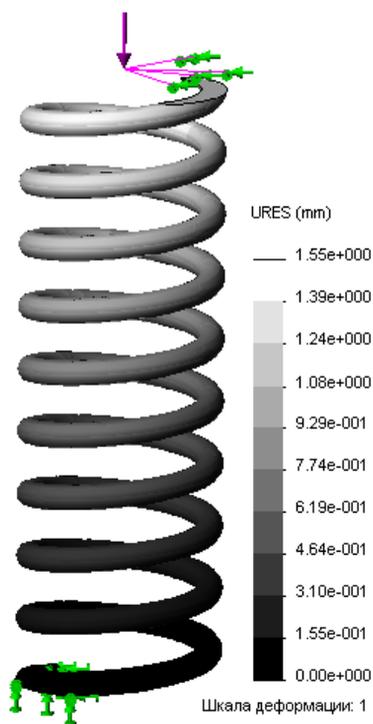


Рис. 1.8. Диаграмма перемещений для модели

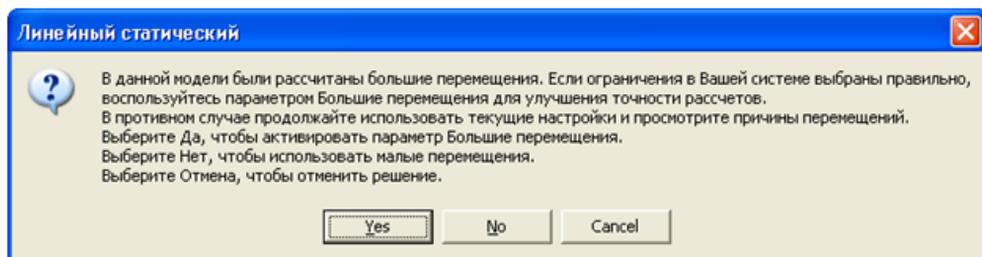


Рис. 1.9. Диагностическое сообщение с предложением активизировать модель "больших перемещений"

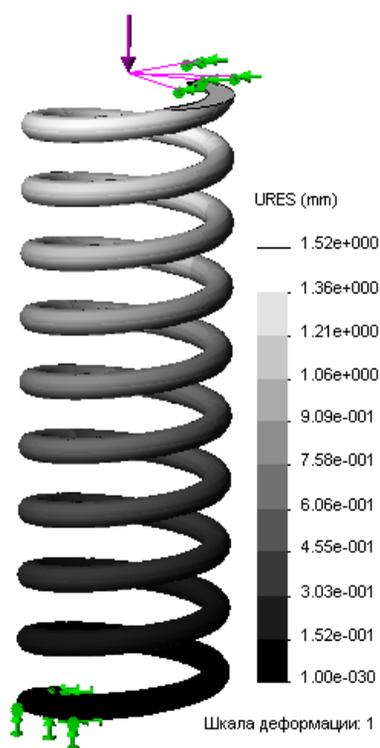


Рис. 1.10. Диаграмма с учетом "больших перемещений"

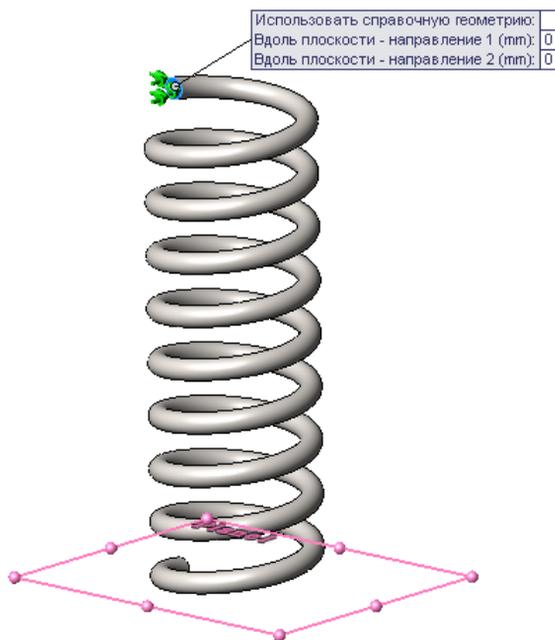


Рис 1.11. Граничные условия, имитирующие фиксацию торцов

Как следует из рис. 1.12, с учетом некоторого отличия геометрии, жесткость пружины соответствует предыдущим моделям: пружина деформируется преимущественно в осевом направлении, что делает модель пригодной для сравнения с аналитикой. Будем исследовать этот вопрос применительно к величинам напряжений.

Известное решение утверждает, что определяющим компонентом напряженного состояния в витой пружине при осевой нагрузке является сдвиг из-за кручения витка. Для данной геометрии и силы максимальные касательные напряжения по кон-

туру сечения проволоки $\tau_{\max} = 5,39 \times 10^7$ Па. В целях упрощения будем сравнивать с данной величиной не касательные напряжения в конкретном сечении, а величину интенсивности напряжений σ_i , отображенную на поверхности пружины. Интенсивность напряжений равна удвоенной величине максимального касательного напряжения в данной точке (рис. 1.13). Как видно, распределение функции на поверхности неоднородно. Понятно, что даже если нивелировать действие сингулярностей на зафиксированных концах (их следствия) и сузить диапазон шкалы (рис. 1.14), то результат все равно остается не слишком удовлетворительным (с точки зрения соответствия ожиданиям).

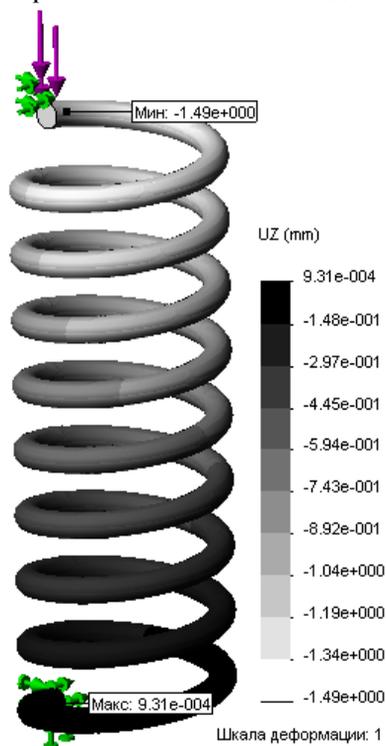


Рис. 1.12. Диаграмма перемещений для модели с фиксированными торцами пружины

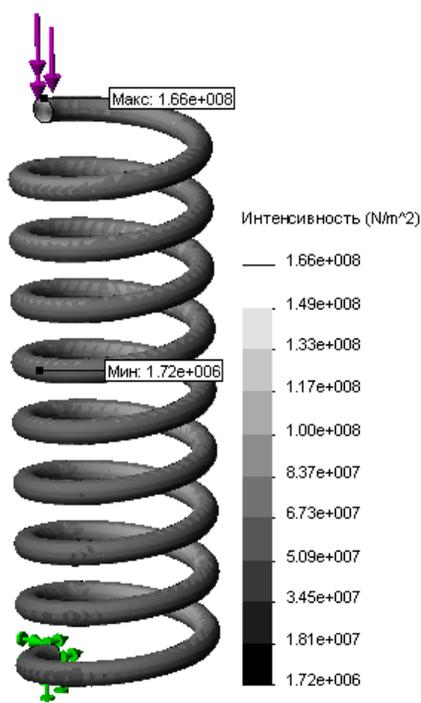


Рис. 1.13. Интенсивность напряжений

Источник проблем, как и в большинстве подобных случаев, — достаточно редкая сетка. Размер конечного элемента по умолчанию примем таким, чтобы по диаметру проволоки генерировалось порядка четырех элементов. Предварительно выполним еще одну манипуляцию. Интерес представляет распределение напряжений, в частности касательных по окружности проволоки. Для последующей идентификации соответствующих функций нанесем на грань пружины линию разреза (рис. 1.15). Результирующая сетка конечных элементов показана на рис. 1.16.

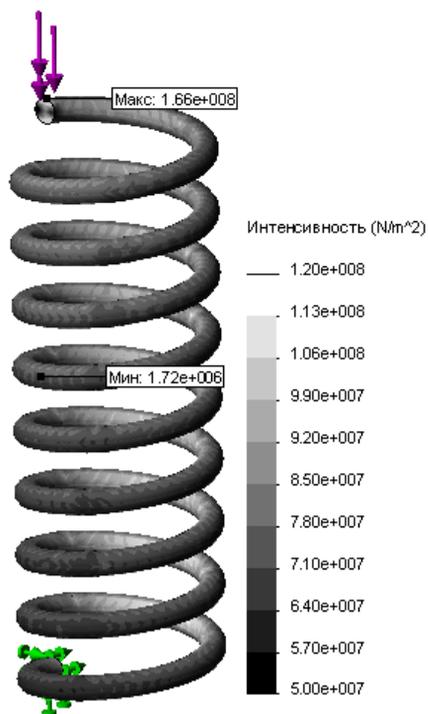


Рис. 1.14. Интенсивность напряжений — суженный диапазон шкалы

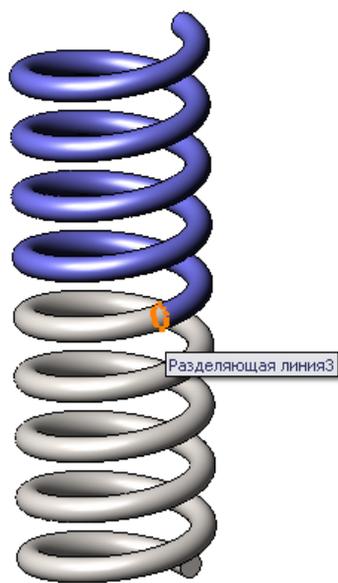


Рис. 1.15. Модифицированная геометрия с линией разреза

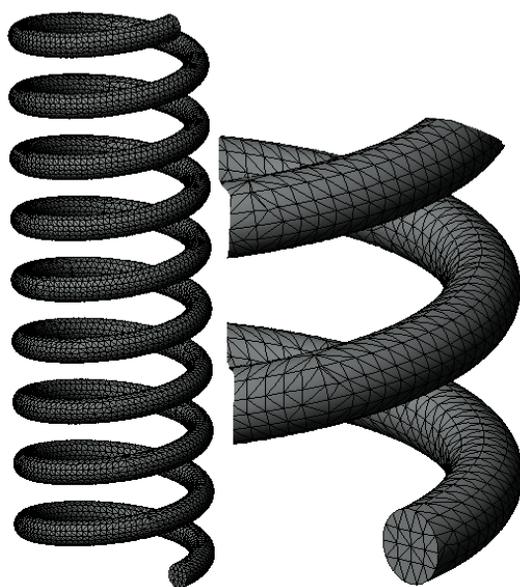


Рис. 1.16. Плотная сетка и ее фрагмент

Интересно, что жесткость модели после уплотнения сетки практически не изменилась: диаграмма перемещений, по сути, идентична полученной для редкой сетки. Распределение же интенсивности напряжений стало визуально более "упорядоченным" (рис. 1.17). При этом вполне очевидна локализация минимума касательных напряжений: он должен располагаться в центре проволоки.

Результат выполнения команды **Выбранный список** (List Selected), аргументом которой является кромка линии разреза, показан на рис. 1.18. Во-первых, среднее значение (по кромке) интенсивности составило около $9,0 \times 10^7$, что соответствует касательному напряжению $\tau = 4,5 \times 10^7$ Па, в то время как аналитика предсказала $5,39 \times 10^7$ Па. Распределение интенсивности по кромке (график получен после нажатия кнопки **Эпюра** (Plot) в панели **Результат зондирования** (Probe Result)) показан на рис. 1.19. Максимальное значение интенсивности равно примерно 10×10^7 Па. Таким образом, можно констатировать удовлетворительное соответствие между численным и аналитическим расчетом.

Может возникнуть естественный вопрос: как объяснить синусоидальный характер распределения касательных напряжений вдоль кромки? Дело здесь в том, что на постоянное касательное напряжение, возникающее в результате кручения проволоки (в предположении, что основным силовым фактором является крутящий момент), накладывается составляющая касательного напряжения, порождаемого перерезывающей силой. Оно максимально по модулю внутри и снаружи пружины. При этом направления компонентов касательных напряжений одинаковы внутри и направлены в разные стороны снаружи. "Сверху" и "снизу" проволоки вклад перерезывающей силы в касательные напряжения равен нулю.

Разницу между средним по синусоиде и аналитикой можно объяснить особенностями процедуры вычисления деформаций/напряжений в конечно-элементной системе: деформации (или напряжения — это зависит от конкретной реализации алгоритма) в узлах рассчитываются на основе среднего арифметического экстраполированных деформаций в точках интегрирования.

Подводя итог сравнению аналитических и численных моделей витых пружин, можно отметить, что соответствующие результаты вполне сопоставимы. Для оценки жесткости аппроксимации с редкой (два элемента по диаметру проволоки) сеткой дают приемлемые оценки. Для прогноза прочности требуется использовать достаточно плотную сетку.

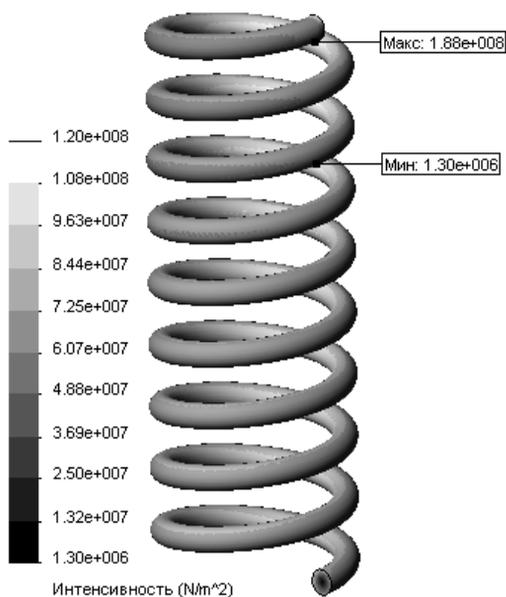


Рис. 1.17. Распределение интенсивности напряжений в модели с более плотной сеткой

Результат зондирования ?

✓ ✗ 📁

Параметры ⌵

В местоположении
 От датчиков
 Для выбранных объектов

Результаты ⌵

Кромка <1>

Отразить рисунок кромки

Обновить

Узел	Значение (N/m ²)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
1782	1.08e+008	3.6198E	6	30.625
98562	1.05e+008	-4.2429I	6.0241	30.405
9072	1.06e+008	-1.6051I	6.0958	30.195
52840	1.01e+008	1.3115E	6.2111	30.006
9073	1.01e+008	1.9507E	6.3653	29.847
52831	9.52e+007	4.7623E	6.5512	29.725
9074	9.27e+007	1.0028E	6.7584	29.648
52821	8.67e+007	6.6655E	6.9782	29.619
9075	8.49e+007	8.8032E	7.1994	29.639

Отчет ⌵

	Значение
Сумма	2.505e+009 N/m ²
Среднее зн	8.9465e+007 N/m ²
Макс	1.0766e+008 N/m ²
Мин	7.3705e+007 N/m ²
Среднеква	9.0196e+007 N/m ²

Параметры отчета ⌵

📄 📄 📈 📄

Эпюра

Рис. 1.18. Результат выполнения команды **Выбранный список** применительно к линии разреза

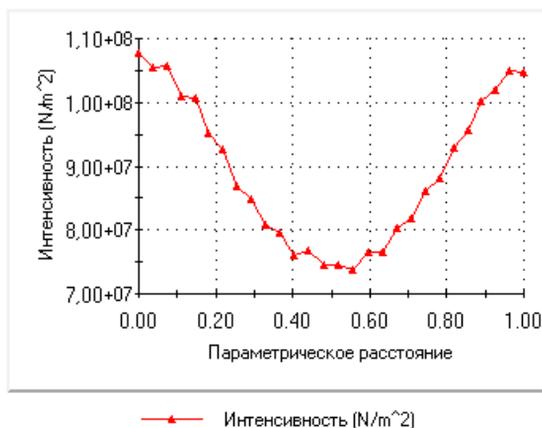


Рис. 1.19. Интенсивность напряжений на линии разреза

Метод конечных элементов дает адекватную имитацию практически всех факторов, влияющих на функционирование пружины (обработка концов, схемы их опирания, эксцентриситета нагрузки и т. д.). С учетом простоты подготовки геометрической и расчетной модели SolidWorks Simulation может быть эффективно использован как для проектировочного, так и для поверочного расчета.

1.2. Расчет прорезных пружин

Рассмотрим прорезную цилиндрическую пружину, чертеж которой показан на рис. 1.20. Ее внутренний средний диаметр $d = 82$ мм; наружный $D = 106$ мм; толщина кольца $h = 13$ мм; число колец $n = 11$; центральный угол кольца = 160° . Следует обратить внимание, что границы прорезей совпадают с радиусами. Геометрическая модель показана на рис. 1.21.

Податливость пружины с учетом конечной величины центрального угла $\lambda = 7,06 \times 10^{-4}$ мм/Н [2]. Соответственно жесткость $K = 1,42 \times 10^4$ Н/мм. Если в аналитическом расчете не учитывать ширину перемычек (центральный угол равен 180°), то $\lambda = 9,30 \times 10^{-5}$ мм/Н. Поскольку в дальнейшем более удобно будет сравнивать величины перемещений, то прогнозируемая осевая осадка для силы 1000 Н составляет $7,06 \times 10^{-2}$ мм или, в отсутствие перемычек, $9,30 \times 10^{-2}$ мм.

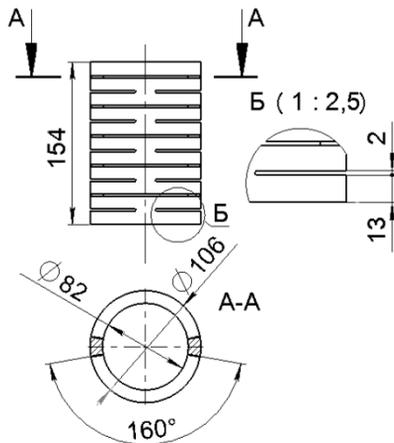


Рис. 1.20. Чертеж пружины

Свойства материала (стали) идентичны использованным для витой пружины (см. рис. 1.20).

Расчетная модель показана на рис. 1.22. Выделена четверть исходного объекта, а на получившиеся вертикальные грани поставлено условие **Симметрия** (Symmetry), что (для твердотельной модели), по сути, есть равенство нулю нормального перемещения. В качестве усилий используем противоположно направленные силы на торцах. Поскольку в расчете оставлена только четверть, то каждая сила равна 250 Н. Для того чтобы исключить движение объекта как жесткого целого вдоль

оси, одну из вершин (кстати говоря, это может быть любая вершина модели) фиксируем в направлении кромки, параллельной оси (есть, понятно, и другие способы добиться аналогичного эффекта).

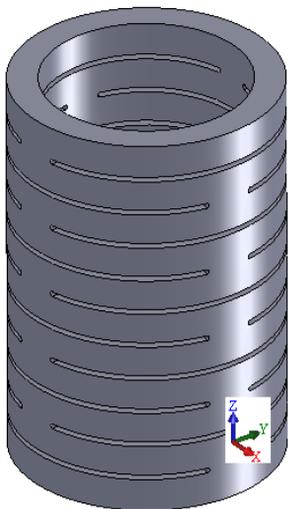


Рис. 1.21. Геометрическая модель прорезной пружины

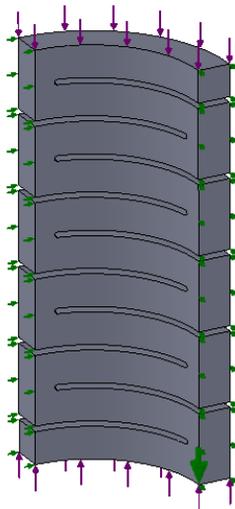


Рис. 1.22. Граничные условия при нагружении силой

Может возникнуть вопрос, почему на одном из торцов не зафиксировано осевое перемещение. Дело в том, что это изменит жесткость грани и, как следствие, повысит жесткость системы в целом. Исходя из соображений здравого смысла, граничные условия на противоположных торцах (если, конечно, в конструкции не реализовано что-то иное) должны быть тождественны.

Сетка конечных элементов (рис. 1.23) с параметрами, приведенными на рис. 1.24, получена алгоритмом **На основе кривизны** (Curved based), который, согласно справочной системе программы, обеспечивает более качественную дискретизацию по сравнению с "традиционным" алгоритмом, базирующимся на диаграммах Делано—Вороного. Использованы элементы второго порядка. Как видно, внешне результат выглядит вполне качественно: элементы приближаются к правильным тетраэдрам и в целом достаточно пропорциональны. Если к уже готовой сетке применить команду **Создать эпюру сетки | Пропорции** (Create Mesh Plot | Aspect ratio), то результат будет выглядеть, как показано на рис. 1.25. Соотношение наибольшей и наименьшей стороны в пределах одного элемента не превышает 4,55. Величина Якобиана (ее можно получить командой **Якобиан** (Jacobian), соответствующая диаграмма в силу ее малой информативности не показана) не превышает 2,2.

ПРИМЕЧАНИЕ

В современных версиях COSMOSWorks (SolidWorks Simulation) вместо Якобиана в традиционном его смысле фактически генерируется величина от единицы (идеальный элемент) до бесконечности (вырожденный).

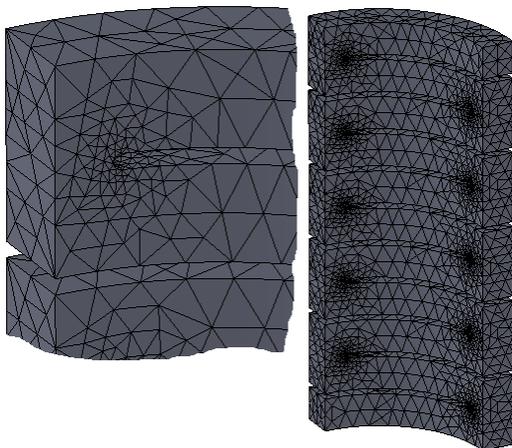


Рис. 1.23. Сетка на основе метода кривизны

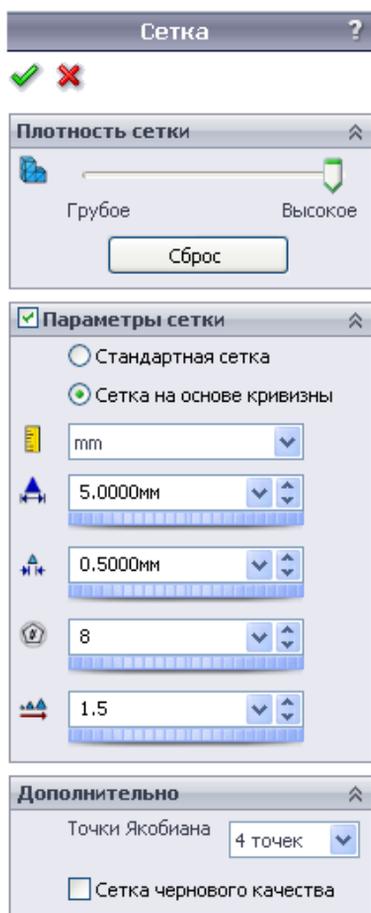


Рис. 1.24. Параметры сетки на основе кривизны

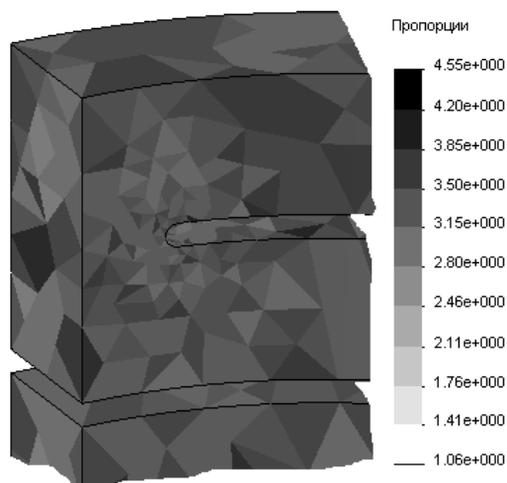


Рис. 1.25. Пропорции сетки, полученной методом кривизны

Сетка конечных элементов, полученная "традиционным" алгоритмом, приведена на рис. 1.26, *слева*. Если тот же алгоритм использовать в совокупности с опцией **Автоматический переход** (Automatic transition), которая приводит к уплотнению сетки в окрестности криволинейных кромок (и иногда — граней), то результат будет выглядеть, как показано на рис. 1.26, *справа*. Диаграммы пропорции для этих сеток приведены на рис. 1.27, 1.28: очевидно существенное снижение качества сетки, если под ним понимать близость конечных элементов к правильным тетраэдрам. Максимальная величина Якобиана также ощутимо возросла как в первом, так и во втором случае, приблизившись к 30.

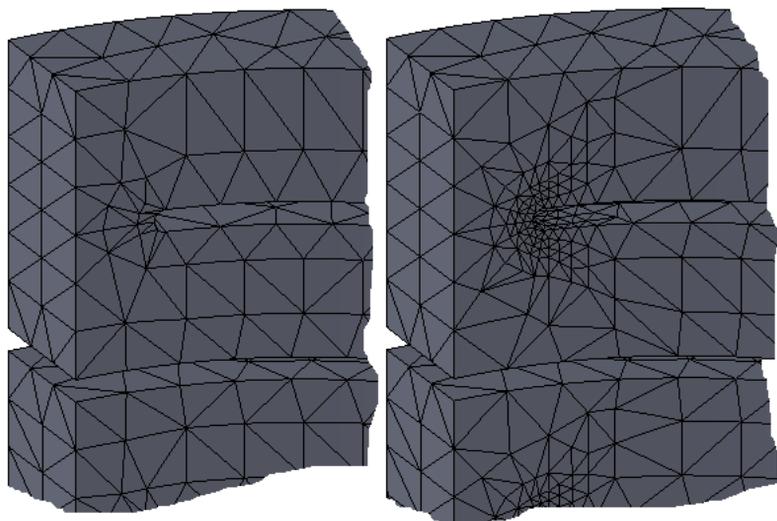


Рис. 1.26. Сетки, полученные на основе "стандартного" метода

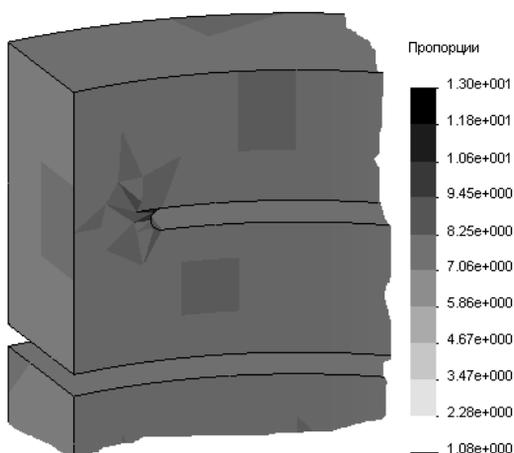


Рис. 1.27. Пропорции сетки, полученной "стандартным" алгоритмом

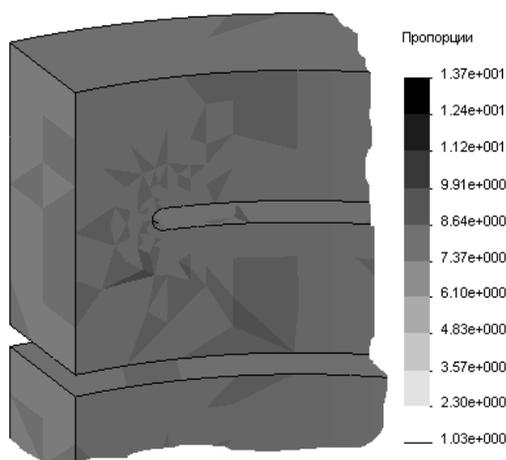


Рис. 1.28. Пропорции сетки, полученной "стандартным" алгоритмом с автоматическим уплотнением

Возникает естественный вопрос, какой алгоритм и какие параметры настройки являются наилучшими. В общем случае алгоритм "на основе кривизны" уплотняет сетку не только в зонах отрицательной кривизны (в частности во внутренних скруглениях), но и в окрестности внешних скруглений. Это далеко не всегда рационально, поскольку грани с положительной кривизной, как правило, не являются зонами концентрации напряжений. Одной из наиболее очевидных ситуаций, где требуется уплотнять сетку и на выпуклых гранях, является контактная задача, когда корректное моделирование взаимодействия требует точного описания геометрии, как на вогнутых, так и на выпуклых объектах.

В данном случае мы бегло рассмотрели исключительно алгоритмы автоматического уплотнения сетки, работа которых строится на основе анализа геометрии:

ручное (посредством инструмента **Элемент управления сеткой (Mesh Control)**) и адаптивное (когда решение принимается на базе предыдущего шага расчета), применительно к данной задаче.

Диаграмма осевого перемещения (в данном случае оно совпадает с перемещением в направлении оси Z) показана на рис. 1.29. Под осадкой пружины будем понимать разницу средних перемещений, взятых с противоположных торцов. Такой подход основан на том наблюдении, что под действием силы торцы становятся существенно неплоскими, и по этой причине нужен алгоритм, обеспечивающий своего рода инвариантность результата относительно объекта измерения. В данном случае осадка будет равна $0,1991 + 0,00813 = 0,207$ мм.

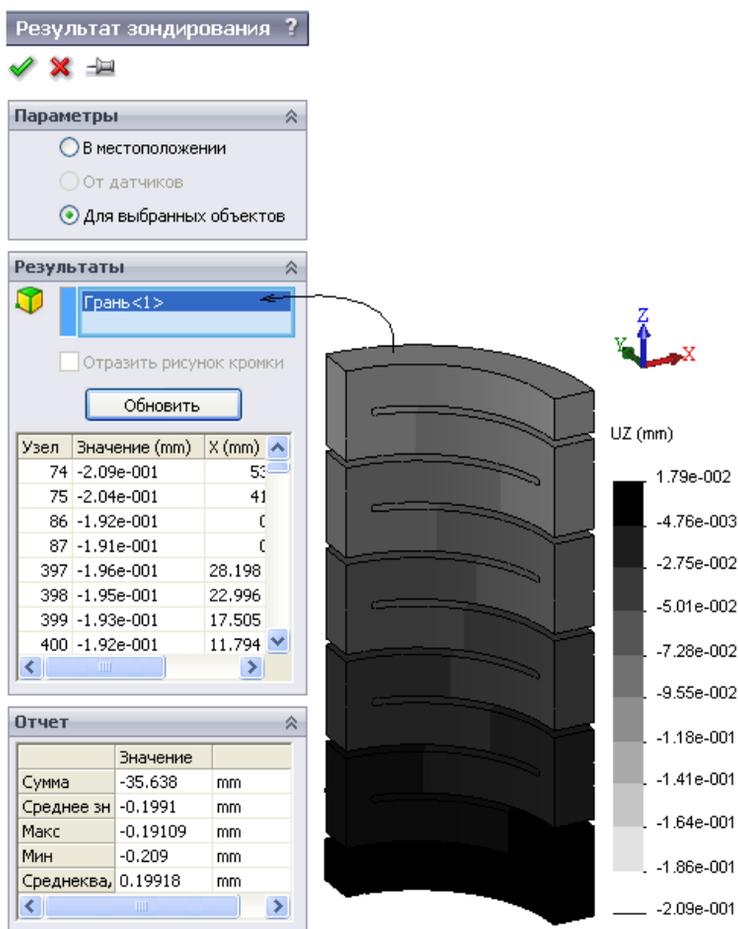


Рис. 1.29. Идентификация среднего по грани осевого перемещения

Как видно, полученное перемещение более чем в два раза превышает аналитическую оценку. Попытаемся "приблизиться" к аналитике. Во-первых, важную роль играет способ реализации граничных условий, в данном случае нагрузки сжатия.

В реальных конструкциях пружины, как правило, взаимодействуют с плоскими жесткими опорами, в силу чего деформирование крайних колец происходит не так, как внутренних. Попытаемся воспроизвести такую ситуацию, для чего введем виртуальные объекты, имитирующие опоры.

Первый из них — "реальное" кольцо, представляющее собой деталь или тело, имеющее абсолютную жесткость и связанное с собственно пружиной контактным условием **Нет проникновения** (No penetration), в данном случае выбрана реализация **Узел с поверхностью** (Node to surface). Сделать объект абсолютно жестким можно посредством команды Simulation **Сделать жестким** (Make rigid), которая подается из контекстного меню пиктограммы соответствующего тела (рис. 1.30) в Менеджере.

Из-за того что тело является идеально жестким, форма его может быть произвольной при условии, что контактирующая с пружиной плоская грань эквивалентна торцу пружины или перекрывает его.

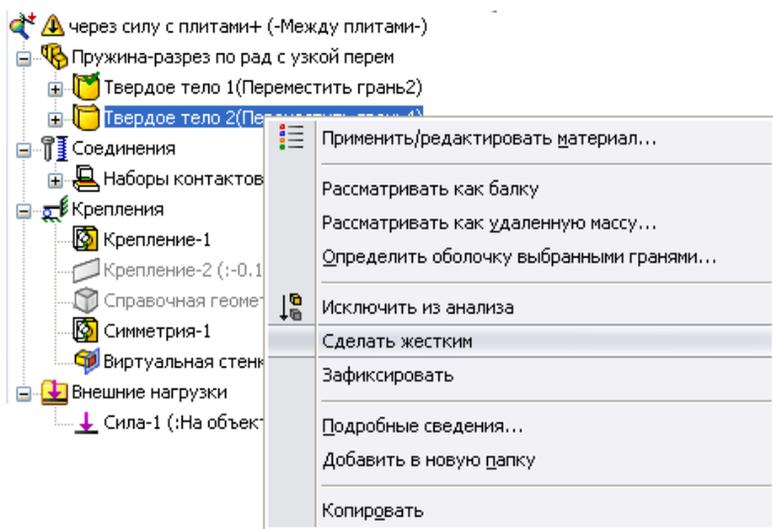


Рис. 1.30. Придание телу идеальной жесткости

С другого торца также можно было бы ввести аналогичную жесткую шайбу с фиксацией нормального перемещения на свободном торце или же применить другой прием. В качестве опоры для кольца будем использовать условность **Виртуальная стенка** (Virtual wall) со свойствами, показанными на рис. 1.31. Ее отличием от фиксации в нормальном направлении (аналогом этой заделки является условие **Симметрия** (Symmetry)) является возможность выхода граней из контакта целиком или локально. То есть эта фиксация (если стенка принята абсолютно жесткой) является однонаправленной.

Само собой, при наличии соответствующей информации можно смоделировать податливость опор, назначая подходящие коэффициенты нормальной (в терминах программы, "осевой") и сдвиговой ("касательной") жесткости.

Параметры сетки в данной модели тождественны рассмотренным ранее.

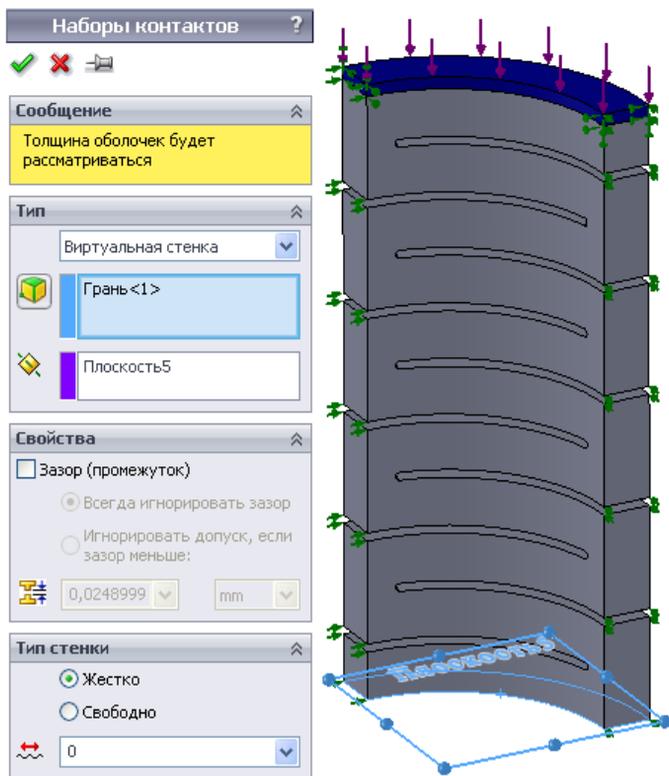


Рис. 1.31. Создание жесткой виртуальной стенки

Диаграмма осевых перемещений показана на рис. 1.32. Осадка пружины (она, по сути, равна перемещению произвольной точки жесткого кольца) составила 0,193 мм. Она несколько меньше, чем для модели со "свободными" заделками; причина этого понятна, поскольку в модифицированной модели перемещения крайних колец стеснены. Тем не менее жесткость конечно-элементной модели осталась более чем в два раза выше аналитической оценки.

Наступило время задуматься о причинах такого расхождения. Рассмотрим базовые посылки, лежащие в основе аналитической модели. Во-первых, это предположение об абсолютной жесткости перемычек. Во-вторых, гипотеза о том, что деформируемые кольца функционируют как плоские тонкие балки, имеющие исключительно моды изгиба и кручения. Поперечный сдвиг и растяжение/сжатие в кольцах отсутствуют. Все эти гипотезы уменьшают расчетную податливость относительно реальности. Попытаемся, в целях подтверждения достоверности конечно-элементного анализа, "интегрировать" эти условности в численную модель. Идеальную жесткость перемычек воспроизводим практически так же, как и в случае вспомогательной опоры. Расчленим деталь так, чтобы выделить перемычки в отдельные тела (для этого используется команда SolidWorks **Разделить** (Split)). Результат показан на рис. 1.33. Затем для тел, соответствующих перемычкам, применяем команду **Сделать жестким** (Make rigid).

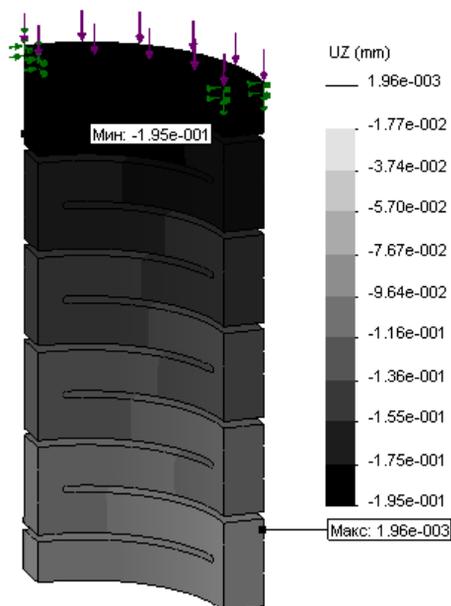


Рис. 1.32. Распределение осевых перемещений

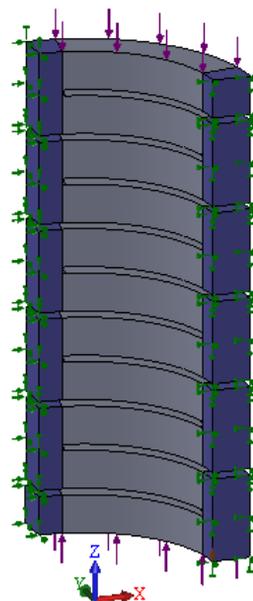


Рис. 1.33. Граничные условия для расчлененной модели

Граничные условия схожи с использованными для "гомогенной" модели при нагружении силой (см. рис. 1.22) за исключением того, что сила приложена не по всему торцу, а только в пределах деформируемой части кольца.

Сетка конечных элементов (как и в предыдущих вариантах, использован алгоритм **На основе кривизны** с сохранением характерных размеров) показана на рис. 1.34. Видно, что по толщине (в направлении оси пружины) колец на удалении от перемычек располагаются два конечных элемента. Это позволяет корректно воспроизвести деформации/напряжения поперечного сдвига (они в первом приближении аппроксимируются параболой) и изгиба (они близки к линейным). Как представляется, менее качественно воспроизводится кручение в кольцах. Как и по толщине, вдоль ширины (радиуса) кольца располагается (на удалении от перемычек) два конечных элемента. Применительно к прямоугольному профилю это позволяет в первом приближении аппроксимировать жесткость при кручении.

Однако на иллюстрации с сеткой можно увидеть и то, что, несмотря на назначение глобального контакта **Связанные** (Bonded) в варианте **Совместная сетка** (Compatible mesh), результатом является сетка несовместная. Это (по крайней

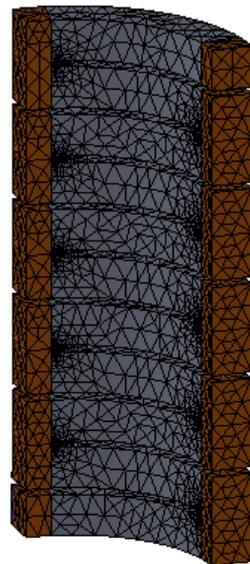


Рис. 1.34. Сетка конечных элементов для расчлененной модели

мере, в использованной версии программы) есть атрибут алгоритма **На основе кри- визны**.

В качестве осадки принимаем разницу средних осевых перемещений на торцах крайних перемычек, которая составила 0,117 мм. Как видим, пренебрежение податливостью перемычек повысило жесткость пружины почти в два раза, что радикально приблизило численную оценку к аналитической (рис. 1.35).

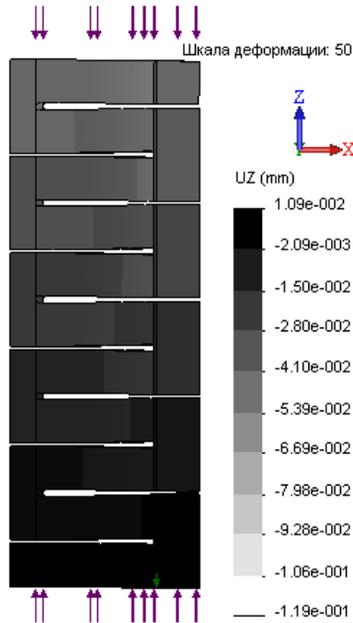


Рис. 1.35. Диаграмма осевого перемещения

Попытаемся ликвидировать еще один источник отличия конечно-элементной модели от аналитической. Как упоминалось, в решении "Сопrotивления материалов" не учитывается поперечный сдвиг колец. "Устранить" его в численной аппроксимации можно, существенно повысив модуль сдвига при сохранении других характеристик упругости. Для изотропного материала, как известно, независимыми являются только две из трех констант: модуль Юнга, коэффициент Пуассона и модуль сдвига. Поэтому создаем анизотропный (ортогонально-ортотропный) материал со свойствами, показанными на рис. 1.36, *слева*. Здесь модули сдвига были увеличены в 1000 раз. Этот тип анизотропии характеризуется девятью независимыми константами, то есть модули сдвига могут назначаться (при соблюдении определенных интервальных ограничений, описанных, кстати говоря, в справочной системе программы) независимо.

Тем не менее результат по сравнению с изотропным материалом никак не изменился. Дело здесь в том, что если даже в материале, декларированном как анизотропный, модули Юнга одинаковы, то система воспринимает его как изотропный. В этом случае модуль сдвига является справочной величиной и автоматически вычисляется системой на основе продольного модуля и коэффициента Пуассона.

Чтобы воспрепятствовать таким действиям программы, делаем модули вдоль осей отличными друг от друга, как показано на рис. 1.36, *справа*. Это, конечно, вносит определенную погрешность в результат, но "заставляет" программу воспринимать материал как анизотропный. Перемычки, как и в предыдущем случае, являются идеально жесткими.

Материал Детализация	
Имя исследования	Через силу с жесткими + жестк при сдвиге формально аниз (-Соединение абсолютно жесткими-)
Имя материала	Большая жесткость при сдвиге - формально
Источник материала	Библиотека Simulation
EX	2.1E+011 N/m ²
EY	2.1E+011 N/m ²
EZ	2.1E+011 N/m ²
NUXY	0.28
NUYZ	0.28
NUXZ	0.28
GXY	7.9E+013 N/m ²
GYZ	7.9E+013 N/m ²
GXZ	7.9E+013 N/m ²
DENS	7700 kg/m ³
SIGXT	7.2383E+008 N/m ²
SIGYLD	6.2042E+008 N/m ²
ALPX	1.3E-005 /Kelvin
KX	50 W/(m.K)
C	460 J/(kg.K)
Справочный	Система координат1

Материал Детализация	
Имя исследования	Копия [через силу с жесткими + жестк при сдвиге аниз (-Соединение абсолютно жесткими-)]
Имя материала	Большая жесткость при сдвиге
Источник материала	Библиотека Simulation
EX	2E+011 N/m ²
EY	2.1E+011 N/m ²
EZ	2.2E+011 N/m ²
NUXY	0.28
NUYZ	0.28
NUXZ	0.28
GXY	7.9E+013 N/m ²
GYZ	7.9E+013 N/m ²
GXZ	7.9E+013 N/m ²
DENS	7700 kg/m ³
SIGXT	7.2383E+008 N/m ²
SIGYLD	6.2042E+008 N/m ²
ALPX	1.3E-005 /Kelvin
KX	50 W/(m.K)
C	460 J/(kg.K)
Справочный	Система координат1

Рис. 1.36. Варианты свойств ортотропного материала с большим модулем сдвига

Диаграмма осевого перемещения показана на рис. 1.37. Жесткость пружины существенно повысилась, а осадка (определяемая по перемещению характерных точек) составила $3,45 \times 10^{-2}$ мм. Как видно, численная оценка жесткости превышает аналитическую в два раза. Это, как предполагается, есть следствие того, что была радикально уменьшена не только мода поперечного сдвига, но и, по сути, ликвидирована мода кручения колец. Она, если следовать аналитическому решению, вносит существенный вклад в общую податливость объекта.

В дополнение к сравнению результатов для жесткости попытаемся сопоставить оценки для напряжений. Используя методику, описанную в упомянутом источнике, можно получить значение максимального нормального напряжения, порожденного изгибом кольца: $\sigma_{\text{н}}^{\text{max}} = 2,52 \times 10^7$ Па, а также максимальное касательное напряжение, вызванное кручением: $\tau_{\text{max}} = 8,60 \times 10^6$ Па.

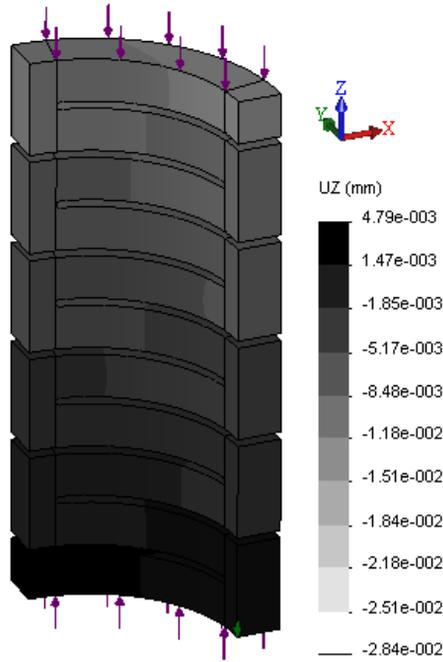


Рис. 1.37. Диаграмма осевого перемещения анизотропной пружины

Чтобы сделать результаты более наглядными, а их объяснение более аргументированным, модифицируем геометрическую модель, включив в нее линию разреза. Она выполнена на внутренней грани кольца, находящегося на удалении от места приложения нагрузки (чтобы нивелировать влияние краевых эффектов), и соединяет вершину скругления с границей кольца (рис. 1.38).

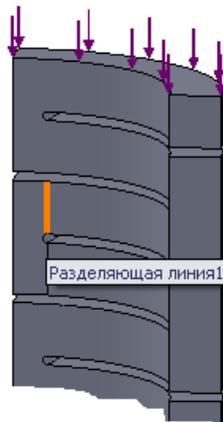


Рис. 1.38. Фрагмент пружины со вспомогательной линией разреза

В данном случае целью является сравнение аналитических напряжений, имеющих изгибную природу, с их численными "аналогами". В отличие от типовой ситуации, отображаем не эквивалентное (по Мизесу) напряжение, а окружное (рис. 1.39), в данном случае именно оно будет аналогом нормального изгибного. Максимальной информативностью обладает эпюра окружного напряжения, построенная на базе имеющейся кромки (рис. 1.40).

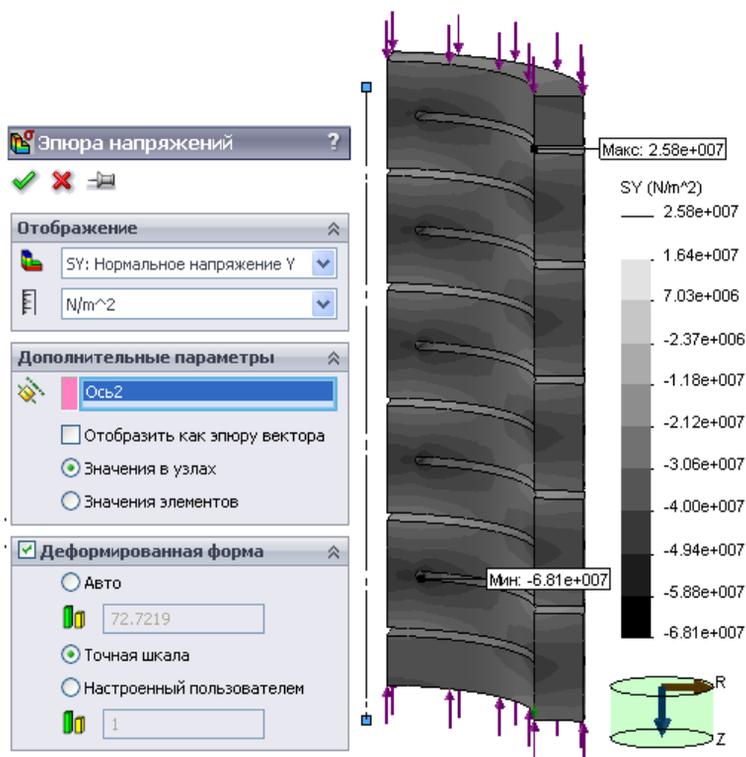


Рис. 1.39. Окружное нормальное напряжение

Как видно, напряжение в верхней точке кромки составляет $2,5 \times 10^7$ Па, а в нижней — $-4,4 \times 10^7$ Па. Первая величина крайне близка к аналитической оценке, а вторая существенно (по модулю) превышает ее. При этом эпюра при приближении к скруглению теряет линейность. Очевидно, что источником этой нелинейности является внутреннее скругление, выступающее в роли концентратора напряжений. Действительно, если экстраполировать линейный отрезок до конца кромки, то будет получена величина порядка $-2,3 \times 10^7$ Па.

Аналогичный подход применяем для "адаптации" численных результатов к имеющейся оценке максимальных касательных напряжений. В аналитической модели они порождены кручением кольца, поэтому в конечно-элементной модели их

аналогом будут касательные напряжения τ_{r0} , также вычисленные в цилиндрической системе координат. Сечение соответствующей диаграммы плоскостью, проходящей через ось, показано на рис. 1.41. Здесь также полезно было бы построить эпюру вдоль, например, верхней кромки сечения, однако даже визуальная оценка дает значение $\tau_{r0} \approx 8,8 \times 10^6$ Па, что очень близко к аналитике.

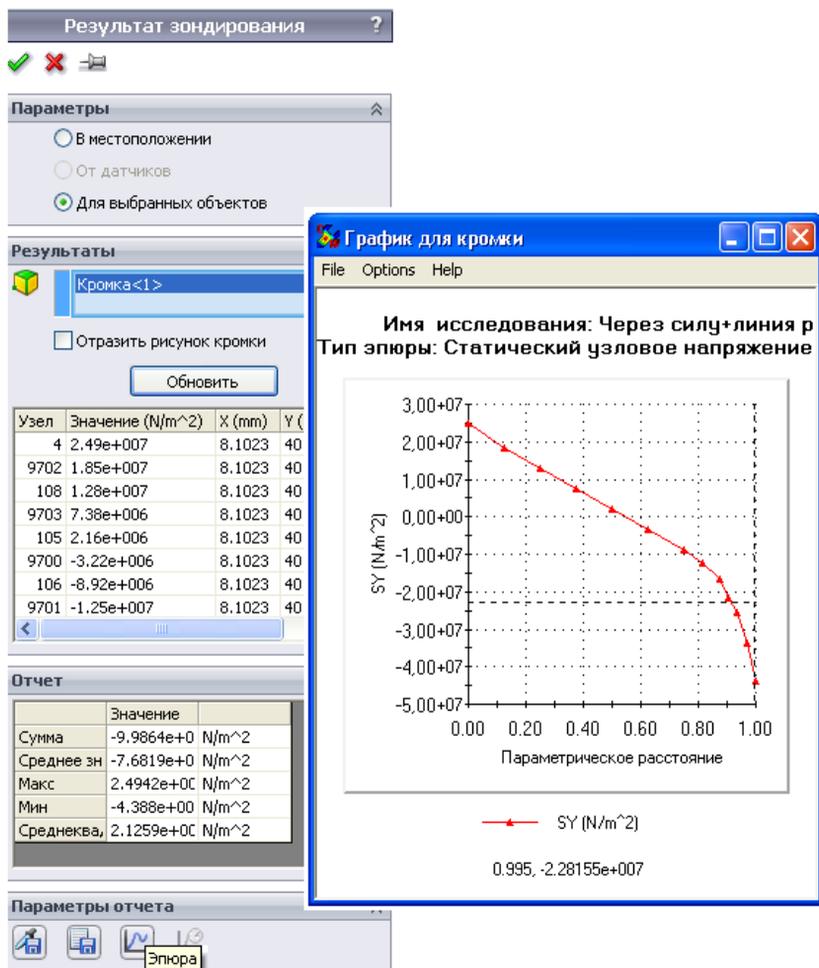


Рис. 1.40. Эпюра распределения окружных напряжений вдоль линии разреза

Однако прочность конструкций желательно анализировать по критериям, инвариантным относительно системы координат. На рис. 1.42 приведена диаграмма интенсивности напряжений (это удвоенное максимальное касательное напряжение в данной точке). Как видно, критическое значение касательного напряжения составляет около $4,5 \times 10^7$ Па, что радикально больше канонических оценок.

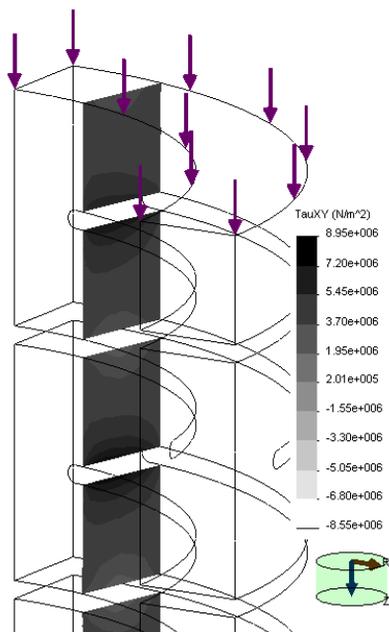


Рис. 1.41. Сечение диаграммы касательных напряжений

Диаграмма эквивалентных напряжений в соответствии с критерием Мизеса в данном случае очень схожа с диаграммой интенсивности напряжений, поэтому мы ее не помещаем.

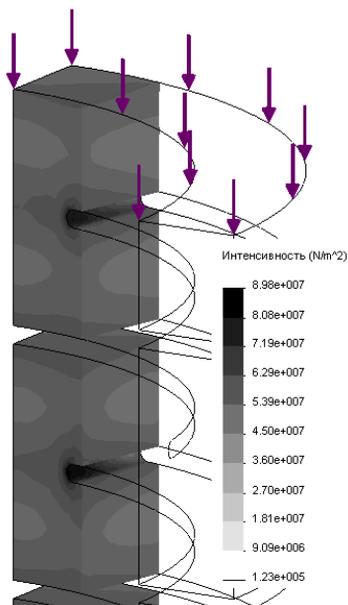


Рис. 1.42. Сечение диаграммы интенсивности напряжений

Рассмотрим еще один пример прорезной пружины с небольшими (относительно перемычек) прорезами. В данном случае будем сравнивать две модели. Одна характеризуется тем, что вырезы, формирующие кольца, имеют форму сегментов (рис. 1.43), в то время как вторая, "традиционная", получена вырезами в виде секторов. При этом размеры вырезов подобраны так, что площадь перемычек примерно одинакова. Попытки изготавливать пружины с сегментными вырезами объясняются существенно более высокой технологичностью этой формы, в то время как радиальные границы вырезов более трудоемки в обработке.

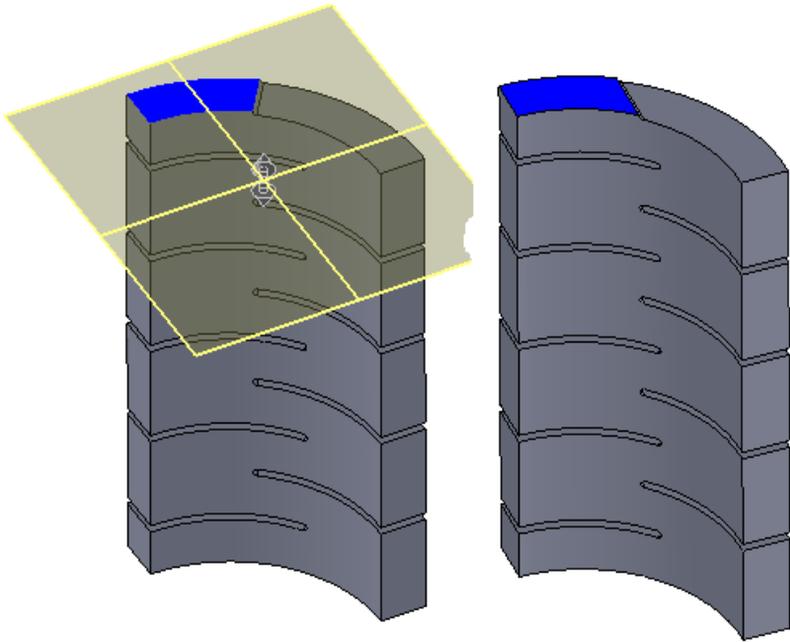


Рис. 1.43. Пружины с радиальными и сегментными вырезами — разрез горизонтальной плоскостью

Диаграммы осевого перемещения для "традиционной" и "модифицированной" пружины показаны на рис. 1.44. При анализе иллюстраций следует принять во внимание, что в силу ряда причин системы координат направлены в разные стороны. Как видно, при одинаковой нагрузке осадка пружины с сегментными вырезами существенно ниже. С другой стороны, максимальные напряжения радикально выше, да и распределение напряжений менее однородно (рис. 1.45). Из этого следует, что приоритет технологических аспектов оборачивается существенным ухудшением характеристик, в частности снижением допустимой (с точки зрения отсутствия необратимых деформаций) нагрузки. Еще одной особенностью таких пружин является то, что прогнозировать их свойства посредством аналитических моделей довольно затруднительно.

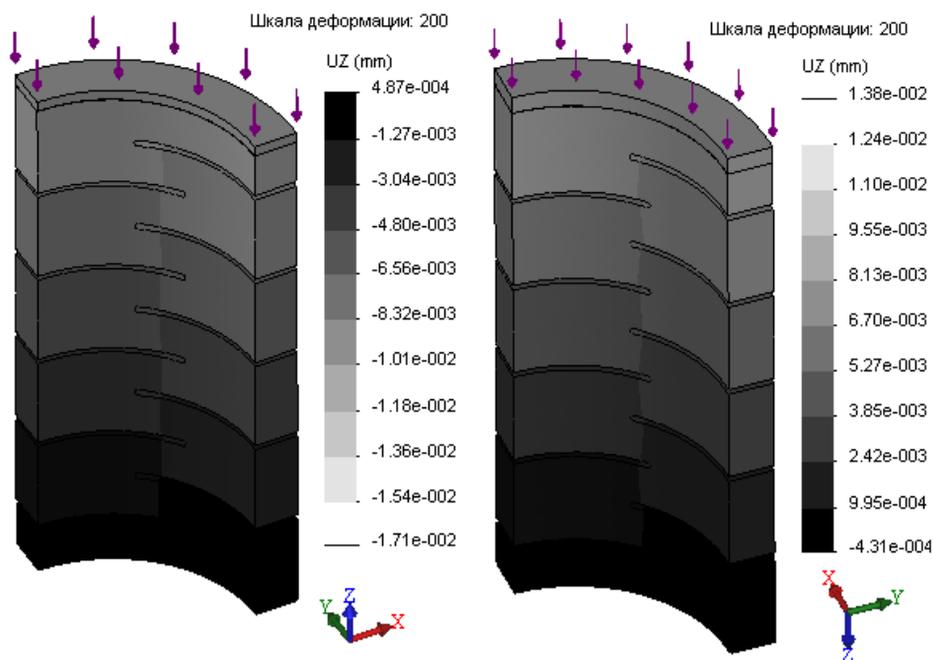


Рис. 1.44. Диаграммы осевых перемещений для пружины с радиальными и сегментными вырезами

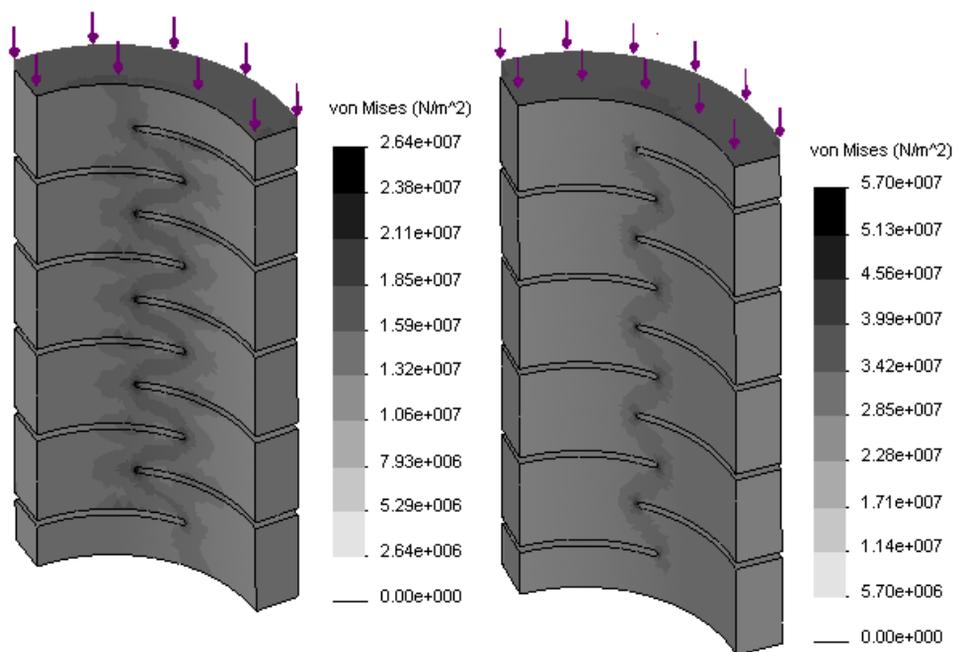


Рис. 1.45. Диаграммы эквивалентных напряжений для пружин с радиальными и сегментными вырезами

Таким образом, мы обосновали корректность численной модели, а также продемонстрировали возможность приближения к аналитической оценке. Более того, применительно к конструкциям подобного типа конечно-элементный расчет является наиболее достоверным инструментом прогноза свойств, как изолированного объекта, так и с учетом контекста. Численная модель особенно актуальна для пружин с малыми вырезами (и, соответственно, большими перемычками), а также для исполнений с вырезами, отличными от радиальных.

1.3. Расчет линзового компенсатора

Целью данного раздела является расчет линзового компенсатора с определением наиболее рациональной расчетной модели, а также сравнение с результатами, полученными другими конечно-элементными программами.

1.3.1. Постановка задачи

Рассматривается линзовый компенсатор трубопровода АЭС, характерные размеры которого показаны на рис. 1.46, а геометрическая модель в разрезе — на рис. 1.47.

Требуется оценить напряженно-деформированное состояние под действием характерных нагрузок, а также сравнить результаты с известными численными/аналитическими решениями (АСТРА-АЭС'2009. Верификационный отчет. Том 3. ЗАО "НИЦ СтаДиО").

Также стоит задача выбора рациональной конечно-элементной аппроксимации для задач подобного типа.

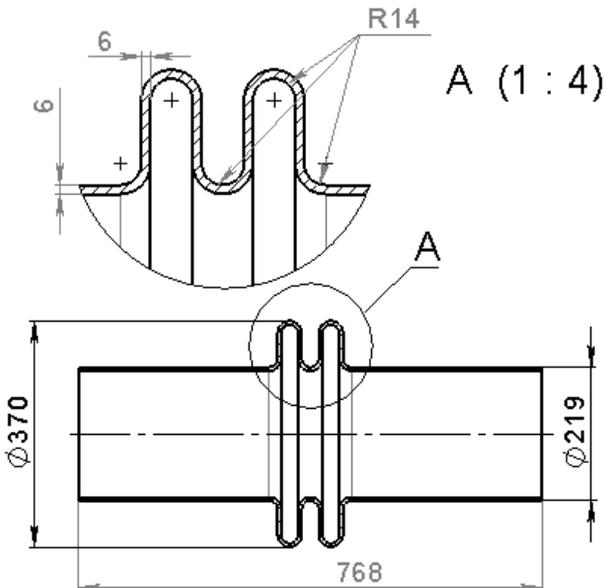


Рис. 1.46. Размеры компенсатора

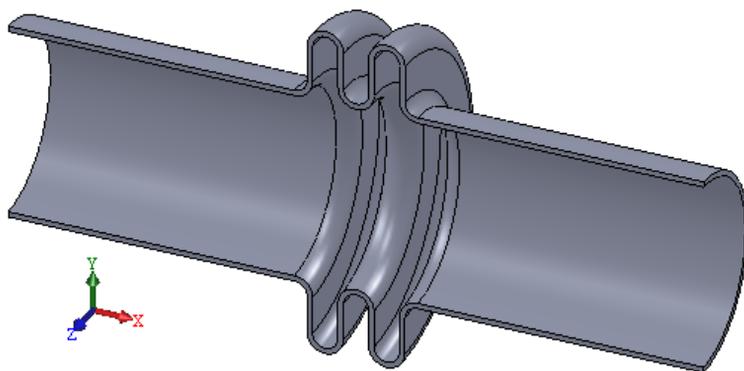


Рис. 1.47. Геометрическая модель в разрезе

Геометрические характеристики:

- наружный диаметр трубы $D_{н1} = 219$ мм;
- толщина стенки трубы $S_1 = 6$ мм;
- наружный диаметр линзы $D_{н2} = 370$ мм;
- толщина стенок линз $S_2 = 6$ мм;
- внутренние радиусы $R_k = 14$ мм;
- число линз $n = 2$.

Свойства материала (стали) показаны на рис. 1.48.

Материал Детализация	
Имя исследования	Изгиб - тело двуслойная -
Имя материала	Сталь
Источник материала	Библиотека Simulation
EX	2.05E+011 N/m ²
NUXY	0.3
GXY	8E+010 N/m ²
DENS	7858 kg/m ³
SIGXT	4.25E+008 N/m ²
SIGYLD	2.8269E+008 N/m ²
ALPX	1.2E-005 /Kelvin
KX	52 W/(m.K)
C	486 J/(kg.K)

Рис. 1.48. Свойства материала компенсатора

Расчет будет выполняться с двумя (независимыми) видами нагрузки:

- внутреннее давление $p = 1$ МПа;
- изгибающий момент $M = 1000$ Н·м.

1.3.2. Расчетные модели

Особенностью данной задачи является неоднозначность расчетной модели. Формально относящаяся к классу оболочек, данная конструкция имеет достаточно большую толщину стенки относительно характерных размеров компенсаторов. В этой связи нужно оценить применимость доступных моделей конечных элементов.

В расчетных моделях максимально использовались условия симметрии, а плотность сетки подбиралась так, чтобы на четверти окружности сечения было около 12 узлов, а на четверти окружности (вдоль образующей) в зоне линз — четыре. Для этого использовались элементы управления сеткой, назначенные для всех тороидальных объектов линз. При этом соотношение размеров смежных элементов в зоне уплотнения и вне зоны составило 1,1.

Длина присоединенной трубы составляет около полутора диаметров с выходом в зону отсутствия возмущений.

1.3.3. Расчет конструкции при действии давления по твердотельной модели

Особенностью постановки задачи для действия является неоднозначность условий на торцах. Во-первых, принята гипотеза отсутствия ужесточающего влияния присоединенных труб, а также то, что компенсатор нагружен растягивающей осевой силой, порожденной действием неуравновешенного внутреннего давления на присоединенные объекты. Результирующая сила, величина которой есть четверть (поскольку в силу условий симметрии рассматривается четверть модели по окружности) произведения давления на площадь поперечного сечения трубы, прикладывается к ее торцу (рис. 1.49).

Как видно, на иллюстрации приведена твердотельная модель. Соответствующая сетка параболических конечных элементов показана на рис. 1.50.

Обрезанная часть модели заменена граничным условием **Симметрия** (Symmetry), что для твердых тел эквивалентно равенству нулю нормальных перемещений.

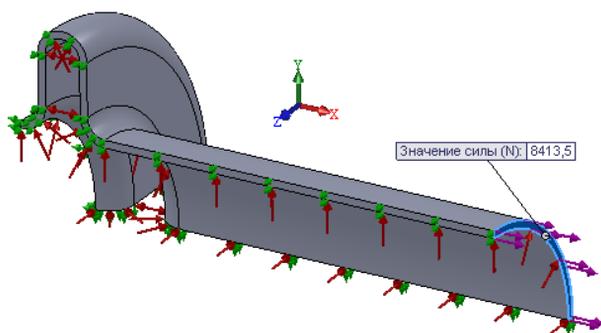


Рис. 1.49. Расчетная модель для действия давления

Диаграмма результирующих перемещений на фоне деформированного вида показана на рис. 1.51, а распределение эквивалентных (по Мизесу) напряжений — на рис. 1.52.



Рис. 1.50. Сетка твердотельных конечных элементов

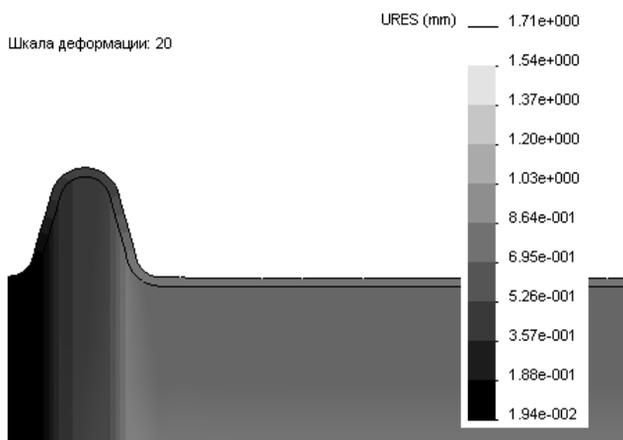


Рис. 1.51. Результирующие перемещения

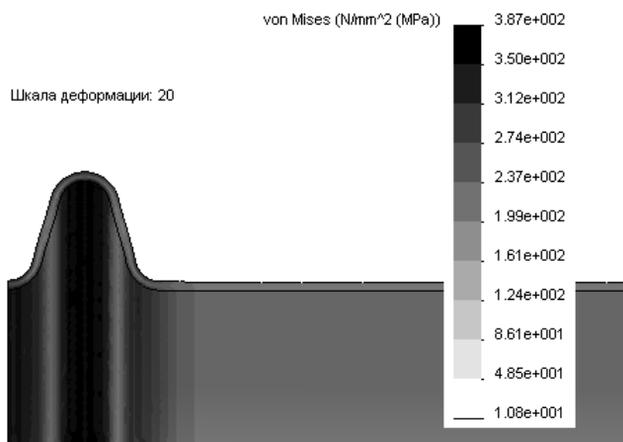


Рис. 1.52. Эквивалентные напряжения

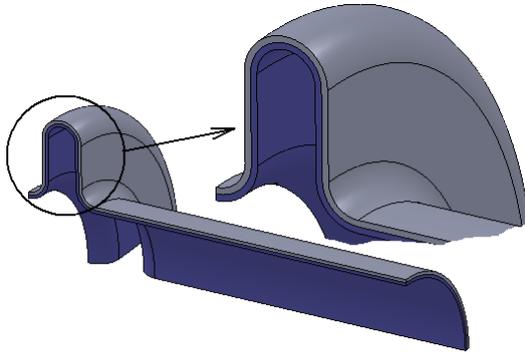


Рис. 1.53. "Двухслойная" модель

В связи с тем, что оболочечная, по сути, конструкция рассчитывается посредством конечных элементов твердого тела, попытаемся (косвенно) оценить погрешность аппроксимации вводом двух слоев элементов по толщине. "Прямое" измельчение сетки здесь крайне нерационально, поскольку назначение размера элемента, сопоставимого с половиной толщины, приведет к огромной размерности задачи. Пожалуй, единственно приемлемый способ — это разбиение модели на два тела с получением двухслойной системы (рис. 1.53). В этом случае программа будет "обязана" каждое тело описывать собственной совокупностью конечных элементов. При генерации сетки следует обратить внимание не только на размер конечного элемента по умолчанию — **Глобальный размер**, но и корректно назначить параметр **Допуск**, чтобы сетка корректно разрешила все геометрические элементы. В данном случае его величина составляет 0,1 мм, что заведомо меньше характерного размера — толщины слоя.

Понятно, что в качестве контактных граничных условий между слоями назначено (оставлено) условие **Связанные** (Bonded).

Сетка конечных элементов модифицированной модели показана на рис. 1.54.

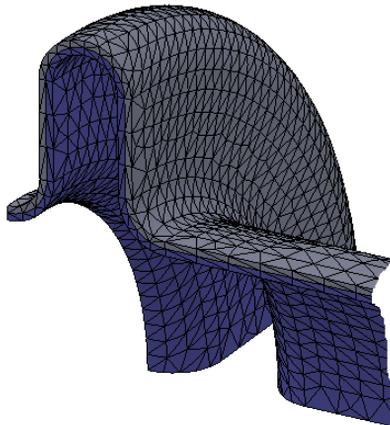


Рис. 1.54. Сетка "двухслойной" модели

Соответствующая диаграмма перемещений приведена на рис. 1.55, а эквивалентные напряжения — на рис. 1.56. Как видно, поле перемещений практически идентично полученному для одного слоя элементов по толщине, а вот максимальные эквивалентные напряжения несколько выросли. Дело здесь, как представляется, в особенностях алгоритма расчета напряжений в узлах сетки и последующей обработки применительно к диаграмме. Используется алгоритм экстраполяции деформаций (или напряжений — это зависит от особенностей реализации) из точек интегрирования (они, как известно, находятся внутри конечных элементов) в узлы сетки с последующим осреднением результата по инцидентным с узлом элементам.

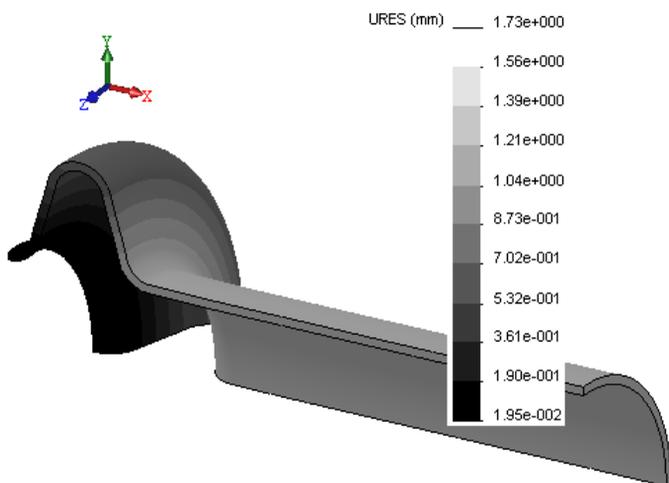


Рис. 1.55. Результирующие перемещения для "двухслойной" модели

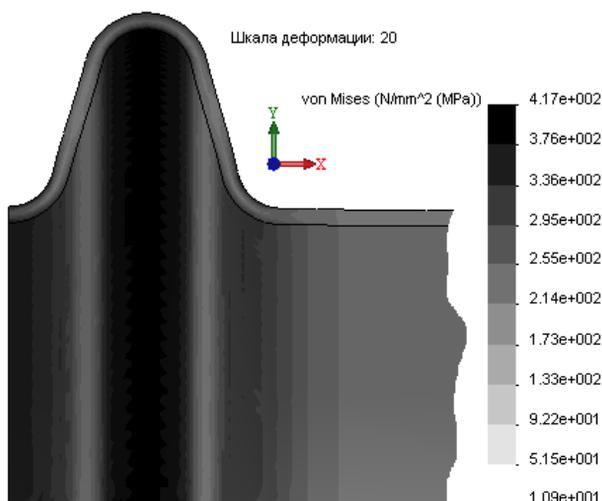


Рис. 1.56. Эквивалентные напряжения для "двухслойной" модели

Косвенным признаком наличия неточностей является то, что в однослойной модели максимальные напряжения смещены от максимального диаметра внутренней поверхности тора, в то время как в двухслойной они локализуются на окружности. Также если отобразить диаграмму функции **Ошибка** (Error), которая характеризует меру различия напряжений (деформаций), рассчитанных в каждом узле, исходя из результатов экстраполяции из точек интегрирования в примыкающих элементах, то можно увидеть, что максимум для однослойной модели локализуется вблизи этой окружности (рис. 1.57). В модифицированной же модели "ошибка" меньше по максимальной величине и более однородно распределена (рис. 1.58).

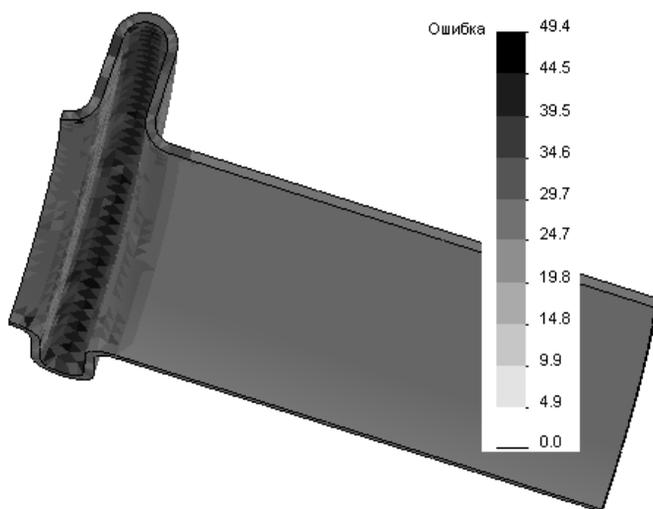


Рис. 1.57. Распределение функции **Ошибка** в однослойной модели

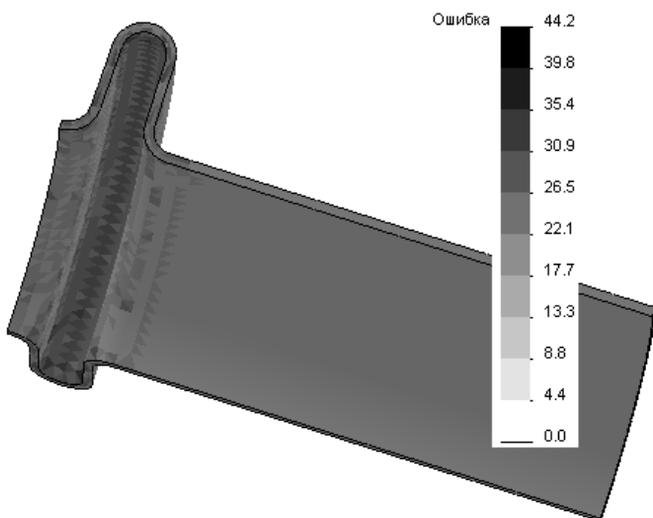


Рис. 1.58. Распределение функции **Ошибка** в двухслойной модели

Размерность твердотельной модели с одним слоем элементов составила 7 146 элементов при 14 403 узлах. Для двухслойной системы — 14 275 элементов при 24 170 узлах.

1.3.4. Расчет конструкции при действии давления по оболочечной модели

Расчетная модель компенсатора, пригодная для анализа посредством оболочек, показана на рис. 1.59, 1.60. Геометрия здесь есть срединная поверхность твердого тела.

На первой иллюстрации приведены кинематические граничные условия, все из которых, по сути, имитируют симметрию относительно трех плоскостей геометрической симметрии. Для кромок, лежащих в вертикальной плоскости, эти условия конкретизированы: видно, что в качестве базового объекта используется ось детали, соответственно фиксации назначаются для перемещений, определенных в цилиндрической системе координат.

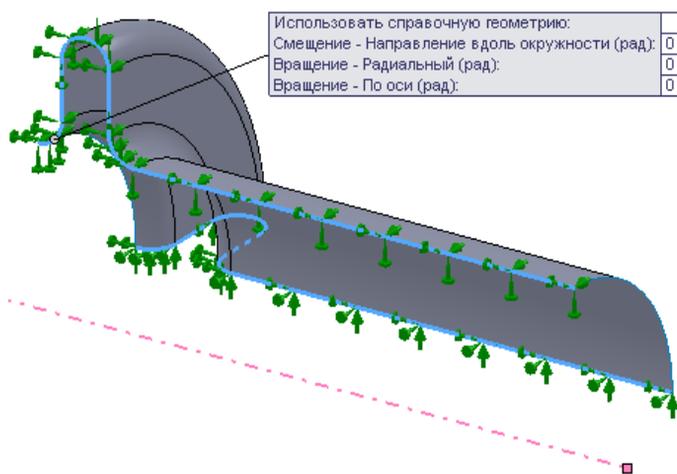


Рис. 1.59. Кинематические граничные условия оболочечной модели

Вторая иллюстрация демонстрирует схему нагрузок. Как и в случае твердотельной модели, отсутствующие "заглушки" заменены силой (она равна назначенной для твердотельной модели), а вот в величину давления внесена поправка. Дело в том, что давление, в реальности приложенное к внутренней грани тела, в оболочечной модели прикладывается к собственно поверхности. Если она, как в нашем случае, совпадает со срединной поверхностью тела, то для криволинейной поверхности при внутреннем (положительном) давлении результирующая нагрузка будет завышена, а при внешнем отрицательном — занижена (в силу отличия площади, на которую действует давление). Поэтому давление поправлено (умножено) на коэффициент отношения площади внутренних граней тела к площади срединной поверхности. На самом деле, поправки должны персонально назначаться для каждой грани (пар граней), но степень их отличия невелика.

Некоторые другие идеи о том, как учесть в расчетной модели факт несоответствия объектов приложения давления, в частности, связанные с понятием "смещение оболочки", будут рассмотрены в *разд. 1.4* данной главы.

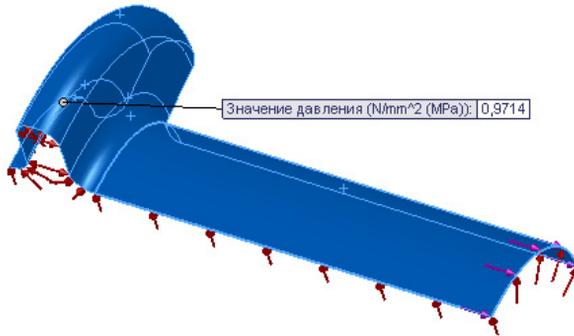


Рис. 1.60. Нагрузки для оболочечной модели

Сетка конечных элементов показана на рис. 1.61. Как видно, характерные настройки соответствуют использованным в твердотельной модели.



Рис. 1.61. Сетка конечных элементов оболочечной модели

Диаграмма результирующих перемещений приведена на рис. 1.62, а эквивалентных напряжений на внутренней (в данном случае в терминах программы — "нижней") поверхности оболочки — на рис. 1.63.

Если же вместо гипотезы "тонких" оболочек, не учитывающей деформации поперечного (из плоскости оболочки) сдвига, использовать модель "толстых" оболочек, в которой этот сдвиг возможен (при этом рассчитываются также межслоевые касательные напряжения), то результат будет выглядеть, как показано на рис. 1.64. Наблюдается некоторый рост максимальных эквивалентных напряжений при сохранении распределения перемещений. Однако если в дополнение к "толстым" оболочкам активизировать опцию **Большие перемещения** (Large displacement), то максимум ощутимо снизится (рис. 1.65). Интересно, что для двухслойной твердотельной модели нет сколь-нибудь значимого различия между расчетами с "большими перемещениями" и без них.

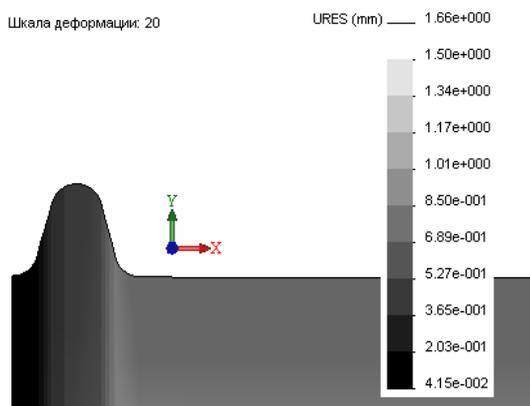


Рис. 1.62. Результирующие перемещения по оболочечной модели

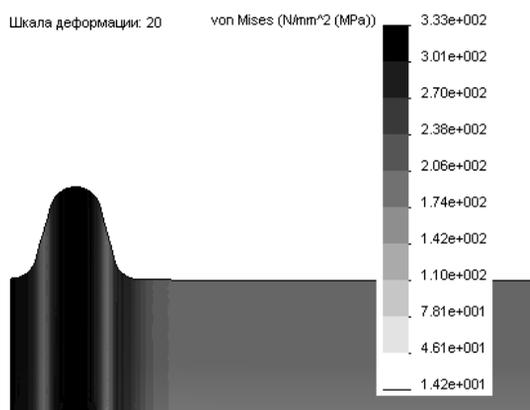


Рис. 1.63. Эквивалентные напряжения на внутренней поверхности

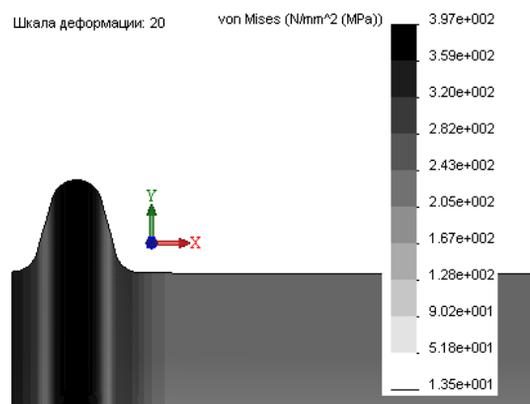


Рис. 1.64. Эквивалентные напряжения на внутренней поверхности — модель "толстых" оболочек

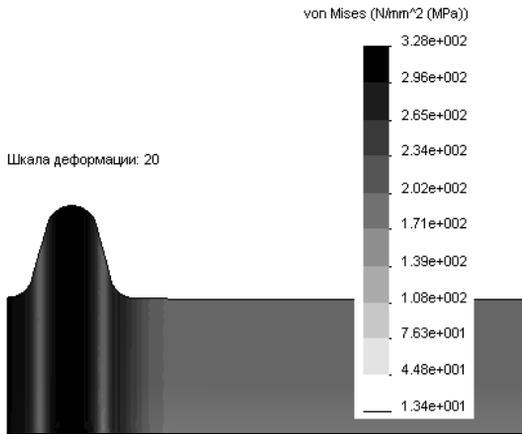


Рис. 1.65. Эквивалентные напряжения на внутренней поверхности — модель "толстых" оболочек при "больших перемещениях"

Для полноты картины выполним нелинейный расчет той же модели (в предположении упругости материала). Результаты (как при активной опции **Большие перемещения**, так и без нее) практически не отличаются от статического расчета с "толстыми" оболочками и "большими перемещениями". Подавляющий вклад в эти цифры вносят именно нормальные напряжения (если судить по величине максимального первого главного напряжения, оно равно максимальному эквивалентному).

По всей видимости, именно модель "толстых" оболочек с "большими перемещениями" наилучшим образом воспроизводит схему работы конструкции. Тем не менее из всех рассмотренных она является наименее консервативной, а также обладает несколько большим отличием от линейного (гипотеза "малых перемещений") решения, полученного посредством ANSYS, где для оболочек, реализующих гипотезы Тимошенко, максимальные эквивалентные (по Мизесу) напряжения составили $3,78 \times 10^2$ МПа. Это очень близко к $3,97 \times 10^2$ МПа в аналогичной (геометрически-линейной) постановке посредством SolidWorks Simulation.

Размерность оболочечной модели составила 2348 элементов при 4823 узлах.

1.3.5. Расчет конструкции при действии изгиба по твердотельной модели

Еще один тест — задача чистого изгиба компенсатора. Граничные условия для твердотельной модели показаны на рис. 1.66. Как видно, в отличие от случая с растяжением, где для учета осевой симметрии рассматривалась одна восьмая часть исходной детали (можно было оставить и сектор меньшего углового размера), здесь мы имеем дело с четвертью. На вновь появившиеся грани, лежащие в плоскостях симметрии, поставлено одноименное граничное условие. Однако тело сохраняет моду движения как жесткого целого в вертикальном направлении. Ее компенсируем фиксацией (правда, во всех направлениях) некоторой вершины, лежащей в плоскости симметрии.

Нагрузкой является момент, ориентированный относительно локальной системы координат (ее центр находится, в целях упрощения, в центре нагруженного торца). Изгибающий момент реализован посредством инструмента **Дистанционная нагрузка** (Remote Load) в варианте **Прямой перенос** (Direct transfer), сохраняющего податливость объекта приложения. С учетом симметрии относительно плоскости (рассматривается половина исходной геометрии) прикладывается половина назначенной нагрузки.

Поскольку изгибающий момент (будучи корректно реализованным) создает уравновешенную по силам нагрузку, то выполненная фиксация вершины в вертикальном направлении не породит соответствующую силу реакции.

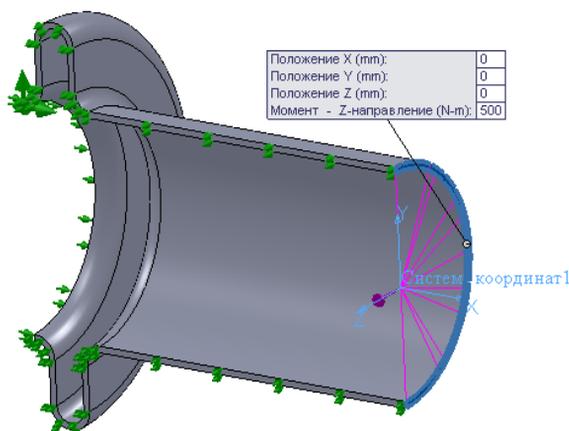


Рис. 1.66. Граничные условия для твердотельной модели при изгибе

Параметры сетки конечных элементов идентичны использованным для растяжения. Диаграмма перемещений показана на рис. 1.67, а эквивалентных напряжений — на рис. 1.68. Если активизировать опцию **Большие перемещения** (Large displacement), то результат практически не изменится.

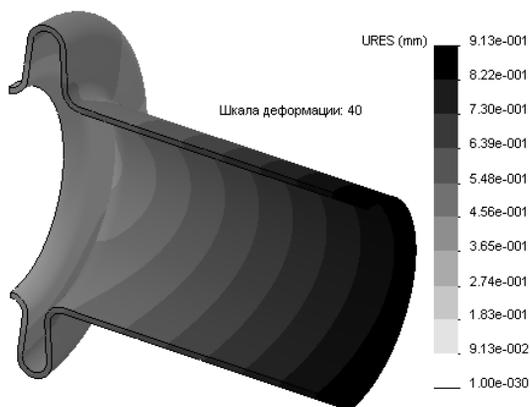


Рис. 1.67. Перемещения при изгибе — твердотельная однослойная сетка

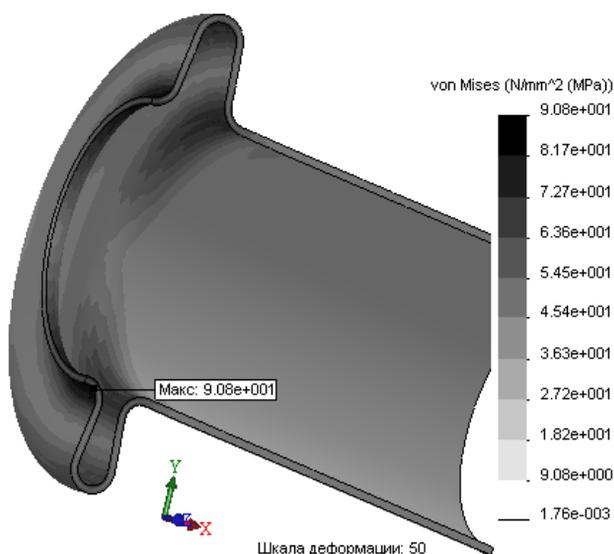


Рис. 1.68. Эквивалентные напряжения при изгибе — твердотельная однослойная сетка

Использование двухслойной геометрической модели также мало меняет напряженно-деформированное состояние. Диаграмма эквивалентных напряжений при "больших перемещениях" показана на рис. 1.69. Перемещения изменились крайне незначительно.

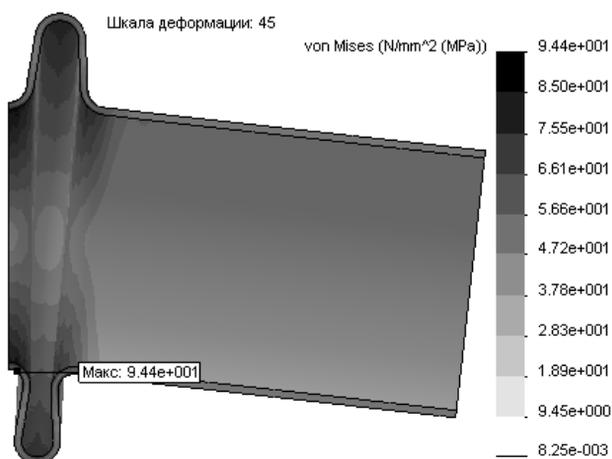


Рис. 1.69. Эквивалентные напряжения при изгибе — двухслойная сетка с "большими перемещениями"

Интересно оценить влияние алгоритма построения сетки на результат. На рис. 1.70 приведена кривая (результат применения команды **Выбранный спи-**

сок (List Selected) к наружной круговой кромке поперечного сечения при активной диаграмме осевых напряжений. При этом расчет выполнялся для модели с сеткой "на основе кривизны". Там же показана и сама сетка. Для сравнения на рис. 1.71 помещен тот же график, но для модели со "стандартной" сеткой.

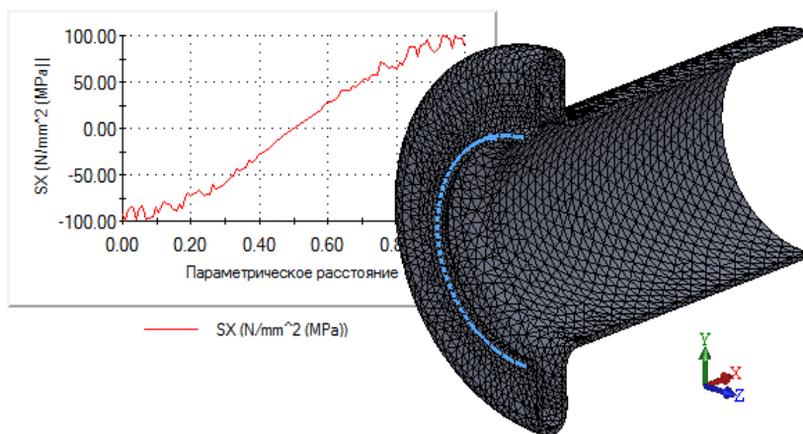


Рис. 1.70. Распределение осевых напряжений вдоль круговой наружной кромки в плоскости симметрии — сетка "на основе кривизны"

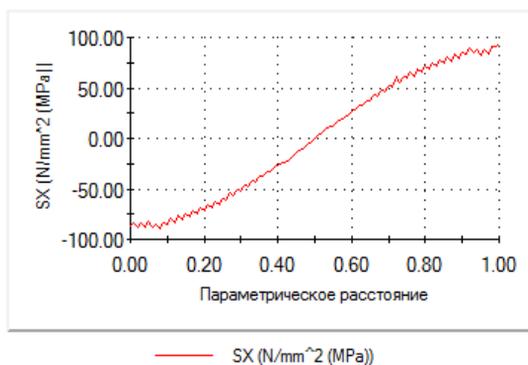


Рис. 1.71. Распределение осевых напряжений вдоль круговой наружной кромки в плоскости симметрии — "стандартная" сетка

Обращают на себя внимание пульсации напряжений сверху и снизу кромки, явно выраженные в первом случае и практически незначимые — во втором. При этом кривые перемещений (они не показаны) являются гладкими в обоих случаях. Как представляется, это результат несовершенства формы конечных элементов, сгенерированных в окрестности торца: здесь формально более высокое качество (в смысле пропорций отдельно взятых элементов и величины Якобиана) сопровождается непостоянством инцидентности элементов относительно узлов, или, проще

говоря, непостоянством числа элементов, принадлежащих узлам (рис. 1.72). Последующее использование для расчета деформаций/напряжений процедуры осреднения по инцидентным к узлу элементам приводит к сеточно-зависимому результату. Использование двухслойной схемы, когда в пределах одного элемента не может быть узлов, принадлежащих внутренней и наружной поверхностям (со знакопеременным напряжением), существенно уменьшает этот эффект.

Итак, на основе данного наблюдения следует акцентировать внимание на том, что регулярные сетки с "худшим" формальным качеством могут быть конкурентоспособны относительно неструктурированных, но "качественных".

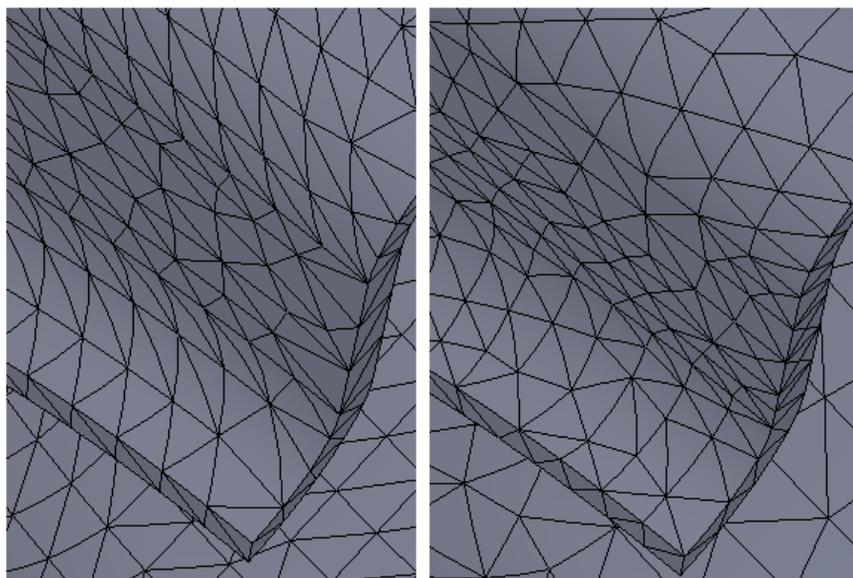


Рис. 1.72. Фрагмент сеток, "стандартной" и "на основе кривизны"

Размерность твердотельной модели с одним слоем элементов при изгибе составила 14 469 элементов при 28 852 узлах. Для двухслойной системы — 28 475 элементов при 47 876 узлах.

1.3.6. Расчет конструкции при действии изгиба по оболочечной модели

Кинематические граничные условия для оболочечной модели ставятся в три приема. Первый — условие симметрии (относительно поперечной плоскости) — показан на рис. 1.73. Как видно, в качестве ориентира используется справочная ось модели, и зафиксированы осевое смещение, окружной и тангенциальный повороты.

Второй шаг — условие симметрии относительно вертикальной плоскости. Он иллюстрирован рис. 1.74, откуда видно, что зафиксировано окружное смещение, радиальный и осевой повороты.

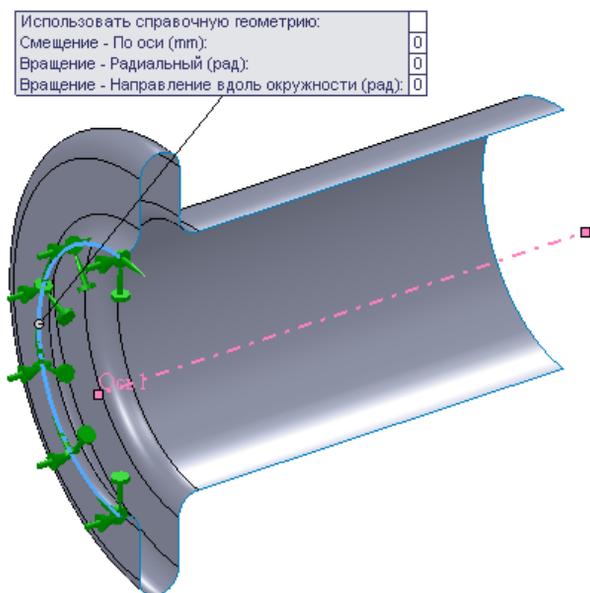


Рис. 1.73. Условие симметрии на поперечной плоскости

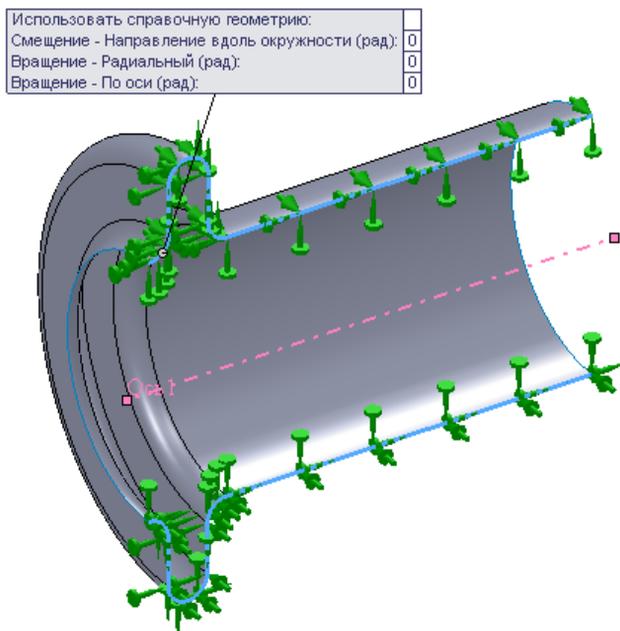


Рис. 1.74. Условие симметрии на вертикальной плоскости

Вертикальная мода движения как жесткого целого устраняется фиксацией поступательных перемещений в одной из вершин, принадлежащих обеим плос-

костям симметрии (рис. 1.75). На этом же рисунке показана схема приложения изгибающего момента: как и для твердотельной модели, он воспроизводится дистанционной нагрузкой (моментом), приложенной на сей раз к кромке на торце и позиционированной относительно локальной системы координат в центре дуги. Однако в данном случае пришлось изменить способ "взаимодействия" нагружающего объекта: не **Прямой перенос** (Direct transfer), а **Жесткая связь** (Rigid connection). Причина — затруднения в реализации первого варианта для нашей оболочечной модели (такую нагрузку нельзя прикладывать к кромке или вершине, а только к грани), поскольку потребовалось бы создавать вспомогательную грань. Последнее, как представляется, не слишком исказило результат, потому что отрезок трубы достаточно длинный, чтобы распределение перемещений приобрело характерный для изгиба характер с линейным распределением по высоте при сохранении формы сечения.

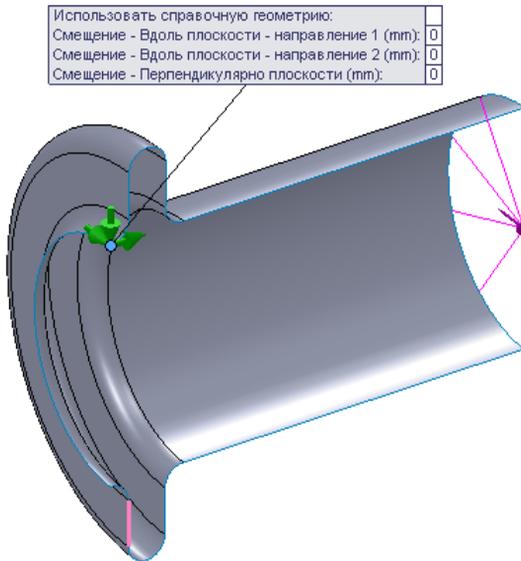


Рис. 1.75. Фиксация перемещений в вершине

Диаграмма результирующего перемещения для модели "толстых" оболочек при активной опции **Большие перемещения** (Large displacement) показана на рис. 1.76. Распределение эквивалентных напряжений на "верхней" поверхности оболочки (в данном случае она соответствует наружным граням реального объекта) показано на рис. 1.77 — именно там локализуется максимум функции.

Другие комбинации настроек ("толстые/тонкие" оболочки, "большие/малые перемещения") не вносят ощутимых поправок в результат, как по перемещениям, так и по напряжениям.

Как видно, разнообразные модели для изгиба с различными настройками дают достаточно близкие результаты, которые, в свою очередь, с высокой точностью соответствуют результатам расчета в ANSYS.

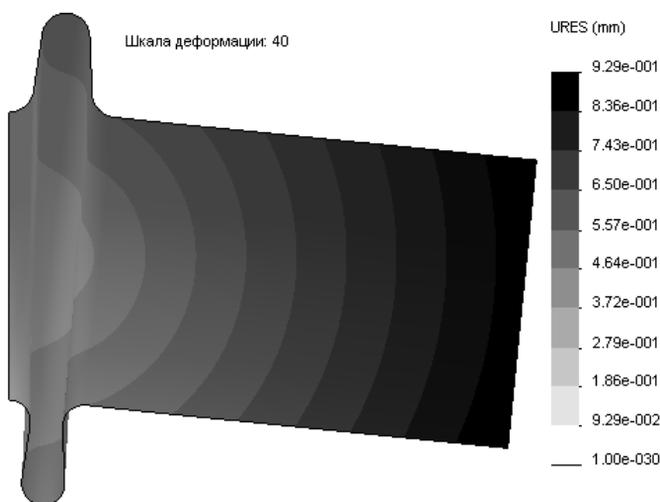


Рис. 1.76. Результирующие перемещения для модели "толстых" оболочек при "больших перемещениях"

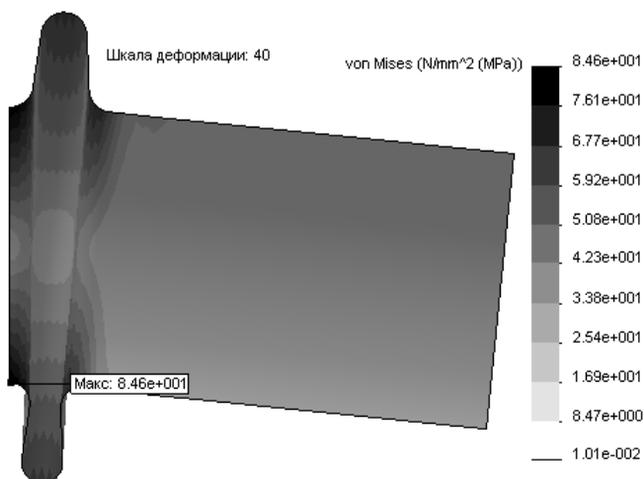


Рис. 1.77. Эквивалентные напряжения на наружной поверхности для модели "толстых" оболочек при "больших перемещениях"

Размерность оболочечной модели при изгибе составила 4748 элементов при 9659 узлах.

1.3.7. Выводы

Подводя итог задаче расчета линзового компенсатора, можно утверждать: несмотря на то что канонической (при данных геометрических параметрах и типах нагрузки) аппроксимацией является модель оболочек Тимошенко—Миндлина, ре-

зультаты, полученные посредством модели Кирхгофа—Лява, а также с помощью твердотельных конечных элементов с параболическим полем перемещений, также вполне приемлемы.

1.4. Цилиндрическая оболочка с эллиптическим дном

Целью данного раздела является расчет цилиндрической оболочки с эллиптическим дном под действием равномерно распределенного давления, а также сравнение с результатами, полученными другими конечно-элементными программами. (Отчет о верификации и обосновании программы нормативного расчета устойчивости основных элементов оборудования АЭУ. ФР — 03419. ОАО "Машиностроительный завод ЗиО — Подольск", ОАО "Инжиниринговая компания ЗИОМАР", СКБ АМ, 2007.)

1.4.1. Постановка задачи

Чертеж оболочки показан на рис. 1.78. Следует обратить внимание, что размеры приведены для срединной поверхности.

Требуется оценить напряженно-деформированное состояние и, в частности, максимальные окружные и меридиональные напряжения в центре эллиптического дна и вблизи зоны перехода от дна к обечайке.

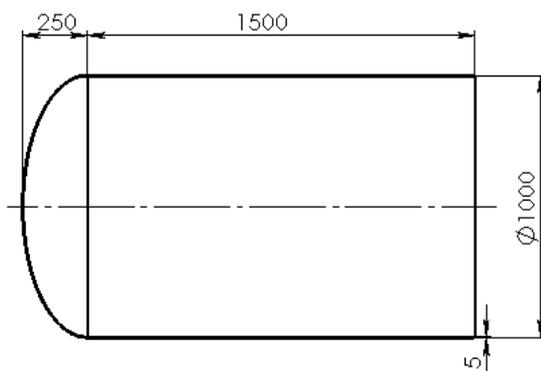


Рис. 1.78. Размеры оболочки

Геометрические характеристики:

- диаметр цилиндра по срединной поверхности $D = 2 \times r_0 = 1000$ мм;
- толщина стенки обечайки и дна $t = 5$ мм;
- высота эллиптического дна по срединной поверхности $H = 0,5 \times r_0 = 250$ мм.

Свойства материала — стали: $E = 2,0 \times 10^{11}$ МПа; $\nu = 0,3$.

Нагрузка — внутреннее давление 1 МПа.

Характерные (окружное и меридиональное) напряжения рассчитываются по следующим формулам [3]:

□ в зоне перехода $\sigma_{\text{окр}} = 1,07 \frac{Pr_0}{t}$; $\sigma_M = \frac{Pr_0}{t}$;

□ в центре днища $\sigma_H = \sigma_M = \frac{Pr_0}{t}$;

Для заданной геометрии и нагрузок:

□ в зоне перехода днища к обечайке $\sigma_{\text{окр}} = 107$ МПа; $\sigma_M = 50$ МПа;

□ в центре днища $\sigma_{\text{окр}} = \sigma_M = 100$ МПа.

1.4.2. Расчет конструкции по оболочечной модели

Расчетная модель оболочки показана на рис. 1.79. Это поверхностная модель SolidWorks, учитывающая потенциальную симметрию относительно показанной оси, которая предназначена исключительно для назначения граничных условий и генерации соответствующих диаграмм с результатами, и относительно плоскости. Будет рассчитываться замкнутая оболочка с одинаковыми днищами. Как видно, использована модель "толстых" оболочек Тимошенко—Миндлина, продемонстрировавшая лучшую стабильность в широком классе задач по сравнению с аппроксимацией Кирхгофа-Лява, на базе которой (как можно предположить) получено приведенное аналитическое решение. Сразу скажем, что результаты по обоим моделям практически неотличимы.

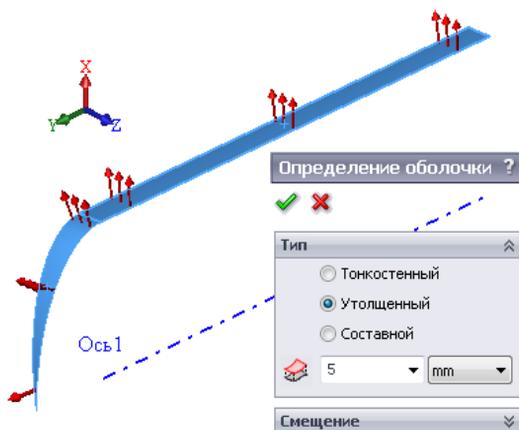


Рис. 1.79. Расчетная модель с нагрузкой

Кинематические граничные условия (все они, по сути, моделируют ту или иную симметрию) показаны на рис. 1.80. Панели, реализующие условия симметрии: осевой и относительно плоскости, показаны на рис. 1.81, 1.82. Как видно, в обоих случаях заделки определены в цилиндрической системе координат, связанной с осью.

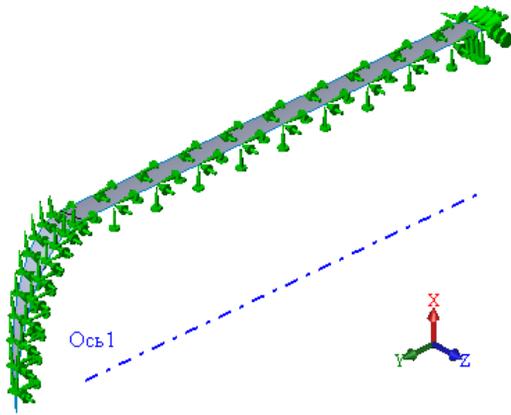


Рис. 1.80. Кинематические граничные условия

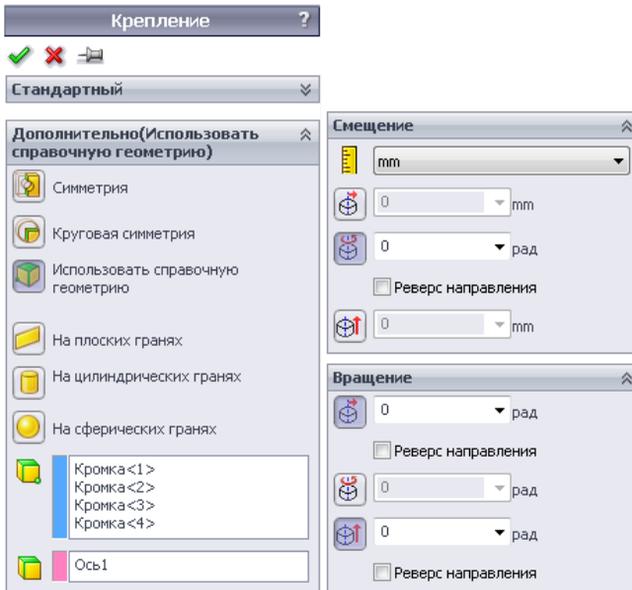


Рис. 1.81. Реализация осевой симметрии в плоскостях, проходящих через ось

Обсудим еще один щекотливый вопрос, связанный с особенностями реализации давления в оболочечных моделях. Дело в том, что реальные системы имеют конечную толщину, и давление приложено не к условной (срединной) поверхности, а к внутренней (допустим) грани. В конечно-элементной же модели, по крайней мере, в ее реализации в SolidWorks Simulation, распределенные по граням нагрузки фактически прикладываются к граням конечных элементов. Эти грани, как правило, (и Simulation здесь не исключение) совпадают с гранями геометрической модели. На рис. 1.83 стрелками обозначены "верхние" и "нижние" грани; на экране первые закрашиваются серым цветом, а вторые — рыжим.

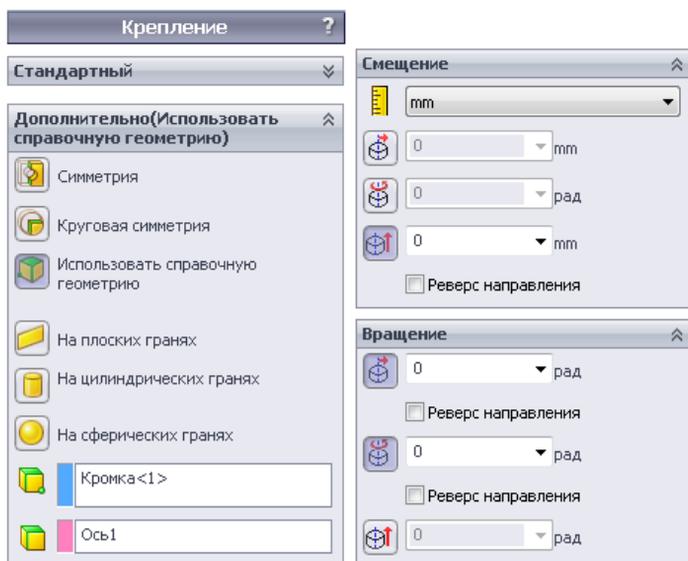


Рис. 1.82. Реализация симметрии относительно плоскости в торцевом сечении

По этой причине расчет выполняется с погрешностью, величина которой (для цилиндра или сферы под внутренним давлением) пропорциональна отношению половины толщины к радиусу. Одним из выходов является корректировка (для внутреннего давления — уменьшение в $(r_0 + \delta/2)/r_0$ раз назначаемого давления).

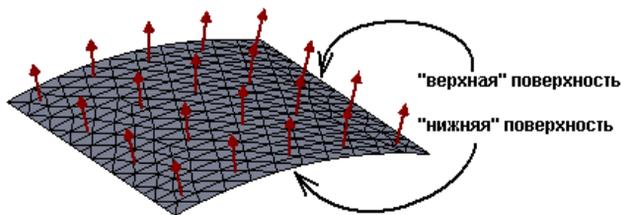


Рис. 1.83. Приложение давления к срединной поверхности оболочечной модели

Однако для асимметричных моделей этот подход может порождать некоторую погрешность. Используя инструмент **Смещение** (Offset) SolidWorks Simulation, задачу можно рассмотреть в более общей постановке. На рис. 1.84 показана поверхностная модель с приложенным давлением. При этом оболочка имеет нулевое смещение (соответствует срединной поверхности). Там же присутствует прозрачное твердое тело (реально в расчетной модели его нет), демонстрирующее, как программа интерпретирует данную оболочку.

Если мы для смещения выберем вариант **Нижняя поверхность** (Bottom surface), при котором его величина равна $-0,5$, то система воспримет оболочку как тело, лежащее "на" нижней поверхности сетки (акцентируем внимание, что сетка всегда

строится на базе геометрии, присутствующей в SolidWorks). Мы прорисовали иллюстративное тело наружу по той причине, что "нижняя" поверхность оболочки находится внутри цилиндра — именно так была сгенерирована сетка (рис. 1.85). К слову сказать, после создания сетки можно "развернуть" сетку на некоторой грани, указав на нее в графической области мышью и подав из контекстного меню пиктограммы **Сетка** (Mesh) Менеджера Simulation команду **Реверс элементов оболочки** (Flip Shell Elements).

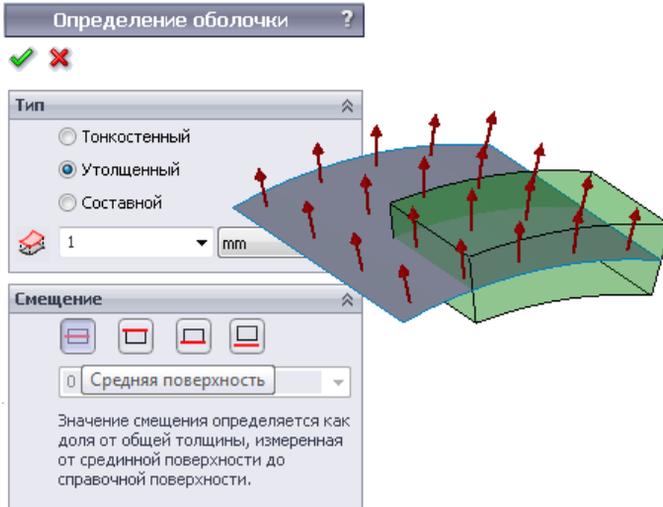


Рис. 1.84. Условная и "реальная" модели фрагмента оболочки под давлением — нулевое смещение

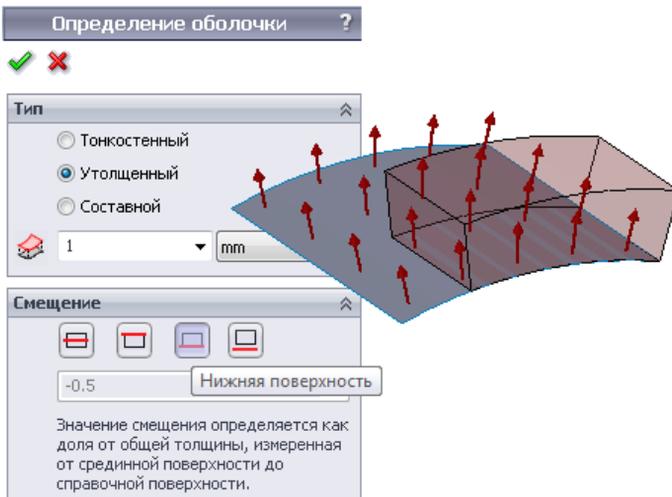


Рис. 1.85. Условная и "реальная" модели фрагмента оболочки под давлением — на "нижней" поверхности

Этот подход, сопровождаемый некоторыми дополнительными усилиями, дает возможность компенсации ограничений Simulation, связанных с тем, что нагрузки прикладываются к сетке, а не к виртуальным сущностям "реальной" геометрии. Если более конкретно, то поверхности SolidWorks следует строить по внутренним граням реального сосуда (к сетке будет прикладываться фактическое давление), а при определении оболочек — устанавливать смещение, например, по принципу "Нижняя поверхность" в панели **Определение оболочки** (Shell Definition), если "Нижняя поверхность" в сетке ориентирована в сторону оси.

Для данной задачи в части сравнения численных результатов с аналитикой эти рассуждения, в общем, неактуальны, по той причине, что в обоих случаях нагрузки прикладываются к срединной поверхности, которая совпадает с геометрической поверхностью, используемой для расчета в предположении, что материал расположен относительно нее симметрично.

Строим сетку с параметрами, показанными на рис. 1.86. Результат в виде диаграммы окружных мембранных напряжений (а также эпюра по кромке днища) показан на рис. 1.87. Как видно, на полюсе вместо 100 МПа получилось 124 МПа. При уплотнении сетки (результат не показан) пик локализуется в вершине, совпадающей с полюсом. Этот факт наводит на мысль, что граничные условия в полюсе (соответствующей вершине) программа реализует некорректно. Попробуем ввести дополнительное (по сути, дублирующее) закрепление радиального и окружного перемещений в вершине, как показано на рис. 1.88.

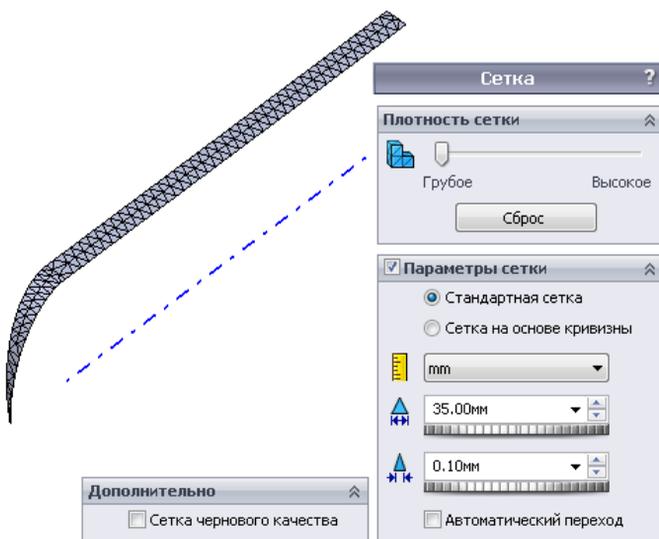


Рис. 1.86. Сетка первого приближения

Результат для модели с исходной сеткой показан на рис. 1.89. Он вполне удовлетворительный, но с целью более точной идентификации, как величины, так и места появления максимума в зоне перехода, выполняем локальное уплотнение сетки, как показано на рис. 1.90. Тогда критическое окружное напряжение становится равным 106 МПа. Эпюра меридиональных напряжений (мембранная компонента) в обечайке показана на рис. 1.91. Как видно, они постоянны и равны 50 МПа.

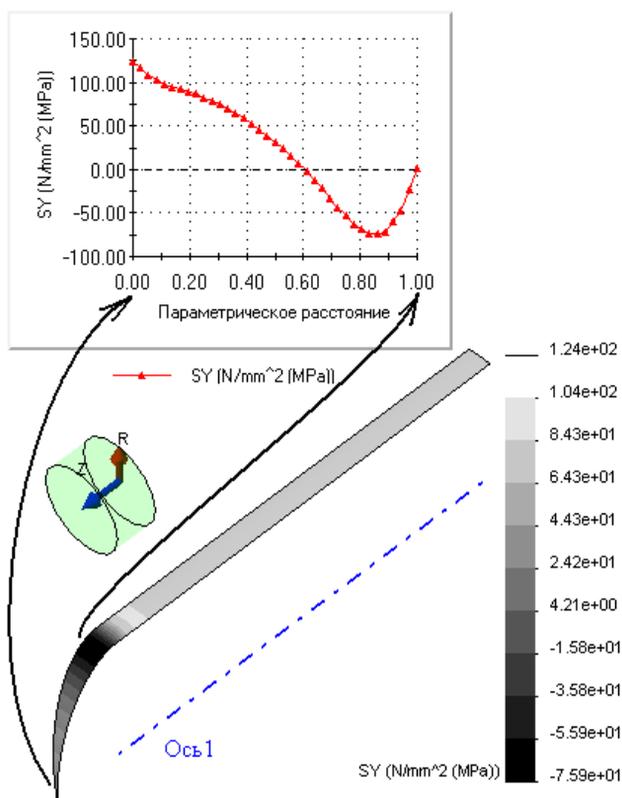


Рис. 1.87. Окружные напряжения и эпюра их изменения вдоль кромки дна

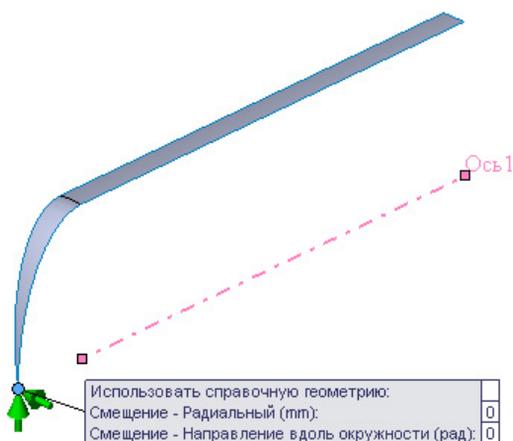


Рис. 1.88. Дополнительная фиксация вершины в полюсе

Окружные мембранные напряжения равны 100 МПа, а вот чтобы получить напряжения меридиональные, требуется сначала определить подходящую систему

координат. Мы будем использовать цилиндрическую, с осью, перпендикулярной одной из плоскостей, проходящих через ось сосуда в точке центра окружности, радиус которой равен радиусу кривизны образующей в полюсе. Соответствующий чертеж приведен на рис. 1.92, на котором также показана диаграмма окружных (в цилиндрической системе координат, определяемой полученной осью) напряжений. Как видно, искомая величина равна 100 МПа.

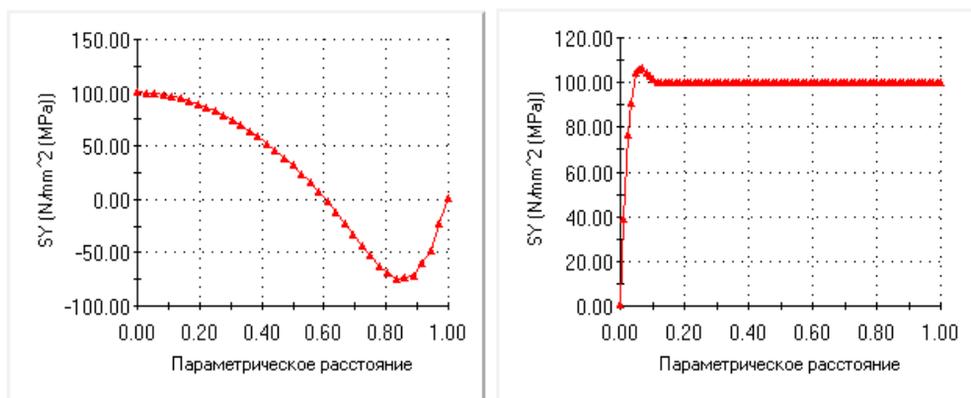


Рис. 1.89. Окружные напряжения в днище и в цилиндре

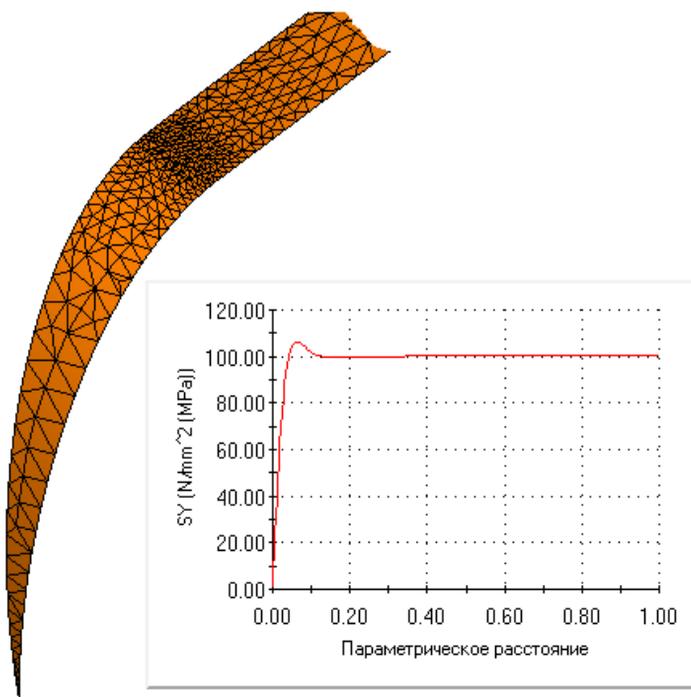


Рис. 1.90. Сетка с локальным уплотнением и окружные напряжения в обечайке

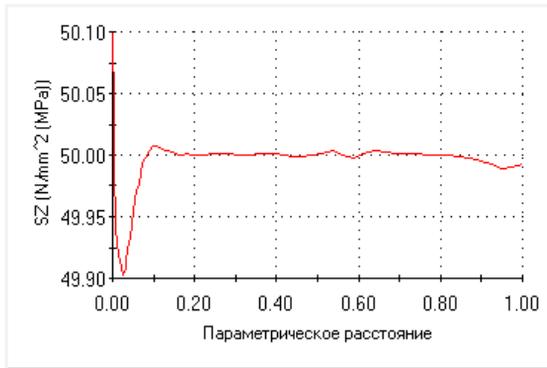


Рис. 1.91. Меридиональные напряжения в обечайке

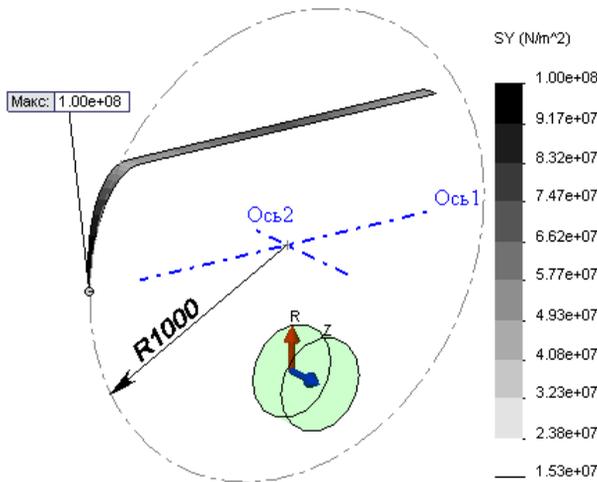


Рис. 1.92. Меридиональные напряжения в системе координат, предназначенной для получения напряжений в полюсе

1.4.3. Расчет конструкции при действии давления по плоской модели

Проверим полученные результаты посредством плоской модели Simulation. Она базируется на твердотельном представлении, фрагмент которого показан на рис. 1.93. Как видно, твердотельная модель выполнена из двух слоев, каждый из которых образован отдельным телом. Подобно задаче с линзовым компенсатором, это сделано для гарантированной аппроксимации модели по толщине двумя конечными элементами.

Плоская (в широком смысле слова: помимо статического анализа, упрощение возможно для термического и нелинейного расчетов) модель получается одновременно с созданием соответствующего исследования после активизации опции **Использовать 2D упрощение** (Use 2D Simplification) (рис. 1.94). В получившейся па-

нели (ее название зависит от типа аппроксимации: плоское напряженное состояние, плоская деформация, осевая симметрия¹) выбираем подходящий тип исследования, плоскость сечения (она должна проходить через геометрическую ось симметрии) и собственно ось. Посредством опции **Использовать одну сторону** (Use other side) выбираем, по какую сторону от оси будет выполняться сечение (в данном случае выбора нет, поскольку геометрия описывает неполную окружность — рис. 1.95).

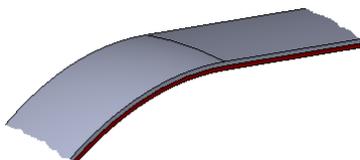


Рис. 1.93. Фрагмент твердотельной геометрической модели

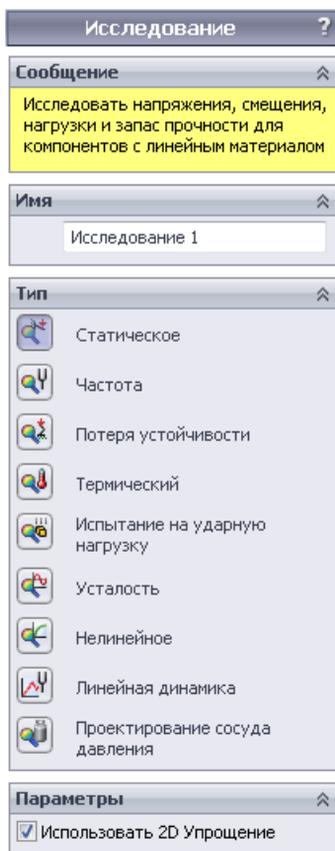


Рис. 1.94. Создание плоской модели

¹ Приведены устоявшиеся в отечественной литературе термины.

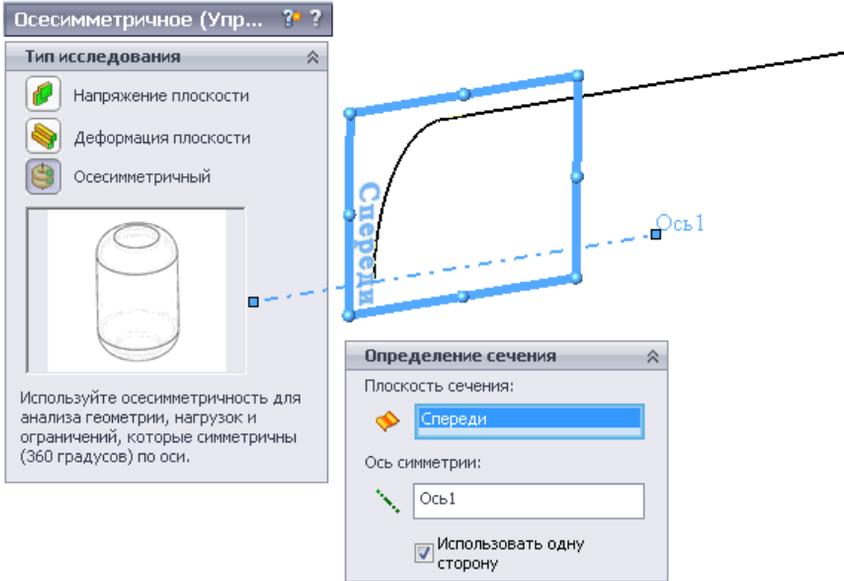


Рис. 1.95. Создание плоской осесимметричной расчетной модели

Сетка показана на рис. 1.96. Параметры сетки соответствуют (в целом) назначенным для оболочечной модели: "стандартная" сетка с глобальным размером 80 мм, допуском 0,1 мм, дополненная элементом управления в вершинах в месте перехода кромок от днища к царге (рис. 1.97).

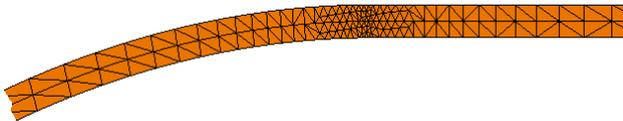


Рис. 1.96. Фрагмент сетки

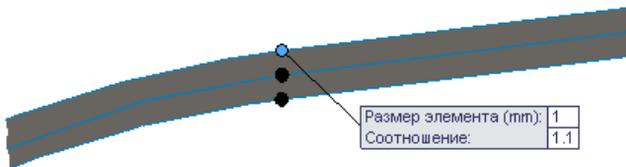


Рис. 1.97. Элемент управления сеткой

Граничные условия очень просты, это равенство нулю нормальных перемещений на обрезе царги, что соответствует присутствию с другой стороны аналогичной системы. Внутреннее давление прикладываем к внутренним кромкам (рис. 1.98). Это соответствует реальности, однако, чтобы сравнить результаты, нужно приведенные далее значения увеличить в соответствующее число раз.

ПРИМЕЧАНИЕ

Эти рассуждения актуальны для цилиндрической части бака. Если бы мы рассматривали плоское днище, то там поправка была бы нулевой. Поэтому корректный алгоритм внесения поправок порождает переменное по образующей давление, пересчитываемое относительно реального с учетом толщины бака и его кривизны.

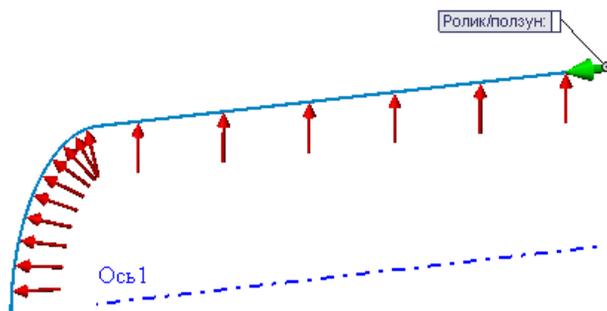


Рис. 1.98. Граничные условия

Между слоями действует (по умолчанию) контактное условие **Связанные** (Bonded).

Эпюра окружных напряжений вдоль кромки царги, разделяемой слоями (лежащей на срединной поверхности), показана на рис. 1.99. Как видно, результат крайне незначительно отличается от полученного по оболочечной модели. Критическое окружное напряжение равно 106 МПа.

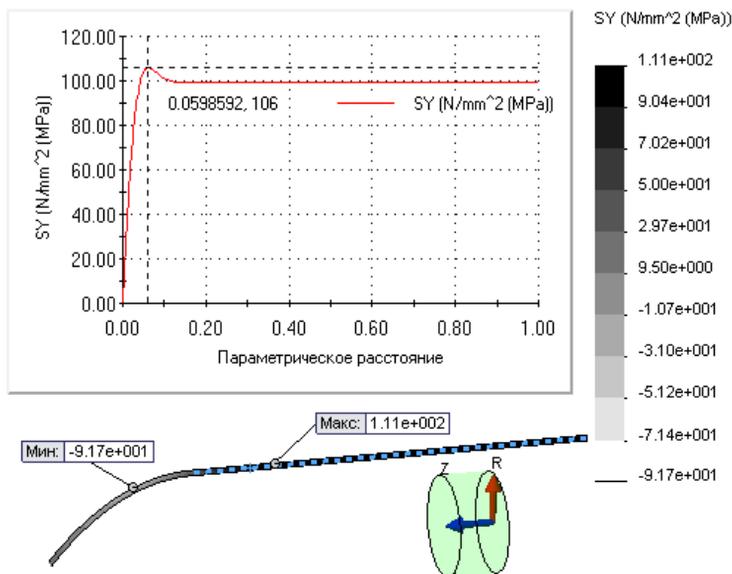


Рис. 1.99. Окружные напряжения в сечении обечайки и на ее срединной поверхности

Распределение меридиональных напряжений вдоль кромки между цилиндрами показано на рис. 1.100. В зоне плотной сетки наблюдается "дребезг", причина которого в особенностях осреднения деформаций и напряжений в узлах между смежными конечными элементами. Однако размах пульсаций невелик, поэтому этот эффект можно игнорировать. С учетом поправки, примененной к имеющемуся значению 49,5 МПа, получаем 49,7 МПа, что очень близко к аналитической оценке.

Такое же высокое соответствие аналитике и оболочечной модели наблюдается для окружных и меридиональных напряжений в полюсе: 99,3 МПа и 99,9 МПа.

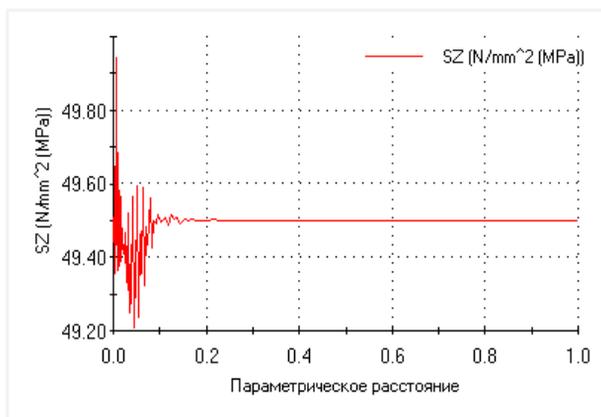


Рис. 1.100. Меридиональные напряжения в срединной поверхности обечайки

1.4.4. Выводы

Данная задача продемонстрировала эффективность использования SolidWorks Simulation для задач механики тонкостенных сосудов. Возникающие затруднения при обработке программой граничных условий достаточно легко преодолеваются, однако это обстоятельство принуждает пользователя внимательно анализировать результаты даже в простейших, на первый взгляд, случаях.

Еще раз показано, что применение твердотельной (реализованной посредством плоской осесимметричной модели) аппроксимации позволяет получить вполне адекватные результаты при условии, что по толщине оболочки генерируются два конечных элемента.

Результаты, в целом и частностях, соответствуют полученным в сертифицированной программе COSMOSM.

1.5. Расчет плоских тонких мембран

Целью данного раздела является построение расчетных моделей плоских тонких мембран круглой формы с учетом "больших перемещений", а также сравнение с аналитическими результатами.

1.5.1. Постановка задачи

Рассматривается плоская круглая тонкая мембрана радиусом 100 мм. Ее геометрическая модель выполнена посредством поверхностей SolidWorks (рис. 1.101). Линиями разреза исходная поверхность разделена на четыре сектора. Это сделано для построения упорядоченной сетки, а также гарантированного попадания узла сетки в центр мембраны.

Толщина мембраны составляет 0,4 мм. Свойства материала (стали) показаны на рис. 1.102.

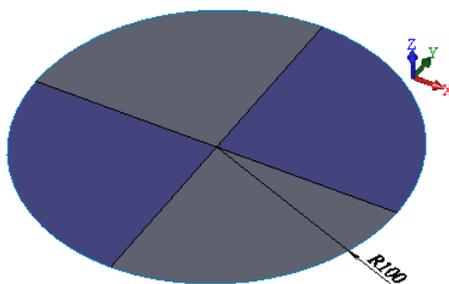


Рис. 1.101. Геометрическая модель мембраны

Оболочка Детализация	
Имя исследования	МПерем (По умолчанию)
Состав оболочки	Тонкостенный
Толщина оболочки	0.4
Имя материала	Легированная сталь
Источник материала	Библиотека Simulation
EX	2.1E+011 N/m ²
NUXY	0.28
GXY	7.9E+010 N/m ²
DENS	7700 kg/m ³
SIGXT	7.2383E+008 N/m ²
SIGYLD	6.2042E+008 N/m ²
ALPX	1.3E-005 /Kelvin
KX	50 W/(m.K)
C	460 J/(kg.K)

Рис. 1.102. Свойства материала мембраны

Расчет будет выполняться при нагружении давлением 0,04 МПа. Граничные условия — фиксация всех перемещений и углов поворота по контуру.

1.5.2. Расчетная модель

При данном отношении толщины к пролету наиболее адекватной является модель тонких оболочек, в которой не учитываются деформации поперечного сдвига, а реализуются только изгиб и деформация в плоскости. В то же время прогибы могут

быть достаточно велики, чтобы система продемонстрировала нелинейное поведение. Предполагается, что нелинейная модель должна использоваться, если прогиб превышает величину от половины до одной толщины. Источников нелинейности, собственно, два. Первый — переход от изгибной моды деформирования пластины (в силу моментного закрепления при малых нагрузках вклад изгиба в энергию деформаций достаточно весом) к мембранной с превалированием последней при увеличении прогиба. Второй — изменение результирующей нагрузки в связи с изменением площади мембраны под нагрузкой.

В SolidWorks для подобных ситуаций предусмотрено два основных инструмента: алгоритм больших перемещений в линейном анализе, когда нагрузка последовательно увеличивается под управлением программы, и собственно нелинейный анализ, который является единственным способом учесть изменение площади под нагрузкой.

Сетка конечных элементов с граничными условиями и нагрузками показана на рис. 1.103. Размерность оболочечной модели при изгибе составила 144 элемента при 321 узле.

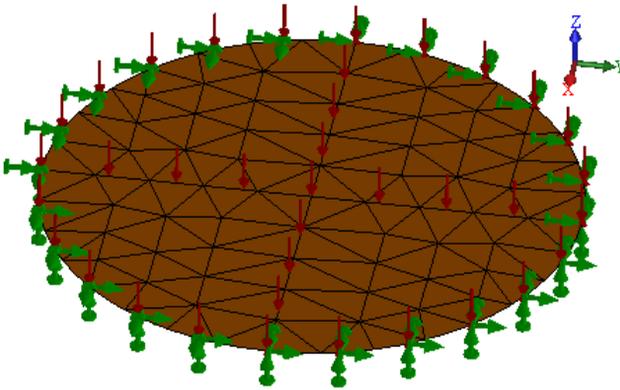


Рис. 1.103. Сетка конечных элементов с граничными условиями

1.5.3. Расчет мембраны по линейной и нелинейной модели

Диаграмма деформированного вида в натуральном масштабе, полученная посредством линейной модели, показана на рис. 1.104. Как видно, прогиб 51,7 мм превышает толщину более чем в 100 раз. Это, кстати говоря, очень близко к аналитическому решению по линейной же модели — 50,8 мм.

Если активизировать опцию **Большие перемещения** (Large displacement), то результат будет выглядеть, как показано на рис. 1.105. Аналитическое решение дает 2,30 мм.

Интерес представляют диаграммы распределения радиальных нормальных напряжений вдоль радиуса. Напряжение на срединной поверхности (мембранная компонента) показано на рис. 1.106 (график начинается с кромки), а изгибная компонента — на рис. 1.107. Как видно, у кромки изгибная мода превалирует, однако на незначительном удалении от нее практически сходит "на нет". Из графика сле-

дует также заключение о необходимости уплотнения сетки возле кромки, где градиенты напряжений/деформаций максимальны — график достаточно негладкий.

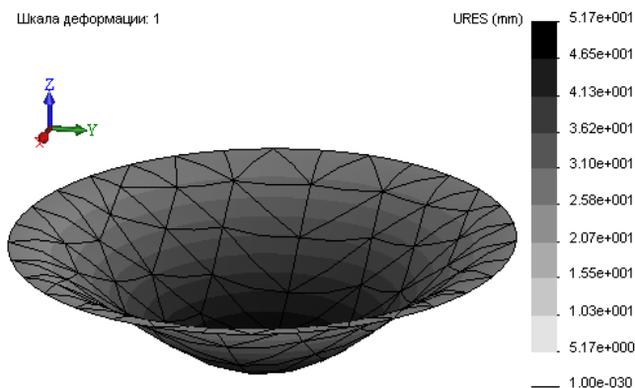


Рис. 1.104. Деформированный вид мембраны по модели "малых перемещений"

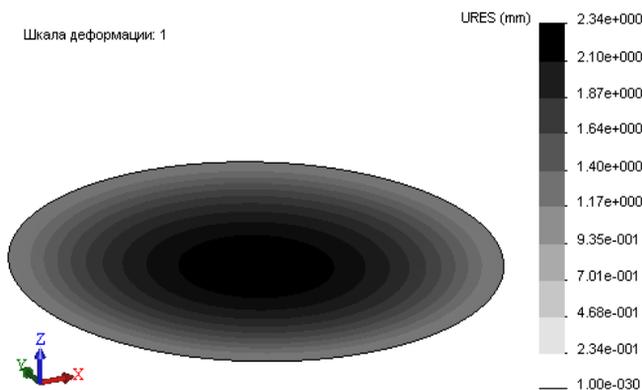


Рис. 1.105. Деформированный вид мембраны по модели "больших перемещений"

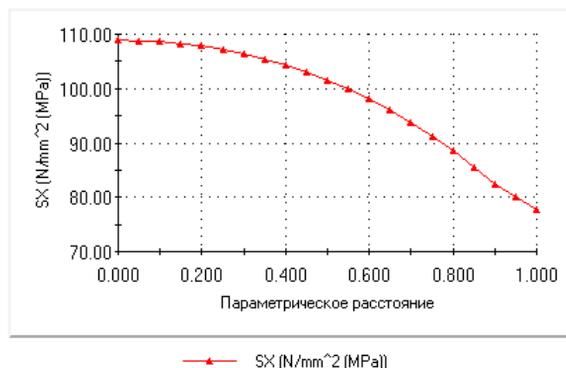


Рис. 1.106. Распределение мембранной компоненты радиального напряжения вдоль радиуса

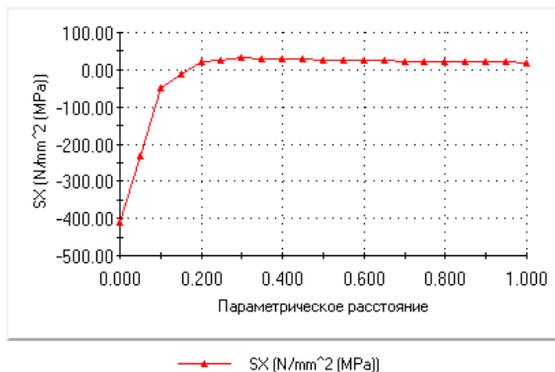


Рис. 1.107. Распределение изгибной компоненты радиального напряжения вдоль радиуса

Если решить задачу посредством нелинейной процедуры, то максимальный прогиб составит 2,35 мм. Для нелинейного исследования использовались настройки по умолчанию.

Кривая отклика (зависимости прогиба в центре от нагрузки) показана на рис. 1.108. Как видно, уже при прогибах, сопоставимых с толщиной, система демонстрирует нелинейное поведение.

Проверим, как влияет учет изменения площади мембраны в процессе деформирования на прогиб. Для этого активизируем опцию **Обновить направление нагрузки с отклонением** (Update load direction with deflection) в настройках нелинейного исследования. Состояние системы практически не изменилось.

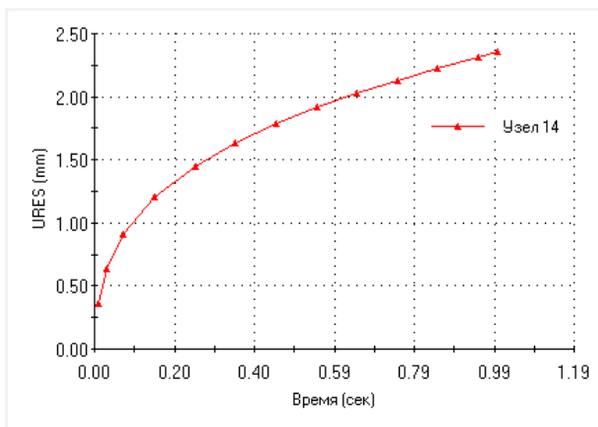


Рис. 1.108. Кривая отклика для точки в центре

Следует отметить, что изменение жесткости под нагрузкой в статическом анализе может учитываться посредством опции **Учитывать эффект нагружения в плоскости** (Use inplane effect) в настройках исследования. Ее активизация предполагает выполнение двух последовательных статических расчетов, причем во втором в упругие свойст-

ва системы автоматически вносятся поправки. Однако в данной, равно как и во многих других задачах, результат или не меняется, или меняется крайне незначительно. В этой связи в документации к программе утверждается, что наиболее надежным является использование нелинейной процедуры, позволяющей управлять величиной шага. Менее стабильна статическая модель с использованием опции **Большие перемещения** (Large displacement), поскольку приращения нагрузок (и граничных условий) осуществляются исключительно автоматически и синхронно.

Последнее может стать критическим ограничением в задачах, когда начальная жесткость системы (в частности, мембраны под давлением) исчезающе мала, как если бы мембрана имела крайне малую толщину и была изготовлена из нежесткого материала, например, пластмассы. Здесь первый шаг должен быть малым, на уровне погрешности математики. Тогда нелинейный алгоритм может остановиться, не достигнув сходимости. В такой ситуации документация программы рекомендует сначала придать системе жесткость — для круглой мембраны приложить радиальное растягивающее перемещение, после чего она приобретет жесткость при приложении давления. Реализовав давление и тем самым еще больше увеличив жесткость (относительно давления же), можно "вернуть" кромки в исходное положение: получившаяся форма и будет "истинной".

1.5.4. Определение объема между деформированной поверхностью и плоскостью

Некоторым своеобразием обладает задача расчета объема между деформированной поверхностью мембраны и плоскостью ее начального положения. Деформированный вид мембраны в натуральном масштабе показан на рис. 1.109. Как видно, поверхность имеет очень малую кривизну, поскольку прогиб (с точки зрения геометрии) достаточно мал.

Для идентификации объема необходимо создать соответствующий объект в твердотельном представлении посредством команды **Создать тело из деформированной формы** (Create Body from Deformed Shape) контекстного меню **Результаты** (Results). Результат можно сохранить в новой конфигурации рассчитываемой детали/сборки или же создать новую деталь. Что ценно, объектом (и результатом) выполнения команды являются как тела, так и поверхности. Результат для мембраны показан на рис. 1.109.

С другой стороны будущее тело ограничиваем создаваемой плоской поверхностью. Она будет базироваться на плоском эскизе, полученным проецированием (используется команда **Преобразование объектов**) в SolidWorks (рис. 1.110). Однако попытка решить вопрос с минимальными усилиями (сшить две поверхности с одновременным созданием твердого тела) терпит неудачу (рис. 1.111). Причина в том, что между кромками поверхностей присутствуют зазоры. Они появляются в силу того, что деформированная форма строилась на основе сеточной аппроксимации — даже при элементах второго порядка получить точную аппроксимацию окружности контура невозможно. Ситуация усугубляется тем, что граничные условия (моментная заделка) предполагают касательность деформированной мембраны к ее исходному плоскому состоянию. Такого типа конфигурации достаточно проблематичны с точки зрения перехода к твердому телу, поскольку (при численном представлении) крайне чувствительны к точности аппроксимации.

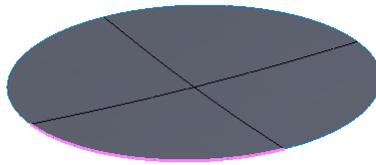


Рис. 1.109. Деформированный вид мембраны как поверхностная модель SolidWorks

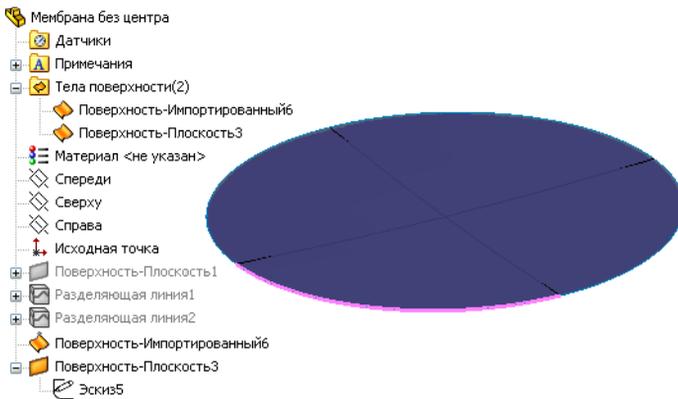


Рис. 1.110. Плоская ограничивающая поверхность

Как видно из иллюстрации, программа диагностировала наличие и величину зазоров. Попытка увеличить допуск сшивания оканчивается неудачей. Поэтому приходится прибегать к исправлению геометрии.

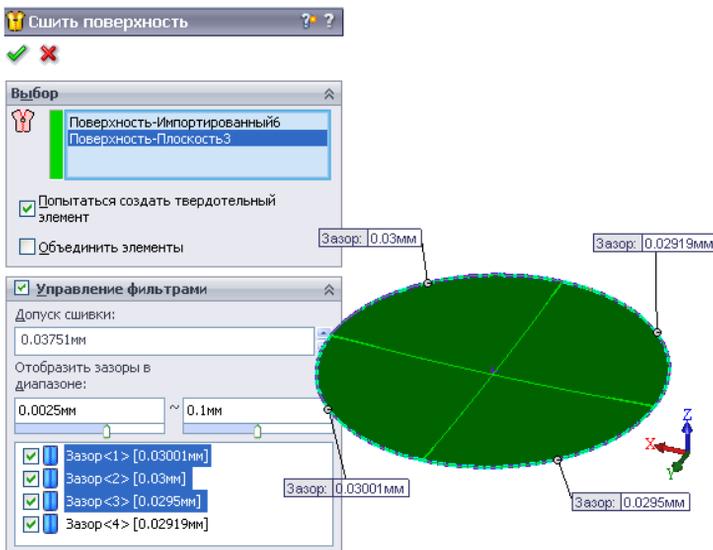


Рис. 1.111. Диагностика наличия зазоров между сшиваемыми поверхностями

Последовательным применением команды **Удлинить поверхность** увеличиваем обе поверхности так, чтобы они гарантированно (и однозначно, так как есть вероятность, что при дальнейшем удлинении возникнет перегиб) пересекались (рис. 1.112). При последующем сшивании поверхностей и генерации тела проблем не возникает (рис. 1.113).

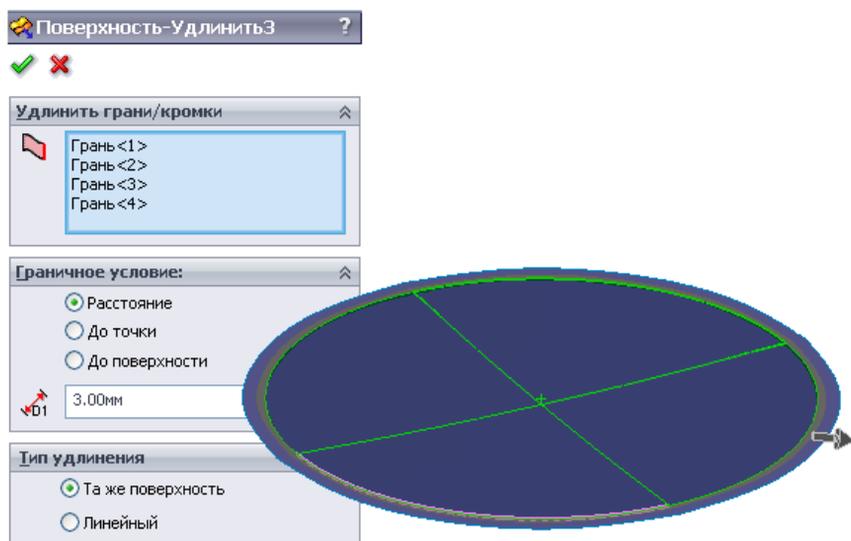


Рис. 1.112. Удлинение поверхностей

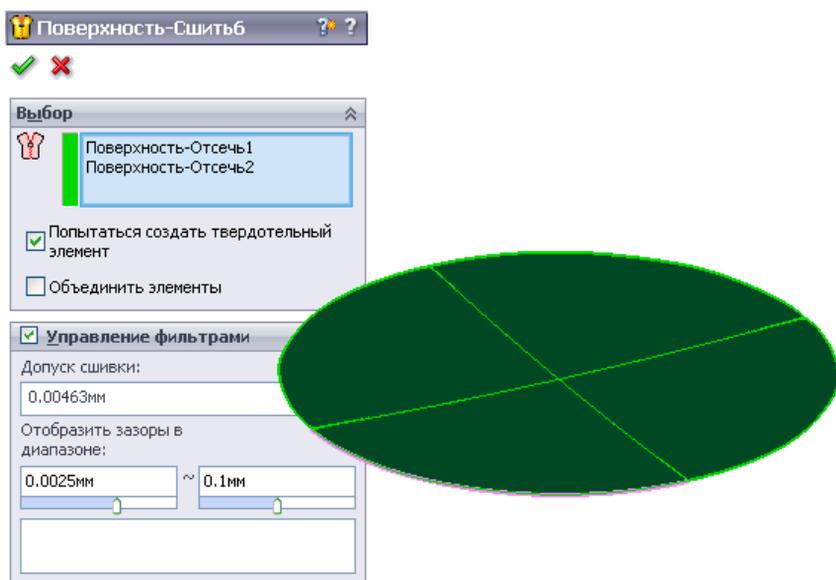


Рис. 1.113. Сшивка поверхностей с одновременным созданием твердого тела

Результат измерения массовых характеристик показан на рис. 1.114. Учитывая, что аналитическое решение также строится на базе численного, по сути, алгоритма, результат вполне удовлетворителен.

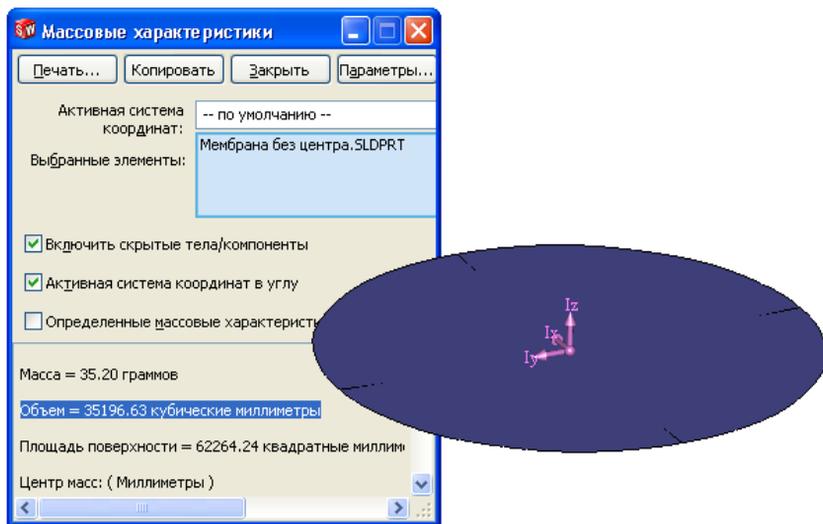


Рис. 1.114. Определение объема тела

1.5.5. Выводы

Класс задач, связанный с расчетом тонких мембран, уверенно моделируется с помощью конечных элементов тонких пластин/оболочек. В зависимости от соотношения нагрузка/жесткость и типа граничных условий используется линейная модель или подходящий нелинейный алгоритм с соответствующими настройками. В частности, вполне работоспособен алгоритм больших перемещений в статическом анализе. Практически все необходимые результаты могут быть получены с достаточной точностью и приемлемой трудоемкостью.

1.6. Устойчивость прямоугольной тонкой пластины при сдвиге

Целью данного раздела является расчет устойчивости прямоугольной пластины при чистом сдвиге и сравнение результатов с аналитическим решением.

1.6.1. Постановка задачи

Рассматривается прямоугольная тонкая пластина размером 300×500 мм. Ее геометрическая модель выполнена посредством поверхностей SolidWorks. Толщина пластины составляет 3 мм. Свойства материала (стали) обычные: $E = 2,1 \times 10^{11}$ Па; $\nu = 0,28$. Нагружение — чистый сдвиг, касательные напряжения направлены вдоль сторон. Граничные условия — безмоментное опирание.

1.6.2. Расчетная модель

Геометрия расчетной модели показана на рис. 1.115. Как видно, принята гипотеза за "толстых" оболочек, учитывающая деформации поперечного сдвига.

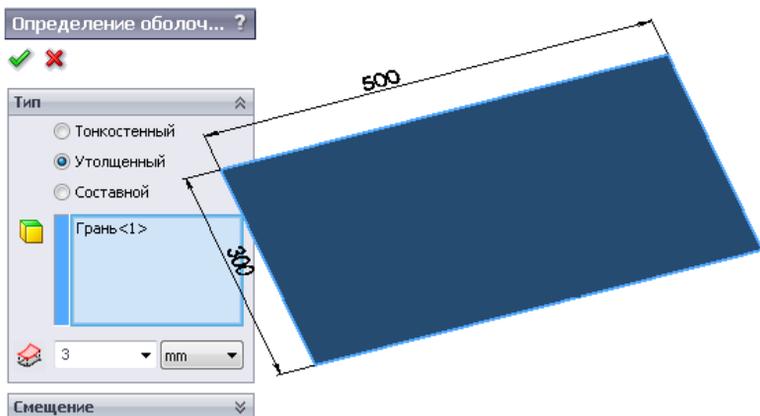


Рис. 1.115. Геометрия расчетной модели

Граничные условия показаны на рис. 1.116. Шарнирные заделки реализованы посредством ограничения перемещений граничных кромок в направлении, перпендикулярном пластине. Для стабилизации модели (исключения мод движения как жесткого целого) введено два дополнительных закрепления. Первое — фиксация одной из трех вершин (из них оригинальными являются два направления закрепления, так как фиксация вдоль нормали обеспечивается закреплением кромок) перемещения и поворота относительно нормали к пластине (рис. 1.117).

Вторая заделка показана на рис. 1.116, это ограничение перемещения диагональной (по отношению к предыдущей) вершины вдоль нормали к плоскости, проходящей через диагональ пластины.

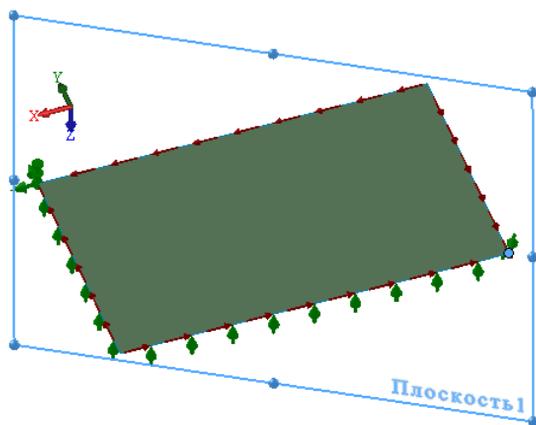


Рис. 1.116. Граничные условия

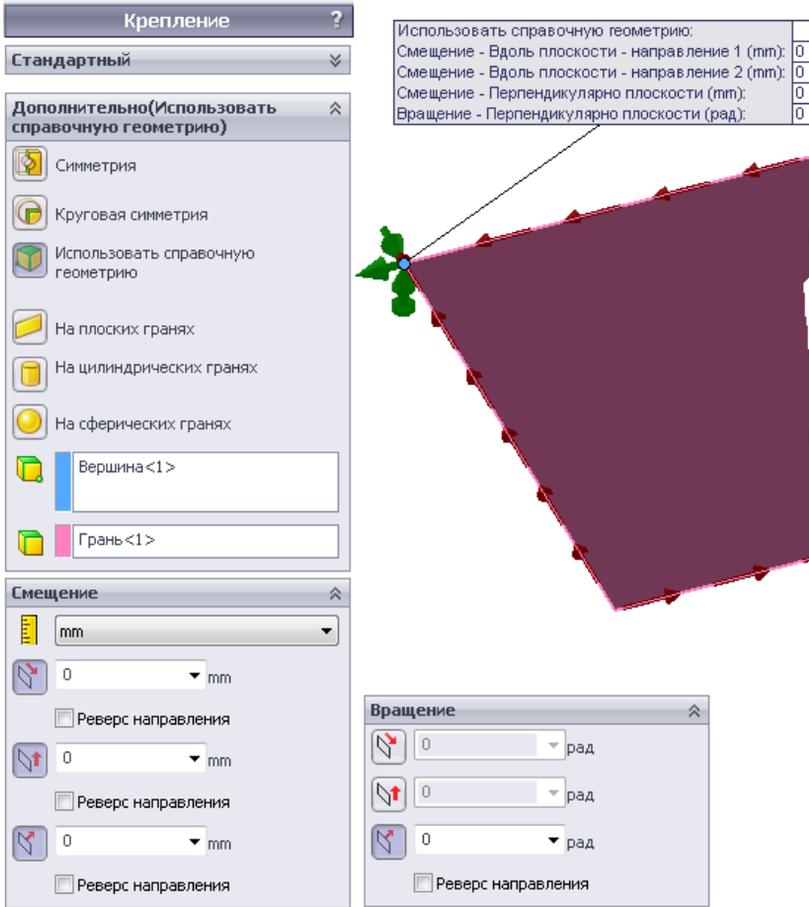


Рис. 1.117. Дополнительная заделка в вершине

Сдвиг имитируем распределенными нагрузками единичной величины, действующими вдоль кромок (рис. 1.118).

Сетка конечных элементов показана на рис. 1.119. Используются элементы с параболическим полем перемещений (сетка "высокого" качества).

Проверим корректность приложенных граничных условий — реализации чистого сдвига с касательными напряжениями, параллельными сторонам пластины. Для этого упомянутые граничные условия воспроизведем в статическом анализе. Отобразив диаграмму эквивалентных напряжений на срединной поверхности оболочки в режиме **Отобразить как эпюру тензора** (Show as tensor plot), получим диаграмму рис. 1.20. Как видно, получилась картина с эллипсоидами главных напряжений, причем главные напряжения направлены под углом 45° к сторонам прямоугольника. При этом напряжения по Мизесу составили $\sqrt{3}$, это значит, что касательные напряжения, их порождающие, равны единице. Таким образом, считаем доказанным, что в пластине реализован чистый сдвиг с требуемым направлением касательных напряжений.

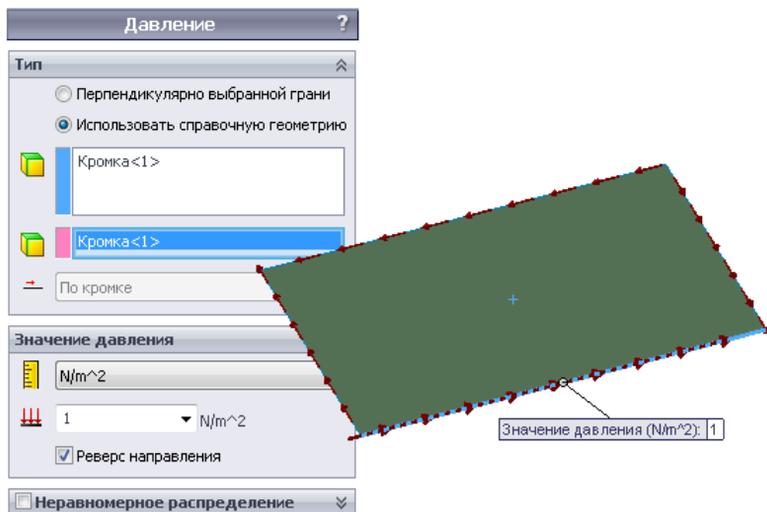


Рис. 1.118. Назначение сдвига

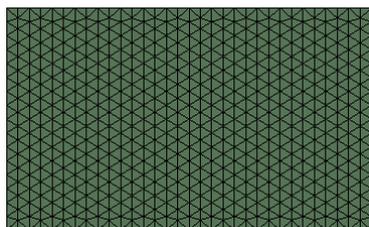


Рис. 1.119. Сетка конечных элементов

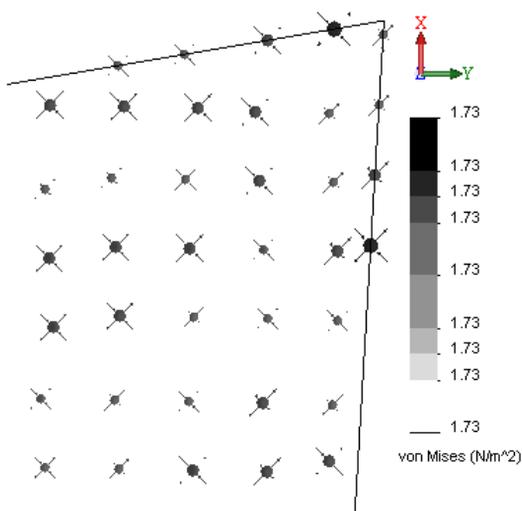


Рис. 1.120. Напряжения по Мизесу на фоне эллипсоидов главных напряжений

1.6.3. Аналитическое решение

Приближенное аналитическое решение для минимальной критической силы следующее:

$$\tau_{\text{критич}} = K_{\tau} \frac{\pi^2 D}{b^2 h}, \text{ где } K_{\tau} \approx 5,35 + 4 \frac{b^2}{a^2}, (b < a); D = \frac{E h^3}{12(1-\nu^2)}$$

дает 127 МПа при условии, что b — меньшая сторона пластины (и a — большая).

1.6.4. Расчет по линейной модели

Расчет по линейной модели устойчивости (решается задача собственных значений) выполняем с настройками, показанными на рис. 1.121. Результат расчета в виде первых шести собственных форм и соответствующих им критических сил показан на рис. 1.122.

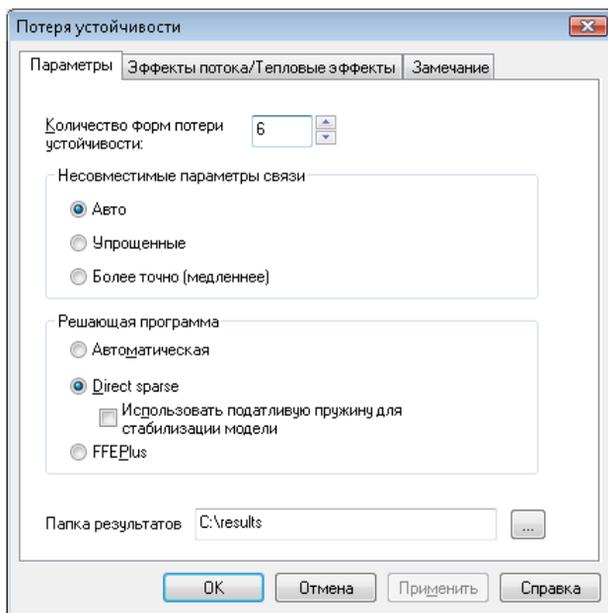


Рис. 1.121. Настройки расчета по линейной модели устойчивости

Как видно, характеристикой критической силы, реализующей некоторую собственную форму, является так называемый Коэффициент нагрузки (Load Factor). Система потеряет устойчивость по некоторой форме, если все граничные условия (нагрузки, перемещения) умножить на этот коэффициент.

Шесть форм, рассчитанных программой, показаны на рис. 1.122. Для первых трех собственных форм (Формы колебаний) коэффициент нагрузки отрицательный. Это значит, что для потери устойчивости по данной форме все нагрузки должны быть приложены в противоположном направлении. Как видно, третья и пятая форма соответствуют одинаковым нагрузкам, что, при единичных приложенных "условных" касательных напряжениях, соответствует в реальности 128 МПа. Эта величина практически совпадает с теоретической оценкой.

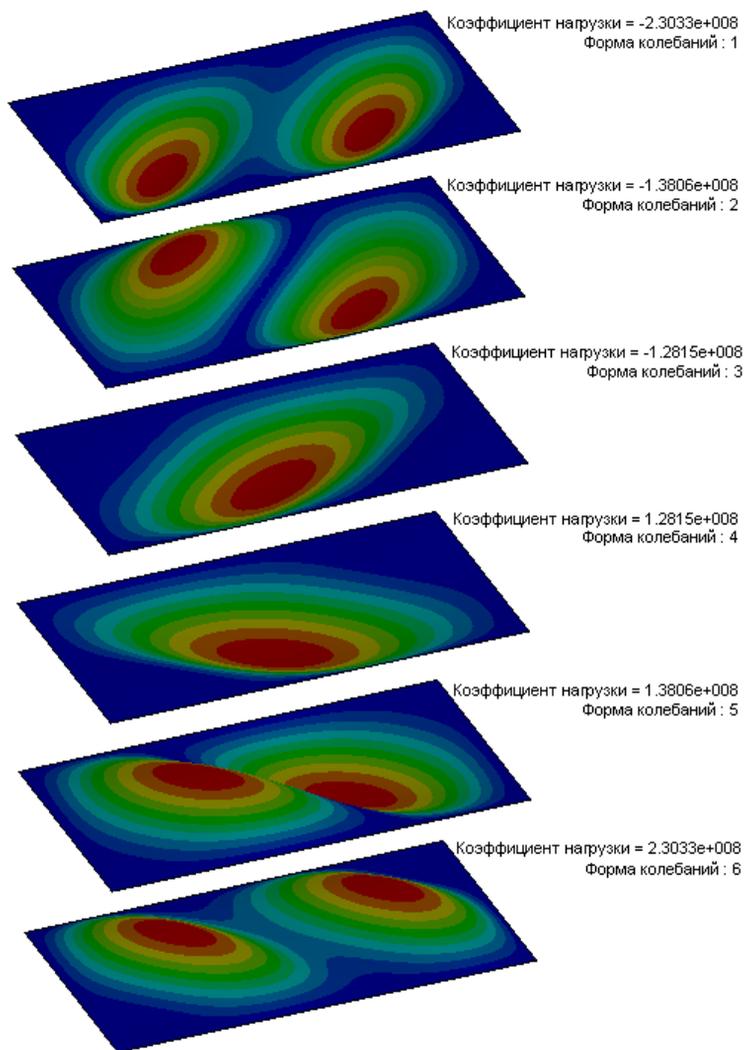


Рис. 1.122. Формы потери устойчивости и соответствующие им критические силы

1.6.5. Расчет по нелинейной модели

Попытаемся подтвердить полученный результат посредством нелинейного алгоритма. Нелинейный алгоритм в Simulation реализован в трех базовых вариантах: **Метод сил** (Force Control), **Метод перемещений** (Displacement Control), **Метод длины дуги** (Arc Length Control). Если ставится задача идентификации минимальной критической нагрузки, то вполне пригодным является метод сил (при расчете упрочняющихся систем). Это означает, что для приращения перемещений конструкции (зон, находящихся под нагрузкой) требуется приращение нагрузки. Если же перемещения увеличиваются без роста нагрузок, то система становится разрушающейся.

ПРИМЕЧАНИЕ

Одной из ближайших аналогий является классификация нелинейного поведения материалов: если рост деформаций требует прироста нагрузок, то материал упрочняющийся. К слову сказать, метод сил становится неработоспособен, если, даже локально, материал функционирует на участке разупрочнения.

Это свойство метода сил есть основа идентификации момента потери устойчивости: как только на кривой отклика (зависимости перемещения характерной точки) появляется излом, можно сделать заключение об "особом" состоянии системы.

Настройки нелинейного анализа показаны на рис. 1.133. Как видно, относительно значений по умолчанию уменьшены величина начального временного инкремента и максимальный шаг приращения по времени. В данном случае это сделано, чтобы получить достаточно гладкие кривые отклика (в ряде других задач малый шаг требуется для получения решения в принципе). Размер анализируемого временного интервала оставляем равным одной секунде.

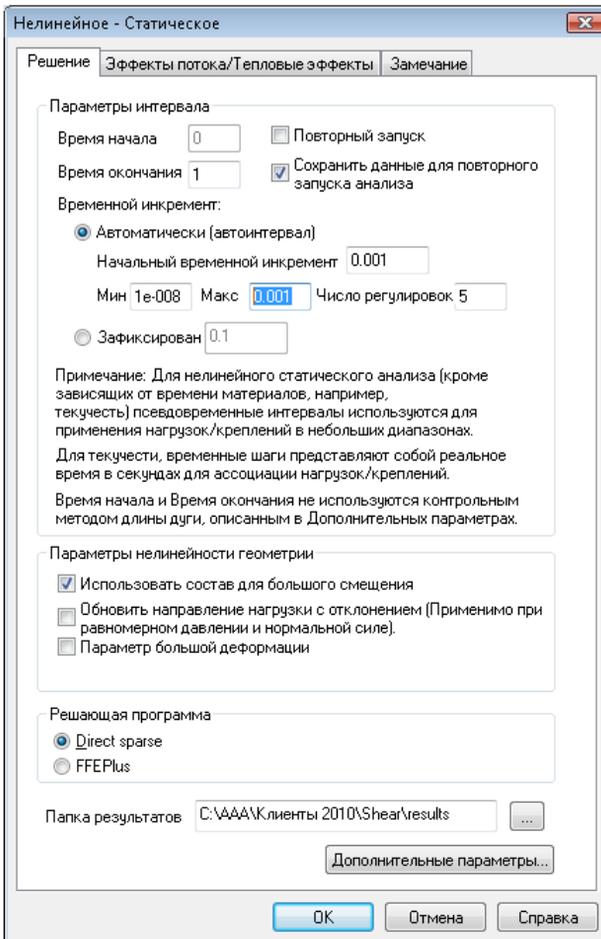


Рис. 1.133. Настройки нелинейного анализа

На вкладке **Дополнительно** (Advanced) оставляем **Метод сил** (Force Control) в качестве алгоритма управления итерационным процессом (рис. 1.124).

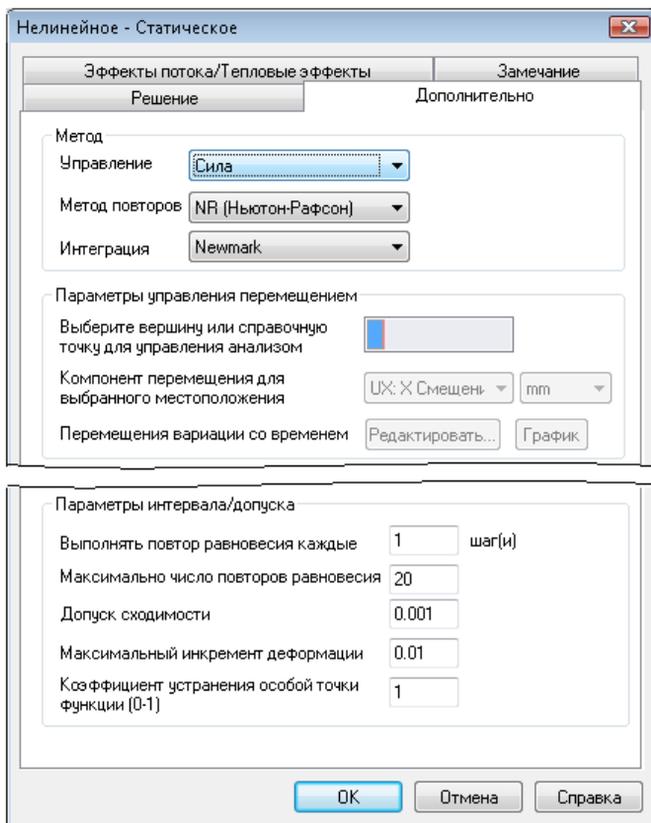


Рис. 1.124. Настройки итерационного алгоритма

Если начать решать задачу "в лоб", приняв, что с течением времени касательные напряжения возрастают равномерно и пропорционально времени, то получим эквивалент упругого решения. Дело в том, что алгоритм не способен вывести пластину в новое состояние без привнесения дополнительного возмущения извне. В нашем случае это будет силовой фактор, выводящий пластину из плоского состояния, а конкретно — незначительное давление. Закон его изменения показан на рис. 1.125. Как видно, давление возрастает с нуля до 100 Па, после чего стабилизируется.

В принципе, вносить возмущение можно незначительным изменением формы, но этот способ более подвержен субъективному фактору. Известен еще один прием искусственного создания дестабилизирующего фактора — асимметрия нагрузки в симметричной системе. Характерный пример — задача потери устойчивости пологой цилиндрической оболочки под действием сосредоточенной силы. Здесь асимметрия вносится в геометрию малой площадки, к которой приложена сила (фактически мы имеем дело с распределенной нагрузкой). Также возмущение может

создаваться неоднородностью сетки в зоне приложения силы. Такая сетка делает асимметричным распределение силы после ее приведения к узлам, а также жесткости — после расчета матрицы жесткости конечно-элементной системы. В данном случае применимы только способы, изменяющие форму (через изменение собственно формы и посредством возмущающей нагрузки). В дисциплине "Строительная механика" подобные алгоритмы при получении аналитических оценок устойчивости носят название "метод начальных несовершенств".

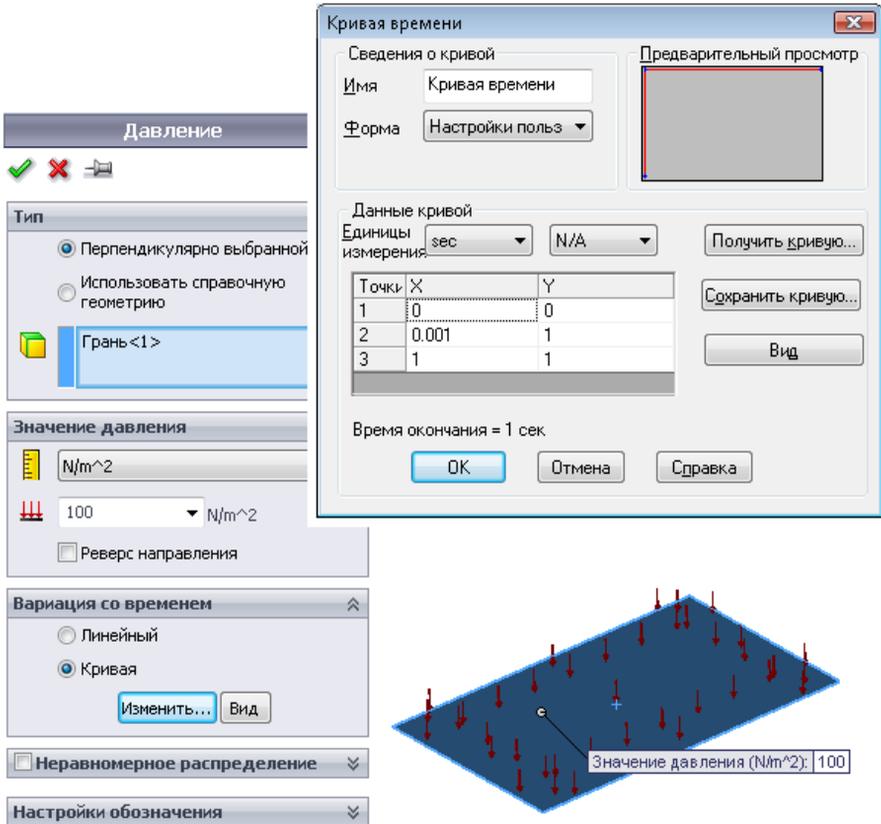


Рис. 1.125. Закон изменения возмущающего давления

Закон изменения сдвиговых усилий показан на рис. 1.126. Как видно, в отличие от алгоритма собственных значений, где действовали единичные напряжения, здесь назначена величина 1000 МПа. Это сделано, чтобы "привести" модель к единичному времени. С таким же успехом можно было бы оставить единичную величину напряжений, но рассмотреть интервал времени более 150 млн с (приложенное напряжение, умноженное на максимальное время, должно превысить критическое напряжение).

Как видно, на первом этапе (до 0,001 с) касательных напряжений нет, после чего начинается их рост по линейному закону.

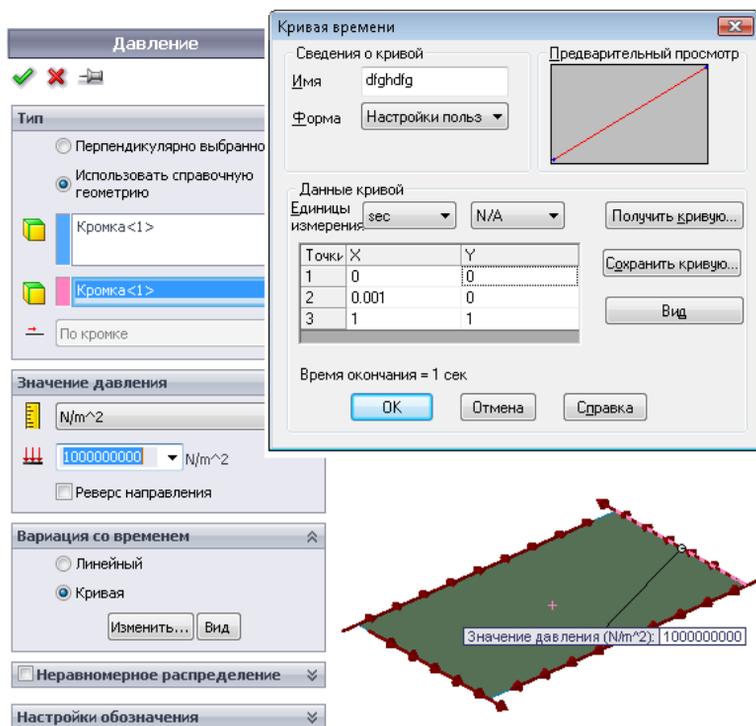


Рис. 1.126. Закон изменения сдвигающей нагрузки

Для получения искомой кривой отклика достаточно отобразить необходимую диаграмму, наиболее показательной является распределение вертикальных (нормальных пластине) перемещений в произвольный момент времени (рис. 1.127). В нашем случае, поскольку ответ мы уже знаем, диаграмма показана в момент 0,126 с — сразу после потери устойчивости.

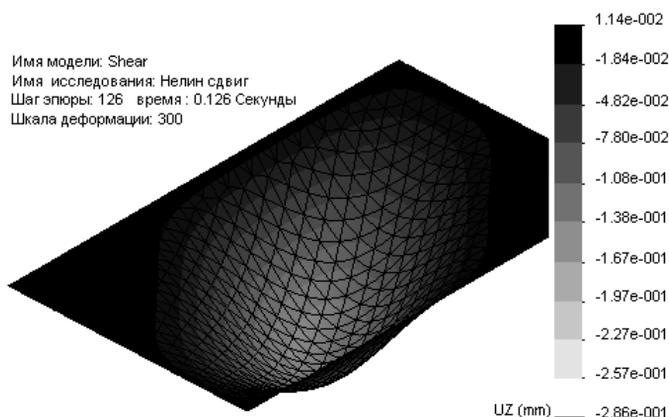


Рис. 1.127. Деформированный вид с вертикальными перемещениями сразу после потери устойчивости

После этого подается команда **Зондирование** (Probe) с указанием, например, узла в центре пластины (рис. 1.128). Нажав кнопку **Отклик** (Response), можно получить график, являющийся кривой отклика (зависимостью перемещения от условного времени и фактически — от приложенной нагрузки, рис. 1.129).

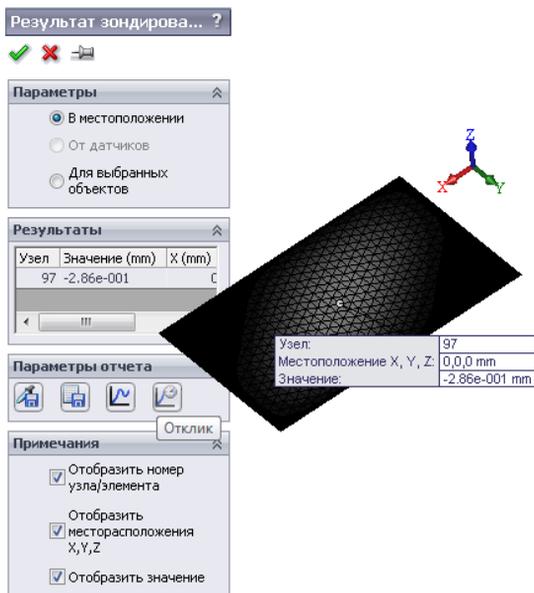


Рис. 1.128. Построение кривой отклика

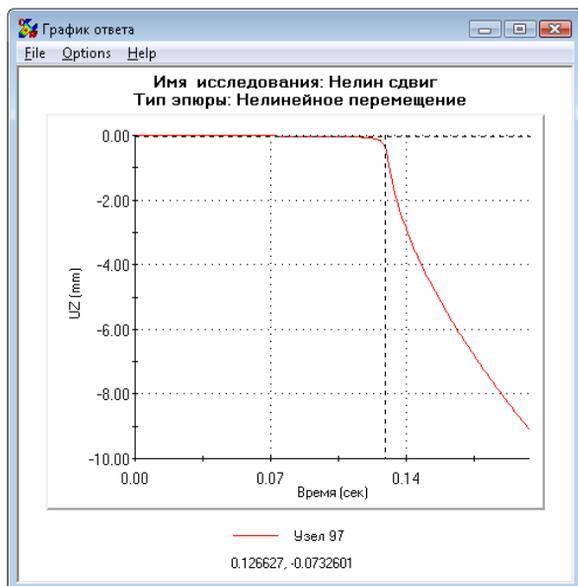


Рис. 1.129. Кривая отклика центрального узла

Данная кривая отклика имеет несколько выраженных участков: почти линейное возрастание прогиба (оно обусловлено как вспомогательным давлением, так и собственно сдвигом); участка перехода в неустойчивое состояние; закритического роста перемещений при малом приросте касательного напряжения. Момент потери устойчивости идентифицируется как пересечение касательных к первому и третьему участкам (рис. 1.130). Как видно, критическое напряжение находится в интервале 126–128 МПа, что практически совпадает с рассчитанным по линейной модели.

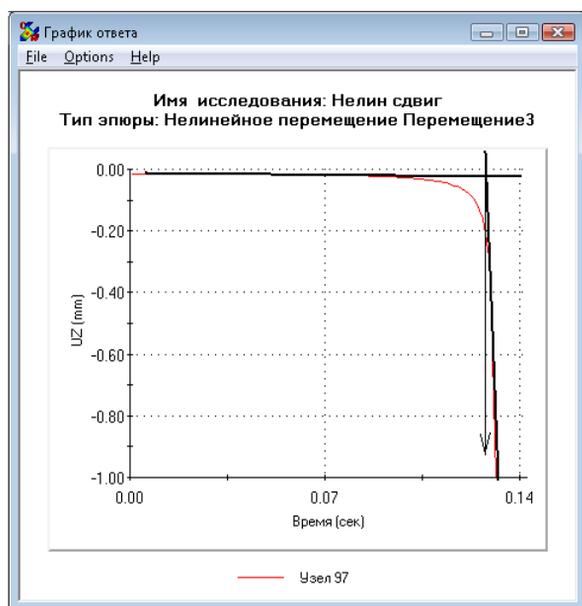


Рис. 1.130. Фрагмент кривой отклика для идентификации момента потери устойчивости

Определенной неоднозначностью обладает этап, связанный с приложением возмущающего давления: мы, по сути, "с потолка" назначили 100 Па. Критерий здесь следующий. Нагрузка должна быть минимально возможной, чтобы породить неустойчивость. Надо сказать, что в данной задаче это результат грубой оценки. Кстати говоря, вклад возмущающей нагрузки в деформированное состояние можно оценить достаточно строго — это величина прогиба в момент полного приложения давления. Чтобы исключить влияние вспомогательного давления на закритическое состояние, можно снять это давление, используя закон его изменения (рис. 1.131). Однако обнулить давление можно только после потери устойчивости.

Возникает естественный вопрос, а можно ли посредством нелинейной модели получить более высокие моды. Если напряжения превышают критические почти в два раза, то распределение нормальных перемещений будет выглядеть, как показано на рис. 1.132. Как видно, эта картина далека от каких-либо вариантов, предложенных линейным алгоритмом. Последний (в идеализированном случае) предполагает, что переход в некоторую форму потери устойчивости происходит сразу из исходного (в нашем случае — плоского) состояния. Нелинейный же алгоритм дает

более реалистичную последовательность, когда возрастающая нагрузка прикладывается к деформированной и напряженной системе.

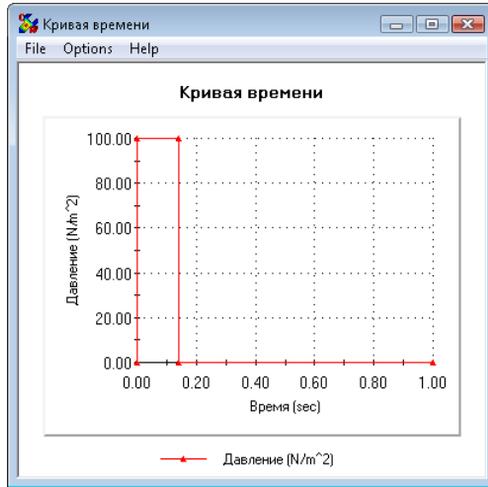


Рис. 1.131. Модифицированный закон изменения возмущающей нагрузки

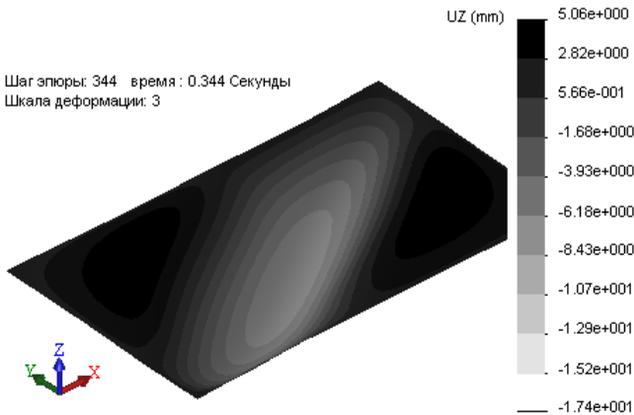


Рис. 1.132. Форма пластины при нагрузке, существенно превышающей нагрузку потери устойчивости

Следующий вопрос касается достоверности моделирования состояния системы после потери устойчивости. В данном случае, если продолжить (до разумных пределов) увеличивать нагрузку, то новое устойчивое состояние не достигается. Это связано с упомянутым ограничением алгоритма метода сил, не допускающего разрушения системы. В такой ситуации должен использоваться метод длины дуги. Его идея состоит в том, что система подбирает величину силы так, чтобы обеспечить некий прирост перемещений, поддерживая систему в статически равновесном состоянии.

Однако в данной задаче получить достоверную оценку закритического состояния не удалось: рассчитанная форма потери устойчивости не совпадала с предыдущими оценками.

1.6.6. Выводы

Эта задача является удачным примером совпадения результатов, полученных двумя независимыми алгоритмами. К сожалению, не удалось получить достоверный вид закритического состояния, однако подобные задачи не актуальны с практической точки зрения.

1.7. Расчет гибкой рамной конструкции

Целью данного раздела является расчет гибкой рамной конструкции выставочного стенда. Автор благодарит ООО "Студия Дега" за предоставленную геометрическую модель и взаимодействие при решении задачи.

1.7.1. Постановка задачи

Общий вид конструкции показан на рис. 1.133. Особенностью данной конструкции является относительно большое число пустотелых криволинейных алюминиевых профилей сложного сечения, функционирующих как балочные элементы. В узлах они связываются посредством гнутых пластин из стали (рис. 1.134). При соединении используются болты, причем профили вне краев комбинируются в пары. Некоторые узлы соединены стяжками, представляющими собой тонкие сплошные стержни, присоединяемые к конструкции посредством достаточно податливых узлов.

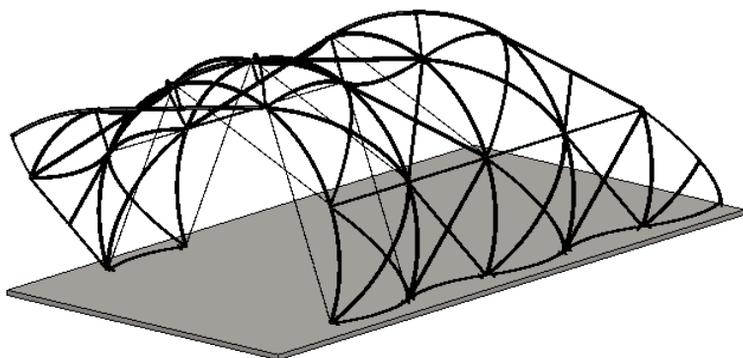


Рис. 1.133. Общий вид конструкции стенда

Нетривиальным (с точки зрения расчета) является устройство опор (рис. 1.135). Эти опоры (их пять) регулируются по высоте установочными винтами так, чтобы все они находились в контакте с полом. Никаких других инструментов для фиксации конструкции на полу не предусмотрено, то есть перемещению "в плоскости" пола препятствует только трение.



Рис. 1.134. Узел соединения

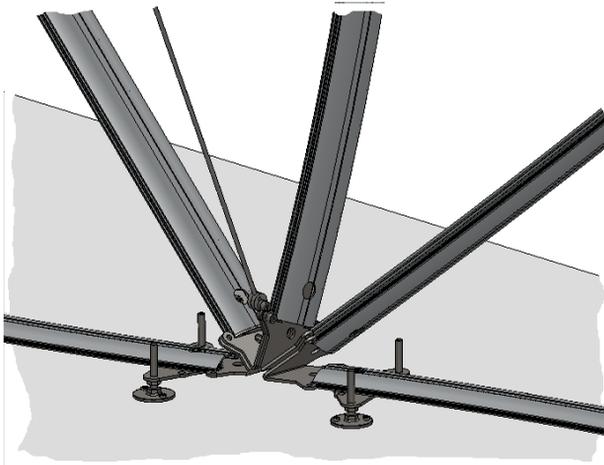


Рис. 1.135. Конструкция опоры

1.7.2. Построение расчетной геометрической модели

Единственно приемлемым способом расчета подобных конструкций является использование балочно-стержневых моделей. При этом, в отличие от "традиционных" балочных конструкций, нельзя однозначно описать работу узлов как "моментную" или "безмоментную". В силу невысокой жесткости, последняя аппроксимация ближе к реальности, однако сопротивление изгибу/кручению для одной и той же балки существенно отличается в зависимости от направления, а если сравнить балки, то и между ними. Следует учитывать, что идеализированная шарнирная связь обладает абсолютной жесткостью относительно перемещений, здесь же мы имеем достаточно податливую (по крайней мере, на вид) систему. Поэтому попытаемся в расчетную модель включить реальные соединяющие детали, что практически полностью исключит субъективизм, порождаемый неоднозначностью оценки влияния условностей и упрощений на конечный результат.

Тогда возникает вопрос о том, какая геометрия узла соединения будет наиболее адекватна для конечно-элементной аппроксимации средствами Simulation. Наименее трудоемкой (с точки зрения геометрического моделирования) является твердотельная аппроксимация, прежде всего, по той причине, что она уже имеется. Более того, для данных пропорций соединительных пластин — отношению (достаточно малому) размеров "в плане" к толщине — она же и вполне достоверна. Мы же, однако, руководствуясь соображениями вычислительной эффективности (потребной памяти и размерности), будем использовать оболочечное представление. Из вариантов, предоставляемых современными версиями Simulation, оптимальным является выполнение пластины по модели листового металла, после чего она может быть автоматически интерпретирована в Simulation как оболочка. Однако, как показала практика, для данной конфигурации программа некорректно реализует связь между балками и гранями листового металла, поэтому для пластин используем непосредственно поверхностную модель SolidWorks. Она, кстати говоря, получается из модели листового металла элементарно — посредством команды **Промежуточная поверхность**. Также линиями разреза на поверхностях выделяем зоны, в которых будет назначаться контакт с балками.

При этом остальные детали опор оставляем в их исходном (твердотельном) представлении, применив, однако, некоторые упрощения, не влияющие существенно на жесткость, но сокращающие размерность конечно-элементной сетки (рис. 1.136).

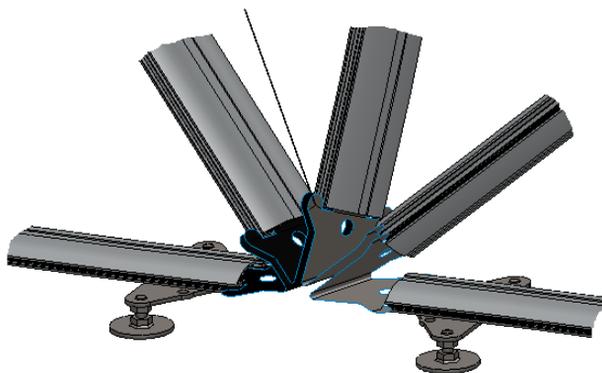


Рис. 1.136. Расчетная геометрическая модель узла соединения и опор

Следующий весьма неоднозначный вопрос — как описать стяжки. В геометрической модели выполнены тонкие круглые стержни (посредством команды **Конструкция** подмножества команд **Сварные детали**). На выступах листовых уголков (а в нашей модели — их срединной поверхности) посредством команды **Линия разреза** получены вспомогательные вершины, которые в том или ином виде "пригодятся" в расчетной модели стяжек. Как видно, отверстия, которым присоединяются стяжки, заполнены, а на их месте появилась вершина.

По причинам, описанным далее, стержни выполняем из трех участков: на концах короткие — они соответствуют зоне связи между пластиной и стяжкой — и посередине длинный, занимающий всю остальную длину (рис. 1.137).

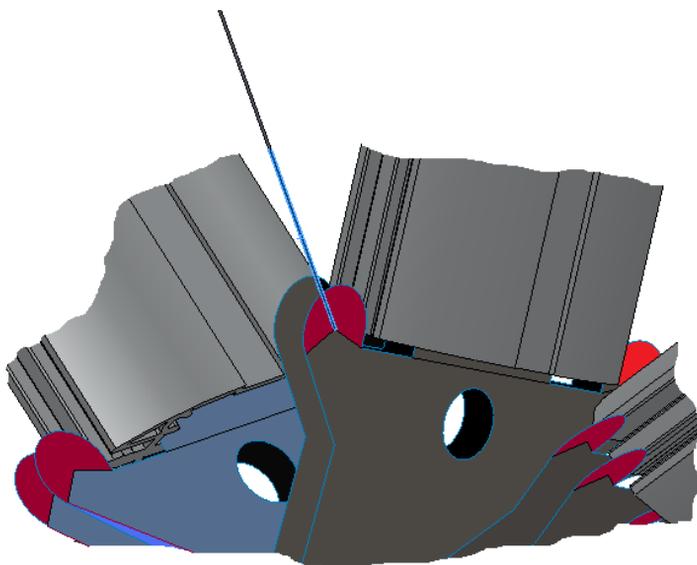


Рис. 1.137. Фрагмент расчетной геометрической модели

Последний вопрос: какую геометрическую модель выбрать для рационального описания геометрии балок применительно к конечно-элементной аппроксимации в функционале Simulation? С одинарной балкой дело достаточно простое. Достаточно инструментами SolidWorks создать соответствующий эскиз (подобный показанному на рис. 1.138 справа) и поместить его в библиотеку профилей сварных деталей, после чего на его базе можно командой SolidWorks **Конструкция** генерировать балки (тела балок). При создании исследования Simulation они будут автоматически интерпретированы как балки (в прочностном смысле). Здесь важным является то, что в SolidWorks (современных его версиях) балки могут быть "протянуты" вдоль как прямых сегментов эскиза, так и дуг окружностей, а в Simulation — корректно интерпретированы.

Сдвоенный профиль, если стоять модель "в лоб", приведет к появлению двух параллельных (или идущих вдоль друг друга) балок. В данной задаче этот вариант не был опробован, поэтому выносить окончательное заключение о его применимости мы не будем. Однако, в целях сокращения размерности, можно вместо двух балок рассмотреть одну. Здесь тоже есть варианты. Самый очевидный — сразу сгенерировать "объединенное" сечение, как показано на рис. 1.138 слева. В данном случае был реализован именно такой подход. Его недостатком является необходимость перестроения геометрической модели, если в таковой соединенные профили моделировались различными деталями/телами.

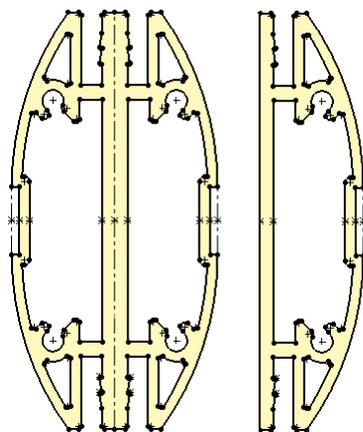


Рис. 1.138. Специальные профили "сварных конструкций"

Есть и компромиссное решение. Допустим, некая геометрическая модель сгенерирована так, что два профиля имеют общую грань (рис. 1.139, сверху). Выполненное посредством команды Соединить в контексте многотельной детали (рис. 1.139, посередине) или команды Соединить в контексте сборки (этот вариант более трудоемкий, поскольку все равно придется создавать вспомогательную деталь, в которую будет помещен продукт булевой операции) результирующее тело (деталь) также будет автоматически интерпретировано как балка (рис. 1.139, снизу).

Отметим, что формирование "единой" виртуальной балки на базе нескольких тел (с точки зрения эргономики рационален именно этот алгоритм) не такой уж экзотический случай. Распространенными являются ферменные конструкции, где нестандартные профили получены сваркой из нескольких типовых. Если такие профили были сформированы как многотельная деталь, то подготовка к расчету по балочной модели может быть выполнена с минимальными затратами.

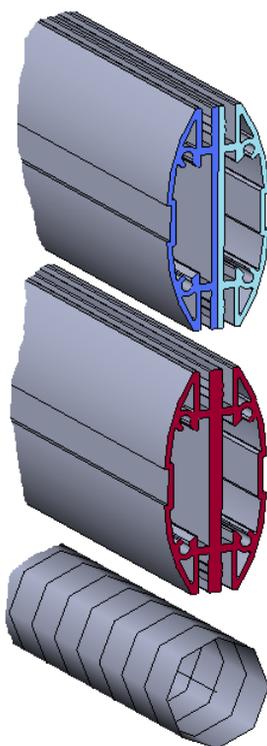


Рис. 1.139. Превращение составной твердотельной конструкции в единственный балочный элемент

1.7.3. Расчетная модель

Имея дело с балочной или включающей балки моделью, необходимо сначала определить тип соответствующих элементов: балка; стержень; или степени свободы управляются пользователем. Все несущие профили будем интерпретировать как

балки, что означает непрерывность, как перемещений, так и поворотов в узлах соединений. В нашей ситуации это не слишком актуально, поскольку непосредственно между собой, за исключением объектов, имитирующих растяжку, профили не связаны. Тем не менее, для несущих профилей оставляем модель "по умолчанию", а она — балочная.

Крайне неоднозначным является вопрос о том, как моделировать стяжки. С точки зрения механики, они являются односторонними связями с отсутствующей жесткостью на сжатие и нелинейной, в общем случае, жесткостью на растяжение. Нелинейность мы, само собой, проигнорируем, так как ее учет не повлияет на результат.

ПРИМЕЧАНИЕ

Здесь имеется в виду, что промежуточные состояния будут зависимы от модели, а после приложения всех нагрузок результат тратит зависимость от способа их приложения и промежуточных состояний системы.

Из числа имеющихся инструментов Simulation наиболее подходящим является **Пружина (Spring)** в варианте **Только растяжение (Tension only)** с опиранием на две вершины — **Два расположения (Two locations)**. Этими вершинами должны были быть вершины, полученные посредством описанной ранее линии разъема. При этом, чтобы придать узлу соединения конечную жесткость (как правило, фиксация вершины, соединение ее с пружиной или с объектом **Связать (Link)** приводит к неопределенности жесткости и, соответственно, сеточной зависимости), следует ограниченной линией разъема части проушин присвоить более высокий (примерно в десять раз) модуль упругости материала. Это, само собой, не снимает проблему, но в значительной степени нивелирует ее. Модель стяжки посредством виртуальных пружин имеет неоспоримое достоинство — возможность имитации предварительного натяга. Рассматриваемая конструкция его не предусматривает, но потенциально в подобных системах он может использоваться.

Однако применительно к данной задаче эта аппроксимация оказалось неприменима из-за некорректной работы программы. Поэтому пришлось искать паллиативное решение. Оно состоит в том, что стяжка моделируется тремя объектами. Относительно короткие тела, примыкающие к соединительным пластинам, аппроксимируются стержнями, а соединяющее их тело — балкой (балки и стержни в Менеджере Simulation отображаются различными пиктограммами, рис. 1.140, 1.141). Это, с одной стороны, гарантирует отсутствие жесткости при сдвиге и изгибе, а с другой — конечную (с учетом поправок на реализацию соединения между стержнем и пластиной) при изгибе. Следует подчеркнуть, что этот подход не решает (автоматически) существенную проблему: односторонняя связь не генерируется. То есть стяжки воспринимают сжимающую нагрузку. В реальности из-за начальных несовершенств, действия силы тяжести и асимметрии стяжки тяжести, последняя изначально находится в состоянии, соответствующем потере устойчивости (в отсутствие растяжения).

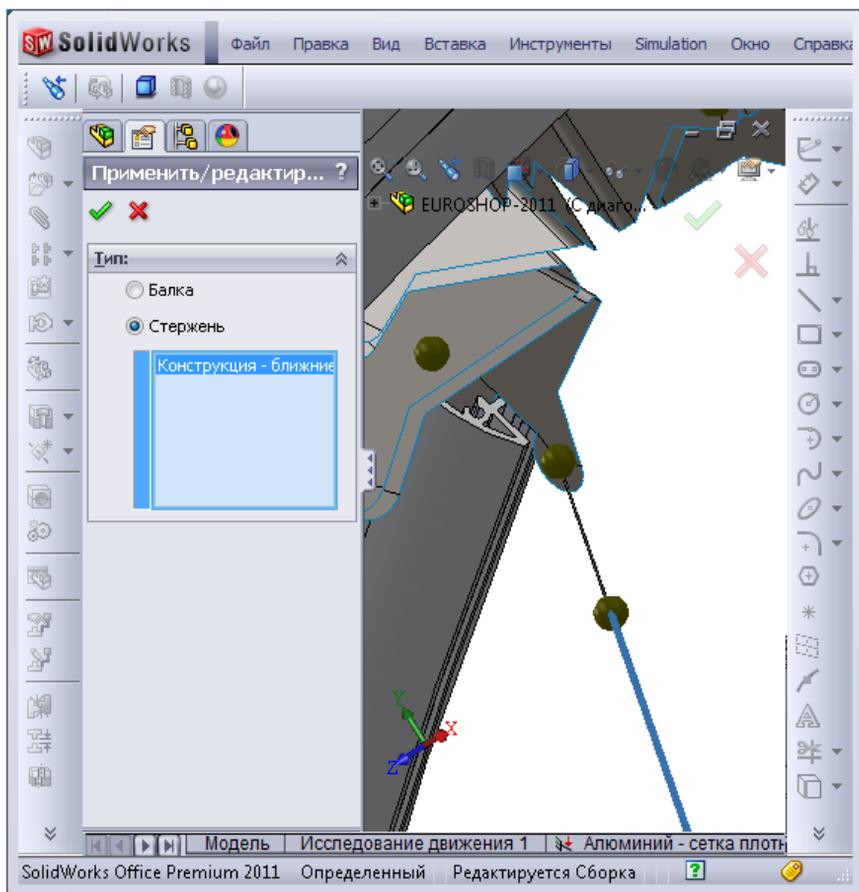


Рис. 1.140. "Придание" элементу конструкции свойств стержня

Из-за этого приходится вручную моделировать нелинейность системы в следующей последовательности:

1. Выполняется расчет при наличии всех стяжек.
2. Выделяется стяжка с максимальной сжимающей деформацией.
3. Эта стяжка исключается из анализа, или, в целях экономии усилий по модификации модели, ей присваивается "нежесткий" материал (рис. 1.142).
4. Выполняется расчет модифицированной модели.

Последние три шага выполняются до тех пор, пока останутся стяжки, "работающие" только на растяжение.

Еще одной условностью, приближающей имеющуюся модель стяжки к "идеальной", является уменьшение фактического диаметра цилиндрических тел (которые будут в Simulation восприниматься как балки) с одновременной компенсацией изменяющейся жесткости увеличением модуля упругости. Свойства соответствующего материала показаны на рис. 1.142.

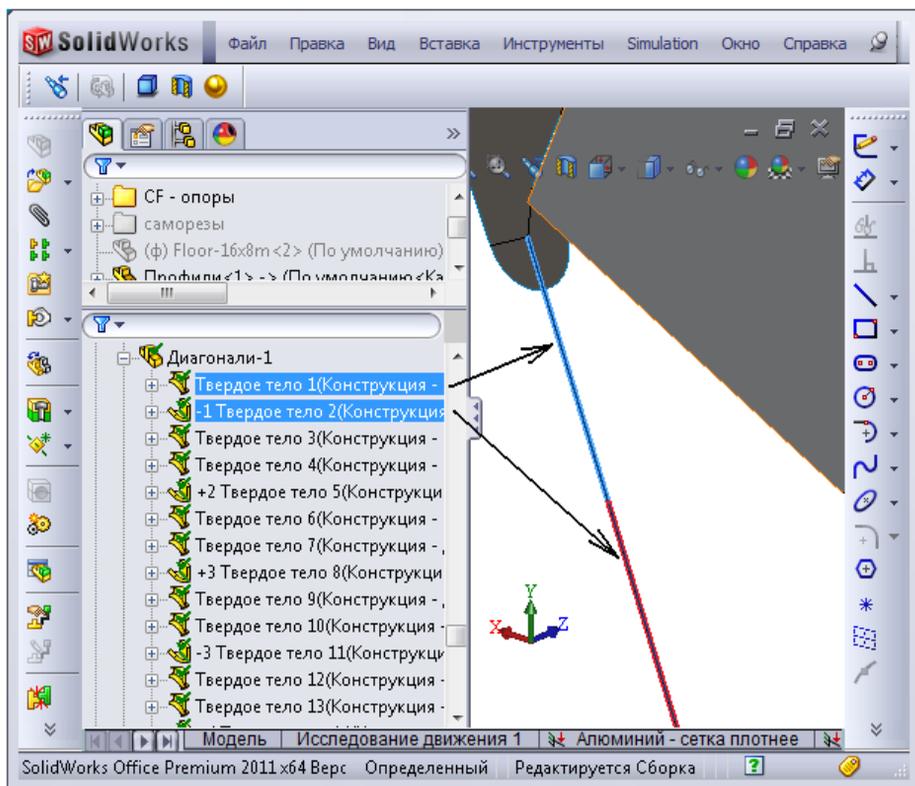


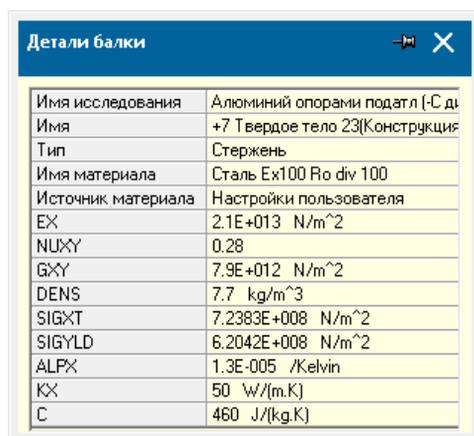
Рис. 1.141. Фрагмент балочно-стержневой структуры в Менеджере Simulation

Детали балки	
Имя исследования	Алюминий опорами податл [-С д
Имя	+7 Твердое тело 23(Конструкция
Тип	Стержень
Имя материала	Сталь Eх100 Ro div 100
Источник материала	Настройки пользователя
EX	2.1E+013 N/m ²
NUXY	0.28
GXY	7.9E+012 N/m ²
DENS	7.7 kg/m ³
SIGXT	7.2383E+008 N/m ²
SIGYLD	6.2042E+008 N/m ²
ALPX	1.3E-005 /Kelvin
KXX	50 W/(m.K)
C	460 J/(kg.K)

Рис. 1.142. Условный материал стержней "не несущей" стяжки

Ответственным, в силу особенностей реализации балочных моделей в Simulation, является этап определения "соединений". Характерное окно показано на рис. 1.144. Здесь важную роль играет настройка **Рассматривать как шарнир для зазора**

меньше, чем... (Treat as joint for clearance less then), которая является критерием наличия/отсутствия физической связи между концами тел (идентифицированных как балки/стержни). Если эту величину назначить "очень" большой, то система установит избыточные связи, если она будет "маленькая", то не установит необходимые. Фрагмент структуры соединений показан на рис. 1.145.



Детали балки	
Имя исследования	Алюминий опорами податл [-С д
Имя	+7 Твердое тело 23(Конструкция
Тип	Стержень
Имя материала	Сталь Ex100 Ro div 100
Источник материала	Настройки пользователя
E _X	2.1E+013 N/m ²
NU _{XY}	0.28
G _{XY}	7.9E+012 N/m ²
DENS	7.7 kg/m ³
SIG _{XT}	7.2383E+008 N/m ²
SIG _{YLD}	6.2042E+008 N/m ²
ALP _X	1.3E-005 /Kelvin
K _X	50 W/(m.K)
C	460 J/(kg.K)

Рис. 1.143. Условный материал стержней "несущей" стяжки

В панели **Редактировать соединения** (Edit Joints) присутствует еще одна неочевидная настройка — **Использовать модифицированное соединение при обновлении** (Keep modified joint on update). Ее логика состоит в том, что если меняется состав структуры (вводятся/исключаются балки, изменяются допуски на соединения), то при активной опции система делает попытку привязать назначенные ранее пользователем условия в соединениях: заделки, нагрузки, контакты к новым сущностям. Следует отметить, что не всегда автоматическое переопределение выполняется корректно, поэтому в целях уменьшения трудозатрат следует назначать граничные условия и контакты после тщательной отработки соединений. Именно по этой причине исключение стяжек из модели выполнялось не через исключение их из анализа, а модификацией жесткости: это не затрагивало топологию системы.

Еще одной неприятной особенностью алгоритма построения соединений являются проблемы обработки мест пересечения несвязанных конструктивных элементов. В нашем случае это касающиеся друг друга стяжки. Если попытаться сгенерировать соединения на базе такой модели, то система всегда будет пытаться организовать там связи, причем избавиться от них в дальнейшем невозможно. Единственным выходом является перенос концов одного (или обоих) стержней так, чтобы они оказались перекрещивающимися и имели ощутимый зазор. Следует отметить, что описанная проблема возникает достаточно редко: в подавляющем большинстве реальных конструкций геометрический контакт балок сопровождается механической связью. Автоматическая же генерация этой связи в балочной модели SolidWorks Simulation (без тщательного оформления узла в SolidWorks) позволяет радикально уменьшить трудоемкость собственно проектирования за счет того, что расчету подвергается "черновая" модель.

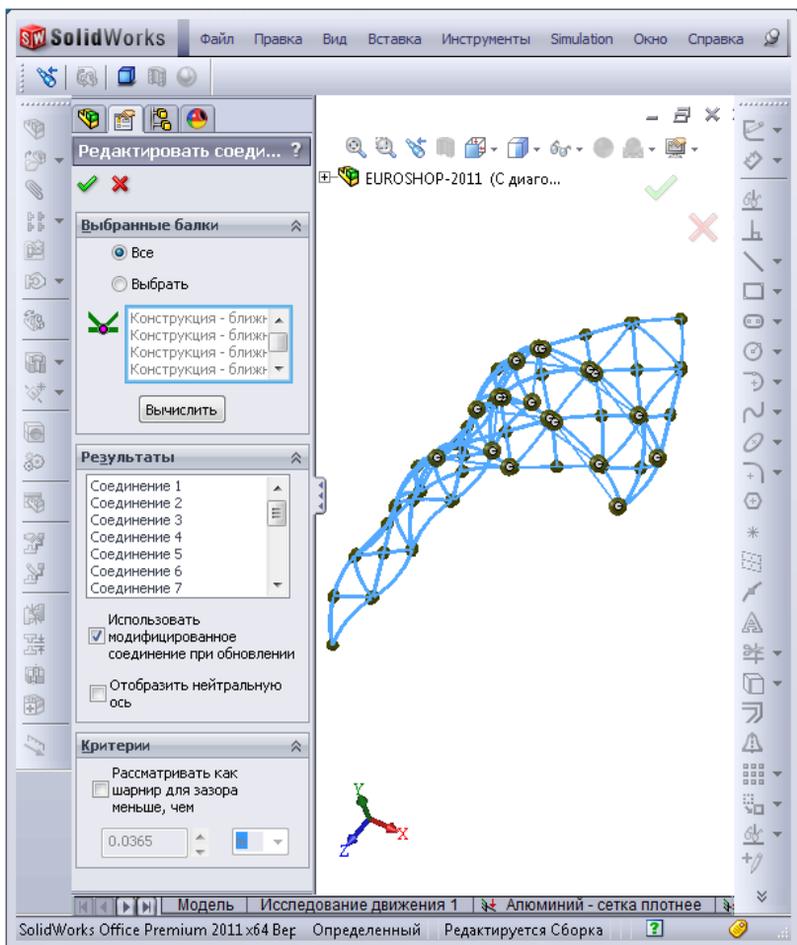


Рис. 1.144. Структура соединений

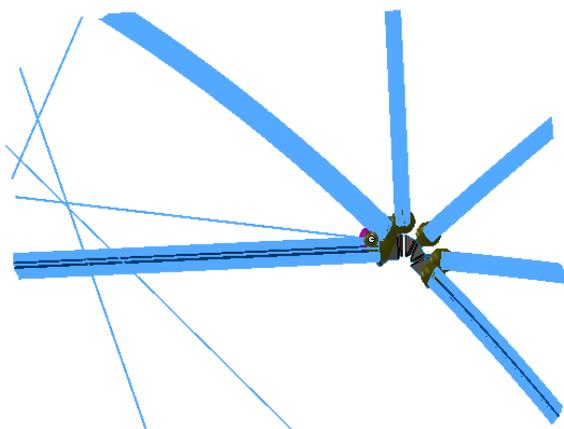


Рис. 1.145. Фрагмент структуры соединений

Поскольку соединительные пластины были выполнены посредством поверхностей SolidWorks, то необходимо назначить для них виртуальную толщину (используем модель "толстых" оболочек), а также материал.

После определения состава проекта нужно связать балки с соединителями. Для этого используем контакт **Связанные** (Bonded) между балками и выделенными для этого гранями на поверхностях, имитирующих соединитель (рис. 1.146). Следует обратить внимание, что соединяется именно балка (а не соединение). При реализации данного контакта хотелось бы за один прием создавать связь между концом балки (фактически балкой) и двумя пластинами. К сожалению, за один раз можно установить контакт между балкой и пластинами на различных ее концах. Тем не менее, факт, что можно балку (ее конец) привязать одновременно к нескольким граням, крайне позитивен.

Подобно соединению балок с пластинами, вручную (автоматически система этого не выполняет) создаем контакт между балками и опорами. В этом случае аргументом является грань опоры как тела, для нее используется твердотельная аппроксимация.

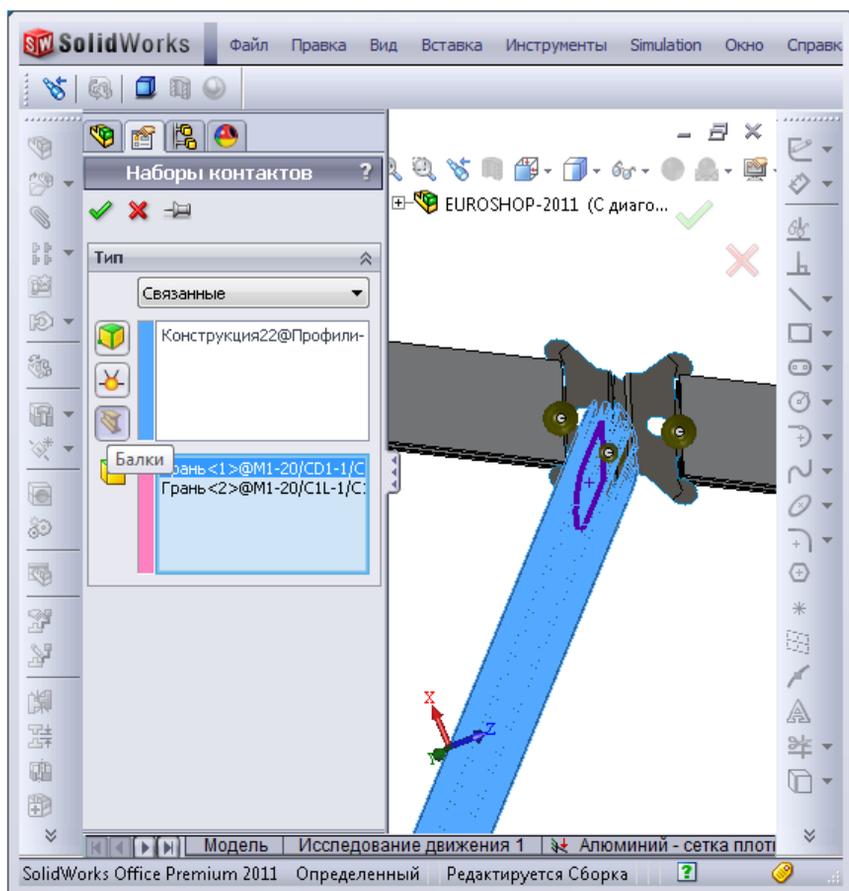


Рис. 1.146. Назначение контакта между балкой и соединительной пластиной

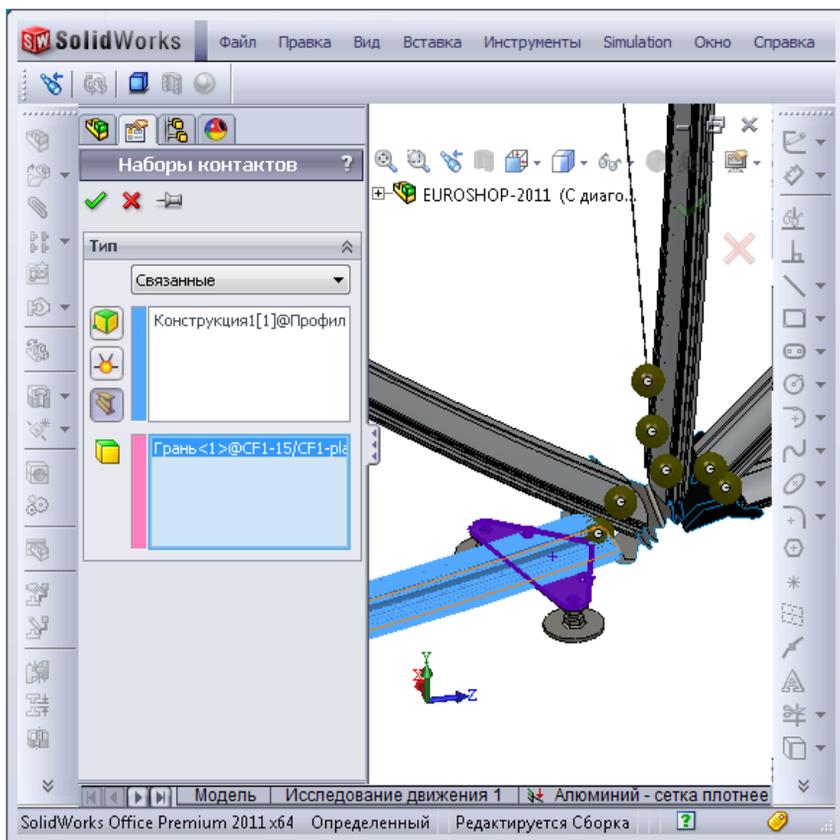


Рис. 1.147. Назначение контакта между балкой и опорой

В качестве нагрузки выступает исключительно сила тяжести. Несколько сложнее ситуация с закреплением опор. Предположим, что эта конструкция устанавливается на гладкий пол на опоры — пяты, которые не фиксируются от смещения вдоль пола. В оригинале в модели присутствуют установочные винты, которые предназначены для выравнивания нагрузки, воспринимаемой опорой. То есть после монтажа винты с коническими концами перемещаются в вертикальном направлении так, чтобы опора была нагружена. Смоделировать этот процесс с минимальными затратами затруднительно, поэтому ограничимся моделью изменяющегося контакта между пятами и полом.

Для этого используем контактное условие **Виртуальная стенка** (Virtual Wall), предполагающее возможность скольжения и полной или частичной потери контакта между гранями интересующих нас тел (оболочек) и некоторого условно-податливого (в общем случае) полупространства с учетом или без учета трения. При создании виртуальной стенки необходимо указать плоскость, которая будет ограничивать условное полупространство (рис. 1.148).

В нашем случае мы будем учитывать трение, а также нормальную и сдвиговую податливость основания. Жесткость пола весьма велика относительно жесткости системы, однако в целях проверки работоспособности программы будем решать задачу в

общей постановке. Учет трения в данной модели необходим, поскольку никаких других закреплений, предотвращающих смещение конструкции параллельно плоскости, нет. В принципе, для адекватного моделирования данной конструкции можно было бы заменить сведенные пяты единственной опорой в точке, в которой зафиксированы все перемещения, включая вертикальное. В рассматриваемом диапазоне граничных условий отрыва обеих пят не происходит, а учитывая возможность юстировки — и не должно быть. Такова простейшая модель, но пришлось бы как-то реагировать на неадекватную жесткость при фиксации точки. В данном же случае лучше было бы применить дистанционную нагрузку в варианте **Перемещение (Жесткая связь)**, определив в качестве системы координат, относительно которой выполняется фиксация, середину отрезка, соединяющего центры соответствующих пят.

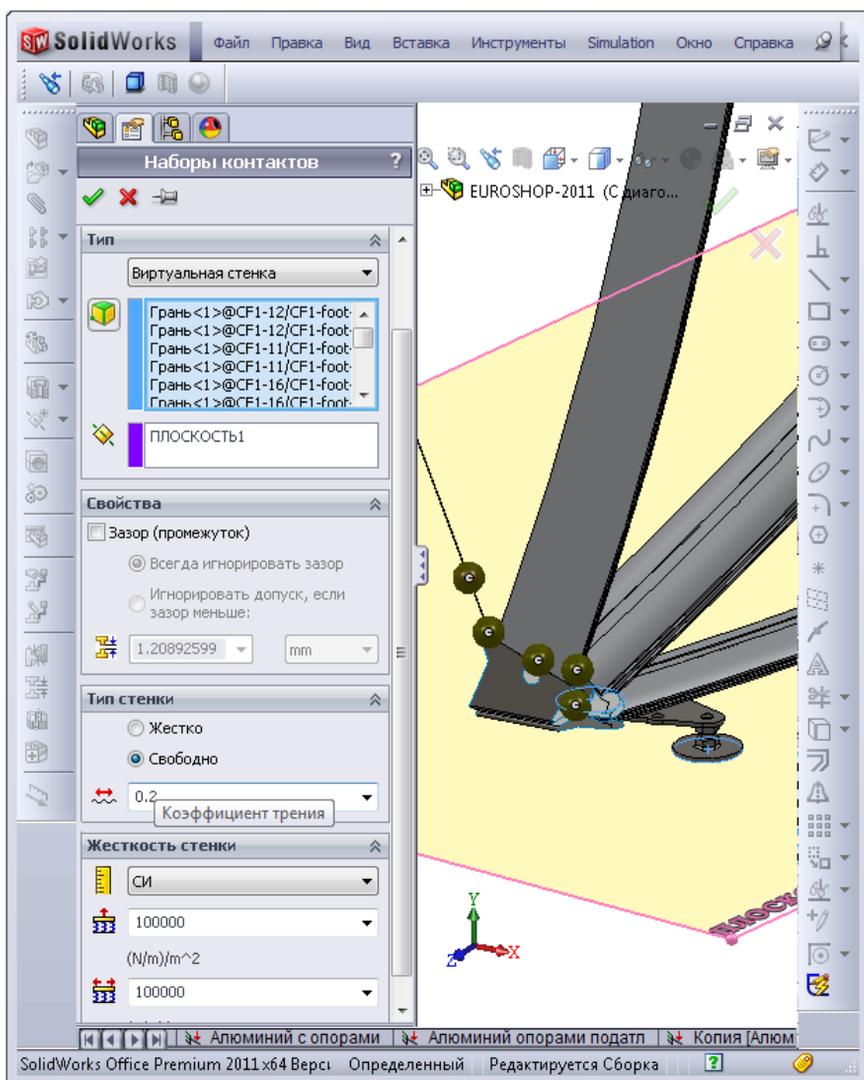


Рис. 1.148. Создание контакта опор с виртуальным полупространством

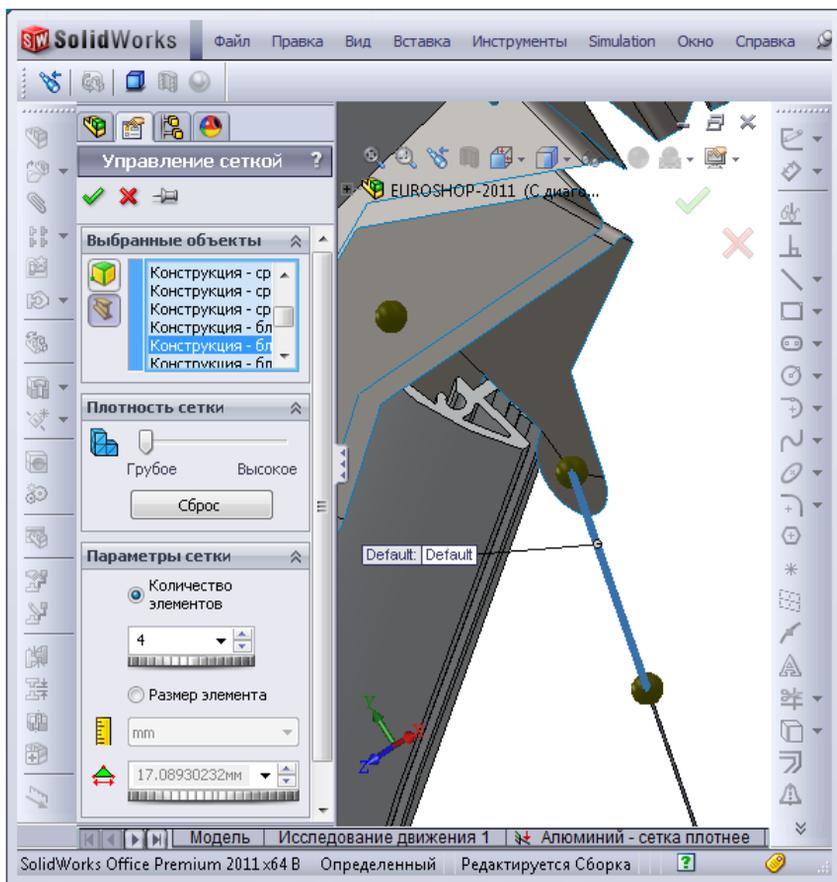


Рис. 1.149. Элемент управления сетки на присоединяемом теле стяжки

Практика показала, что для удовлетворительного разрешения сеткой зоны контакта балки с гранью необходимо присутствие не менее двух конечных элементов, аппроксимирующих балку. Для этого используем элементы управления сеткой — в современных версиях они доступны и для объектов, на базе которых система строит сетку балочно-стержневых конечных элементов. Пример, когда элемент управления сеткой применяется к стержням, связанным с пластинами, показан на рис. 1.149. Как видно, назначать можно как число конечных элементов, аппроксимирующих балку, так и размер элементов. Подобную манипуляцию продельваем и с криволинейными профилями. Надо сказать, что злоупотреблять плотностью дискретизации не следует. Например, для шарнирно-опертого стержня достаточно одного элемента. В нашем случае мы имеем дело с криволинейными объектами, поэтому редкая сетка тоже неприемлема.

Сетка конечных элементов показана на рис. 1.150, а ее фрагмент в зоне опоры — на рис. 1.151. Сетка образована конечными элементами второго порядка, с параболическим полем перемещений. Использовался алгоритм "на основе кривизны" (Curved based). Можно наблюдать, что по образующей сгиба в соединителе присутствует более трех конечных элементов.

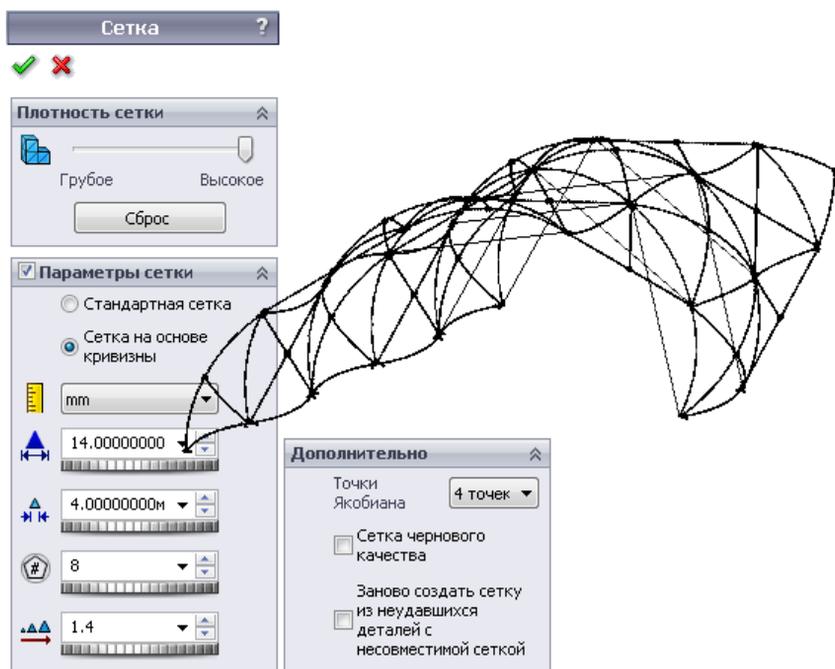


Рис. 1.150. Параметры сетки конечных элементов и результирующая сетка

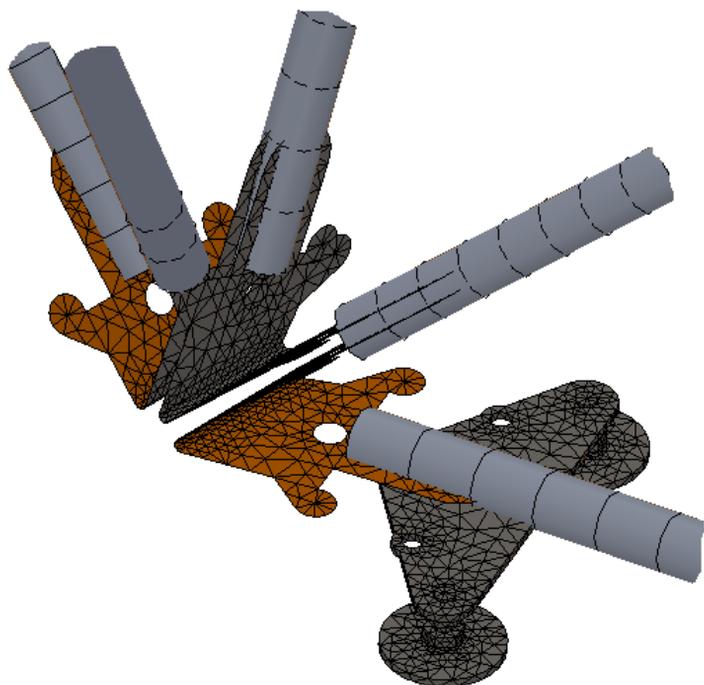


Рис. 1.151. Фрагмент сетки в зоне опоры

1.7.4. Результаты и их интерпретация

Диаграмма перемещений на фоне деформированного вида конструкции после нескольких итераций по исключению (уменьшению жесткости) сжатых стержней в утрированном масштабе показана на рис. 1.152. Как видно, прогибы достаточно велики: при расстоянии между опорами в поперечном направлении 6 600 мм максимальное перемещение составляет около 360 мм.

Распределение осевых усилий в балках/стержнях приведено на рис. 1.153. Убеждаемся (на иллюстрации этого не видно), что в стержнях-стяжках действуют только растягивающие усилия.

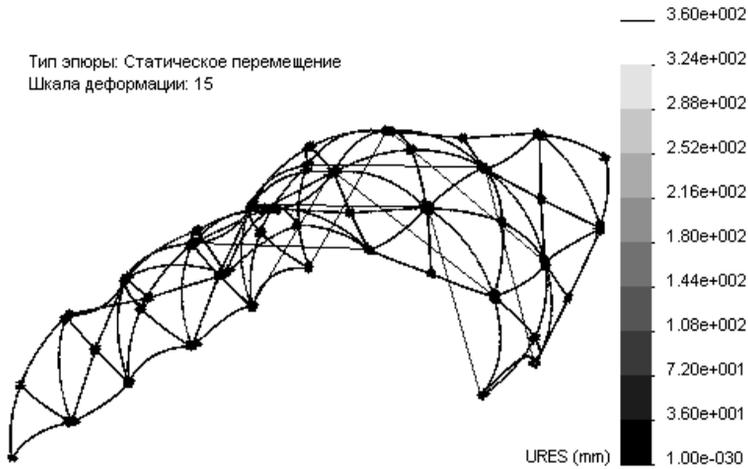


Рис. 1.152. Диаграмма перемещений на фоне деформированного вида

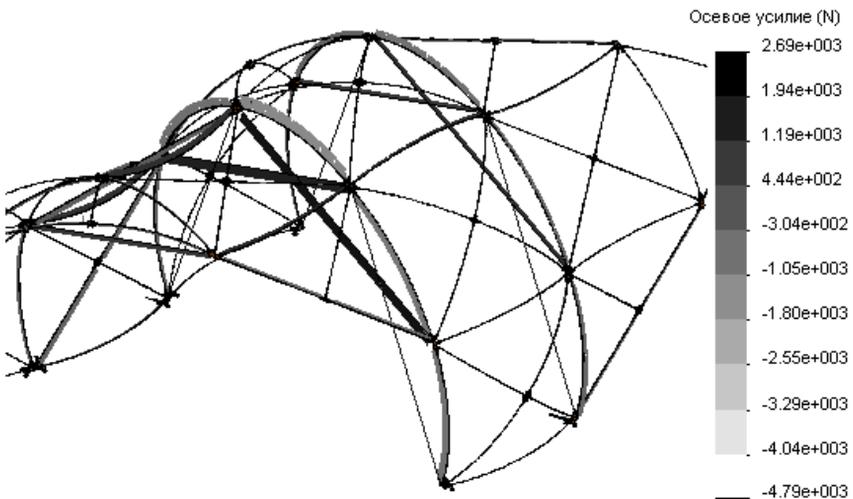


Рис. 1.153. Осевое усилие в балках и стержнях

Интересной картиной является диаграмма распределения крутящего момента в балках (рис. 1.154). Критические величины локализуются в профилях, лежащих в основании. С учетом того, что профили здесь одинарные и, соответственно, мало-жесткие, величина крутящего момента является достаточно существенной. Эта информация тем более значима, что порождаемые кручением касательные напряжения никоим образом не фигурируют в диаграмме "наивысших" (в терминах программы) осевых и изгибных напряжений. Касательные напряжения кручения можно рассчитать вручную, используя данные этой диаграммы и информацию о характеристиках сечений.

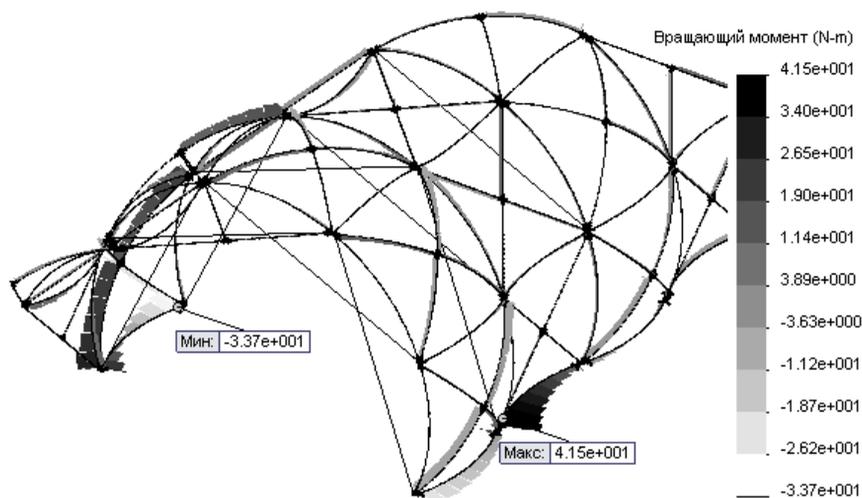


Рис. 1.154. Крутящий момент в балках

Эти операции можно до некоторой степени автоматизировать, если заполнить раздел **Свойства сечений** (Section Properties) панели **Применить/редактировать балку** (Apply/Edit Beam) — она показана на рис. 1.155:

- Крутильная константа** (Torsional Constant) — в отечественной терминологии это "геометрическая жесткость при кручении";
- Расстояние до максимального усилия при сдвиге** (Distance for Max Shear Stress) — расстояние от нейтральной оси до точки, в которой должно действовать максимальное касательное напряжение;
- Коэффициент сдвига** (Shear Factor) — доля площади сечения, "сопротивляющегося" сдвигу (несущего сдвиг), рассчитываемая как частное от площади, "воспринимающей" сдвиг, к полной площади.

Программа также рассчитывает касательные напряжения, вызванные перерезывающими силами. Здесь используется простейшая формула, предполагающая их постоянство по сечению. Также в формуле учитывается поправка на коэффициент сдвига, однако если его величина не определена (равна нулю), то касательные напряжения есть частное от деления перерезывающей силы на площадь.

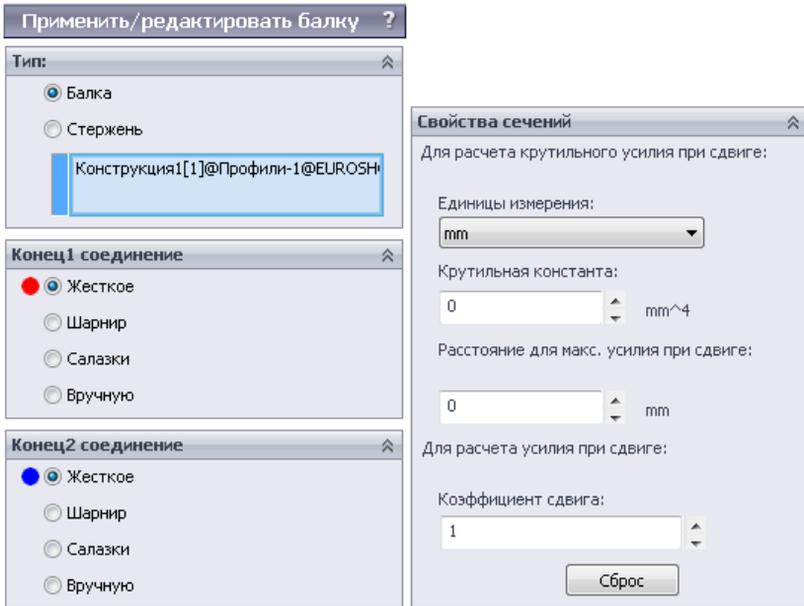


Рис. 1.155. Параметры балки, характеризующие свойства при сдвиге и кручении

Завершая рассмотрение функциональности программы, связанной с расчетом сдвиговых напряжений, можно заключить, что соответствующие процедуры требуют значительной доли ручного труда. Причина здесь в том, что построить универсальный интерфейс и расчетный алгоритм, учитывающие все возможные формы сечений достаточно трудно, а в случае создания — его не менее сложно эксплуатировать. Поэтому разработчики программы приняли решение возложить определенную часть работы на пользователя.

Утешением может быть факт, что касательные напряжения, порожденные порезывающими силами, в абсолютном большинстве конструкций играют малую роль. Что же касается напряжений, вызванных кручением, то они равны нулю для стержневых систем, а для многих других — весьма незначительны.

На рис. 1.156 показано распределение максимальных нормальных напряжений в балках. Здесь верхний диапазон шкалы обрезан для достижения большей контрастности. Следует обратить внимание, что максимальные напряжения (превышающие границу диапазона) действуют в стержнях-стяжках. При анализе следует внести поправку на то, что для повышения гибкости диаметр стержней был уменьшен при сохранении продольной жесткости за счет увеличения модуля. Соответственно осевые напряжения (относительно реальных) выросли пропорционально уменьшению площади сечения.

Эквивалентные (по Мизесу) напряжения в оболочках (на "верхних" поверхностях) и в телах показаны на рис. 1.157. Не требует комментариев факт концентрации напряжений в сгибе соединительной пластинки.

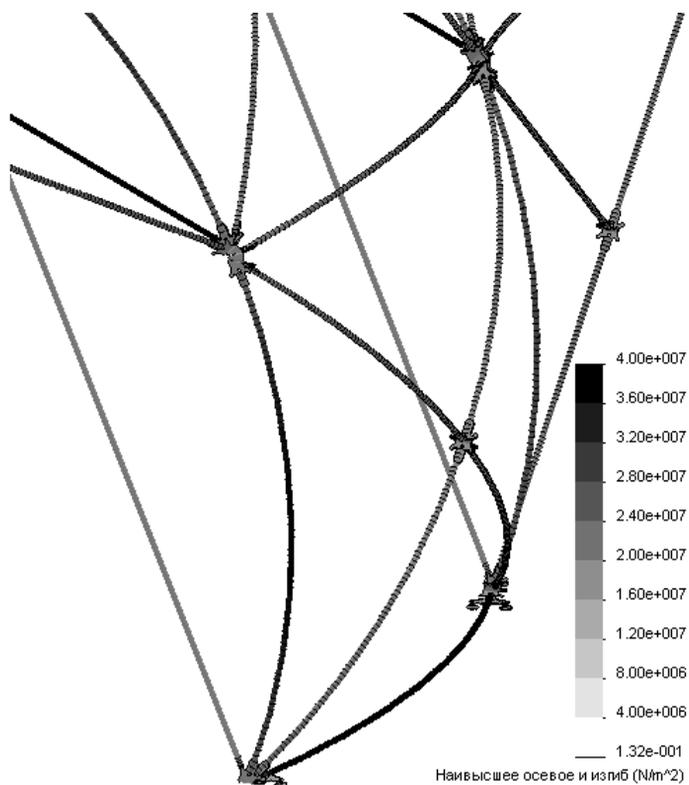


Рис. 1.156. Максимальные нормальные напряжения в балках/стержнях

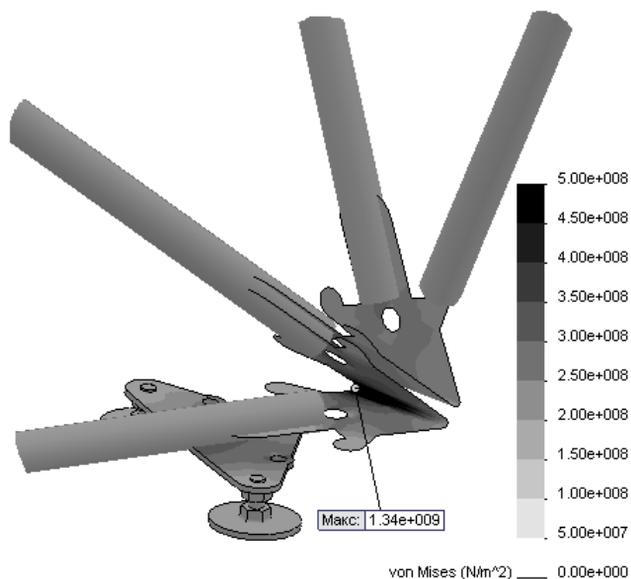


Рис. 1.157. Эквивалентные напряжения в оболочках и телах

Интересной является информация о силах реакции, действующих в опорах. Ее можно получить посредством команды **Сила контакта трения** (Contact/Friction Force) (рис. 1.158) с указанием геометрии (в данном случае граней, на которых поставлены контактные условия, подразумевающие изменение площадки контакта). Это, в частности, **Виртуальная стенка** (Virtual Wall). Результат для стороны с двумя опорами показан на рис. 1.159. В целом реакции в опорах достаточно неоднородны, однако силы трения крайне малы.

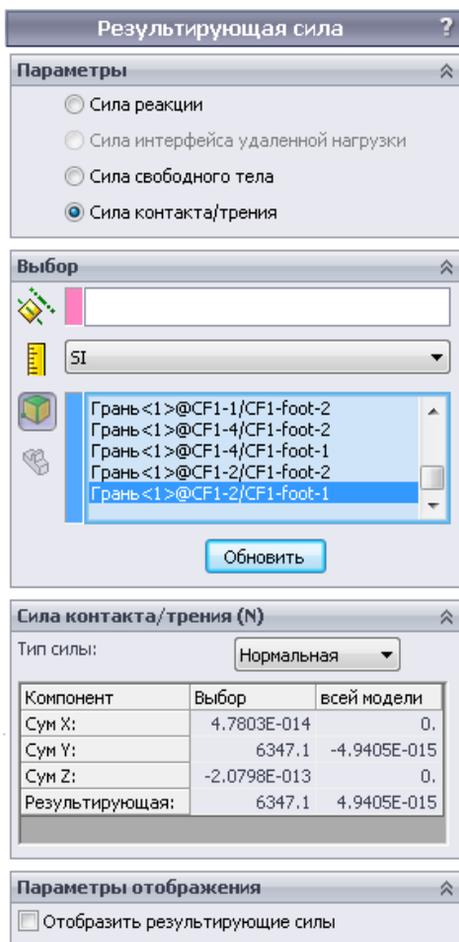


Рис. 1.158. Определение силы контакта для отображения

Дополнительную информацию о функционировании опор можно получить, рассмотрев диаграмму контактного давления — для одной из пары пят она показана на рис. 1.160. В конкретной задаче она, может быть, и не слишком интересна, однако для конструкций с протяженными опорами подобные данные, как правило, востребованы.

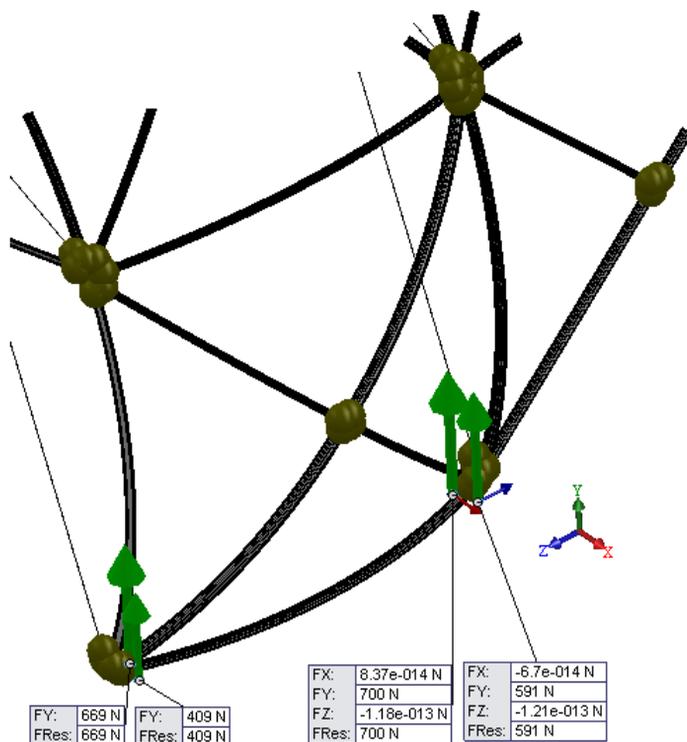


Рис. 1.159. Силы контакта/трения в опорах

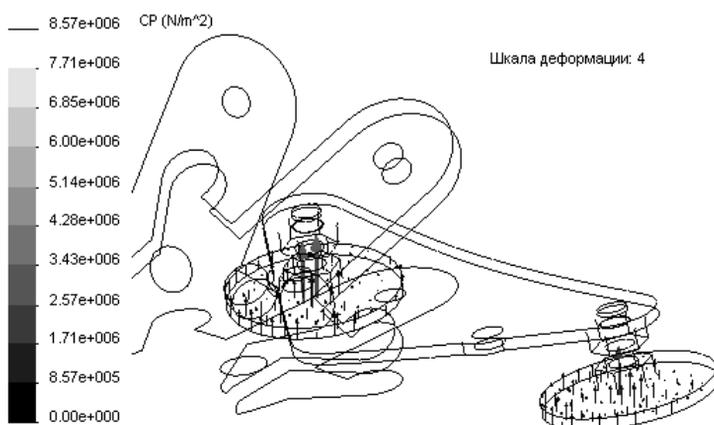


Рис. 1.160. Контактные напряжения в опорах

1.7.5. Выводы

Данная задача, несмотря на определенные затруднения в подготовке расчетной модели, продемонстрировала пригодность SolidWorks Simulation для расчета балочно-стержневых систем с учетом податливости узлов соединения и нелинейно-

го контакта в опорах. Такая постановка обладает достаточно высокой трудоемкостью, однако, пожалуй, только она предполагает достоверную расчетную аппроксимацию.

1.8. Расчет предельного состояния вращающегося вала с изгибом

Целью данного раздела является расчет вращающегося вала, выполняющего передачу крутящего момента в изогнутом состоянии. Особенностью конструкции является то, что предельное состояние может наступить как из-за достижения материалом пластического состояния, так и в результате потери устойчивости. Автор благодарен сотрудникам фирмы "ВНИИБТ-Буровой инструмент" (Пермь) за предоставленную геометрическую модель и взаимодействие в ходе решения задачи.

1.8.1. Постановка задачи

Рассматривается стальной вал, передающий крутящий момент (будучи при этом в изогнутом состоянии). Узел (вал и втулки) в исходном положении показан на рис. 1.161, а его деформированный вид в утрированном масштабе перемещений — на рис. 1.162. Находясь в деформированном состоянии, узел подвергается вращению относительно собственной оси и относительно оси левой втулки. При этом на него действует крутящий момент и осевая сжимающая сила. Требуется оценить возможность потери узлом несущей способности — возможности воспринимать увеличивающиеся нагрузки в виде кручения и сжатия.

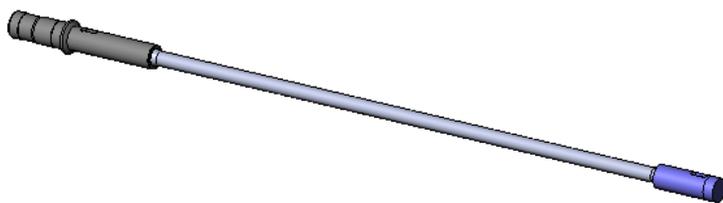
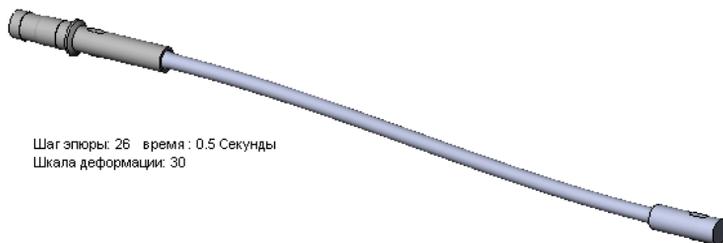


Рис. 1.161. Конструкция в исходном состоянии



Шаг эпоры: 26 время: 0.5 Секунды
Шкала деформации: 30

Рис. 1.162. Конструкция в рабочем положении без приложения рабочих нагрузок

1.8.2. Расчетная модель

Разрез узла вертикальной плоскостью показан на рис. 1.163. Собственно нагрузки (а также крепления) приложены к втулкам, имеющим конические отверстия, в которые вставлены конические бобышки вала. Соответствующие контактные условия, предполагающие вход в контакт и выход из него, иллюстрированы рис. 1.164. Как видно, такая разновидность контакта реализована для сопряжения цилиндрических граней левого соединения и конических — правого. При этом, игнорируя реальность, трение в этих соединениях не назначается. Взаимодействие в сопряжении конических граней левого соединения подчиняется глобальным установкам — **Связанные** (Bonded). Эти условности введены для уменьшения вычислительной трудоемкости модели. В нагруженном состоянии сопряжение в конических гранях с высокой степенью вероятности не изменяет геометрию контакта, а трение в сопряжении цилиндрических граней оказывает малое влияние на состояние узла в целом.

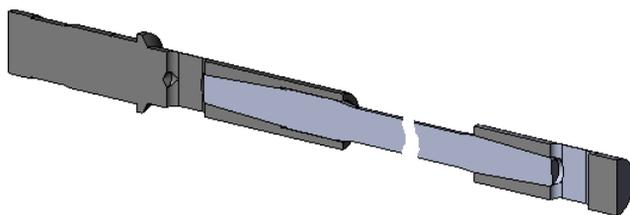


Рис. 1.163. Фрагмент исходного состояния конструкции

Следует обратить внимание, что в реальности левый конец вала не может проворачиваться относительно втулки, однако в нашей модели скольжение (с потенциальным выходом из контакта) происходит без трения (рис. 1.164). Дело здесь в том, что нужно дать реализоваться всем возможным модам потери устойчивости, в том числе и крутильной. Поэтому в качестве источника кручения следует прикладывать крутящий момент, который не фиксирует поворот. Тогда — при использовании метода сил в качестве алгоритма нелинейного решателя — потеря устойчивости идентифицируется как момент, когда перемещения начинают расти без увеличения нагрузки (правильнее сказать, когда нарушается линейная или, в силу наличия нелинейных контактов, почти линейная зависимость между усилием и перемещением). Также приложение нагрузок посредством сил/моментов (а не перемещений/углов поворота) позволяет наилучшим образом смоделировать их совместное действие в присутствии истории нагружения.

Левая втулка вставлена в некоторую достаточно жесткую деталь, причем на цилиндрических гранях, разделенных канавками, вал жестко связан с этой деталью в осевом и радиальном направлениях (то есть на этих гранях вал может проворачиваться) (рис. 1.165). А на ближайшей к торцу цилиндрической грани вал неподвижно связан с деталью, поэтому дополнительно накладывается заделка в окружном направлении (рис. 1.166).



Рис. 1.164. Контактные условия

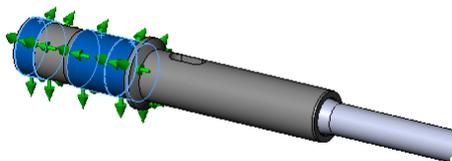


Рис. 1.165. Закрепление левой втулки в окружном и осевом направлении



Рис. 1.166. Закрепление левой втулки в окружном направлении

Правый конец вала вместе с втулкой претерпевает начальное смещение в поперечном направлении. Закон для поперечного смещения (его конечная величина составляет 11 мм) показан на рис. 1.167. При этом в ортогональном направлении втулка зафиксирована. Совокупность этих двух перемещений фактически фиксирует вращение конца втулки. Как видно, остается свободным перемещение в осевом направлении, оно будет "использоваться" для приложения осевой силы.

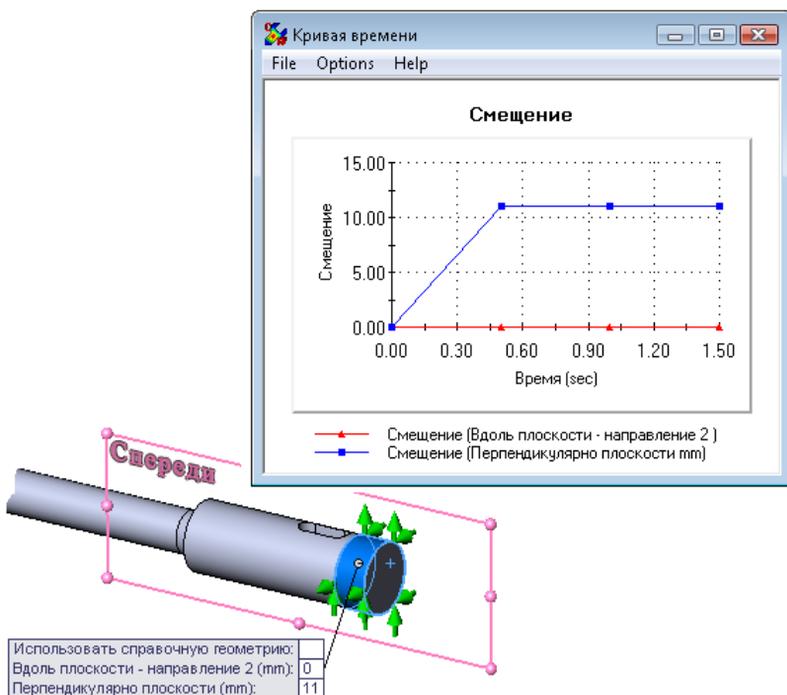


Рис. 1.167. Закон для перемещения правой втулки

Поскольку целью исследования является оценка момента потери устойчивости деформированного и вращающегося вала в зависимости от осевой силы и крутящего момента, то после реализации исходной деформации прикладываем угловую скорость (рис. 1.168). В данном случае скорость достаточно мала: первая оценка нагрузки потери устойчивости будет осуществляться при неподвижном вале, однако в целях единообразия некоторую малую скорость мы включаем в расчет. Кстати говоря, если вал потеряет устойчивость еще на этапе приложения начальной деформации (перемещения, перпендикулярного оси), то идентифицировать момент потери устойчивости при выбранном для нелинейного решателя методе сил можно, если для каждого шага приращения нагрузки (перемещения) идентифицировать силу реакции в заделке в направлении смещения. Сделать это можно только вручную, средствами программы соответствующий график построить невозможно.

На этапе роста угловой скорости определение момента потери устойчивости описано далее (применительно к изменению крутящего момента и осевой силы).

После придания валу изгиба и вращения прикладываем осевую силу и крутящий момент. В силу природы конструкции, они изменяются (в данном случае — возрастают) синхронно, поэтому законы их изменения идентичны (рис. 1.169, 1.170). Еще раз обращаем внимание, что в расчетной модели сила приложена к торцу втулки, а кручение — к конической грани вала, скользящей внутри соответствующего отверстия во втулке. Кстати говоря, крутящий момент реализован посредством инструмента **Дистанционная нагрузка (Remote Load)** в варианте **Прямой перенос (Direct transfer)**, что подразумевает сохранение гранью податливости.

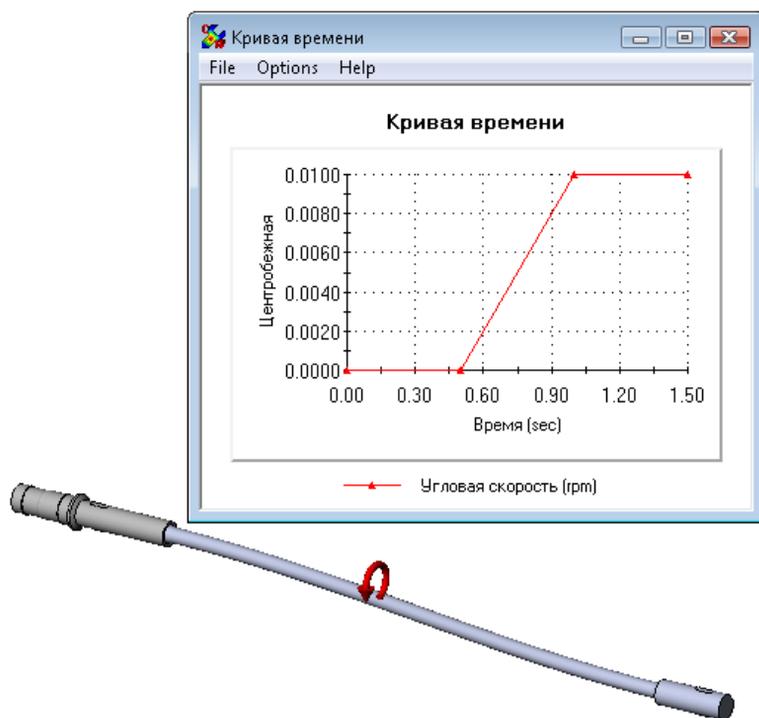


Рис. 1.168. Закон для угловой скорости

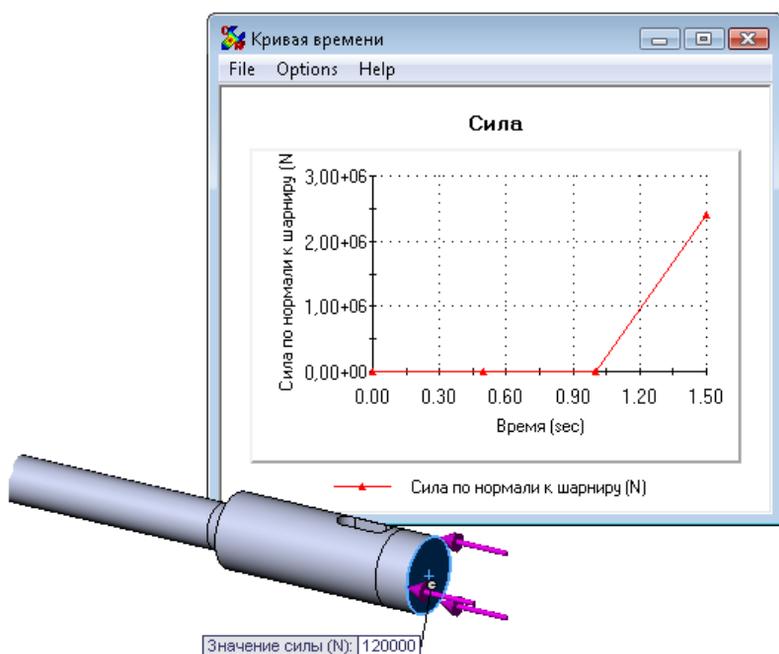


Рис. 1.169. Закон для осевой силы

Настройки нелинейного решателя приведены на рис. 1.171. Относительно значений, принятых по умолчанию, изменено максимальное приращение времени (в данном случае это условное время), оно уменьшено до 0,02. При практически неизменной точности получения "конечного" результата хотелось бы получить достаточно гладкие кривые отклика, по которым, в свою очередь, будет идентифицироваться момент времени, соответствующий критическим величинам сил.

В качестве собственно алгоритма управления нелинейным решателем выбран предложенный по умолчанию **Метод сил** (Force control), требующий уравнивания системы при каждом шаге приращения нагрузок (рис. 1.172). При этом если перемещения начинают расти без увеличения нагрузок (разупрочняющаяся система), то независимо от природы явления (физическая или геометрическая нелинейность) решатель сначала предельно уменьшает шаг, после чего останавливается. Соответствующую диагностику можно получить, подав команду **Сообщения решающей программы** из контекстного меню **Результаты** (Results) Менеджера Simulation.

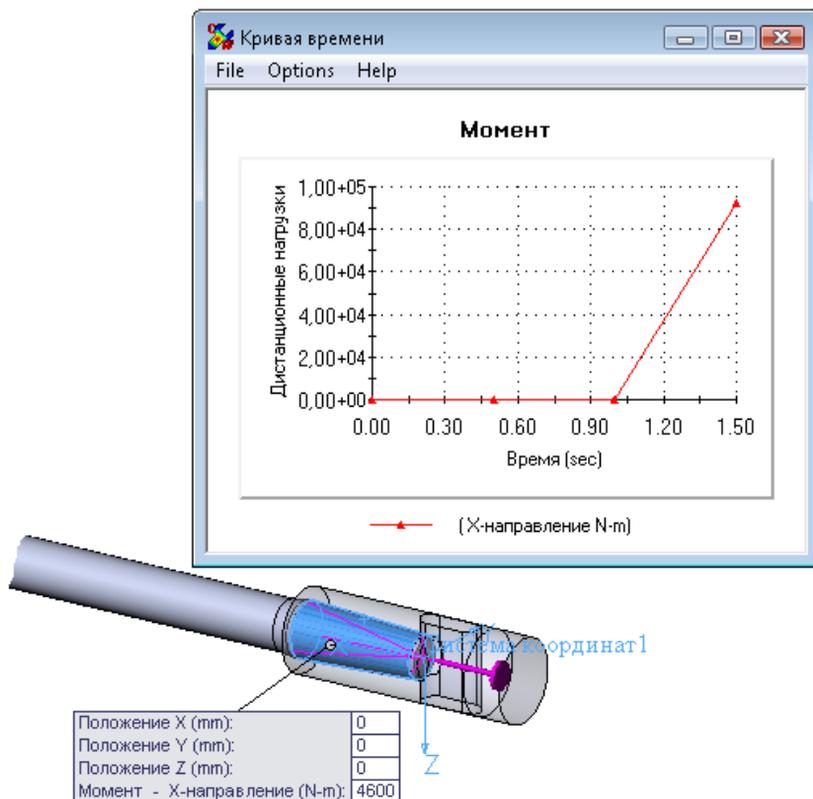


Рис. 1.170. Закон для крутящего момента

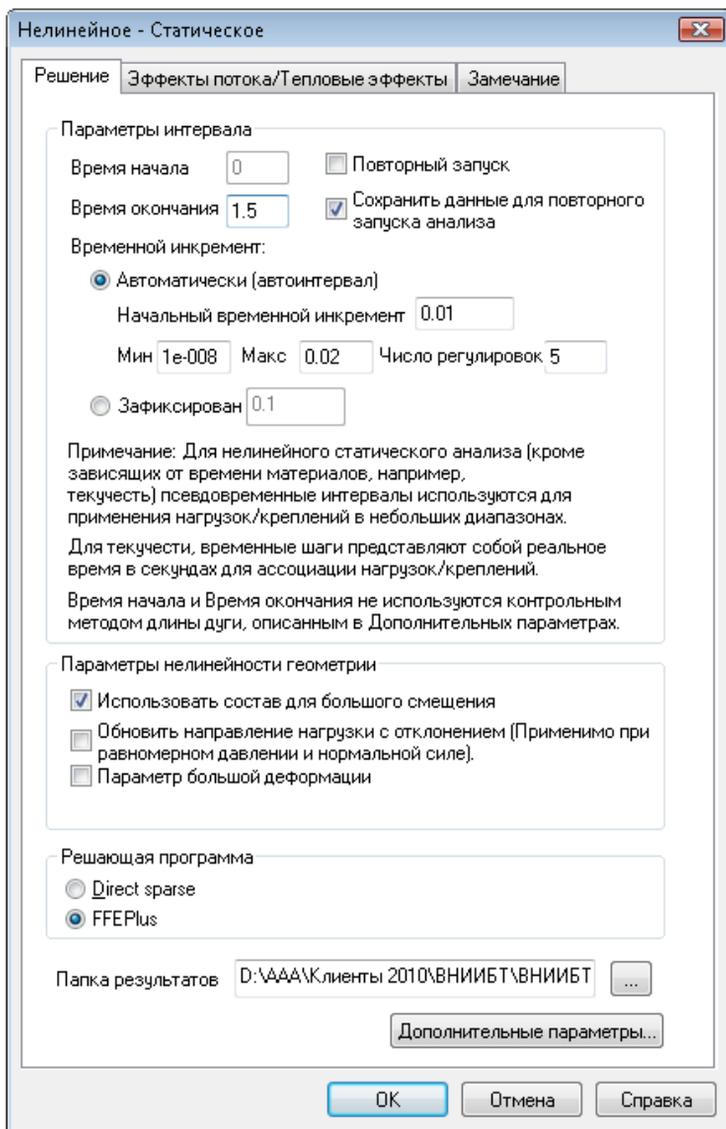


Рис. 1.171. Настройки нелинейного решателя

Фрагменты сетки конечных элементов для втулок показаны на рис. 1.174, а для концов вала — на рис. 1.175. Как видно, использованы элементы с параболическим полем перемещений, а глобальные параметры сетки подобраны так, чтобы по диаметру вала располагалось не менее трех элементов. Это позволяет с достаточной точностью аппроксимировать распределение всех компонентов деформаций и напряжений в пределах сечения. Также применено локальное уплотнение на концах вала, включая зоны перехода от законцовок к стержню, и на внутренних гранях втулок.

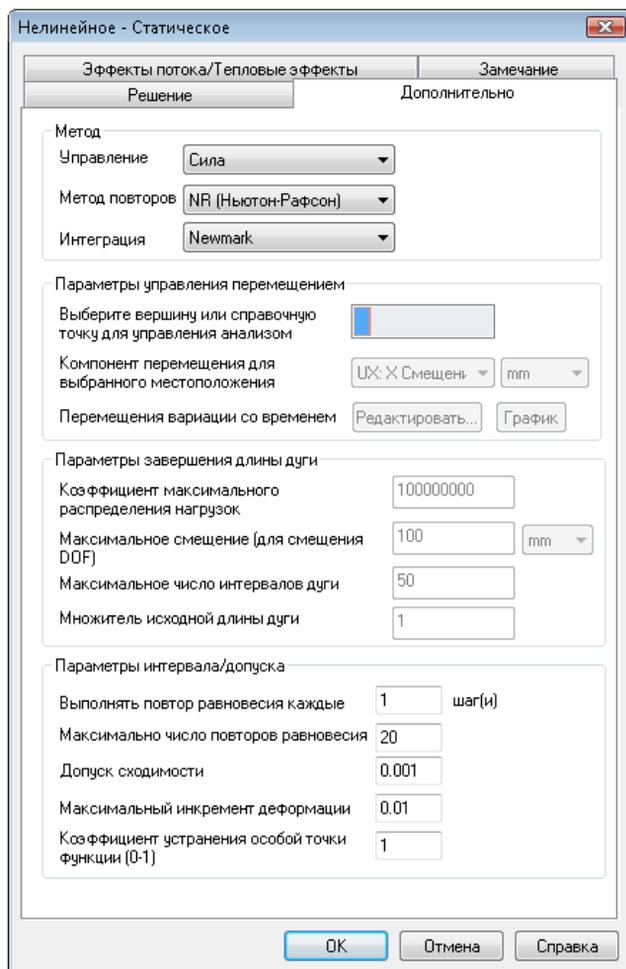


Рис. 1.172. Выбор нелинейного решателя

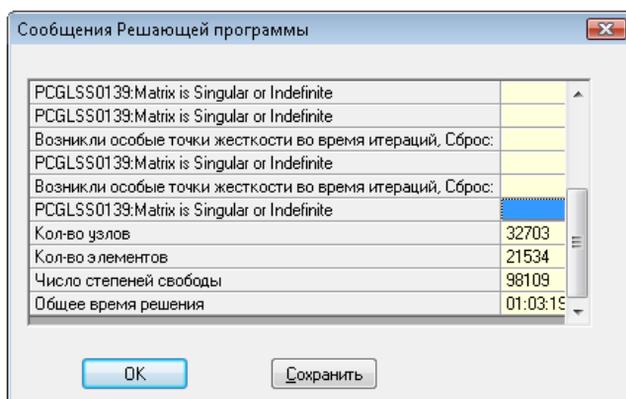


Рис. 1.173. Диагностика, сопровождающая аварийное завершение расчета

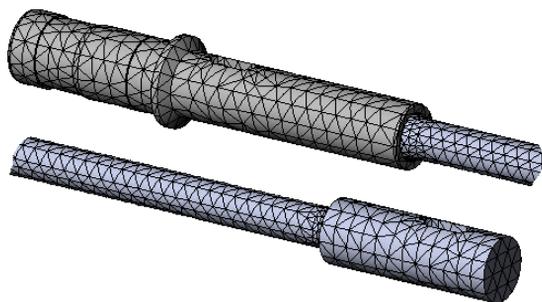


Рис. 1.174. Сетка конечных элементов на втулках

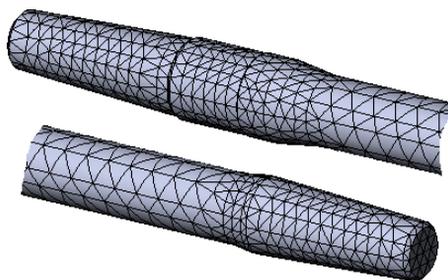


Рис. 1.175. Сетка конечных элементов на концах вала

1.8.3. Результаты расчета и их интерпретация

Распределение эквивалентных напряжений на левом и правом концах вала и во втулках приведено на рис. 1.176, 1.177. Для отображения выбрано время, соответствующее завершению конструктивной деформации при нулевых внешних силах в отсутствие вращения. Как видно, предел текучести нигде не превышен, так что последующий анализ устойчивости вполне востребован.

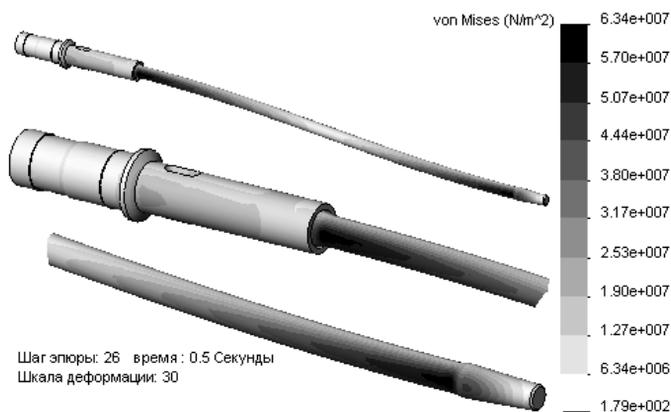


Рис. 1.176. Эквивалентные напряжения в левой втулке и на конце вала

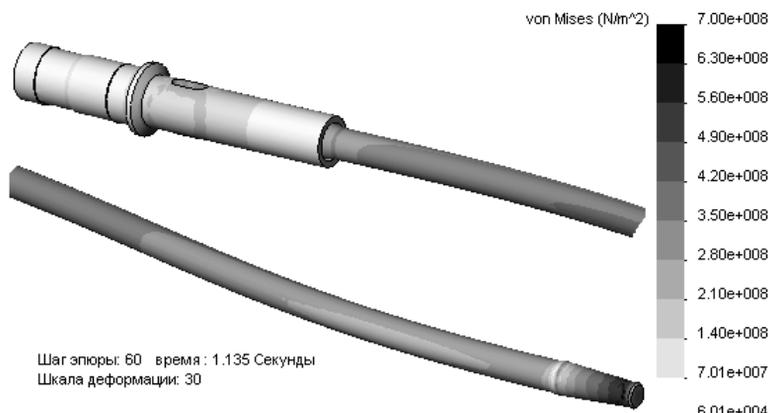


Рис. 1.177. Напряжения в левой втулке и на конце вала

Идентификацию момента потери устойчивости будем выполнять по кривым отклика для окружных и радиальных перемещений характерного узла сетки (рис. 1.178). В принципе, ту же информацию можно было бы извлечь и из результирующих перемещений, однако такой подход, как представляется, более нагляден.

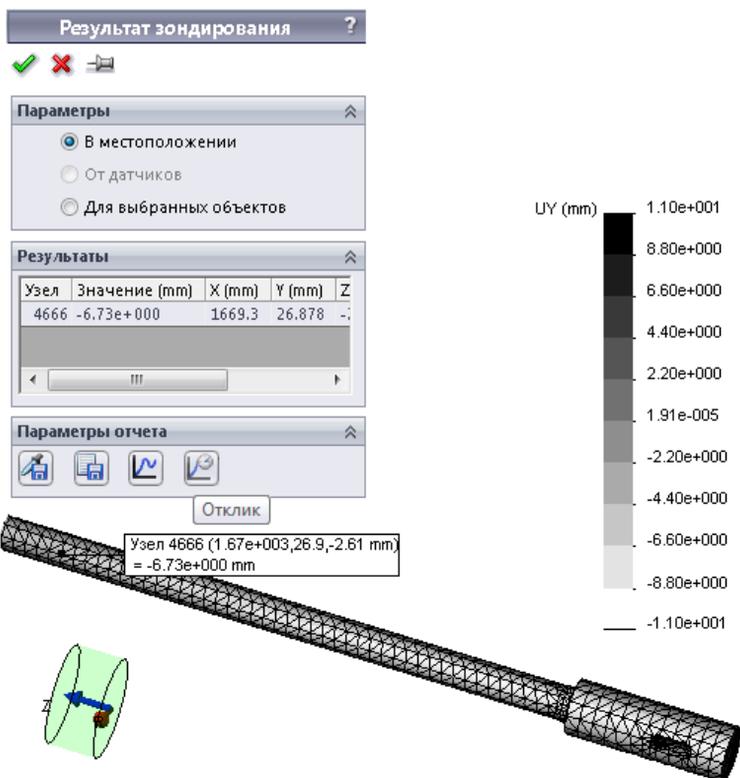


Рис. 1.178. Получение кривой отклика для окружных перемещений

Кривые отклика для окружного перемещения в зависимости от назначенной угловой скорости показаны на рис. 1.179–1.183. Как видно, все они имеют общую структуру: примерно через 1,1 с начинается резкое увеличение перемещения. Это свидетельствует о том, что при малом увеличении нагрузки (а после первой секунды — это осевая сила в совокупности с крутящим моментом) наступает исчерпание несущей способности системы. Относительно точную оценку можно получить, построив две касательные прямые: к конечному наклонному участку (этапу прироста рабочих нагрузок) и к кривой (этапу потери жесткости, рис. 1.180). Получив соответствующий момент времени, можно на основе элементарной пропорции рассчитать долю реально приложенной нагрузки.

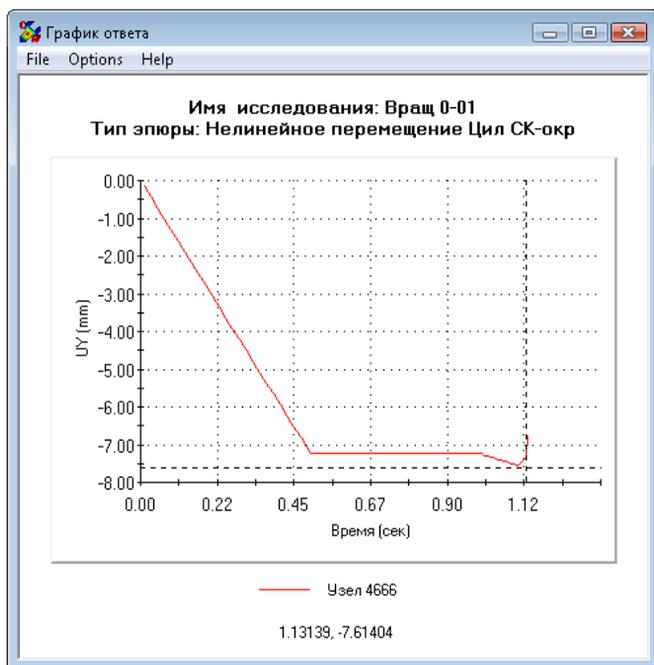


Рис. 1.179. Кривая отклика для окружного перемещения при неподвижном вале

Не следует удивляться тому, что резкое изменение компонентов перемещений происходит как в положительном, так и в отрицательном направлении (поскольку узел и направление конструктивного изгиба произвольны) — переход в неустойчивое состояние может осуществляться в произвольном, по сути, направлении. Оно, в частности, определяется начальными несовершенствами конструкции. В данном случае это собственно изгиб в совокупности с вращением асимметричной системы, а также отклонение формы и, соответственно, жесткости от идеального цилиндра — его источником является сеточная аппроксимация тела. К слову сказать, в ранних версиях SolidWorks Simulation (COSMOSWorks) для решения задач нелинейной устойчивости и закритического состояния симметричных (в смысле геометрии и граничных условий) систем приходилось прибегать к вводу незначительной искусственной асимметрии нагрузок. Так что с учетом этих особенностей нашей задачи (присутствия "натуральных" возмущений в виде изгиба) полученная оценка будет вполне консервативной (то есть дающей нижнюю границу несущей способности).

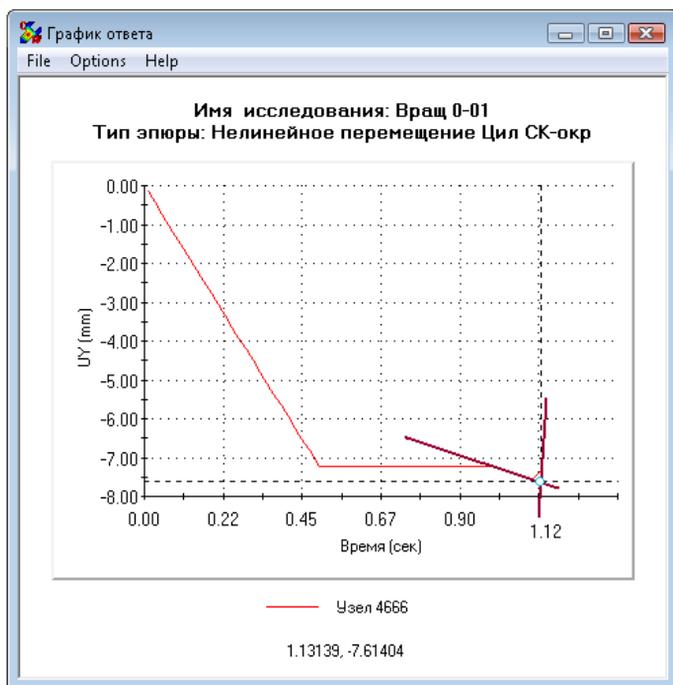


Рис. 1.180. Идентификация момента потери устойчивости

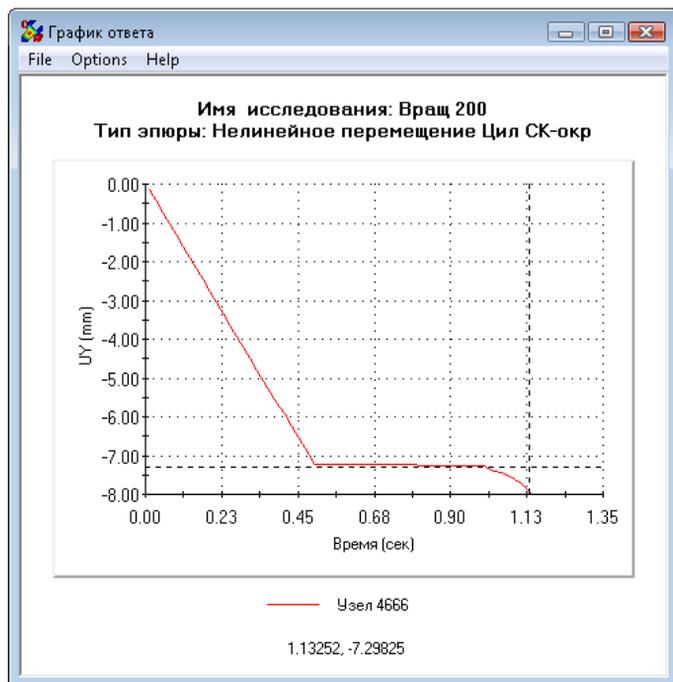


Рис. 1.181. Кривая отклика для окружного перемещения при угловой скорости 200 об/мин

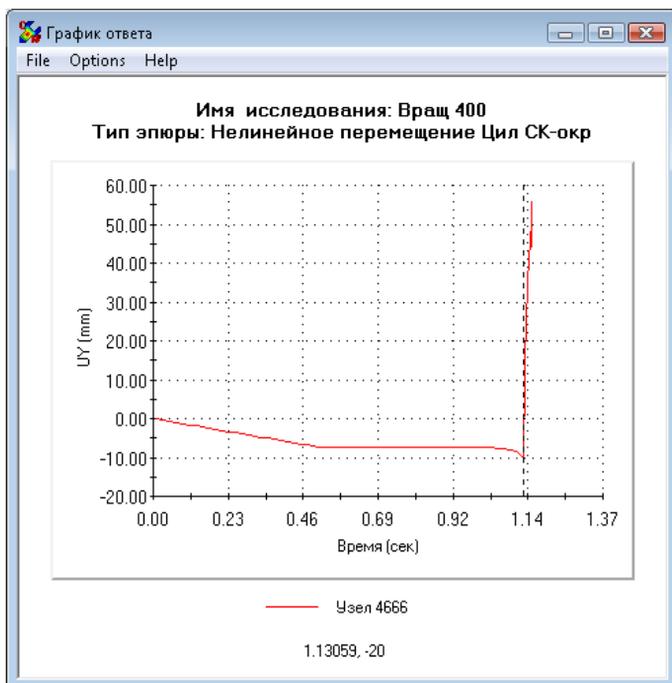


Рис. 1.182. Кривая отклика для окружного перемещения при угловой скорости 400 об/мин

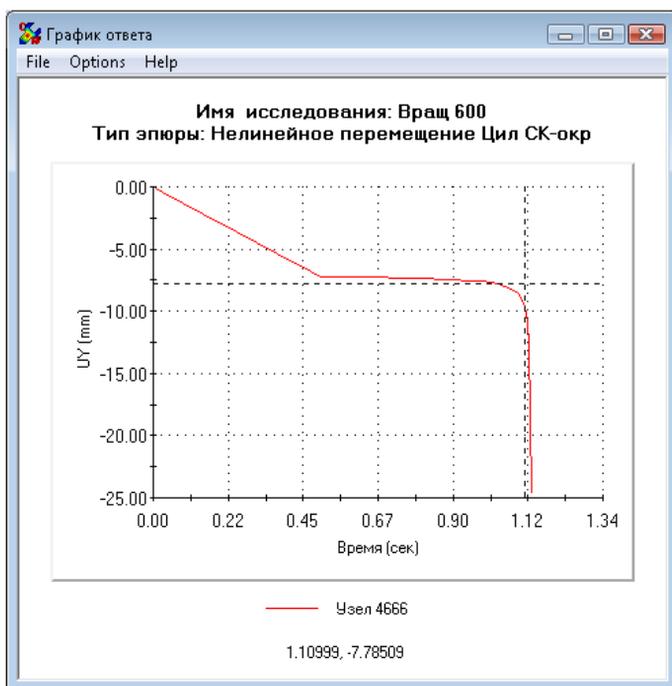


Рис. 1.183. Кривая отклика для окружного перемещения при угловой скорости 600 об/мин

Подтвердить выполненную оценку можно, используя кривые отклика для радиальных перемещений: для неподвижного вала это рис. 1.184, а для вращающегося — рис. 1.185–1.187.

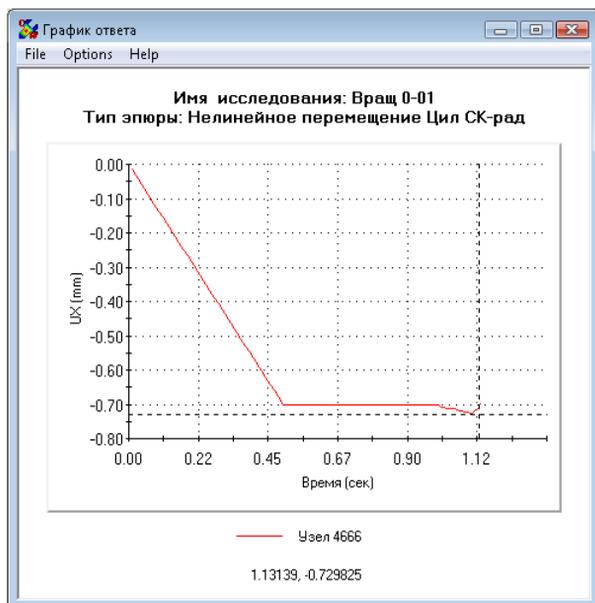


Рис. 1.184. Кривая отклика для радиального перемещения при неподвижном вале

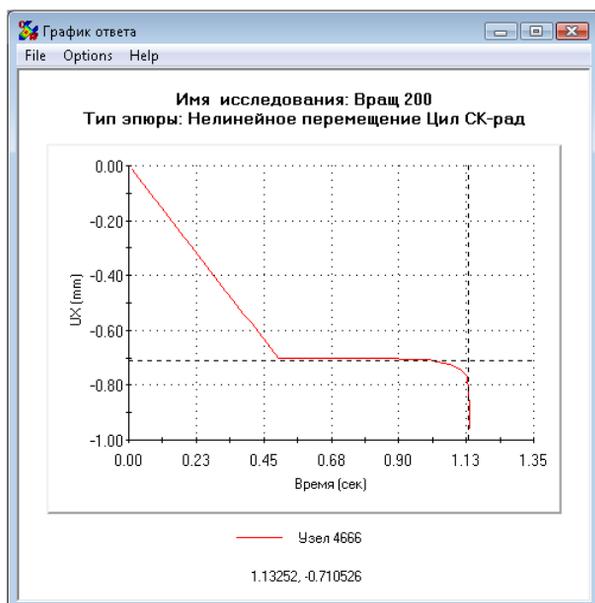


Рис. 1.185. Кривая отклика для радиального перемещения при угловой скорости 200 об/мин

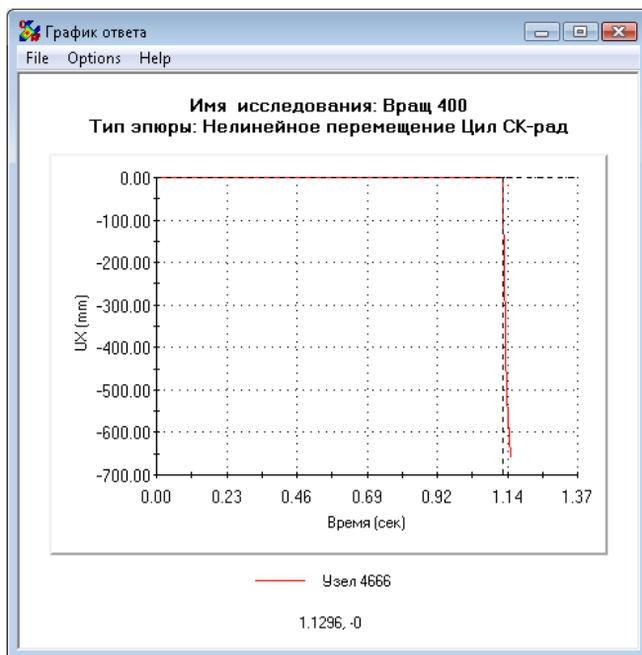


Рис. 1.186. Кривая отклика для радиального перемещения при угловой скорости 400 об/мин

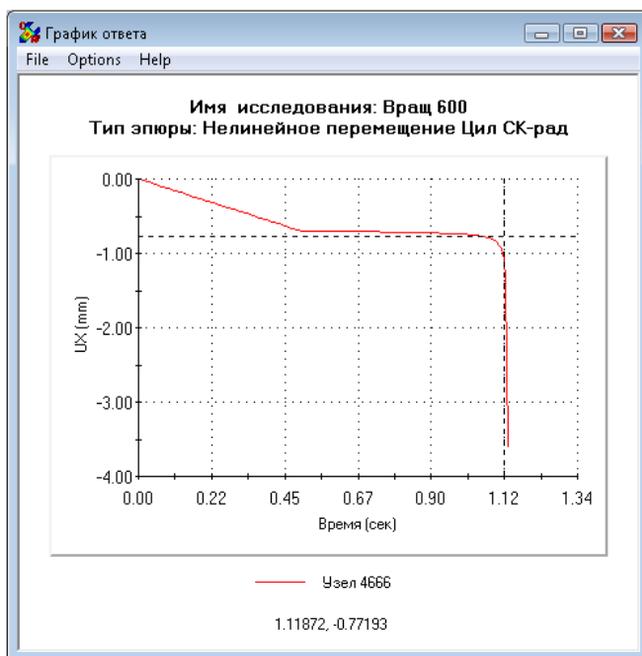


Рис. 1.187. Кривая отклика для радиального перемещения при угловой скорости 600 об/мин

Отметим, что зависимости для радиального и окружного перемещений характерного узла дают практически одинаковую оценку критической нагрузки: она соответствует условному времени около 1,13 с для угловых скоростей в интервале от 0 до 400 об/мин. Влияние вращения на несущую способность начинает ощущаться при 600 об/мин, когда время начала нелинейности уменьшается на 0,01–0,02 с. Это значит, что в реальных условиях эксплуатации вращение практически не влияет на прочность.

Для полноты картины рассмотрим диаграмму эквивалентных напряжений в вале в момент начала потери устойчивости (рис. 1.188). Как видно, максимум превышает предел текучести, однако он локализован на грани, нагруженной крутящим моментом. Напомним, что мы имеем дело с условной моделью нагружения, поэтому данный факт можно не принимать во внимание, учитывая необходимость более тщательного анализа статической прочности узлов соединения. В самом же вале напряжения не превышают 3×10^{-8} Па, из чего следует, что возможная потеря прочности, если игнорировать состояние заделок, будет происходить именно из-за появления геометрической нелинейности.

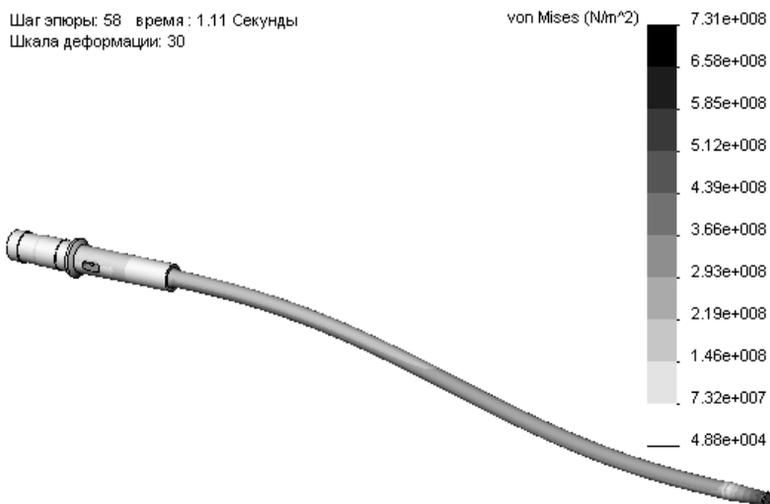


Рис. 1.188. Эквивалентные напряжения в вале в момент начала потери устойчивости

1.8.4. Выводы

Данная задача является характерным примером, демонстрирующим необходимость дополнения статического расчета нелинейным анализом, учитывающим возможность появления геометрической нелинейности. Особенностью примера является принципиальная неприменимость линейной модели потери устойчивости, предполагающей синхронность приложения всех нагрузок (вызванных перемещениями, вращениями и собственно силами), а также невозможность учета граничных условий в виде контакта с переменной границей.

1.9. Нелинейный расчет узла крепления датчика давления в осесимметричной постановке

Данный раздел иллюстрирует функциональность Simulation применительно к осесимметричным задачам в упруго-пластической постановке. Автор благодарит сотрудников ОАО "Сибнефтеавтоматика" (Тюмень) за предоставленную геометрическую модель и сотрудничество при решении данной задачи.

1.9.1. Постановка задачи

Данная задача возникла в связи с тем, что в изделиях в процессе эксплуатации возникает негерметичность. Одной из возможных причин может быть остаточная пластическая деформация, сопровождающая циклическое нагружение.

Геометрическая модель сборки показана на рис. 1.189. Необходимо воспроизвести поведение датчика давления, подвергаемого действию циклических нагрузок в виде давления и температуры. Датчик представляет собой предварительно нагруженную резьбовым соединением систему. В геометрическую модель входит также фрагмент корпуса, куда вваривается втулка с резьбой в отверстии. Геометрическая модель содержит некоторые упрощения, не влияющие существенно на состояние собственно датчика. Кроме того, в модели собственно датчика оставлена только силовая составляющая.

Для реализации натяга используется инструмент Simulation **Посадка с натягом** (Shrink Fit). Величина интерференции между торцом штуцера и соответствующей гранью датчика подбиралась из соображений о действующей величине осевого натяга. В целях повышения точности расчетной модели имитируется также снижение жесткости деталей в зоне резьбы, для чего на штуцере эта область выделена в отдельное тело.

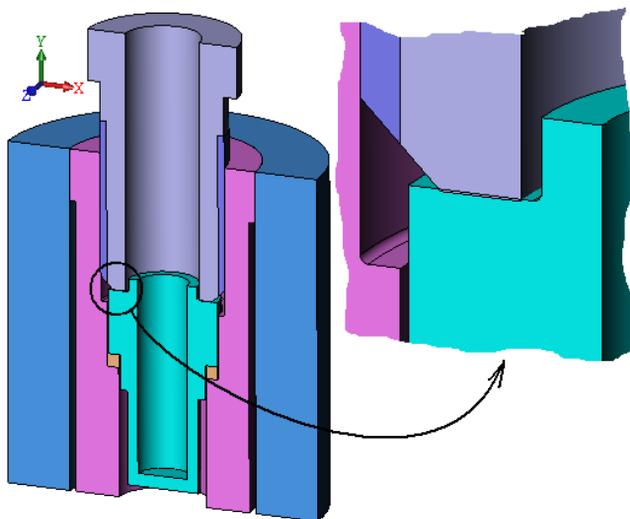


Рис. 1.189. Модель датчика в разрезе и ее фрагмент

1.9.2. Расчетная модель конструкции как твердотельной осесимметричной системы

Плоское нелинейное статическое исследование создается из обычной панели **Исследование** (Study) посредством активизации опции **Использовать 2D Упрощение** (Use 2D Simplification) (рис. 1.190). В процессе подбора наиболее эффективной расчетной модели выяснилось, что статический нелинейный анализ (правильнее сказать, его реализация в SolidWorks Simulation) не гарантирует сходимости при разумных настройках. Требуется существенно (до 10%) увеличивать допустимое приращение деформаций, уменьшать начальный шаг и более "тонко" настраивать сетку. Более эффективным является использование нелинейной динамической модели без учета какого-либо демпфирования. В этом случае сеточная зависимость имела место, но была гораздо менее ощутима.

В панели со свойствами исследования (рис. 1.191) выбираем тип **Осесимметричный** (Axis-symmetric), после чего должны назначить объект, определяющий сечение (это может быть как плоскость SolidWorks, так и плоская грань), а также ось (но не временная ось и не ось эскиза). Кстати говоря, геометрическая модель не обязана быть осесимметричной, да и вообще обладать какой-либо симметрией. Расчетную модель, само собой, строим на базе одного из двух (фактически) симметричных сечений, для чего активизируем соответствующую опцию.

В конструкции используются различные материалы, два из них (пластичная медь и условный материал, имитирующий резьбовое соединение двух стальных деталей) показаны на рис. 1.192–1.194.

Как видно, для меди выбрана модель пластичности по Мизесу с касательным модулем, составляющим 1/100 от упругого. Это есть своего рода "нижняя" оценка жесткости, что в данной ситуации способствует идентификации явлений, связанных с необратимыми деформациями.

Условный материал резьбового соединения присваивается вспомогательному телу, имитирующему соответствующую зону. От окружающего материала (стали) он отличается уменьшенным в 10 раз модулем упругости. В данной задаче учет уменьшения жесткости в резьбе, на первый взгляд, не слишком важен, поскольку получить нужно именно требуемый натяг: больше податливость резьбы — большую интерференцию придется создавать (искусственно). Однако деформация резьбы влияет на общее состояние системы, поэтому лучше этот фактор предусмотреть, тем более что на вычислительную трудоемкость это никак не влияет.

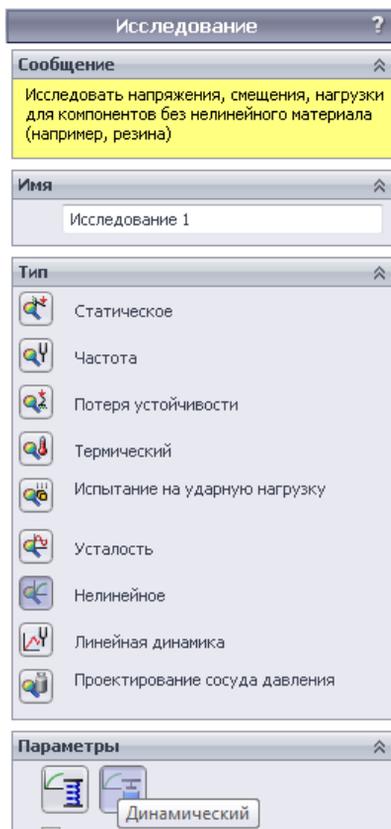


Рис. 1.190. Создание нелинейного статического исследования в варианте 2D упрощение

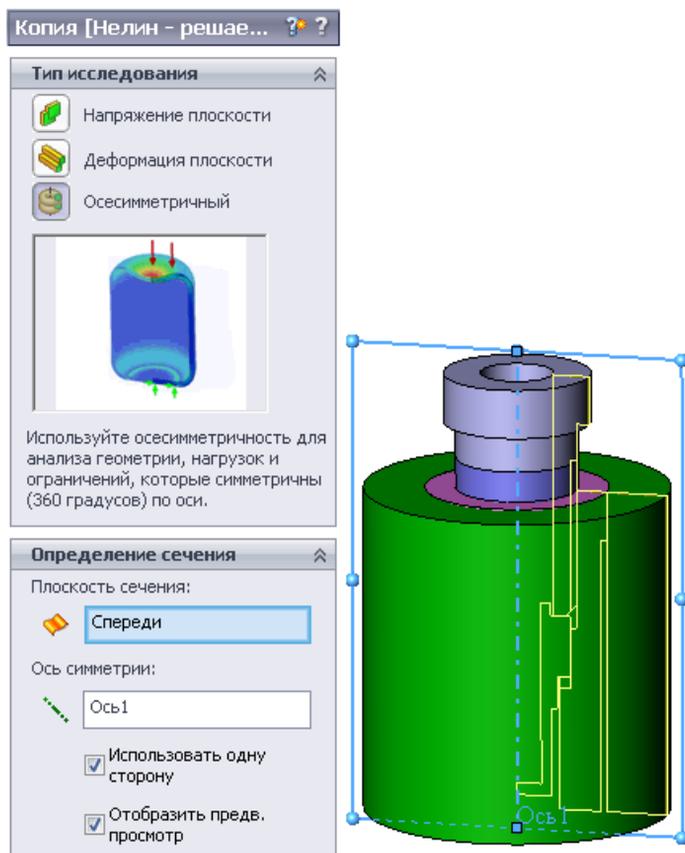


Рис. 1.191. Уточнение расчетной плоской модели



Рис. 1.192. Материалы деталей/тел

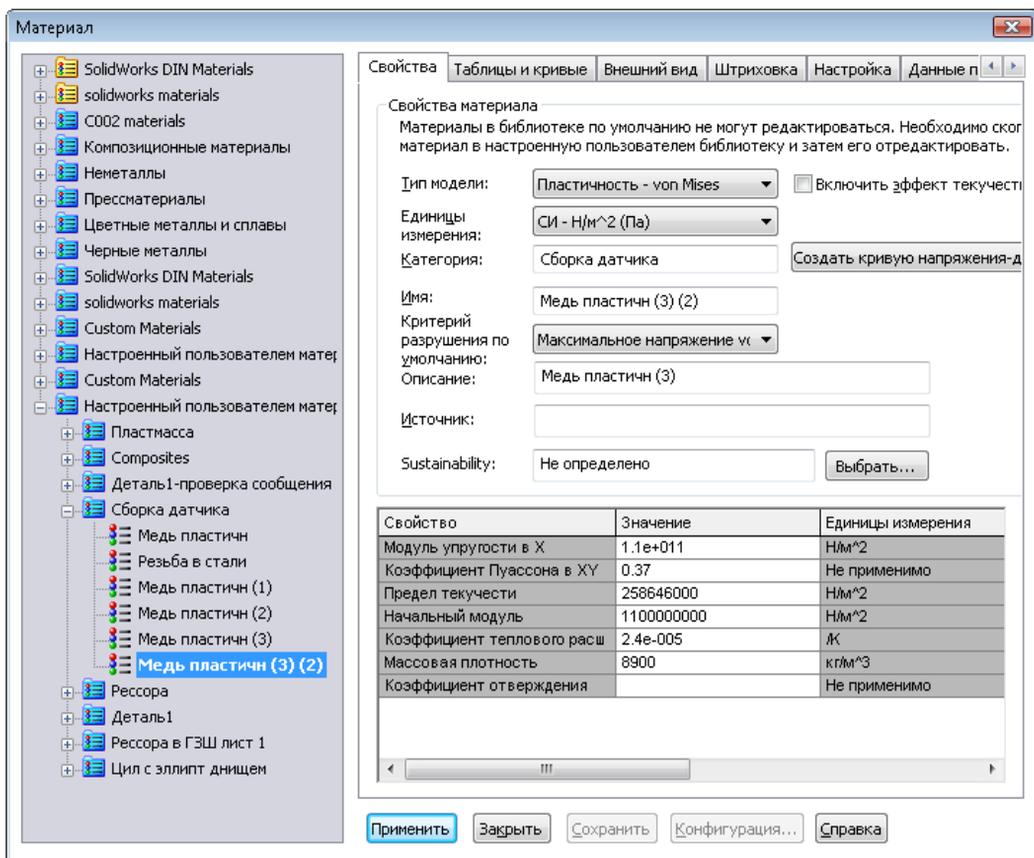


Рис. 1.193. Свойства пластичной меди

Кинематические граничные условия призваны имитировать вырезанный из прилива в относительно толстостенном баке или трубе фрагмент. В силу отсутствия более подробной информации и существования различных вариантов конструкции, выберем вариант, показанный на рис. 1.195. Как видно, это ограничение нормальных (по сути, радиальных) перемещений на наружной кромке (цилиндрической грани) и фиксация наружной нижней вершины (круговой кромки). Данная совокупность закреплений также изменяет жесткость модели в сторону "ослабления". Кроме того, закрепление в вершине (кромке) порождает в ней сингулярность, которая будет нивелироваться относительно редкой сеткой.

Давление прикладываем к граням, взаимодействующим с содержимым внутреннего пространства, как показано на рис. 1.196. В месте контакта между корпусом и втулкой давление, приложенное к кромке корпуса, распространяется и на площадку контакта. Для его компенсации прикладываем противоположное давление к кромке буртика втулки (на иллюстрации здесь присутствуют противоположно направленные стрелки). Этих действий можно было бы избежать, если командой **Линия разреза** в отверстии корпуса выделить соответствующую грань. Тогда в осесимметричной модели (сечении исходной модели) получилось бы две коллинеарных кромки, разделенных вершиной.

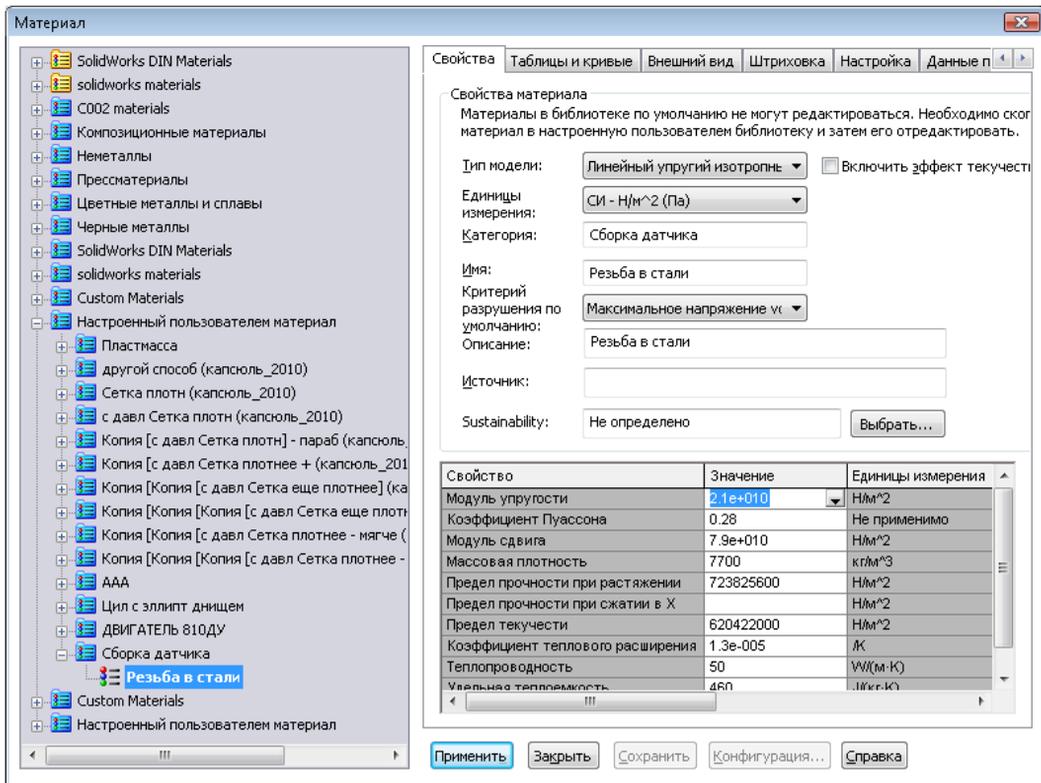


Рис. 1.194. Свойства условного материала резьбы

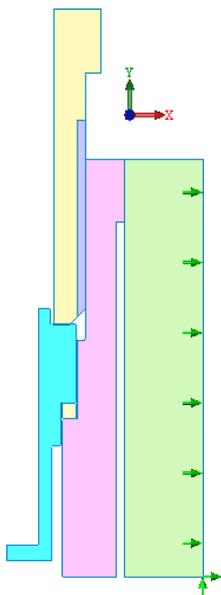


Рис. 1.195. Закрепления

К слову сказать, если бы потребовалось уплотнить сетку в некоторой области, то пришлось бы прибегнуть к весьма трудоемкой манипуляции: поскольку 2D-модель базируется на искусственной поверхности (поверхностях), генерируемой SolidWorks, как сечение твердого тела (тел), а у пользователя нет доступа к этой оболочке. Соответственно, следует членить тело, выделяя ту его область, которая будет уплотняться в конечно-элементной модели. В частности, для осесимметричной задачи пришлось бы строить осесимметричную поверхность и с ее помощью, используя команду **Разделить**, вычленять необходимое тело. Оно и станет базой для манипуляций с сеткой и/или назначения каких-либо специфических граничных условий (закреплений, мощностей, и т. д.).

Законы изменения давления показаны на рис. 1.196. Как видно, прогнозируется четыре синхронных цикла, завершающиеся фиксацией системы в нагруженном состоянии. Для температуры показаны кривые со значениями, на которые умножаются принятые константы. Мы рассмотрим самый общий случай, когда детали нагреваются по-разному, как показано на рис. 1.197, 1.198.

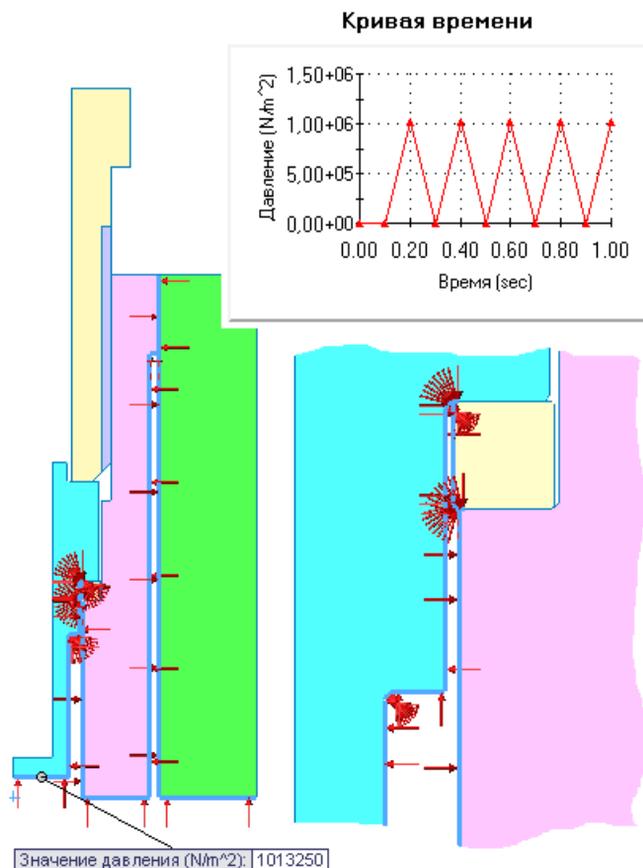


Рис. 1.196. Приложение давления и закон его изменения

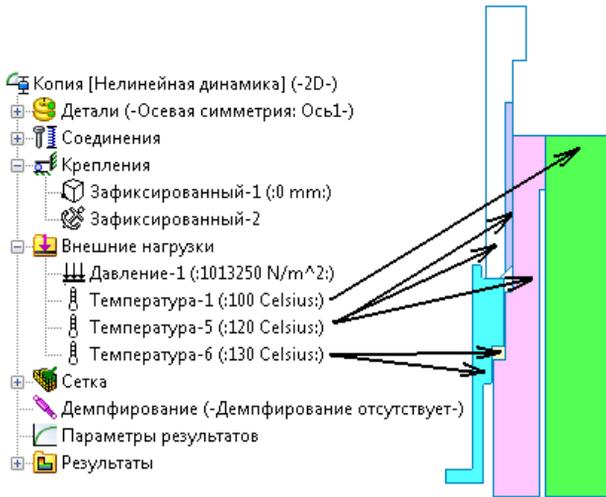


Рис. 1.197. Приложение температур к различным деталям/телам.

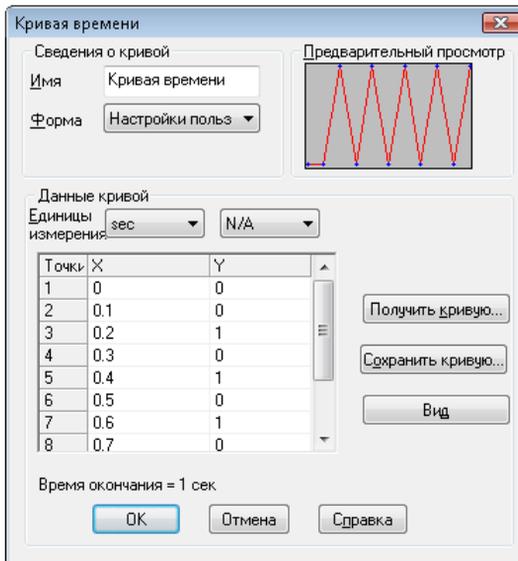


Рис. 1.198. Закон изменения температуры

Выяснилось, что при назначении (оставлении) контакта **Связанные** (Bonded) условием по умолчанию, система работает некорректно (до версии 2011 SP2 включительно), поэтому по умолчанию назначено **Проникновение допускается** (Allow Penetration). Следствием этого стала необходимость определения контактов **Связанные** (Bonded) для соответствующих контактных пар в явном виде. Между взаимодействующими деталями (в реальности — телами, в модели — гранями), штуцером и датчиком, назначаем условие **Горячая посадка** (Shrink Fit), причем объектами для приложения этого условия в осесимметричной модели являются кромки (рис. 1.199).

Взаимодействующие грани (в плоской модели — кромки) шайбы с одной стороны и датчика со втулкой — с другой связываем условием **Нет проникновения** (No Penetration) в варианте **Поверхность с поверхностью** (Surface to Surface). При создании соответствующих пар множеств в первое включаем кромки, содержащие плоские и выпуклые (относительно направления взаимодействия) кривые.

Более подробно зона модели с горячей посадкой показана на рис. 1.200.



Рис. 1.199. Контактные условия

Сетка приведена на рис. 1.201. Как видно, использованы элементы управления сеткой для шайбы, примыкающих граней и скруглений между ними.

Для генератора сетки выбран **Стандартный** (Standard) алгоритм, **Допуск** (Tolerance) назначается в несколько раз меньшим размера перекрытия.

В предположении того, что деформации будут достаточно большими, активизируем соответствующую опцию в настройках анализа (рис. 1.202). Хотя это и не слишком актуально для данной задачи (мы приняли простейшую, билинейную, модель пластического поведения меди), рассмотрим подробно вопрос о том, в каком виде пришлось бы вводить в базу данных кривые "напряжение-деформация" для нелинейных материалов в предположении появления больших деформаций. Из табл. 1.1 и последующих разъяснений можно увидеть, что состав исходных данных зависит от настроек анализа.

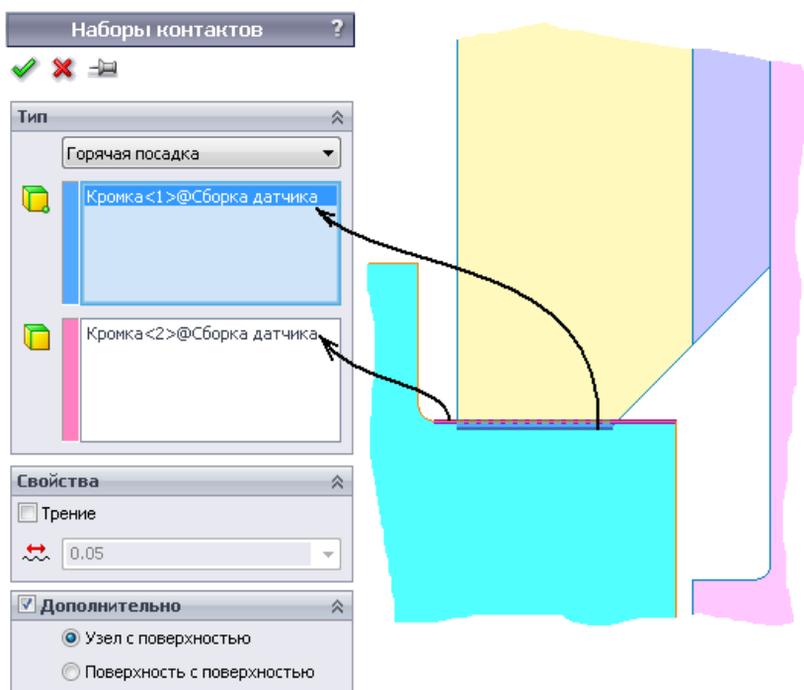


Рис. 1.200. Создание "горячей посадки" между штуцером и датчиком

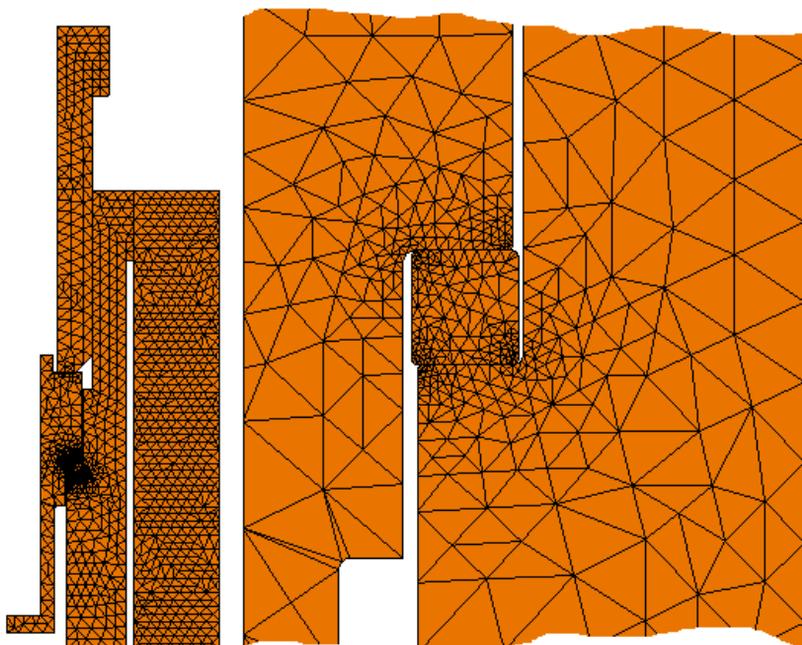


Рис. 1.201. Сетка и ее фрагмент в зоне прокладки

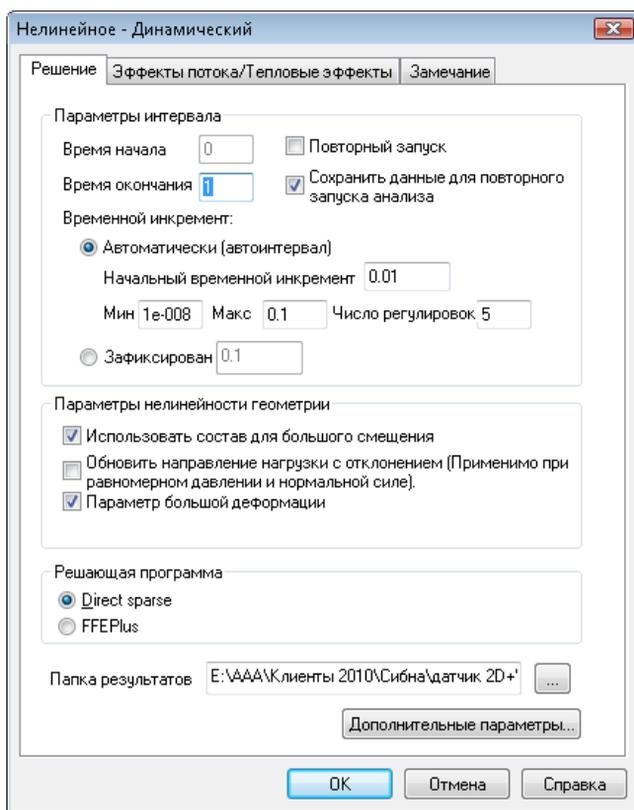


Рис. 1.202. Настройки нелинейного анализа

Таблица 1.1. Интерпретация напряжений/деформаций в зависимости от типа анализа

Модель материала	Настройка анализа		
	Малые деформации Малые перемещения	Малые деформации Большие перемещения	Большие деформации Большие перемещения
Нелинейный упругий	Истинные напряжения Инженерные деформации	Истинные напряжения Инженерные деформации	Недоступно
Упруго-пластический по Мизесу; по Треска; модель сыпучих сред Дракера-Прагера	Истинные напряжения Инженерные деформации	Истинные напряжения Инженерные деформации	Истинные напряжения Логарифмические деформации

Таблица 1.1. (Окончание)

Модель материала	Настройка анализа		
	Малые деформации Малые перемещения	Малые деформации Большие перемещения	Большие деформации Большие перемещения
Гиперупругие материалы: Муни-Ривлина; Огдена; Блатца-Ко	Инженерные напряжения Коэффициент удлинения	Инженерные напряжения Коэффициент удлинения	Инженерные напряжения Коэффициент удлинения
Гиперупругий	Истинные напряжения Логарифмические деформации	Истинные напряжения Логарифмические деформации	Истинные напряжения Логарифмические деформации
Вязкоупругий	Истинные напряжения Инженерные деформации	Истинные напряжения Инженерные деформации	Недоступно

Освежим смысл терминов, присутствующих в таблице.

Инженерные напряжения (номинальные) рассчитываются относительно площади сечения недеформированного тела A_0 : $\sigma = \frac{P}{A_0}$. Истинные напряжения (напряжения

Коши) рассчитываются относительно сечения деформированного тела A . Истинные (логарифмические) деформации в предположении условия постоянства объема:

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) = \ln\left(\frac{A}{A_0}\right)$$

Коэффициент удлинения: $1 + E$. Соотношения между истинными и инженерными деформациями $\varepsilon = \ln(1 + E)$. Соотношения между истинными и инженерными напряжениями $\sigma_t = \sigma(1 + E)$.

ЗАМЕЧАНИЯ.

Модель больших деформаций следует использовать, если деформации превышают 5%.

Для вязкоупругих материалов используется не зависимость напряжений от деформаций, а функция релаксации в зависимости от времени.

Экстраполяция кривой "напряжение-деформация" осуществляется на основе значений в двух последних точках. Используется линейная зависимость.

В качестве результатов получаем следующие:

- Напряжения являются напряжениями Коши.
- Деформации для модели малых деформаций — инженерные деформации.
- Деформации для модели больших деформаций — логарифмические деформации.

1.9.3. Результаты и их интерпретация

На рис. 1.203–1.205 показано распределение эквивалентных (по Мизесу напряжений) в различные моменты условного времени: 0,1 с — действует только натяг; 0,9 с — пятый шаг приложения нагрузок; 1 с — снятие нагрузок, натяг оставлен. Как видно, максимальные напряжения действуют в углах втулки. Даже в отсутствие других нагрузок кроме натяга эквивалентные напряжения превышают предел текучести. Здесь следовало бы уменьшить натяг (в нашей модели — величину взаимопроникновения штуцера в датчик); однако дальнейший анализ показывает, что свойства системы (в целом) под нагрузкой близки к линейным, поэтому заключения можно делать и для данного состояния.

Интересно, что уровень наибольших напряжений выше в отсутствие давления и температуры, а после снятия нагрузок напряжения во втулке увеличились.

Как правило, мотивированное заключение о герметичности соединений объектов в численных процедурах выносят на основе диаграммы контактных напряжений. К сожалению, для плоских задач данный инструмент в использованной версии Simulation недоступен. В данном случае (для плоских граней) применим косвенный инструмент — напряжения вдоль общей нормали. Здесь в этом качестве могут использоваться нормальные напряжения вдоль оси датчика. Соответствующая диаграмма для состояния системы без нагрузок (только с натягом) приведена на рис. 1.206. Вполне отчетливо видно, что по граням шайбы действуют сжимающие напряжения. После приложения внешних нагрузок состояние системы принципиально не изменяется.

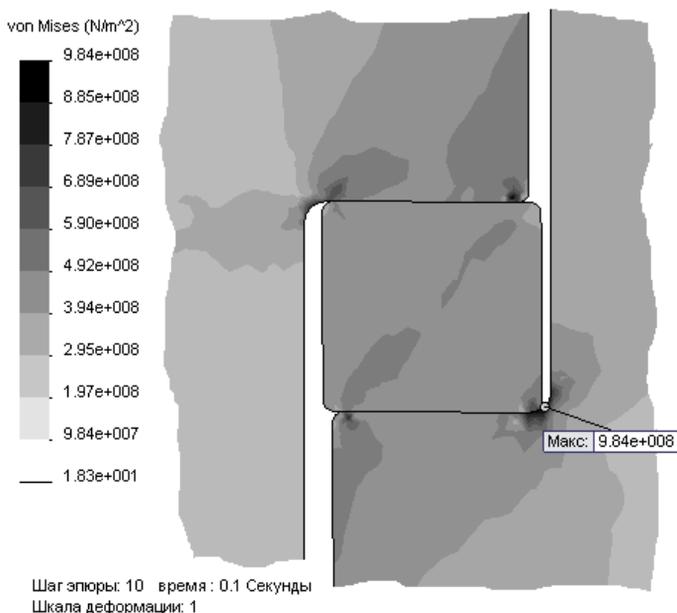


Рис. 1.203. Эквивалентные напряжения при действии натяга

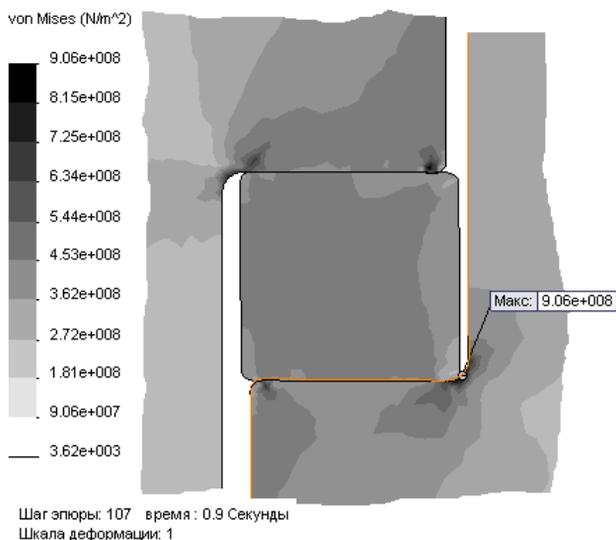


Рис. 1.204. Эквивалентные напряжения при пятом шаге приложения нагрузок

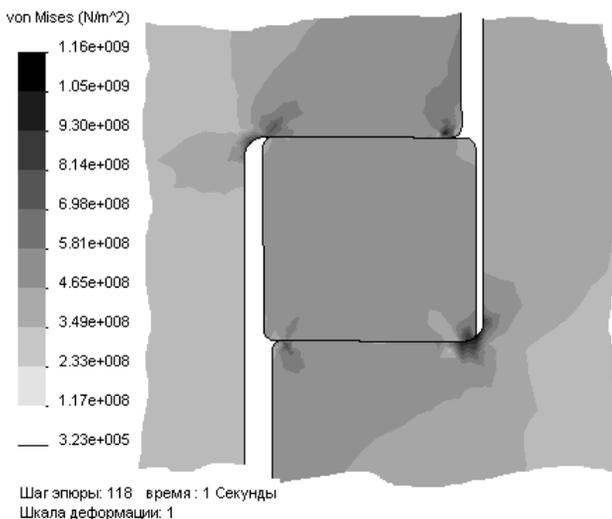


Рис. 1.205. Эквивалентные напряжения при снятии нагрузок

Более детальную информацию о состоянии соединения можно получить, рассмотрев, например, эпюру распределения нормальных напряжений вдоль верхней кромки шайбы. Результат для момента времени 0,9 с показан на рис. 1.207. Как видно, контактное давление практически постоянно, за исключением левого конца графика: эти точки отображают состояние левого верхнего угла сечения шайбы вблизи внутреннего угла датчика, где жесткость примыкающего объекта резко возрастает и соответственно возрастает контактное давление. Локальный минимум

величины (максимум модуля) наблюдается и возле правого верхнего угла, из-за того что шайба выступает за габариты датчика и его левый угол оказывается смещенным внутрь сечения.

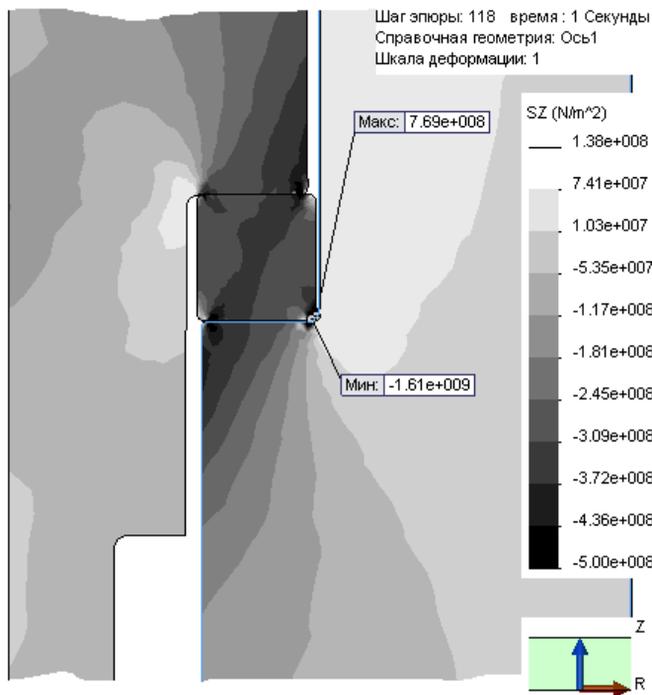


Рис. 1.206. Нормальные напряжения вдоль оси после снятия нагрузок

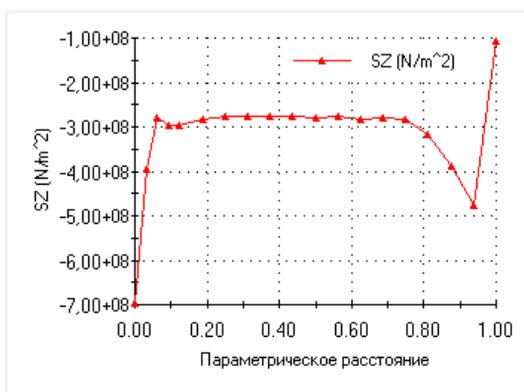


Рис. 1.207. Нормальные напряжения по верхней кромке шайбы под нагрузкой

Судить о степени влияния цикличности (в идеальном ее варианте, учитывающем исключительно упруго-пластические деформации и пренебрегающем усталостью и

износом) можно по кривой отклика. На рис. 1.208 она построена для нормальных напряжений в узле, лежащем примерно посередине верхней кромки шайбы. Здесь, во-первых, обращает внимание, что время приложения натяга равно 0,05 с, что не соответствует ни одному из назначенных шагов. Дело в том, что пользователь — даже в нелинейном (динамическом) анализе — не может управлять временем и последовательностью реализации контакта Горячая посадка (Shrink Fit). Этот тип контакта всегда реализуется в начале расчета за время (правильнее сказать, число шагов), определяемое системой. Для пользователя лучше всего думать, что натяг реализуется "мгновенно", но без порождения динамических (в случае, если мы имеем дело с нелинейным динамическим типом исследования) эффектов.

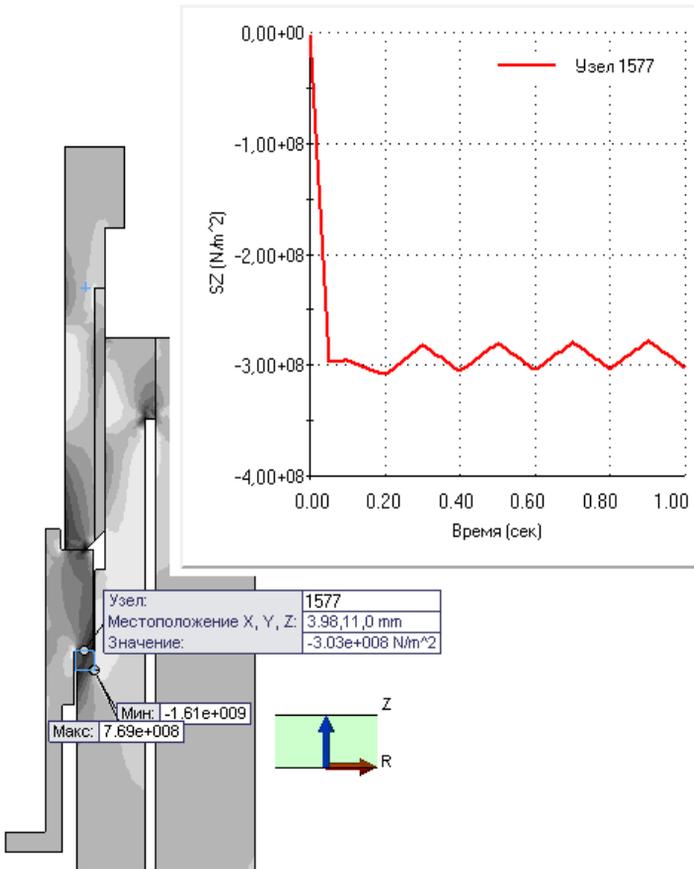


Рис. 1.208. Изменение нормальных напряжений в характерном узле в зависимости от времени

Интересно также, что уровень (модуль) напряжений после снятия нагрузок при всех этапах нагружения больше, чем под нагрузкой. Присутствует и еще одна, несколько менее выраженная, но более значимая с точки зрения функционирования конструкции закономерность. Если изменить масштаб графика, как показано на

рис. 1.209, то выясняется, что локальные минимумы, равно как и локальные максимумы описываются двумя, близкими к прямолинейным, и, что интересно, практически параллельными асимптотами. Они, по крайней мере, в рассматриваемом числе циклов нагружения имеют тенденцию к пересечению с осью абсцисс, что соответствует потенциально возможной утрате герметичности.

Полезную информацию несет эпора эквивалентной пластической деформации. Чтобы выделить именно эту компоненту (для нелинейных моделей, в зависимости от типа анализа или материала доступны также тепловая деформация и деформация ползучести), следует выбрать желаемую позицию в списке опции **Тип деформации** (Strain type) панели **Эпора деформации** (Strain Plot), как показано на рис. 1.210.

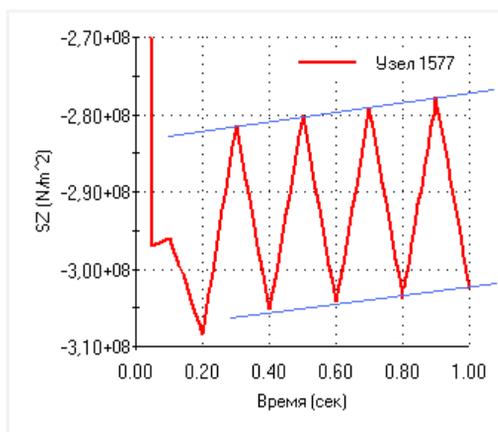


Рис. 1.209. Кривая отклика в масштабированном виде, дополненная асимптотами

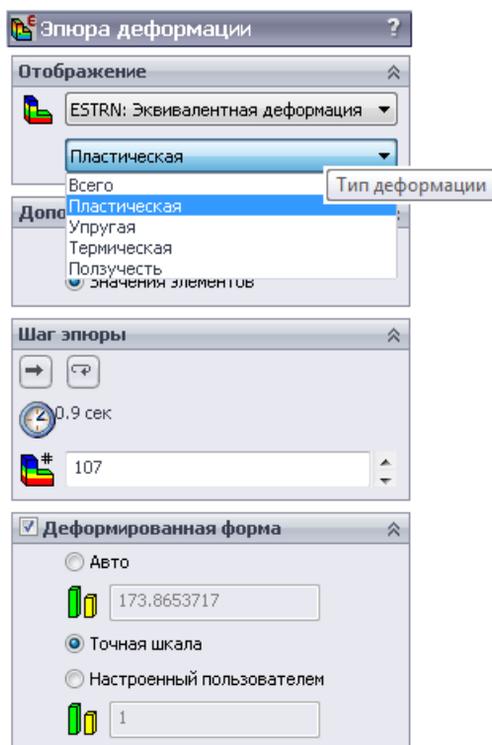


Рис. 1.210. Выбор пластической компоненты относительной деформации для отображения

Результат для системы под нагрузками, а также после их снятия показан на рис. 1.211, 1.212. В первом случае верхняя граница шкалы опущена, чтобы повысить наглядность картинки. Как видно, пластическая деформация охватывает значительную часть площади сечения, причем подавляющий вклад в ее образование вносит именно натяг в резьбе.

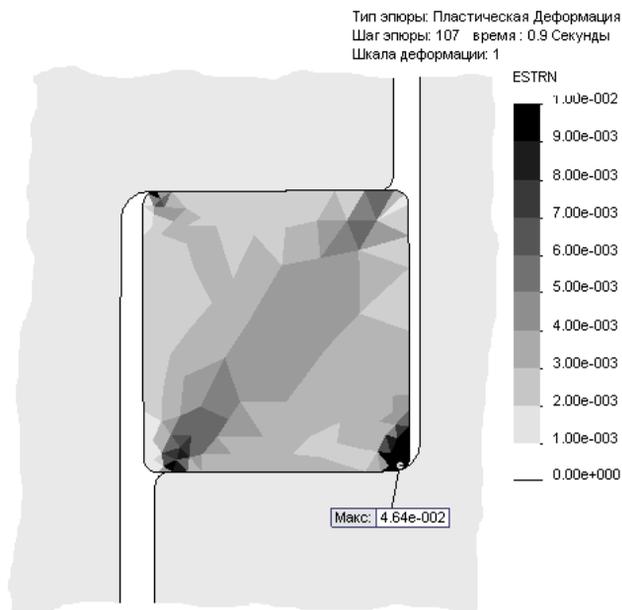


Рис. 1.211. Пластическая деформация для системы под нагрузками

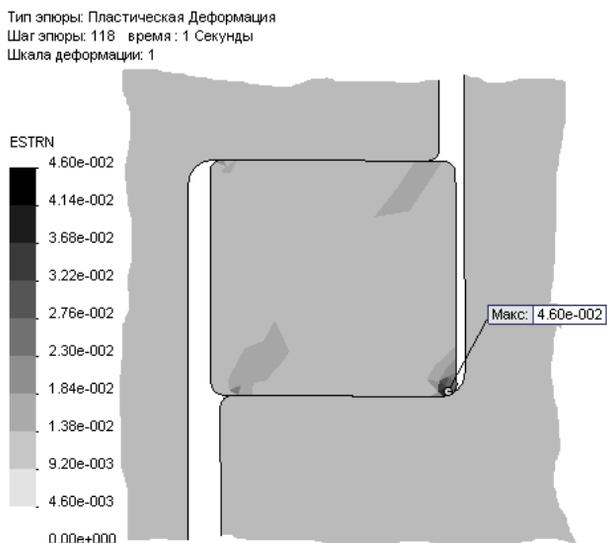


Рис. 1.212. Пластическая деформация после снятия нагрузок

1.9.4. Выводы

Приведенный пример продемонстрировал полезность появившегося в свежих версиях Simulation 2D-анализа применительно к трудоемким контактным задачам в нелинейной постановке. Более того, автору не удалось за приемлемое время получить соответствующий результат для пространственной постановки с учетом осевой симметрии (рассматривался малый сектор).

Определенные, но преодолимые неудобства, создались из-за того, что в качестве контактных условий по умолчанию нельзя назначить контакт Связанные (Bonded).

Полученные результаты, в принципе, объясняют, из-за чего конструкция теряет герметичность: в процессе циклического нагружения происходит последовательное расплющивание прокладки с уменьшением контактных напряжений. Однако абсолютных аргументов в пользу этого объяснения мы не привели, поскольку использовалась не экспериментальная кривая деформирования меди, а некая условность — в данной ситуации упрощения могут принципиально изменить результат. Более того, принятый в расчете уровень деформаций натяга слишком велик, чтобы уверенно распространять его на более реальные значения. Поэтому принято решение не продолжать исследование при большем числе циклов нагрузки/разгрузки без уточнения свойств материала и условий эксплуатации (прежде всего усилия затяжки).

Как видно, существует некий разумный уровень пластических деформаций (определяемый затяжкой), превышение которого существенно уменьшает соответствующие характеристики конструкции в циклическом режиме эксплуатации.

Также мы не исследовали нелинейность, присутствующую непосредственно в резьбовом соединении. Она порождается как физической нелинейностью материала (пластичностью и ползучестью), так и нелинейными эффектами в зоне контакта, обусловленными в первую очередь трением.



Глава 2

Гидрогазодинамика и теплопередача — SolidWorks Flow Simulation

Глава содержит задачи нескольких классов. Первая — стандартная модель авиационного профиля. Рассматривается крыло конечного размаха, а полученные результаты сравниваются с экспериментом.

Следующая группа задач (*см. разд. 1.2 и 1.4*) основана на использовании виртуальных пористых сред Flow Simulation. Демонстрируются различные реализации пористых сред применительно к особенностям конструкции.

Три задачи посвящены анализу теплового состояния замкнутых объемов: сушилки, холодильной витрины и кондиционируемого офисного помещения. Несмотря на внешнюю несхожесть, они имеют много общих черт, в частности порождают большую вычислительную размерность. В то же время каждая задача имеет характерные черты, заслуживающие пристального внимания. На примере одной — расчете помещения подробно анализируется функциональность Flow Simulation, связанная с моделированием систем вентиляции, отопления и кондиционирования.

Последние примеры демонстрируют возможности модуля по расчету вращающихся объектов. Материал образует вполне законченную картину: гидравлический насос (активное колесо); гидропривод (пассивное колесо) и компрессор. Эти три задачи сопровождаются результатами экспериментов.

2.1. Дозвуковое обтекание крыла при различных углах атаки

Решается задача обтекания крыла бесконечного и конечного размаха дозвуковым потоком при различных углах атаки. Результаты расчета сравниваются с экспериментом. Автор благодарит сотрудников ЗАО "Спецкомплектприбор" (Москва) за предоставленные результаты эксперимента и геометрическую модель крыла. Отрабатывается рациональная расчетная модель профиля и крыла. Рекомендуется предварительно ознакомиться с материалами разработчиков программы. Некоторые из них, например, статьи, описывающие особенности сеточной аппроксимации и реализованную модель турбулентности, можно найти на сайте www.mentor.com.

2.1.1. Постановка задачи

Геометрическая модель крыла в аксонометрии показана на рис. 2.1, а профиль при нулевом угле атаки — на рис. 2.2. Необходимо определить аэродинамические коэффициенты: сопротивления C_x и подъемной силы C_y при различных углах атаки и скоростях. Расчеты будем выполнять при двух скоростях: 0,35 М и 0,8 М. Предполагается использовать модель сжимаемого газа при малых числах Маха.

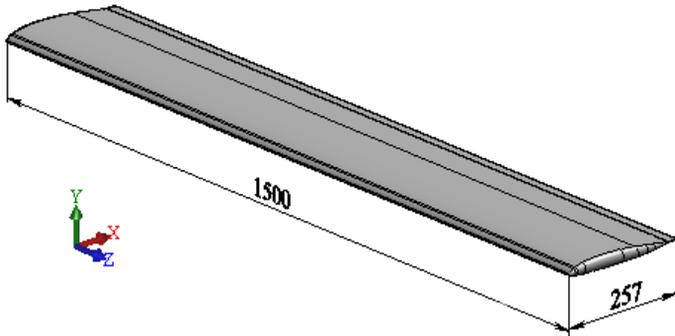


Рис. 2.1. Крыло

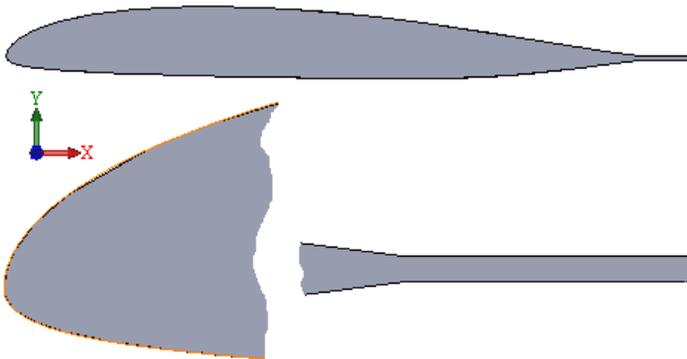


Рис. 2.2. Профиль крыла

Аэродинамические коэффициенты будем вычислять по формулам:

$$C_x = \frac{16 \times X}{\Delta \times v^2 \times S};$$

$$C_y = \frac{16 \times Y}{\Delta \times v^2 \times S}.$$

Здесь X — сила сопротивления, Кг; Y — подъемная сила, кг, $\Delta = 1$ при $p = 101\,325$ Па и $t = 15$ °С; v — скорость, м/с², $\Delta = 1$, $v = 341$ м/с \times М; М — число Маха; S — площадь крыла.

2.1.2. Плоская нестационарная модель для бесконечного крыла

На первом этапе попробуем решить задачу в плоской нестационарной постановке. Модель плоского течения (она соответствует бесконечному крылу), при том что результаты эксперимента получены для крыла конечного размаха, выбрана, чтобы сократить размерность задачи и использовать компьютер с оперативной памятью 2 Гбайт. Нестационарная постановка принята для того, чтобы учесть потенциальные эффекты в виде срыва потока при больших углах атаки.

Глобальные настройки расчетной модели приведены на рис. 2.3–2.6.

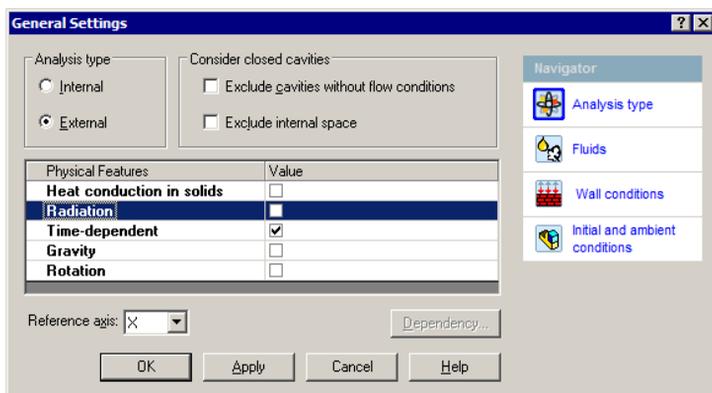


Рис. 2.3. Общие установки — внешняя нестационарная задача

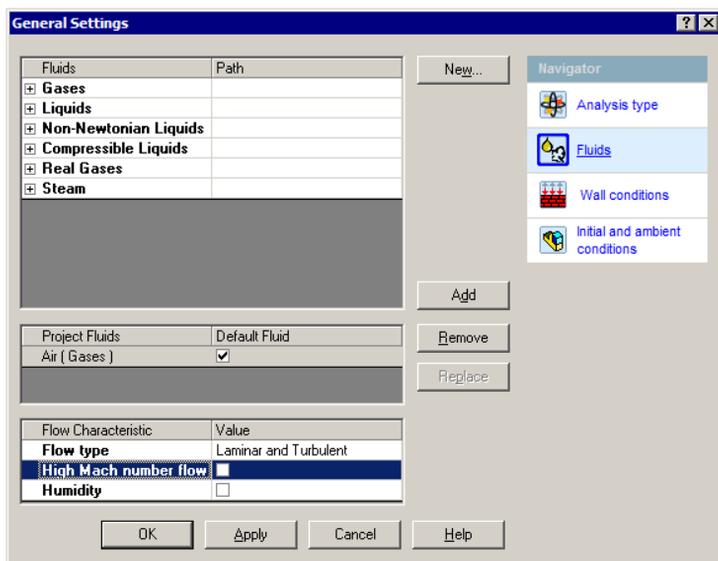


Рис. 2.4. Общие установки — назначение текучей среды и контроль опции Течение с большим числом Маха

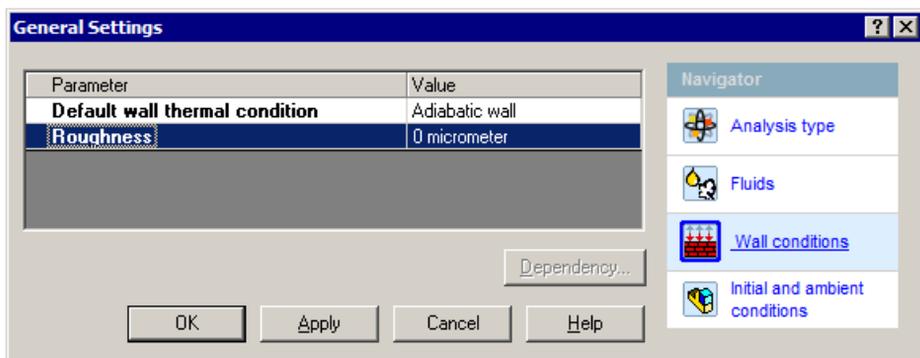


Рис. 2.5. Общие установки — условия на стенках по умолчанию

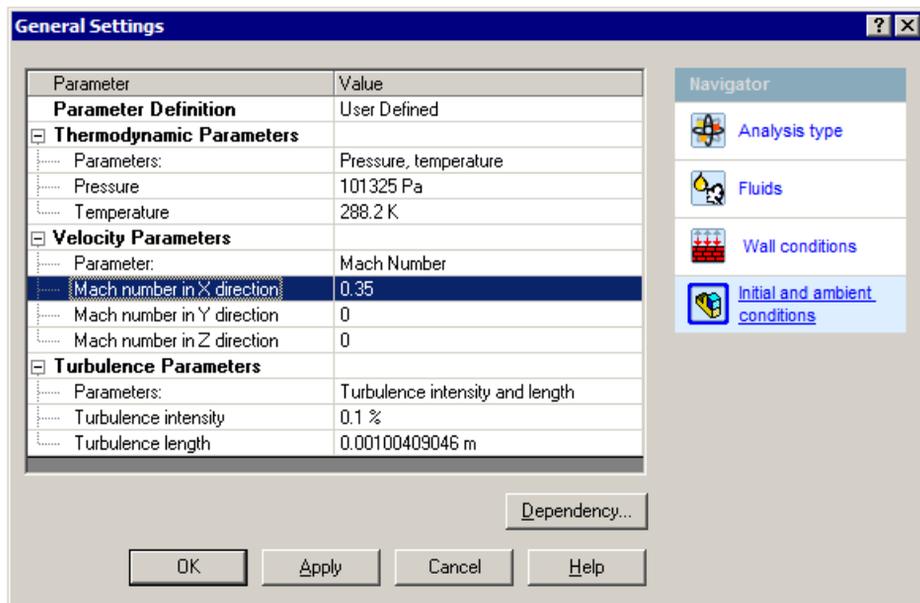


Рис. 2.6. Общие установки — граничные условия

Размеры расчетной области показаны на рис. 2.7. Здесь габариты в плоскости профиля назначены из соображений минимизации возмущений (влияющих на состояние крыла) на границах домена. При этом предусматривается, что при больших углах атаки, а также при увеличении скорости потока возмущения будут распространяться в вертикальном направлении на расстояние более 10 толщин профиля. Размеры домена в направлении длины крыла оставлены такими, которые программа назначила по умолчанию при выборе плоского течения в плоскости XU (рис. 2.8).

Получившаяся расчетная область для модели плоского течения показана на рис. 2.9.

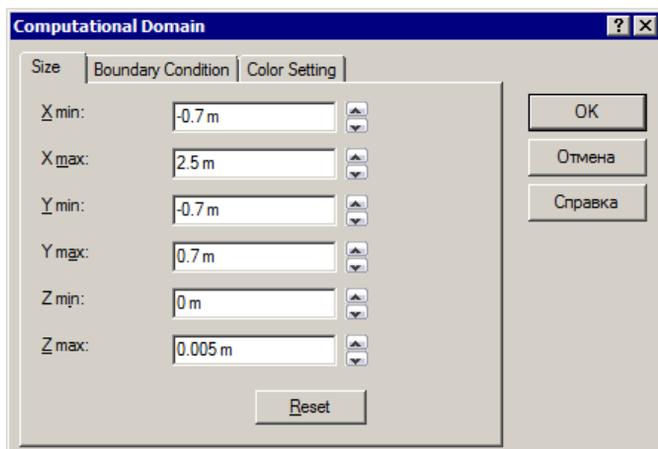


Рис. 2.7. Размеры расчетной области

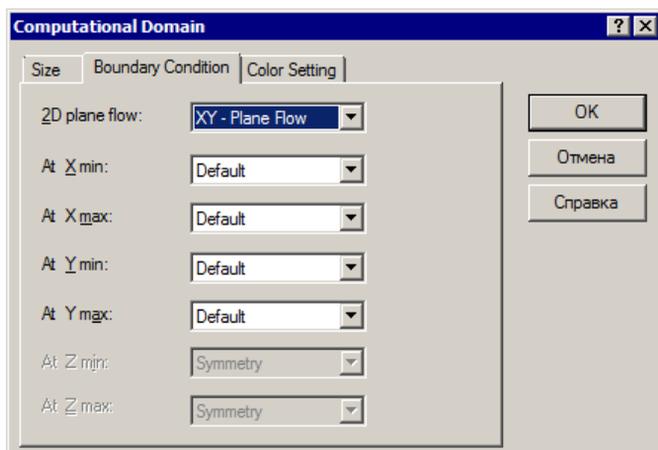


Рис. 2.8. Назначение плоского расчета

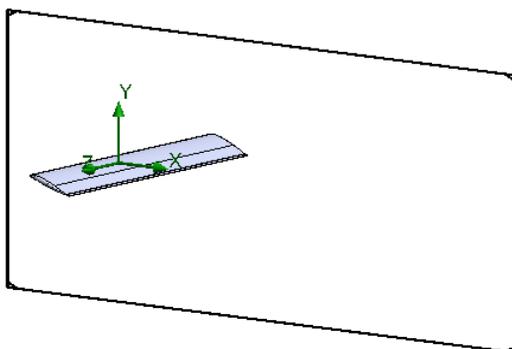


Рис. 2.9. Расчетная область для плоской задачи

В качестве целей для проекта выберем средние величины скорости и объемы расчетной области, продольное и поперечное усилие (глобальные цели), контролирующие сходимость, а также собственно аэродинамические коэффициенты. Их формируем на базе усилий, пересчитанных из ньютонов в килограммы силы (рис. 2.10), с учетом величины скорости и площади (результатирующий множитель в выражении для) C_x , C_y — рис. 2.11. Цели, рассчитываемые через соотношения, можно как использовать для контроля сходимости, так и сделать справочными.

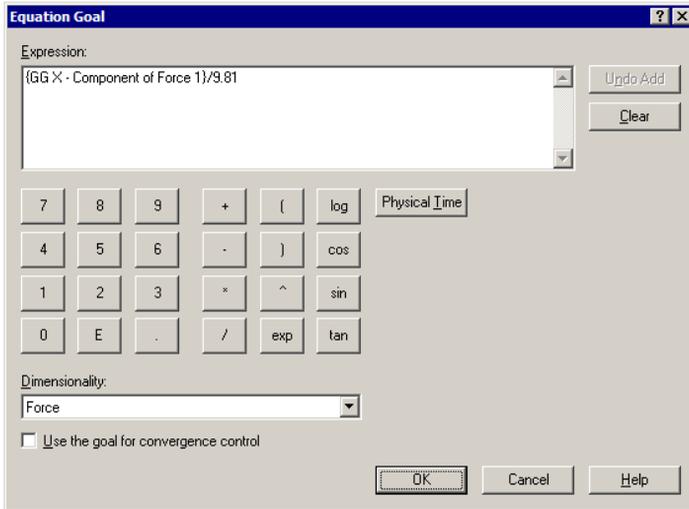


Рис. 2.10. Перевод усилий в килограммы силы

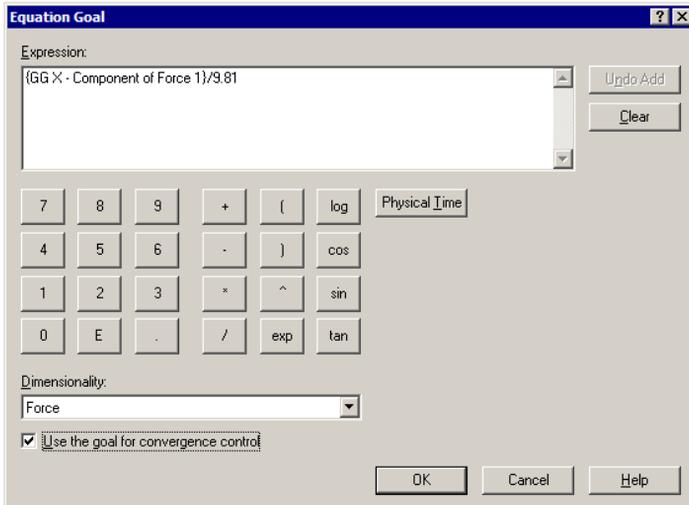


Рис. 2.11. Выражение для коэффициента C_x

Дерево проекта с целями показано на рис. 2.12.

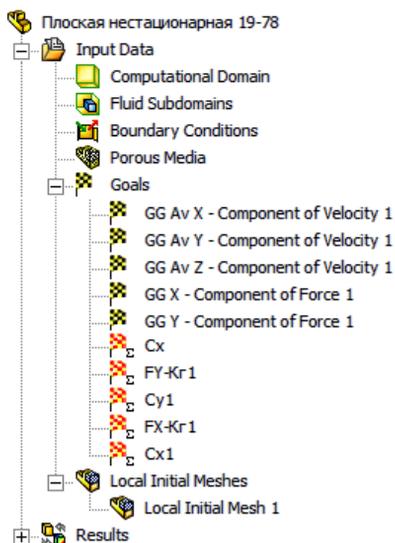


Рис. 2.12. Дерево проекта с целями

Параметры базовой сетки показаны на рис. 2.13, а сама сетка — на рис. 2.14. Никакие другие настройки на остальных вкладках, кроме **Basic Mesh** (Базовая сетка), не изменяем (относительно того, что сделала система).

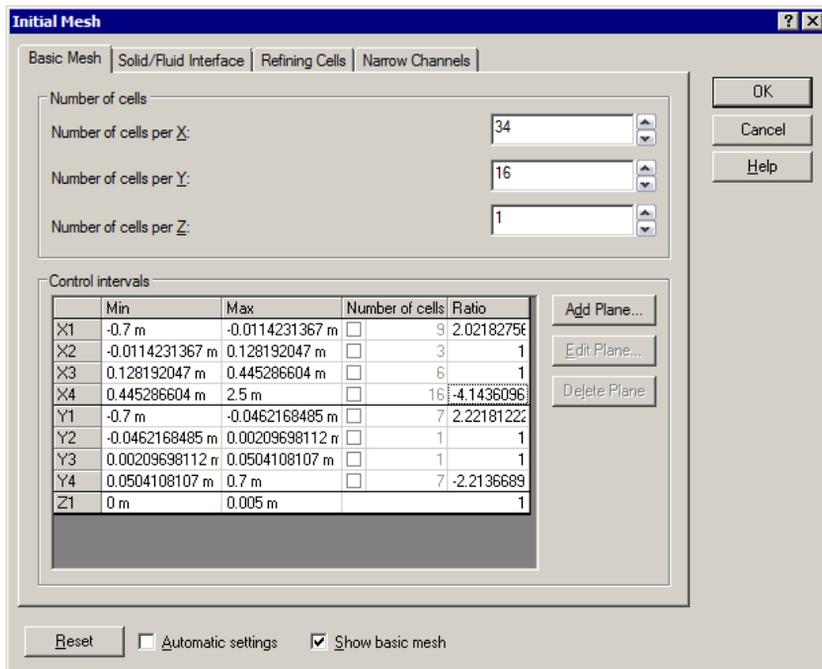


Рис. 2.13. Параметры начальной сетки

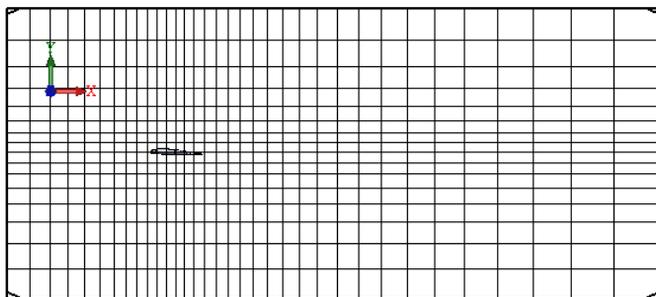


Рис. 2.14. Начальная сетка

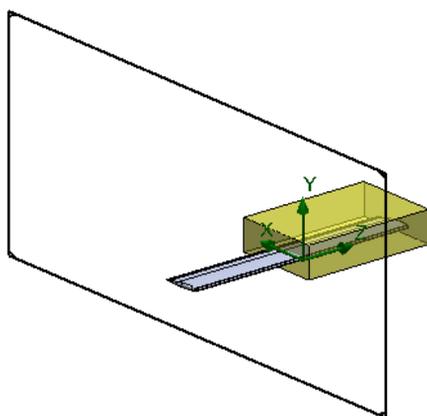


Рис. 2.15. Вспомогательное тело для локального управления сеткой

Базовая сетка выполнена достаточно редкой по той причине, что будет выполнено локальное уплотнение сетки и адаптация ее в ходе расчета. Для местного уплотнения создаем тело (деталь), охватывающую крыло, как показано на рис. 2.15. Поскольку на этом этапе исследования задача решается в плоской постановке, и размерность не имеет критического значения, то пусть вспомогательная область будет отстоять примерно на четыре толщины профиля сверху и снизу, на треть длины вперед и примерно на одну длину по ходу потока. Создавая объект локальной начальной сетки, помещаем тело в поле **Components/faces/edges/vertices to apply the local initial mesh** (Компоненты/грани/кромки/вершины для применения локальной начальной сетки) окна **Local Initial Mesh** (Локальная начальная сетка) с одновременной активизацией опции **Disable solid components** (Деактивировать твердые тела) (рис. 2.16).

На вкладке **Refining Cells** (Дробление ячеек) регулятор **Refine fluid cells** (Дробить все ячейки в текучей среде) установлен в положение 2, а **Refine partial cells** (Дробить все частичные ячейки) — в положение 5 (рис. 2.17). Тем самым приоритет отдается дроблению ячеек на границе тело/среда, что позволяет (потенциально) с достаточной адекватностью описать как геометрию, так и течение на границе.

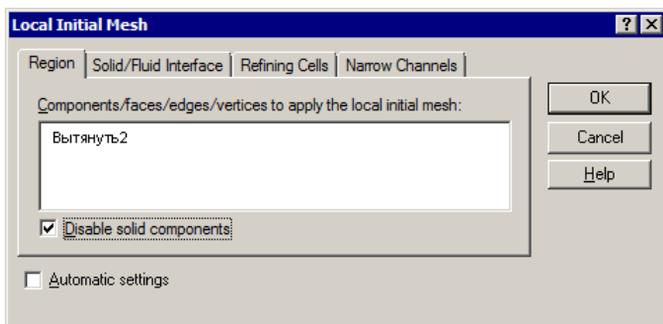


Рис. 2.16. Назначение тела для локальной адаптации сетки

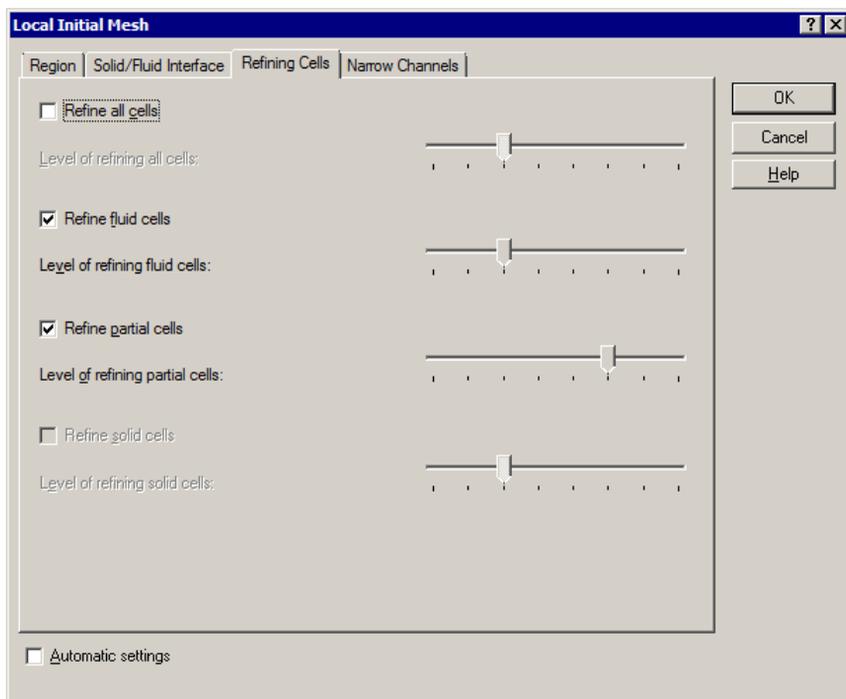


Рис. 2.17. Параметры дробления ячеек в фиктивном теле

Начальная сетка и ее фрагмент в уплотняемой области показаны на рис. 2.18, 2.19.

На первом этапе исследования выбираем адаптивную схему управления сеткой, в частности, поскольку пример с дорожкой Кармана (обтекание бесконечного цилиндра при определенных числах Рейнольдса) из учебных пособий реализован именно в такой постановке. Соответствующие настройки, выполненные в окне **Calculation Control Options** (Опции управления расчетом), показаны на рис. 2.20, 2.21: вкладка **Finish** (Завершение), на которой параметру **Minimum refinement number** (Минимальное число дроблений) присваиваем значение 2, что "заставит" алгоритм выполнить, как минимум, два шага адаптации сетки; вкладка **Refinement** (Адапта-

ция сетки), где для параметра **Refinement** (Адаптация сетки) устанавливаем значение 2, определяя допустимый уровень дополнительного дробления ячеек.

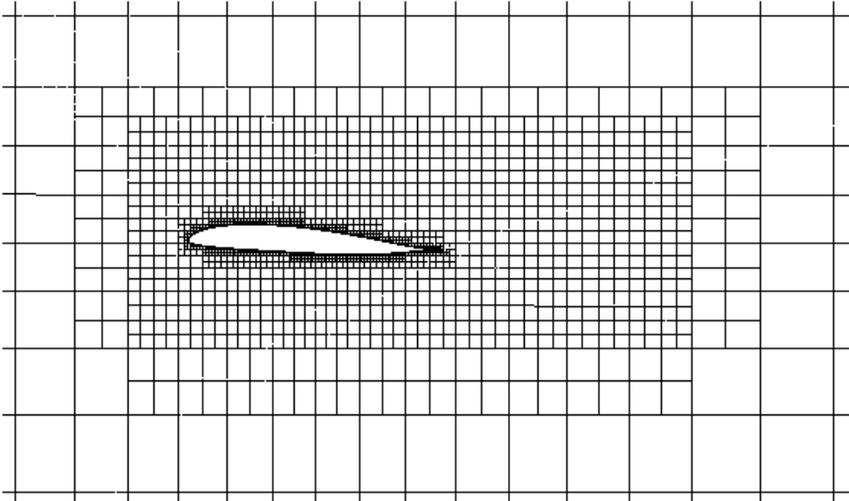


Рис. 2.18. Начальная сетка (фрагмент в области уплотнения)

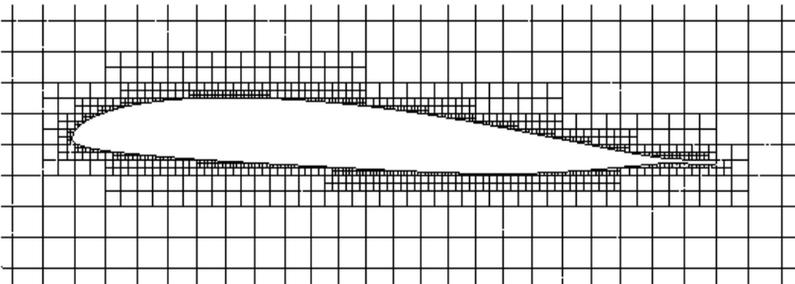


Рис. 2.19. Начальная сетка (фрагмент вокруг профиля)

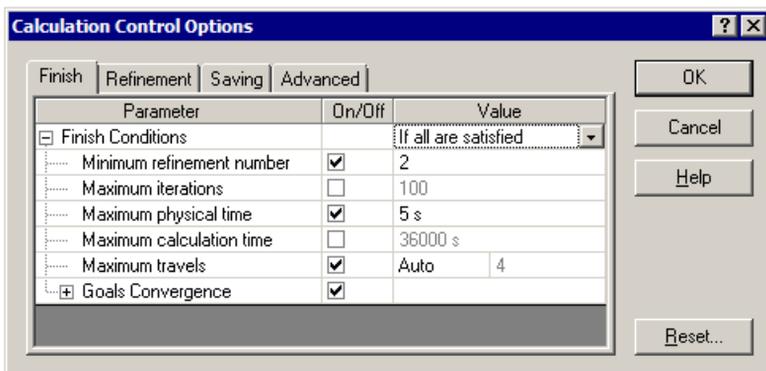


Рис. 2.20. Опции управления расчетом — критерий завершения

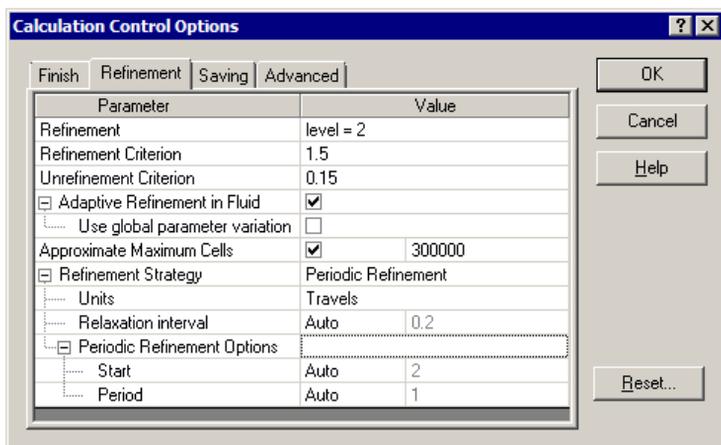


Рис. 2.21. Опции управления расчетом — параметры адаптации сетки

Как показала расчетная практика применительно к данной задаче, не следует злоупотреблять завышением уровня уплотнения. В значительной степени это относится к нестационарной постановке задачи. Дело здесь в том, что мелкие ячейки делают возможным генерацию вихрей "очень" малого масштаба, которые, влияя в определенной степени на "глобальные" аэродинамические характеристики, заставляют алгоритм занижать временной шаг. Это приводит к неприемлемым затратам ресурсов без возможности оценить состояние системы "в целом".

Расчетная сетка в конце расчета показана на рис. 2.22. Как видно, наибольшая степень уплотнения достигнута вблизи носка и задней кромки профиля. Поле скоростей для угла атаки $5,985^\circ$ показано на рис. 2.23.

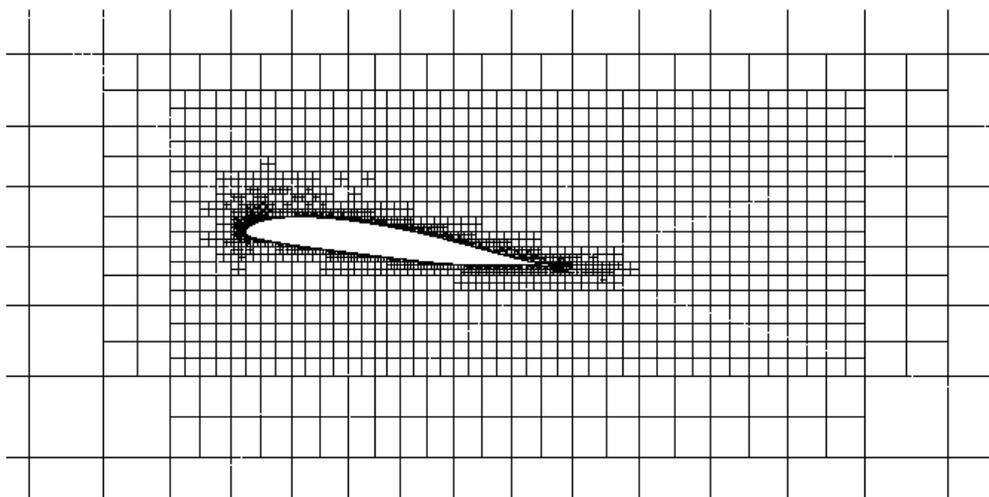


Рис. 2.22. Расчетная сетка после неоднократного адаптивного уплотнения

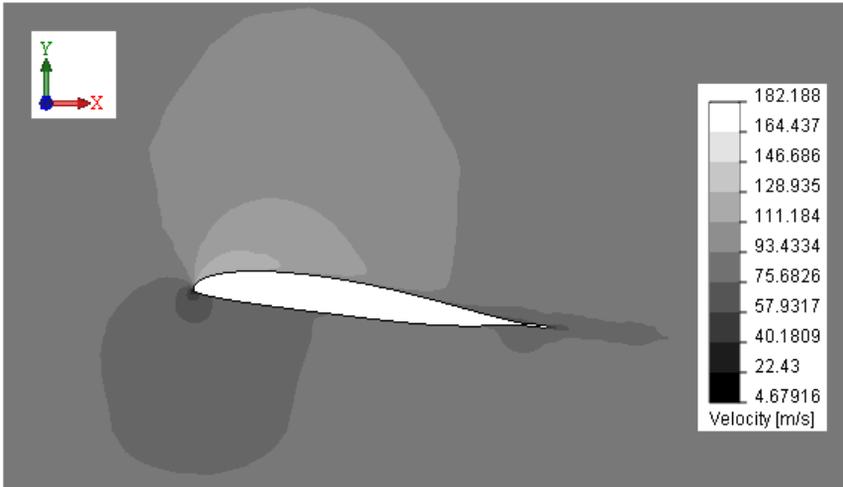


Рис. 2.23. Поле скоростей для угла атаки $5,985^\circ$ в некоторый момент времени

Графики коэффициентов C_x и C_y как функций времени показаны на рис. 2.24, 2.25. Как видно, существует очевидная зависимость этих характеристик от физического времени. Однако природа этой нестационарности двояка. Ее обуславливают два фактора: первый — собственно сход вихрей, которые присутствуют даже при безотрывном обтекании крыла. В дополнение к "реальным" вихрям имеет место локальная нестационарность, порождаемая особенностями численной модели. Вторым значимым фактором, порождающим флуктуации на графике, является адаптация сетки, которая может приводить к ощутимому изменению картины обтекания и, в частности, силовых характеристик. Модель претерпела как минимум четыре шага адаптации на протяжении расчетного интервала времени. Как видно, в конце интервала целевая функция демонстрирует высокочастотные флуктуации. Как представляется, это обусловлено в том числе и тем, что произошло измельчение ячеек вблизи носка и конца профиля, что привело к значительному различию их размеров относительно ячеек на удалении. Такая разница есть источник потенциальной вычислительной неустойчивости.

Еще одним неприятным следствием измельчения ячеек является радикальное уменьшение шага по времени, который составил тысячные доли секунды. В совокупности с возросшей размерностью задачи это отрицает анализ сколь-нибудь значимых интервалов времени. Выходом мог бы стать подбор "разумных" параметров адаптации — ее уровня (предельного числа дроблений ячейки) и максимально допустимого числа ячеек, а также ручное назначение шага по времени. Здесь, однако, требуется трудоемкий вычислительный эксперимент и достаточно квалифицированное исполнение.

Неоднозначными являются и результаты для расчетного случая при малых отрицательных углах атаки (в данном случае он равен $-0,973^\circ$). Сетка после нескольких шагов адаптации показана на рис. 2.26. Область возмущения потока (она иден-

тифицируется как зона с уплотненной сеткой) простирается за крылом на расстояние большее, чем полторы длины хорды, причем сетка существенно измельчена. В отличие от предыдущей модели, здесь адаптация привела к качественным изменениям результата: в ходе времени (по сути, из-за адаптации сетки) подъемная сила изменила знак с отрицательного на положительный (рис. 2.28). При этом коэффициент лобового сопротивления, будучи достаточно стабильным на протяжении начального периода времени, проявил ощутимые осцилляции после некоторого шага адаптации (рис. 2.27).

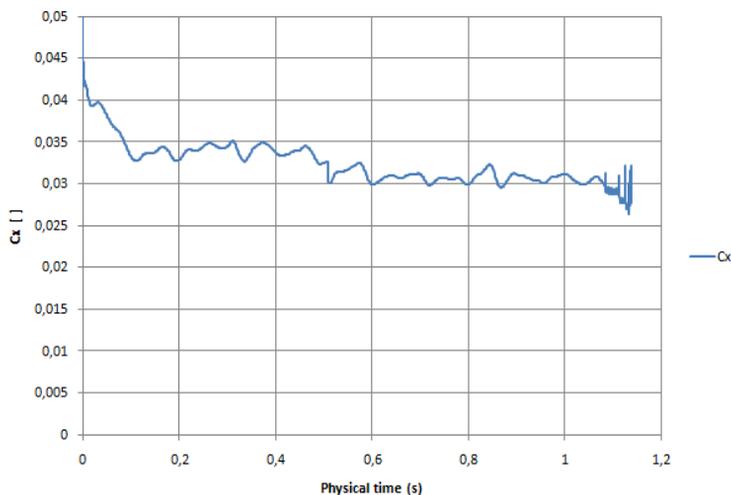


Рис. 2.24. Зависимость коэффициента лобового сопротивления от времени

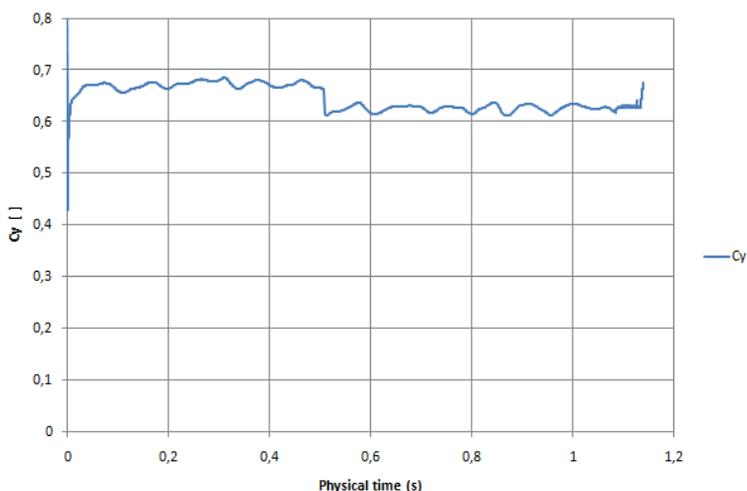


Рис. 2.25. Зависимость коэффициента подъемной силы от времени

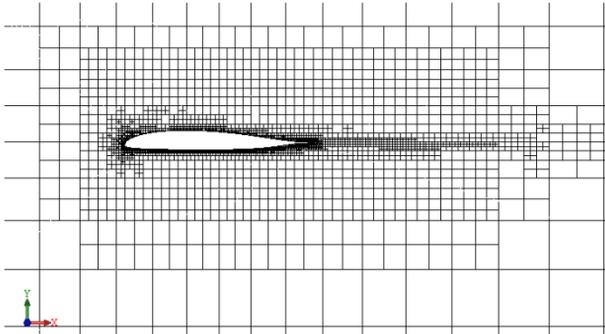


Рис. 2.26. Расчетная сетка после неоднократного адаптивного уплотнения для модели с малым отрицательным углом атаки

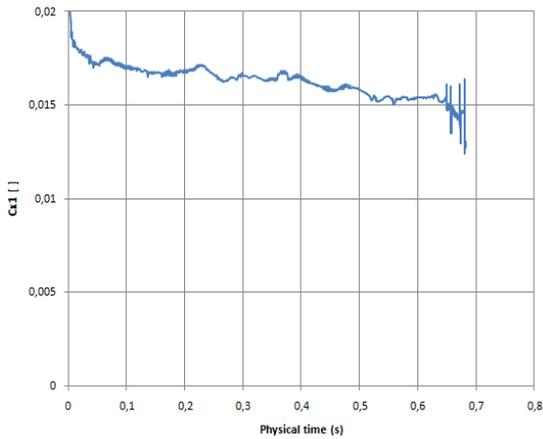


Рис. 2.27. Зависимость коэффициента лобового сопротивления от времени для малого отрицательного угла атаки

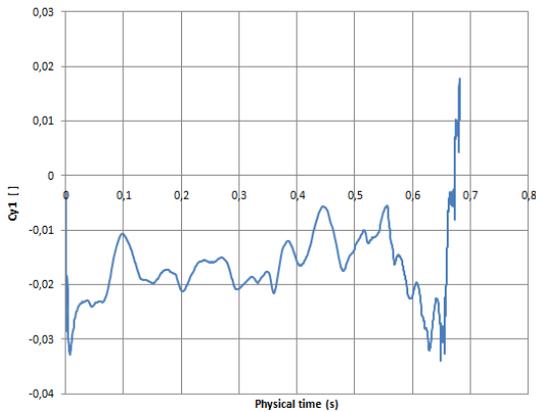


Рис. 2.28. Зависимость коэффициента подъемной силы от времени для малого отрицательного угла атаки

Поле скорости для модели с углом атаки $-0,973^\circ$ показано на рис. 2.29.

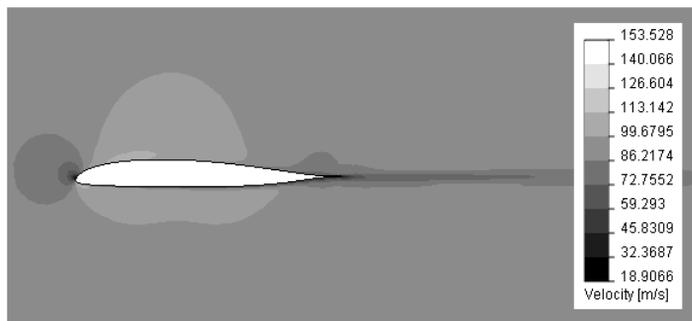


Рис. 2.29. Поле скорости для модели с отрицательным углом атаки $-0,973^\circ$

2.1.3. Стационарная модель для крыла конечного размаха

Учитывая нетривиальность настроек для модели нестационарного течения, а также необходимость расчета подъемной силы для крыла конечного размаха, а не для бесконечного крыла, будем рассматривать пространственную модель половины крыла. Расчетная модель похожа на показанную на рис. 2.9, за исключением того что расчетная область охватывает половину крыла, а также простирается на достаточно значительное расстояние от его конца (рис. 2.30). Кроме того, в отличие от плоской модели, где проблема размерности менее актуальна, введено не одно, а два фиктивных тела, позволяющих более эффективно управлять плотностью расчетной сетки. Первое из тел ограничено эквидистантой к поверхности крыла, второе — охватывающий предыдущее тело параллелепипед, вытянутый вдоль потока.

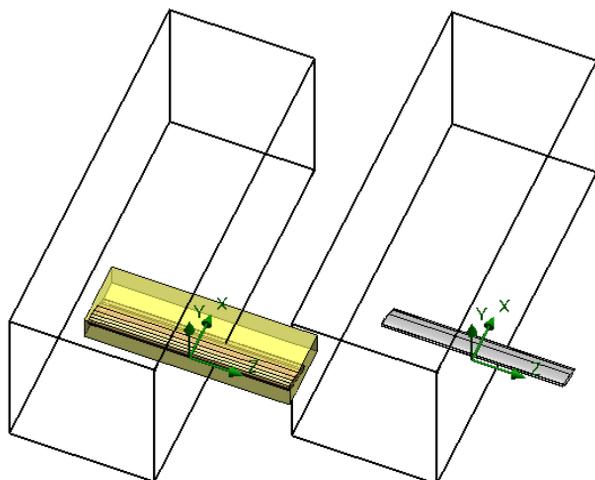


Рис. 2.30. Расчетная область и геометрическая модель с телами для уплотнения сетки и без них

Для управления плотностью сетки в окрестности крыла в большем объеме применяем следующие настройки: в окне **Local Initial Mesh** (Локальная расчетная сетка) на вкладке **Refining Cells** (Дробление ячеек) регуляторы **Level of refining fluid cells** (Уровень дробления всех ячеек в текучей среде) и **Level of refining partial cells** (Уровень дробления всех частичных ячеек), после включения опций **Refine fluid cells** (Дробить все ячейки в текучей среде) и **Refine partial cells** (Дробить все частичные ячейки) соответственно, устанавливаем в положение 2 (рис. 2.31).

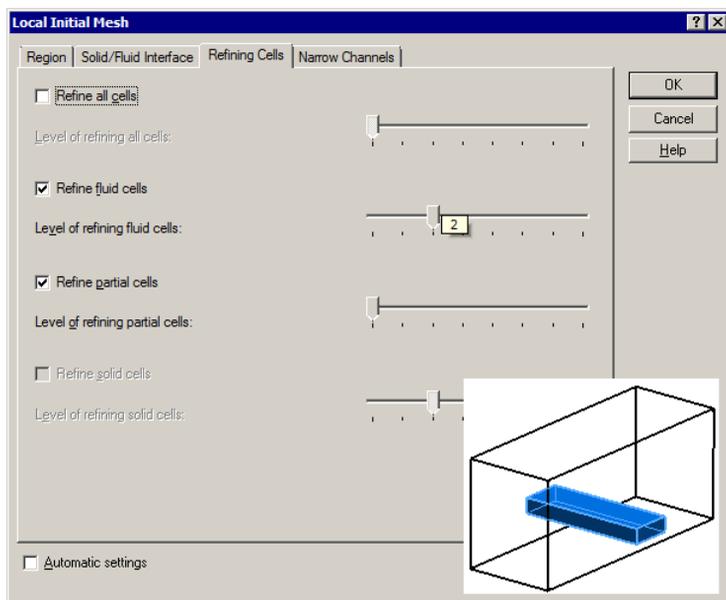


Рис. 2.31. Параметры локальной сетки для внешнего дополнительного объема

Для вспомогательного объема, непосредственно охватывающего крыло, следует добиться более плотной сетки. Поэтому локальные настройки на вкладке **Refining Cells** (Дробление ячеек), касающиеся ячеек в текучей среде и мелких ячеек, устанавливаем на уровень 4 (рис. 2.32). Также необходимо получить качественную аппроксимацию геометрии, для чего на вкладке **Solid/Fluid Interface** (Поверхность раздела твердых тел с текучей средой) выставляем ползунковый переключатель **Curvature refinement level** (Уровень разрешения сеткой кривизны поверхности) — он контролирует максимальный уровень дробления ячеек базовой сетки — на уровень 3, а в поле **Curvature refinement criterion** (Критерий разрешения сеткой кривизны поверхности) выбираем величину 2. Последнее означает, что допустимый максимальный угол между нормальными к поверхности модели в расчетной ячейке, который используется в качестве критерия разрешения начальной расчетной сеткой кривизны поверхности модели, не может превышать 3° (рис. 2.33).

Также, стремясь достичь соответствия геометрической модели и расчетной сетки, параметру **Tolerance refinement criterion** (Критерий разрешения сеткой выступов поверхности) присваиваем величину 0,0001 м (рис. 2.33). Этим мы устанавливаем допустимую максимальную выпуклость (расстояние поверхности модели в ячейке относительно плоского многоугольника, аппроксимирующего эту поверхность в ячейке).

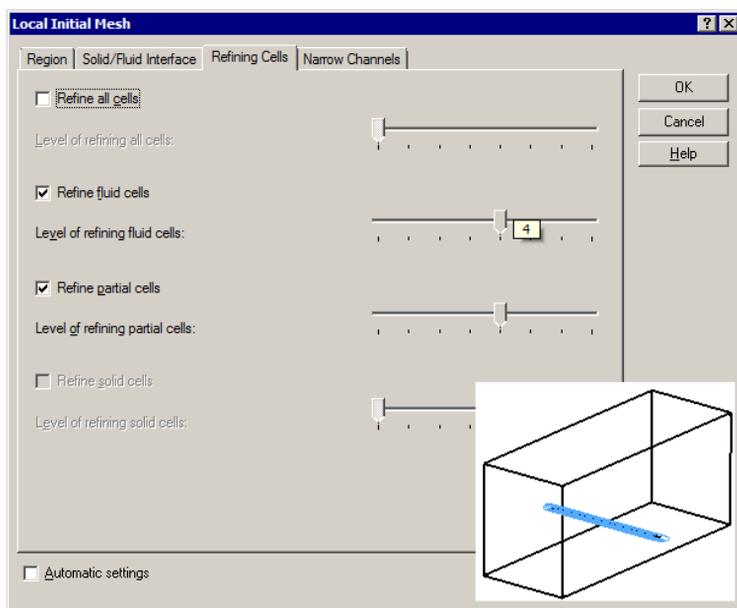


Рис. 2.32. Параметры локальной сетки для внутреннего дополнительного объема

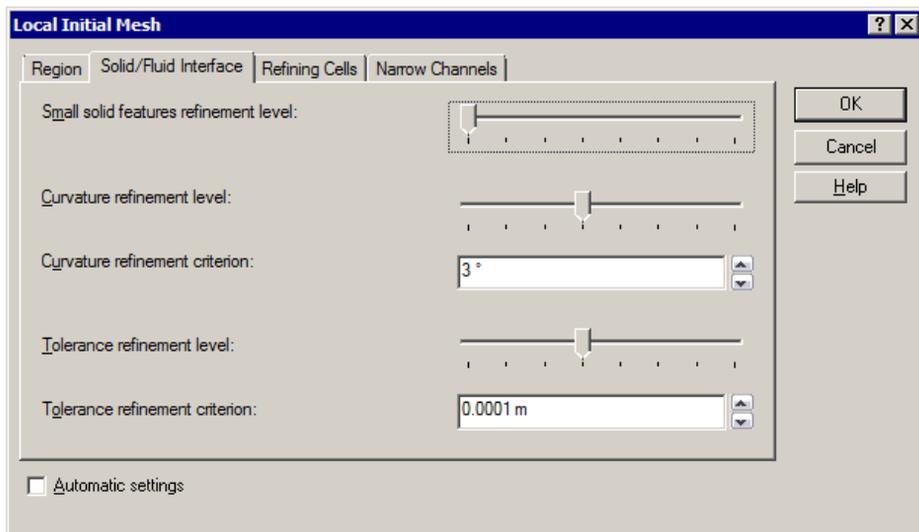


Рис. 2.33. Параметры локальной сетки для границы между телом и средой в дополнительном объеме

Начальная сетка и ее фрагмент в зоне профиля (фактически сечение сетки посередине крыла) показаны на рис. 2.34, 2.35.

Как видно из рис. 2.36, 2.37, максимальное доступное уплотнение сетки произведено вдоль носка и по спинке. Также сетка отследила зону возмущения в следе.

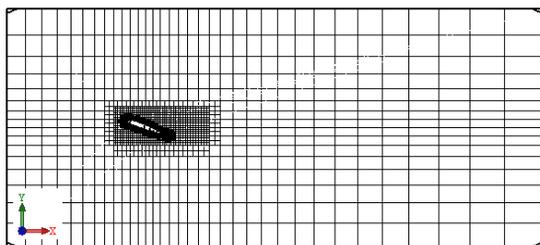


Рис. 2.34. Начальная сетка в сечении пространственной модели

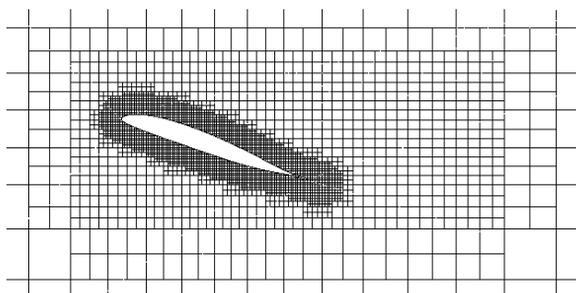


Рис. 2.35. Фрагмент базовой сетки

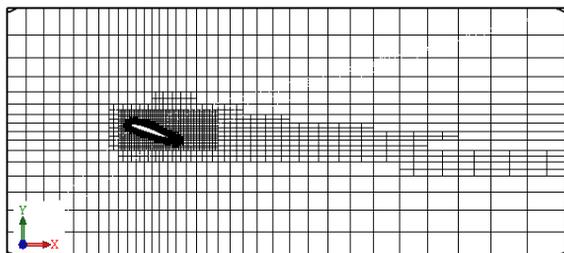


Рис. 2.36. Сетка после двух шагов адаптации

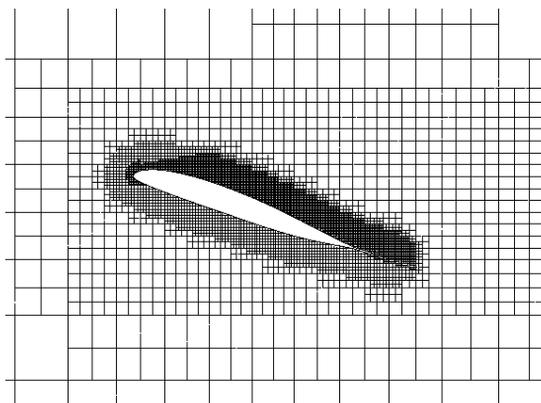


Рис. 2.37. Фрагмент сетки после двух шагов адаптации

Поле скоростей в векторном представлении показано на рис. 2.38. На рис. 2.39 отчетливо виден развитый вихрь за спинкой профиля.

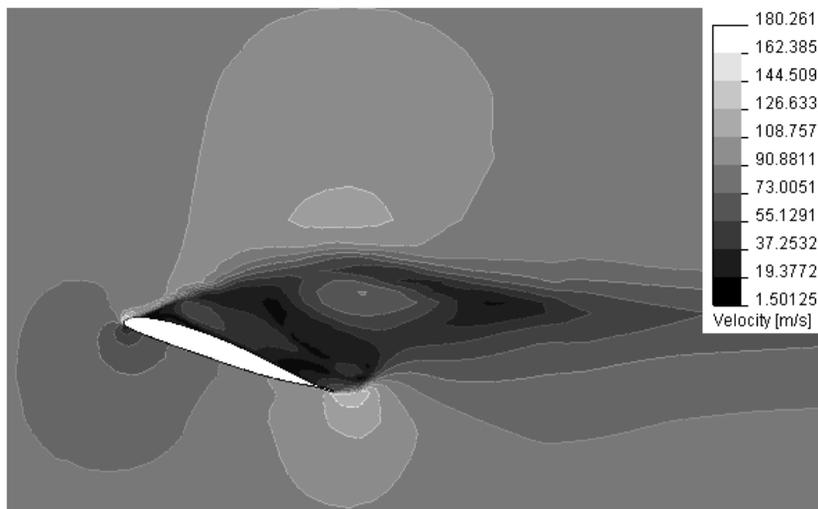


Рис. 2.38. Диаграмма скорости

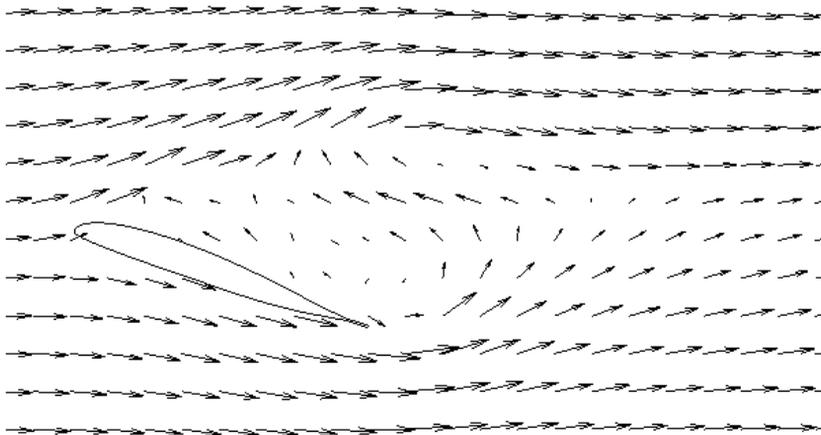


Рис. 2.39. Векторное представление скорости

Если в опциях панели **Cut Plot** (Картина в сечении) активизировать опцию **Display Boundary Layer** (Показывать пограничный слой) (рис. 2.40), то становится видно, что вихрь является продолжением оторвавшегося пограничного слоя (рис. 2.41).

Кривые зависимости коэффициентов подъемной силы и лобового сопротивления показаны на рис. 2.42, 2.43. Как видно, достигнута только "глобальная" сходимость. Присутствуют существенные периодические колебания, обусловленные развившимся вихреобразованием. Также видно, что адаптация сетки в большей степени повлияла на величину C_y , чем на C_x .



Рис. 2.40. Настройка отображения пограничного слоя

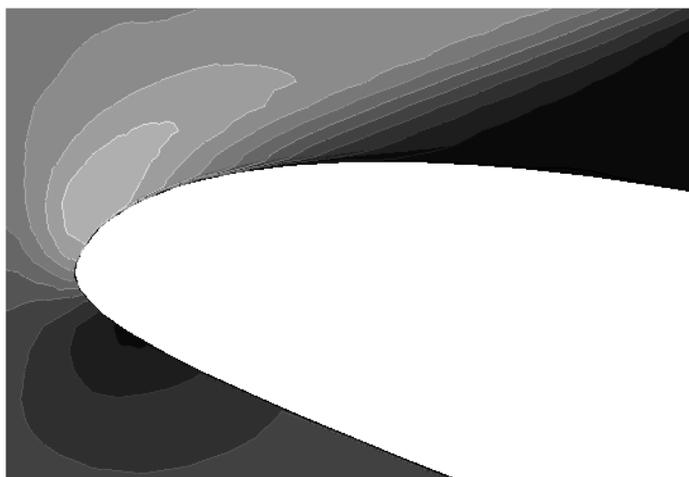


Рис. 2.41. Носок крыла с отображенным пограничным слоем в диаграмме скорости

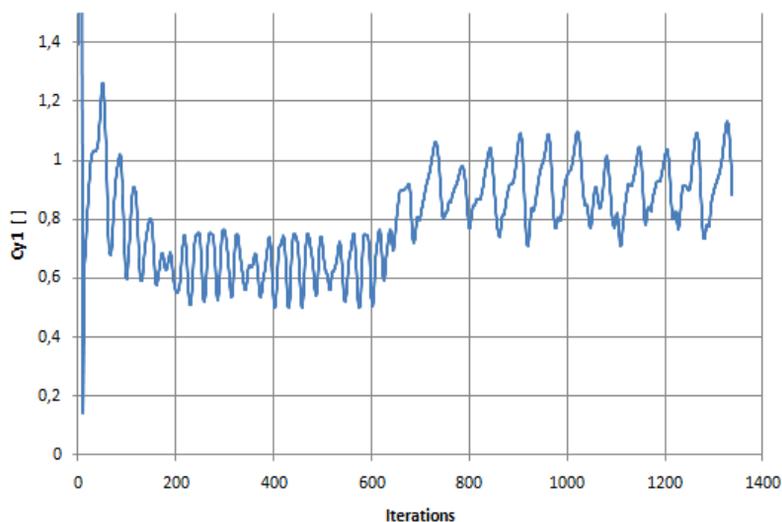


Рис. 2.42. Зависимость коэффициента подъемной силы от номера итерации для угла атаки $17,78^\circ$

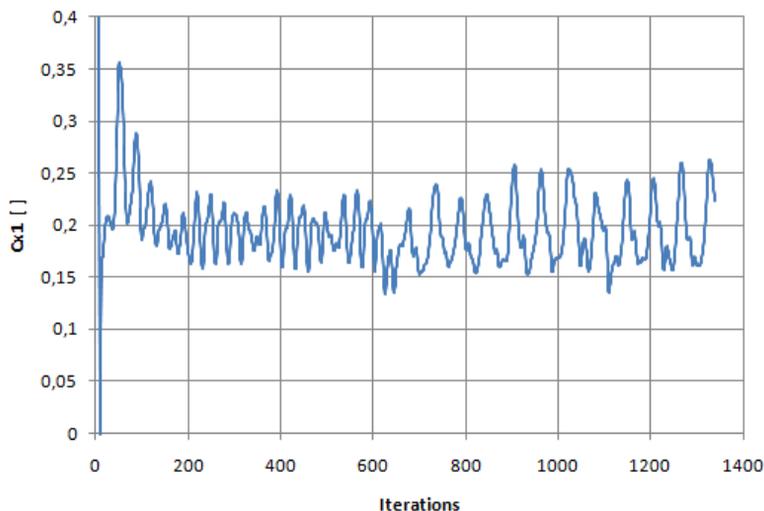


Рис. 2.43. Зависимость коэффициента лобового сопротивления от номера итерации для угла атаки $17,78^\circ$

В связи с наличием пульсаций (в данном случае периодических) возникает вопрос о том, как идентифицировать результирующее значение искомой характеристики — коэффициентов сопротивления.

Использование нестационарной постановки с последующим осреднением на некотором интервале времени, в течение которого осуществляется несколько пульсаций, труднореализуемо из-за роста размерности. Можно было бы подоб-

рвать плотность сетки в областях, покрывающих вероятное распространение возмущений с одновременным же назначением (по сути, подбором) фиксированного шага по времени. Он должен быть достаточно мал, чтобы адекватно описывать поведение возмущений "значимого" масштаба, а с другой стороны — достаточно велик, чтобы расчет выполнялся при доступных вычислительных ресурсах. Одним из приближений является использование результатов стационарного расчета с адаптивной сеткой. Однако здесь встает вопрос о том, какая величина функции соответствует реальности.

Алгоритм решения стационарной задачи, в первом приближении его описания, фактически решает нестационарную задачу, причем каждая ячейка характеризуется собственным значением локального времени. По этой причине вычислительные пульсации в стационарном режиме в ходе итераций являются своего рода имитацией реальных пульсаций в "живом" времени, и локальное значение функции не является объективной характеристикой процесса. Вместо него следует использовать величину **Averaged Value** (Среднее значение). В справочной системе программы эта характеристика трактуется как среднее значение цели в пределах **Analysis Interval** (Интервал анализа). Физическим смыслом (в первом приближении) этой характеристики является множество итераций (или интервал реального времени в нестационарном расчете), в пределах которого вычисляются параметры системы в данный момент.

Визуализировать **Analysis Interval** можно в ходе выполнения расчета в окне **Goal Plot** (График целей) (рис. 2.44), если из контекстного меню графической зоны окна вызвать окно **Goal Plot Settings** (Установки графика целей) и отметить опцию **Show analysis interval** (Показать интервал анализа) (рис. 2.45).

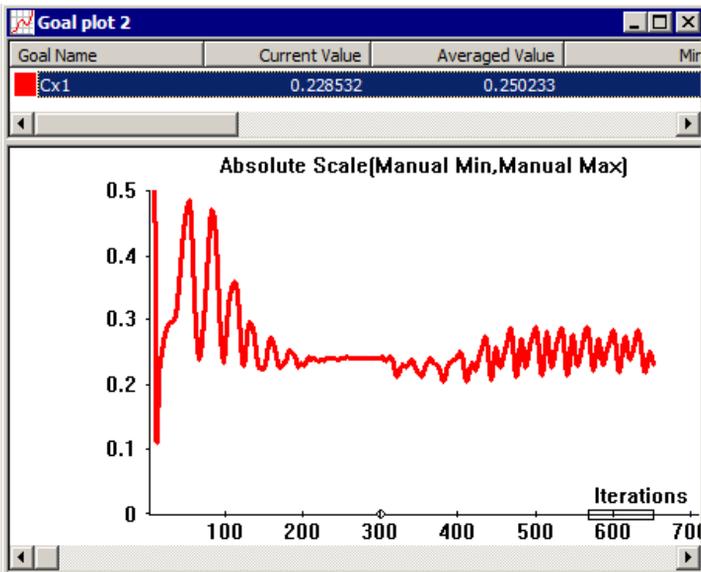


Рис. 2.44. График сходимости цели с отображенным интервалом анализа

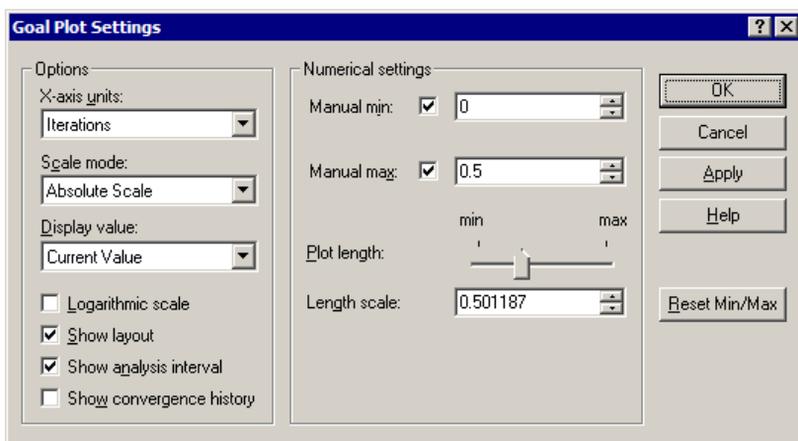


Рис. 2.45. Отображение интервала анализа

Конечное значение **Averaged Value** можно увидеть в одноименном поле в таблице целей, которая доступна посредством вызываемого окна MS Excel (для этого нужно подать команду **Edit Definition** (Редактировать определение) контекстного меню пиктограммы соответствующей цели в Дереве проектирования). Фрагмент соответствующей таблицы приведен на рис. 2.46.

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Delta
Cy1	[]	0,8829272	0,942696195	0,73352563	1,132507028	0,057425
Cx1	[]	0,223658	0,199416927	0,157101163	0,263182351	0,014429

Рис. 2.46. Значения целей как результат расчета

Графики зависимости подъемной силы и лобового сопротивления от угла атаки для эксперимента и модели крыла конечного размаха показаны на рис. 2.47, 2.48. Как видно, достигнуто удовлетворительное соответствие результатов в целом. В то же время различие составляет в среднем около 20%. С достаточной точностью идентифицируется критический угол атаки, однако в расчетной модели отрыв пограничного слоя "наступает" несколько позже, соответственно расчетный критический угол атаки несколько больше.

Одним из источников несоответствия может быть неэквивалентность пользовательских параметров начальной турбулентности набегающего потока фактическим их значениям. Начальная турбулентность может определяться одной из двух пар характеристик: **Turbulence intensity and length** (Интенсивность турбулентности и Турбулентная длина) или **Turbulence energy and dissipation** (Турбулентная энергия и диссипация). Они назначаются в соответствующих полях окна **General Settings** (Общие установки) (рис. 2.49). Данные настройки, связанные с особенностями работы конкретной экспериментальной установки и особенностями модели, оказывают существенное влияние на результат, в частности состояние модели в около- и закритических режимах.

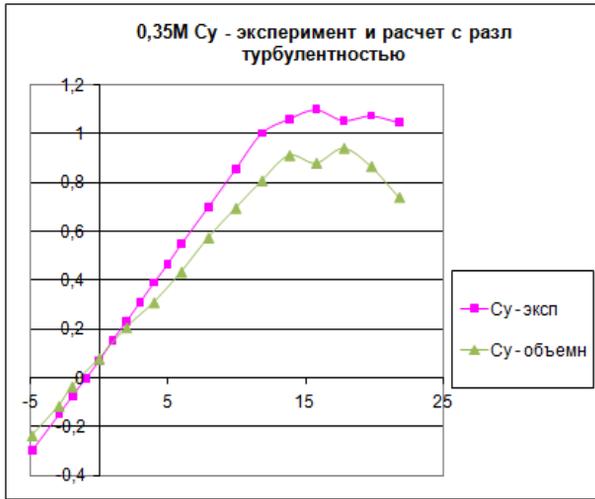


Рис. 2.47. Зависимость C_y от угла атаки при 0,35 М — эксперимент и расчет

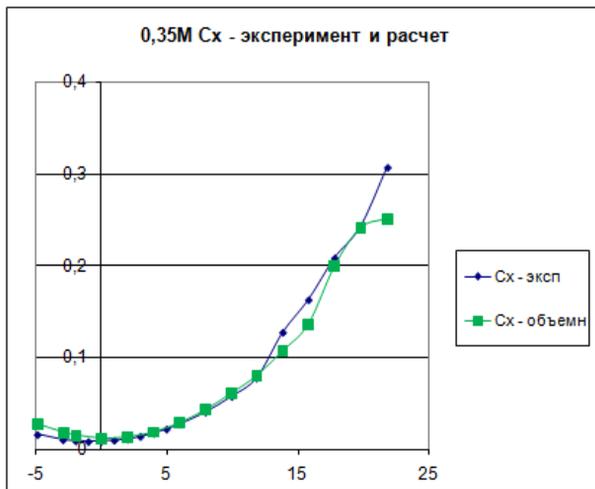


Рис. 2.48. Зависимость C_x от угла атаки при 0,35 М — эксперимент и расчет

Помимо причин, связанных с погрешностями расчетной методики — объективных (обусловленных несовершенством инструмента) и субъективных (порожденных неточностями в постановке задачи и выборе настроек программы), нельзя исключить и наличие погрешностей в проведении эксперимента. Также источником отличий может быть то, что расчетная модель имитировала бесконечный объем, в то время как аэродинамическая труба имеет конечный размер.

Если отобразить линии тока, пересекающие "переднюю" грань вспомогательного параллелепипеда, то результат будет выглядеть, как показано на рис. 2.50, 2.51. Отчетливо видна вихревая структура потока на конце крыла, что является источником индуктивного сопротивления.

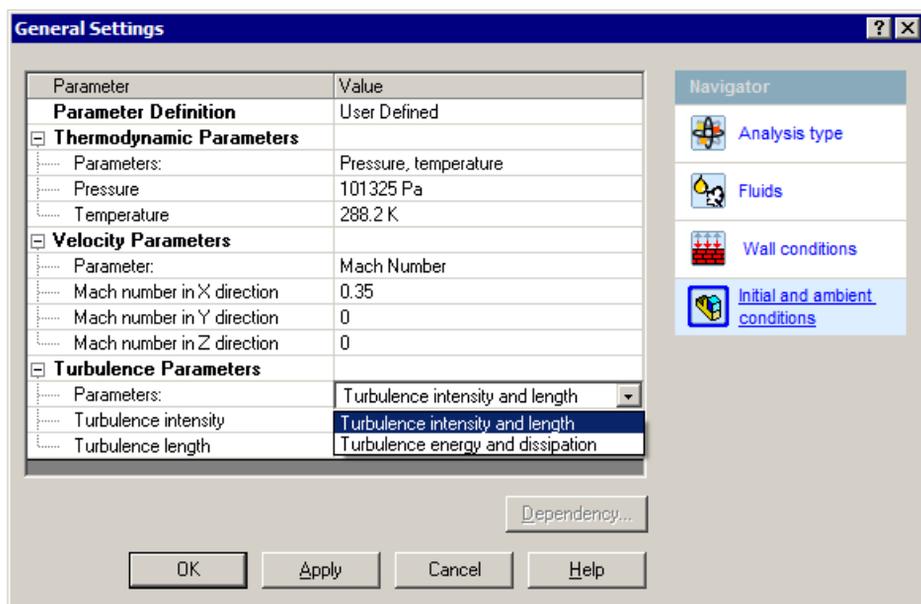


Рис. 2.49. Назначение параметров начальной турбулентности

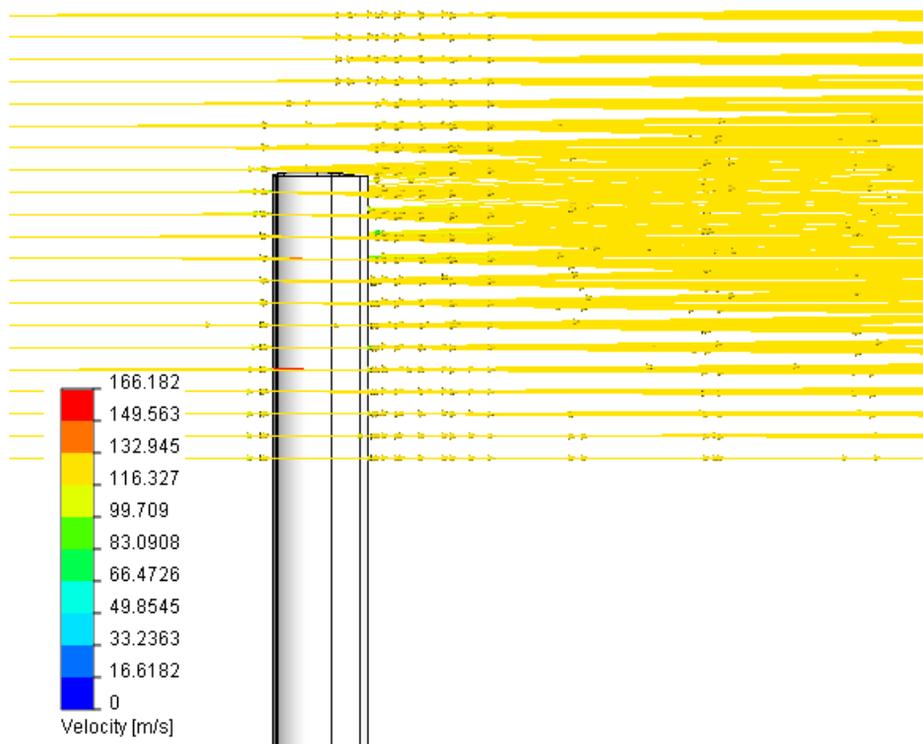


Рис. 2.50. Линии тока, вид сверху

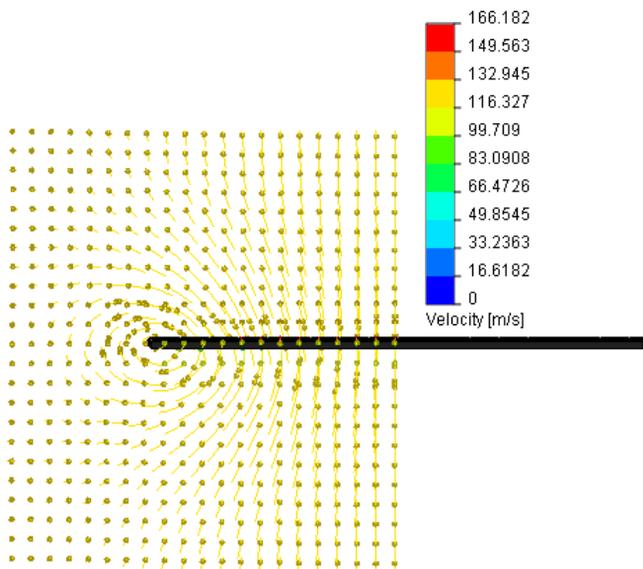


Рис. 2.51. Линии тока, вид спереди

2.1.4. Крыло конечного размаха при 0,8 М

Увеличим скорость набегающего потока до 0,8 М (рис. 2.52). Остальные настройки (стационарная модель, адаптация сетки по команде пользователя, плотность сетки) наследуем из модели для 0,35 М. После запуска на счет в мониторе решателя появляется предупреждение: "Supersonic flow is detected within a considerable number of cells. Use of manual stopping criteria is recommended" (Сверхзвуковое течение диагностировано в значительном числе ячеек. Использование пользовательского критерия остановки рекомендуется).

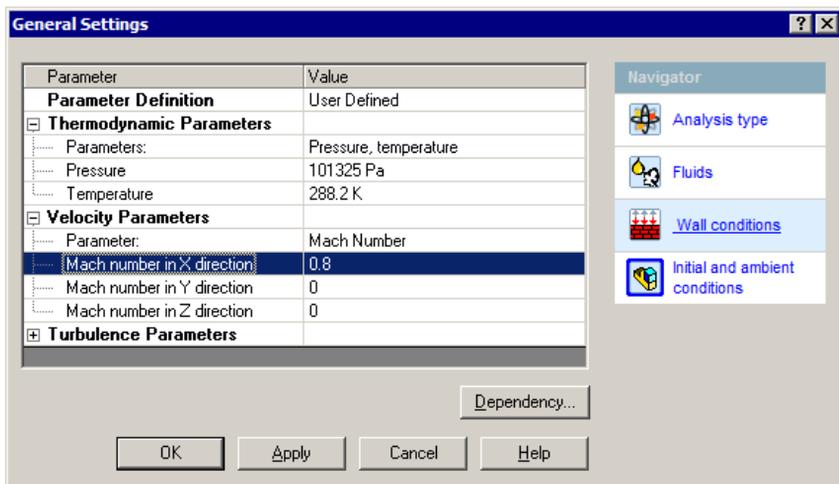


Рис. 2.52. Граничные условия для расчета с 0,8 М

В соответствии с рекомендациями справочной системы программы, если максимальная скорость течения газа в задаче превышает число Маха (3 для стационарной или 1 для нестационарной), то необходимо отметить опцию **High Mach number flow** (Течение с большим числом Маха) в окне Мастера проектов или общих установок. При этом не рекомендуется включать опцию **High Mach number flow** 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 программа выдает соответствующее предупреждение. В процессе решения пользователь будет информирован о том, превышает ли максимальная скорость потока указанные значения числа Маха или нет. Имейте в виду, что указание **High Mach number flow** для низкоскоростного течения газа (максимальное число Маха $M < 1,5$) может привести к снижению точности расчета.

Если продолжить расчет, то выяснится, что максимальная скорость в диапазоне углов атаки от -2° до $+6^\circ$ составляет $1,4 M$, что делает использование модели с большим числом Маха неактуальной. Однако остановку расчета следует осуществлять вручную на основе анализа процесса сходимости в зависимости от истории адаптации сетки.

Отменить автоматическую остановку можно в окне **Calculation Control Options** (Опции управления расчетом) на вкладке **Finish** (Завершение): выбрать для параметра **Finish Conditions** (Условие завершения) значение **If all are satisfied** (Если все удовлетворены) и назначить полно **Maximum iterations** (Максимальное число итераций) достаточную величину (рис. 2.53).

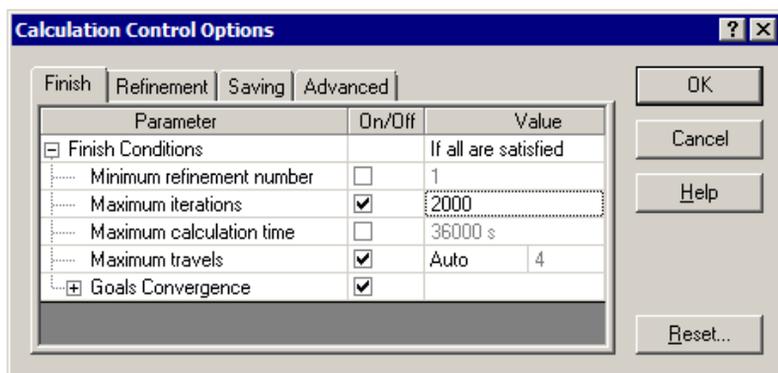


Рис. 2.53. Корректировка условий завершения процесса

Графики зависимости подъемной силы и лобового сопротивления от угла атаки в упомянутом диапазоне углов атаки приведены на рис. 2.54, 2.55. Как видно, в целом эксперимент достаточно хорошо согласуется с расчетом. Наибольшее отличие наблюдается для C_y при отрицательных углах атаки.

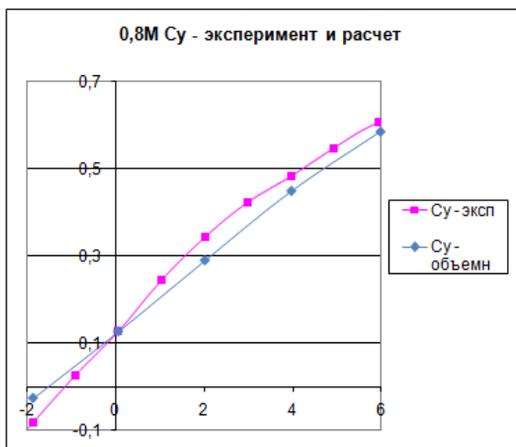


Рис. 2.54. Зависимость C_y от угла атаки при 0,8 М — эксперимент и расчет

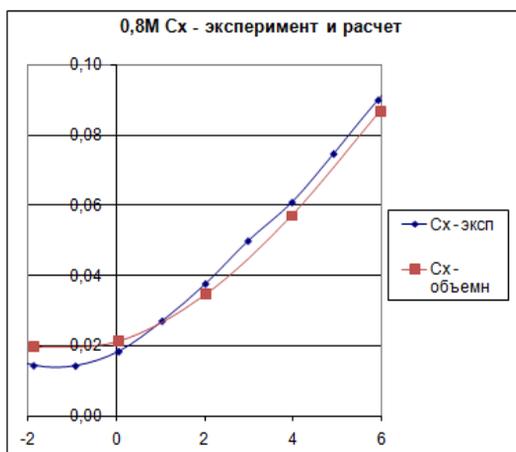


Рис. 2.55. Зависимость C_x от угла атаки при 0,8 М — эксперимент и расчет

2.1.5. Модифицированная расчетная модель

Служба поддержки SolidWorks Corp. периодически (несколько раз в год) выпускает Базу знаний по инженерному анализу SolidWorks Simulation Knowledge Base, в которой разбираются характерные вопросы, имеющие неоднозначное решение. В одном из выпусков, в частности, приводятся соображения по расчету аэродинамических сопротивлений. Рекомендации следующие:

- Желательно, чтобы линия хорды совпадала с линией (плоскостью) базовой сетки.
- Хвостовая кромка профиля должна располагаться в вершине сетки. Применительно к нашему случаю, где эта кромка является плоской прямоугольной гранью, перпендикулярной хорде, это требование может быть переформулировано, как совпадение этой грани с плоскостью базовой сетки.

- ❑ Сетка должна быть более плотной в зоне носка и хвостика. Также следует уплотнять сетку в зонах с высокой (потенциально) турбулентностью.
- ❑ При изучении зависимости аэродинамических характеристик от угла атаки желательно изменять направление потока, а не вращать крыло.
- ❑ Минимальные размеры расчетной области таковы, что начало должно отступать от носка на две хорды, конец — на три от хвостика и горизонтальные границы — на две хорды соответственно.

Как представляется, все идеи, относящиеся к сетке, могут быть вполне реализованы посредством ее адаптации в ходе расчета. При этом желательно установить достаточно высокий уровень адаптации — число этапов дробления ячеек (следует, однако, помнить, что подвергнутая адаптации ячейка дробится тремя плоскостями, образуя $2^3 = 8$ меньших ячеек, а после двух адаптаций может образоваться $8^3 = 64$ ячейки). Некоторые иллюстрации, делающие эти соображения более наглядными, приведены далее.

Посмотрим, как повлияет на зависимость аэродинамических характеристик от угла атаки замена поворота крыла в модели изменением направления потока. Следует отметить, что простым изменением граничных условий в окне **General Settings** (Общие установки) дело не ограничится. Допустим, что угол атаки крыла составляет α . Тогда компоненты скорости в граничных условиях будут вычисляться как:

$$v_x = v \times \cos(\alpha);$$

$$v_y = v \times \sin(\alpha).$$

Например, для угла атаки $9,941^\circ$ граничные условия будут выглядеть, как показано на рис. 2.56.

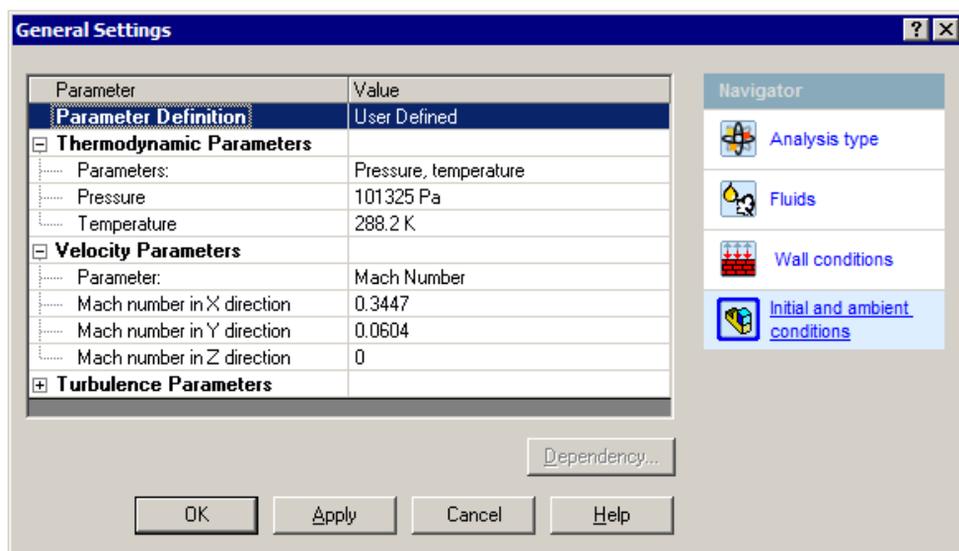


Рис. 2.56. Условия на границах расчетной области

Также необходимо скорректировать компоненты силы X и Y в выражениях для аэродинамических коэффициентов C_x , C_y , подставив в них составляющие силы X' , Y' (определенные в системе координат, связанной с направлением потока):

$$X' = X \times \cos(\alpha) - Y \times \sin(\alpha);$$

$$Y' = X \times \sin(\alpha) - Y \times \cos(\alpha).$$

Кстати говоря, можно аэродинамические коэффициенты вычислить на основе компонентов сил, диагностированных в глобальной системе координат, после чего C'_x , C'_y рассчитываются по аналогичным формулам.

Пример поля скоростей для угла атаки $9,941^\circ$ с векторами скорости показан на рис. 2.57.

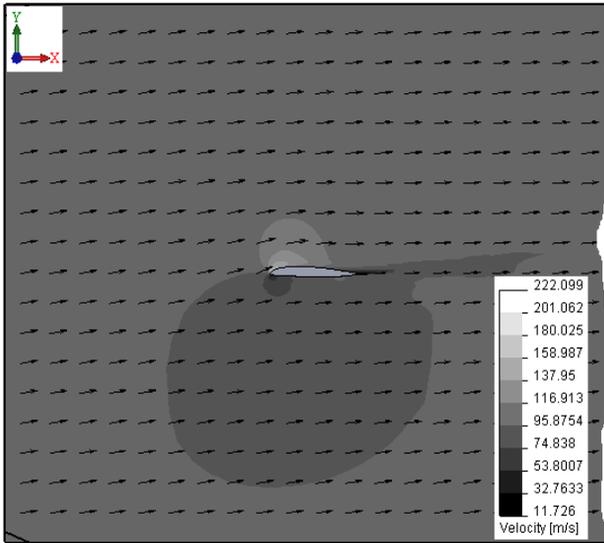


Рис. 2.57. Линии тока для угла атаки $9,941^\circ$

Фрагмент сетки возле носка после двух адаптаций при максимальном уровне дробления 2 показан на рис. 2.58, а в зоне хвостика — на рис. 2.60. Если же после этого выполнить еще два шага адаптации, повысив при этом максимальный уровень до 3, то результат будет выглядеть, как показано на рис. 2.59, 2.61. Следует подчеркнуть, что оценка C_y при этом увеличилась примерно на 5%, а C_x — на 3%.

Результирующие диаграммы, посредством которых можно оценить влияние способа "изменения" угла атаки, показаны на рис. 2.62, 2.63. Как видно, лобовое сопротивление весьма малочувствительно к тому, "вращается" ли крыло или же изменяется направление потока. Подъемная сила более существенно зависит от алгоритма, причем оценка с "вращающимся" потоком несколько ближе к эксперименту, особенно в зоне отрицательных и малых положительных углов атаки. Следует отметить, что этот подход является более объективным с точки зрения зависимости характеристик от некоторого параметра, поскольку все вычислительные эксперименты осуществляются с одной и той же сеткой, в то время как изменение геометрии сопровождается перестроением сетки.

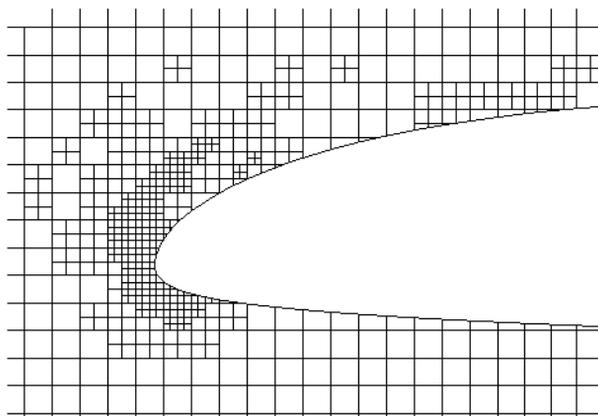


Рис. 2.58. Фрагмент расчетной сетки в зоне носка после двух адаптаций

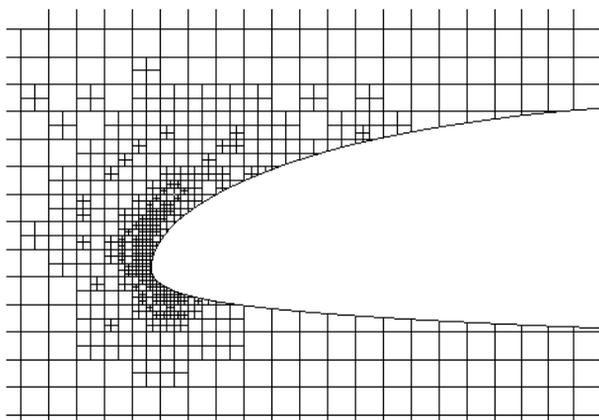


Рис. 2.59. Фрагмент расчетной сетки в зоне носка после двух адаптаций с уровнем 3

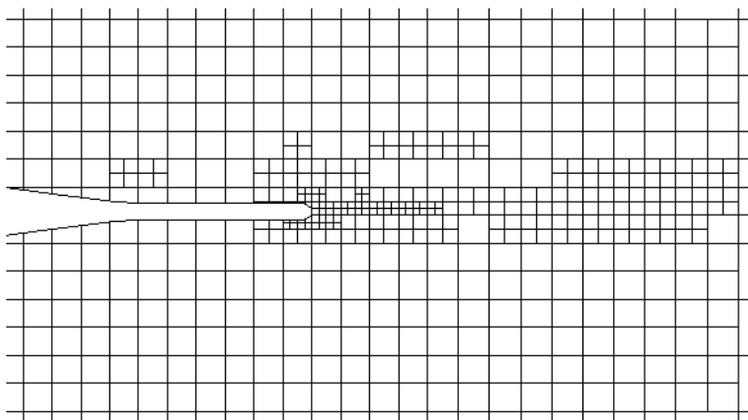


Рис. 2.60. Фрагмент расчетной сетки в зоне хвостика после двух адаптаций с уровнем 2

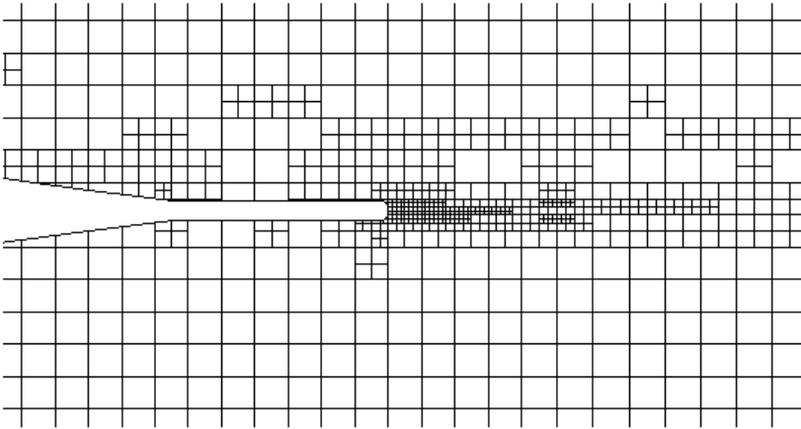


Рис. 2.61. Фрагмент расчетной сетки в зоне хвостика после трех адаптаций с уровнем 3

Определенным недостатком схемы с изменением направления потока является то, что при больших углах атаки требуется увеличивать размер расчетной области в вертикальном направлении. Это сопровождается ощутимым ростом размерности задачи.

Также на упомянутых рисунках присутствуют кривые, полученные для моделей с третьим уровнем адаптации (все предыдущие расчеты ограничивались вторым уровнем) сетки. Как видно, в области отрицательных и малых положительных углов атаки результат несколько приблизился к эксперименту.

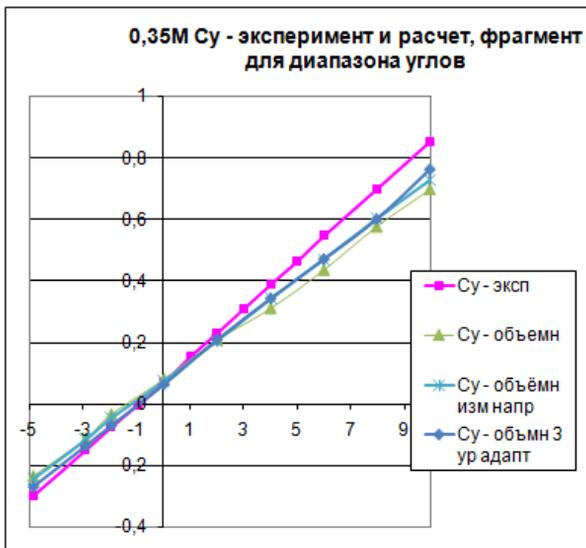


Рис. 2.62. Зависимость C_y от угла атаки при 0,35 М — эксперимент и расчет с различной реализацией направления потока

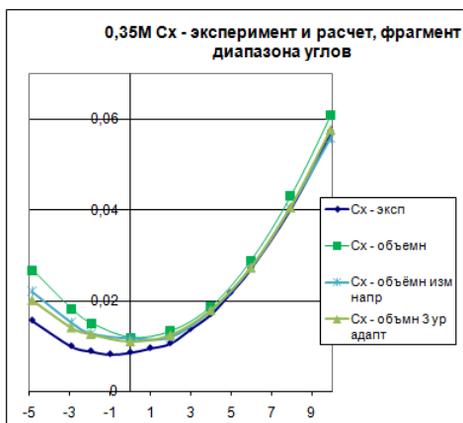


Рис. 2.63. Зависимость C_x от угла атаки при 0,35 М — эксперимент и расчет с различной реализацией направления потока

Об актуальности адаптации сетки можно также судить по графикам сходимости целей — коэффициентов C_y (рис. 2.64) и C_x (рис. 2.65) (здесь следует иметь в виду, что отображенные характеристики рассчитывались в системе координат, связанной с крылом, после чего пересчитывались в систему координат, связанную с потоком). Начальный уровень адаптации устанавливался 2, а после нескольких шагов адаптации изменялся до 3, а затем выполнялось еще два шага адаптации. Наиболее показательным является график для подъемной силы: до первой адаптации она была положительной, а после — изменила знак. После выполнения еще двух адаптаций (при сохранении уровня 2) достигнута стабилизация. Что касается лобового сопротивления, то оно так же чувствительно к уровню адаптации (по сути, локальной плотности сетки), но демонстрирует лучшую сходимость в пределах шага адаптации.

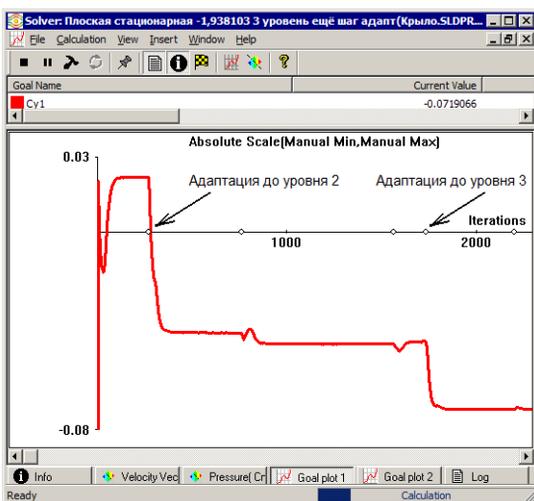


Рис. 2.64. График сходимости коэффициента C_y в зависимости от шага и уровня адаптации

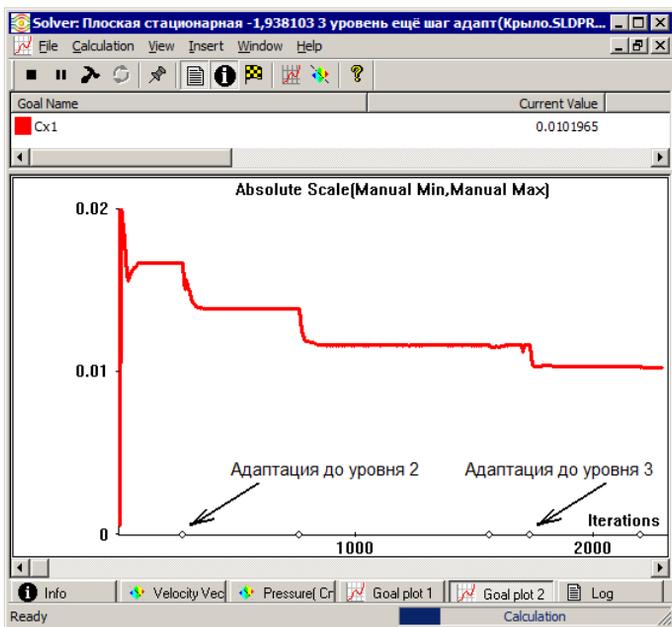


Рис. 2.65. График сходимости коэффициента C_x в зависимости от шага и уровня адаптации

2.1.6. Выводы

SolidWorks Flow Simulation с удовлетворительной точностью прогнозирует аэродинамические характеристики крыла конечного размаха в широком диапазоне дозвуковых скоростей. При этом затраты труда на подготовку расчетной модели и сопровождение расчета крайне незначительны. В то же время для получения более точного приближения следует проанализировать зависимость характеристик от параметров начальной турбулентности и учесть контекст эксперимента.

2.2. Исследование течения в фильтрующей установке

В данном разделе рассмотрена задача расчета течения в фильтрующей колонне. Автор благодарит сотрудников ООО "Производственное предприятие ТЭКО-ФИЛЬТР" (Тольятти) за предоставленную информацию, связанную с этим проектом.

2.2.1. Постановка задачи

Рассмотрим фильтрующую колонну, геометрическая модель которой показана на рис. 2.66, 2.67. Она состоит из бака и системы фильтров, представляющих собой стаканы с фланцами. Фильтры опираются на патрубки, соединенные с конической перегородкой. Из-за этого участки цилиндров на фильтрах, которые вставлены в патрубки, фактически не обладают проницаемостью.

Геометрическая модель фильтра в разнообразных масштабах показана на рис. 2.68–2.70. Как видно, конструкция является достаточно сложной. Боковые грани состоят из частых вертикальных ребер с цилиндрической навивкой трапецеидального сечения. Большое основание сориентировано на внешнюю по отношению к потоку сторону. Дно образовано повторяющимися прямолинейными элементами, сечение которых идентично использованному в навивке. Они соединены под прямым углом с набором параллельных ребер относительно небольшого размера, которые, в свою очередь, опираются на совокупность параллельных пластин. Такая схема придает конструкции достаточную жесткость.

Жидкость в колонне поступает из нижнего патрубка, поднимается вверх, затем проходит через фильтры и выходит через левый верхний патрубок вниз. Целью анализа является исследование течения (жидкости с характеристиками воды) и, в частности, расчет потоков через каждый фильтр вплоть до идентификации потоков через дно и цилиндрические стенки. Также нас интересует величина потери давления при прохождении жидкости через стенки фильтров.

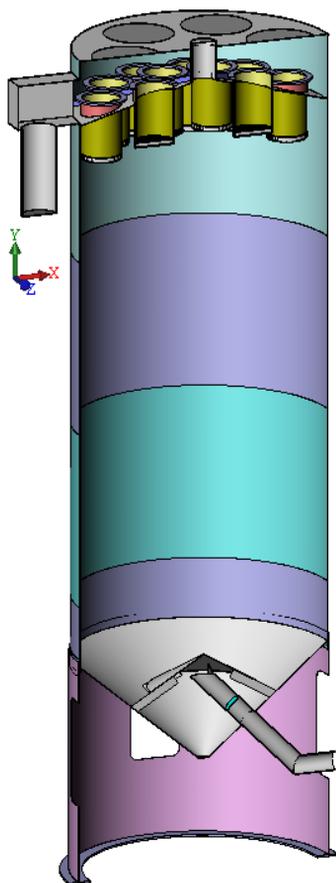


Рис. 2.66. Геометрическая модель колонны — разрез вертикальной плоскостью

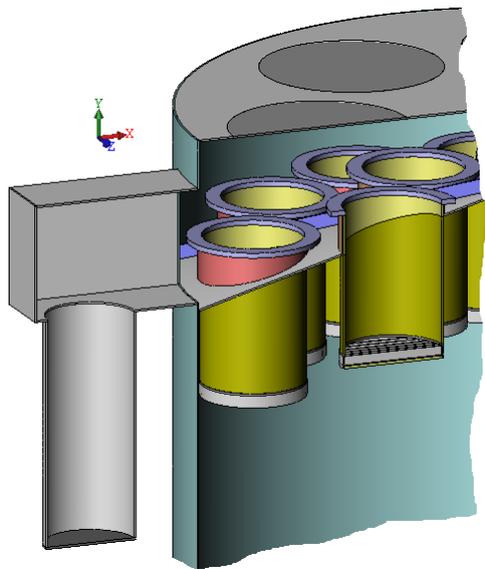


Рис. 2.67. Модель колонны — фрагмент

2.2.2. Получение характеристик пористой среды

Основной проблемой при моделировании течения в подобных системах является радикальное различие масштабов: проходное сечение витками проволоки навивки составляет 0,25 мм, при том что габариты колонны измеряются метрами. В COSMOSFloWorks для объектов с подобным различием масштабов применяется семейство настроек **Narrow Channel** (Узкие каналы), однако число протяженных по периметру цилиндра щелей составляет несколько сотен. Поэтому необходимо использовать такую сущность, как **Porous Medium** (Пористая среда), представляющую собой "гомогенизированную" модель структурно-неоднородной среды, образованной периодическими объектами. COSMOSFloWorks содержит несколько типов пористых сред:

- изотропная — имеет одинаковую проницаемость во всех направлениях;
- однонаправленная — имеет проницаемость только в одном направлении;
- осесимметричная — для нее назначается проницаемость в осевом и в радиальном направлении (в окружном направлении массопереноса нет);
- ортотропная — проницаемость назначается персонально относительно каждого из трех взаимно ортогональных направлений.

Моделируются пористые материалы, у которых составляющие коэффициента проницаемости k по характерным направлениям определяются одной из следующих их зависимостей от параметров течения:

- $k = \Delta p \times S / (m \times L)$, где Δp — перепад давления между противоположными сторонами пористого тела в некотором направлении; m — массовый расход текущей среды в этом направлении; S и L — площадь поперечного сечения и длина пористого тела в этом направлении. Величина k , если брать ее идентифицировать, задается зависимостью ΔP от m и константами S и L . Если вместо массового расхода m задан объемный расход v , то определяется $m = v \times \rho$, где ρ — плотность текущей среды;
- $k = (A \times v + B) / \rho$, где v — скорость текущей среды; ρ — плотность текущей среды; A и B — константы. Величина k определяется константами A и B , а v и ρ вычисляются после построения модели течения (или, само собой, реального эксперимента);
- $k = \mu / (\rho \times D)$, где μ и ρ — коэффициент динамической вязкости и плотность текущей среды; D — характерный размер поры, обычно определяемый из экспериментов;
- $k = \mu / (\rho \times D) \times f(\text{Re})$, где, в отличие от предыдущей формулы, фигурирует $f(\text{Re})$ — функция от числа Рейнольдса. Пользователь может выбрать различные варианты зависимости, в частности адаптированную для турбулентного течения в узких каналах круглой формы с гладкими стенками — соответствующие зависимости приводятся в справочной системе расчетного модуля.

Мы остановимся на варианте, в котором коэффициент проницаемости линейно зависит от скорости и плотности. Нужно установить коэффициенты A и B , чтобы определить в базе данных эквивалентный пористый материал.

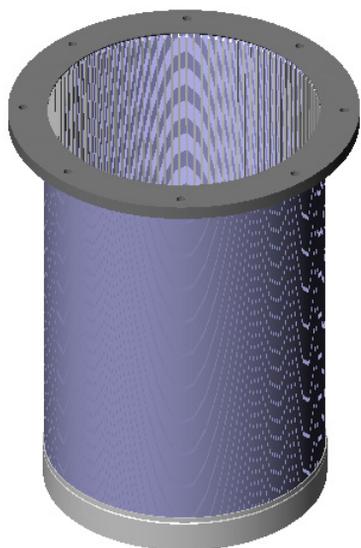


Рис. 2.68. Геометрическая модель фильтра — исходный вариант

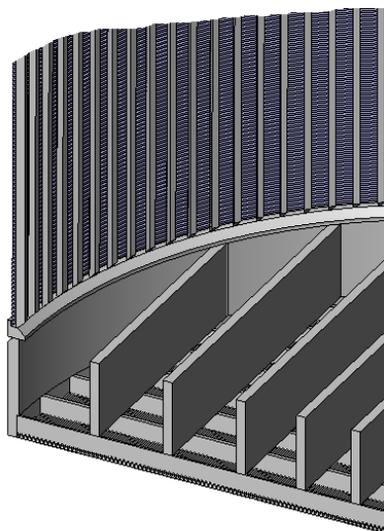


Рис. 2.69. Геометрическая модель фильтра — фрагмент

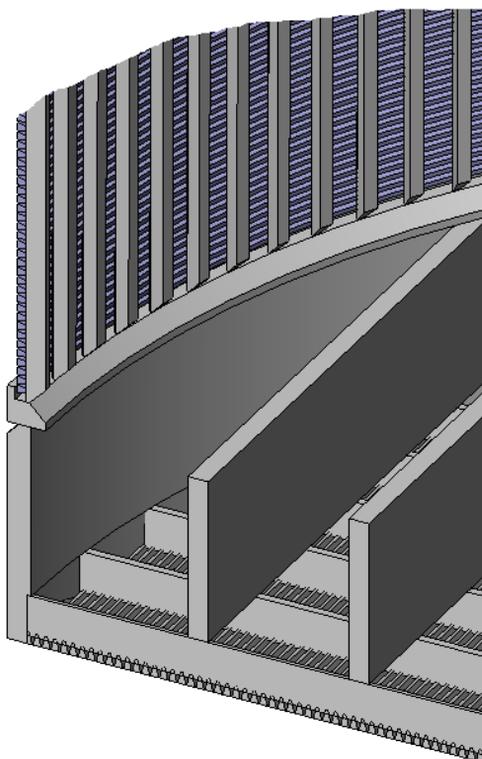


Рис. 2.70. Геометрическая модель фильтра — увеличенный фрагмент

В дополнение к имеющемуся соотношению

$$k = (A \times v + B) / \rho$$

примем во внимание собственно определение коэффициента проницаемости:

$$k = - \text{grad}(p) / (\rho \times v).$$

Приравнивая правые части уравнений, получаем выражение для градиента давления при прохождении текучей среды через однородную пористую среду:

$$\text{grad}(p) = A \times v^2 + B \times v.$$

Геометрическая модель для проведения виртуальных экспериментов по определению коэффициентов в уравнении проницаемости показана на рис. 2.71. Данная модель предназначена для имитации прохождения текучей среды через цилиндрические стенки фильтра в направлении снаружи внутрь (свойства проницаемости, в общем случае, чувствительны к направлению движения). Ограничивающие секущие плоскости выбирались так, чтобы сохранить геометрическую симметрию относительно них. В месте сопряжения вертикального ребра с кольцевой обмоткой геометрия сечения ребра изменена, чтобы избежать контакта по линии (она получалась бы при сопряжении полного скругления на клиновидном ребре с цилиндрической гранью обмотки). В данном случае относительно малая площадка контакта реализована в виде фрагмента цилиндрической грани с осью, совпадающей с осью фильтра (рис. 2.72).

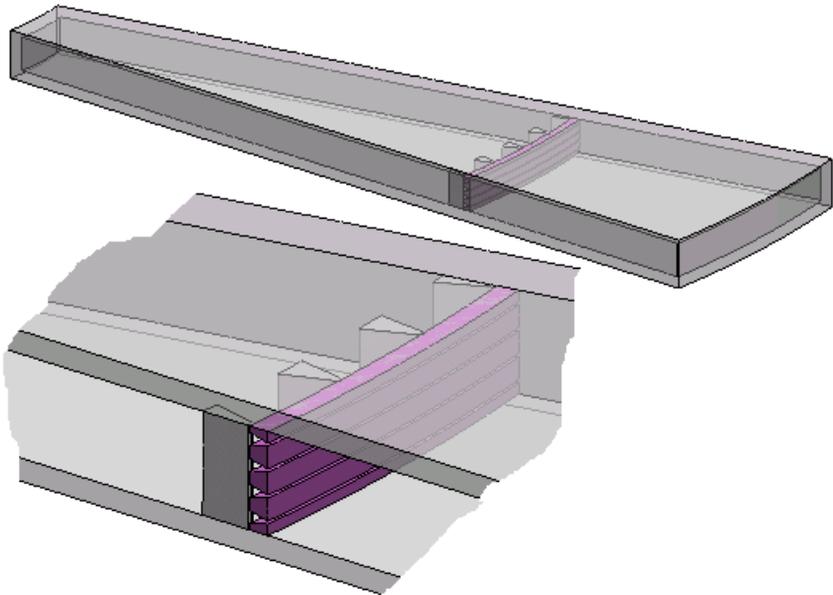


Рис. 2.71. Геометрическая модель для определения констант в уравнении проницаемости

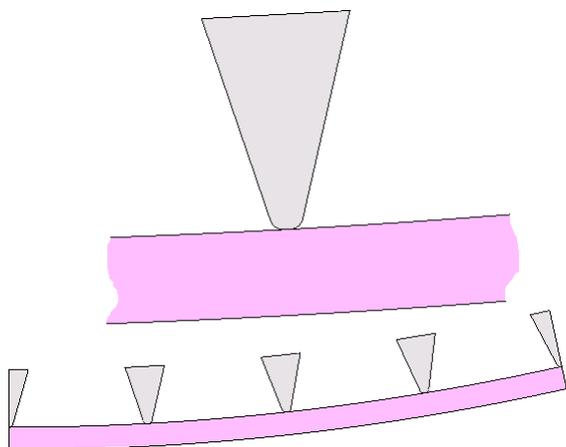


Рис. 2.72. Фрагмент геометрической модели в сечении плоскостью, перпендикулярной оси симметрии

Граничные условия внутри полости показаны на рис. 2.73. Наружное давление назначено в варианте **Total Pressure** (Полное давление), поскольку здесь предполагается вход среды. На предполагаемом выходе назначено условие **Environment Pressure** (Давление внешней среды). Именно такое сочетание рекомендуется для задач, в которых, как на входе, так и на выходе, используются граничные условия в виде назначенного давления. Условие в виде сочетания давлений представляется ближе к постановке конкретной задачи, требующей установить зависимость падения давления от скорости. Поскольку проходное сечение не является постоянным, скорость также меняется. Поэтому назначенная на входе (выходе) скорость потребует пересчета в месте расположения фильтра. Если сечение постоянно, то назначение скорости на входе (выходе) смотрелось бы более логично.

На боковых стенках поставлено условие **Ideal Wall** (Идеальная стенка), реализующее взаимодействие текучей среды со стенкой без трения. В принципе, на верхней и нижней гранях расчетного домена, ограничивающих полость, можно было бы поставить условие **Periodicity** (Периодичность), однако в данной ситуации отличия были бы малозначимы. Поэтому, исходя из соображений единообразия между направлениями периодичности (требовалась бы циклическая симметрия/периодичность), было выбрано более тривиальное условие.

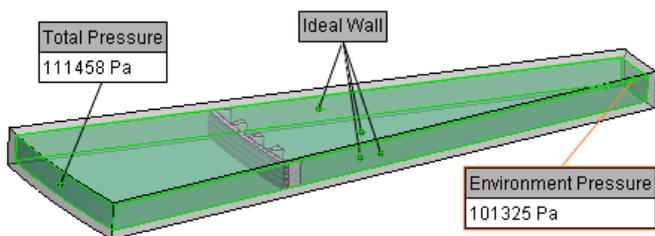


Рис. 2.73. Граничные условия

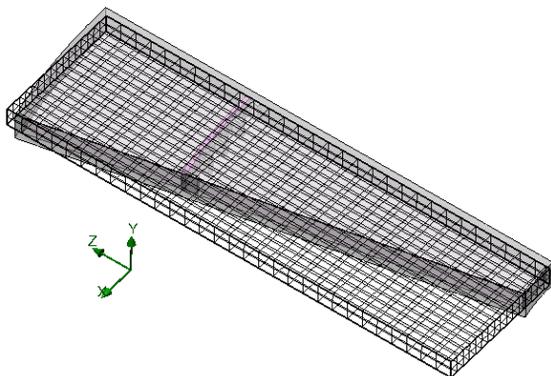


Рис. 2.74. Начальная сетка

Начальная сетка показана на рис. 2.74. С целью рационального разбиения в окрестности фильтра сделаны следующие настройки. На вкладке **Basic Mesh** (Базовая сетка) (рис. 2.75) изменено число ячеек вдоль каждого из направлений относительно настроек по умолчанию.

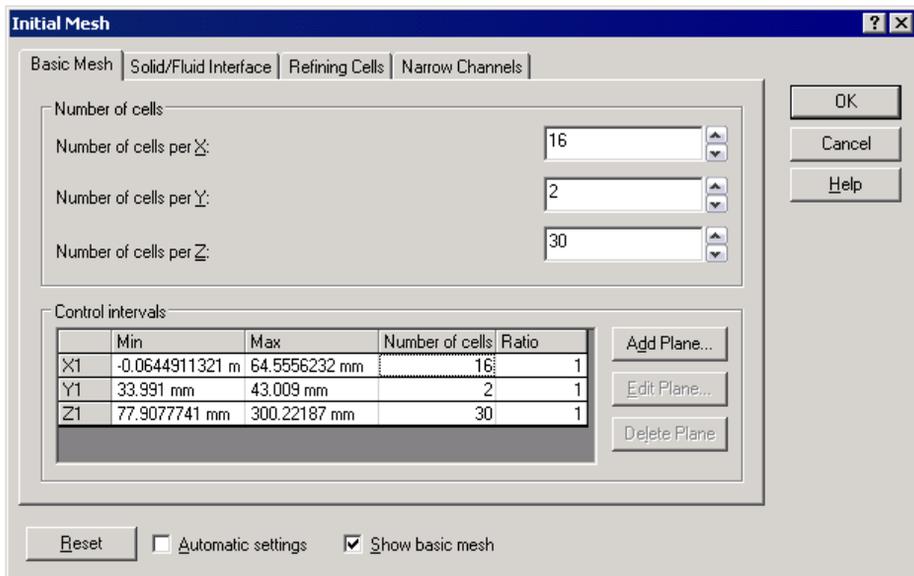


Рис. 2.75. Настройки начальной сетки — Базовая сетка

На вкладке **Solid/Fluid Interface** (Поверхность раздела твердых тел с текучей средой) (рис. 2.76) с помощью регулятора **Small solid feature refinement level** (Уровень разрешения сеткой мелких особенностей модели), принимающего дискретные положения 0–7, задан максимальный допустимый уровень дробления ячейки базовой сетки. Так удовлетворяется критерий разрешения, который заключается в том,

что максимальный угол между нормальными к поверхности модели в отдельно взятой расчетной ячейке не должен превышать 120° . В данном случае установлен уровень дробления ячеек 3. Также регулятор **Tolerance refinement level** (Уровень разрешения сеткой выступов поверхности), управляющий уровнем дробления ячейки базовой сетки для удовлетворения критерия разрешения начальной расчетной сеткой выступов поверхности модели, установлен в положение 6. При этом для параметра **Tolerance refinement criterion** (Критерий разрешения сеткой выступов поверхности), определяющего допустимую максимальную выпуклость поверхности модели в ячейке относительно плоского многоугольника, аппроксимирующего эту поверхность в ячейке, принято значение 0,1 мм. Мы ориентируемся на то, что минимальный размер основания трапеции в сечении навивки равен 1,1 мм, а радиусы наименьших скруглений имеют величину 0,2–0,3 мм.

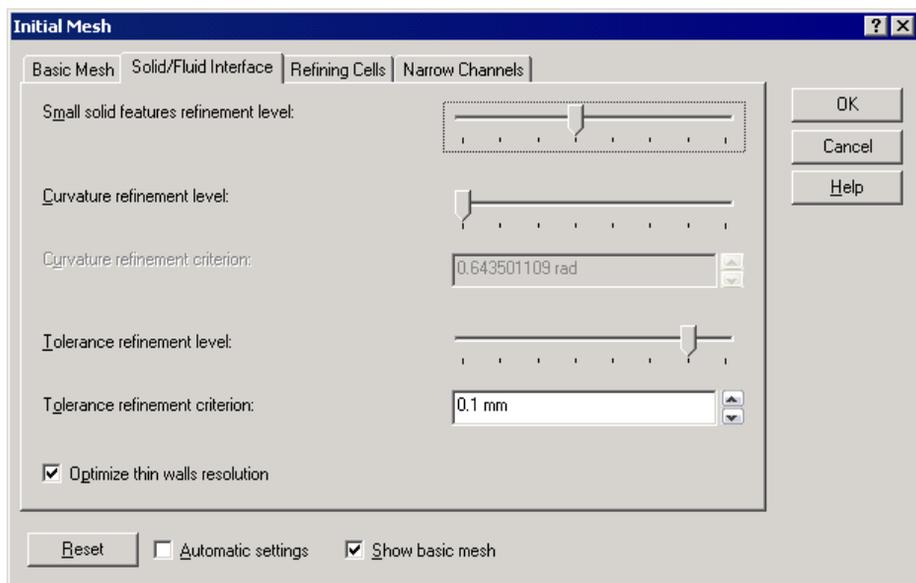


Рис. 2.76. Настройки начальной сетки — Поверхность раздела твердых тел с текучей средой

На вкладке **Refining Cells** (Дробление ячеек) (рис. 2.77) назначаем предельную степень дробления ячеек базовой сетки, разделяемых текучей средой и телом. Для этого активизируем опцию **Refine partial cells** (Дробить все частичные ячейки) и ползунковый переключатель **Level of refining partial cells** (Уровень дробления всех частичных ячеек) в положение 2.

На вкладке **Narrow Channels** (Узкие каналы) (рис. 2.78), если отмечена опция **Enable narrow channels refinement** (Включить опцию дробления сетки в узких каналах), следует назначить параметры, определяющие дробление ячеек начальной расчетной сетки. Это позволит уточнить результат в проточных частях модели. В поле **Characteristic number of cells across a narrow channel**

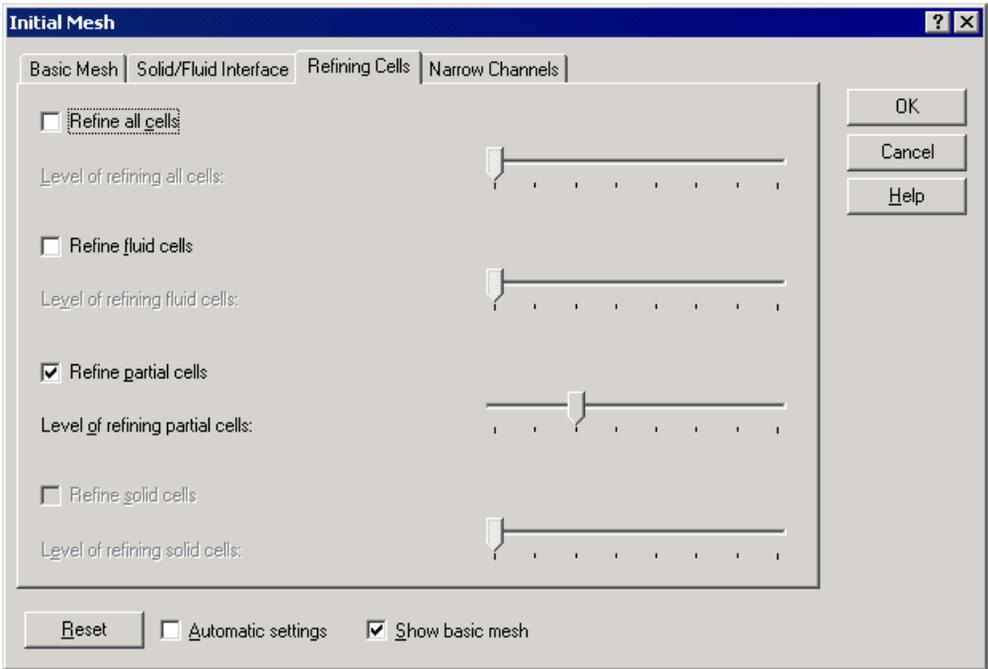


Рис. 2.77. Настройки начальной сетки — Дробление ячеек

(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 регулятора **Narrow channel refinement level** (Уровень дробления сетки в узких каналах) назначаем 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 от 0 до 7 означает, что допустимый минимальный размер ячейки начальной сетки при попытках удовлетворить этот критерий в $2N$ раз меньше размера ячейки базовой сетки по каждой из осей глобальной системы координат. В данном случае максимально возможный уровень дробления адекватен воспроизведению состояния потока в фильтре. Также задействуем опции **Enable the minimum height of narrow channels** (Задать минимальную высоту узкого канала) и **Enable the maximum height of narrow channels** (Задать максимальную высоту узкого канала), назначая для управляющих полей **The minimum/maximum height of narrow channels** (Минимальная/максимальная высота узкого канала) значения 0,02 и 0,5 соответственно. Нижняя граница определяет минимальный зазор, интерпретируемый как "узкий" канал. Он назначен для того, чтобы в местах примыкания скругленных граней ребер к навивке не происходило нерационального дробления ячеек. Верхняя граница назначена, чтобы исключить "избыточное" дробление между вертикальными ребрами.

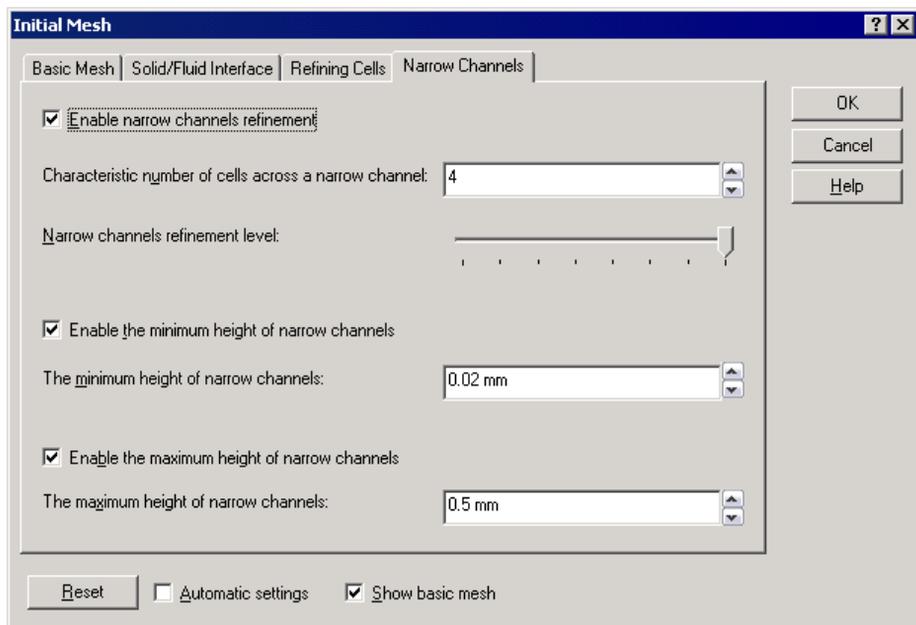


Рис. 2.78. Настройки начальной сетки — Узкие каналы

На рис. 2.79, 2.80 показана расчетная сетка в вертикальном и горизонтальном сечении. Настройки сечения в панели **Cut Plot** (Картинки в сечении) показаны на рис. 2.81. Как видно, отключена опция **Interpolate** (Интерполировать) между центрами ячеек расчетной сетки (это, в частности, ускоряет просмотр диаграммы), так что в пределах каждой ячейки результаты расчета будут показаны постоянными. Также отключена опция **Use CAD geometry** (Использовать геометрию САПР) — при просмотре результатов расчета будет показана геометрия САПР в том виде, в котором она разрешена расчетной сеткой.

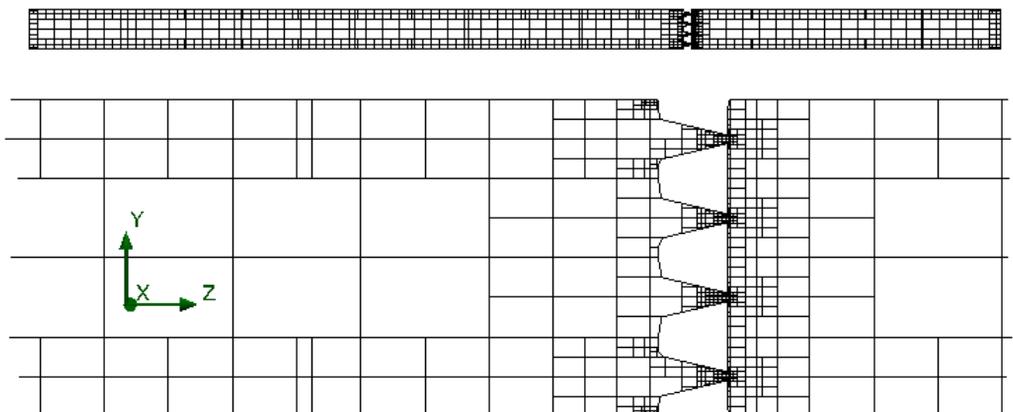


Рис. 2.79. Сетка в вертикальном сечении

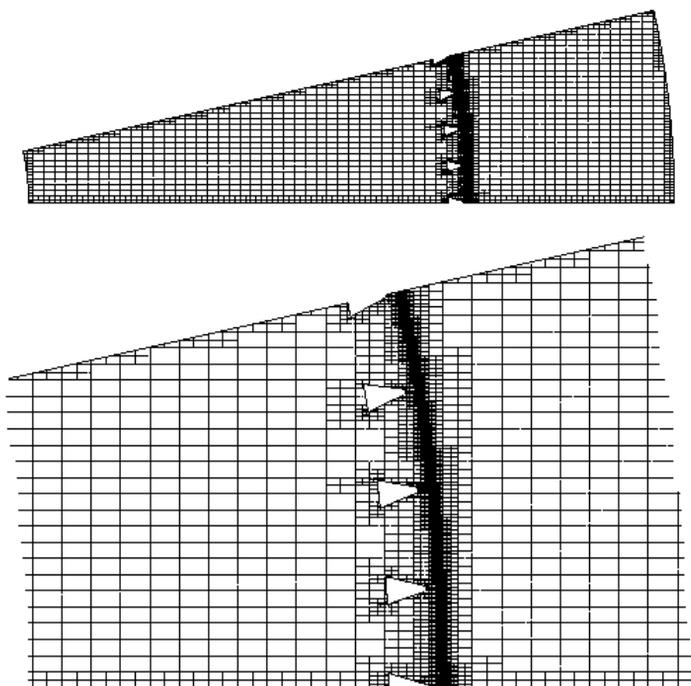


Рис. 2.80. Сетка в горизонтальном сечении

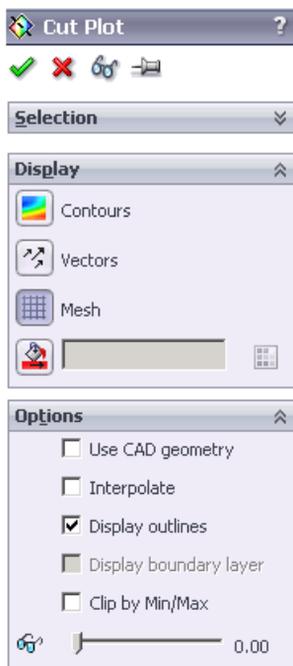


Рис. 2.81. Настройки в панели Картины в сечении

На сетке в вертикальном сечении каналы между витками навивки вблизи их узкого сечения разрешены удовлетворительно, а вот там, где основания трапеций больше, получилось только две-три ячейки. Это, по всей видимости, произошло потому, что параметру **The maximum height of narrow channels** присвоена недостаточно большая величина — 0,5 мм, в то время как расстояние между вершинами трапеций изменяется от 1,3 до 0,3 мм. То есть процедура уплотнения сетки в узких каналах сработала вполне корректно, ограничившись теми зонами, где канал уже, чем 0,5, но шире 0,02. Если бы пространство в широких участках было разрешено сеткой точнее, то более адекватным стало бы и представление криволинейных границ ребер: это произошло бы по той причине, что разница в уровнях разбиения смежных ячеек не может превысить единицу. То есть область уплотнения распространилась от каналов на большее расстояние.

В качестве целей назначаем объемный и массовый расход через вход и выход (это сделано для контроля сходимости интегральной величины потока), а также минимальную, среднюю и максимальную скорость на входе и выходе, что, как представляется, повысит качество расчета в локальных объемах и в области с текучей средой в целом.

Проанализируем результаты расчета для назначенной разницы давления (динамическое на входе минус статическое на выходе) 0,1 МПа. Диаграмма статического давления в сечении плоскостью, располагающейся между ребрами и перпендикулярной оси фильтра, показана на рис. 2.82. Как видно, давление изменяется скачкообразно при протекании жидкости через фильтр. Более информативную картину можно получить, визуализировав распределение давления вдоль некоторой траектории. В данном случае это линия эскиза, проходящего через точку, расположенную посередине, как между навивкой, так и между ребрами (рис. 2.83). Здесь следует иметь в виду, что в модели на рис. 2.84 движение жидкости происходит слева направо, а на графике — справа налево (рис. 2.85).

Как видно, давление постоянно при движении от входа до фильтра, после чего при прохождении через фильтр происходит его уменьшение до некоторой величины, причем собственно на фильтре наблюдается локальное падение давления. Последний эффект обусловлен локальным же скачком скорости, как это показано на рис. 2.85.

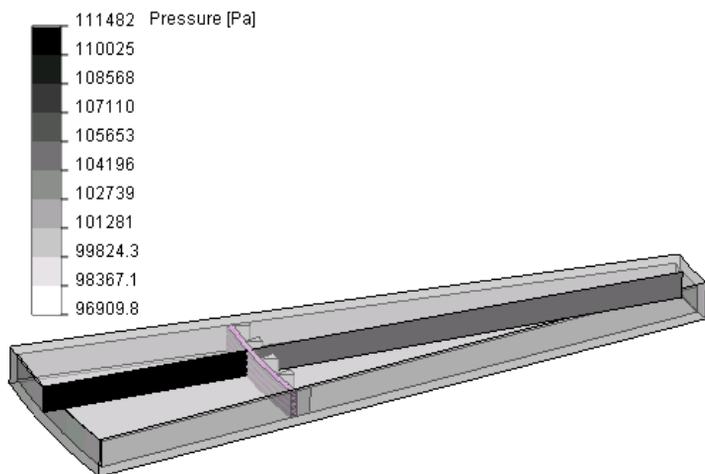


Рис. 2.82. Поле скоростей в сечении, проходящем через ось

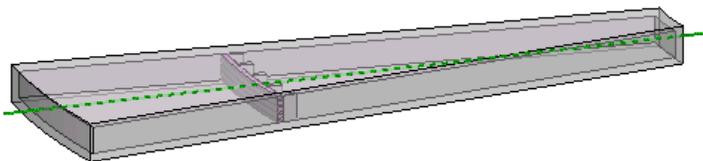


Рис. 2.83. Эскиз для графика вдоль линии

Если не учитывать местное изменение скорости, то величина падения давления Δp идентифицируется, как на иллюстрации. Тогда градиент давления на фильтре:

$$\text{grad}(p) = \Delta p / \delta.$$

Здесь δ — толщина фильтрующего объекта. Это в некотором смысле условная величина, поскольку в ряде случаев она однозначно не идентифицируется. Примем ее равной размеру (в радиальном направлении) подмотки в совокупности с вертикальными ребрами (см. рис. 2.84). Чтобы "толщина" (7 мм) в зависимостях для определения констант фильтрующей среды стала объективной характеристикой, следует ее же использовать в дальнейшем при назначении параметров виртуальных сущностей.

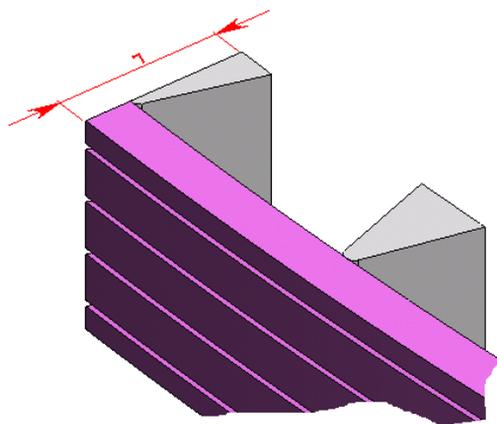


Рис. 2.84. Условная толщина пористой среды

Определенная неоднозначность выявляется при попытке идентифицировать скорость потока при прохождении через фильтр (в последующем — пористую среду). В данном случае нам нужна средняя скорость. Однозначный алгоритм ее получения предложить достаточно сложно. Мы будем принимать эту скорость равной максимальному значению скорости потока вдоль траектории на участке диаграммы, исходящем от входа (рис. 2.86). Эта проблема, кстати говоря, возникла потому, что расчетная область является (в сечении горизонтальной плоскостью) сектором, из-за чего скорость, даже в отсутствие фильтра, непостоянна. Если бы, как это имеет место при расчете "эффективных" характеристик пористой среды, имитирующей дно фильтрующего цилиндра, сечение проточной части было постоянным (расчетная область — параллелепипед), то средняя скорость была бы равна скорости на входе/выходе.

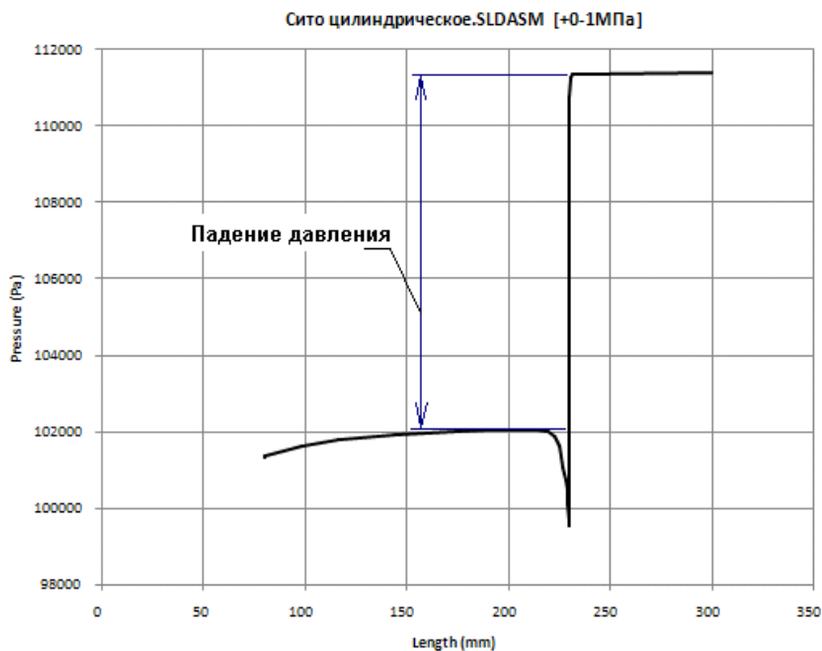


Рис. 2.85. Изменение давления вдоль отрезка, проходящего через центр отверстия в фильтре и ось

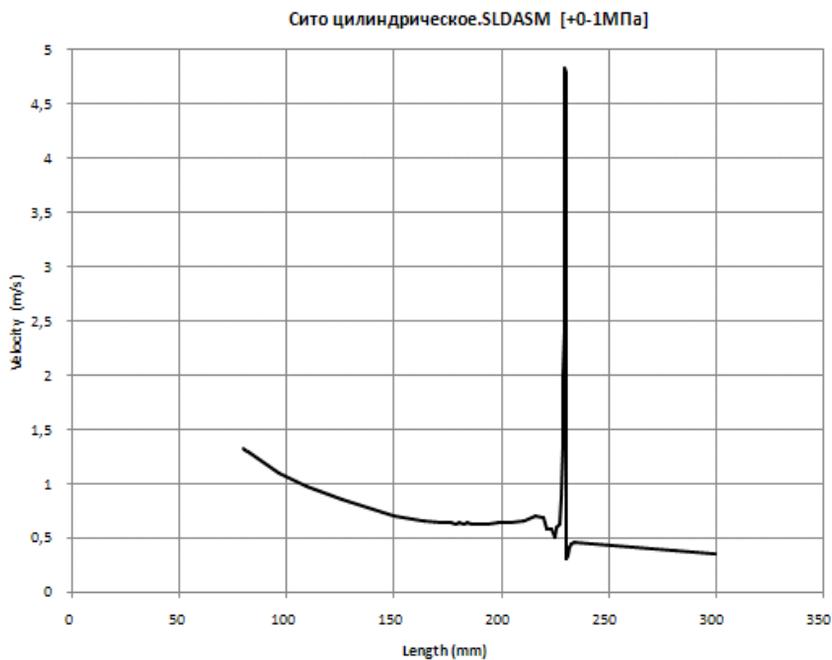


Рис. 2.86. Скорость вдоль отрезка, проходящего через центр отверстия в фильтре и ось

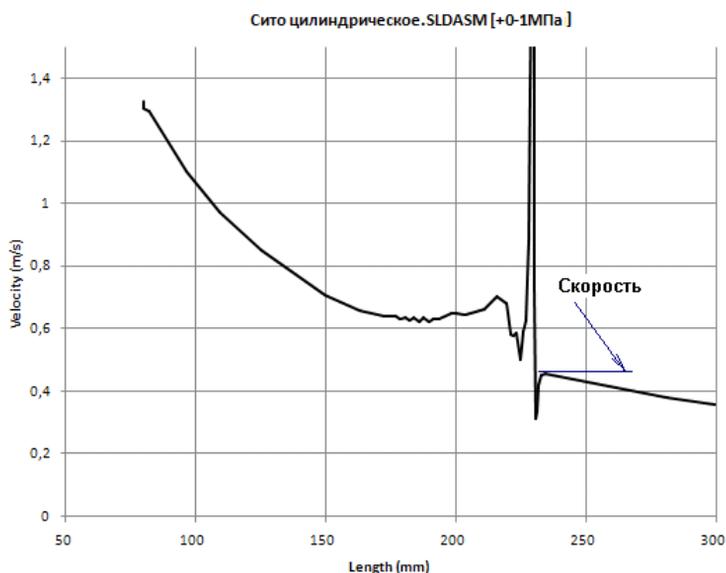


Рис. 2.87. Идентификация средней скорости потока при прохождении фильтра

Определенный интерес представляет диаграмма скорости в сечении, перпендикулярном оси и проходящем посередине между витками. Изображение на рис. 2.88 свидетельствует о том, что функция отслеживает предполагаемые (при условии стационарного характера течения, который, кстати говоря, нами не аргументирован) направления симметрии относительно плоскостей, проходящих через ось. При этом расчетная сетка является ортогональной и потенциальную симметрию результатов никак не "стимулирует".

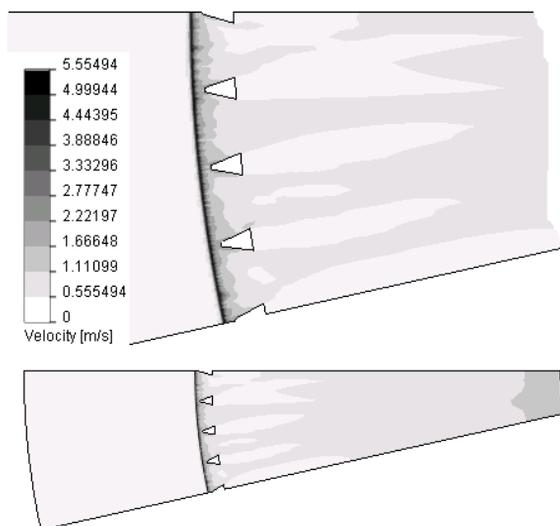


Рис. 2.88. Поле скоростей в сечении, перпендикулярном оси

Выполнив несколько расчетов при различных значениях давления (полного) на входе, получим график, показанный на рис. 2.89. Как видно, потенциально он должен с достаточной точностью аппроксимироваться параболой. Таким образом, возникает задача подбора коэффициентов A и B в зависимости:

$$\text{grad}(p) = A \times v^2 + B \times v.$$

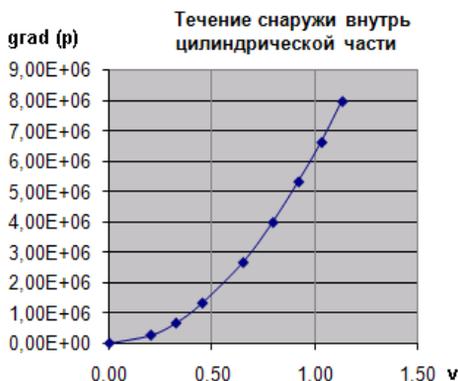


Рис. 2.89. Зависимость градиента давления от скорости

Для этого привлекаем программу NLREG, заимствованную нами с сайта <http://www.nlreg.com>. Она предназначена для нелинейного регрессионного анализа и аппроксимации функций. Информационное окно программы показано на рис. 2.90. Программа в течение 30 дней функционирует в бесплатном режиме, что позволяет выполнить минимально необходимый объем вычислений.



Рис. 2.90. Информационное окно программы NLREG

Протокол работы программы регрессионного анализа показан на рис. 2.91, а воспроизведенный график параболической функции с наложенными на него "экспериментальными" точками — на рис. 2.92. Как видно, параболическая аппроксимация зависимости падения давления от скорости в широком диапазоне варьирования градиента давления оказалась вполне адекватной.

Рассчитанные константы изотропной пористой среды помещаются в инженерную базу данных. Для виртуальной среды, имитирующей боковые стенки, окно со

свойствами показано на рис. 2.93. Здесь поле **Porosity** (Пористость) с точки зрения собственно расчета несет сугубо иллюстративный смысл, но при отображении результатов его смысл вполне конкретен (см. разд. 2.4).

```

Beginning computation...
Stopped due to: Both parameter and relative function convergence.

---- Final Results ----

NLREG version 6.5
Copyright (c) 1992-2008 Phillip H. Sherrod.

Parabola: y = b*x + c*x^2
Number of observations = 9
Maximum allowed number of iterations = 500
Convergence tolerance factor = 1.000000E-010
Stopped due to: Both parameter and relative function convergence.
Number of iterations performed = 6
Final sum of squared deviations = 2.2330734E+009
Final sum of deviations = -1.2609430E+004
Standard error of estimate = 17860.9
Average deviation = 13008.5
Maximum deviation for any observation = 31890.8
Proportion of variance explained (R^2) = 1.0000 (100.00%)
Adjusted coefficient of multiple determination (Ra^2) = 1.0000 (100.00%)
Durbin-Watson test for autocorrelation = 2.394
Analysis completed 10-Jun-2009 14:27. Runtime = 0.02 seconds.

---- Descriptive Statistics for Variables ----

Variable      Minimum value   Maximum value   Mean value      Standard dev.
-----
x              0                1.13            0.6106667      0.391163
y              0                7970000        3200000        2929542

---- Calculated Parameter Values ----

Parameter     Initial guess   Final estimate   Standard error   t      Prob(t)
-----
c              1              6121935.02     38709.08        158.15  0.00001
b              1              140531.193    36600.64         3.84   0.00638

```

Results of analysis

Рис. 2.91. Протокол работы программы регрессионного анализа

Следует еще раз подчеркнуть, что приведенные характеристики виртуальной пористой среды определены для случая, когда жидкость течет снаружи цилиндра внутрь. В реальной модели возможна ситуация, когда на отдельных участках поток следует в противоположном направлении. Из-за геометрической асимметрии реальных объектов гидравлические свойства могут зависеть от направления. Однако, в силу малости противотоков, будем считать, что проницаемость одинакова во всех направлениях как для цилиндрической, так и для плоской стенки фильтра.

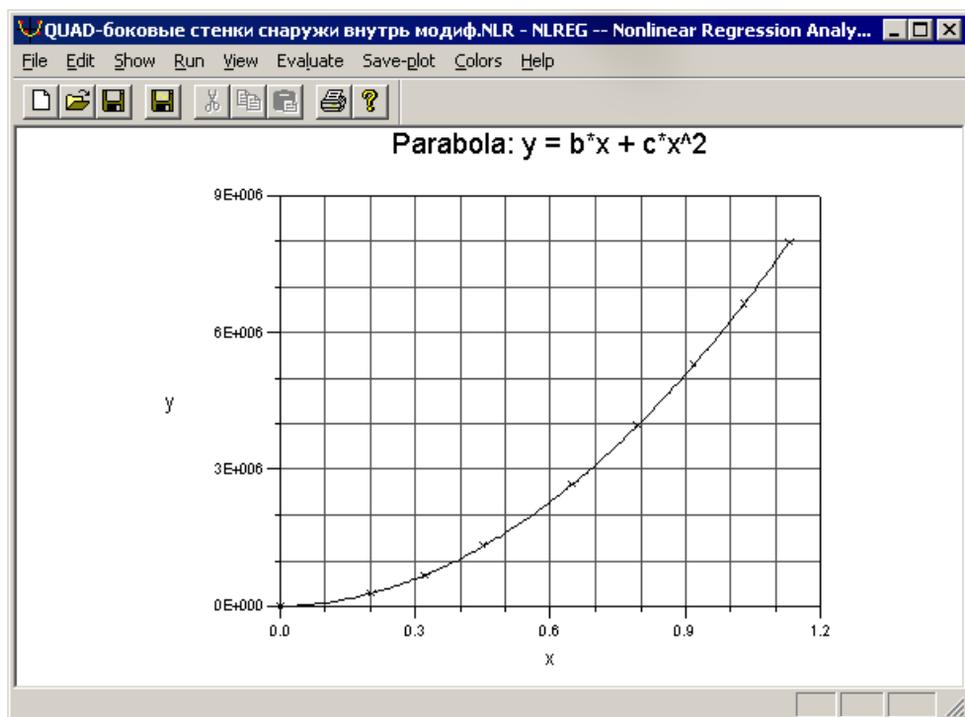


Рис. 2.92. Зависимость падения давления от скорости — интерполированная кривая

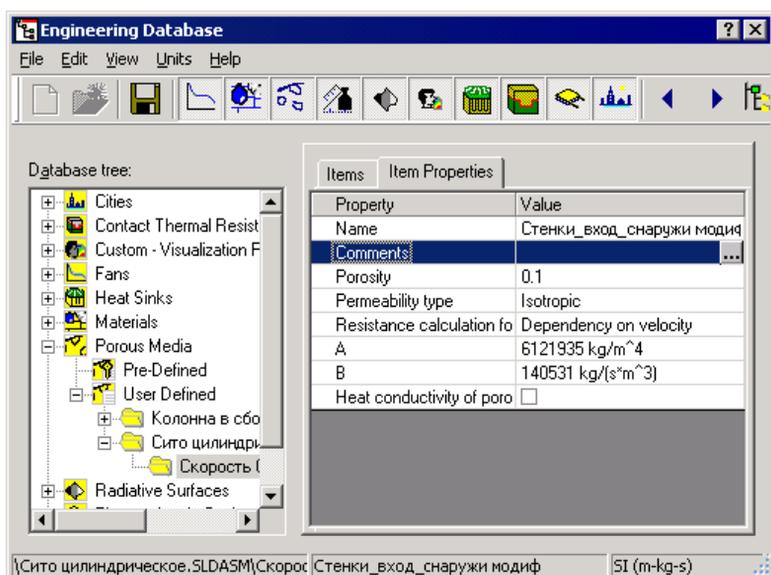


Рис. 2.93. Константы пористой среды, описывающей боковые стенки в инженерной базе данных

Следующий этап — получение констант условной пористой среды, имитирующей донную часть фильтра. Соответствующая геометрическая модель с граничными условиями (для входа, как и в случае цилиндрической стенки, назначаются несколько значений давления) показана на рис. 2.94. Фрагмент геометрии приведен на рис. 2.95. Как видно, модель содержит дефект: присутствует интерференция фильтрующих ребер и ребер несущих. Тем не менее, для гидравлического расчета, не предусматривающего учет теплопроводности в телах, корректировка не требуется: модуль Flow Simulation обрабатывает такие ситуации вполне корректно.

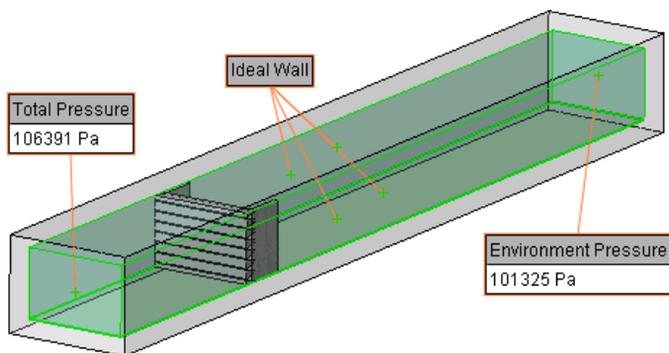


Рис. 2.94. Граничные условия для модели дна

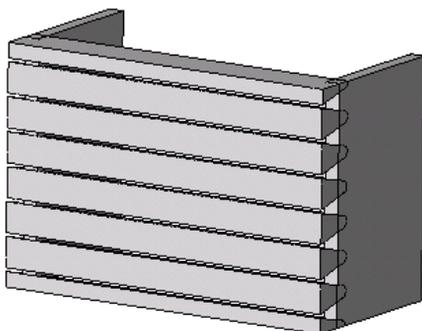


Рис. 2.95. Геометрия фильтра в расчетной модели течения через дно

Граничные условия на боковых гранях расчетного домена поставлены в виде **Periodicity** (Линейная периодичность) (рис. 2.96), обеспечивая идентичность параметров течения во всех повторяющихся объемах, эквивалентных рассматриваемому и образующих бесконечную линейно-периодическую структуру. Также обеспечивается совпадение параметров течения на границах реального и окружающих его виртуальных объемов. Тем самым, как и в ситуации с типовым элементом боковой стенки, игнорируются всевозможные краевые эффекты в месте примыкания дна к стенке, а также вблизи ее краев.

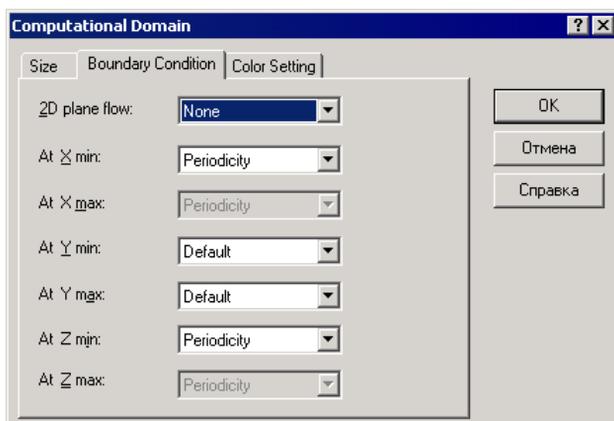


Рис. 2.96. Граничные условия на расчетном домене

Остальные манипуляции, необходимые для получения зависимости между падением давления при прохождении текучей среды через плоский фильтр и скоростью на удалении от него, эквивалентны описанным для цилиндрических стенок. В данном случае из-за постоянства проходного сечения однозначным является вопрос о том, какую скорость следует принимать в качестве аргумента функции. Вне возмущенной зоны это есть средняя скорость течения в произвольном сечении, в частности на входе или выходе. Результат подбора параболической функции с нанесенными на нее "экспериментальными" точками выглядит, как показано на рис. 2.97, а собственно константы приведенной пористой среды приведены на рис. 2.98. Как видно, они существенно отличаются от рассчитанных для среды, имитирующей боковые стенки.

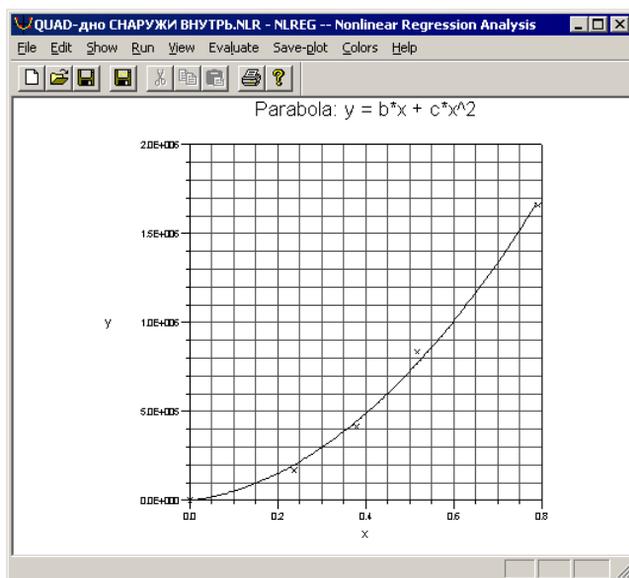


Рис. 2.97. Зависимость падения давления от скорости на дне — интерполированная кривая

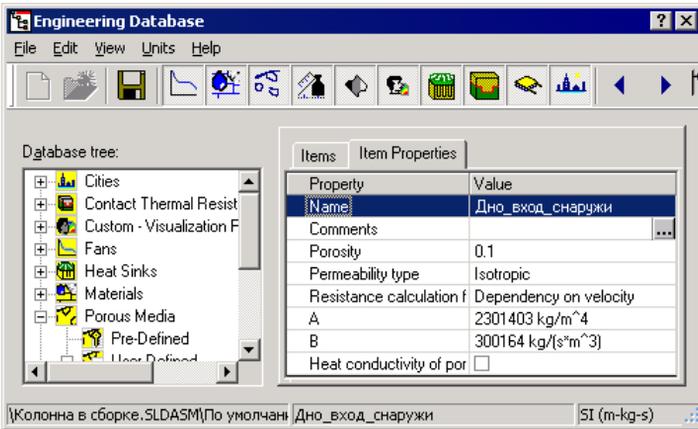


Рис. 2.98. Константы пористой среды, описывающей дно, в инженерной базе данных

Интересно сравнить модели течения с реальным фильтром и с его виртуальной моделью (с рассчитанными характеристиками пористой среды). Условия задачи, в частности факт присвоения специально созданному телу свойств изотопной пористой среды, показаны на рис. 2.99. Подчеркнем, что толщина тела принята равной условной толщине фильтрующего объекта (см. рис. 2.84), то есть 7 мм.

Как видно, граничные условия заимствованы из модели с "реальным" фильтром.

Расчетная сетка показана на рис. 2.100: она имеет те же базовые параметры, что и ранее, но на самом фильтре уплотнение незначительно.

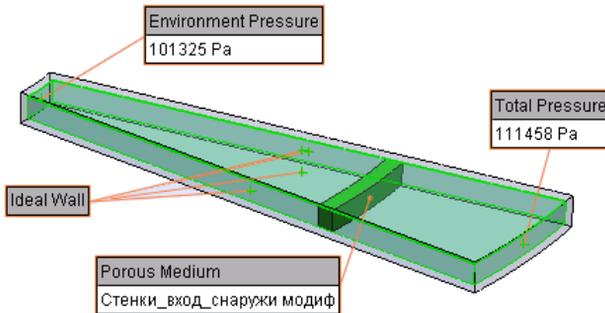


Рис. 2.99. Граничные условия в модели с виртуальной пористой средой

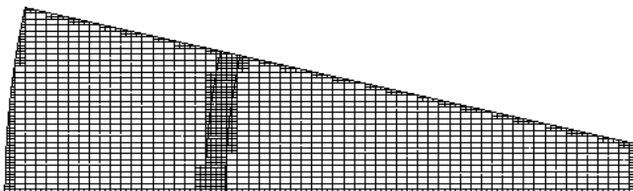


Рис. 2.100. Расчетная сетка в модели с виртуальной пористой средой

Диаграмма скорости в сечении плоскостью, перпендикулярной оси, показана на рис. 2.101. Очевидно, что имеет место существенная неоднородность потока, нивелирующаяся на расстоянии более 10 толщин фильтра. В принципе, не рекомендуется значительно уплотнять сетку на объектах с виртуальной пористой средой. Тем не менее попробуем это сделать. Расчетная сетка и ее фрагмент показаны на рис. 2.102, а поле скорости во всем ее диапазоне, а также после снижения верхней границы диапазона, показано на рис. 2.103. Как видно, проблема флуктуаций в окружном направлении снята, и скорость на равном расстоянии от оси практически постоянна.

Распределение давления в сечении показано на рис. 2.104, а графики изменения давления и скорости вдоль радиуса — на рис. 2.105, 2.106. Можно убедиться, что проблема негетогенности течения снята, а графики вполне соответствуют полученным для модели с учетом "тонкой" структуры. Само собой, отсутствует локальный спад давления в месте ускорения потока через узкий канал по причине отсутствия такового в идеализированной модели. Величины падения давления и скачка скорости в обеих моделях вполне сопоставимы. Таким образом, получено косвенное подтверждение пригодности эффективных характеристик для исследования сложных систем с фильтрами, а также приняты рекомендации о необходимости (возможности) уплотнения сетки в "фильтрующем" теле и на его границах.

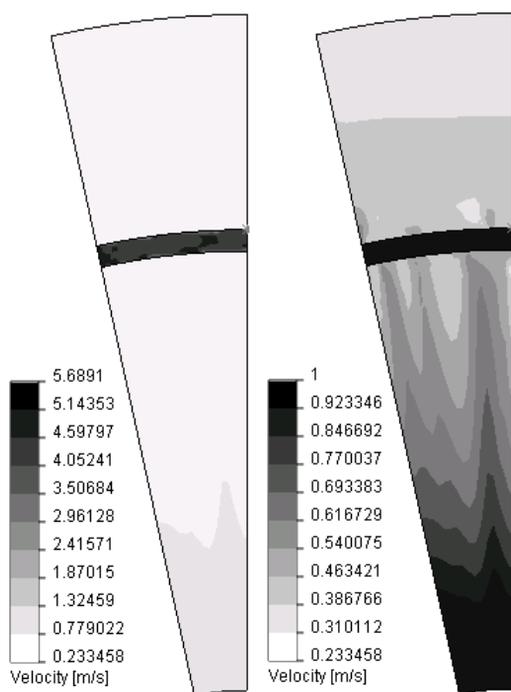


Рис. 2.101. Поле скоростей с модели с условной пористой средой: полный диапазон и фрагмент

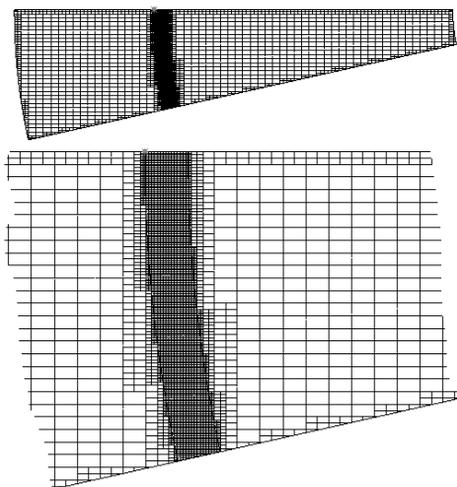


Рис. 2.102. Расчетная сетка в модели с виртуальной пористой средой — результат локального уплотнения

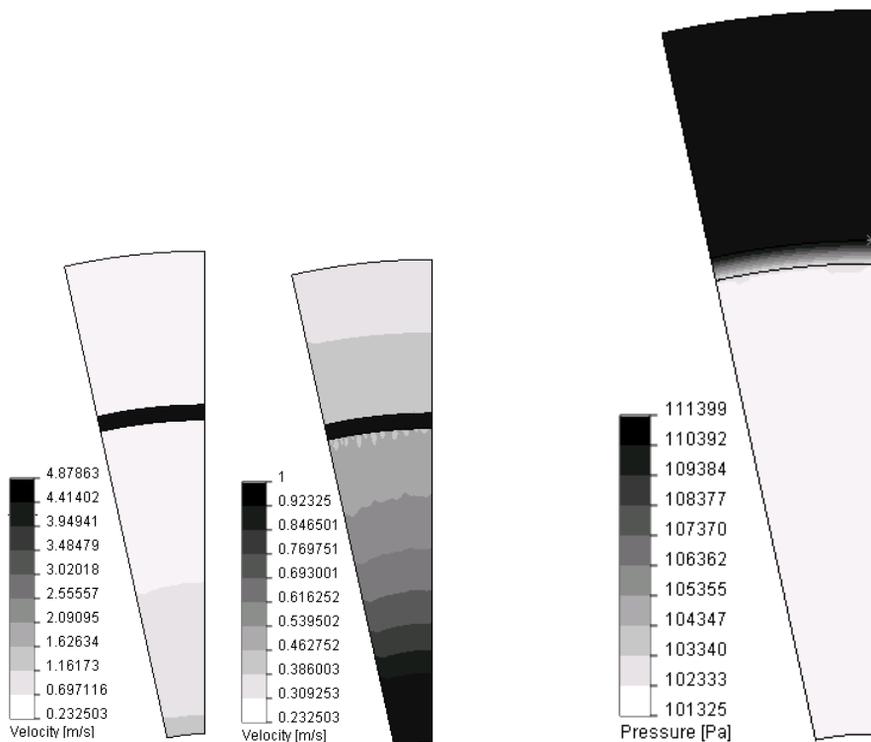


Рис. 2.103. Поле скоростей в модели с условной пористой средой

Рис. 2.104. Распределение давления в модели с условной пористой средой

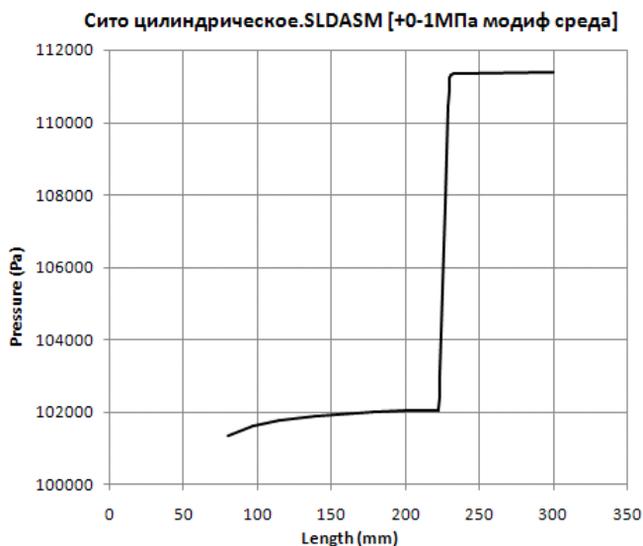


Рис. 2.105. Давление вдоль отрезка в модели с условной пористой средой

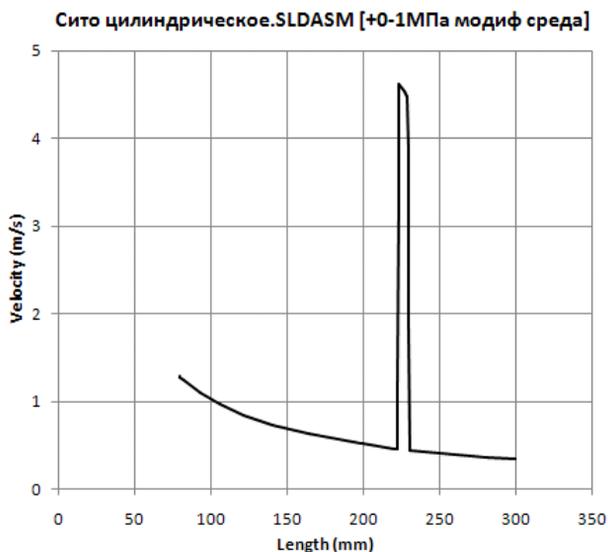


Рис. 2.106. Скорость вдоль отрезка в модели с условной пористой средой

2.2.3. Расчет течения в колонне

Расчетный домен и граничные условия на фоне вида с разрезом фильтрующей колонны показаны на рис. 2.107. Как видно, условие на единственном входе — массовый расход, а на единственном же выходе — давление окружающей среды. Имея в виду именно эти условия, формировалась геометрия модели. Заглушка на входном патрубке отстоит от его открытой части примерно на два диаметра, а на выходе — на три. Это является

минимально необходимым расстоянием. Более того, прямой участок на выходе можно было сделать и длиннее, однако, как показал расчет, диагностических сообщений о вихрях, пересекающих границу с назначенным давлением, не появилось.

Несмотря на наличествующую геометрическую симметрию относительно вертикальной плоскости XU (плоскость разреза на иллюстрации совпадает с ней), симметрия течения не гарантируется. Поэтому в расчете участвует полная модель.

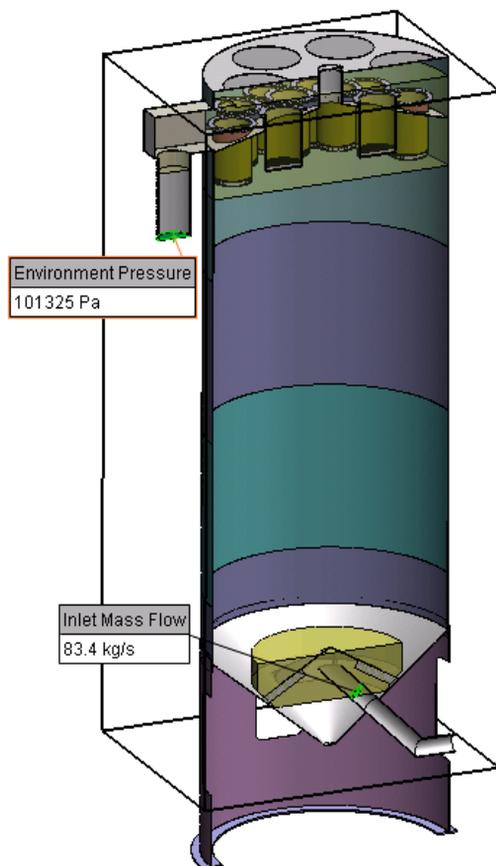


Рис. 2.107. Граничные условия для течения в колонне

В геометрическую модель введены две детали: одна охватывает фильтры и выходной патрубок, вторая — конец входного патрубка и часть расщепителя. Они послужат для назначения параметров локальной начальной сетки. Чтобы соответствующие тела стали прозрачными для текучей среды, их следует отключить (деактивировать), что выполняем в окне **Component Control** (Управление деталями) (рис. 2.108).

Боковым стенкам фильтров (им соответствуют тела в детали), выходящим в нижний объем колонны, а также деталям, описывающим днища, присваиваем характеристики гомогенных пористых сред, рассчитанные ранее (рис. 2.109). Соответствующая команда подается из Деревя проекта Flow Simulation (рис. 2.110).



Рис. 2.108. Отключение деталей, прозрачных для текучей среды

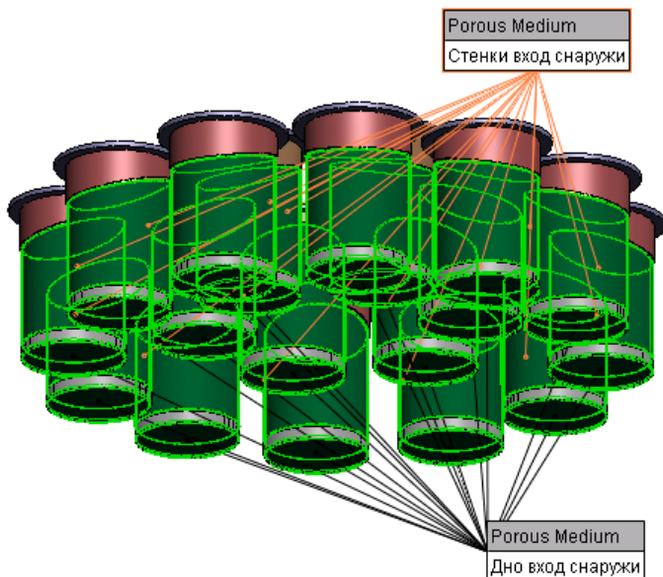


Рис. 2.109. Пористые среды в модели

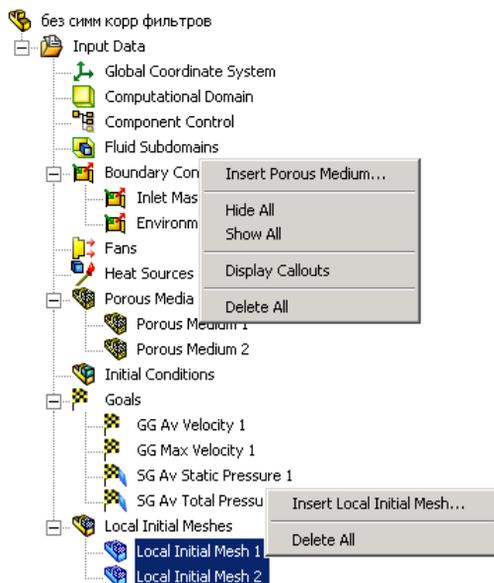


Рис. 2.110. Присвоение характеристик пористых сред объектам в модели

Параметры начальной сетки показаны на рис. 2.111, а собственно базовая сетка — на рис. 2.112. Для этого пришлось отказаться от автоматических настроек сетки — отключить опцию **Automatic settings** (Автоматические настройки) в окне **Initial Mesh** (Начальная сетка), а затем скорректировать число ячеек начальной сетки по каждой из координат.

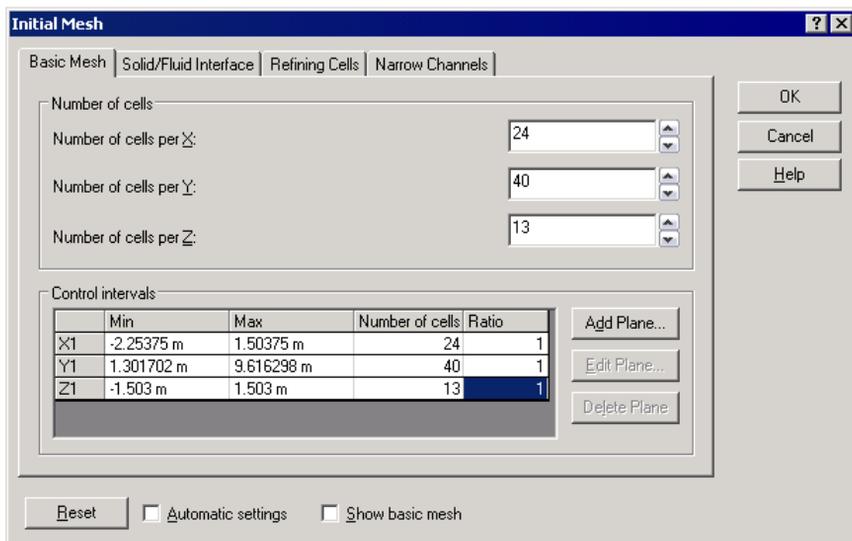


Рис. 2.111. Параметры базовой сетки

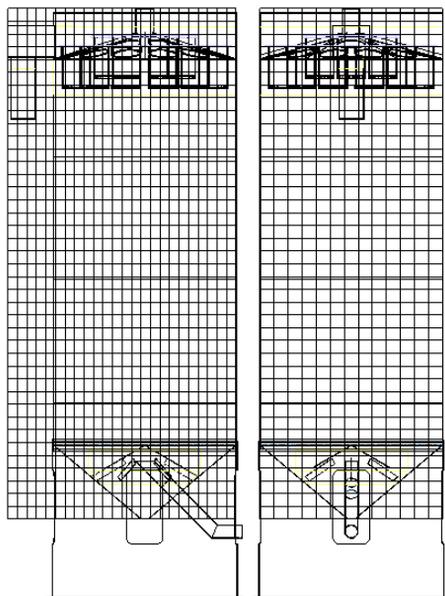


Рис. 2.112. Начальная сетка в вертикальных сечениях

Вручную устанавливаем параметры, определяющие уровень разрешения сетки и отклонение сетки от модели, на вкладке **Solid/Fluid Interface** (Поверхность раздела твердых тел с текучей средой) (рис. 2.113).

На вкладке **Narrow Channels** (Узкие каналы) (рис. 2.114) определяем характерное число ячеек через узкие каналы (здесь мы полагаемся на мнение системы о том, какой канал считать "узким"), а также предельный уровень дробления ячеек в таких зонах — принят уровень 3.

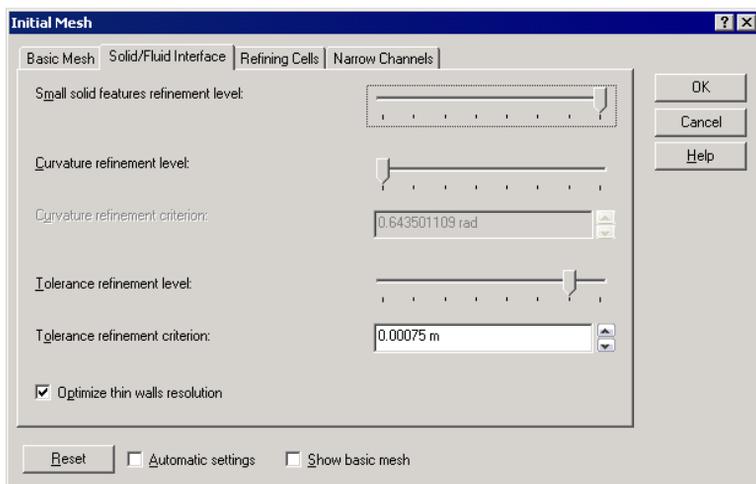


Рис. 2.113. Установка параметров сетки на поверхности раздела тела с текучей средой

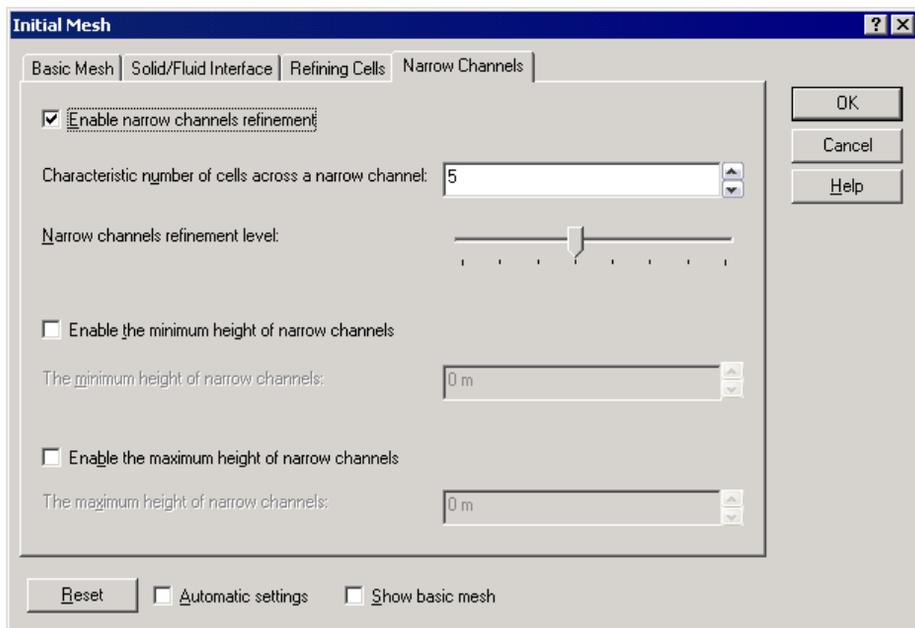


Рис. 2.114. Параметры сетки при обработке узких каналов

Уплотнять сетку в фиктивных объемах будем посредством функции **Local Initial Mesh** (Локальная начальная сетка). Окна, определяющие сетку в окрестности фильтров и в зоне впуска, показаны на рис. 2.115. Как видно, здесь для зон фильтра и выхода назначен уровень дробления 6, а для зоны входа — 5. Это значит, что дробиться будут все ячейки, полностью или частично попавшие в указанные детали (тела).

Начальная сетка в вертикальных сечениях после генерации ее системой показана на рис. 2.116. Как видно, уплотнение в зоне фильтров выражено в большей степени, чем в нижней части бака. Высокая степень уплотнения в окрестности днищ фильтров объясняется действием ребер жесткости, которые не попали в аппроксимацию телами с пористой средой и распознаются системой как тонкие стенки и/или мелкие особенности геометрии. Также достаточно удовлетворительное качество сетки достигнуто в зоне выходного патрубка и смежных с ним объемов. В то же время между концом впускной трубы и рассекателем плотность сетки может оказаться недостаточной. Здесь проходное сечение аппроксимируется 5–6 ячейками. На этот факт реагируем следующим образом. Во-первых, в данном случае для нас в первую очередь интересна "интегральная" точность модели течения в этой зоне, поскольку первоочередными объектами исследования являются фильтры и их окрестности. С другой стороны, будет предпринята попытка адаптации сетки непосредственно в ходе расчета.

Для этого на вкладке **Refinement** (Адаптация сетки) окна **Calculation Control Options** (Опции управления расчетом) в одноименном поле из выпадающего списка выбирается уровень 1, назначается максимально возможное число ячеек (исходя прежде всего из соображений доступности оперативной памяти) (рис. 2.117). Также на вкладке **Finish** (Завершение) определяется, что расчет завершится только при удовлетворении всех условий с минимальным числом адаптаций — 1. Также (в данном случае это совсем необя-

зательно, поскольку задача не относится к числу тех, где решение о завершении пере-
кладывается на пользователя) устанавливается достаточно большое число итераций,
чтобы расчет можно было продолжить без каких-либо дополнительных манипуляций
(рис. 2.118), а также быть уверенным, что останов не случится "не вовремя".

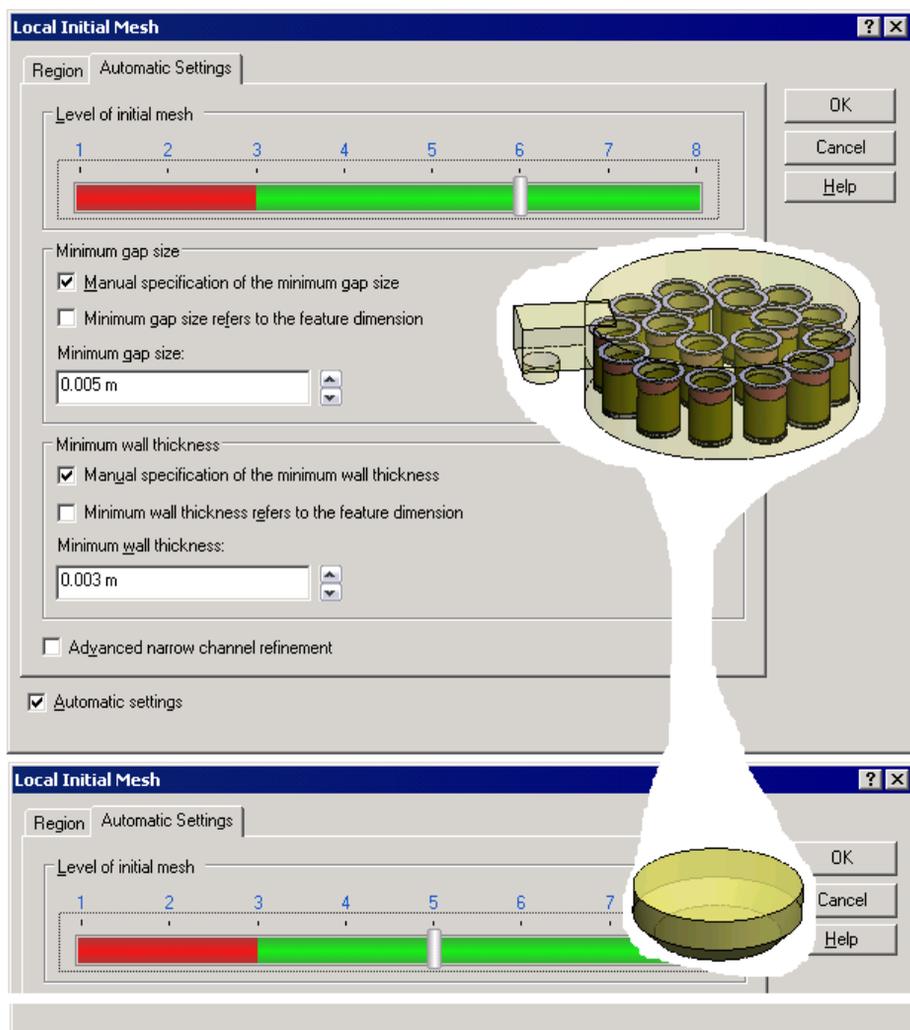


Рис. 2.115. Параметры локальной сетки в фиктивных объемах

Кстати говоря, весь этот набор функций доступен и во время расчета из меню **Calculation** (Расчет) диалогового окна **Solver** (Решатель).

В качестве целей проекта назначаем статическое и динамическое давление на входе (цель на поверхности), а также среднюю и максимальную скорость в пределах всего объема текучей среды (глобальная цель). Тем самым мы декларируем желание добиться адекватной точности во всем объеме среды.

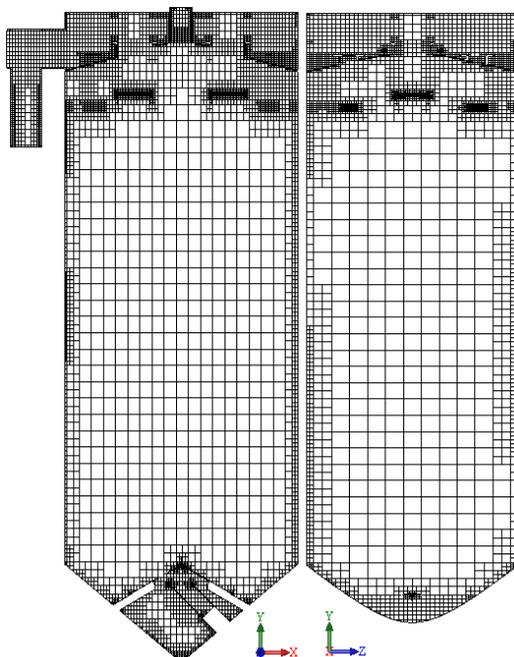


Рис. 2.116. Начальная сетка в вертикальных сечениях

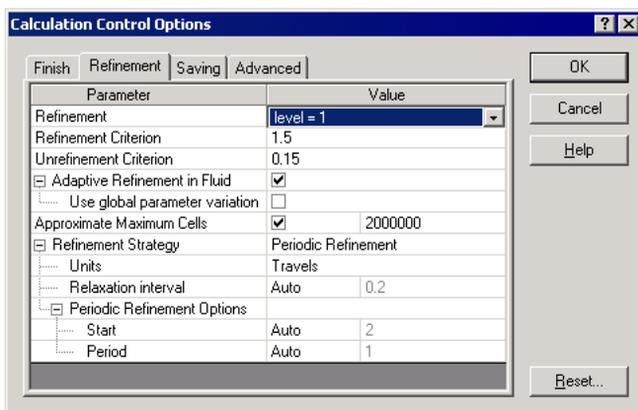


Рис. 2.117. Параметры адаптации сетки

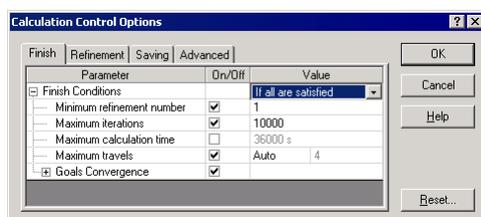


Рис. 2.118. Критерии завершения расчета

Сетка (ее сечение) после одного шага адаптации показана на рис. 2.119. Как видно, она изрядно отличается от базовой сетки.

Диаграмма скорости в вертикальном сечении, проходящем через патрубки, показана на рис. 2.120. Как видно, максимальная скорость 3,32 м/с (она имеет место на входе) достаточно велика в сравнении со средней по объему. Поэтому ту же диаграмму показываем с ограничением верхней границы шкалы до 0,1 м/с. Результат показан на рис. 2.121. Как видно, изображение приобрело достаточно наглядность. Обращает на себя внимание достаточно малая, по сравнению с "основным" объемом бака, скорость движения через фильтры.

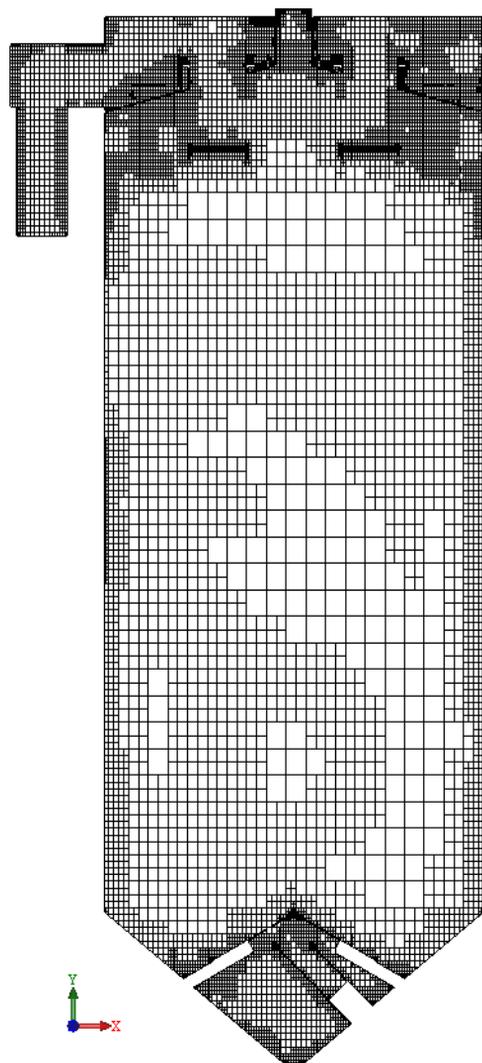


Рис. 2.119. Сетка после одного шага адаптации

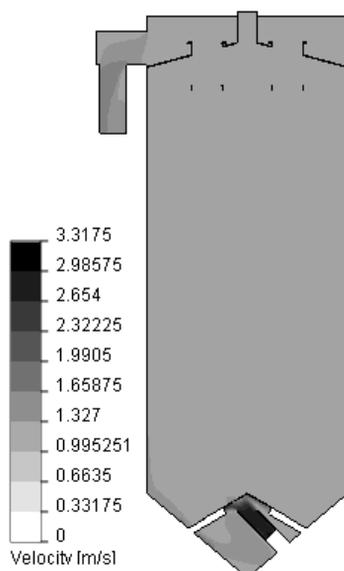


Рис. 2.120. Поле скоростей в сечении вертикальной плоскостью, проходящей через патрубки

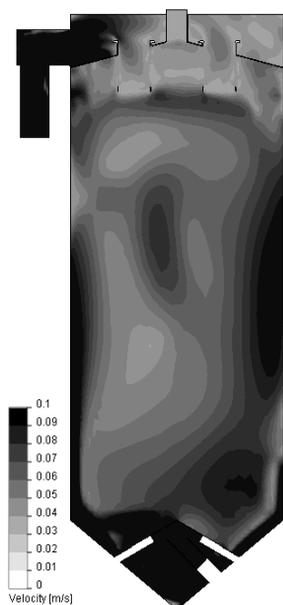


Рис. 2.121. Поле скоростей в сечении плоскостью, проходящей через патрубки — обрезанный диапазон

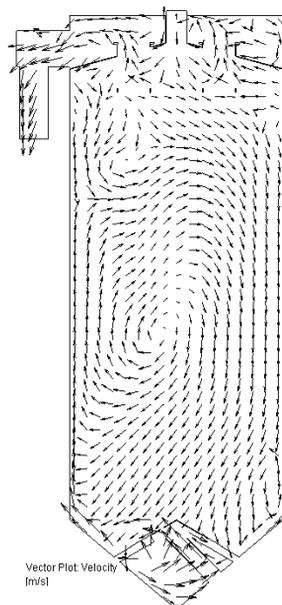


Рис. 2.122. Распределение скоростей в сечении — векторное представление

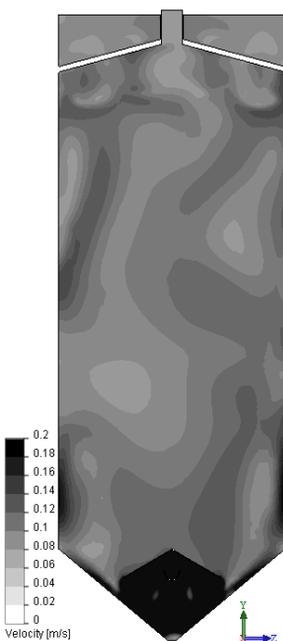


Рис. 2.123. Поле скоростей в сечении вертикальной плоскостью, перпендикулярной патрубкам

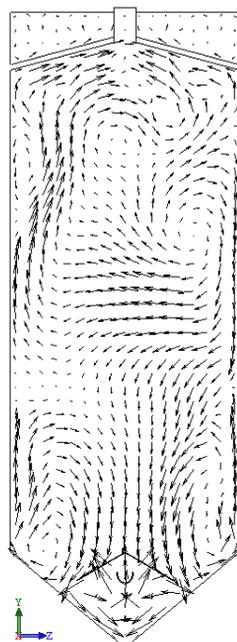


Рис. 2.124. Распределение скоростей в сечении плоскостью, перпендикулярной патрубкам — векторное представление

Статическое давление в сечении показано на рис. 2.125. При этом диапазон для шкалы был адаптирован (сужен) так, чтобы повысить контрастность в области возле фильтров. Также посредством процедуры **Probe** (Проба) выделено значение функции в двух парах точек: до и после фильтров, расположенных ближе к выходу и дальше от него. Как видно, на левом фильтре падение давления составляет около 5 Па, а на втором — несколько меньше, около 3 Па.

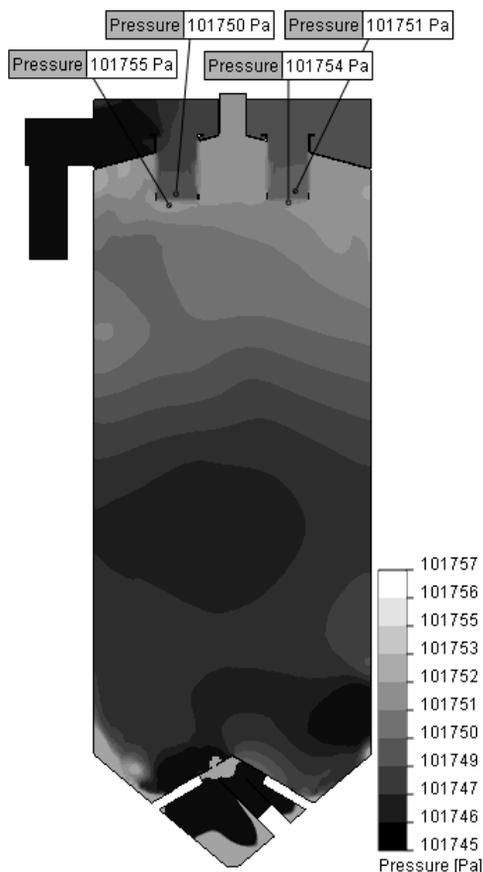


Рис. 2.125. Распределение статического давления в сечении плоскостью, проходящей через патрубки — обрезанный диапазон

Более детализированную и точную информацию можно получить посредством процедуры **Surface Parameters** (Параметры на поверхности). Например, если применить ее к наружным цилиндрическим граням фильтров, расположенным вдоль плоскости симметрии, то результаты будут выглядеть, как показано на рис. 2.126. Как видно, средний массовый расход варьируется от 5,7 до 3,6 кг/м² в секунду. Надо полагать, что фильтры на периферии могут иметь еще меньшую интенсивность фильтрации. Таким образом, можно оценить степень равномерности при загрузке фильтров.

На рис. 2.127 аналогичная по структуре информация собрана для внутренней и наружной грани дна фильтра, ближайшего к выходу. Как видно, падение давления составляет около 5 Па, а скорость в направлении оси Y (перпендикулярно фильтру) снаружи — 0,017 м/с и внутри — 0,021 м/с. Причина того, что скорости, как, кстати, и массовые расходы, неодинаковы в том, что изнутри к фильтру (телу, его заменяющему) примыкают ребра, через которые не происходит движения текучей среды.

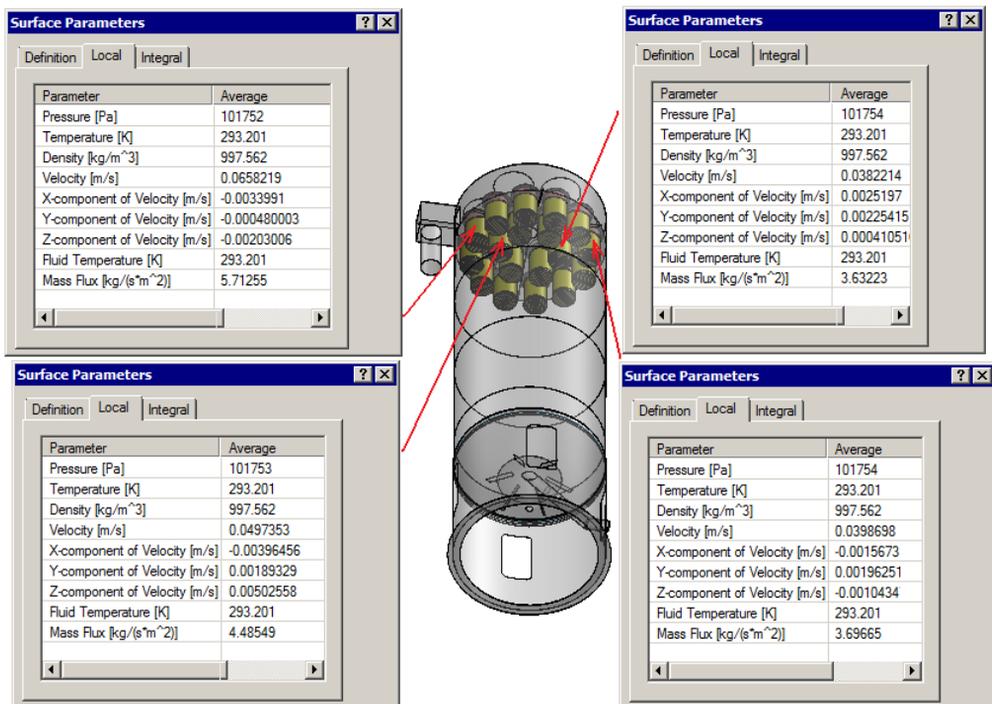


Рис. 2.126. Интегральные расчетные параметры на наружных цилиндрических гранях фильтров

В контексте данной задачи актуальной становится одна из относительно редко используемых процедур Flow Simulation — расчет среднего времени прохождения средой расстояния от входа до какой-либо точки Dimensionless LMA (Local Mean Age) и местного значения коэффициента воздухообмена LACI (Local Air Change Index). Последняя характеристика рассчитывается как V/Q , где V — объем расчетной области, а Q — отношение объемного расхода на входе (входах) к среднему времени, необходимому для прохождения текучей средой расстояния от входа до какой-либо точки.

Здесь следует отметить, что по умолчанию Flow Simulation может иметь настройки, при которых в процессе выполнения расчета параметры LMA не вычисляются. Соответствующий регулятор находится на вкладке **Advanced** (Дополнительные параметры) окна **Calculation Control Options** (Опции управления расчетом) (рис. 2.128). Перед расчетом нужно активизировать опцию **LMA**.

После выполнения расчета при попытке отобразить параметры из группы **LMA** можно потерпеть неудачу. Дело в том, что они не входят в число параметров, визуализируемых по умолчанию. Поэтому при попытке создать подобную диаграмму нужно подать команду **View Settings** (Установки просмотра), затем в одноименном окне нажать кнопку **Parameter List** (Список параметров) и в окне **Display Parameters** (Параметры визуализации) включить опцию **LMA** (рис. 2.129, 2.130).

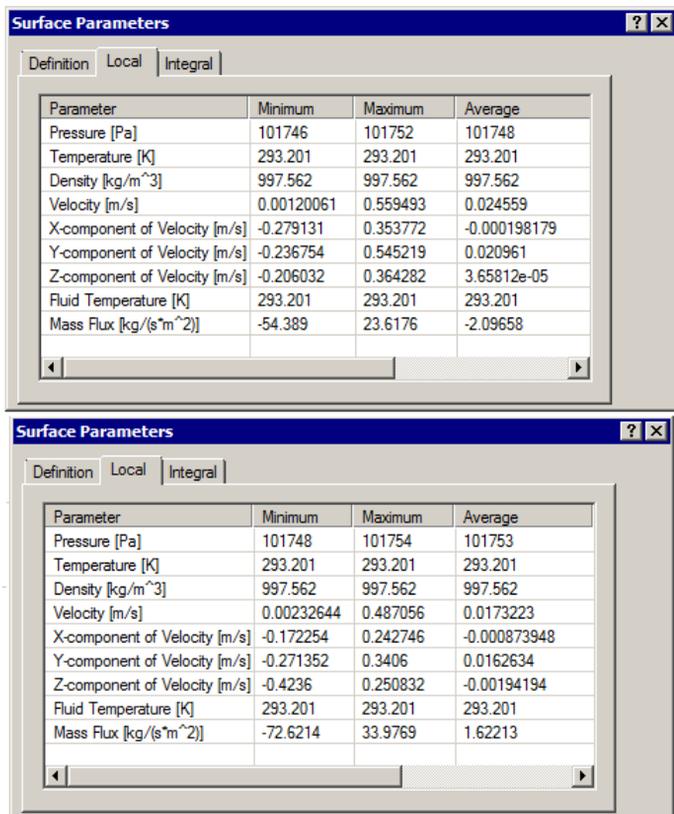


Рис. 2.127. Интегральные параметры на внутренней и наружной гранях дна

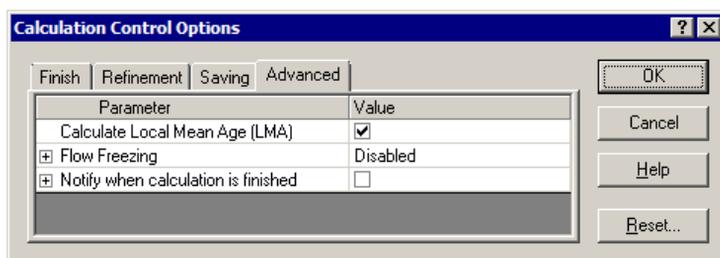


Рис. 2.128. Настройка для вычисления функции LMA

Как и другую рассчитанную функцию, LMA можно визуализировать на фоне линий тока посредством команды **Flow Trajectories** (Траектории течения) (рис. 2.131). Результат для параметра LMA показан на рис. 2.132. Как видно, до попадания "среднестатистической" частицы среды на фильтр проходит около 500 с, а до выхода из колонны — несколько меньше 700 с. Таким образом, параметры LMA позволяют получить информацию, которая будет полезна, например, при оценке взаимодействия частиц с текучей средой (при условии малой концентрации этих частиц). Тогда следовало бы использовать не процедуру **Flow Trajectories**, а **Particle Studies** (Расчет частиц). У последней, помимо очевидных достоинств (учета плотности, гравитации, различных вариантов взаимодействия со стенками, анимации движения частиц), есть и некоторое ограничение: взаимодействие с телами, имитирующими пористые среды, никак не учитывается. То есть они идеально прозрачны для частиц.

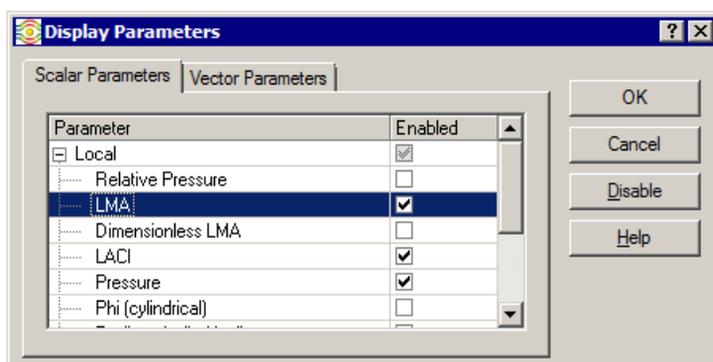


Рис. 2.129. Включение LMA в число доступных для отображения параметров

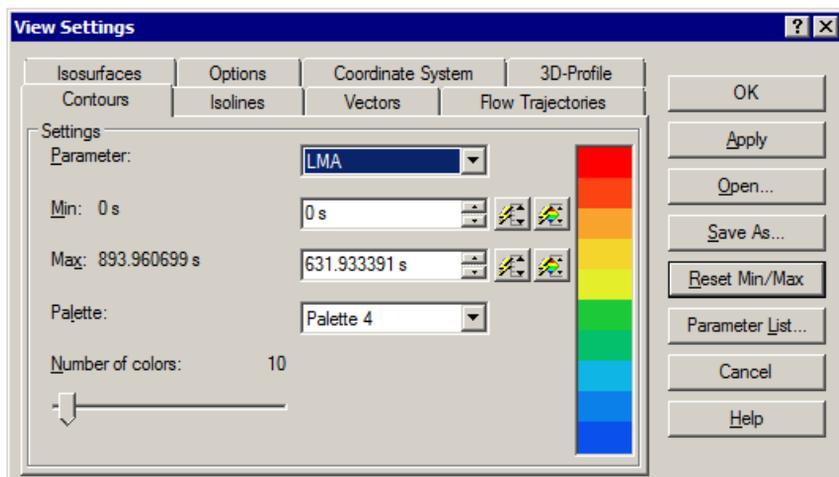


Рис. 2.130. Отображение LMA

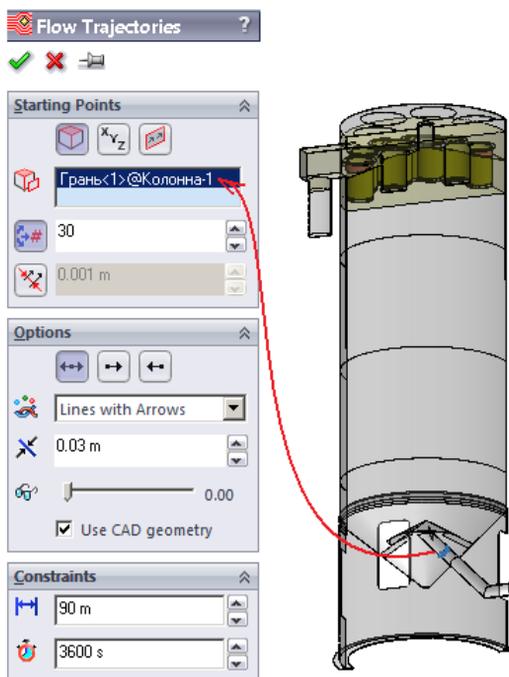


Рис. 2.131. Построение линий тока, проходящих через вход

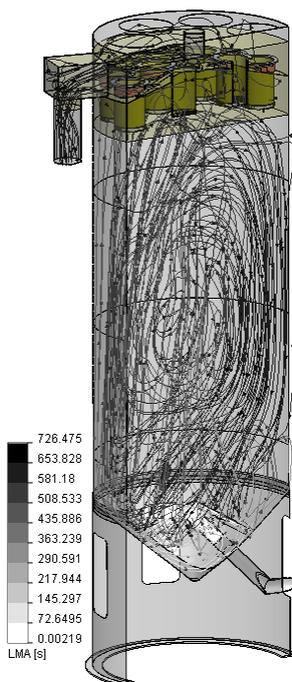


Рис. 2.132. Время действия воздуха на фоне линий тока, проходящих через вход

2.2.4. Выводы

Моделирование фильтрующих систем посредством SolidWorks Flow Simulation может быть выполнено с различной степенью подробности. Для фильтра сложной структуры рациональным является его замена пористой средой, параметры которой также могут быть рассчитаны с помощью виртуальной модели. В этом случае потребуется привлечение дополнительных математических инструментов, позволяющих рассчитать константы параболической функции, описывающей зависимость градиента давления от скорости при прохождении жидкостью (газом) условной пористой среды. На результат оказывает влияние направление движения текучей среды, особенности конструкции в месте расположения фильтрующих элементов.

2.3. Тепловой расчет сушилки гальванотехнического производства

Целью данного раздела является тепловой расчет сушилки гальванотехнического производства. Автор благодарит сотрудников ОАО "Тамбовгальванотехника имени С. И. Лившица" (Тамбов) за предоставленную геометрическую модель и взаимодействие при решении задачи.

2.3.1. Постановка задачи

Исходная геометрическая модель показана на рис. 2.133, разрез горизонтальной плоскостью — на рис. 2.134, поперечной вертикальной — на рис. 2.135, а модель в прозрачном состоянии — на рис. 2.136. Как видно, "конструкторская" модель была радикально упрощена. Во-первых, обеспечена герметичность конструкции, за исключением, естественно, входного (загрузочного) отверстия сверху и отверстий для выхода воздуха. Во-вторых, ликвидированы скругления и щели, не влияющие (существенно) на гидродинамику. В частности модифицированы углы, где лист с отгибом (при наличии скругления на отгибе) примыкает к плоскому листу — в таких зонах образуется близкий к нулю внутренний угол (рис. 2.137). Ликвидация скруглений существенно уменьшает "базовую" размерность сетки, а также ту ее составляющую, которая обусловлена потенциальным использованием процедур уплотнения сетки. Само собой, эти упрощения повлияют на результат, однако для данной задачи это будет несущественно на фоне остальных факторов.

Кстати говоря, использование для расчетов геометрической модели, полученной посредством команд группы **Сварные детали**, не слишком рационально, при достаточно сложной геометрии. Поэтому приходится тратить время на упрощение геометрии. Этот факт, кстати говоря, является дополнительным аргументом в пользу создания на этапе концептуального проектирования схематических моделей с хорошей параметризацией. Как правило, безболезненно изменить сложную модель, подготовленную для оформления конструкторской документации, невозможно даже с учетом исчерпывающей функциональности SolidWorks.

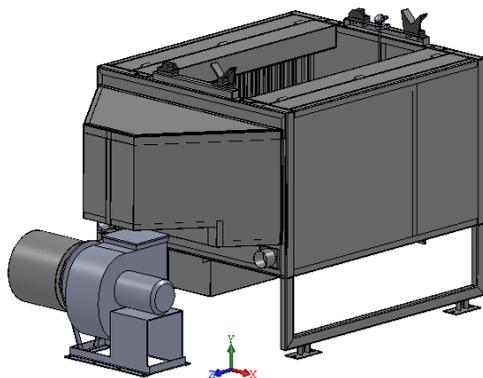


Рис. 2.133. Внешний вид исходной модели

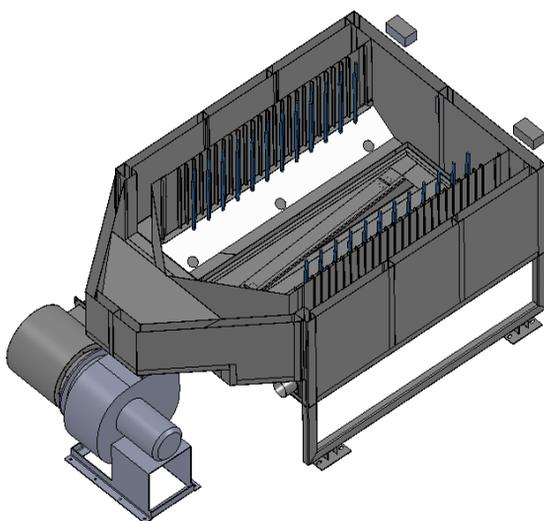


Рис. 2.134. Разрез горизонтальной плоскостью

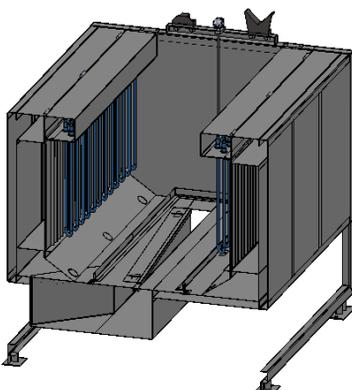


Рис. 2.135. Разрез вертикальной поперечной плоскостью

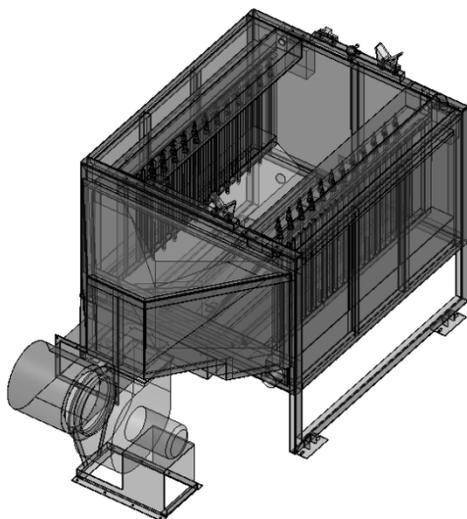


Рис. 2.136. Модель в прозрачном состоянии

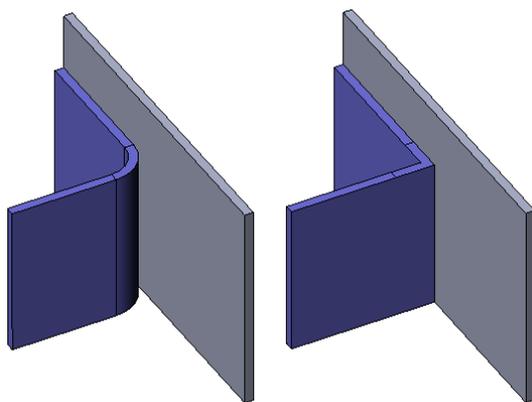


Рис. 2.137. Схема упрощения геометрии, описывающей изделия из листового металла

Сушилка функционирует следующим образом: корзина с деталями устанавливается на дно. Включается центробежный вентилятор, который осуществляет циркуляцию воздуха, забирая его из объема с корзиной и направляя в боковые пазухи. Из них воздух проходит через щели в своего рода жалюзи и протекает мимо тэнов, нагреваясь при этом. Тэны со всех сторон открыты, поэтому могут посредством теплообмена излучением нагревать как собственно корзину, так и внутренние вертикальные стенки, которые также будут излучать в пространство. Общая мощность тэнов 38,4 кВт.

Сушилка двумя патрубками присоединена к внешней системе вентиляции, в которой присутствует некоторое разрежение. В нее через круглые отверстия в наклонных стенках, примыкающих к дну камеры, выбрасывается часть воздуха из рабочего объема (рис. 2.138).

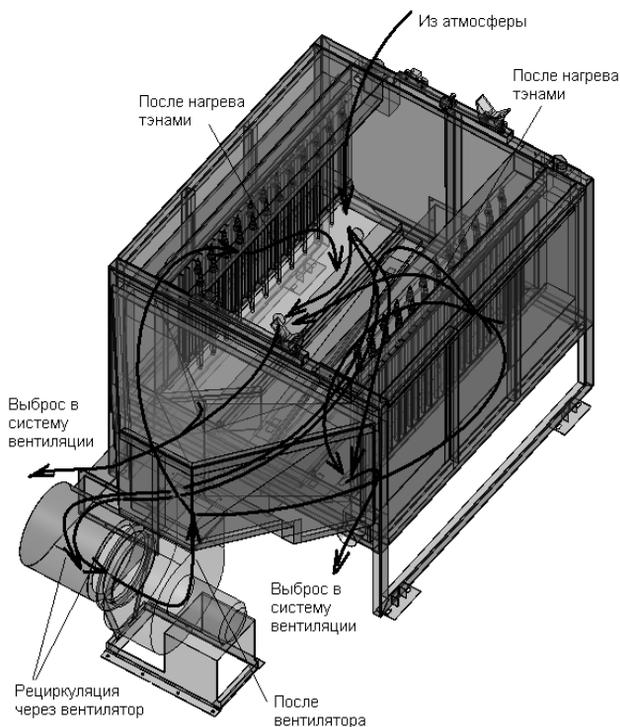


Рис. 2.138. Схема движения воздушных потоков

2.3.2. Расчетная модель

Расчетная геометрическая модель в разрезе показана на рис. 2.139. Как видно, помимо упрощений введены и новые объекты. Во-первых, это крышка с бортами над входным отверстием. Она имеет высоту, сопоставимую с поперечным размером отверстия, и нужна для преобразования внешней аэродинамической задачи во внутреннюю. В принципе, более адекватная аппроксимация возможна, если бы вспомогательный объект был больше контура отверстия, но в качестве первого приближения договариваемся о достаточности данной модели. Также добавлены заглушки, закрывающие отводы в систему вентиляции — их назначение очевидно.

Внутренний вентилятор представлен сугубо простой геометрией — телом без полостей, имеющим две плоских грани: одна будет имитировать вход, другая — выход. Что будет находиться между этими гранями — абсолютно несущественно, поэтому профиль тела схематически воспроизводит контуры вентилятора.

Окно проекта **General Settings** (Общие установки) показано на рис. 2.140. Задача будет решаться как внутренняя, с учетом теплопроводности в телах. Активизирована опция **Radiation** (Излучательный теплообмен), но опция **Environment radiation** (Излучение окружающей среды) отключена, то есть теплового обмена между внутренними гранями элементов конструкции (решается внутренняя задача — процессы на наружных гранях описываются другими законами) и окружаю-

щей средой (а более конкретно, границами расчетной области) нет. Задача решается в стационарной постановке с учетом гравитации.

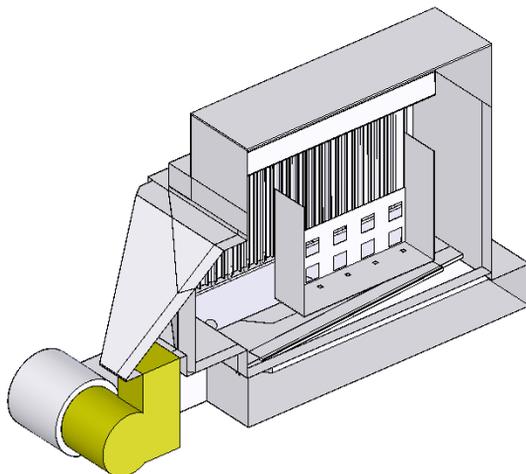


Рис. 2.139. Расчетная геометрическая модель в разрезе

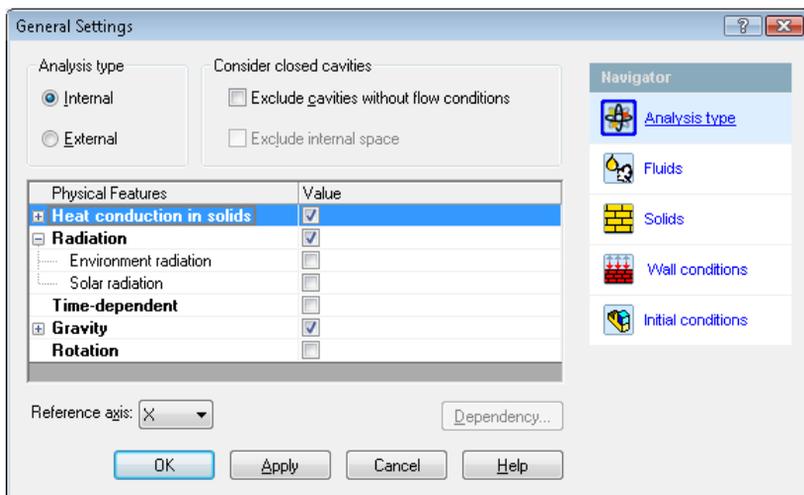


Рис. 2.140. Определение типа задачи

В качестве материала по умолчанию назначена нержавеющая сталь (рис. 2.141). Сразу оговоримся, что дальнейшей конкретизации для материалов, за исключением условных объектов, не будет. Наибольшая погрешность от этого возникнет, как представляется, в модели тэнов: теплопроводность материалов, из которых они изготовлены, может ощутимо отличаться от стали. С целью экономии ресурсов следовало представить их (как, собственно, и сделано в данном расчете) как однородную среду с некими эффективными характеристиками (теплопроводностью для стационарной задачи и теплоемкостью — для нестационарной). Мы же предположим, что перераспределение температуры по длине и сечению стержня нагревателя незначительно.

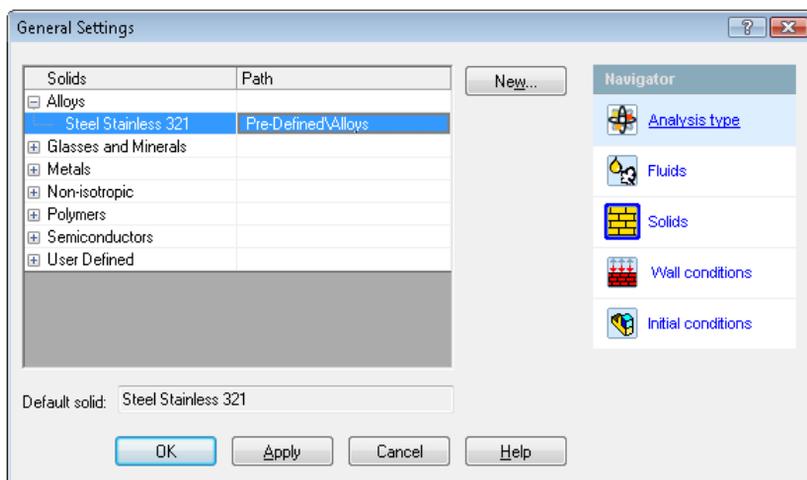


Рис. 2.141. Назначение материала по умолчанию

На странице **Wall conditions** (Условия на стенках) (рис. 2.142) определяем способ взаимодействия внешних стенок с окружающим пространством — теплообмен с условной внешней средой.

ПРИМЕЧАНИЕ

Напоминаем, что внешняя среда во внутренней задаче является условным объектом, ни при каких условиях не изменяющей своих параметров (температуры).

Также не имитируется теплообмен излучением с окружающим пространством. Учитывая достаточно высокую (предполагаемую) температуру некоторых фрагментов наружных стенок, данное допущение может ощутимо повлиять на результат. Одной из причин его принятия является сокращение времени счета.

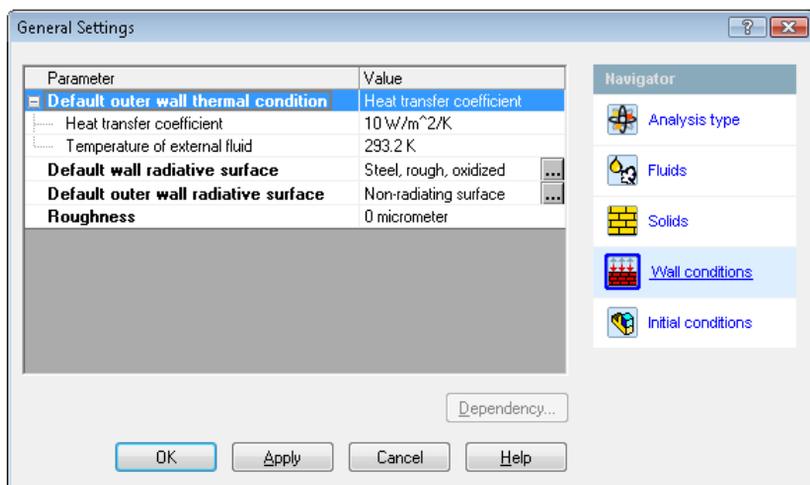


Рис. 2.142. Определение тепловых параметров на внешних гранях

На вкладке **Initial Conditions** (Начальные условия) убеждаемся, что автоматически включилась опция **Pressure potential** (Давление в точке отсчета) (рис. 2.143). Это произошло из-за учета гравитации. Таким образом, заданное статическое давление рассматривается как давление в точке начала используемой в расчете глобальной системы координат проекта (Global Coordinate System), а необходимое для проведения расчета абсолютное давление определяется по давлению в точке с заданными координатами в зависимости от гравитационного ускорения и средней (по расчетной области) плотности текучей среды. В противном случае задаваемое в качестве начальных и граничных условий статическое давление рассматривается как абсолютное.

Другие начальные условия оставляем по умолчанию. Исключением могла бы стать начальная температура, которая для сушилки явно отличается от "комнатной", однако это возможно только на основе эксперимента или уже имеющегося расчета.

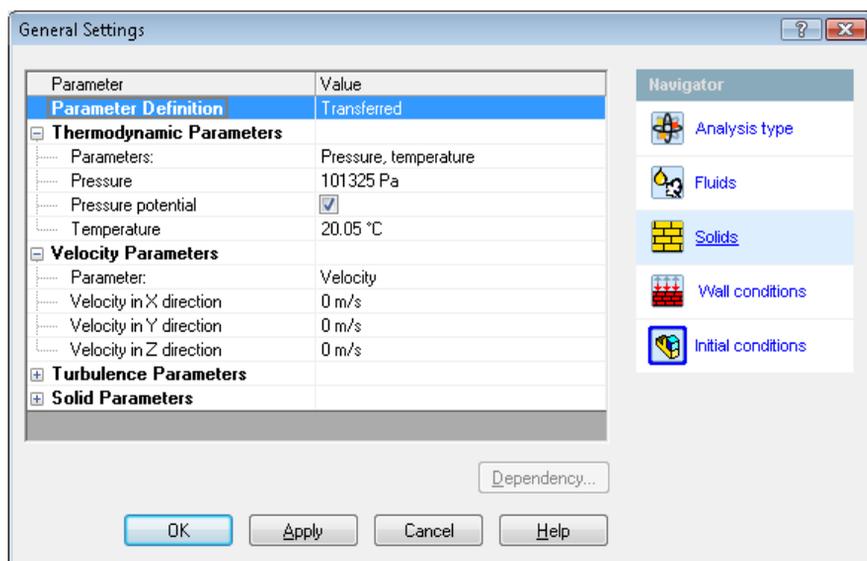


Рис. 2.143. Начальные условия

Граничные условия и тепловые нагрузки показаны на рис. 2.144. На верхней (фиктивной) крышке и ее боковых сторонах (на внутренних гранях) поставлено условие **Environment Pressure** (Давление внешней среды), интерпретируемое как полное давление втекающей в модель текучей среды и статическое давление вытекающей из модели текучей среды. Это условие принято потому, что отсутствует абсолютная уверенность в том, что отмеченные грани будут гарантированно являться входами. На внутренних гранях заглушек патрубков, подключенных к вытяжке, также поставлено давление в варианте **Environment Pressure** 101 075 Па, что на 250 Па меньше, чем давление на входах (условных).

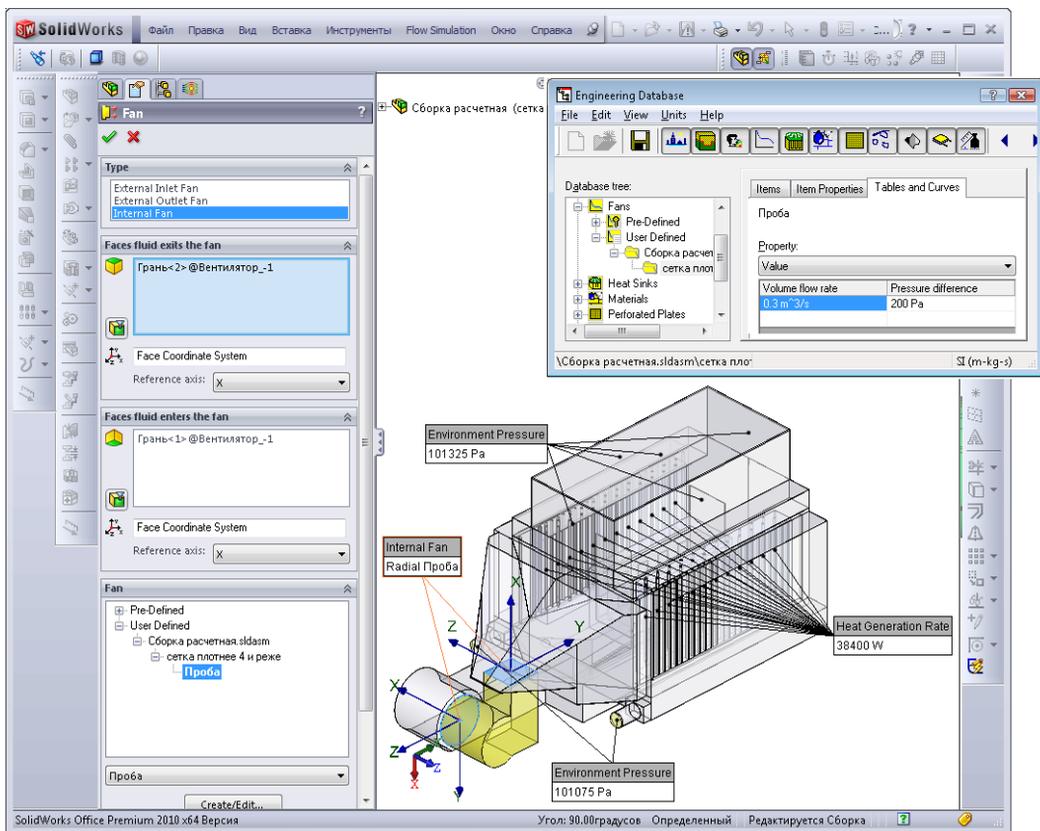


Рис. 2.144. Граничные условия и тепловые нагрузки

Информация про внутренний вентилятор ограничена знанием расхода — $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$ (такова особенность постановки задачи, что расход предполагается постоянным). Соответствующий этому расходу напор (перепад среднего статического давления между гранью, через которую поток "выходит", и гранью, через которую "входит"), предполагается 200 Па (рис. 2.146).

Из других реально влияющих на движение среды параметров вентилятора можно отметить **Reference density** (Характерная плотность) — плотность, при которой проводились испытания (рис. 2.145). Остальные характеристики являются условными.

Помимо необходимых входов и выходов для внутреннего вентилятора можно в разделе **Thermodynamics Parameters** (Термодинамические параметры) определить температуру на выходе, или же, активизировав опцию **Use outlet temperature** (Использовать температуру потока, втекающего в вентилятор), принять, что температура потока при прохождении через вентилятор не изменится (рис. 2.147). Кстати говоря, вход (из вентилятора в расчетную область) в интерфейсе фигурирует как **Inlet (from Fan to Fluid)**, а выход из расчетной области в вентилятор — как **Outlet (from Fluid to Fan)**.

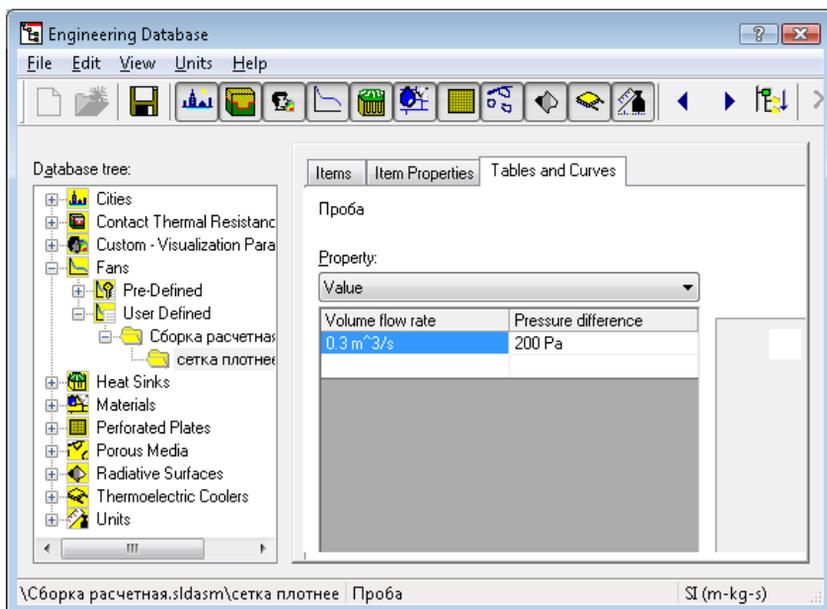


Рис. 2.145. Характеристики внутреннего вентилятора

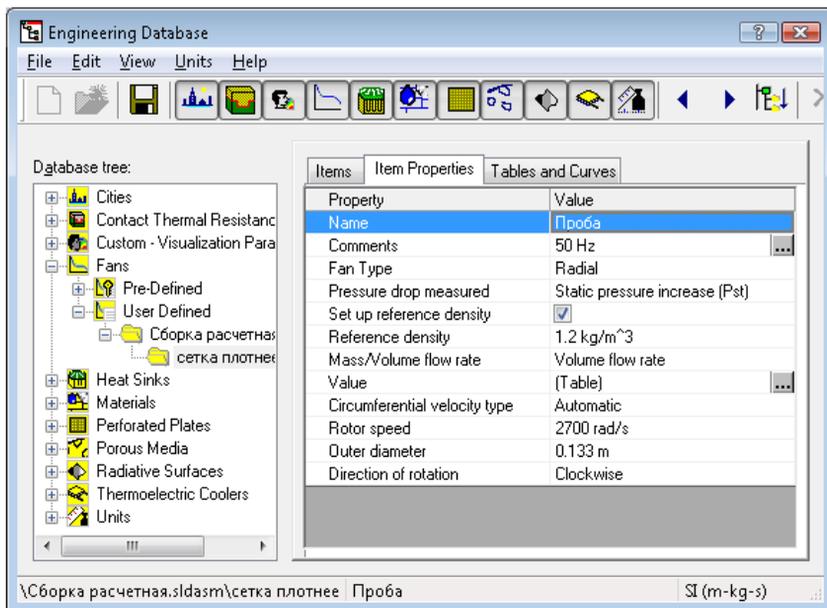


Рис. 2.146. Расходно-напорная характеристика вентилятора

Чтобы исключить перетекание тепла по условным объектам (заглушкам и телу, имитирующему вентилятор), назначаем материал **Insulator** (Изолятор), обладающий нулевой теплопроводностью (рис. 2.148).

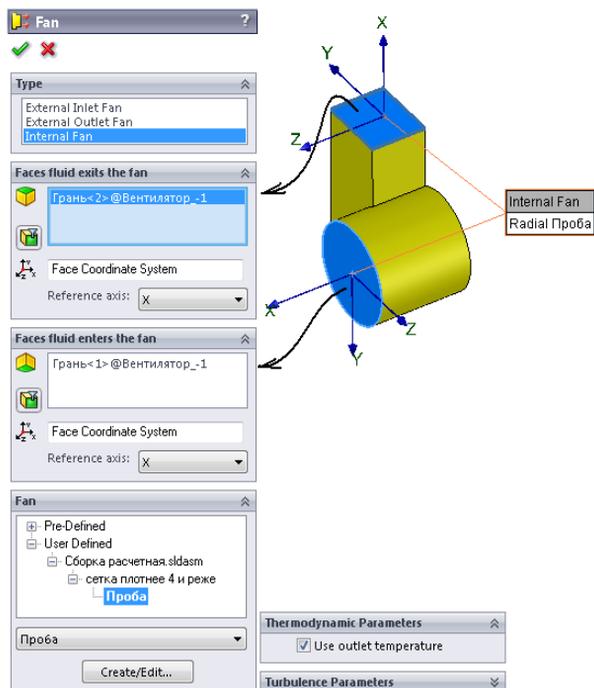


Рис. 2.147. Назначение внутреннего вентилятора

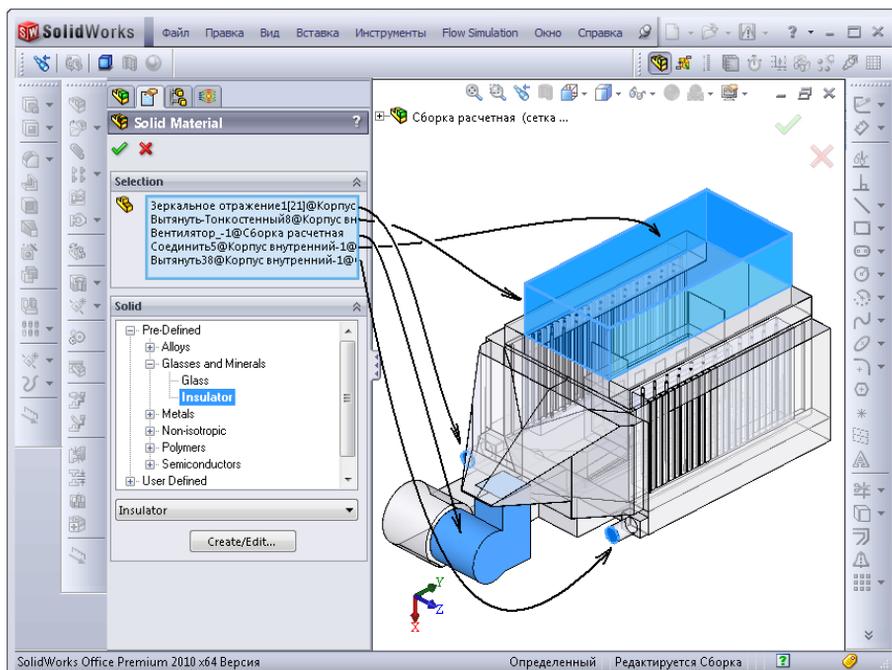


Рис. 2.148. Теплоизоляторы

В качестве целей принимаем характерные величины, определяющие функционирование системы — объемные расходы на входах-выходах, средние скорости на выходах, минимальные, средние, максимальные температуры тэнов и корзины (рис. 2.149).

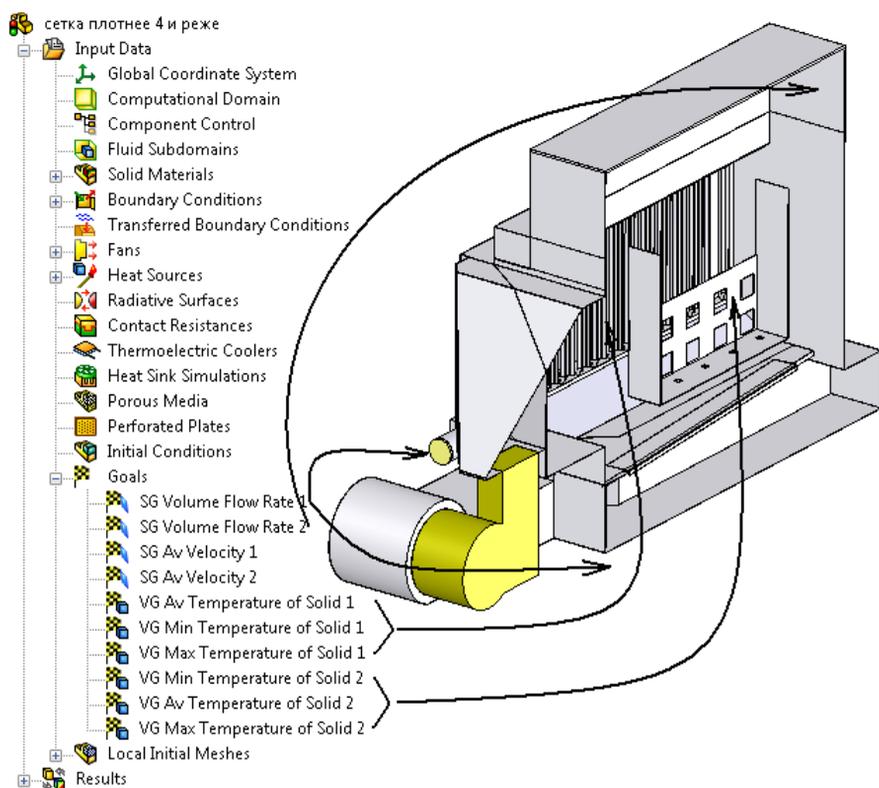


Рис. 2.149. Цели проекта

В задачах подобной степени сложности, как правило, не удастся ограничиться "грубыми" настройками из окна **Initial Mesh** (Начальная сетка) в варианте **Automatic settings** (Автоматические настройки), которые для данного проекта показаны на рис. 2.150.

Сняв соответствующий флажок, настраиваем число ячеек базовой сетки по соответствующим координатам, как показано на рис. 2.151. Начальная сетка показана на рис. 2.152.

На фоне значительных габаритов конструкции из тонкого листового металла следует в настройках начальной сетки подобрать такие параметры, чтобы система разрешила все необходимые объекты. Содержимое вкладок **Solid/Fluid Interface** (Поверхность раздела твердых тел с текучей средой) и **Narrow Channels** (Узкие каналы) показано на рис. 2.153. Как видно, установлен второй уровень адаптации сетки на мелких элементах геометрии **Small solid feature refinement criterion** (Критерий захвата малой особенности). То же самое сделано для **Tolerance refinement criterion** (Критерий разрешения сеткой выступов), причем минимальная высота выпуклости, требующей разрешения, принята равной 0,5 мм. Само собой, включена оптимизация разрешения тонких стенок.

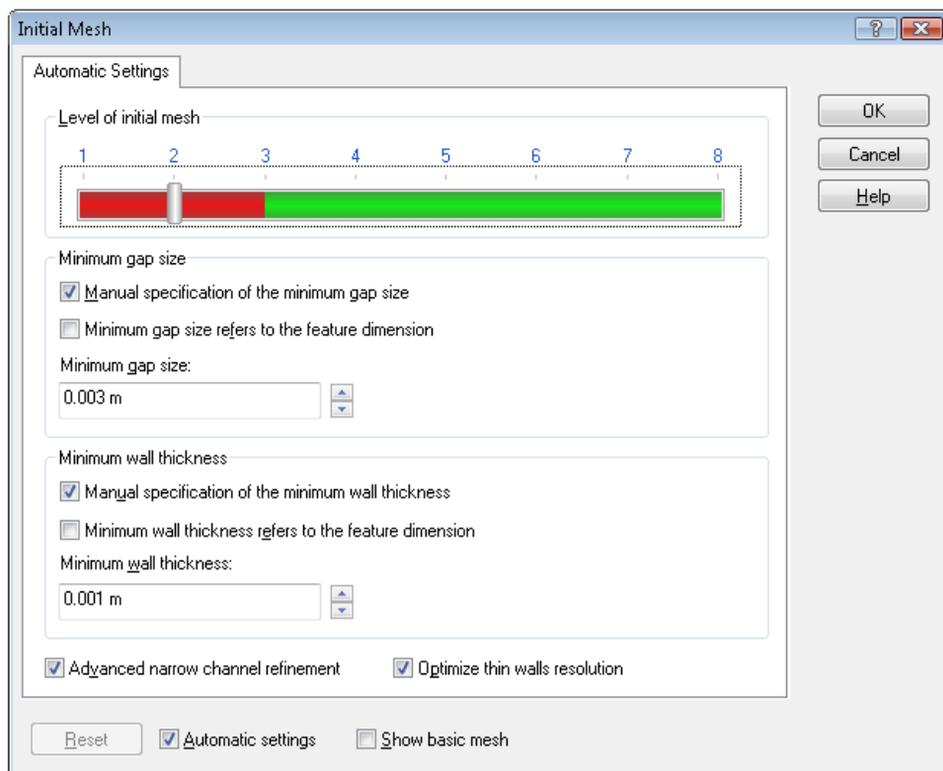


Рис. 2.150. Параметры начальной сетки с автоматическими настройками

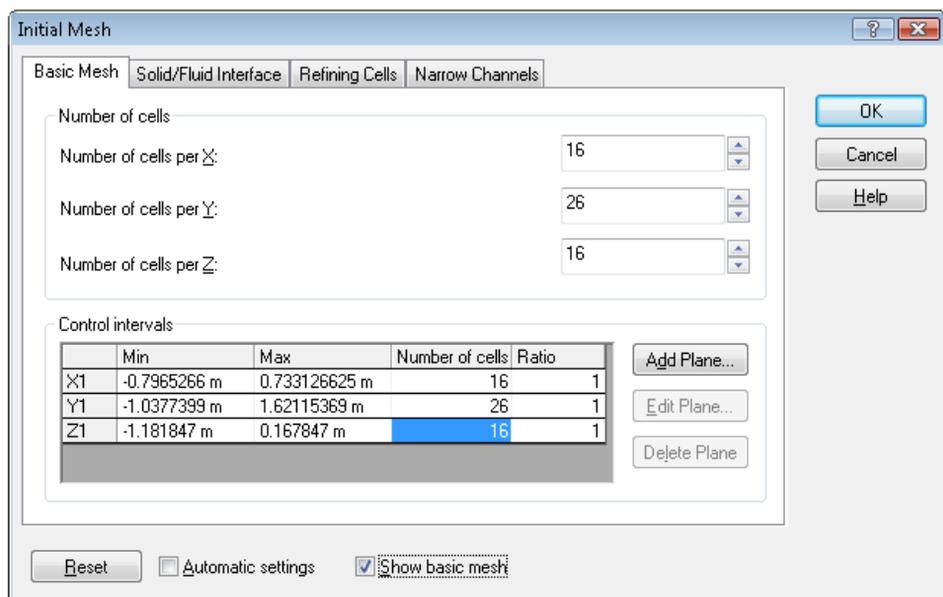


Рис. 2.151. Параметры базовой сетки

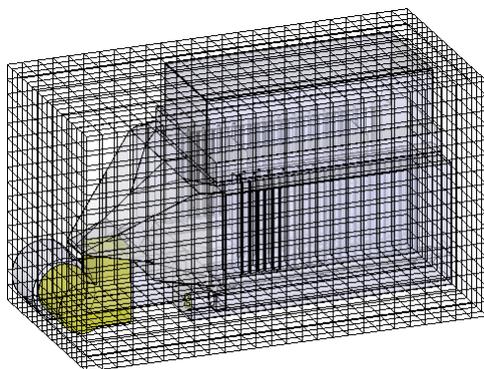


Рис. 2.152. Начальная сетка

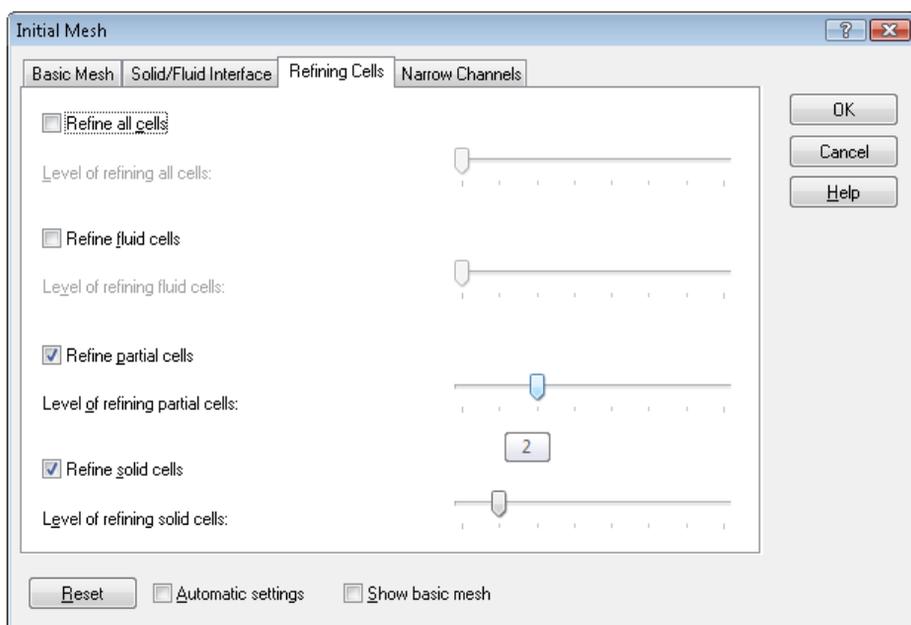


Рис. 2.153. Глобальные настройки сетки на поверхности раздела твердых тел с текучей средой

На вкладке **Refining Cells** (Дробление ячеек) регулятор уровня дробления частичных ячеек установлен в положение 2, а уровень дробления всех ячеек тел — в положение 1 (рис. 2.154).

На вкладке **Narrow Channels** (Узкие каналы) (рис. 2.155) проверяем, отмечена ли опция **Enable narrow channels refinement** (Включить опцию дробления сетки в узких каналах) и определяем параметры адаптации начальной расчетной сетки для получения более точного решения задачи в проточных частях модели. В данном случае это особенно актуально, поскольку именно от качества описания потока в подобных зонах зависит качество модели в целом.

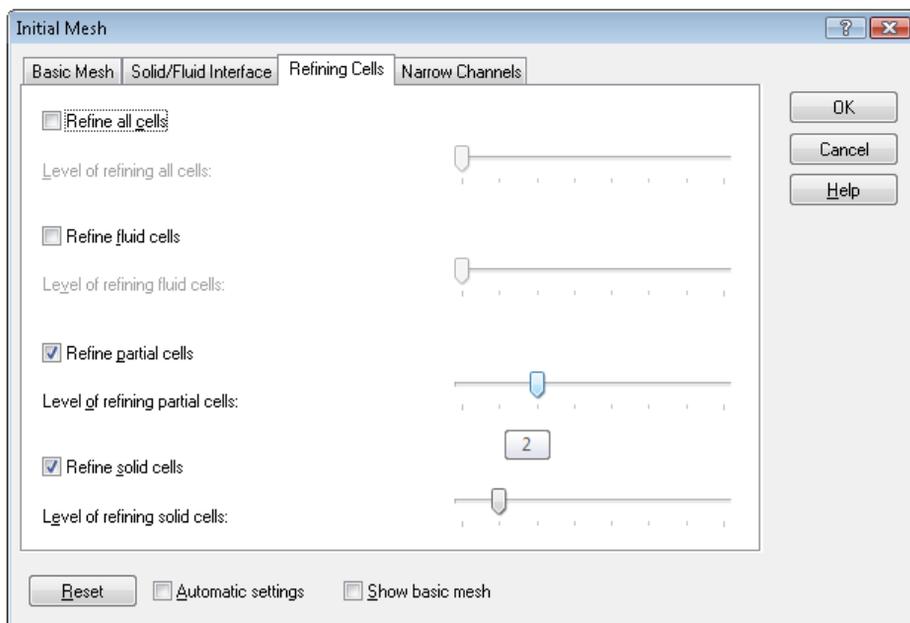


Рис. 2.154. Глобальные настройки дробления ячеек

В поле **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 регулятора **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**.

Включаем также опции **Enable the minimum height of narrow channels** (Задать минимальную высоту узкого канала) и **Enable the maximum height of narrow channels** (Задать максимальную высоту узкого канала), назначая эти величины так, чтобы процедура дробления ячеек начальной расчетной сетки в узких каналах работала не во всей расчетной области, а только там, где расстояние между поверхностями в текучей среде находится в указанном с помощью этих величин диапазоне.

Дробление в тонких каналах среди прочих критериев стоит особняком, так как базируется на количестве ячеек между поверхностями. Общая идея алгоритма состоит в трассировке лучей: из 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 объединяется. Действительно, исходя из специфики течений жидкости, вблизи стенки канала необходимо иметь более густую сетку.

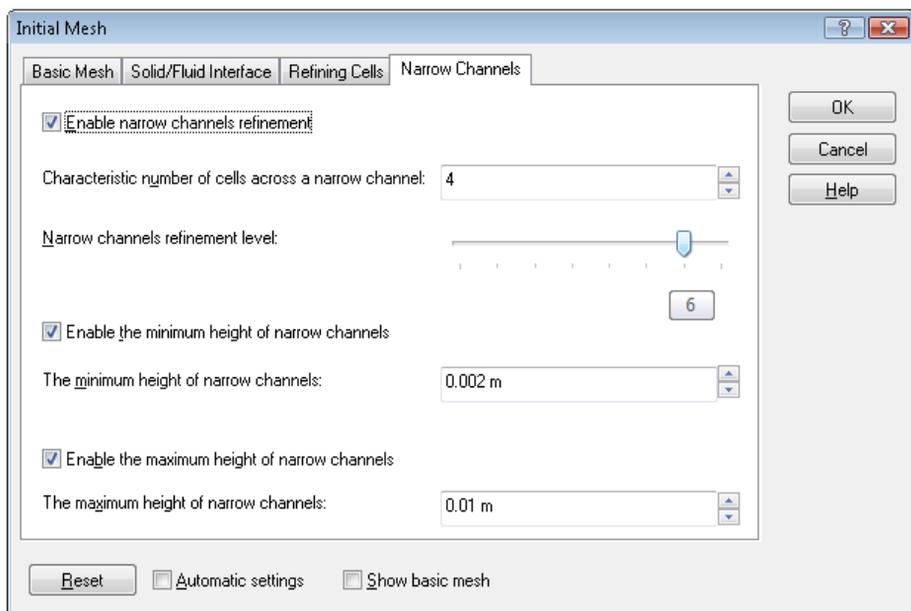


Рис. 2.155. Глобальные настройки сетки для узких каналов

Однако глобальный уровень адаптации не обеспечивает должного разрешения сеткой щелей между жалюзи, пространства возле тэнов, вокруг корзины и ее окрестностей, а также возле входа в полость, переходящую во входной канал вентилятора. Чтобы уплотнить сетку в этих зонах, создаем описывающие их тела (детали), которым присваивается атрибут **Disable** (Отключить) (рис. 2.156).

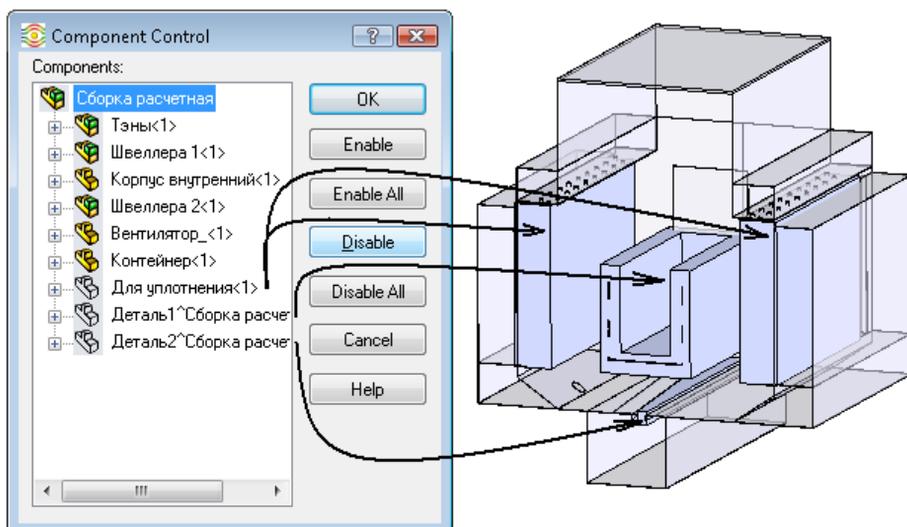


Рис. 2.156. Деактивация тел, предназначенных для локальной адаптации сетки

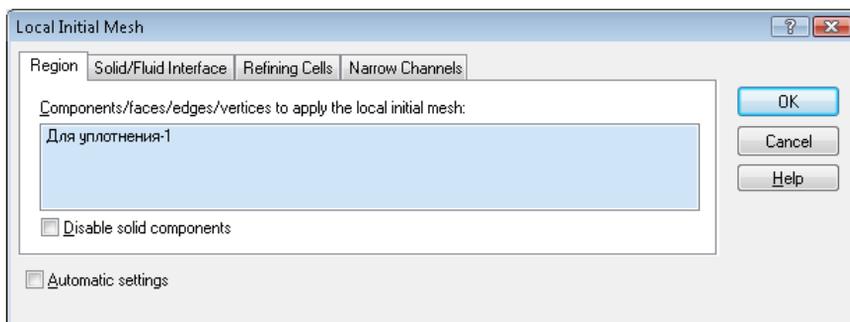


Рис.2.157. Адаптация сетки в окрестности тэнов

После этого вызываем процедуру **Local Initial Mesh** (Локальная начальная сетка) (рис. 2.157) и выполняем настройки, повышающие уровень дробления характерных объектов — тэнов и окружающего их пространства (рис. 2.158–2.160).

Относительно глобальных настроек для границы раздела до третьего уровня повышено значение регуляторов **Small solid feature refinement level** (Уровень разрешения сеткой мелких особенностей модели), **Curvature refinement level** (Уровень разрешения сеткой кривизны поверхности). При этом параметру **Curvature refinement criterion** (Критерий разрешения сеткой кривизны поверхности), задающему допустимый максимальный угол α (в радианах) между нормальными к поверхности модели в расчетной ячейке, присваивается значение 0,1 рад.

Также выставляем в позицию 5 ползунковый переключатель **Tolerance refinement criterion** (Критерий разрешения сеткой выступов поверхности): он задает допустимую максимальную выпуклость (то есть допустимое максимальное расстояние) поверхности модели в ячейке относительно плоского многоугольника, аппроксимирующего эту поверхность в ячейке (рис. 2.158).

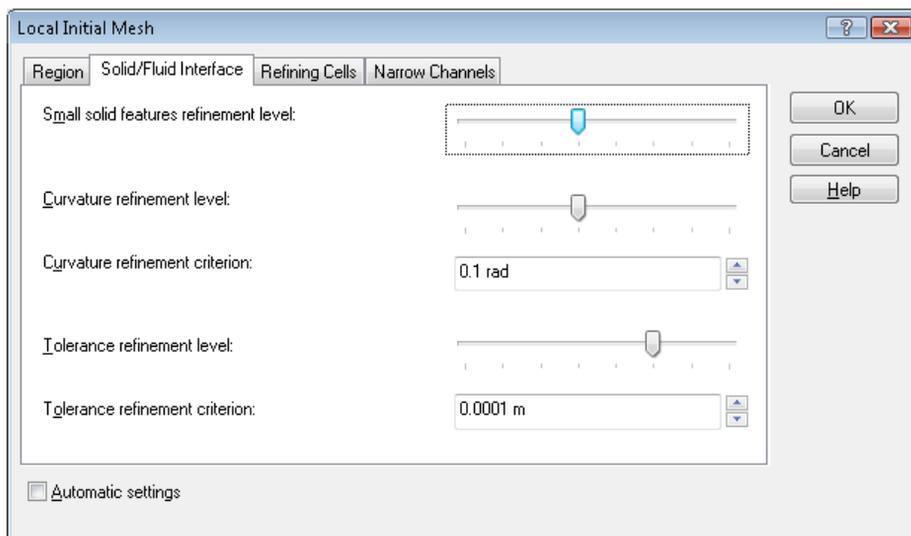


Рис. 2.158. Параметры поверхности раздела тела с текучей средой

Эти манипуляции призваны уплотнить сетку на гранях тэнов и, как следствие (разница в уровне дробления сетки между смежными ячейками не должна превышать единицы), в тэнах и в окружающей их области.

Также до уровня 3 повысим значение **Level of refining partial cells** (Уровень дробления всех частичных ячеек), а переключатель **Level of refining solid cells** (Уровень дробления всех ячеек в твердом теле) устанавливаем в положение 2 (рис. 2.159).

ПРИМЕЧАНИЕ

Предложенное решение не является единственно возможным, и, скорее всего, можно обойтись меньшим числом модификаций стандартных значений.

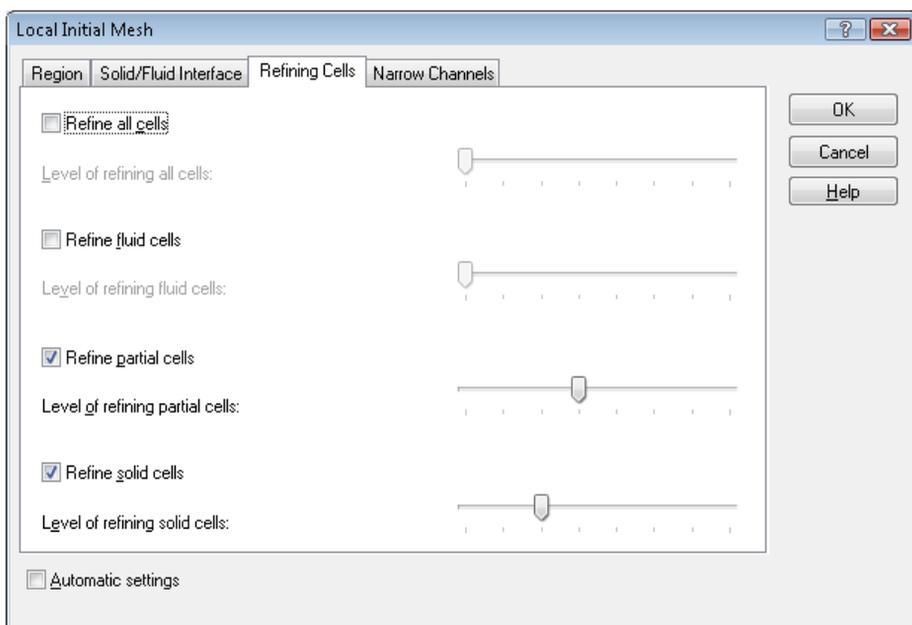


Рис. 2.159. Настройки дробления ячеек, описывающих тэны и среду на границе

Также для областей, охватывающих тэны и вертикальные направляющие щели, повышаем до 5 число ячеек сетки по сечению в узких каналах, как показано на рис. 2.160.

Результирующая сетка имеет около 4 млн ячеек. Сечение сетки горизонтальной плоскостью показано на рис. 2.161, фрагмент сечения возле входа в одну из боковых полостей — на рис. 2.162. Как видно, во всех проходных сечениях число ячеек текучей среды (целых или частичных) не меньше 5. По толщине стенок, в силу ее малости, располагается, как правило, единственная ячейка, что делает невозможным аппроксимацию изменения температуры. Однако, в силу малости толщины и достаточно высокой теплопроводности, переменная составляющая весьма мала.

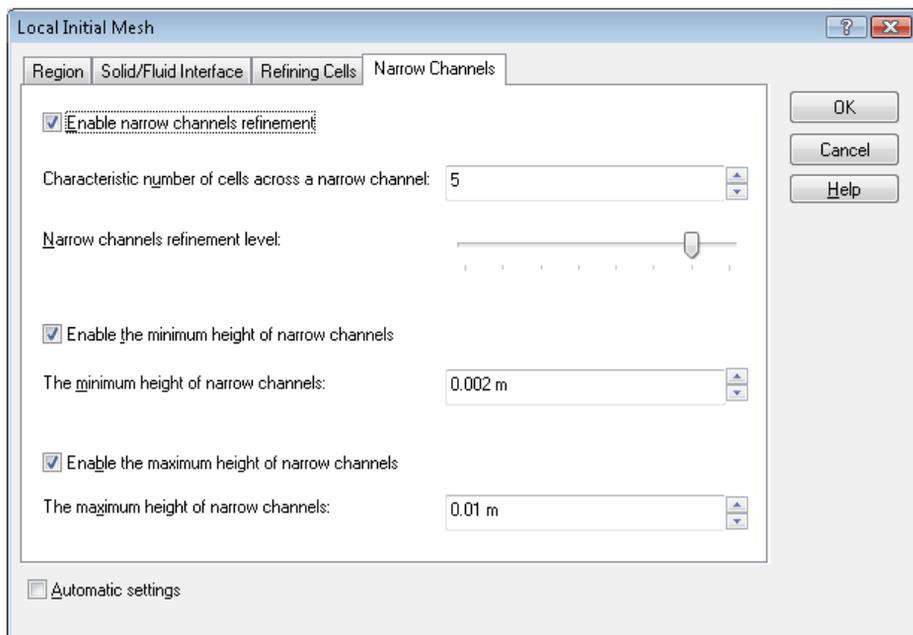


Рис. 2.160. Обработка узких каналов

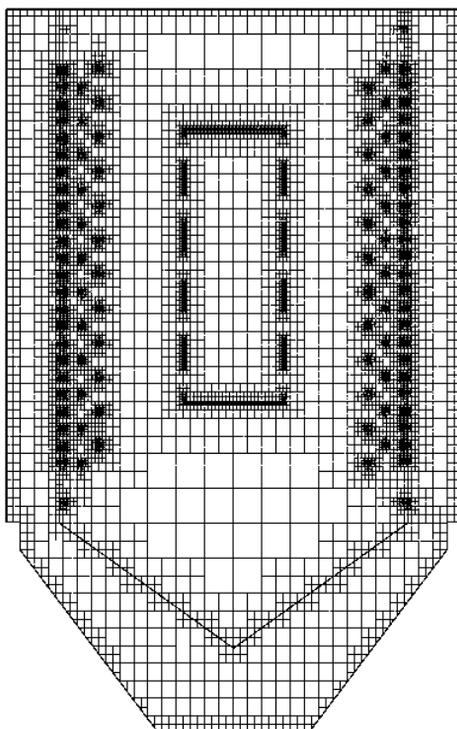


Рис. 2.161. Сетка в горизонтальном сечении

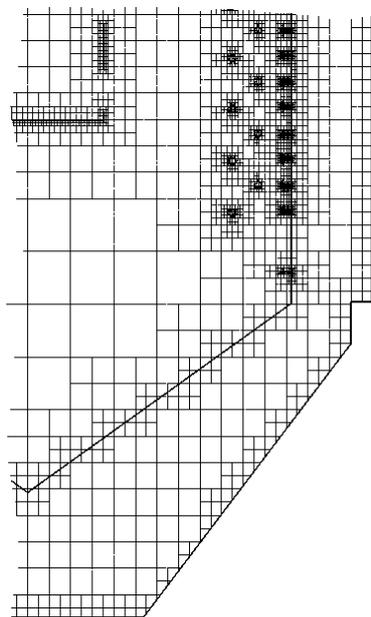


Рис. 2.162. Сетка в горизонтальном сечении — фрагмент

Сечения фронтальной и профильной плоскостями показаны на рис. 2.163, 2.164. Как видно, побочным следствием настроек сетки, управляющих разрешением малых особенностей и, что более вероятно, узких каналов явилось уплотнение в окрестности вершин острых углов. Учитывая масштаб объекта в целом, это не слишком рационально. Если бы не были выполнены упрощения геометрической модели, ликвидирующие нулевые внутренние углы на стыке отгибов и плоских граней, результат был бы менее приемлем. Следует, однако, напомнить, что в узких каналах с высокой скоростью течения мы таких упрощений не делали.

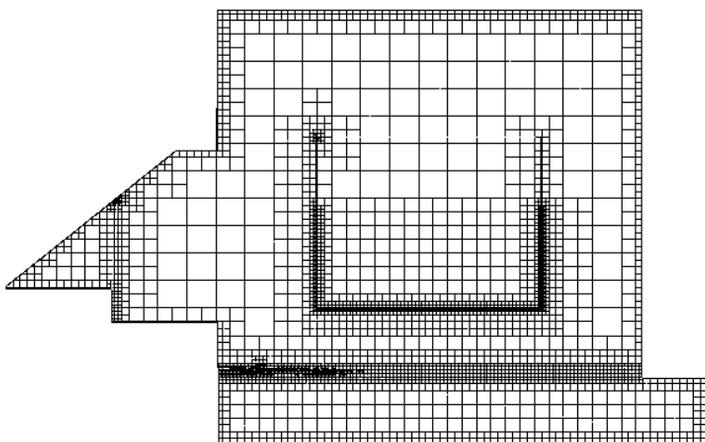


Рис. 2.163. Сетка во фронтальном сечении

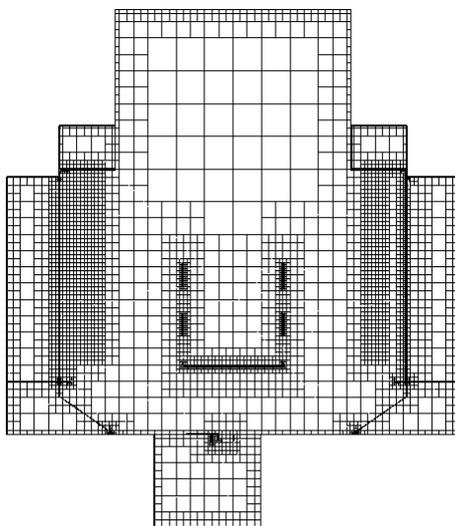


Рис. 2.164. Сетка в профильном сечении

2.3.3. Результаты

В окне **Results Summary** (Отчет о результатах) (рис. 2.165) можно увидеть основные параметры вычислительного процесса и собственно модели. Расчет продолжался около 140 часов. При этом использовался процессор семейства Core 2 Quad с частотой 3 ГГц. Потребная оперативная память составила около 7 Гбайт.

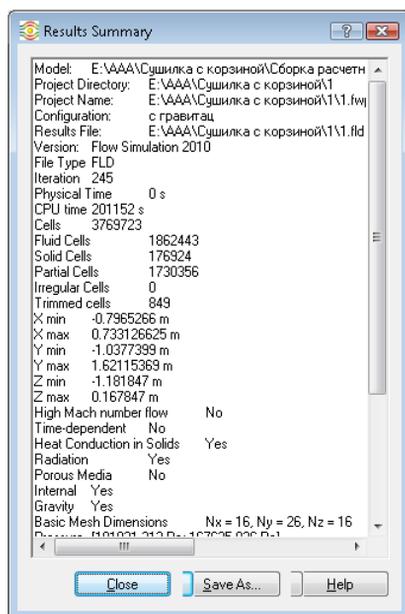


Рис. 2.165. Параметры проекта

Графики сходимости целей (минимальной, средней и максимальной температуры тэнов) показаны на рис. 2.166. Как видно, разница весьма значительна и составляет около 450° . Для более детальной расчетной модели тэнов этот результат, скорее всего, был бы другим. В любом случае он является объективной характеристикой системы "нагреватель—окружение".

Аналогичные графики для корзины приведены на рис. 2.167. Здесь разница составляет около 125° . С точки зрения равномерности сушки деталей это весьма ощутимая величина. Источники этой неоднородности будут выявлены в дальнейшем анализе.

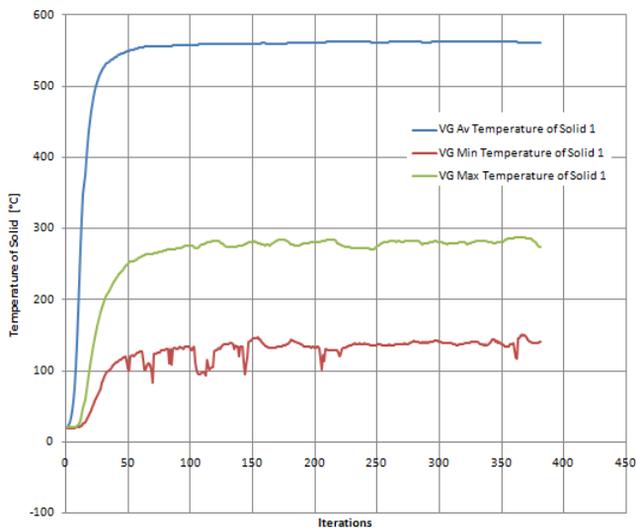


Рис. 2.166. Сходимость целей — температуры тэнов

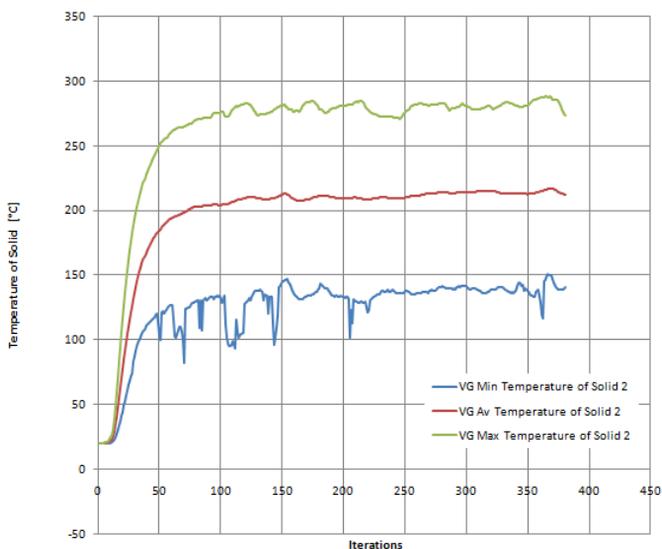


Рис. 2.167. Сходимость целей — температуры корзины

На рис. 2.168 видно, что результирующие величины расходов на входе и выходе не равны вследствие разницы в плотности воздуха, обусловленной различием температуры и давления. Если сравнить массовые расходы, то они окажутся (с высокой точностью) близкими.

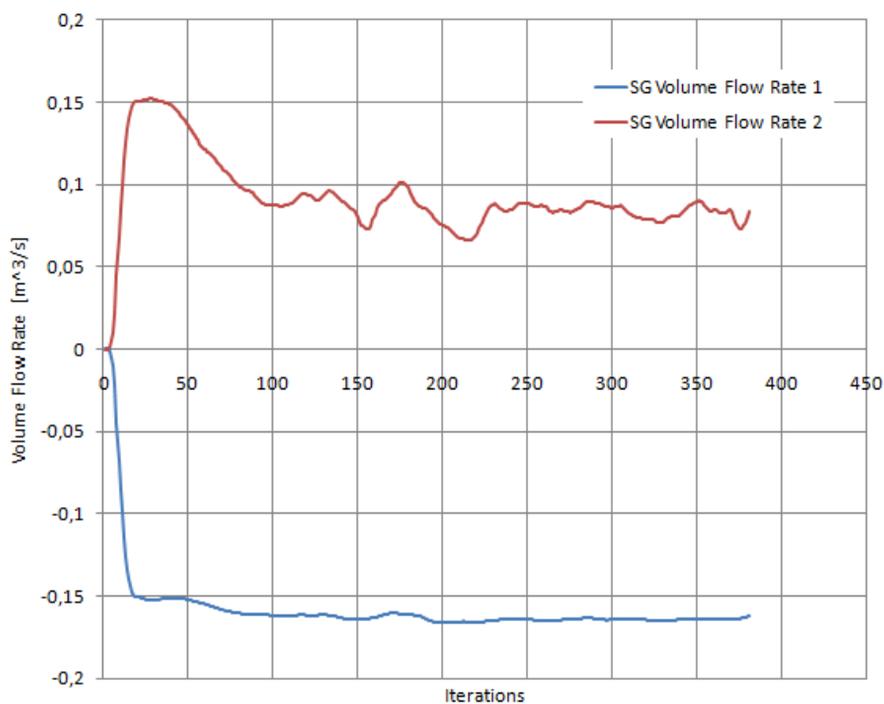


Рис. 2.168. Сходимость целей — объемных расходов на входах и выходах

Стремясь к объективности, отметим, что сходимость в данном случае недостаточно уверенная. Это, в частности, касается минимальных температур, а также объемного расхода на входе. Для сравнения продемонстрируем соответствующие графики целей, полученные для модели без учета гравитации (порождающей то, что называется естественной конвекцией). Кривые расходов показаны на рис. 2.169, температуры тэнов — на рис. 2.170, а корзины — на рис. 2.171. Как видно, они радикально более гладкие и имеют выраженные горизонтальные асимптоты.

Источником проблем, как представляется, являются вихри, пересекающие грани с граничными условиями в виде назначенного давления — это условный (геометрически он вполне реален) параллелепипед, окружающий погрузочное отверстие и имитирующий "бесконечность". Из этого следует рекомендация увеличить в расчетной геометрической модели область, описывающую окружающее пространство, чтобы каждая из граней с назначенным давлением стала или входом или выходом.

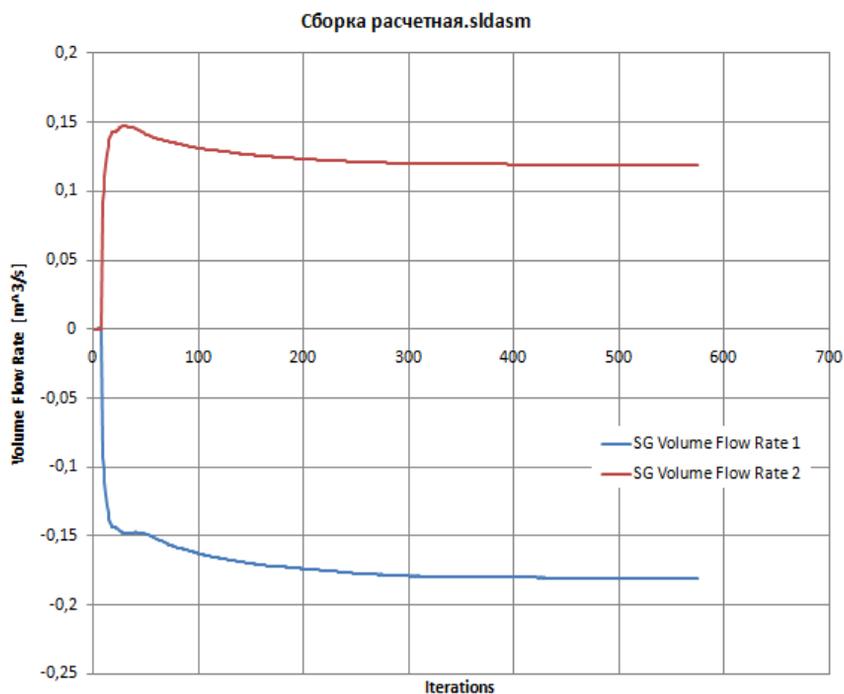


Рис. 2.169. Сходимость целей — объемных расходов на входах и выходах без учета конвекции

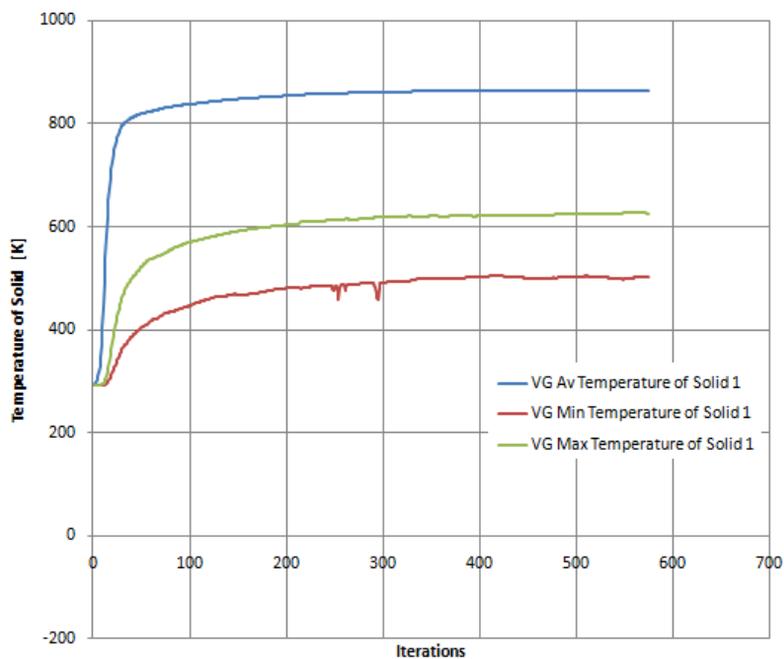


Рис. 2.170. Сходимость целей — температуры тэнов без учета конвекции

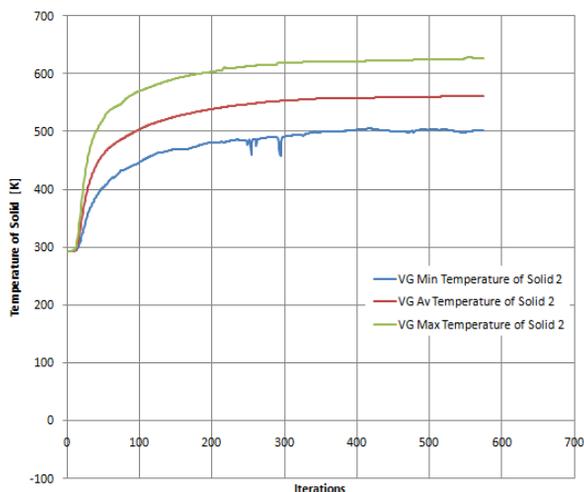


Рис. 2.171. Сходимость целей — температуры корзины без учета конвекции

Другие параметры воздуха, выбрасываемого в систему вентиляции, можно получить посредством команды **Surface Parameters** (Параметры на поверхности), аргументами которой являются внутренние грани заглушек на выходах (рис. 2.172). Как видно, средняя температура составляет 445,5 °K, то есть "отработанный" воздух нагревается более чем на 150° относительно исходной температуры 292,2 °K. Следует обратить внимание, что средняя температура воздуха на выходе существенно меньше минимальной температуры корзины, так что подавляющий вклад в ее нагрев вносит именно излучение от тэнов.

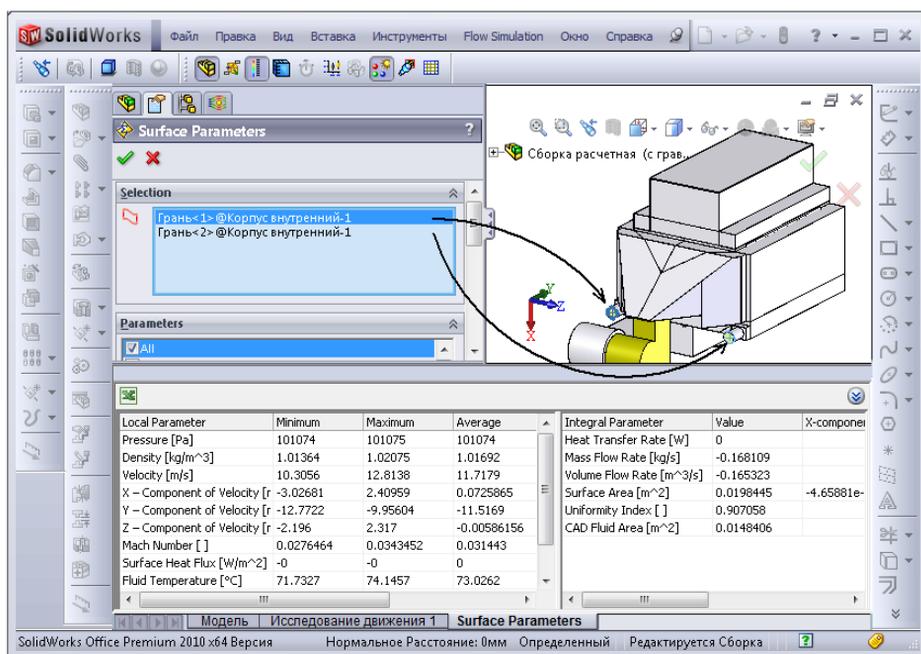


Рис. 2.172. Параметры среды на выходах

Линии тока, источником которых являются внутренние грани "заглушки" в виде короба, имитирующего атмосферу, показаны на рис. 2.173. Линии тока раскрашены в соответствии со скоростью потока. Обтекание корзины осуществляется достаточно неравномерно: большая часть "свежего" воздуха поступает в заднюю (более отдаленную от вентилятора) часть корзины. Интересно, что, попав в полость под корзиной, потоки образуют выраженную вихревую структуру. Таким образом, асимметрия геометрии порождает асимметрию аэродинамических характеристик и, соответственно, невозможность упрощения расчетной модели за счет симметрии.

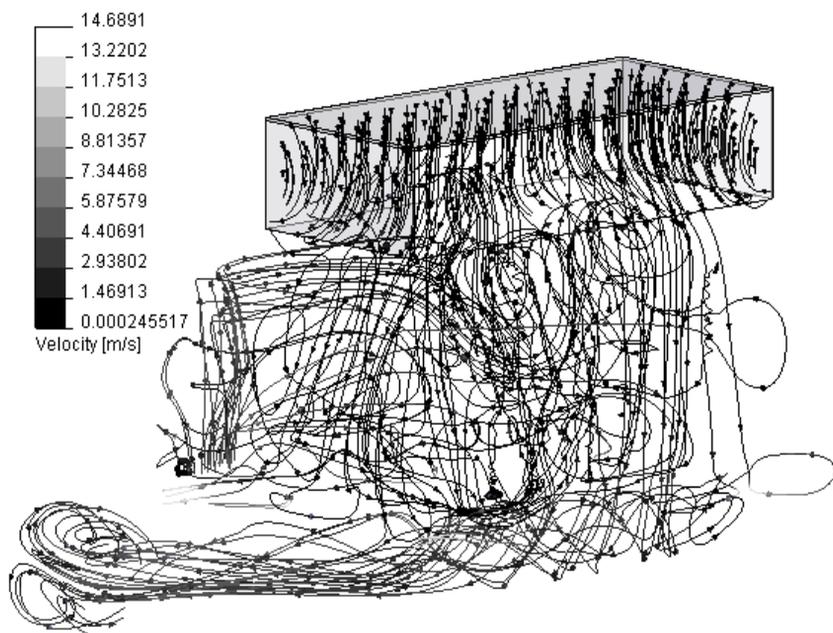


Рис. 2.173. Линии тока, исходящие из входов, с отображенной скоростью

Линии тока, исходящие из вентилятора, показаны на рис. 2.174. Как видно, максимальная скорость (около 18 м/с) наблюдается в отверстиях, ведущих в полости, которые направлены в выходы. В самих выходах скорость также достаточно велика — более 10 м/с. Также интересно, что, судя по линиям тока, большая часть воздуха, прошедшего через вентилятор, в него и возвращается.

Линии тока, сгенерированные по критерию прохождения через окрестности корзины, показаны на рис. 2.175, *справа*. Они раскрашены в соответствии с температурой воздуха. Как видно, интенсивный холодный поток поступает в заднюю (дальнюю от вентилятора) часть корзины, в то время как теплый воздух увлекается мимо нее в рециркуляцию. Передняя часть корзины обдувается нагретым тэнами воздухом более интенсивно, однако вдоль стенки также наблюдается достаточно интенсивное течение. Таким образом, именно особенности аэродинамики являются причиной неоднородности теплового состояния корзины.

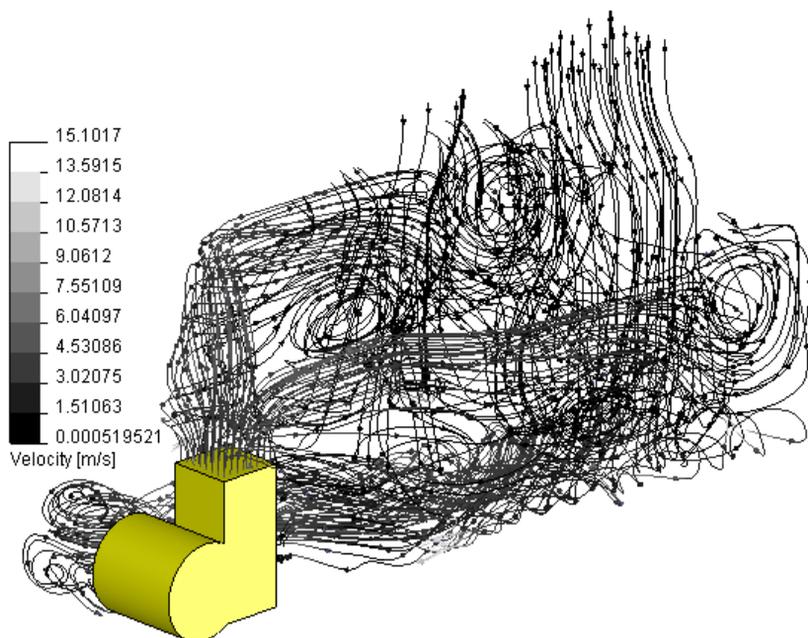


Рис. 2.174. Линии тока, исходящие из вентилятора

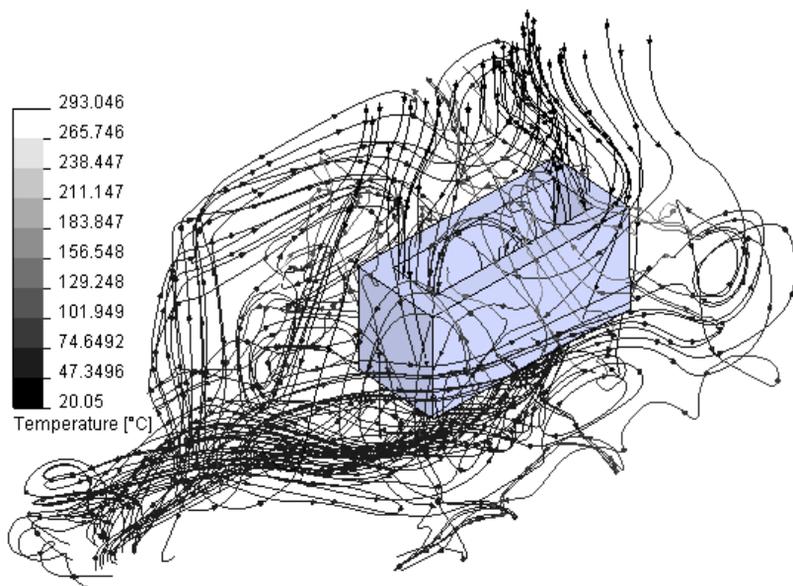


Рис. 2.175. Линии тока, проходящие через корзину и ее окрестности

Эти умозаключения подтверждаются рассмотрением диаграммы температуры в горизонтальном сечении (рис. 2.176). Воздух прогрев достаточно равномерно, за

исключением зоны в задней части корзины, и менее выраженной — в передней части корзины, а также впереди камеры. Последняя зона порождена потоком под-сасываемого воздуха, который не взаимодействует с какими-либо нагреваемыми (непосредственно или излучением от тэнов) элементами конструкции. Эта область достаточно безвредна, поскольку поток не взаимодействует с корзиной, а сразу направляется на рециркуляцию, смешиваясь с теплым воздухом.

Распределение температуры на поверхности корзины показано на рис. 2.177. Наиболее нагретой является та ее часть, которая не подвергается охлаждению под-сасываемым воздухом.

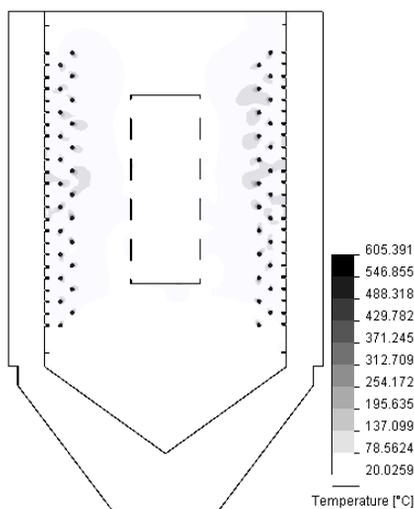


Рис. 2.176. Горизонтальное сечение поля температуры

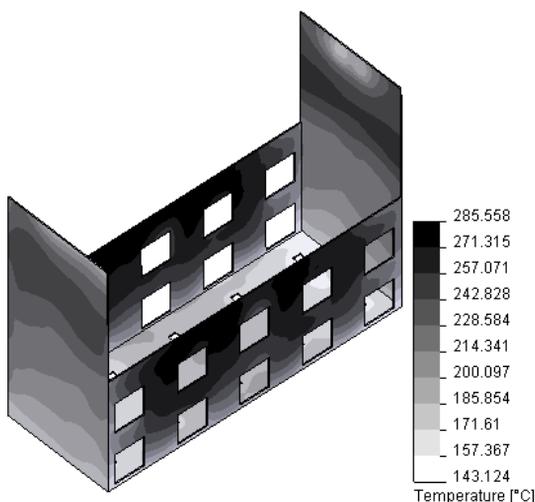


Рис. 2.177. Распределение температуры на поверхности корзины

2.3.4. Выводы

Задачу можно классифицировать как имеющую "большую" размерность. Природа ее в том, что расчет течения непосредственно сочетается с задачей теплопроводности. Как-либо упростить модель (уже модифицированную геометрическую или расчетную) без потери существенных составляющих невозможно, поэтому нужно подбирать ресурсы под задачу.

Хочется отметить высокое качество сетки, сгенерированной программой. В данном случае потребовалось минимальное вмешательство оператора, причем число нерационально измельченных ячеек пренебрежимо мало относительно общей размерности сетки.

2.4. Моделирование холодильной витрины

Целью данного раздела является тепловой расчет холодильной витрины. Автор благодарит сотрудников ЗАО "Озерская промышленная компания" за предоставленную геометрическую модель и взаимодействие при решении задачи.

С точки зрения теплового расчета витрина состоит из двух изолированных объемов. Первый — собственно витрина, в которой располагаются продукты, там находится испаритель, поглощающий тепло из пространства внутри витрины. Второй объем находится в нижней части, где располагается конденсатор, отбирающий тепло у хладагента, поступающего из испарителя, и отдающий его в объем, сообщающийся с окружающей средой. В данном случае мы абстрагируемся от процессов в устройствах и не будем принимать во внимание конденсатор с сопутствующим оборудованием.

Последнее упрощение является наиболее значимым, поскольку выделяемое тепло нагревает воздух в полости под витриной и, несмотря на внушительную теплоизоляцию, может частично перетекать обратно внутрь витрины. В данном случае мы пренебрежем этим эффектом (который может быть воспроизведен посредством Flow Simulation), ограничившись сугубо упрощенным представлением.

2.4.1. Постановка задачи

Геометрическая модель витрины, использованная для расчета, показана на рис. 2.178–2.180. Некоторые ее фрагменты, позволяющие уточнить представление о конструкции, приведены далее.

Как видно, в конструкции имеется значительное число трехслойных стенок, образованных двумя стальными листами с полиуретановым наполнителем в промежутке.

Еще одной существенной особенностью задачи ввиду ее решения посредством CFD алгоритмов является то, что она должна однозначно классифицироваться как "внешняя" или как "внутренняя". Строго говоря, рабочее пространство внутри витрины не является замкнутым. Небольшие щели присутствуют, в частности, между стеклами и боковыми стенками. Однако решение задачи с учетом движения среды снаружи потребует неадекватных (относительно имеющихся) вычислительных ресурсов. Поэтому ограничимся решением внутренней задачи, требующей присутствия одного или нескольких замкнутых объемов текучей среды. Соответственно возникает типовая задача обеспечения герметичности (в "геометрическом" смысле) модели. Для этого используем разнообразные приемы. Наиболее очевидный — вставить искусственные "уплотнения" (рис. 2.181). Также можно продлить некото-

рые детали до заполнения зазоров. Здесь, однако, есть существенное соображение, связанное с тем, что воздушные прослойки являются своего рода тепловыми мостиками между по-разному нагретыми деталями. В таком случае можно заполнить зазор вспомогательной деталью, присвоив ей свойства твердого тела, идентичного по тепловым характеристикам (теплопроводности и теплоемкости) воздуху.

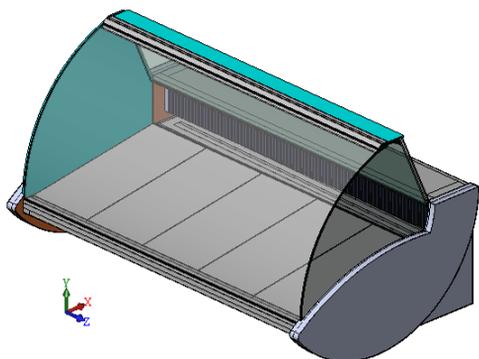


Рис. 2.178. Расчетная геометрическая модель витрины

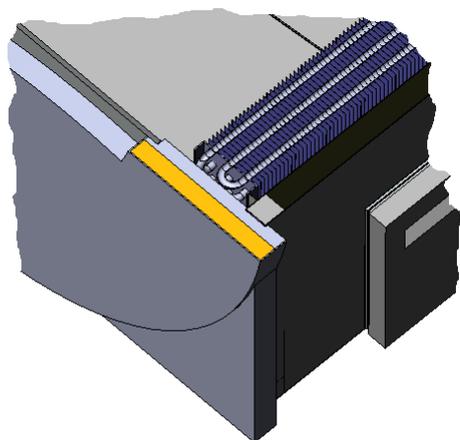


Рис. 2.179. Фрагмент геометрической модели в зоне испарителя

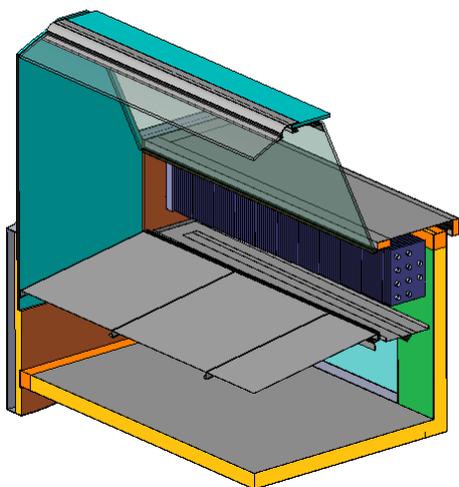


Рис. 2.180. Сечение двумя вертикальными плоскостями

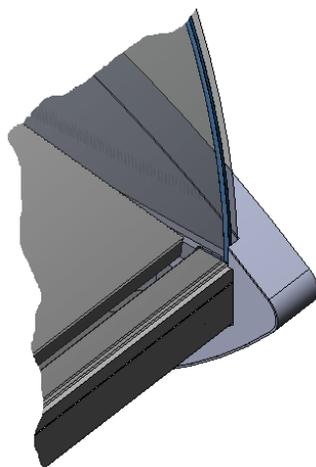


Рис. 2.181. Вспомогательное тело — уплотнение

Аналогичный прием есть смысл использовать в случаях, когда в геометрической модели присутствуют непроходные (или сквозные, но имеющие заведомо малый расход) зазоры. Дело здесь в том, что в CFD-моделях, построенных на численных

аппроксимациях, нужно или адекватно разрешать сетку, чтобы поперек сечения размещалось 4–5 ячеек, или же пренебрегать зазором. Для обеспечения первого условия предполагается использовать соответствующие процедуры Flow Simulation, которые (в общем случае) не делают различия между "нужными" и "бесполезными" зазорами. Как следствие, после построения сетки задача может приобрести колоссальную и одновременно неэффективную размерность.

В подобных ситуациях предлагается заполнять эти щели телами (детальками) со свойствами воздуха. Они будут служить теплоизоляторами, ограничивая переток тепла (в противовес варианту, когда зазор был бы устранен изменением размеров образующих его деталей). Само собой, ставить его нужно только там, где течение будет заведомо малым. Характерный пример показан на рис. 2.182.

На этой же иллюстрации следует обратить внимание на то, что детали, изначально выполненные по технологии "листовой металл" (в реальности они так же и изготавливаются), модифицированы так, что внешние скругления превратились в фаски, а внутренние попросту ликвидированы. Это, как представляется, должно сократить размерность сетки при незначительном изменении аэродинамики системы.

Также "воздухом" как телом можно заполнить небольшие "почти" замкнутые полости. За счет редкой сетки и исключения этих объемов из аппроксимации подвижной средой можно сократить размерность, так как в силу малости объема и отсутствия принудительной конвекции теплоперенос посредством движения будет несущественным.

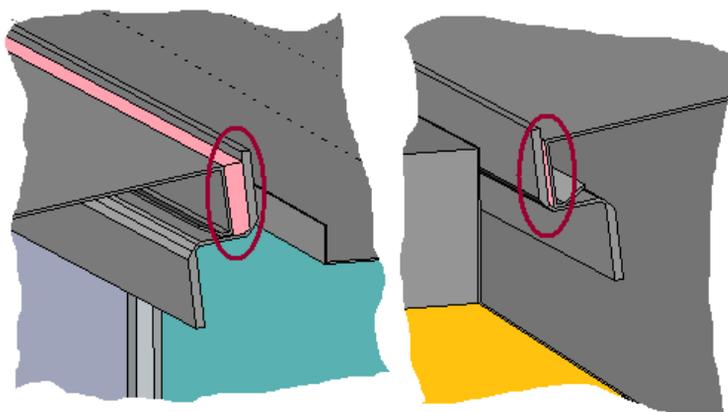


Рис. 2.182. Подготовка к заполнению узких зазоров искусственной средой

Исходная геометрическая модель, как и большинство ей подобных (предназначенных для оформления конструкторской документации с последующей ее правкой после сборки и исправления "по месту" реальной конструкции) содержит значительное число интерференций, а также зазоров, зачастую немотивированных. И те, и другие неприемлемы для расчетной модели. Первые, однако, легче идентифицируются (посредством одноименной команды) и исправляются (вырезами или прямым редактированием посредством переноса граней).

Малые зазоры выделяются посредством команды SolidWorks **Проверка зазора**, как показано на рис. 2.183. Локализовав зазоры, пользователь принимает решение об их сохранении или устранении.

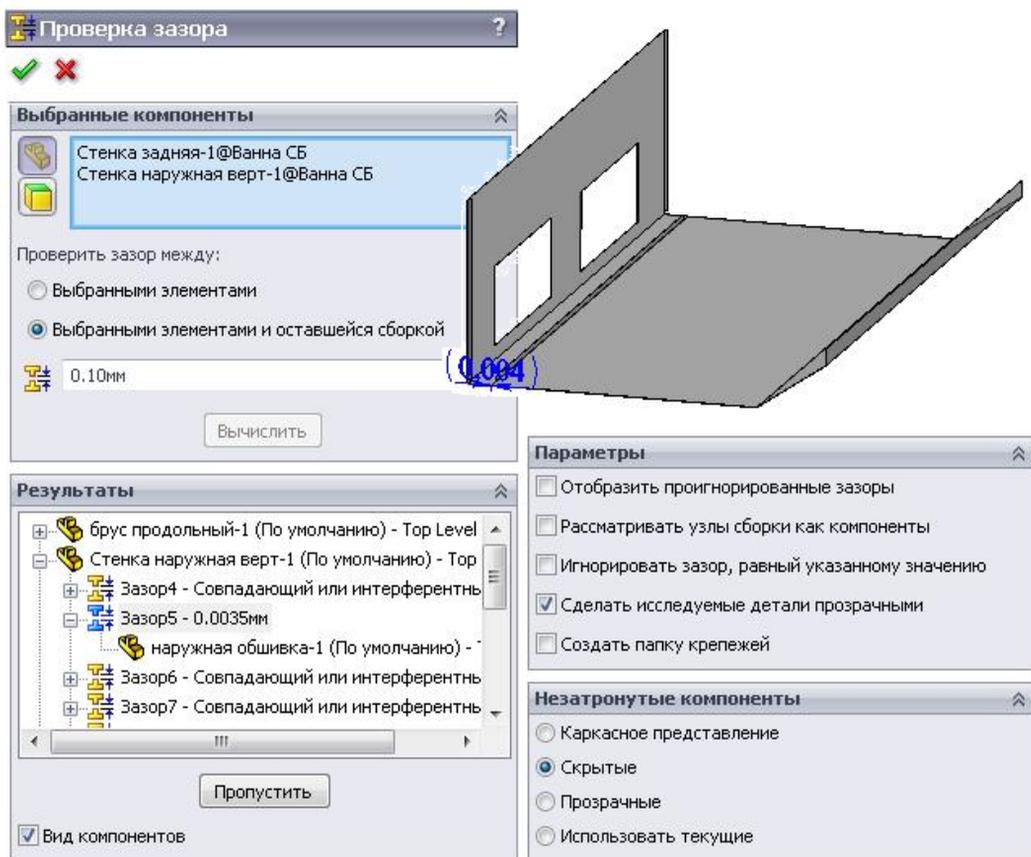


Рис. 2.183. Идентификация малых зазоров

Однако команда **Проверка зазора** не делает различия между зазорами внутренними и теми, которые нарушают "герметичность" модели. Полезным инструментом для решения этой задачи является команда **Check Geometry** (Проверка геометрии) в Flow Simulation. Она позволяет рассчитать величину внутренних объемов, получив изображение или сгенерировав тело, эквивалентное этим полостям. Если же полость не является замкнутой (имеет выход наружу), то соответственно диагностируется нулевой fluid volume (жидкостный объем). Вопрос об идентификации места утечки решается следующим образом. В сборку (многодетальную деталь) помещается тело, охватывающее предполагаемую полость. После этого оно смещается несколько раз так, чтобы определить момент обнуления рассчитанного объема. Последовательными перемещениями можно уточнить место "утечки". Характерный пример на рис. 2.184 (объем отсутствует) и 2.185 (объем появился) наталкивает на заключение, что искомое место нарушения герметичности расположено в правом нижнем углу ванны.

Есть, конечно, и более тривиальный алгоритм поиска утечек, основанный на "прямой" модели процесса. Формулируется внешняя задача с нулевыми скоростями на бесконечности, на одной из граней внутри полости назначается некий (незначительный) объемный или массовый расход, после чего, как и в реальности, ищем, где происходит утечка. Недостатком этого подхода является необходимость решать еще одну задачу немалой размерности. С другой стороны, совсем не обязательна качественная сетка, достаточно иметь минимальное число ячеек по всем каналам (в явном виде указать минимально необходимую величину зазора меньше, чем размер потенциального нежелательного канала). Также нет необходимости добиваться сходимости процесса, достаточно дождаться установления течения, позволяющего однозначно идентифицировать ненужные каналы.

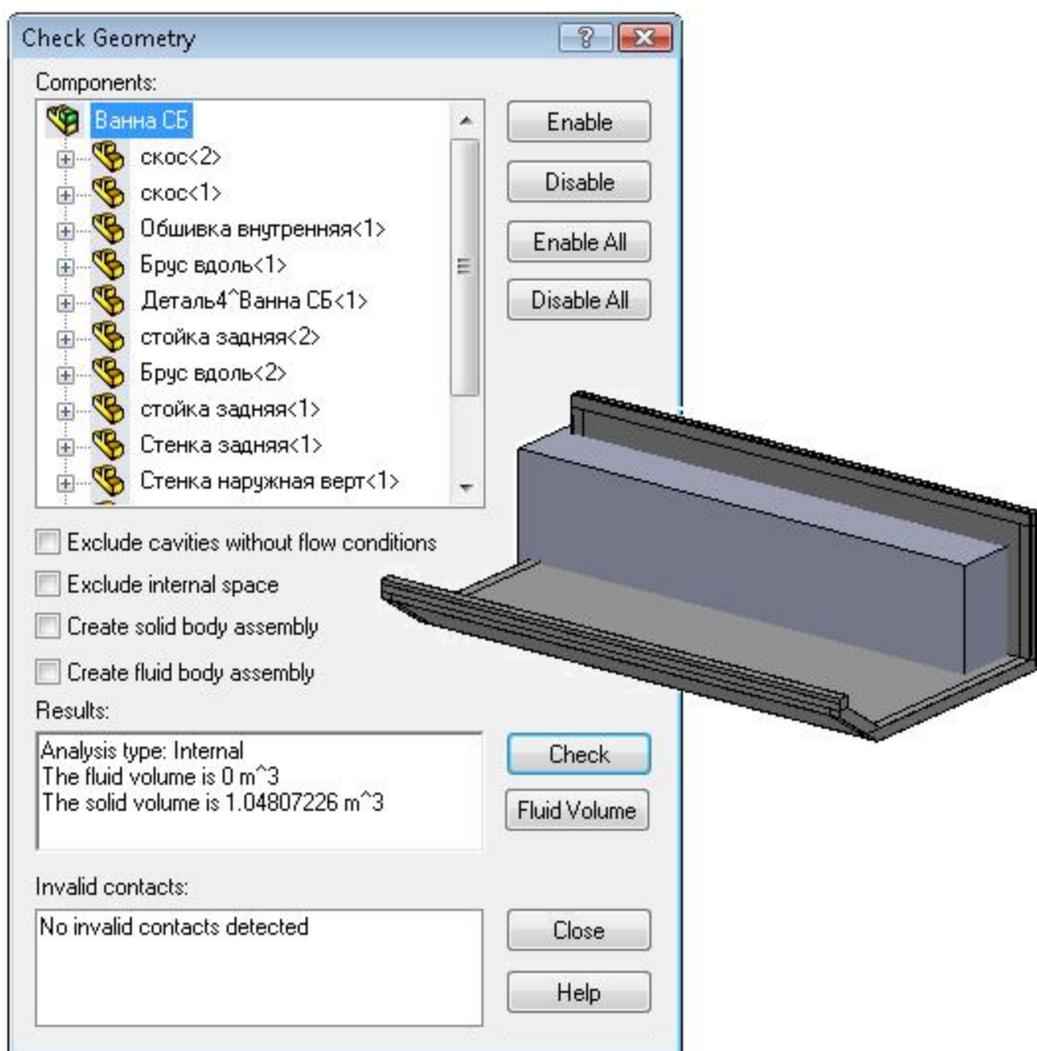


Рис. 2.184. Отсутствующий жидкостный объем

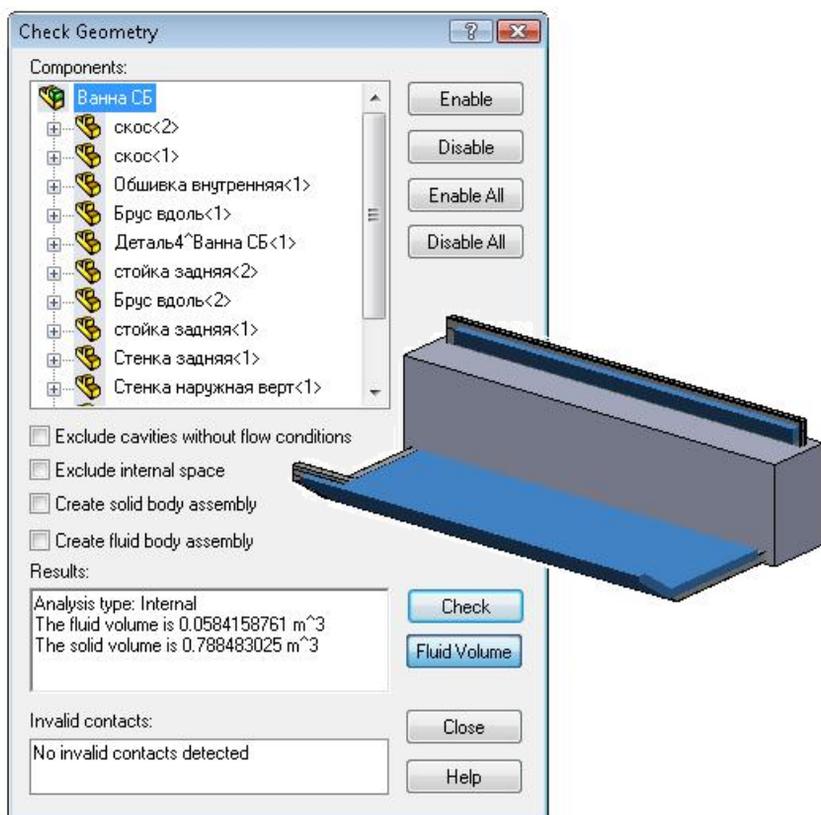


Рис. 2.185. Появление жидкостного объема после модификации вспомогательного тела

2.4.2. Анализ возможности упрощения расчетной модели

Отличительной особенностью задачи является значительная размерность, порождаемая необходимостью качественного разрешения сеткой геометрии испарителя. При данных особенностях течения (прогнозируемой скорости, температуре, назначенной среде (воздух), особенностях конструкции) минимально необходимым является наличие 4–5 ячеек по сечению каждого канала между пластинами испарителя. Также требуется адекватно моделировать течение в окрестности трубок. Дело здесь в том, что течение вызывается исключительно естественной конвекцией, порождаемой тепловым взаимодействием воздуха с испарителем. Так как источников принудительного течения нет, требуется тщательная верификация упрощающих факторов.

Ранее была описана процедура имитации фильтрующих объектов (мелких решеток) виртуальной пористой средой. Для этого из числа реализованных в Flow Simulation была (без обоснования этого выбора) использована методика, использующая формулу для коэффициента сопротивления среды:

$$k = \text{grad}(P)/(\rho \times V),$$

где P — давление текучей среды; ρ — ее плотность; V — скорость. Из трех реализованных в системе вариантов описания коэффициента сопротивления был выбран тот, который является линейной функцией скорости. При этом для идентификации двух коэффициентов линейной зависимости использовалась процедура нелинейно-го программирования (не Flow Simulation).

Поскольку в данной задаче присутствует также эффект теплообмена при прохождении через испаритель, то достичь сколь-нибудь подходящей универсальности (в смысле описания источников с различной мощностью) заведомо невозможно. Также возникают определенные сомнения в том, что (с учетом нетривиальной геометрии проходных каналов) характеристика сопротивления будет линейной.

Попытаемся использовать модель пористой среды, где для ее имитации применяется генерируемая непосредственно во Flow Simulation функция зависимости между объемным расходом и падением давления. Поскольку интерфейс программы использует расход (а не скорость), то дополнительно следует вводить в программу размеры виртуального параллелепипеда, описывающего систему, которая будет идеализирована посредством пористого тела.

Модель пористой среды приведена на рис. 2.186. Как видно, в расчетный домен включено несколько пластин. При этом продольные размеры домена таковы, что в положительном направлении оси Y он распространяется на 9–10 поперечных размеров испарителя (в этом направлении будет двигаться охлажденный воздух, ось Y совпадает с направлением силы тяжести), а в отрицательном — на 3–5. В поперечных направлениях габариты расчетного домена равны габаритам (ширине) испарителя, а в направлении длины испарителя составляют, как упоминалось, несколько ячеек, причем границы домена проходят посередине зазора.

На поперечных границах расчетной области поставлено граничное условие **Symmetry** (Симметрия), в соответствующих направлениях расчетный домен отображается с удвоенными габаритами посредством штриховых линий (рис. 2.187, 2.188). Что касается продольного (по отношению к испарителю) направления (в данной модели оно совпадает с осью X), то, в принципе, можно было бы использовать условие периодичности. В поперечном направлении (ось Z) применимость данного условия мотивируется тем, что планируется получить проточные характеристики, независимые от контекста, в котором испаритель функционирует. Обеспечить эту инвариантность можно, только игнорируя этот самый контекст. Оценить работоспособность данного подхода, как представляется, можно посредством так называемого численного эксперимента.

На рис. 2.187, 2.188 также показана прозрачная деталь — вспомогательное (прозрачное для текучей среды) тело, предназначенное для управления плотностью сетки, а также для сбора информации о давлении на его гранях.

Мы несколько забежали вперед, описав расчетную область до того, как был определен тип задачи. В данном случае предварительно была достигнута договоренность, что решается внешняя задача (рис. 2.189). С учетом принятых граничных условий на стенках (боковых) расчетного домена и назначенной скорости на остальных гранях (по сути, на бесконечности) модель является аналогом внутренней задачи следующего содержания.

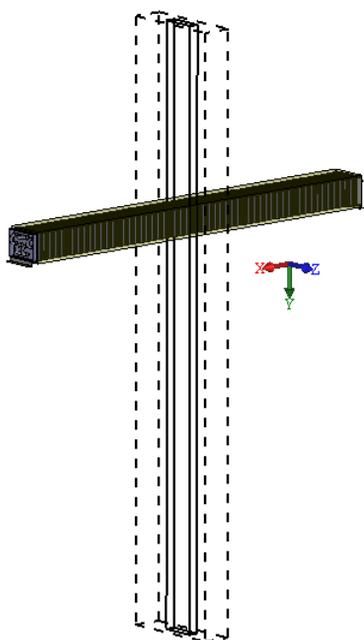


Рис. 2.186. Расчетная модель с расчетным доменом

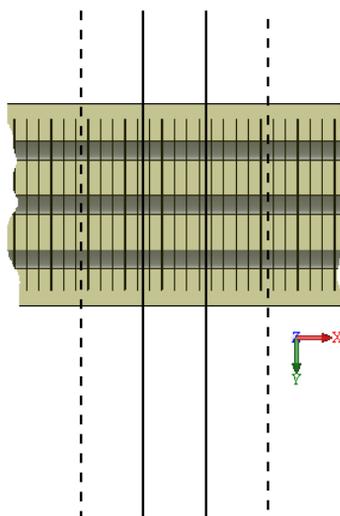


Рис. 2.187. Расчетная модель с расчетным доменом — фрагмент при виде сбоку

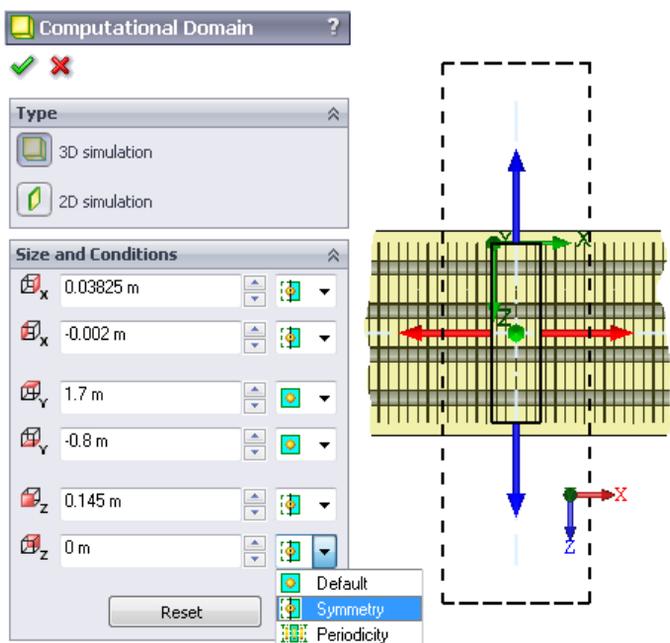


Рис. 2.188. Модель с расчетным доменом и условиями симметрии — фрагмент при виде сверху

В качестве граничных условий используется скорость на бесконечности, как показано на рис. 2.190.

Если поместить соответствующие части тел в прямоугольную трубу (с внутренним сечением, равным горизонтальному сечению расчетной области), на одном из торцов поставить скорость на входе, а на противоположном — статическое атмосферное давление, то результат, в принципе, должен быть таким же. При этом на гранях (разумеется, внутренних) трубы должно быть поставлено условие **Ideal Wall** (Идеальная стенка), предполагающее отсутствие прилипания и, как следствие, теплообмена.

Также следует обратить внимание, что гравитация не учитывается — преследуется цель идентификации проточных характеристик, однако в дальнейшем результаты будут применяться для описания эффектов конвекции.

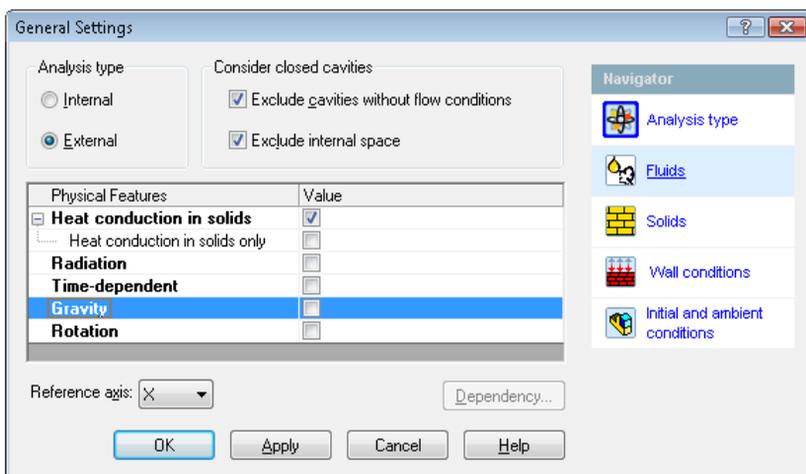


Рис. 2.189. Окно общих установок — внешняя задача без учета гравитации

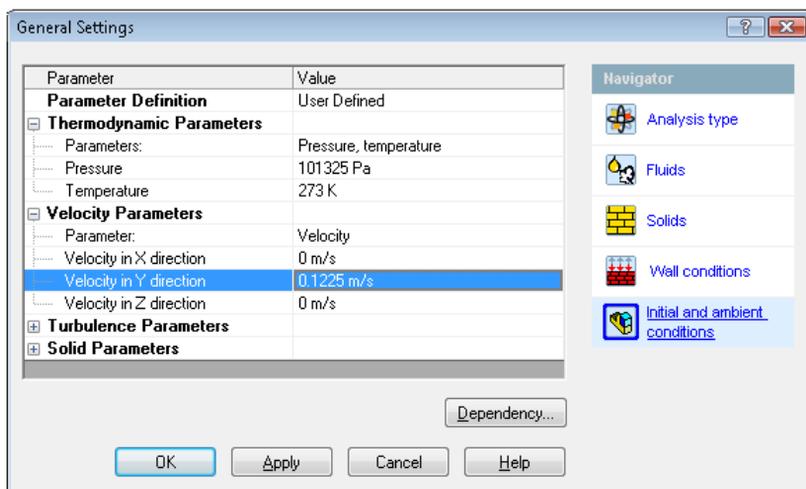


Рис. 2.190. Назначение скорости потока в начальных условиях

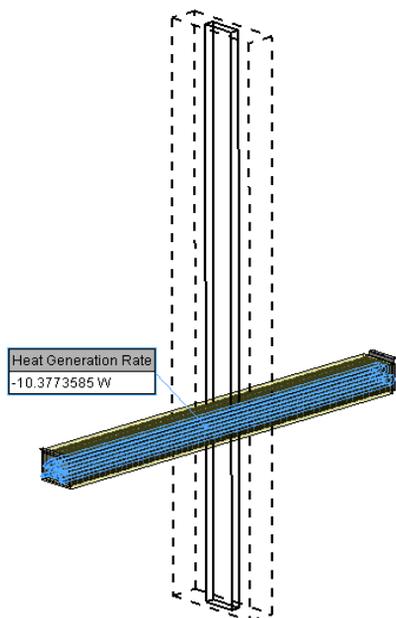


Рис. 2.191. Назначение мощности, выделяемой в трубках в пределах расчетной области

Несмотря на то, что естественная конвекция моделироваться не будет, оценка теплового состояния нами сделана. Для этого назначаем источник мощности (отрицательной, так как тепло отбирается), причем мощность назначаем пропорционально доле длины трубок испарителя, оставшейся внутри рассматриваемой области, как показано на рис. 2.191. Абстрагируясь от физики процесса, протекающего в испарителе, мощность прикладываем к телу, моделирующему трубки.

При использовании внешней задачи нет необходимости в дополнительных граничных условиях (для внутренней задачи с решеткой в трубе это было бы, например, сочетание объемного расхода на входе и статического давления на выходе).

"Главная" цель проекта очевидна — это оценка потери давления при прохождении воздуха через испаритель в зависимости от объемного расхода (в данном случае — скорости) воздуха. Данную цель реализуем посредством инструмента **Equation Goal** (Функциональная цель) как разницу полных давлений, взятых с помощью инструмента **Surface Goal** (Поверхностная цель) с граней фиктивного тела (рис. 2.192).

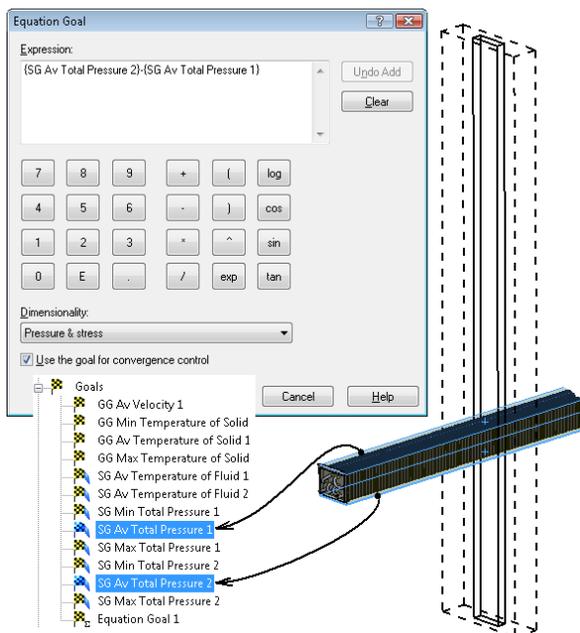


Рис. 2.192. Формирование цели в виде потери полного давления

Также в качестве цели назначаем объемный расход через площадку (грань условного тела), находящуюся непосредственно перед входом в испаритель. Соответствующая величина потребуется для определения зависимости "расход — падение давления" при создании виртуальной пористой среды.

Результат в виде диаграммы скорости в поперечном сечении показан на рис. 2.193. Там же показана сетка. Как видно, в зазоре между пластинами размещается порядка 10 ячеек, что при данных параметрах течения гарантирует достоверность решения.

Весьма информативным является рис. 2.194, где показаны профили скорости на удалении 100 и 300 мм от габаритов пластин по течению и 10 мм — против течения. Как видно, даже на значительном удалении от источника возмущения (трубки с хладагентом) наблюдается неравномерное течение. При этом в поперечном к пластинам направлении профиль достаточно однороден. Направивается заключение, что приведение системы трубок к среде с однородным сопротивлением проблематично.

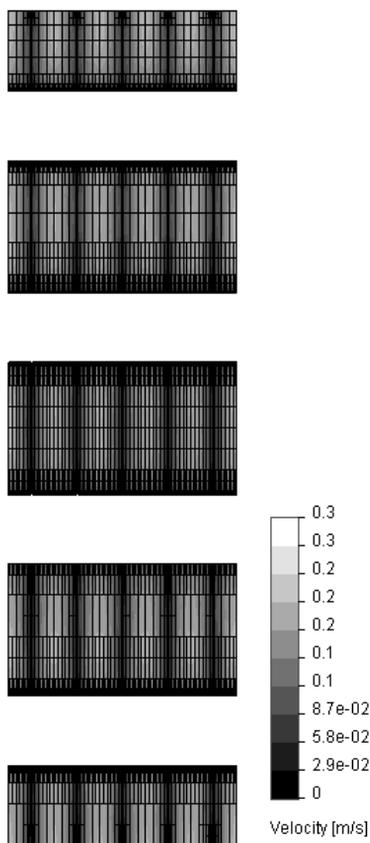


Рис. 2.193. Поле скоростей в поперечном сечении на фоне сетки

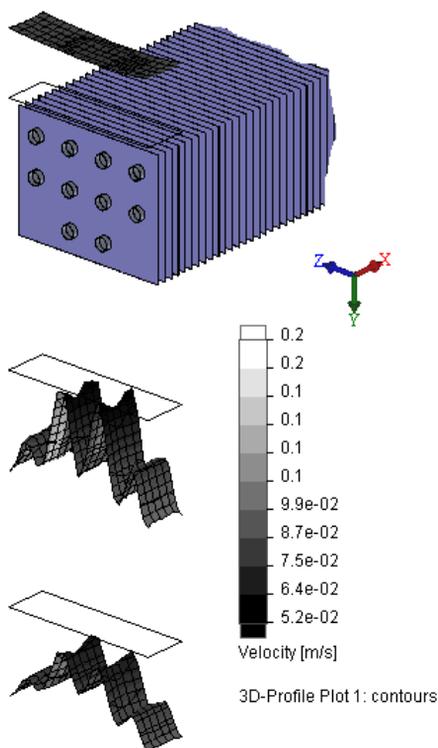


Рис. 2.194. Профили скорости на различном удалении от модели

Горизонтальное сечение поля температуры показано на рис. 2.195. По толщине каналов наличествует ощутимый градиент температуры, что является дополнительным аргументом в пользу достаточно плотной сетки поперек канала.

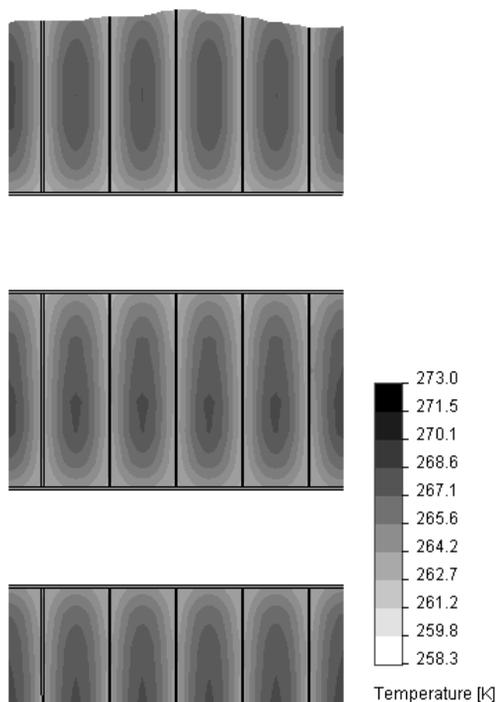


Рис. 2.195. Поле температур в поперечном сечении

Повторяем несколько раз расчет, изменяя в граничных условиях величину скорости в начальных условиях (для трубы это были бы граничные условия) и фиксируя рассчитанное падение динамического давления. Полученная информация собирается в инженерной базе данных в виртуальной пористой среде (рис. 2.196). В данном случае мы имеем тип проницаемости **Orthotropic**. Доступны также изотропная (одинаковая проницаемость во всех направлениях), однонаправленная (ближайший аналог — это набор параллельных трубок) и осесимметричная (в осевом направлении проницаемость имеет одно значение, а в перпендикулярной ему плоскости — другое). Акцентируем внимание, что при назначении характеристик относительно осей в диалоговом окне нужно следить за соблюдением направлений проницаемости при использовании данной среды в конкретной модели.

Сопротивление среды, как и договаривались, будем описывать посредством падения давления (как функции расхода), фиксируя эту зависимость, как показано на рис. 2.197, 2.198. Как видно, присутствует договоренность, что сопротивление среды в направлениях X и Y (они, по сути, взяты произвольно в предположении, что среда будет правильно сориентирована уже в конкретных задачах) одинаково. Здесь мы пренебрегли различием в структуре трубок. Однако, на фоне других упрощений, для данной модели это весьма слабое допущение. Следует обратить внимание, что в

направлении оси Z принято падение давления 10 Па. Это сугубо условная величина, которая (в сравнении с двумя другими направлениями) соответствует невозможности движения воздуха в продольном (относительно длины испарителя) направлении.

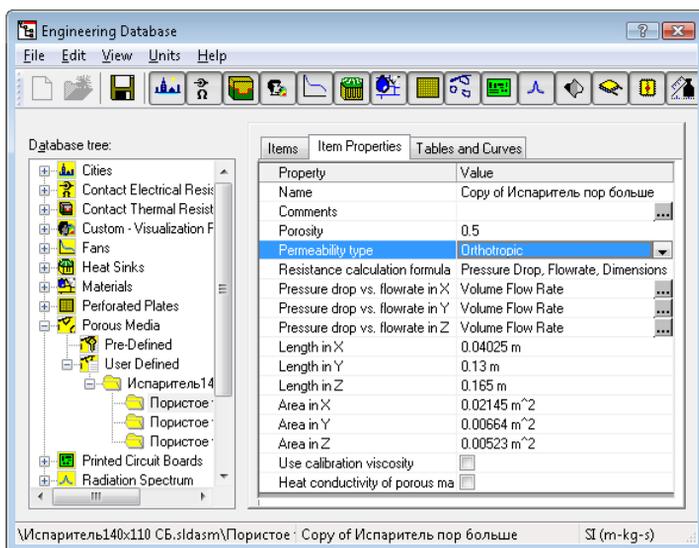


Рис. 2.196. Характеристики виртуальной пористой среды

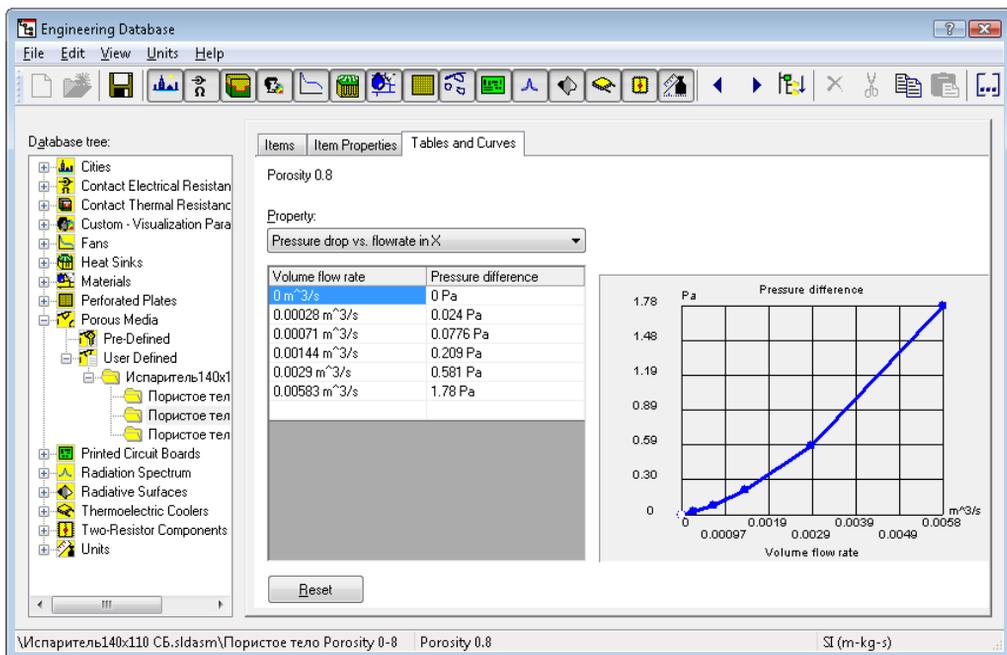


Рис. 2.197. Зависимость падения давления от объемного расхода для направлений x и y, связанных со средой

В окне свойств пористой среды присутствует опция **Use calibration viscosity** (Использовать эталонную вязкость) среды, которая использовалась в виртуальном эксперименте для снятия зависимости "расход — падение давления". При помещении пористой среды в проект с другой текучей средой система автоматически учтет поправку на вязкость.

Опция **Heat conductivity of porous matrix** (Теплопроводность пористой матрицы) управляет тем, будет ли происходить теплообмен теплопроводностью в материале пористой среды. Ее активация открывает доступ к параметрам, описывающим этот процесс. На первый взгляд, эту функциональность следовало бы использовать в данной модели, однако привести свойства испарителя к однородной среде — непростая задача, а нас интересует только действие испарителя на воздух. Оно зависит от двух факторов: отбираемой испарителем мощности и параметров (скорости) движения среды, зависящих от проточных (для воздуха) характеристик испарителя и изменения температуры на выходе относительно входа. Это изменение зависит от мощности в большей степени, чем от подробностей отбора. Если бы течение по длине испарителя было неоднородным в части скорости и температуры, то учет теплопроводности среды стал бы актуален.

Резюмируя эти соображения, мы теплопроводность в виртуальной среде моделировать не будем.

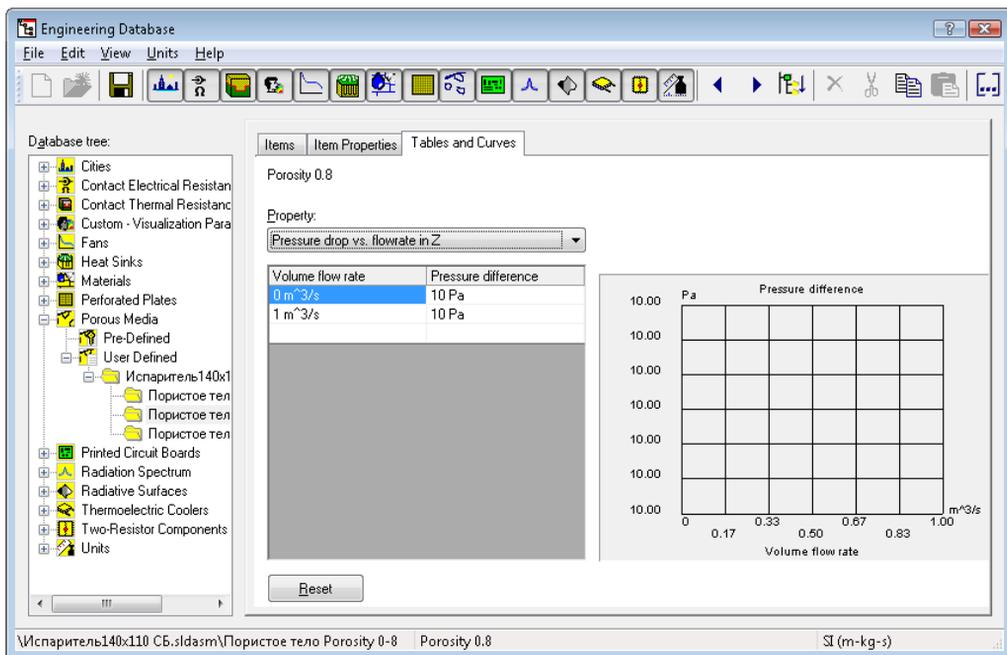


Рис. 2.198. Зависимость падения давления от объемного расхода для направления z в среде

В число вводимых характеристик условной пористой среды входят размеры условного параллелепипеда вдоль соответствующих осей и площадей перпендикулярно осям. Этот условный параллелепипед (в документации об этом в явном виде не сказано) является габаритным по отношению к реальной модели, описывающей структуру среды.

Также следует назначить параметр **Porosity** (Пористость) — это объемная доля связанных между собой пор в среде относительно общего объема пор. В данном случае он близок к единице, поскольку течение будет осуществляться преимущественно в направлениях, ортогональных длине, а соответствующие каналы (будучи разделены между собой) являются едиными. Пористость может быть любой (в интервале от 0 до 1), однако это не совсем так. Она также участвует в расчете скорости течения в пределах среды. Можно предположить, что это условная скорость, являющаяся результатом обработки постпроцессором скорости расчетной. При отображении соответствующих диаграмм последняя делится на величину пористости. Соответствующие иллюстрации будут приведены.

Ввод пористой среды в проект осуществляется элементарно: нужно выбрать среду из базы данных и (для неизотропной среды) определить систему координат (рис. 2.199).

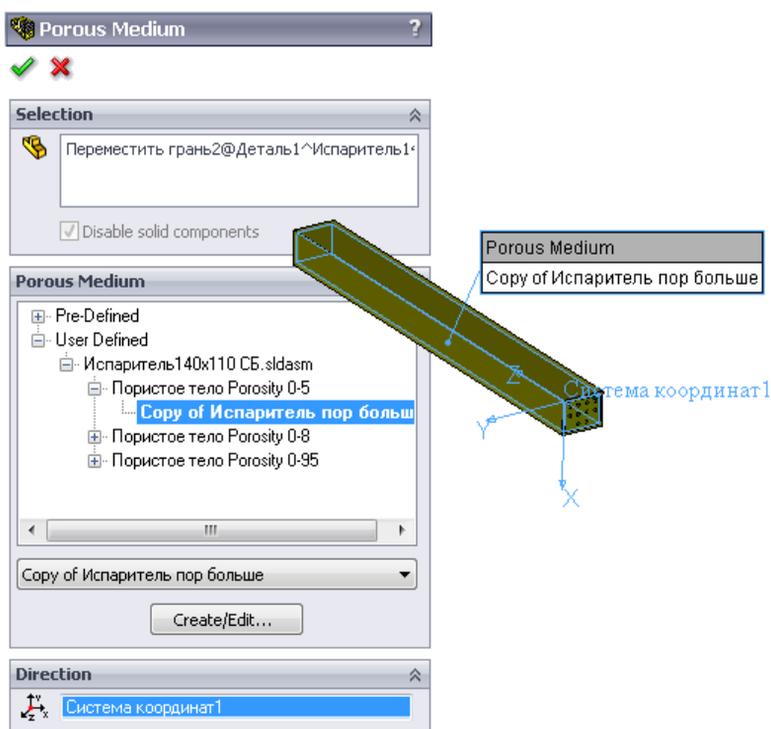


Рис. 2.199. Присвоение характеристик пористой среды условному объему

Расчетная сетка для данной задачи показана на рис. 2.200. Как видно, она достаточно редкая, однако для качественной оценки является вполне пригодной.

В данном случае источником движения будет естественная конвекция, поэтому включаем опцию **Gravity** (Гравитация) в окне **General Settings** (Общие настройки) с определением направления гравитации (в данном случае это положительное направление оси Y).

Сечение поля скоростей с линиями тока показано на рис. 2.201, 2.202. Верхняя граница отображаемого диапазона уменьшена для более контрастного разрешения. Две иллюстрации отличаются тем, что первая получена для среды с величиной параметра пористости 1,0, а вторая — 0,5. Вне пористой среды картины для скоростей практически одинаковы, а внутри (при уменьшении пористости) происходит увеличение скорости. То есть, уменьшая "пористость", мы как бы уменьшаем размер пор: чтобы сохранить величину расхода (она, напоминаем, есть в данном случае функция проницаемости — зависимости падения давления от расхода), системе приходится увеличить (виртуально) скорость.

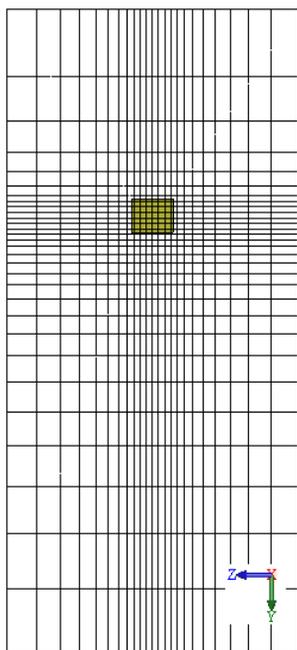


Рис. 2.200. Расчетная сетка для модели с пористой средой

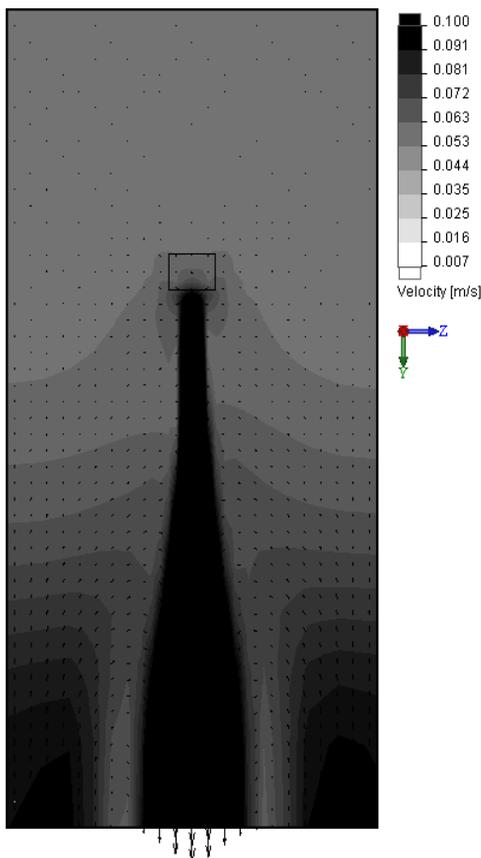


Рис. 2.201. Пористость 1,0

Линии тока в сечении показаны на рис. 2.203. Некоторые соображения об этой диаграмме будут высказаны далее.

Расчетные параметры, собранные по нижней грани параллелепипеда пористой среды, показаны на рис. 2.204. "Фундаментальными" в данной ситуации будем считать массовый расход и среднemasсовую температуру.

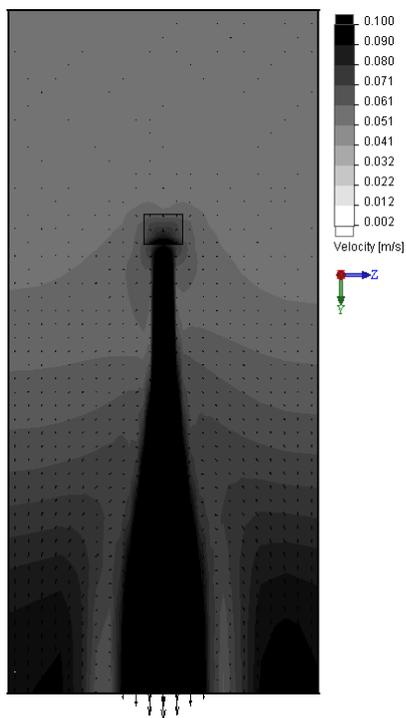


Рис. 2.202. Пористость 0,5

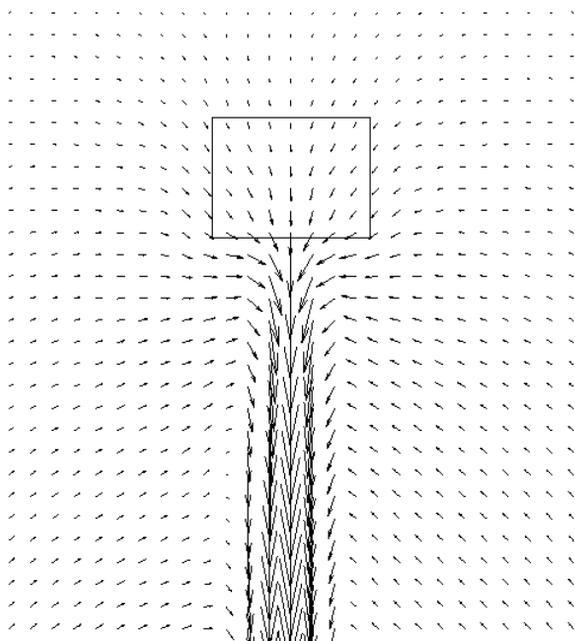
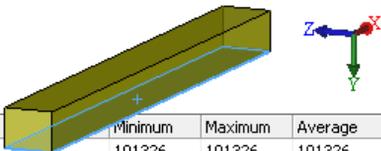


Рис. 2.203. Линии тока в поперечном сечении



Local Parameter	Minimum	Maximum	Average	Bulk Average	Surface Area [m ²]
Pressure [Pa]	101326	101326	101326	101326	0.1406
Density [kg/m ³]	1.2	1.4	1.3	1.4	0.1406
Velocity [m/s]	0.023	0.172	0.067	0.088	0.1406
X - Component of Velocity [m/s]	-0.062	0.001	-0.003	-0.002	0.1406
Y - Component of Velocity [m/s]	-0.015	0.167	0.039	0.074	0.1406
Z - Component of Velocity [m/s]	-0.087	0.086	-1.025e-04	-9.585e-05	0.1406
Mach Number []	6.72e-05	5.44e-04	2.02e-04	2.72e-04	0.1406
Fluid Temperature [K]	248.4	293.2	277.5	261.6	0.1406

Integral Parameter	Value	X-component	Y-component	Z-component	Surface Area [m ²]
Mass Flow Rate [kg/s]	-0.0065				0.1406
Volume Flow Rate [m ³ /s]	-0.0048				0.1406
Surface Area [m ²]	0.1406	0	0.1406	0	0.1406
Total Enthalpy Rate [W]	-1720.1				0.1406
Uniformity Index []	0.5671281				0.1406
CAD Fluid Area [m ²]	0.1406				0.1406

Рис. 2.204. Базовые результаты, собранные по нижней грани пористой среды

Для сравнения построим модель с "реальным" испарителем. Не затрагивая подробностей, приводим фрагмент сетки в сечении горизонтальной плоскостью (рис. 2.205). Как видно, плотность сетки вне области с испарителем сопоставима с предыдущей моделью, а в зоне испарителя ее настройки таковы, что между пластинами разместилось примерно пять ячеек.

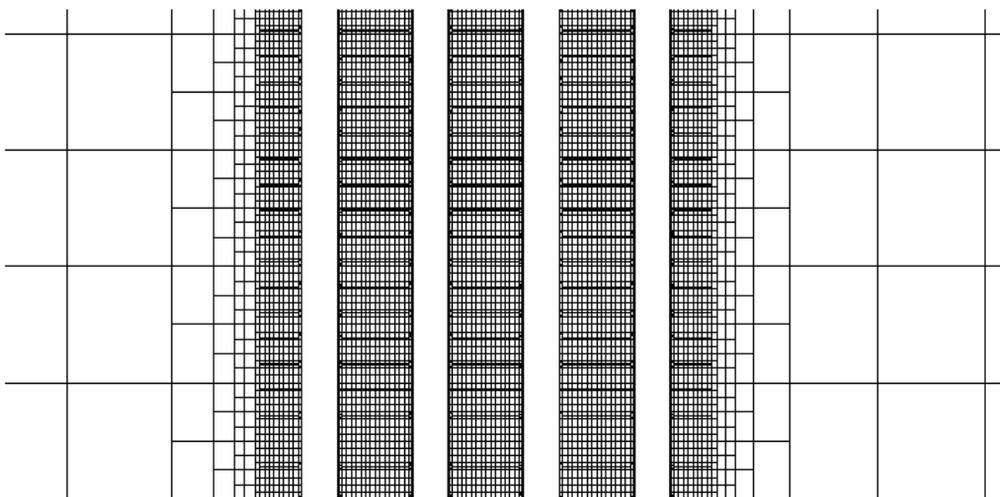


Рис. 2.205. Фрагмент сетки в зоне испарителя в горизонтальном сечении

Диаграммы скорости во всем диапазоне ее изменения и при уменьшенной верхней границе показаны на рис. 2.206, 2.207. Подробности структуры (трубки для хладагента) оказывают существенное влияние на течение.

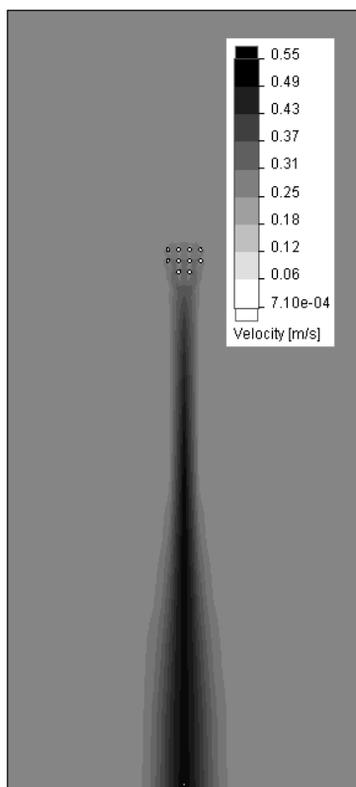


Рис. 2.206. Поле скорости в вертикальном поперечном сечении

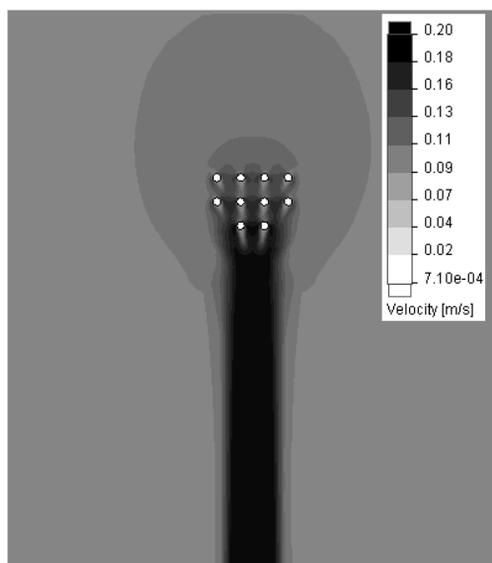


Рис. 2.207. Поле скорости в вертикальном поперечном сечении — обрезанный диапазон изменения характеристики

Сравним диаграмму с линиями тока в поперечном сечении для модели с пористой средой (см. рис. 2.203) и со структурной моделью (рис. 2.208). Как видно, во втором случае вихревые структуры с боков испарителя существенно более интенсивны. Это следствие того, что расход воздуха через тело, охватывающее испаритель (пористое или прозрачное для среды), существенно больше.

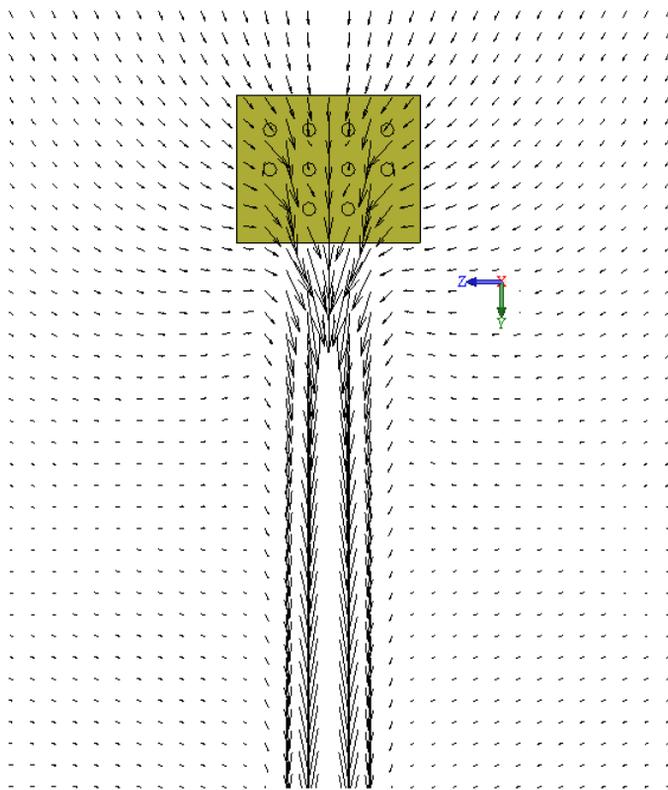


Рис. 2.208. Линии тока в поперечном сечении для "подлинной" модели

Горизонтальное сечение поля скоростей показано на рис. 2.209. В центральных каналах (зазорах между трубками) наблюдается существенное ускорение потока. В каналах с боковых сторон скорость значительно меньше: это, как представляется, обусловлено подсосом теплого воздуха, что уменьшает разницу плотности и делает конвекцию менее интенсивной.

Обратной стороной меньшей интенсивности течения в "пористой" имитации является меньшая температура воздуха на выходе (более интенсивное охлаждение) (рис. 2.210). Это естественно, так как время нахождения воздуха внутри источника холода существенно больше, и времени на охлаждение также "отводится" больше. Для сравнения приведем данные:

- пористая среда, редкая сетка — среднemasсовая скорость на выходе 0,088 м/с, среднemasсовое изменение температуры — 31,6 °С;

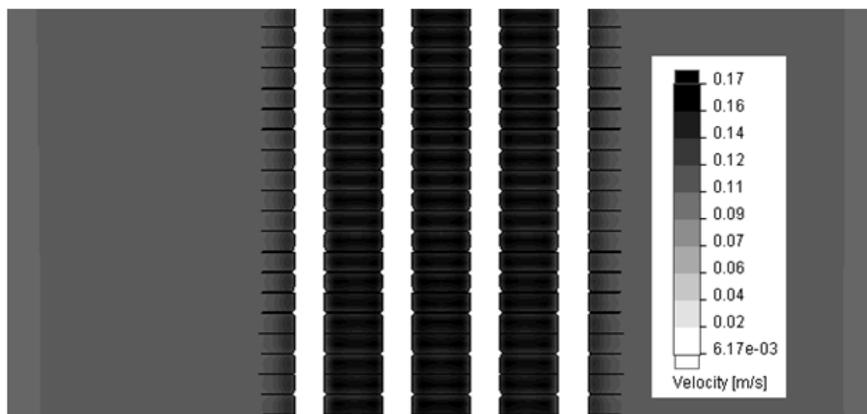
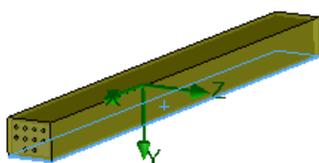


Рис. 2.209. Сечение поля скоростей для исправителя в условиях естественной конвекции



Local Parameter	Minimum	Maximum	Average	Bulk Average	Surface Area [m ²]
Pressure [Pa]	101326	101326	101326	101326	0.1406
Density [kg/m ³]	1.2	1.3	1.2	1.3	0.1406
Velocity [m/s]	0.02	0.18	0.10	0.14	0.1406
X - Component of Velocity [m/s]	-0.05	8.89e-03	-2.35e-03	-1.04e-03	0.1406
Y - Component of Velocity [m/s]	9.19e-04	0.18	0.09	0.13	0.1406
Z - Component of Velocity [m/s]	-0.07	0.07	-1.43e-04	-1.40e-04	0.1406
Mach Number []	6.91e-05	5.50e-04	3.03e-04	4.31e-04	0.1406
Fluid Temperature [K]	276.2	293.2	284.0	279.2	0.1406

Integral Parameter	Value	X-component	Y-component	Z-component	Surface Area [m ²]
Mass Flow Rate [kg/s]	-0.015				0.1406
Volume Flow Rate [m ³ /s]	-0.0123				0.1406
Surface Area [m ²]	0.1406	0	0.1406	0	0.1406
Total Enthalpy Rate [W]	-4399.9				0.1406
Uniformity Index []	0.6272641				0.1406
CAD Fluid Area [m ²]	0.1406				0.1406

Рис. 2.210. Базовые результаты, собранные по нижней грани пористой среды в "подлинной" модели

- пористая среда, плотная сетка — среднемассовая скорость на выходе 0,108 м/с, среднемассовое изменение температуры — 34,0 °С;
- "подлинная" модель — среднемассовая скорость на выходе 0,14 м/с, среднемассовое изменение температуры — 14 °С.

Как видно, для модели с пористой средой приведены два набора характеристик: для "редкой" сетки и более плотной (рис. 2.211, здесь диапазон шкалы принудительно сужен) и 2.212. Несмотря на выраженные отличия результатов при различ-

ной плотности сетки, однозначной тенденции к сходимости результатов для структурной модели не прослеживается.

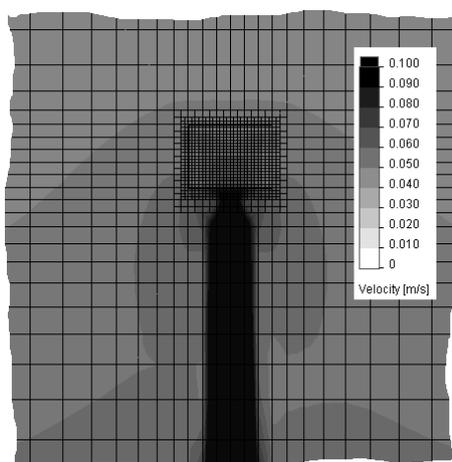


Рис. 2.211. Вертикальное поперечное сечение поля скорости на фоне сетки

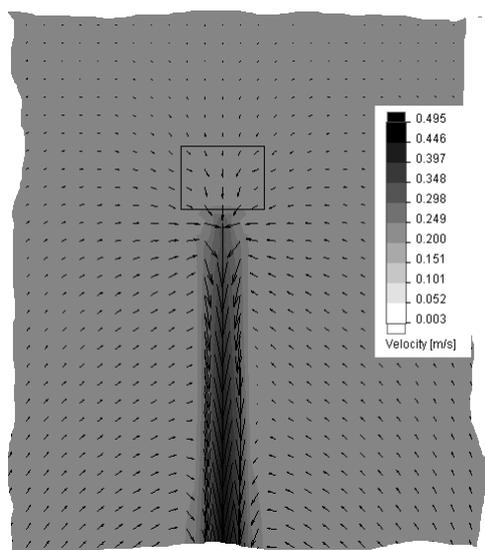


Рис. 2.212. Вертикальное поперечное сечение поля скорости — проекции линий тока с учетом полного диапазона функции

Подводя итог попыткам радикально упростить геометрическую и, соответственно, расчетную модель, приходим к заключению о неадекватности упрощения посредством пористой среды. Поэтому придется искать компромисс между точностью решения и доступными вычислительными ресурсами. В данном случае критическим ограничителем является объем оперативной памяти компьютера, составляющий 8 Гбайт.

2.4.3. Расчетная модель

Расчетная геометрическая модель витрины в разрезе показана на рис. 2.213. Как видно, помимо собственно элементов, моделирующих реальные детали, присутствует фиктивное тело, предназначенное для управления плотностью сетки в окрестности испарителя.

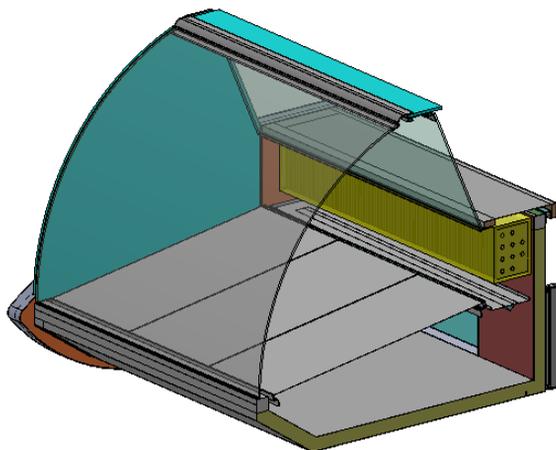


Рис. 2.213. Расчетная геометрическая модель витрины в разрезе с отображенным вспомогательным телом

Единственным источником движения среды в данной модели будет естественная конвекция. Подключаем опцию **Гравитация** и указываем направление ее действия (рис. 2.214). Решение осуществляем в рамках внутренней постановки, не моделирующей движение среды снаружи.

Не будем учитывать теплообмен излучением, поскольку в данном случае его влияние будет несущественным из-за низкой температуры взаимодействующих тел. Как известно, Flow Simulation позволяет учесть теплообмен объектов с окружающей средой, а также имитировать действие солнечного излучения. В современных (начиная с версии 2011 г.) версиях программы допускаются эффекты разделения отраженного света на зеркальную и рассеянную компоненты, а также преломление и объемное поглощение, причем многие эти явления учитывают спектральный (зависимость от длины волны) эффект (только при наличии лицензии на модуль HVAC). Активизирована опция **Exclude cavities without flow conditions** (Игнорировать полости без граничных условий), чтобы предотвратить построение сетки внутри труб испарителя (там она не нужна принципиально) и в малых полостях, которые могут (по недосмотру) оказаться в геометрической модели. Влияние теплообмена будет малым, а вычислительные затраты — ощутимыми. Как упоминалось, такие щели разумно заполнить твердым телом с тепловыми свойствами воздуха.

В качестве материала по умолчанию принимаем нержавеющей сталь (рис. 2.215).

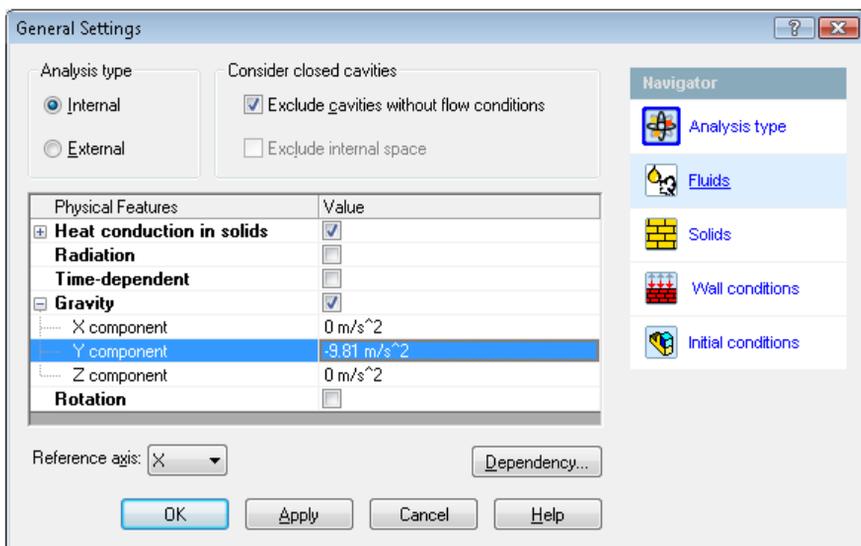


Рис. 2.214. Настройки теплопроводности в телах

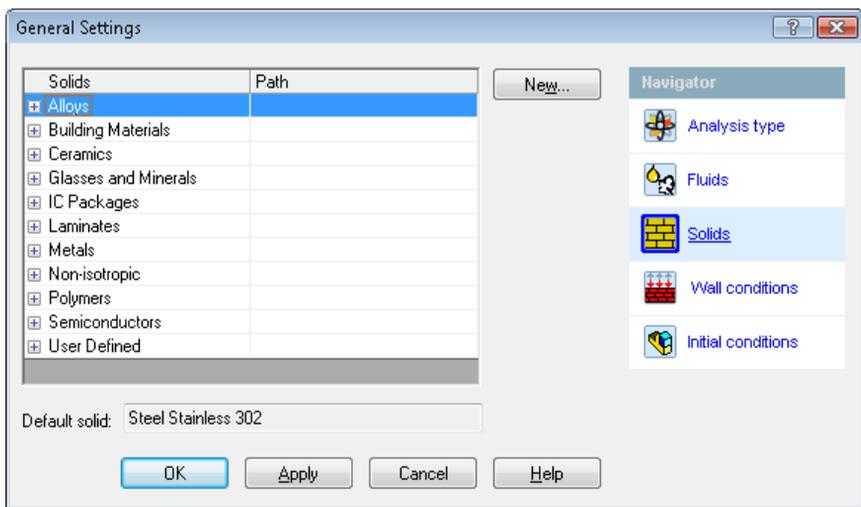


Рис. 2.215. Назначение нержавеющей стали в качестве материала по умолчанию

Отдельный вопрос — о тепловых граничных условиях на наружных поверхностях (гранях) деталей витрины. Они назначаются искусственно (то есть без имитации движения воздуха) посредством коэффициента теплоотдачи и температуры окружающей среды. Используя позицию **Default outer wall thermal condition** (Тепловое условие на внешних стенках по умолчанию), принимаем для соответствующих полей значения, как показано на рис. 2.216. В последующем состоянии отдельных граней можно уточнить, переопределяя как тип граничного условия на стенке, так и его содержание. В этой задаче следовало бы выполнить решение внешней за-

дачи с подробным моделированием состояния среды в нише компрессора при, разумеется, максимально допустимом упрощении состояния внутри витрины (например, посредством замены "подвижного" воздуха на неподвижный с приложением мощности, потребляемой испарителем, непосредственно к телу "воздуха").

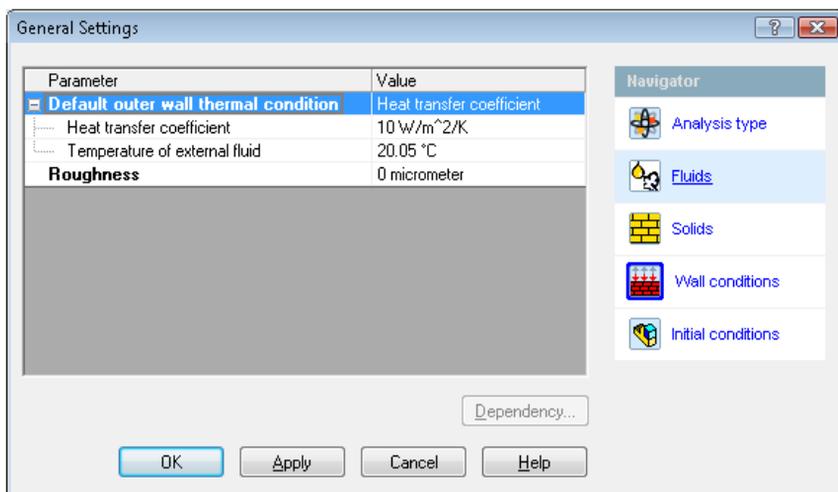


Рис. 2.216. Тепловые условия на наружных стенках

Предугадывая будущий результат (или из эмпирических соображений) назначаем подходящее приближение для температуры среды внутри витрины (рис. 2.217), предполагая конкретизировать температуру испарителя.

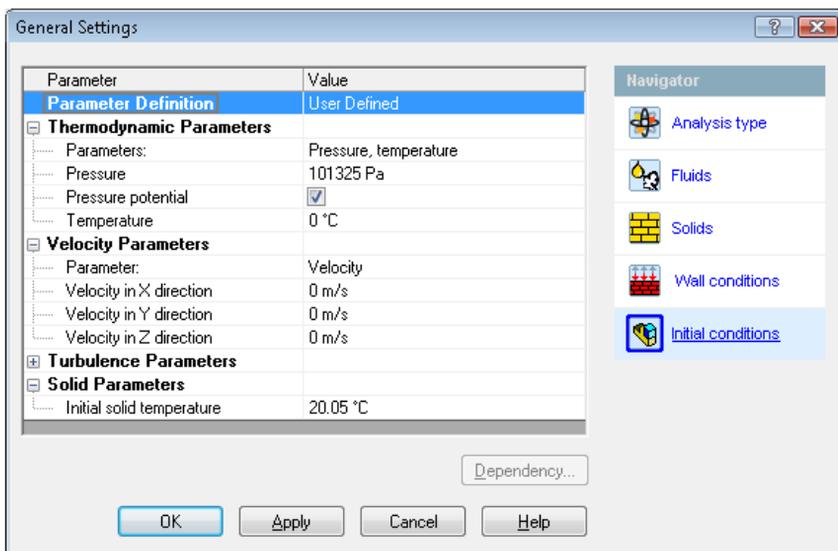


Рис. 2.217. Начальные условия для текучей среды и для тел

Предложенный системой расчетный домен (для внутренней задачи с учетом теплопроводности он должен охватывать габариты с небольшим зазором) сокращаем по координате Z в два раза, компенсируя это вводом граничного условия **Symmetry** (Симметрия) на соответствующей базовой плоскости модели (рис. 2.218, 2.219).

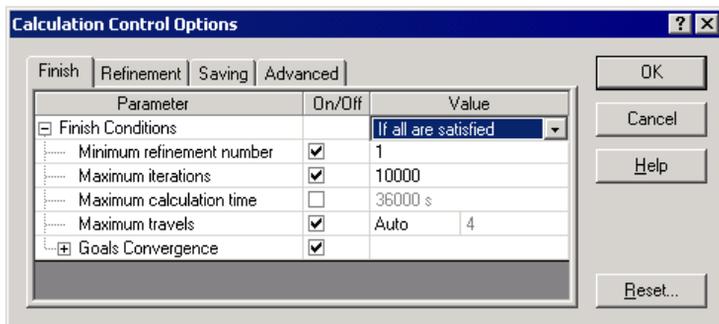


Рис. 2.218. Расчетный домен применительно к симметричной внутренней задаче



Рис. 2.219. Назначение симметрии относительно плоскости $Z = 0$

Как и договаривались, для тел, которыми заполнены тонкие непроточные полосы, назначаем условный материал со свойствами воздуха (рис. 2.220), предварительно помещенный в Инженерную базу данных. Представленный на иллюстрации (рис. 2.221) фрагмент дерева проекта содержит информацию о присвоении соответствующим деталям/телам других материалов в базе данных.

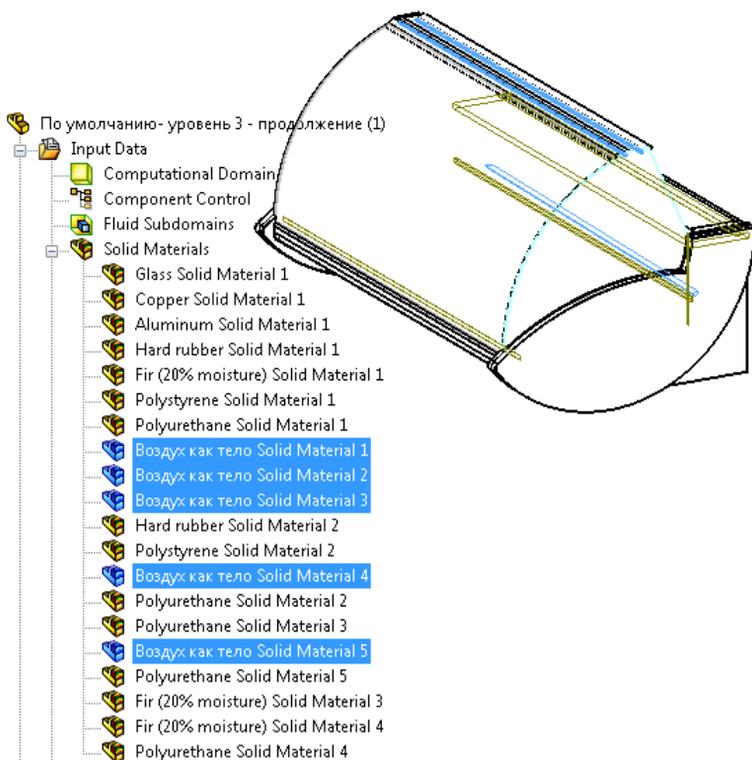


Рис. 2.220. Назначение искусственным заполнителям щелей свойств воздуха как тела

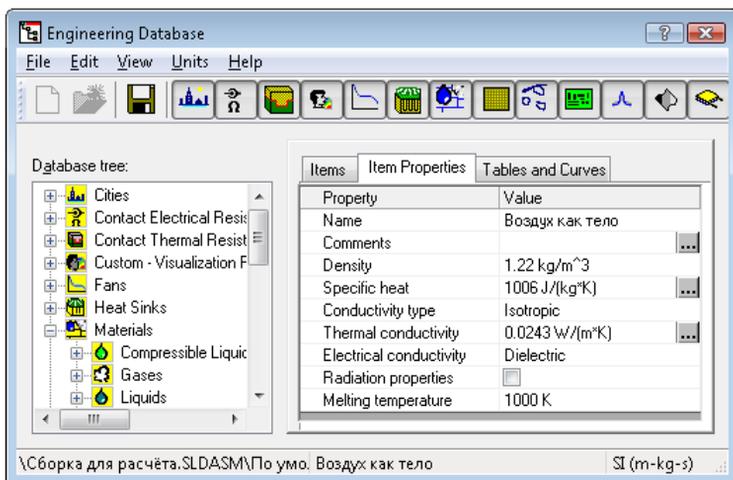


Рис. 2.221. Свойства воздуха как тела в инженерной базе данных

Граничные условия на фоне фрагмента разреза продольной вертикальной плоскостью показаны на рис. 2.222. Как видно, это **Environment Pressure** (Давление окружающей

среды), предназначенное для имитации негерметичности системы, а также **Heat Generation Rate** (Мощность тепловыделения), отбирающее у системы мощность 220 Вт. Здесь следует иметь в виду, что с учетом присутствующей в модели симметрии, "отсекающей" половину конструкции, здесь приложена только половина фактической мощности.

С целью ускорения расчета для тел испарителя назначаем локальное начальное условие, присваивая им температуру $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 2.223).

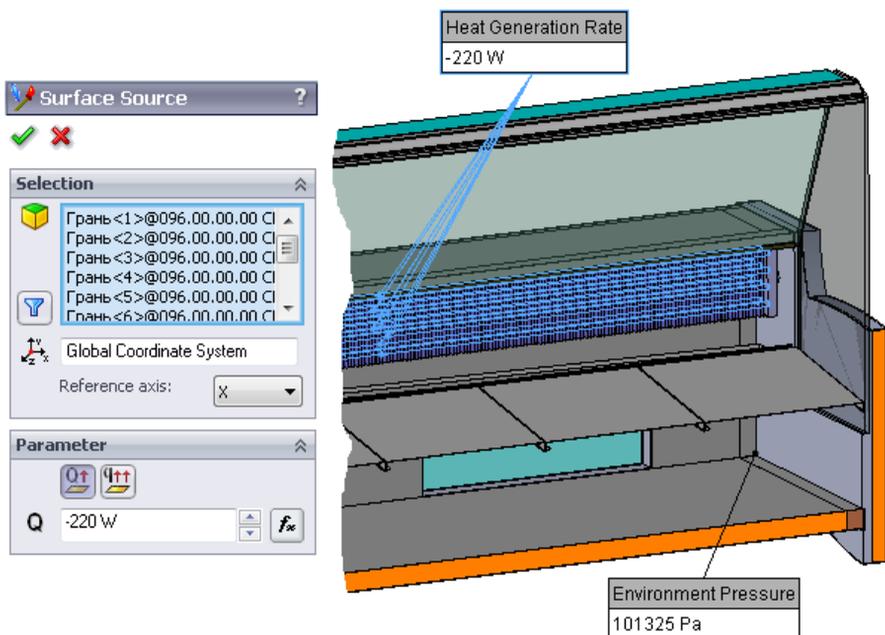


Рис. 2.222. Отбор мощности в испарителе

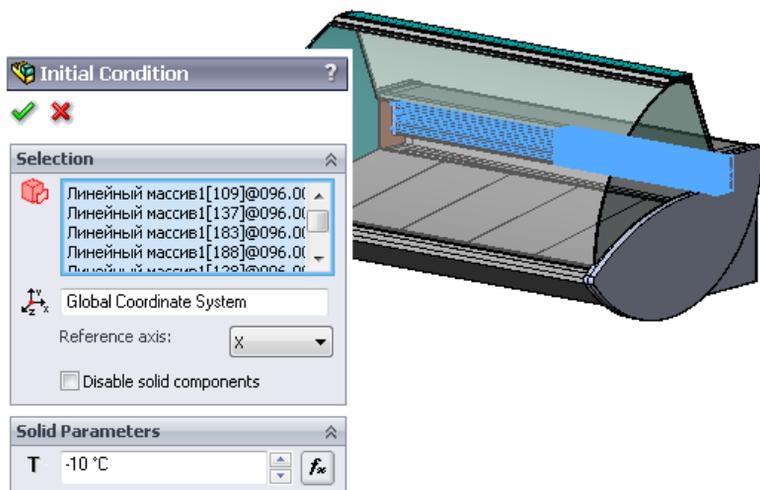


Рис. 2.223. Начальные условия — температура испарителя

Цели, назначенные для задачи (для контроля сходимости), показаны на рис. 2.224. Под Solid1 понимается тело, описывающее испаритель.

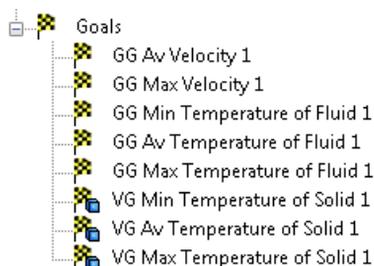


Рис. 2.224. Цели проекта

Параметры начальной сетки, касающиеся модели в целом, показаны на рис. 2.225. Для гарантии адекватного разрешения принципиальных геометрических объектов минимальный зазор (gap size) установлен равным 1 мм и минимальная стенка (minimum wall thickness) — 0,05 мм.

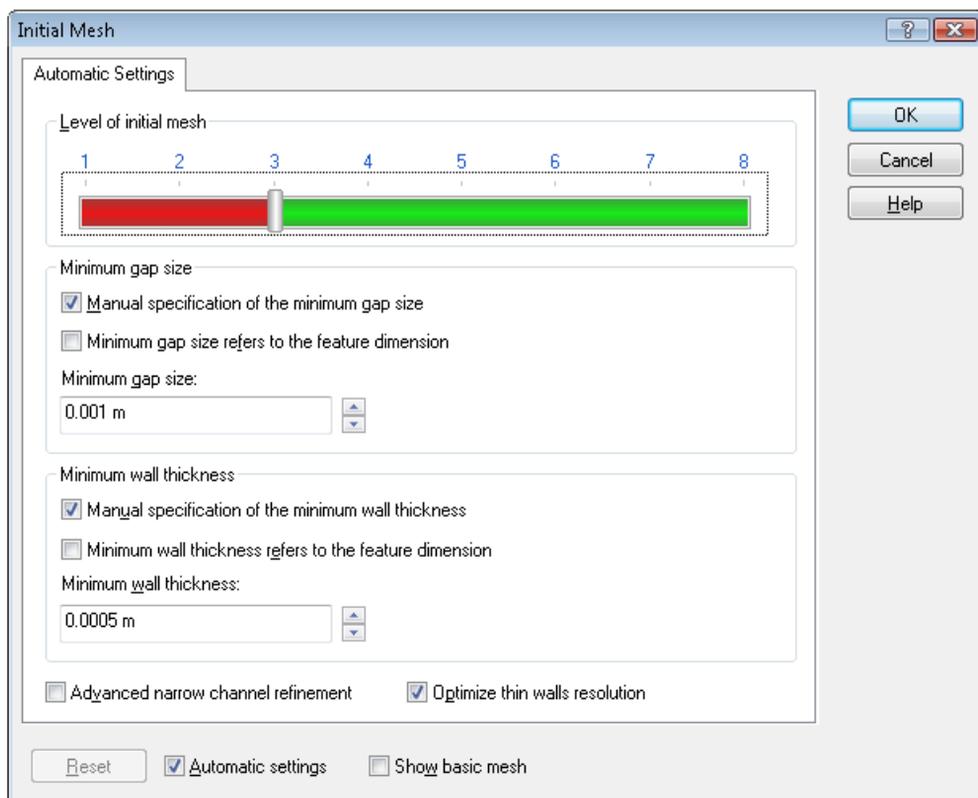


Рис. 2.225. Автоматические настройки начальной сетки

Если воспользоваться настройками по умолчанию, то сетка в окрестности испарителя с его тонкими каналами не будет качественной. Здесь необходимо минимум 4 ячейки. Если активизировать соответствующую опцию в глобальных (автоматических) настройках, то может оказаться, что и в "не слишком" проходных каналах также будет повышено число ячеек в поперечном направлении. Однако, как упоминалось, если канал существует, то сетка должна обеспечивать адекватный профиль скорости.

Персональные настройки сетки локализуем во вспомогательном теле (оно заимствовано из задачи для изолированного испарителя), охватывающем с небольшим запасом испаритель (рис. 2.226). Если этого не было сделано ранее посредством процедуры **Component Control** (Управление деталями), то активизируем опцию **Disable solid components** (Деактивировать твердые тела), делая компонент "прозрачным" для текущей среды.

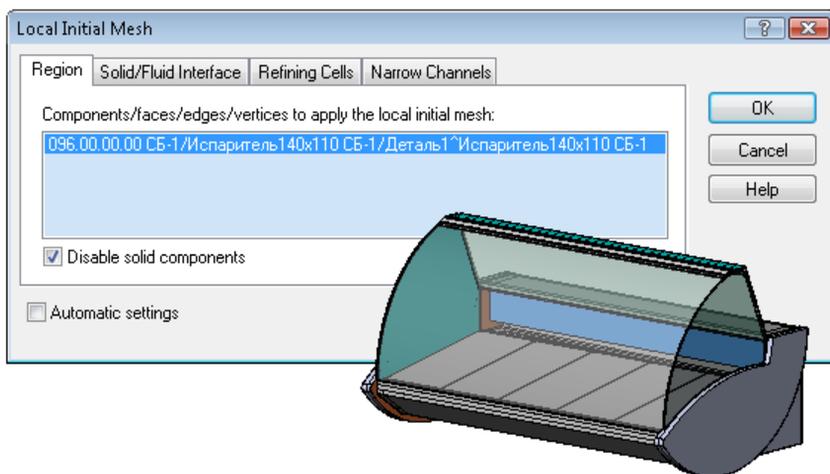


Рис. 2.226. Выбор тела для настройки локальной начальной сетки

Настройки вкладки **Solid/Fluid Interface** (Поверхность раздела твердых тел с текучей средой) показаны на рис. 2.227. Как видно, на уровень 2 установлен регулятор **Small solid feature refinement level** (Уровень разрешения сеткой мелких особенностей модели), а регулятор **Tolerance refinement level** (Уровень разрешения сеткой выступов поверхности) — на 3. При этом **Tolerance refinement criterion** (Критерий разрешения сеткой выступов поверхности) приравнен к 0,05 мм.

Настройки вкладки **Narrow Channels** (Узкие каналы) показаны на рис. 2.228. Как видно, хотелось бы иметь **Characteristic number of cells across a narrow channel** (Критическое число ячеек поперек узкого канала) равным 4, при том что **Narrow channel refinement level** (Уровень дробления сетки в узких каналах) тоже равен 4. Также активизируем опции **Enable the minimum height of narrow channels** (Задать минимальную высоту узкого канала) и **Enable the maximum height of narrow channels** (Задать максимальную высоту узкого канала), отмечая значения этих величин. Тогда процедура дробления ячеек начальной расчетной сетки в узких каналах будет работать не во всей расчетной области, а только в указанном диапазоне.

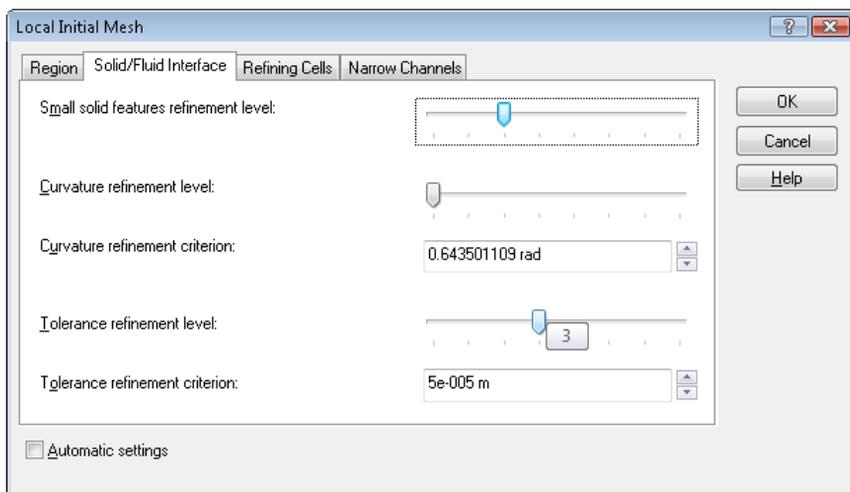


Рис. 2.227. Настройки параметров разрешения выступов в локальной начальной сетке

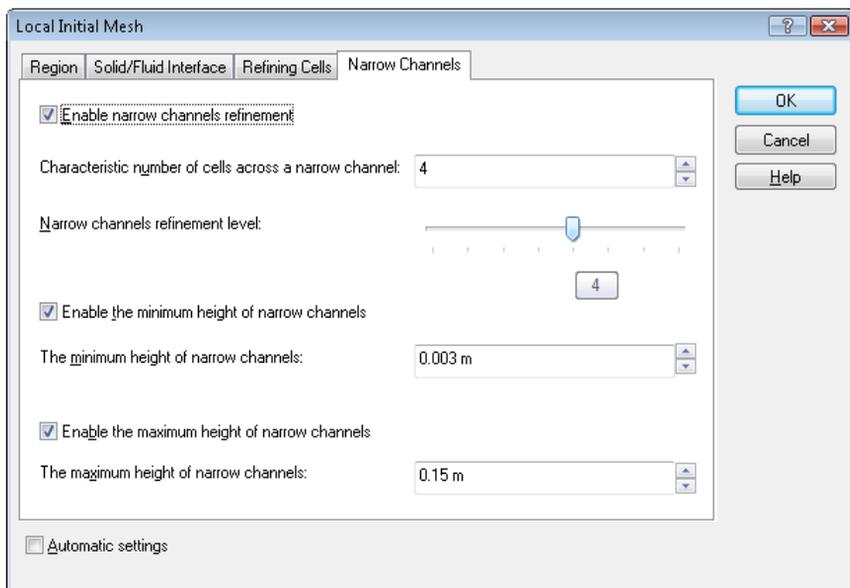


Рис. 2.228. Настройки параметров разрешения узких каналов в локальной начальной сетке

Расчетная сетка в поперечном сечении показана на рис. 2.229, а ее фрагмент в горизонтальном сечении на краю испарителя — на рис. 2.230. В последнем случае отключен режим "подтягивания" сетки к границам модели **Use CAD geometry** (Использовать геометрию САПР) (рис. 2.231), что позволяет увидеть "первичную" сетку и аргументированно оценить степень искажений, внесенных дискретизацией. В данном случае критику может вызвать точность аппроксимации каналов в окре-

стности трубок испарителя. Аппроксимация же криволинейных отрезков трубок и текучей среды в прилегающих областях вполне удовлетворительна.

Еще заметим, что полиуретановый теплоизолятор в трехслойных стенках описан единственной (по толщине) ячейкой. С учетом близкого к линейному распределения температуры в этом направлении и значительной толщины изолятора желательно иметь хотя бы две ячейки. Возможности программы позволяют реализовать и эту идею с минимальной трудоемкостью, однако с учетом ограничений по размерности данная сетка является вполне подходящей для наших целей.

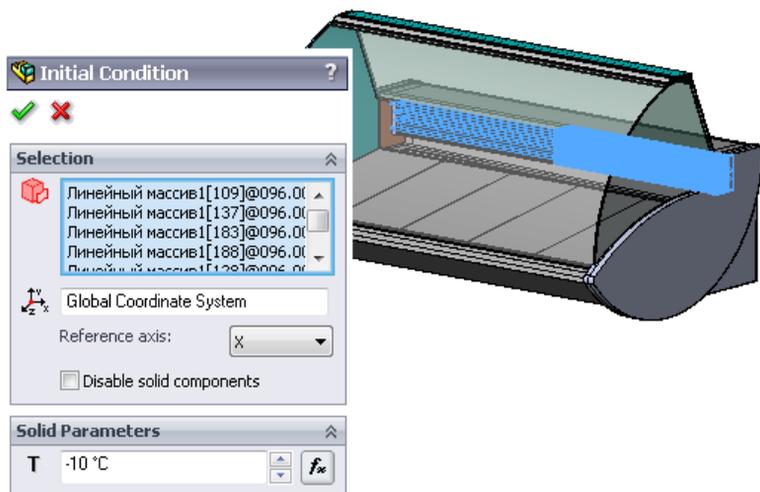


Рис. 2.229. Сетка в поперечном вертикальном сечении

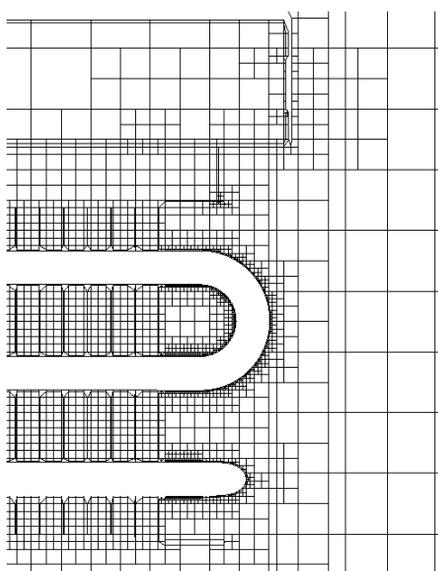


Рис. 2.230. Фрагмент сетки в горизонтальном сечении в окрестности испарителя

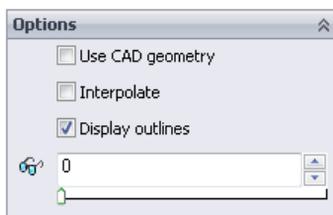


Рис. 2.231. Отключение режима адаптации отображаемой сетки к геометрии

2.4.4. Результаты

Кривые сходимости целей — температур испарителя (минимальной, средней и максимальной) в зависимости от продувок (Travels) и итераций (Iterations) — показаны на рис. 2.232, 2.233. Как видно, хватит одной продувки, чтобы достичь удовлетворительной сходимости. При этом сохраняются некоторые пульсации (в том числе и по среднему значению), обусловленные, как представляется, недостаточно плотной сеткой. К сожалению, исследование сеточной сходимости ограничивается доступными вычислительными ресурсами — данный расчет "с трудом" уложился в имеющиеся 8 Гбайт оперативной памяти.

Распределение температуры в одном из вертикальных поперечных сечений (в воздухе и телах) показано на рис. 2.234. Диаграмма скорости с одновременным ее векторным представлением — на рис. 2.235.

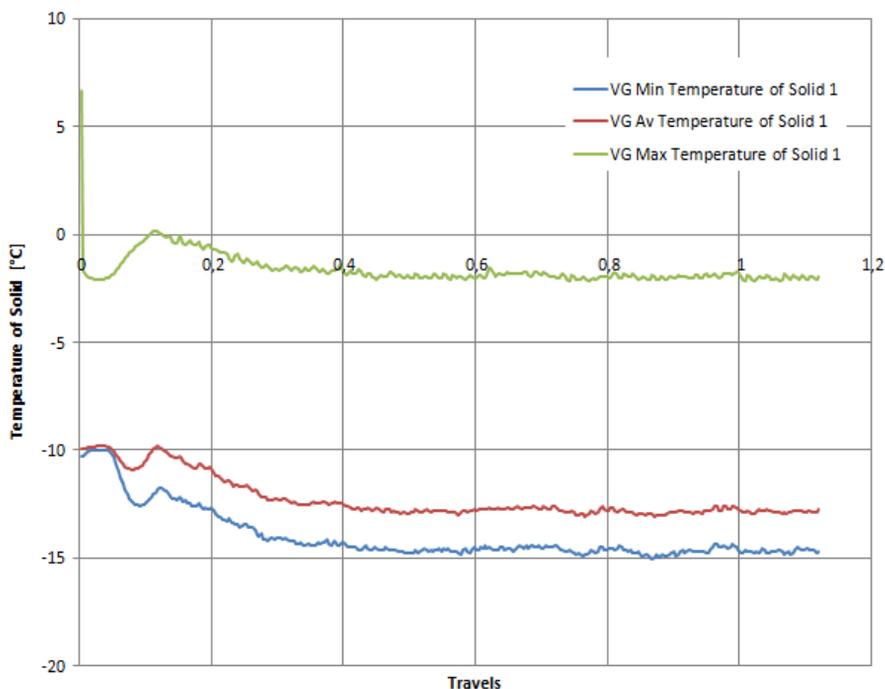


Рис. 2.232. Зависимость температур испарителя от номера продувки

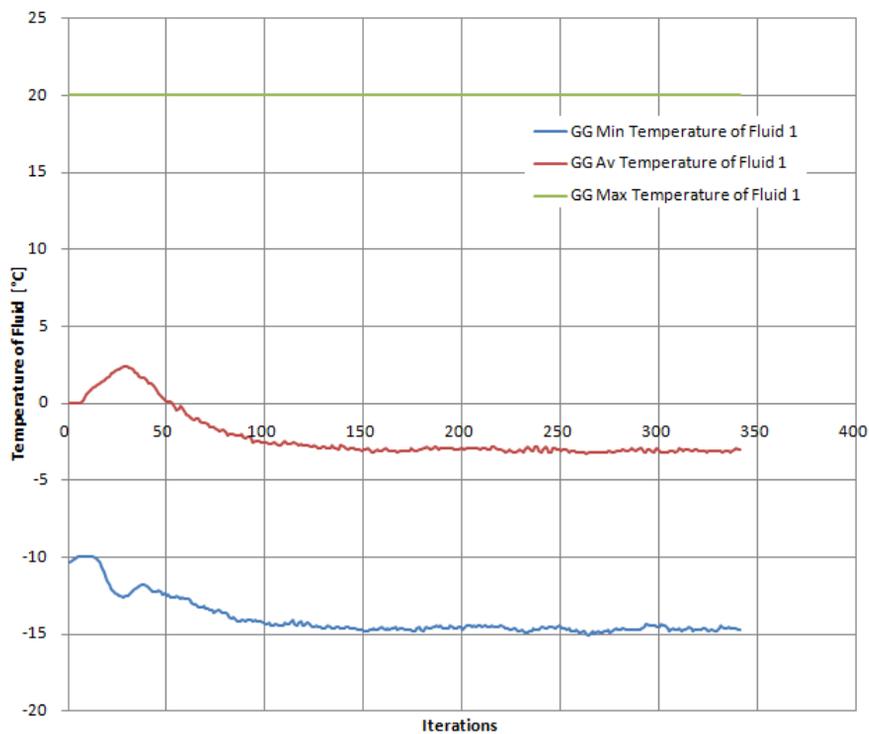


Рис. 2.233. Зависимость температур воздуха от номера итерации

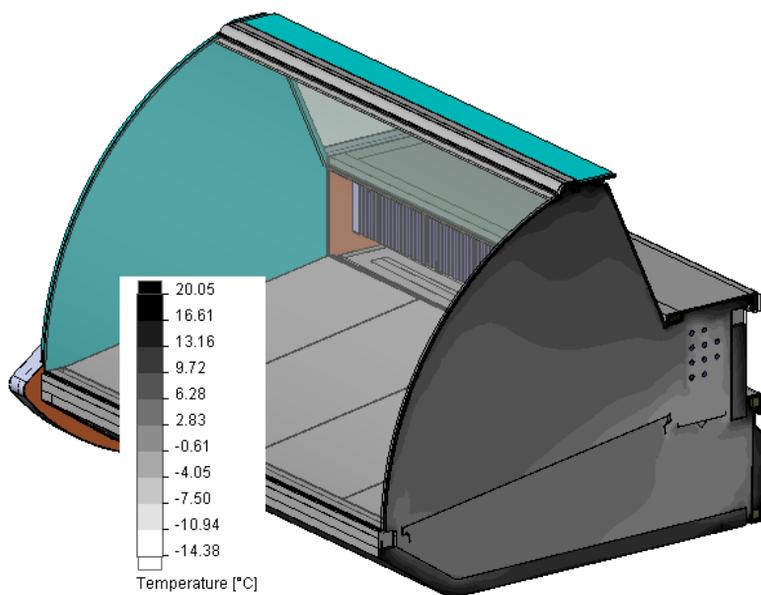


Рис. 2.234. Распределение температуры в вертикальном сечении

Как видно, образовалась достаточно сложная и малопредсказуемая структура вихрей. При этом температура ниже всего там, куда направлен поток охлажденного воздуха из испарителя, а максимальная скорость воздуха наблюдается в щели между поддоном и передней стенкой. Также скорость достаточно велика в щелях между поддоном испарителя с полкой и задней стенкой.

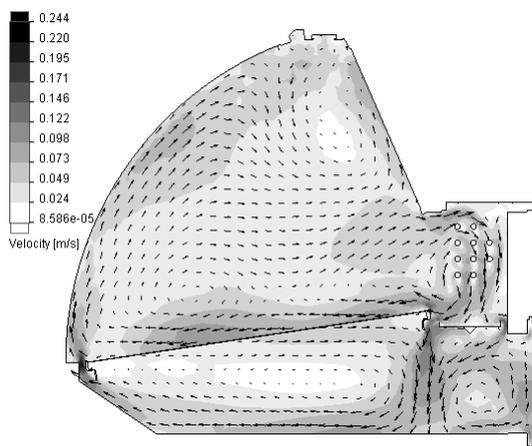


Рис. 2.235. Линии тока в вертикальном сечении на фоне скорости

Фрагмент горизонтального сечения поля скорости в окрестности конца испарителя с отображенной сеткой показан на рис. 2.236. Судя по иллюстрации, предсказать расположение зон с максимальной скоростью затруднительно.

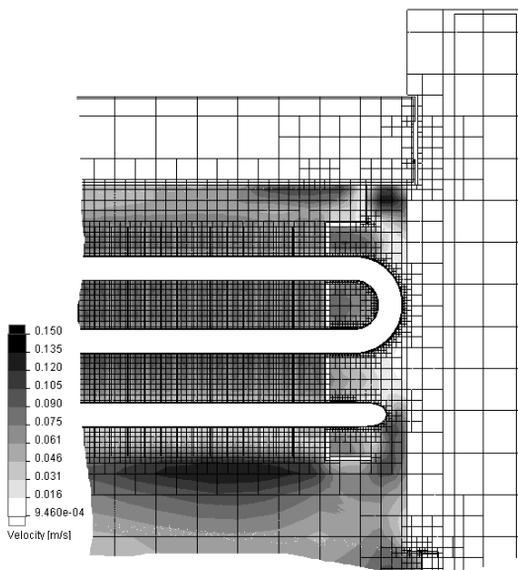


Рис. 2.236. Скорость в горизонтальном сечении — фрагмент в зоне края испарителя с сеткой

Сечение поля температуры показано на рис. 2.237. Понятно, что самые низкие значения локализованы вблизи трубок между пластинами. Это легко объяснимо тем, что скорость там мала, а температура охлаждаемых граней тел наименьшая.

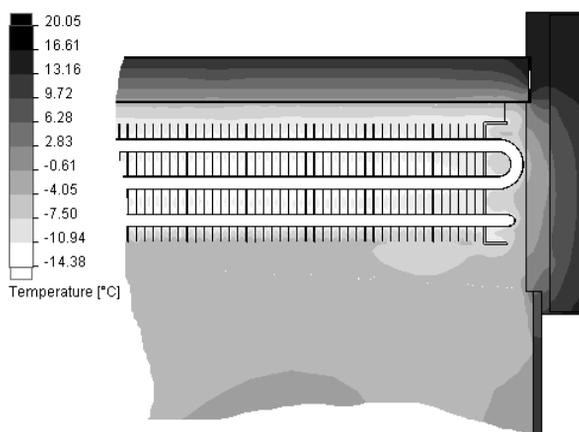


Рис. 2.237. Температура в продольном вертикальном сечении возле края испарителя

Одним из критичных упрощений, принятых в расчетной модели, является симметрия относительно поперечной вертикальной плоскости. Помимо того, что в самой конструкции имеются некоторые отклонения от симметрии, в частности в конструкции испарителя, даже в идеально симметричной системе могут возникнуть возмущения, приводящие к появлению поперечных (относительно вертикальной плоскости) токов. В принципе, они в состоянии ощутимо изменить и распределение температуры, однако с точки зрения функционирования витрины изменение скорости потока и его направления также является существенным показателем. Это подтверждается и тем, что на рис. 2.238, на котором показаны линии тока в пространстве, существуют достаточно интенсивные поперечные течения.

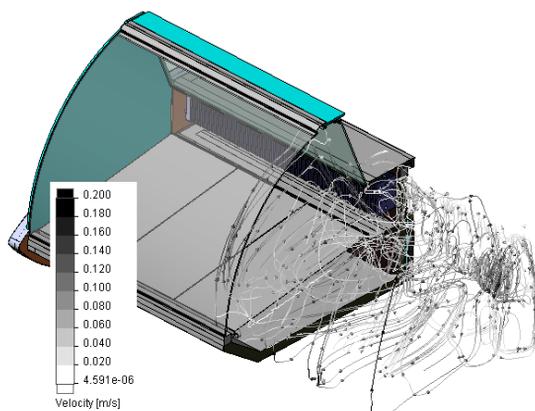


Рис. 2.238. Скорость на фоне линий тока в пространстве

2.4.5. Расчет с учетом влажности

В подобных изделиях информативным параметром состояния является относительная влажность воздуха. Flow Simulation позволяет при некоторых ограничениях получать соответствующие оценки. В качестве текучей среды могут фигурировать как воздух с учетом влажности, так и собственно водяной пар. При этом, в отличие от других типов сред, допускается смешивание воздуха и пара.

При выборе в качестве среды водяного пара доступны результаты, характеризующие конденсацию пара. Flow Simulation прогнозирует равновесную объемную конденсацию воды из водяного пара (при этом никакая конденсация на поверхности не рассматривается). Результатом, базирующимся на локальных значениях температуры, давления и (если рассматривается многокомпонентная среда, одной из составляющих которой является водяной пар) массовой доли водяного пара, является местное значение массовой доли водяного пара, а также местное значение конденсированного пара относительно общей локальной массовой доли водяного пара. Также рассчитываются и учитываются в расчете конденсации соответствующее изменение температуры текучей среды, ее плотности, энтальпии, удельной теплоемкости и скорости звука. Так как используется полностью равновесная модель конденсации, то характеристики водяного пара не имеют истории, то есть доступны исключительно локальные характеристики среды.

Гипотезы, принятые для прогнозирования конденсации, подразумевают, что объем сконденсированной жидкости равен нулю, из чего следует, что объемная доля сконденсированной воды не должна превышать 5%. При нарушении этих ограничений программа выводит соответствующее диагностическое сообщение в окне монитора решателя.

Помимо непосредственного представления среды как пара, Flow Simulation позволяет ассоциировать со средой (как с воздухом, так и с другими идеальными газами, а также их смесями) характеристику относительной влажности.

Относительная влажность должна быть определена во всех граничных и начальных условиях, относящихся к объемам с текучей средой, для которых эта характеристика применима. В контексте программы относительная влажность есть отношение текущей плотности водяного пара к плотности насыщенного пара при текущих (локальных) значениях давления и температуры. Соответственно относительные значения влажности на входах соответствуют назначенным на входах же параметрам текучей среды.

Если задействована относительная влажность, то расчет выполняется с учетом равновесной концентрации воды аналогично случаю со средой в виде водяного пара. Это сопровождается расчетом описанных характеристик. Дополнительно рассчитывается распределение относительной влажности, которое можно впоследствии визуализировать. Вода, "порождающая" влажность и пар, может существовать в виде газа или капель. Последнее являет собой конденсат. Термин "пар" во Flow Simulation объединяет оба состояния воды.

При учете влажности и/или использовании в качестве среды водяного пара доступны следующие результаты:

- Mass fraction of condensate** (Массовая доля конденсата) — локальная величина массовой доли водяного конденсата в газе, "источником" которого может быть как пар, так и относительная влажность;
- Mass fraction of Steam** (Массовая доля пара) — массовая доля воды (конденсированной и газообразной) относительно общей массы газообразной текучей среды;

- ❑ **Volume fraction of Steam** (Объемная доля пара) — объемная доля воды (конденсированной и газообразной) относительно общего объема газообразной текучей;
- ❑ **Moisture content** (Содержание влаги) — локальная величина массовой доли конденсата в паре (доля сконденсированной воды относительно общего содержания воды безотносительно к содержанию других газов, если таковые присутствуют);
- ❑ **Relative humidity, %** (Относительная влажность, %) — отношение текущей плотности водяного пара к плотности насыщенного пара при текущих (локальных) давлении и температуре.

Применительно к данной терминологии можно заключить, что если в некоторой области пар (Steam) является единственной текучей средой, то **Moisture content = Mass fraction of condensate**. В противном случае **Moisture content \geq Mass fraction of condensate**.

Следующие параметры неприменимы для расчетов с влажностью или паром, поскольку они имеют отношение исключительно к модели с кавитацией:

- ❑ **Mass fraction of dissolved gas** (Массовая доля растворенного газа) — массовая доля воздуха, растворенного в воде;
- ❑ **Mass fraction of vapor** (Массовая доля пара) — массовая доля водяного пара относительно воды, его содержащей, в областях с кавитацией.

Активизация режима расчета относительной влажности газообразной среды производится на странице **Fluids** (Текучие среды), как показано на рис. 2.239. При этом, разумеется, средой по умолчанию должен быть идеальный газ или смесь идеальных газов (раздел **Gases**). При наличии достоверной информации можно (а для нестационарного процесса — очень желательно) скорректировать значение относительной влажности в начальных условиях (рис 2.240). То же самое следует сделать в граничных условиях на входах (потенциальных входах, рис. 2.241). На этом исчерпываются изменения, которые повлек учет относительной влажности, и можно приступать к новому расчету.

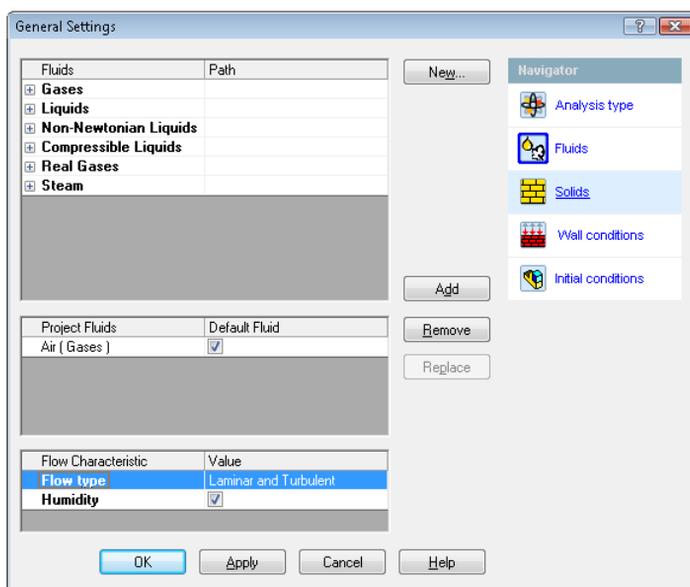


Рис. 2.239. Активизация режима учета влажности

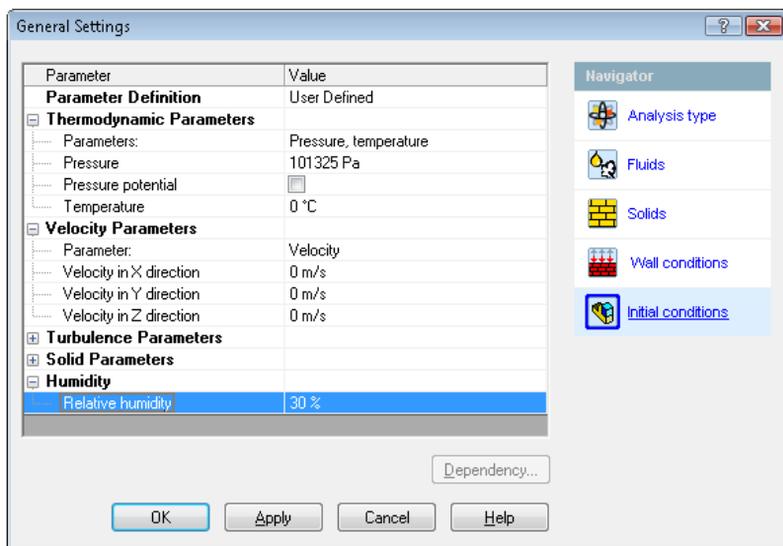


Рис. 2.240. Корректировка относительной влажности в начальных условиях

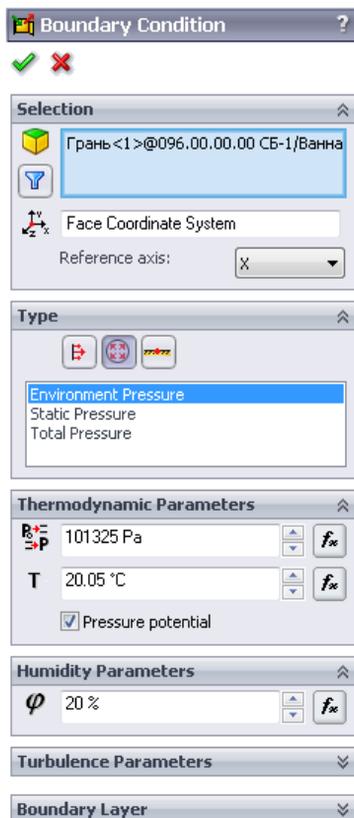


Рис. 2.241. Корректировка относительной влажности в граничных условиях

В процессе счета в окне **Info** (Текущая информация) появляется диагностическое сообщение, информирующее о том, что термодинамические параметры (в данном случае температура) вышли за пределы диапазона, применимого для расчета параметров водяного пара (рис. 2.242).

Parameter	Value	
Status	Preparing for calculation...	
Fluid cells	1493412	
Solid cells	477949	
Partial cells	1550115	
Iterations	340	
Last iteration finished	12:04:00	
CPU time per last iteration	00:01:24	
Travels		
Iterations per 1 travel	305	
Cpu time	71 : 44 : 6	
Calculation time left		
Warning		Comment
A vortex crosses the pressure opening		Boundary Condition : Environment Pressure 1 ; Inlet flow/o...
Thermodynamic parameters have been run out of the allowable limits during calculation of steam.		Please inspect the project's initial and boundary conditions.

Рис. 2.242. Диагностическое сообщение о выходе за допустимые термодинамические границы

Распределение скорости в вертикальном сечении с проекциями линий тока показано на рис. 2.243. Если сравнить эту диаграмму с показанной на рис. 2.235 (без влажности), можно заметить, что направление потоков ощутимо изменилось. Над полками в варианте с влажностью действует единственный вихрь, направленный по часовой стрелке, а на диаграмме без влажности — два встречных вихря, причем второй (направленный против часовой стрелки) образовался вблизи заднего стекла, и поток, примакаящий к стеклу, поднимается.

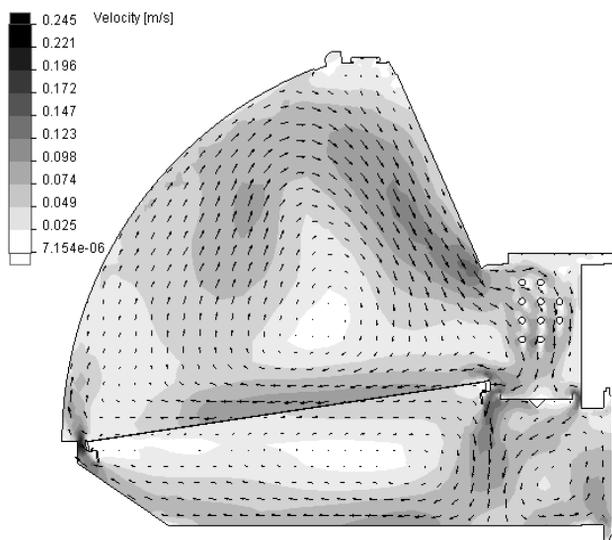


Рис. 2.243. Поле скоростей в сечении для модели с учетом влажности

Распределение относительной влажности в сечении показано на рис. 2.244. Обращает на себя внимание практически нулевая относительная влажность в области отрицательной температуры. Данный факт нуждается в дополнительном осмыслении в части адекватности функциональности программы данным условиям.

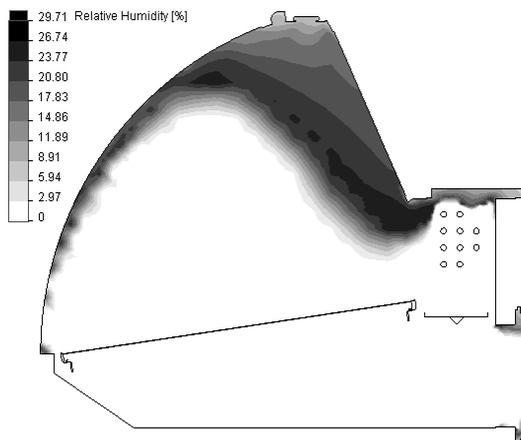


Рис. 2.244. Распределение относительной влажности газовой смеси в сечении

Распределение температуры на гранях тел показано на рис. 2.245. Оно, в принципе, мало отличается от полученного без учета влажности и позволяет сделать некоторые заключения. В частности интересна оценка степени неравномерности температуры полок, приближающейся к $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Она наиболее низкая в центре витрины под испарителем, наиболее высокая — в передних углах. Как представляется, один из путей выравнивания температуры (ее снижения в углах) есть местное увеличение зазора между полкой и передней стенкой (в данный момент этот зазор постоянный), управляющего интенсивностью перетекания воздуха из пространства под полкой в пространство над ней.

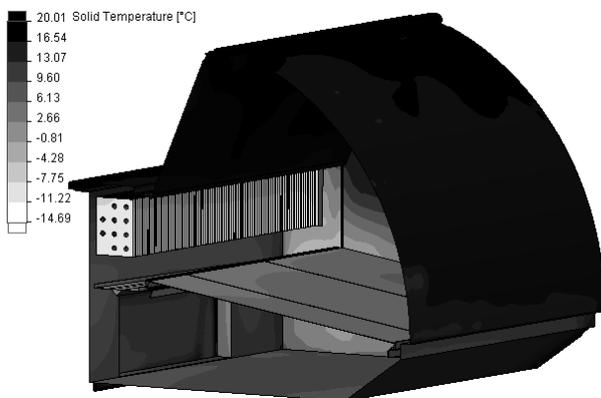


Рис. 2.245. Температура тел для модели с учетом влажности

2.4.6. Выводы

Данная задача является характерным примером ситуации, когда практически невозможно найти эффективный способ упрощения расчетной модели. Единственно приемлемым решением является рациональное использование имеющихся вычислительных ресурсов с мотивированным их наращиванием. В этом смысле результаты, даже неокончательные, могут являться ориентиром для оценки потребных ресурсов.

Интересным является вопрос о мере полезности результатов расчета для практики. Дело в том, что поскольку расчет описанной модели (с учетом симметрии) требует нескольких суток, то его использование на этапе собственно проектирования нерационально. Ресурсы для радикального уменьшения вычислительной трудоемкости также весьма призрачны. Дело в том, что изменение, например, моделей стенок (переход с трехслойной на условно-однослойную модель) может изменить термодинамическую схему изделия, а отказ от каких-то элементов внутри конструкции повлияет на гидродинамику. Как представляется, даже если бы геометрическая модель сразу создавалась бы "под расчет", а не модификацией "полноценной" конструкторской модели, то снижение размерности вряд ли превысило бы 20–30%.

Поэтому актуальность сохраняют традиционные полуэмпирические методики, позволяющие установить общие параметры конструкции: габариты, мощности, размеры характерных объемов, параметры теплоизоляции. После этого желательно создать геометрическую модель, позволяющую параметрически изменять характерные размеры: толщину теплоизолирующих стенок, размер основных проходных каналов, в частности, между полками и корпусом. Как уже было описано, желательно иметь аппроксимацию, допускающую переменные по длине витрины размеры щелей.

Одним из неучтенных в расчетной модели эффектов является действие лампы освещения, расположенной в полости вдоль верха витрины. Несмотря на незначительную тепловую мощность, она может оказать влияние на распределение воздушных потоков. При некоторых усилиях имитация этого явления может быть выполнена с минимальными вычислительными затратами.

2.5. Тепловая модель офисного помещения

Целью данного раздела является расчет системы вентиляции кондиционирования офисного помещения. Автор благодарит сотрудников Российского государственного университета туризма и сервиса (Московская обл., пос. Черкизово) за сотрудничество при решении задачи.

2.5.1. Постановка задачи

Геометрическая модель объекта показана на рис. 2.246. Как видно, в нее вошло как содержимое помещения, так и стены, пол, потолок, окно и дверь. Это говорит о том, что планируется расчет теплового режима с учетом теплопроводности строительных конструкций. Подразумевается назначение тепловых условий снаружи здания, а также на внутренних стенах.

Источниками тепла являются несколько компьютеров, холодильник и персонал. В помещении установлен кондиционер. Воздух, поступающий в помещение, может забираться с улицы, или же система работает в режиме частичной рециркуляции: часть с улицы, часть — из комнаты.

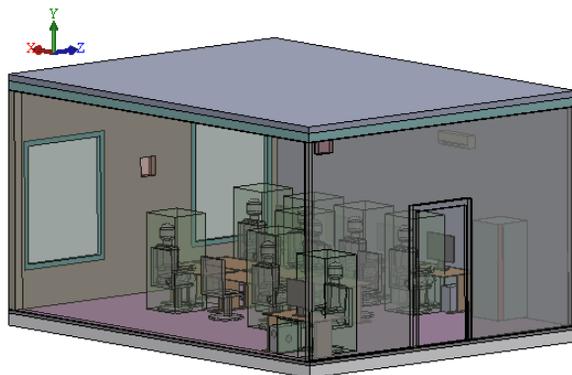


Рис. 2.246. Геометрическая модель помещения

Помещение сообщается с улицей или другими помещениями посредством вентиляционных окошек, расположенных на фасаде и в задней стенке.

2.5.2. Построение расчетной модели

Создаем проект Flow Simulation со следующими настройками (рис. 2.247). Как видно, решаться будет внутренняя задача с учетом теплопроводности в телах. При этом не выполняется расчет течения в полостях, в которых не будет поставлено каких-либо условий течения. Также будет учитываться теплообмен излучением как внутри, так и снаружи, причем температура окружающей среды устанавливается $37\text{ }^{\circ}\text{C}$. Не моделируется действие солнечного излучения, а также эффекты в прозрачных (если бы таковые существовали) телах. Разумеется, учитывается действие силы тяжести в вертикальном направлении — фактор естественной конвекции будет играть решающую роль.

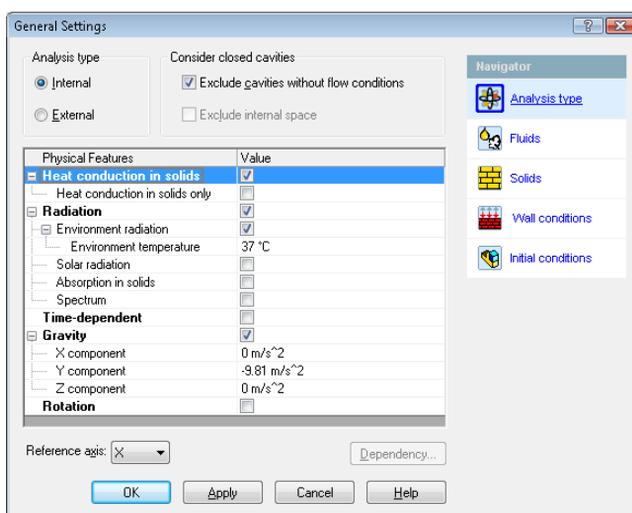


Рис. 2.247. Общие настройки проекта

В качестве текучей среды выбираем воздух, влажность не учитываем (рис. 2.248). Материалом по умолчанию будет полистирен, причем прозрачность (потенциальная) учитываться не будет (рис. 2.249).

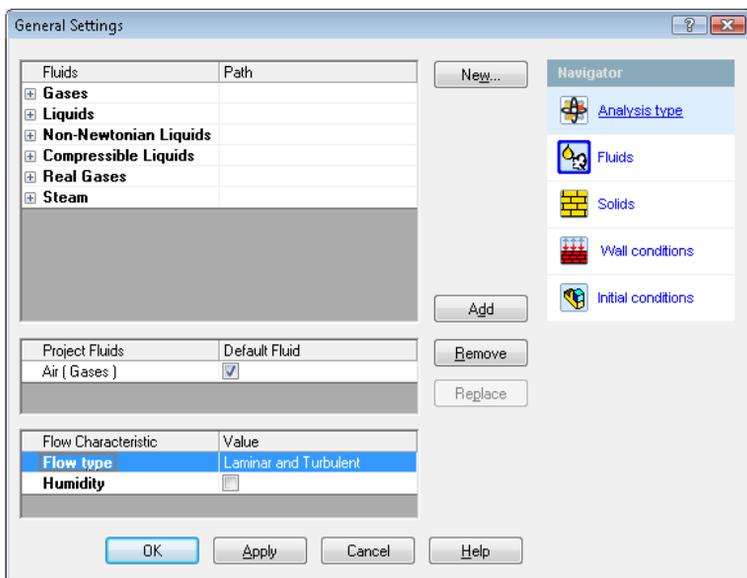


Рис. 2.248. Выбор воздуха в качестве текучей среды по умолчанию

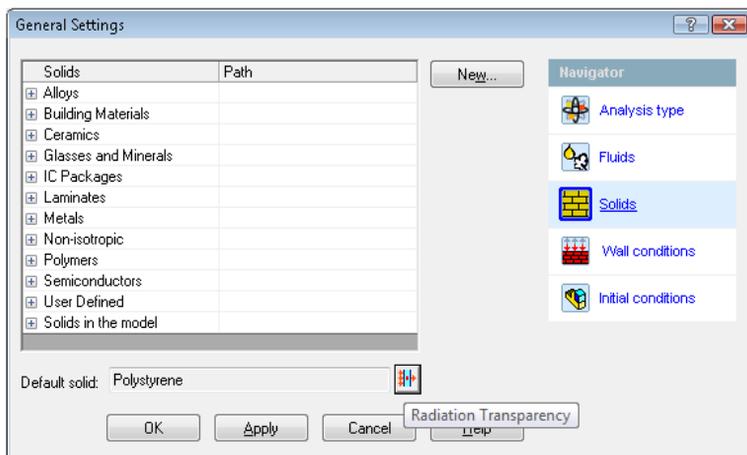


Рис. 2.249. Выбор пластмассы в качестве материала по умолчанию

В качестве граничных условий на стенках по умолчанию назначаем следующие (рис. 2.250):

- для внешних стенок принимаем, что снаружи находится среда с температурой $37\text{ }^{\circ}\text{C}$, с которой материал стенки взаимодействует с коэффициентом те-

плоотдачи $10 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \times \text{К})$. Это соответствует слаборазвитой естественной конвекции;

- для внешних стенок принимаем, что теплообмен излучением отсутствует;
- для внутренних стенок и других поверхностей принимаем, что они окрашены темной краской (в Инженерной базе данных ей присвоен коэффициент излучательной способности 0,82).

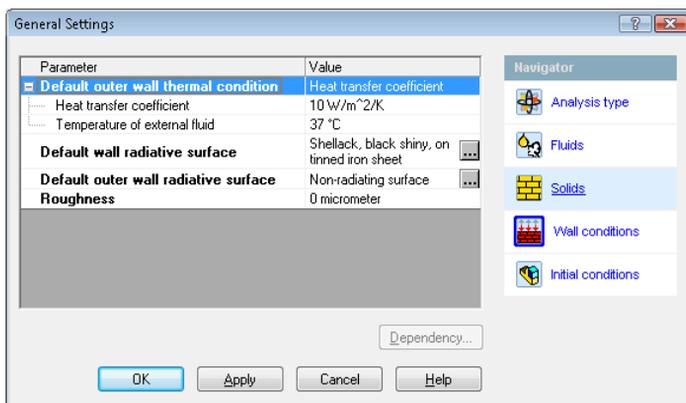


Рис. 2.250. Назначение условий на стенках по умолчанию

Начальные условия — в данном случае они представляют собой исходное приближение, с которого начинается итерационный процесс решения — оставляем без изменений (рис. 2.251).

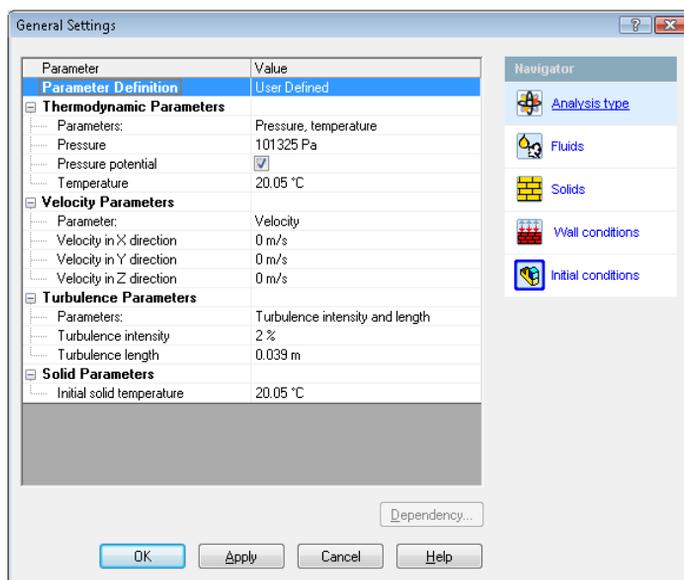


Рис. 2.251. Начальные условия

Геометрическая расчетная модель совпадает с исходной моделью помещения. Остановимся на ее принципиальных особенностях применительно к гидрогазодинамическому расчету.

На рис. 2.252 приведены укрупненные местные виды наружных углов. Как видно, пол, потолок, а также задняя и правая стены представляют собой трехслойную конструкцию, а левая и передняя стены образованы одним телом.

Трехслойная геометрическая модель стен позволяет в явном виде описать трехслойную же конструкцию, которая в нашем случае состоит из пластин гипсокартона, между которыми расположена минеральная вата. Трехслойная модель пола подготовлена для моделирования структуры, состоящей из бетонной плиты, стяжки и керамической плитки.

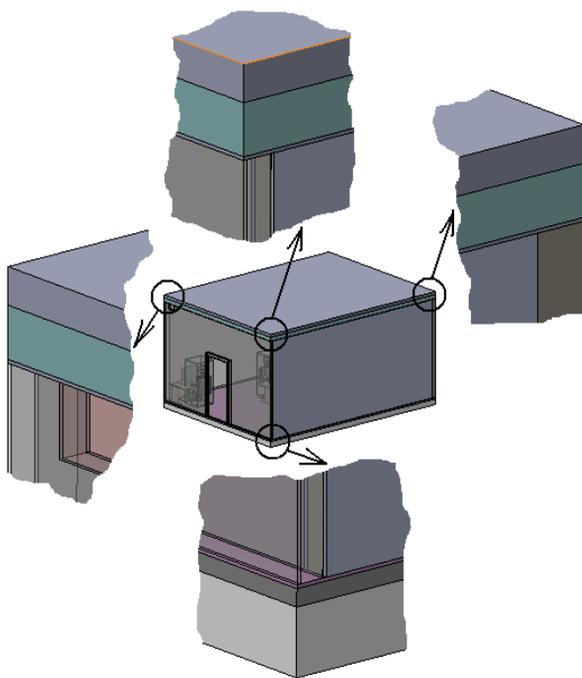


Рис. 2.252. Особенности построения модели ограждений

Трехслойная модель потолка соответствует бетонной плите, подвесному потолку из гипсокартонных плит и воздушной прослойке между ними. Здесь следует обратить внимание, что полость между плитой и потолком смоделирована посредством твердого тела. Предполагается, что мы не будем рассматривать движение воздуха в этом объеме, ограничившись имитацией теплопереноса только посредством теплопередачи. Это, как представляется, не внесет больших погрешностей в модель процесса: из-за малой высоты полости тепломассоперенос, порожденный естественной конвекцией, не будет существенным. Поэтому, создав тело, присвоим ему характеристики материала, как показано на рис. 2.253. Также следует обратить внимание, что в разделе **Radiation Transparency** (Прозрачность для излучения) для

среды выбран вариант **Оpaque** (Непрозрачный). Это также сделано для сокращения объема вычислений в предположении, что разница температур между сторонами плитки и плиты, ограничивающими полость, не слишком велика.

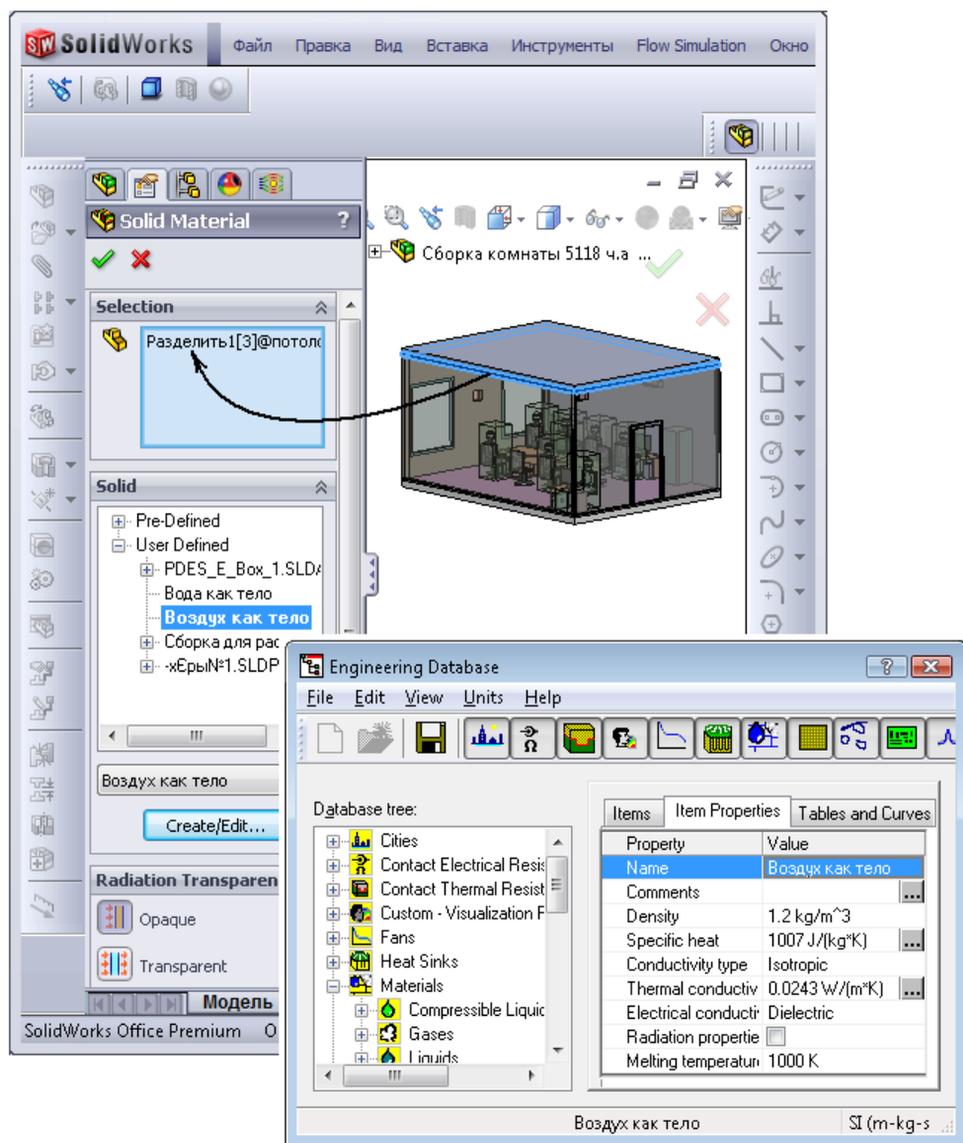


Рис. 2.253. Придание воздушной прослойке в потолке свойств воздуха как материала

Завершая тему, связанную со структурой и материалами стен, объясним, почему для передней и левой стен была использована "однослойная" геометрическая модель. В реальности это сэндвич-панель, где между двумя слоями стали толщиной 1 мм расположена минеральная вата и общая толщина пакета составляет 150 мм.

Такого типа системы лучше моделировать посредством специального инструмента **Printed Circuit Board** (Плата с печатной схемой). Согласно названию, он предназначен для имитации слоистых печатных плат, однако нет никаких противопоказаний, запрещающих использовать его в задачах других типов.

Данный инструмент доступен в модуле **Flow Simulation & Electronic Cooling** (Расчет радиоэлектронных устройств). Структура и функциональность модулей **Flow Simulation** приведена в *приложении 1*.

Для описанной трехслойной конструкции информация о плате должна выглядеть, как показано на рис. 2.254. Здесь нужно в поле **Type** (Тип) выбрать способ описания структуры:

- Layer Definition** (Определение слоев) — в явном виде посредством таблицы **Conducting Layers** (Слой проводников) на вкладке **Tables and Curves** (Таблицы и кривые) (рис. 2.255) определяется число соответствующих слоев и их толщины. Столбец **Percentage Cover** (Процент покрытия) — это доля, занимаемая в "проводящем" слое собственно проводником. Оставшаяся часть этого слоя считается занятой материалом, заполняющим слой диэлектрика.
- Conductor Volume Fraction** (Объемная доля проводника) — здесь нужно будет назначить объемную долю проводника в материале платы без конкретизации топологии.
- Board Mass** (Масса платы) — потребуется определить содержимое полей **PCB total mass** (Общая масса платы) и **PCB total volume** (Общий объем платы).

Как следует из сопоставления имеющихся условий и возможностей для их реализации, для нашего случая наиболее подходящим вариантом является **Layer Definition**.

Характеристики компонентов печатной платы, необходимые для ввода в базу данных:

- Dielectric material density** — плотность материала диэлектрика;
- Dielectric material specific heat** — удельная теплоемкость материала диэлектрика;
- Dielectric material conductivity** — теплопроводность материала диэлектрика;
- Conductor...** — тот же набор характеристик для проводника;
- PCB total thickness** — общая толщина платы.

Сразу после ввода необходимой информации программа автоматически рассчитывает эффективные тепловые характеристики пакета как слоистого анизотропного материала с изотропией в плоскости слоев:

- In-plane (planar) conductivity** — удельная теплопроводность в плоскости;
- Through-plane (planar) conductivity** — удельная теплопроводность перпендикулярно плоскости;
- Effective density** — эффективная (осредненная) плотность;
- Effective specific heat** — эффективная удельная теплоемкость.

Окно в реальности есть однокамерный стеклопакет, помещенный в пластмассовую раму. В нашей модели для окна будет использоваться деталь с единственным телом, не имеющим полостей. Мотив этого упрощения состоит в том, что типовые методики теплового расчета зданий и помещений не предполагают подробной модели процессов в окнах, они заменяются подходящим тепловым сопротивлением. Соответственно для окна должна быть построена такая геометрическая модель, которая позволит эту методику реализовать посредством инструментов **Flow Simula-**

tion. В данном случае для однокамерного стеклопакета в одинарном переплете будем использовать приведенное сопротивление теплопередаче $0,35 \text{ м}^2 \times \text{С/Вт}$ [4]. Тогда для окна площадью 3 м^2 тепловое (эффективное) сопротивление будет $0,117 \text{ }^\circ\text{С/Вт}$.

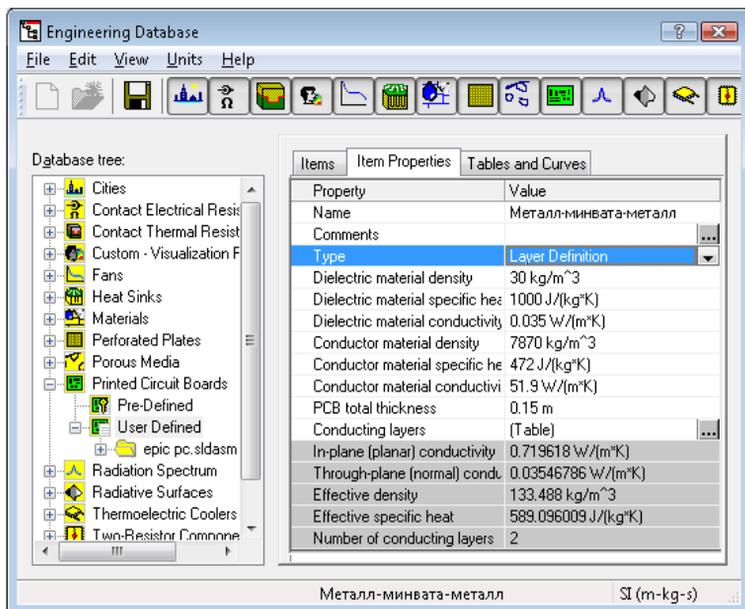


Рис. 2.254. Плата с печатной схемой в Инженерной базе данных

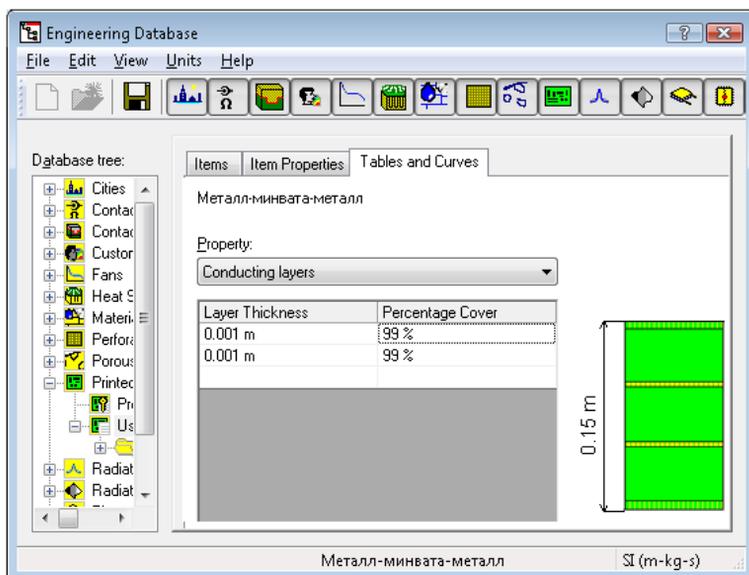


Рис. 2.255. Структура проводящих слоев

Есть несколько подходов к реализации во Flow Simulation сущностей, описанных тепловым сопротивлением. Первый — наиболее очевидный, когда для заданного материала (коэффициента теплопроводности) подбирается подходящая толщина, или же для назначенной толщины подбирается (генерируется) материал с соответствующей теплопроводностью. Следствием этого подхода является присутствие теплопроводности в направлениях, перпендикулярных тому, относительно которого удовлетворяется тепловое сопротивление. В общем случае эта теплопроводность может отличаться от реальной, и тогда приходится прибегать к использованию материалов с анизотропной теплопроводностью.

Для имитации теплового сопротивления тел можно также использовать "традиционный" инструмент **Contact Resistance** (Контактное тепловое сопротивление). Он вполне соответствует своему названию, поскольку реализует сопротивление на границе раздела, заменяя его или некоторой пользовательской константой, или виртуальным слоем с назначенной толщиной материала из базы данных. Получается, что если нужно смоделировать сопротивление тела, то следует разделить его по толщине, назначить контактное сопротивление по границе, а затем каким-то образом подобрать адекватные характеристики для тел.

В упомянутом модуле Flow simulation & electronic cooling присутствует Heat Pipe (Тепловая трубка), представляющая собой виртуальный транслятор тепловой энергии. Он связывает два множества граней и обладает тепловым сопротивлением (рис. 2.256). Нужно заполнить два множества граней: **Heat In Faces** (Грани, принимающие тепло) и **Heat Out Faces** (Грани, отдающие тепло), обозначающие — если бы мы рассматривали реальную тепловую трубку — ее торцы. Отметим, что классификация "холодных" и "горячих" граней вполне условна, то есть грани можно помещать в соответствующие поля произвольным образом, соблюдая только правило о том, чтобы в каждом множестве находились грани, принадлежащие одному концу "трубки". Следующее поле — это **Effective Thermal Resistance** (Эффективное тепловое сопротивление). Как видно, соответствующий параметр имеет размерность °C/Вт и удовлетворяет нашим потребностям — имитировать тепловое сопротивление объекта как целого, независимо от его размеров.

Чтобы исключить теплообмен между боковыми гранями "тепловых трубок" и оконными проемами, создаем контактные тепловые сопротивления для общих граней соответствующих деталей, выбирая для этих сопротивлений вариант **Infinite resistance** (Бесконечное сопротивление) из Инженерной базы данных (рис. 2.257).

Отдельным вопросом является моделирование электронных устройств. Все они являются источниками тепла, однако целью расчета является исследование собственно помещения. Поэтому необходимо найти компромисс между степенью подробности модели прибора и размерностью задачи. Для холодильника используем пустотелый параллелепипед, полость которого заполнена материалом — изолятором (рис. 2.258). Это гарантированно исключает заполнение его текучей средой. В принципе, можно было бы оставить полость, которая, в силу отсутствия учета течения в полостях без граничных условий, не вошла бы в расчетную модель, однако дополнительно пришлось бы уточнять теплообмен излучением между гранями полости. Заполнение теплоизолирующим непрозрачным телом автоматически снимает эти вопросы.

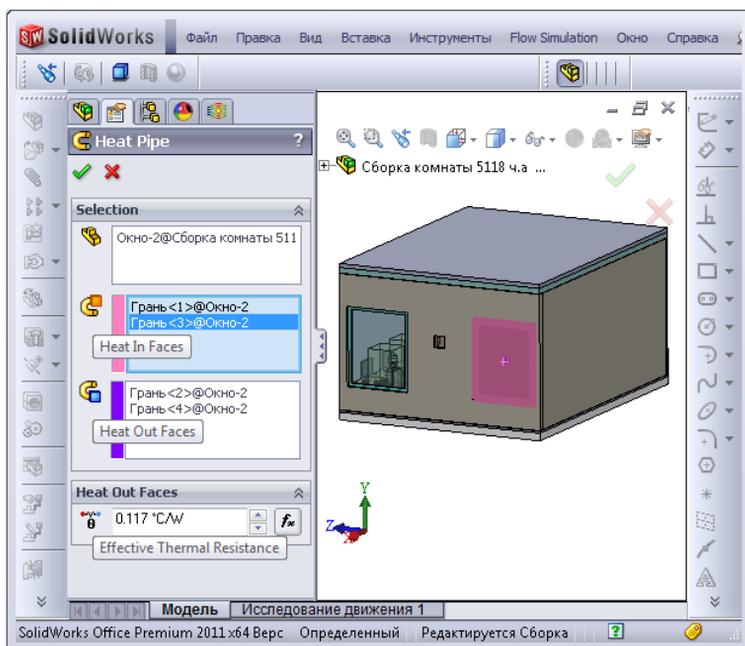


Рис. 2.256. Присвоение окну свойств виртуальной тепловой трубки

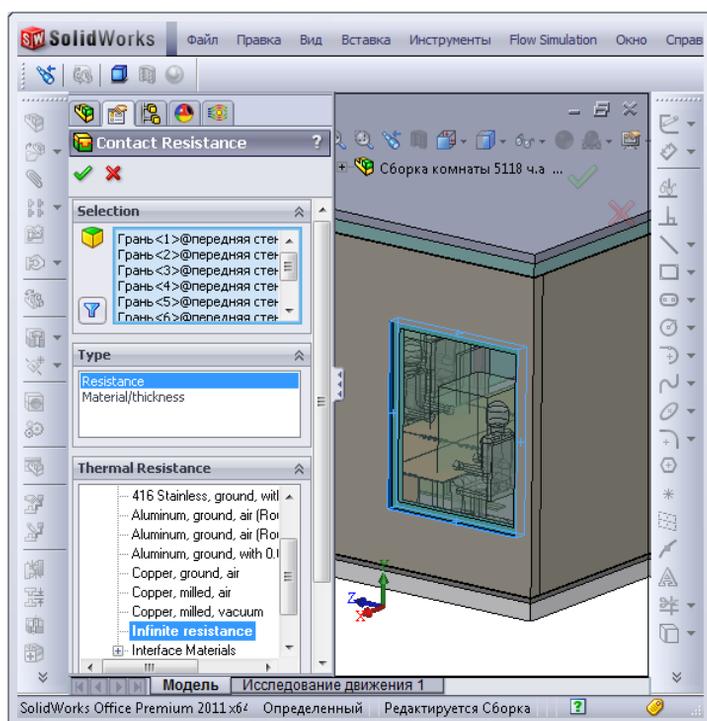


Рис. 2.257. Ввод теплоизоляции между окнами и стеной

Заканчивая разбор модели холодильника, продемонстрируем рис. 2.258. Из него следует, что мощность "сбрасывается" через примыкающие к дверке участки боковых стенок. В геометрической модели эти стенки выделены посредством линий разреза, к которым приложена мощность (общая) 250 Вт (рис. 2.259).

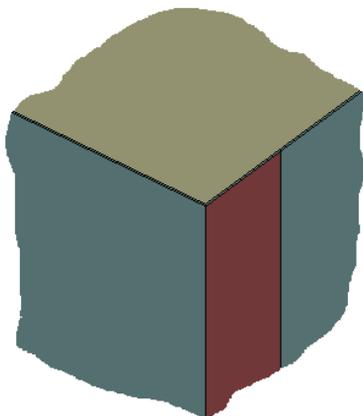


Рис. 2.258. Фрагмент геометрической модели холодильника

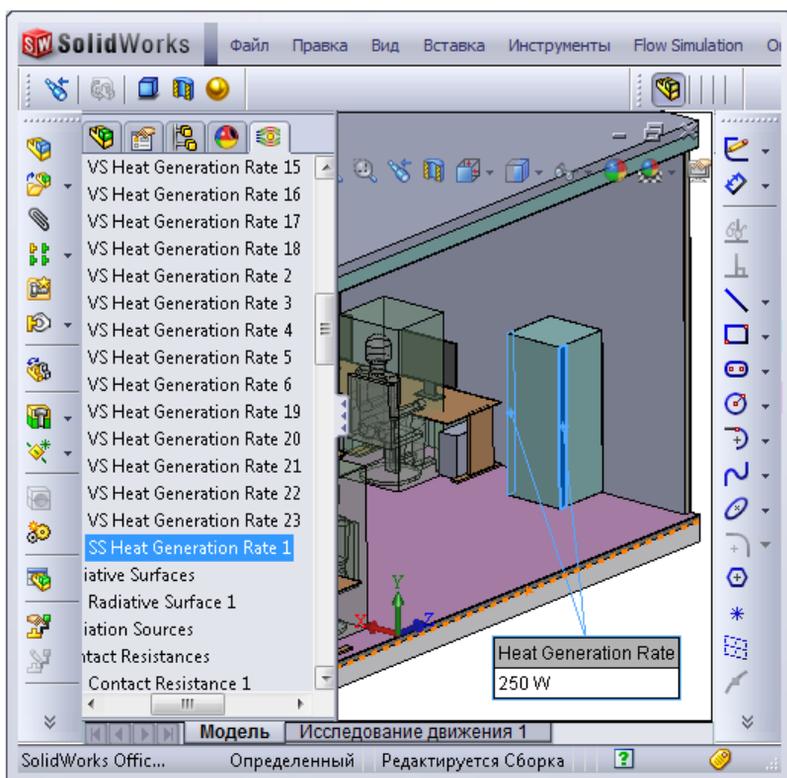


Рис. 2.259. Мощность, выделяемая холодильником

Аналогичным, с точки зрения моделирования внутреннего пространства, образом поступаем с компьютерами (системными блоками), которые (для программы) также являются стальными тонкостенными ящиками, "заполненными" изолятором (рис. 2.260), на модели в разрезе изолятор выполнен прозрачным телом.

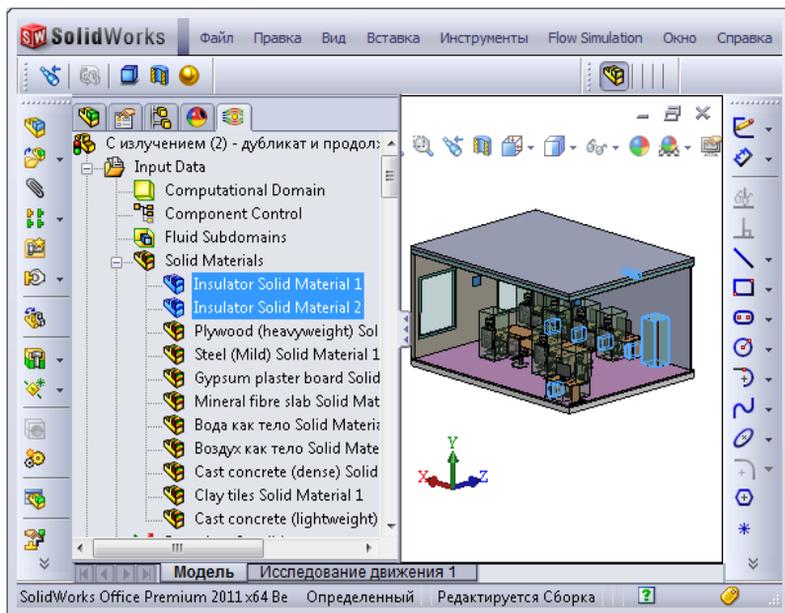


Рис. 2.260. Присвоение материала — изолятора элементам электронных приборов

Мощность 250 Вт, выделяемую системным блоком, геометрическая модель которого показана на рис. 2.261, предполагаем состоящей из двух долей: первая — 50 Вт генерируется в теле корпуса (это наша условность) и выделяется через его стенки (рис. 2.262). Остаток, 200 Вт, генерируется во вспомогательном теле, расположенном на вентиляционной решетке (рис. 2.263). Этому телу присвоен атрибут **Disabled** (Отключен), что делает его "прозрачным" для текучей среды, но позволяет, в частности, ассоциировать с ним источник мощности.

Имитацию системы вентиляторов в системном блоке будем осуществлять посредством единственного вентилятора, для которого используем одноименную виртуальную сущность в варианте **Internal Fan** (Внутренний вентилятор). Он осуществляет "забор" текучей среды из произвольного места модели (оно обозначается одной или несколькими гранями), контактирующего с текучей средой, и перемещает ее в произвольное же место, также обозначаемое гранями (рис. 2.264). Никаких требований, за исключением принадлежности к одному (общему) объему не предъявляется. Соответственно, для данной задачи, наличие/отсутствие полостей в корпусе, через которые протекает среда, не принципиально.

Для этой задачи подбираем из базы данных вентилятор, обладающий "разумными" расходно-напорными характеристиками (рис. 2.265, 2.266), "присваивая" его двум круглым граням на корпусе (рис. 2.264). Следует обратить внимание, что выходом из вентилятора (Faces fluid exits the fan) является грань на собственно корпусе, а не на вспомогательном теле (источнике тепла).

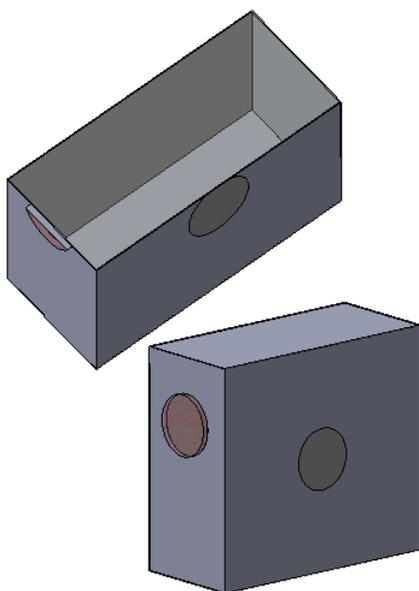


Рис. 2.261. Геометрическая модель системного блока

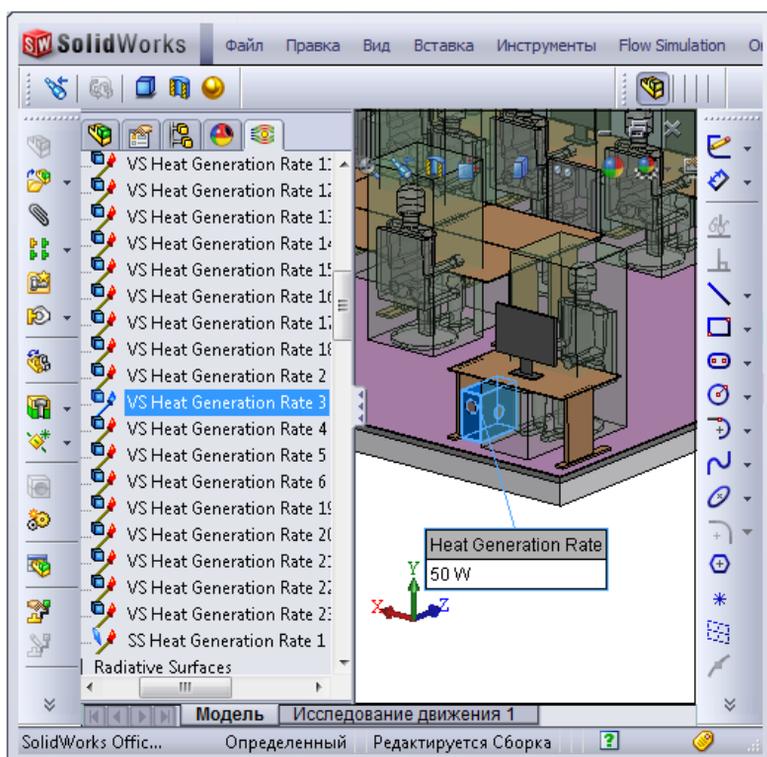


Рис. 2.262. Мощность, выделяемая системным блоком и отбираемая через корпус

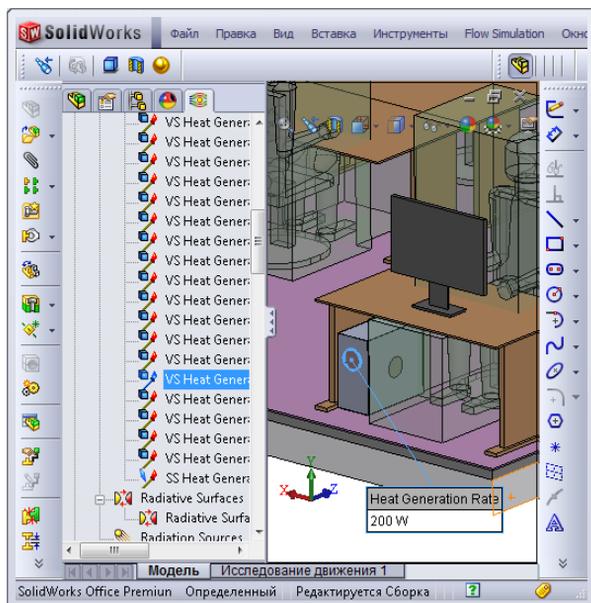


Рис. 2.263. Мощность, выделяемая системным блоком в пространство посредством вентилятора

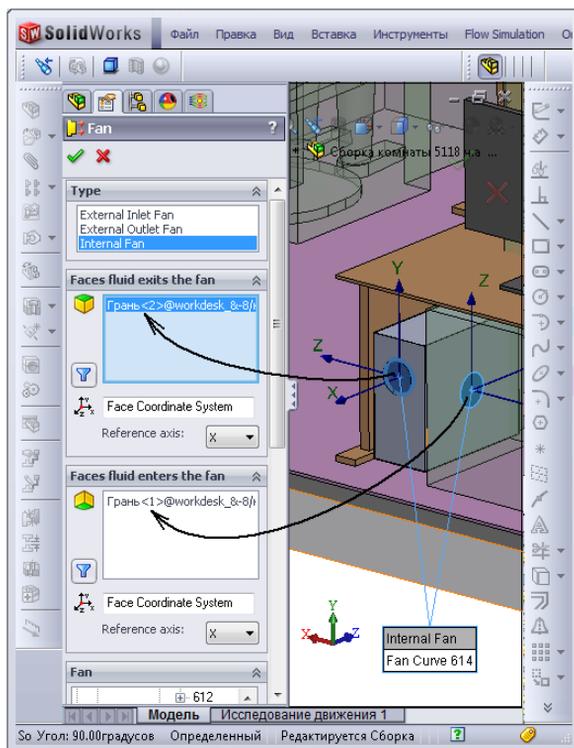


Рис. 2.264. Создание виртуального вентилятора для системного блока

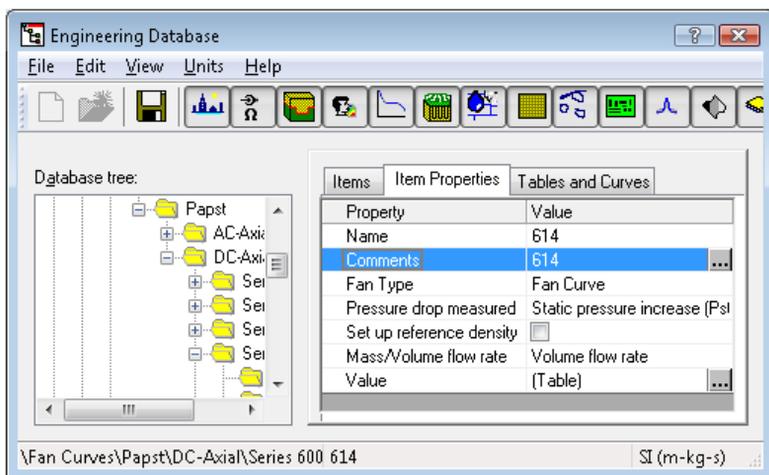


Рис. 2.265. Свойства виртуального вентилятора

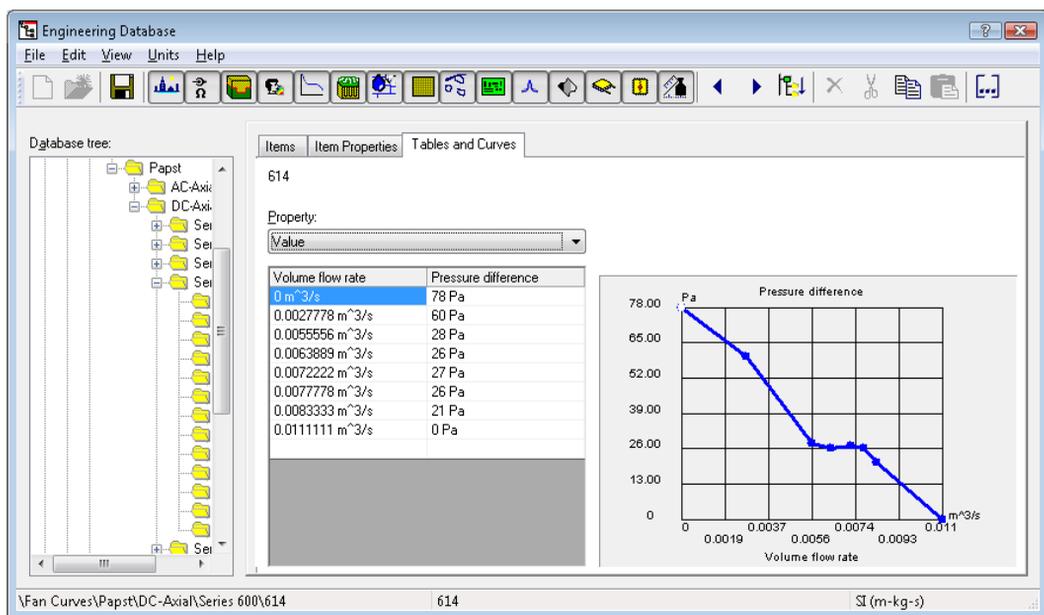


Рис. 2.266. Расходно-напорная характеристика вентилятора

На базе каждого из мониторов создаем объемный источник тепла мощностью 30 Вт (рис. 2.267). Здесь в силу малого объема полостей использовать какие-либо уширения нерационально, поэтому для монитора используется модель сплошного тела.

Кондиционер моделируем следующим образом. Во-первых, в качестве материала детали принимаем изолятор. Это единственно приемлемое решение, поскольку упрощенная гидродинамическая тепловая модель кондиционера нереализуема. На верхней грани детали выделяем прямоугольный участок, который будет служить

входом виртуального вентилятора, имитирующего рециркуляцию. Выход из кондиционера оформляем в виде прямоугольного выреза, заполненного телом (рис. 2.268, на котором вспомогательное тело выполнено прозрачным). Дно выреза линиями разъема делим на пять полосок, через которые будет вбрасываться воздух "с улицы" и через рециркуляцию. Число этих полосок должно, с одной стороны, не требовать слишком плотной сетки, а с другой — обеспечивать перемешивание потоков в пределах области, где происходит охлаждение воздуха. Ширину полосок подбираем так, чтобы из них можно было образовать два множества с площадями, пропорциональными соотношению объемных расходов потока с улицы и рециркуляционной составляющей. В нашем случае полный расход через кондиционер составляет $0,04 \text{ м}^3/\text{с}$, с улицы берется $0,0267 \text{ м}^3/\text{с}$, а из комнаты — $0,0133 \text{ м}^3/\text{с}$.

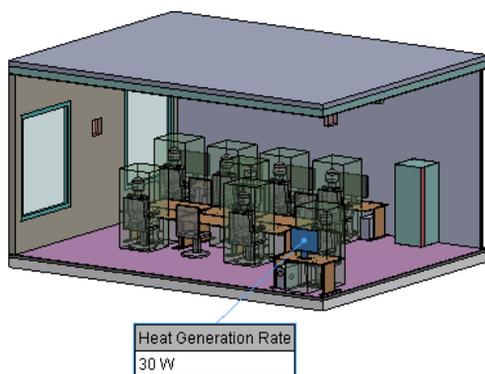


Рис. 2.267. Мощность, выделяемая монитором

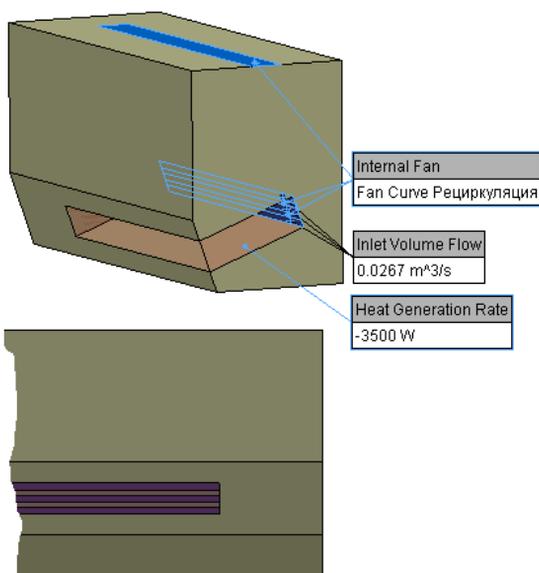


Рис. 2.268. Расчетная модель кондиционера

Рециркуляцию с постоянным расходом обеспечиваем вентилятором, который нужно создать в базе данных (рис. 2.269). Для него назначаем **Fan Type** (Тип вентилятора) как **Fan Curve** (Зависимость вентилятора).

ПРИМЕЧАНИЕ

В отличие от других доступных разновидностей, **Axial** (Осевой) и **Radial** (Радиальный), **Fan Curve** (Зависимость вентилятора) подразумевает отсутствие дополнительной геометрической информации.

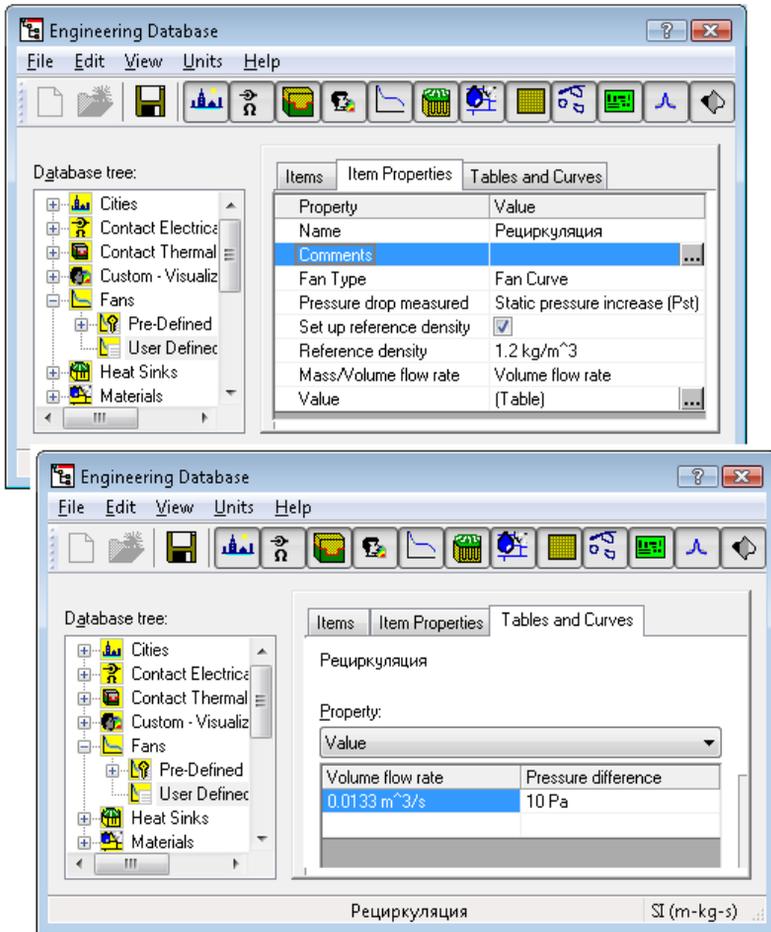


Рис. 2.269. Характеристики вентилятора с постоянным расходом

Назначение внутреннего вентилятора иллюстрирует рис. 2.270. Как видно, забор воздуха из комнаты осуществляется через условное отверстие (грань) сверху кондиционера, выход — через две полоски, расположенные между теми, из которых поступает воздух "с улицы". Также существенно, что в разделе **Thermodynamic parameters** (Термодинамические параметры) активизирована опция **Use outlet temperature** (Использовать температуру потока, втекающего в вентилятор).

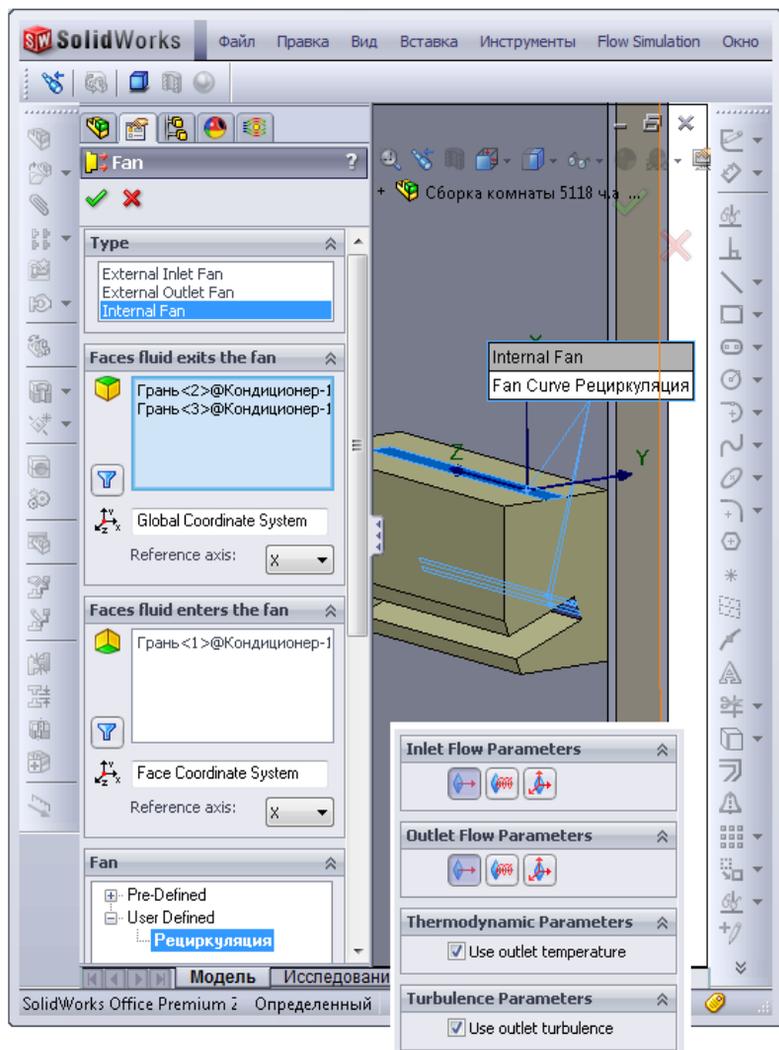


Рис. 2.270. Создание виртуального вентилятора для компьютера

Отбор воздуха "с улицы" моделируется объемным расходом через три грани на дне прямоугольного выреза в теле кондиционера (рис. 2.271). Как видно, предполагается, что температура на входе в помещение составляет $37\text{ }^{\circ}\text{C}$, а объемный расход — $0,0267\text{ м}^3/\text{с}$.

Отбор тепла производится при протекании воздуха через тело, в котором генерируется мощность -3500 Вт , как показано на рис. 2.272.

Неоднозначным является способ описания человеческого тела. Абстрагируясь от подробностей (в виде циркуляции жидкостей, наличия одежды, испарений пота и дыхания, химических превращений), принимаем, что человек состоит из материала со свойствами воды. Этот случай аналогичен ситуации с прослойкой воздуха между плитами перекрытий и подвесным потолком. Если бы мы назначили в качестве материалов "реальные" воду и воздух, то получили бы течение в некоторых объемах.

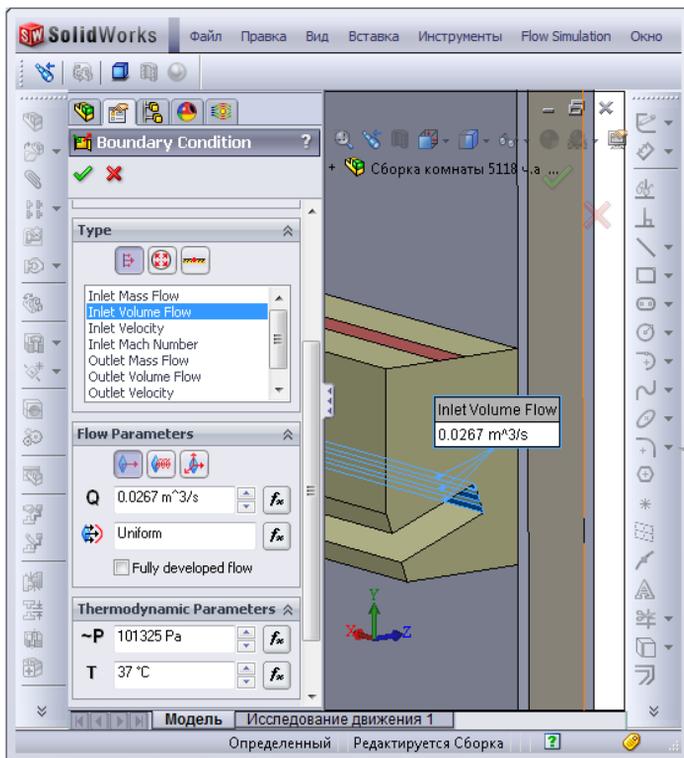


Рис. 2.271. Объемный расход, имитирующий поступление воздуха с улицы

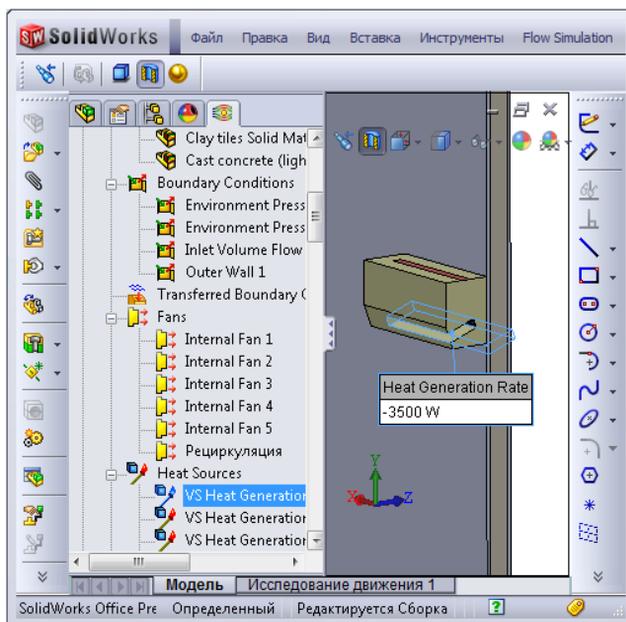


Рис. 2.272. Отбор мощности при прохождении через "прозрачное" тело

Соответствующие характеристики показаны на рис. 2.273. При этом тело (геометрическое) является тепловым источником с мощностью 130 Вт (рис. 2.274).

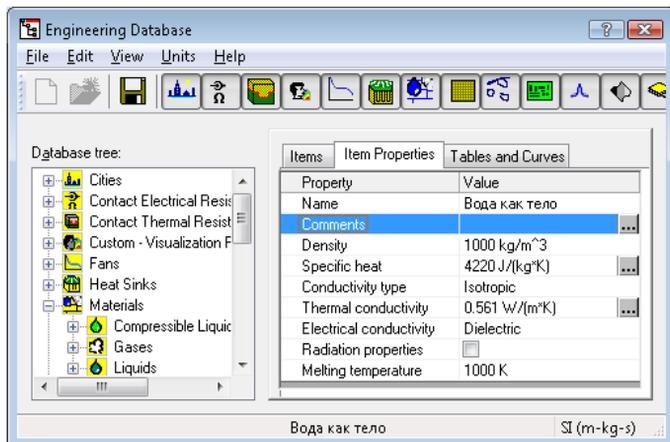


Рис. 2.273. Свойства материала, идентичные свойствам воды

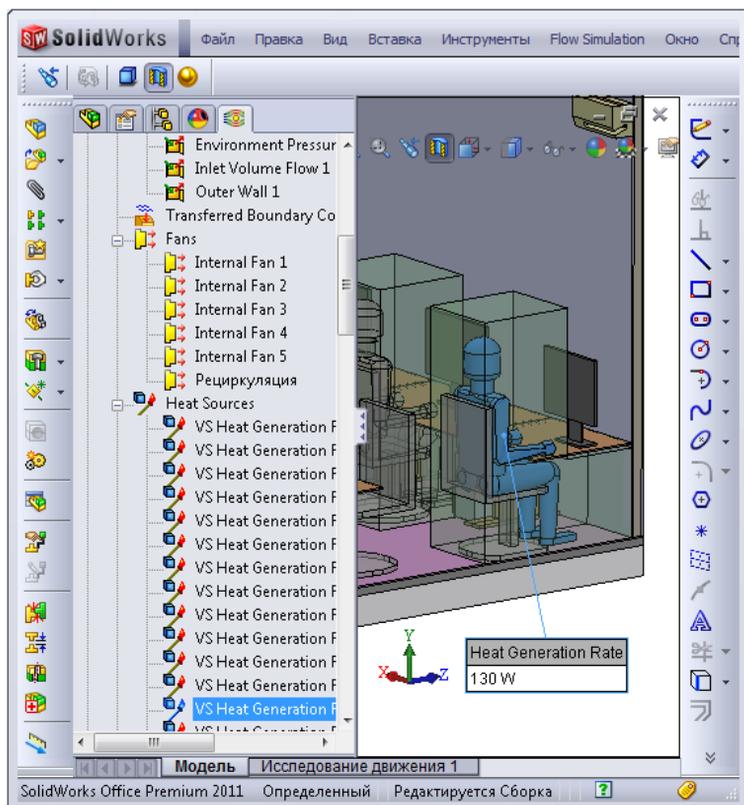


Рис. 2.274. Присвоение телу человека источника мощности

На рисунках видно, что (в геометрическом смысле) людей окружают прозрачные тела, повторяющие форму сидящего человека. Они предназначены для сбора информации о средних величинах параметров текущей среды в окрестности людей. Само собой, соответствующие тела/детали должны быть сделаны прозрачными для среды (рис. 2.275).

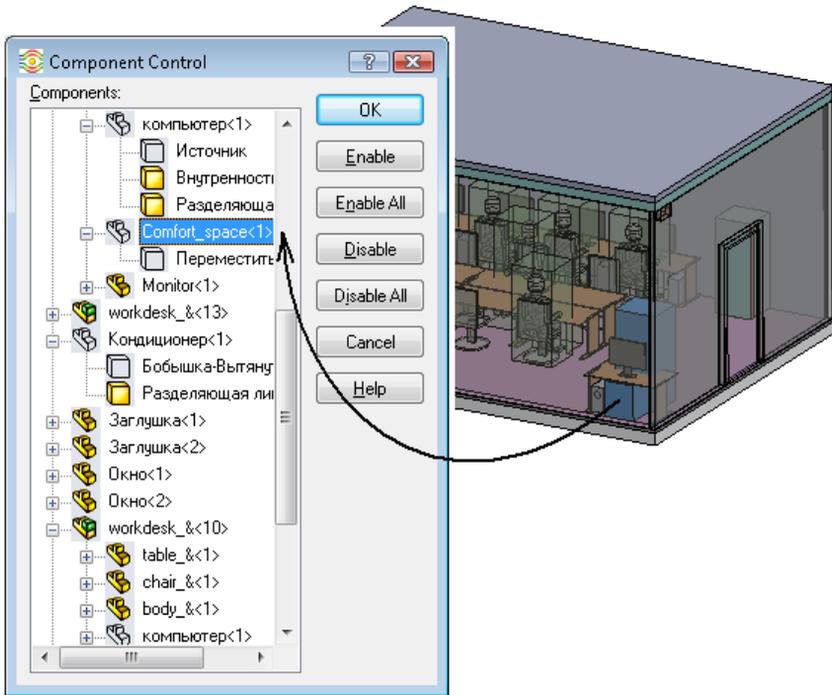


Рис. 2.275. "Отключение" тел, окружающих модель человека

Поскольку в помещение будет принудительно поступать воздух, то создаем один или несколько потенциальных выходов. В нашем случае базируем их на внутренних гранях окон, выделенных в передней и задней стенках посредством вспомогательных деталей (рис. 2.276). На них поставлено условие типа **Pressure Openings** (Отверстия с заданным давлением) в варианте **Environment Pressure** (Давление внешней среды). Оно допускает интерпретацию отверстия (как входа, так и выхода). При этом оставлена активная опция **Pressure Potential** (Давление в точке отсчета), что учитывает изменение давления в зависимости от высоты относительно точки отсчета (в нашем случае — начала системы координат) под действием силы тяжести.

Если присмотреться к рис. 2.277, то можно увидеть, что в модели допущена некоторая неточность: температура на входе/выходе назначена равной 20,05 °С, в то время как "в реальности" это 37 °С, что не повлекло ощутимых последствий, поскольку отверстия должны оказаться именно выходами.

Чтобы конкретизировать тепловые условия на границах рассматриваемой системы (рис. 2.278), учтем, что сверху, снизу, справа и сзади находятся помещения с похожими условиями эксплуатации. В первом приближении этот факт можно имитировать назначением отсутствия теплопередачи на соответствующих наружных

гранях. Следовало бы отсечь стенки вдоль их срединной поверхности (плоскости симметрии), так как наложение условия теплоизоляции соответствует наличию по другую сторону от этой грани стенки идентичной структуры. Как представляется, эта неточность не может существенно повлиять на результат.

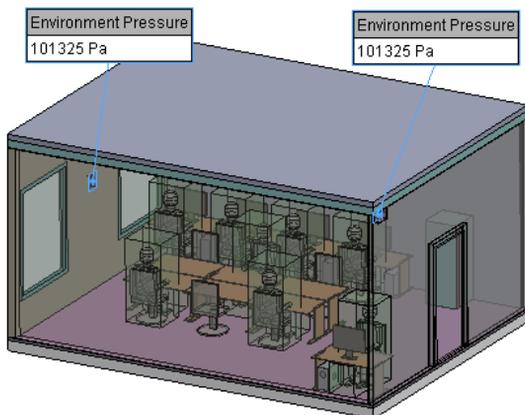


Рис. 2.276. Грани с известным давлением

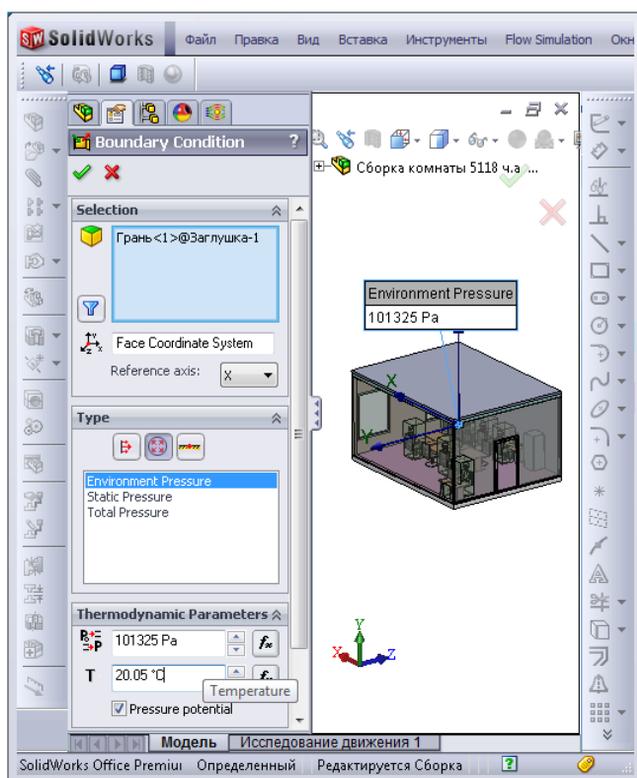


Рис. 2.277. Назначение отверстий с заданным давлением

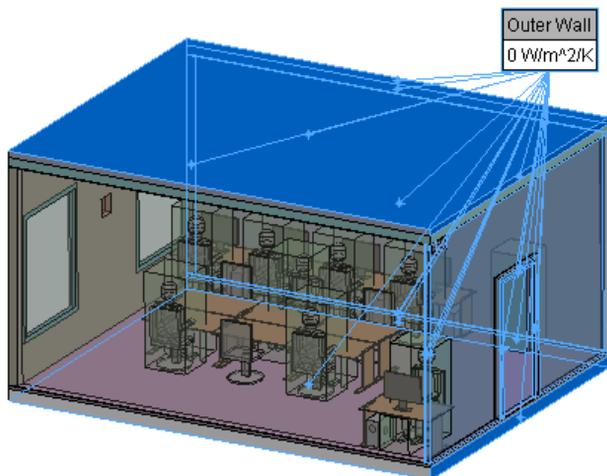


Рис. 2.278. Отсутствие теплопередачи на некоторых границах

Пользуясь наличием в модуле HVAC расширенной базы данных по строительным материалам, назначаем для столов и двери материал "плотное слоистое дерево", а для тела, обозначающего покрытие пола — "керамическую плитку" (рис. 2.279–2.282).

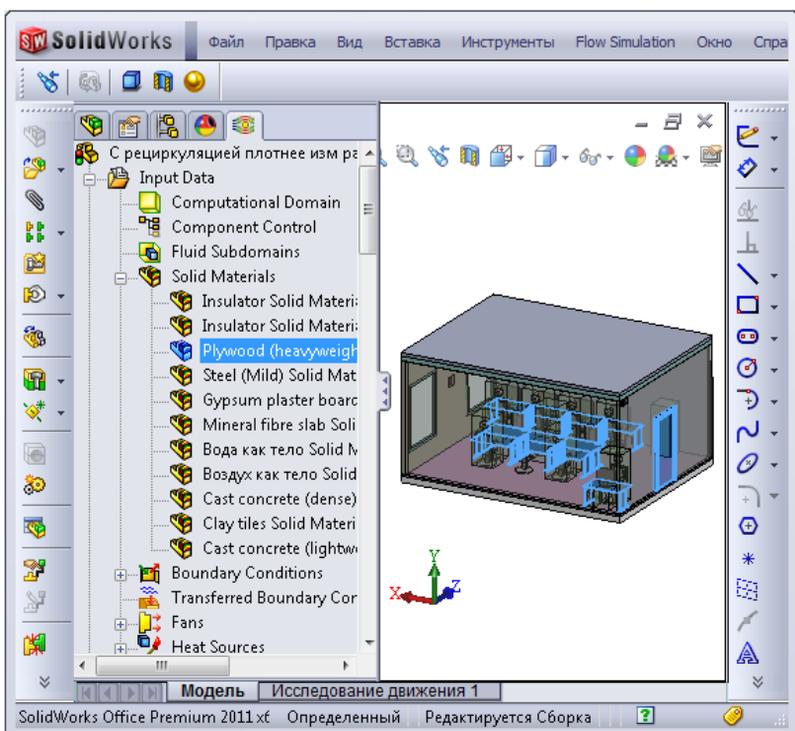


Рис. 2.279. Назначение дерева в качестве материала столов и двери

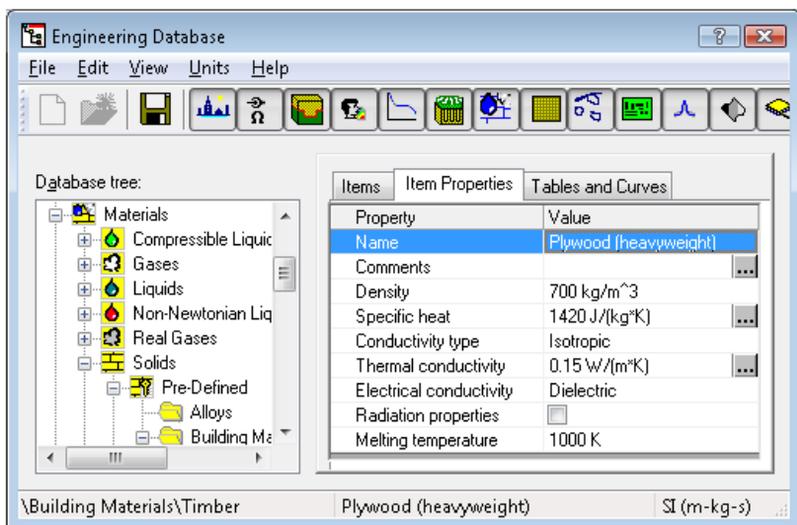


Рис. 2.280. Свойства плотного дерева из базы данных

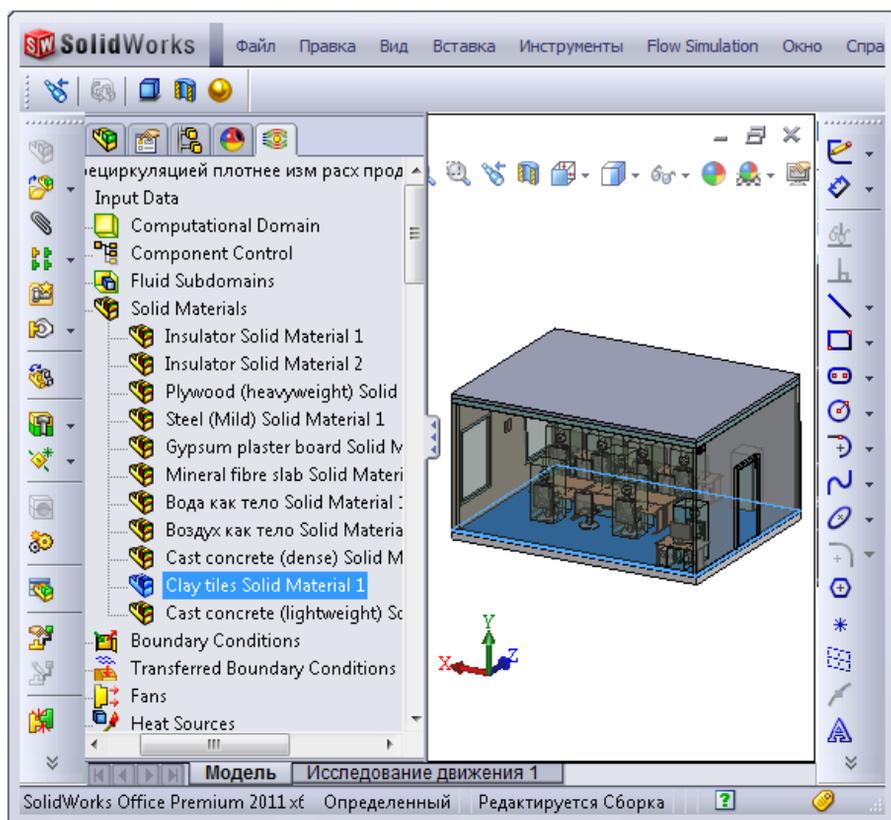


Рис. 2.281. Назначение керамической плитки в качестве материала для покрытия пола

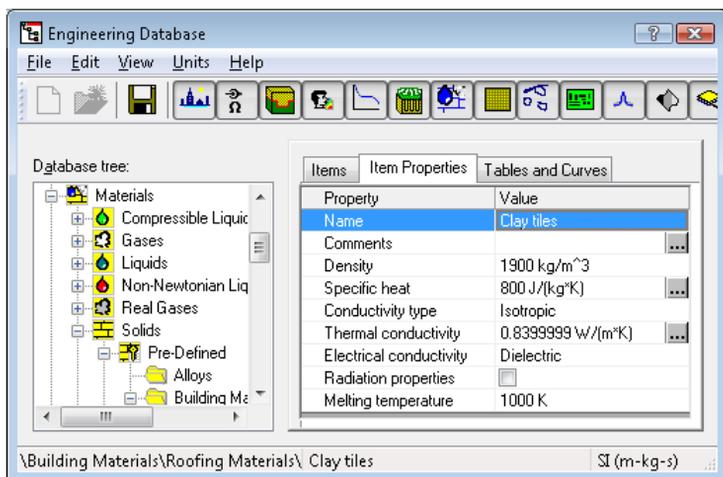


Рис. 2.282. Свойства керамической плитки из базы данных

Ранее мы определили отсутствие теплообмена на наружных стенках через излучение. Предположим, что со стороны стенки с окнами такой теплообмен возможен. Для этого следует применить условие **Radiative Surface** (Поверхность радиационного теплообмена) к соответствующим граням. Из расширенной базы данных выбираем тот тип поверхности, который соответствует окраске глянцевой темной краской (рис. 2.283).

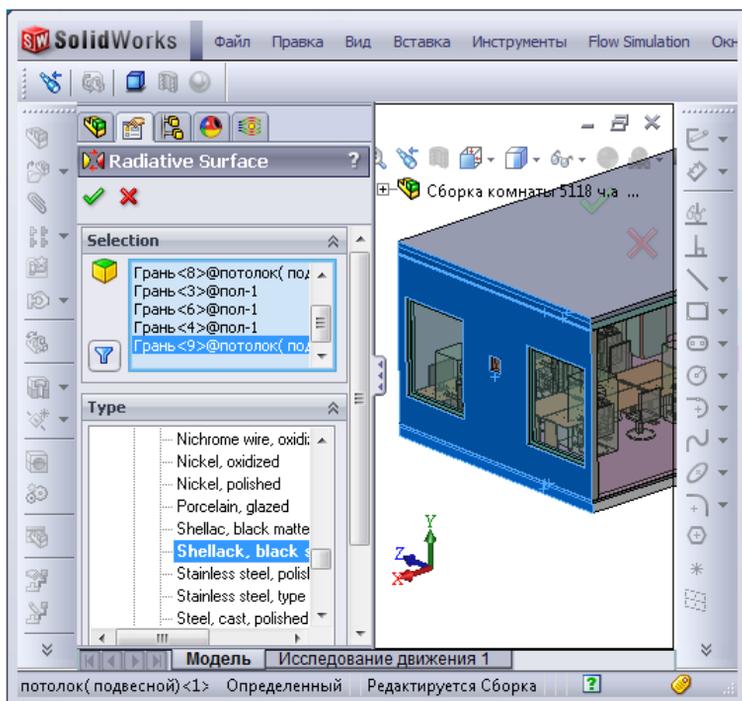


Рис. 2.283. Назначение условий теплообмена излучением

Как показала практика, сходимость задач с естественной конвекцией и вентиляторами достаточно медленная. При этом формальные критерии могут быть удовлетворены, но фактическая сходимость не достигнута. В этой связи модифицируем условия останова на вкладке **Finish** (Завершение) окна **Calculation Control Options** (Опции управления расчетом), устанавливая параметр **Finish Conditions** (Условия завершения) в положение **If all are satisfied** (Если все удовлетворены) (рис. 2.284). Затем назначаем для поля **Maximum Iterations** (Максимальное число итераций) заведомо большое значение; в нашем случае это 5000, что для используемого компьютера соответствует примерно неделе счета. В принципе, можно было бы установить и физическое время.

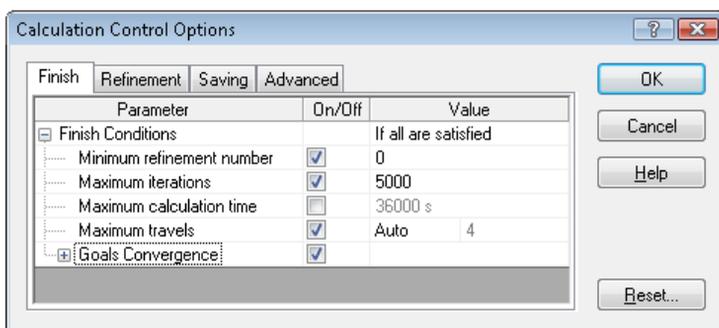


Рис. 2.284. Корректировка условий завершения процесса

Если используется конфигурация Flow Simulation с модулем Electronic Cooling, то, при необходимости, на вкладке **Advanced** (Дополнительные параметры) активируются опции **Calculate Local Mean Age** (Рассчитывать время действия воздуха) и **Calculate Comfort Parameters** (Рассчитывать параметры комфорта) (рис. 2.285).

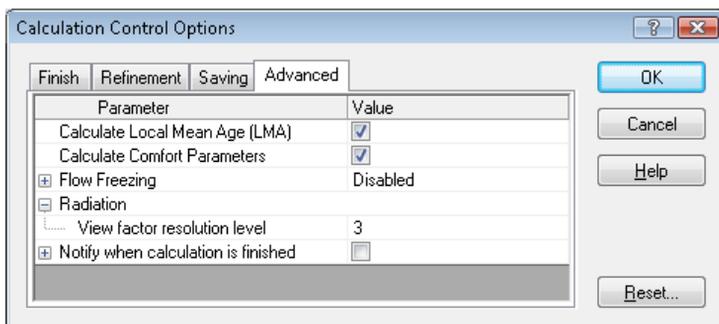


Рис. 2.285. Указание на расчет характеристик комфорта

В качестве целей используем интегральные характеристики воздуха в помещении — среднюю и максимальную скорость и температуру, минимальные средние и

максимальные температуры, вычисленные во вспомогательных объемах, окружающих людей, а также средние этих параметров по всем объемам и среднюю эффективную температуру по всем объемам (рис. 2.286).

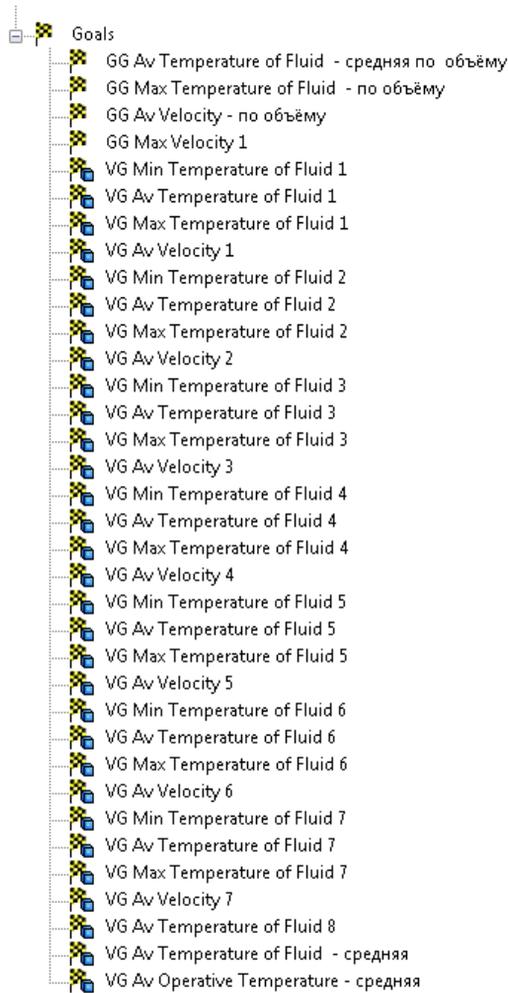


Рис. 2.286. Цели расчета

В данной задаче, как и во многих подобных, необходимо так подобрать параметры сетки, чтобы соблюдался компромисс между точностью в целом и в деталях. Предметом изучения является локальное состояние в окрестности каждого человека, которое определяется как термодинамическим состоянием помещения, так и взаимодействием потока теплого воздуха "из" компьютера с окружающими объектами, в частности человеком.

В настройках начальной сетки в окне **Initial Mesh** (Начальная сетка) снимаем флажок, соответствующий опции **Automatic settings** (Автоматические настройки) и устанавливаем число ячеек базовой сетки по координатным осям, как показано на рис. 2.287. Результат показан на рис. 2.288.

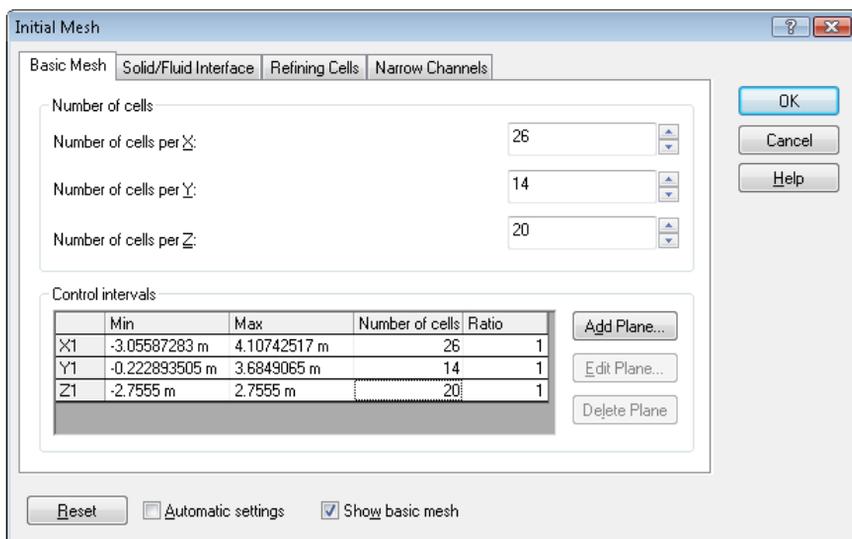


Рис. 2.287. Установки базовой сетки

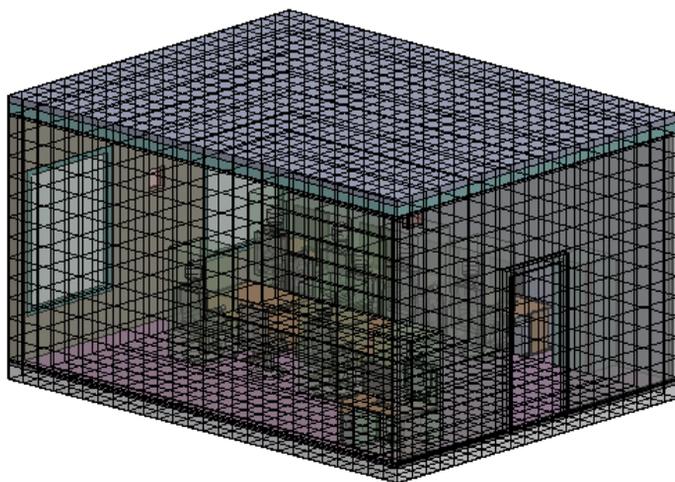


Рис. 2.288. Базовая сетка

На вкладке **Solid/Fluid Interface** (Поверхность раздела твердых тел с текучей средой) устанавливаем переключатель **Small solid feature refinement level** (Уровень разрешения сеткой мелких особенностей модели) на третий уровень. Эта настройка управляет числом дроблений базовой сетки для выступов тел, целиком принадлежащих ячейкам базовой сетки.

Схожую функциональность, учитывающую при этом размер выступов, проникающих в ячейки среды, имеет регулятор **Tolerance refinement level** (Уровень разрешения сеткой выступов поверхности) — мы для него устанавливаем уровень 4. Одновременно для критерия **Tolerance refinement criterion** (Критерий разрешения сеткой выступов

поверхности), задающего допустимую максимальную выпуклость (то есть допустимое максимальное расстояние) поверхности модели в ячейке относительно плоского многоугольника, аппроксимирующего эту поверхность в ячейке, принимаем 1 мм (рис. 2.289).

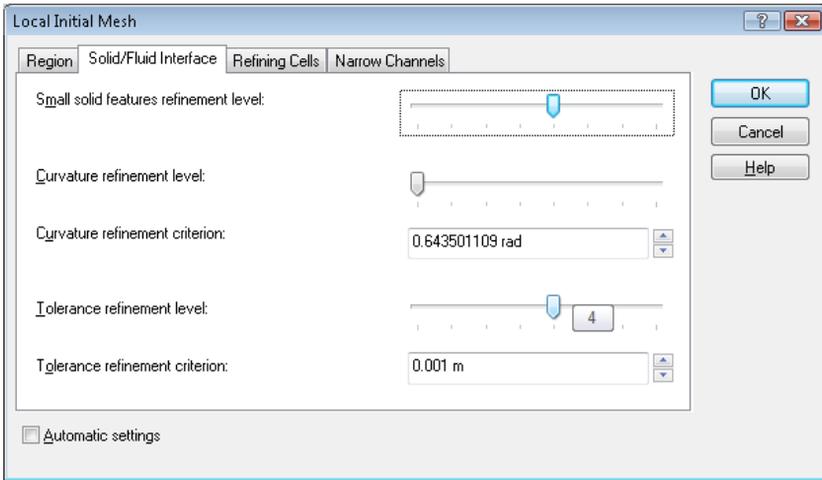


Рис. 2.289. Критерии для поверхности раздела тел и сред

Для более тщательного описания течения на границах между стенами и внутренним пространством устанавливаем для частичных ячеек уровень дробления 3 (рис. 2.290). Также на уровень 2 устанавливаем уровень дробления ячеек тел. Эти операции осуществляем на вкладке **Refining Cells** (Дробление ячеек).

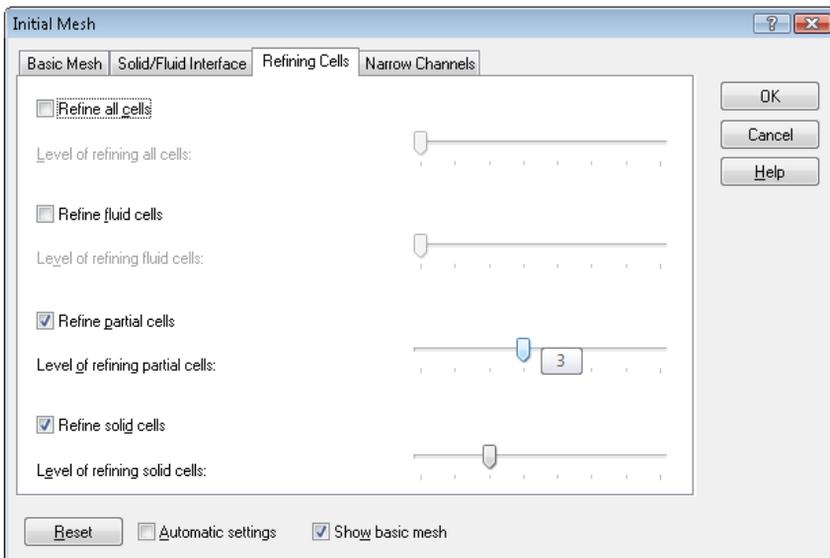


Рис. 2.290. Критерии для поверхности раздела тел и сред

Назначаем число ячеек поперек каналов 4. Однако, подозревая, что таких каналов может быть достаточно много, и требующаяся оперативная память превысит имеющиеся ресурсы (да и в целом размерность выйдет за рамки здравого смысла), назначаем на вкладке **Narrow Channels** (Узкие каналы) уровень дробления ячеек базовой сетки 2 (рис. 2.291).

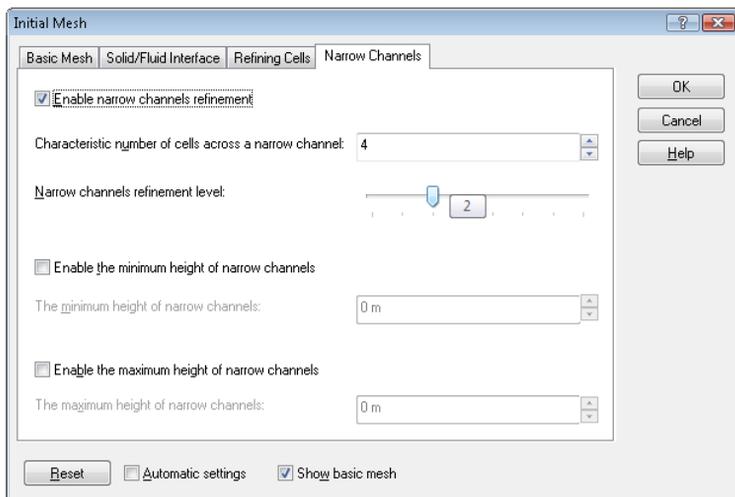


Рис. 2.291. Настройки дробления узких каналов

Для более качественного разрешения сеткой тел, обозначающих компьютеры, применяем к ним элемент управления **Local Initial Mesh** (Локальная начальная сетка), в котором увеличиваем на 1 уровень дробления твердых тел относительно настроек по умолчанию (рис. 2.292).

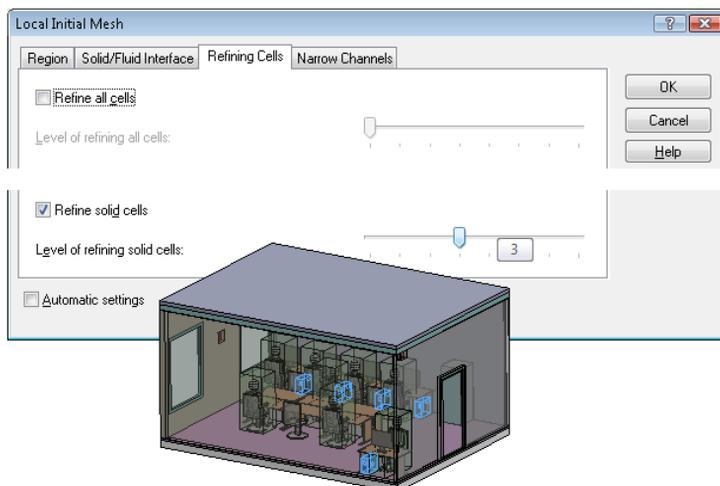


Рис. 2.292. Повышение уровня дробления сетки в компьютерах

Особое внимание следует уделить реализации сетки в канале (в геометрической модели он заполнен "прозрачным" для среды телом), где будет происходить смешивание и охлаждение воздуха, поступающего "с улицы" и захватываемого из комнаты в верхнее (условное) отверстие на кондиционере. Для этого используем инструмент **Local Initial Mesh** с настройками, показанными на рис. 2.293–2.296. Как видно, существенно уточнен критерий погрешности при захвате выступов поверхности, "в лоб", до шестого уровня, увеличено дробление всех ячеек, а также до четвертого уровня при запрошенных шести ячейках увеличена степень дробления узких каналов. В принципе, эти настройки в определенной степени перекрывают друг друга, однако когда мы имеем дело с сеткой, в значительной степени важен результат — собственно сетка, а методические вопросы имеют меньший приоритет.

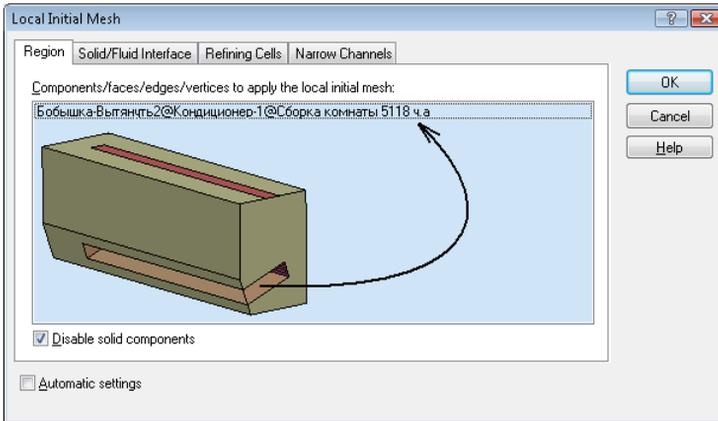


Рис. 2.293. Назначение элемента управления сеткой для условного тела

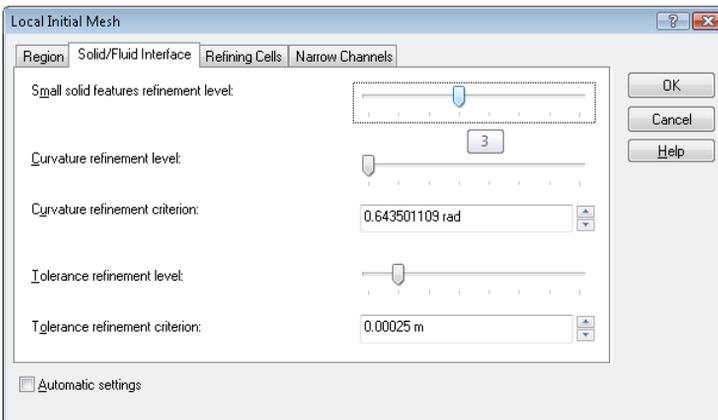


Рис. 2.294. Критерии для поверхности раздела тел и сред применительно к телу в канале

Поскольку — относительно масштабов помещения — геометрическая структура на "выходе" из кондиционера достаточно "тонкая", то желательно гарантировать ее качественное разрешение сеткой. Для этого к "решетке" из граней применяем элемент управ-

ления сеткой (рис. 2.297) с настройками, показанными на рис. 2.298, 2.299. Как видно, до 4 повышен уровень дробления сетки для поверхности раздела тел и сред, и до максимального значения (7) повышен запрос на дробление всех ячеек, пересекаемых соответствующими гранями.

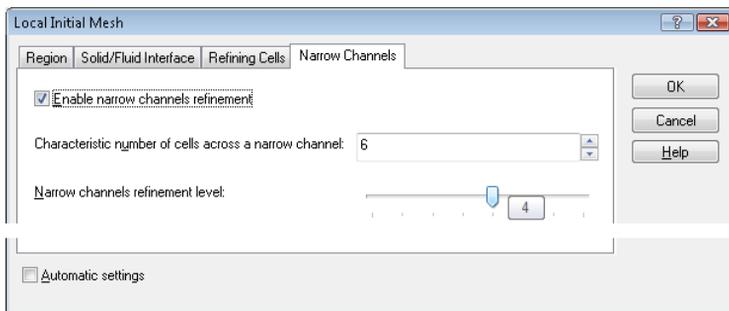


Рис. 2.295. Повышение уровня дробления всех ячеек в канале

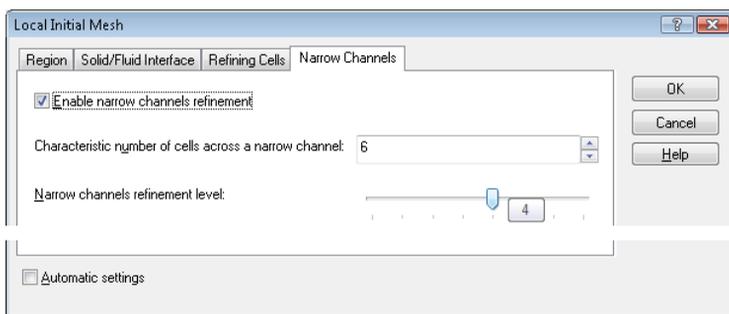


Рис. 2.296. Повышение уровня дробления ячеек в канале по критерию для "узких каналов"

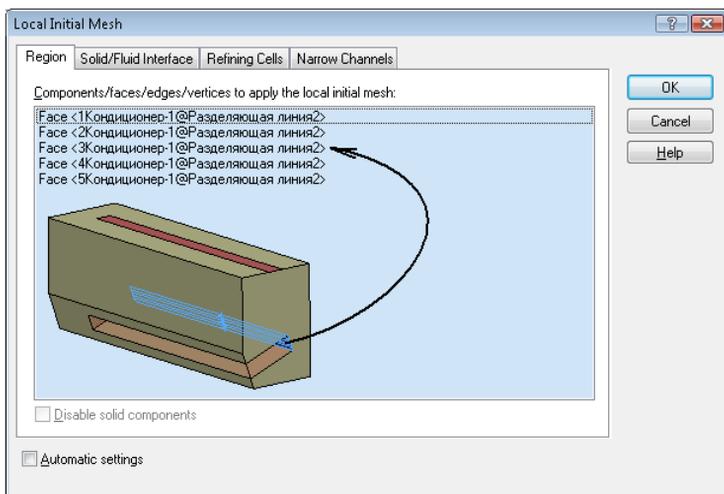


Рис. 2.297. Назначение элемента управления сеткой для граней с поступлением воздуха

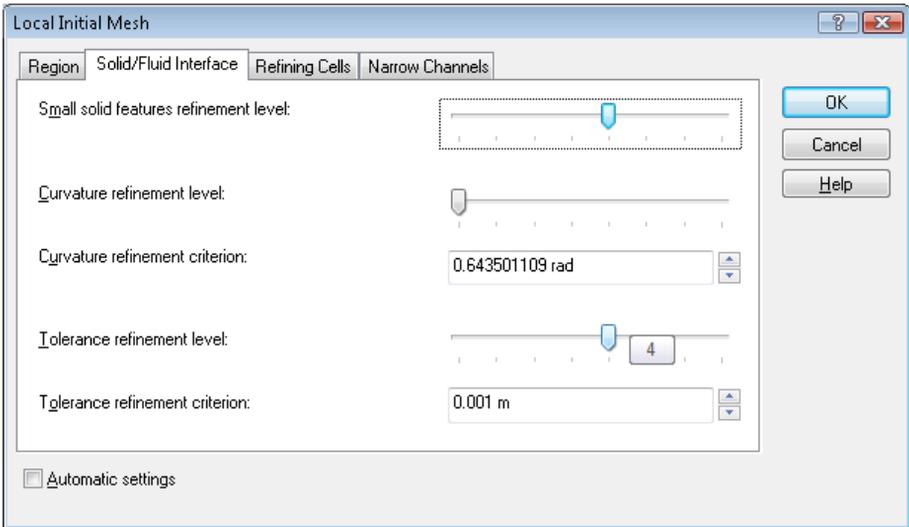


Рис. 2.298. Критерии для поверхности раздела тел и сред применительно к граням с поступлением воздуха

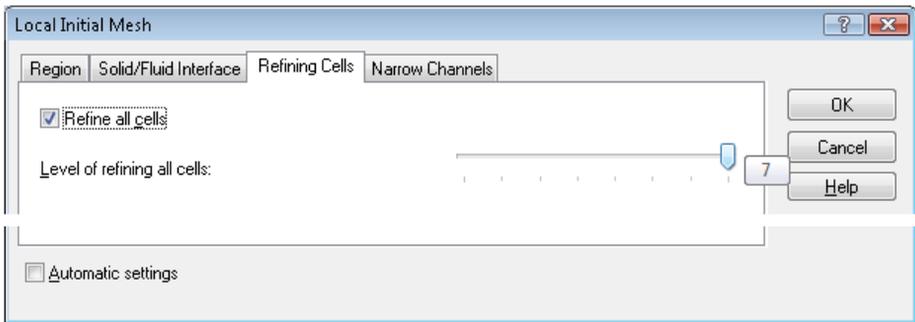


Рис. 2.299. Повышение уровня дробления всех ячеек на гранях с поступлением воздуха

2.5.3. Результаты и их интерпретация

Окно **Results Summary** (Сводный отчет по результатам) показано на рис. 2.300. Общее число ячеек около 800 тыс. При этом время счета составило 134 часа. Однако время или число итераций само по себе не есть показатель "плохих" или "хороших" результатов — оценки могут быть расставлены только в совокупности с анализом результатов процесса, в частности кривых сходимости. Соответствующая информация будет приведена далее.

Сетка в поперечном сечении показана на рис. 2.301, а ее увеличенные фрагменты в зоне угла и в зоне кондиционера — на рис. 2.302, 2.303. Видно, что поперек канала расположено около десяти (полных или частичных) ячеек, а каждую из пяти "полосок", через которые в помещение поступает воздух, описывает две ячейки. Как показали

пробные расчеты, если по сечению приходится, допустим, порядка пяти ячеек, а на "полоску", соответственно, одна, то сходимость становится неудовлетворительной — на графиках целей наблюдаются пульсации большого размаха.

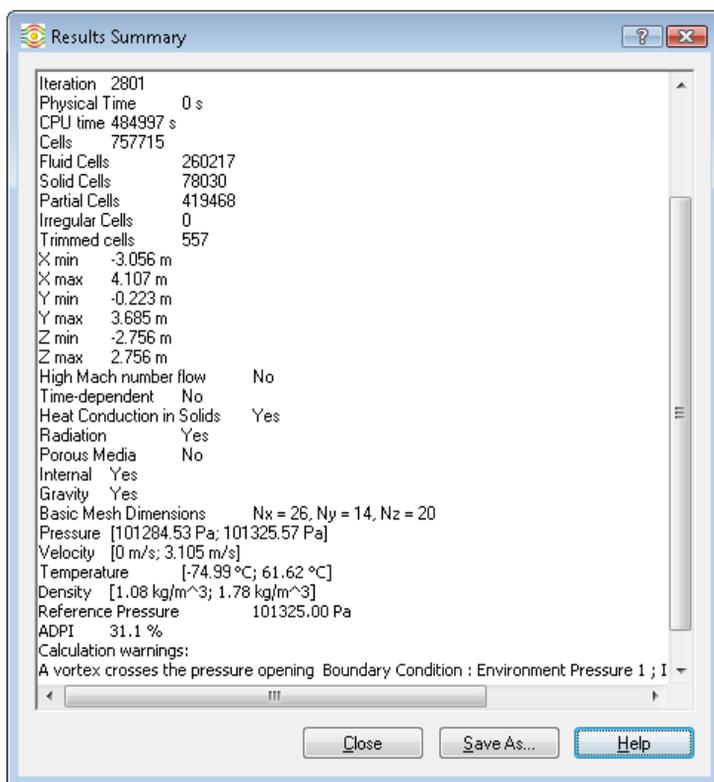


Рис. 2.300. Сводный отчет по результатам

В число "отчетных" параметров вошла характеристика ADPI (Air Diffusion Performance Index) — коэффициент воздушной диффузии. Физический смысл этого понятия будет разъяснен далее в совокупности с другими характеристиками, относящимися к HVAC.

Также из иллюстраций с сеткой и рис. 2.304, где сетка показана в продольном сечении, можно убедиться, что по толщине стены (в данном случае аппроксимированной одним телом) располагается не менее четырех ячеек. Сопоставляя этот факт с оценкой плотности сетки в текучей среде, можно заключить, что аппроксимация стен вполне достаточна для описания имеющих место тепловых эффектов.

Из окна со сводным отчетом следует, что в сетке присутствуют **Trimmed Cells** (Обрезанные ячейки). Они появляются в ситуации, когда генератор сетки не в состоянии описать сеткой выступы модели, целиком проникающие в ячейки базовой сетки и ограниченные единственной ячейкой. Это может произойти из-за сложности геометрии при малой величине настройки **Small solid feature refinement level** (Уровень разрешения сеткой мелких особенностей модели). В подобной ситуации алгоритм отсекает подобные выступы, заполняя полученное пространство текучей средой.

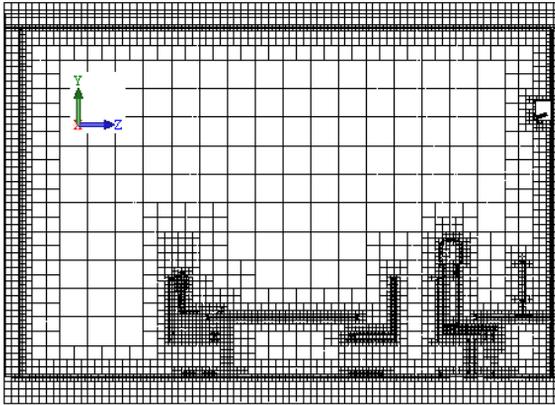


Рис. 2.301. Сетка в поперечном сечении

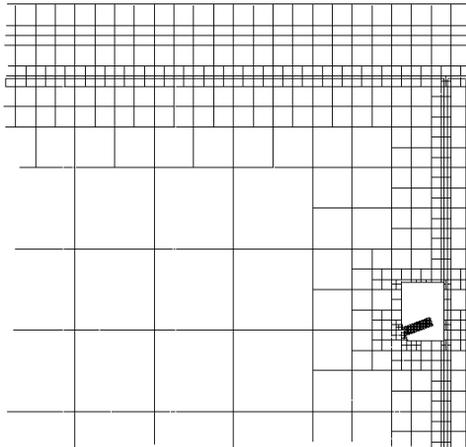


Рис. 2.302. Фрагмент сетки в поперечном сечении в зоне угла

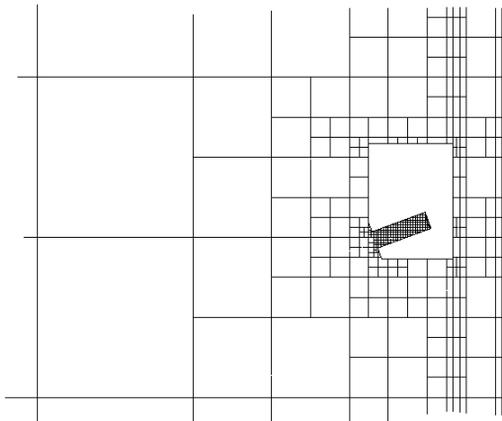


Рис. 2.303. Фрагмент сетки в поперечном сечении в зоне кондиционера

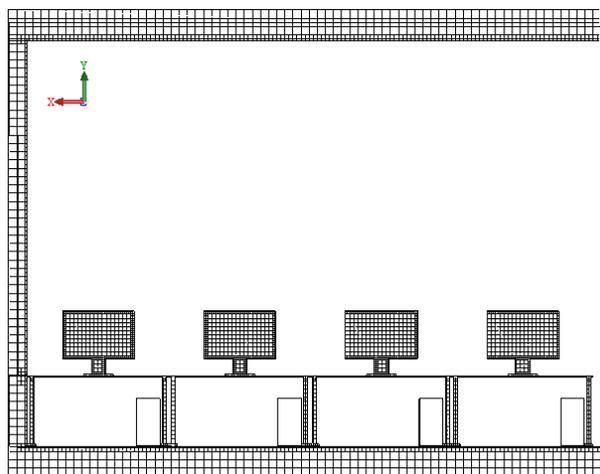


Рис. 2.304. Сетка в продольном сечении в телах

Отобразить ячейки можно посредством команды **Mesh 3D View** (Трёхмерный вид сетки), настройки окна которой (для отображения обрезанных ячеек) показаны на рис. 2.305. Результат операции приведен на рис. 2.306. Дефекты локализируются в конкретных зонах на модели человека. Применительно к данной задаче наиболее эффективным, вероятно, было бы не уплотнять сетку, а попытаться модифицировать геометрию в проблемных зонах. Это оправдано тем, что модель человека в значительной степени условная, и установить сам факт таких изменений достаточно затруднительно.

Кстати говоря, посредством команды **Mesh 3D View** можно отобразить и менее приятную сущность **Irregular Cells** (Иррегулярные ячейки), когда система не может разделить ячейку или изменить геометрию так, чтобы однозначно интерпретировать объем (объемы) как тело или среду. Такие ячейки базовой сетки исключаются из анализа.

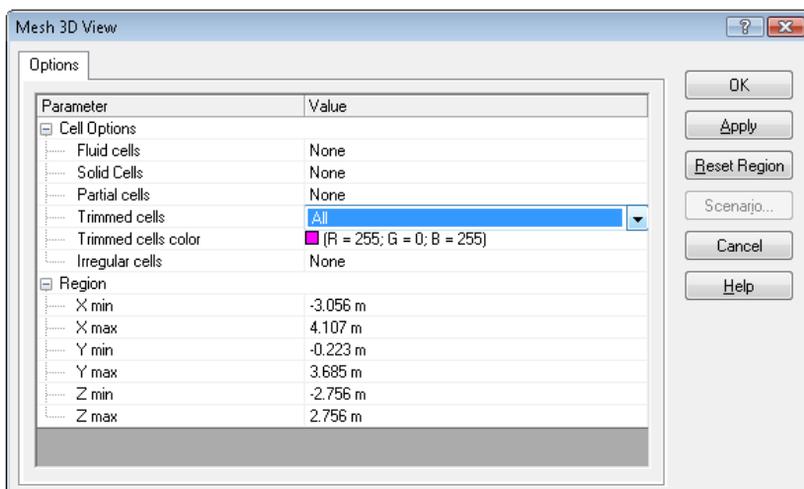


Рис. 2.305. Подготовка к визуализации обрезанных ячеек

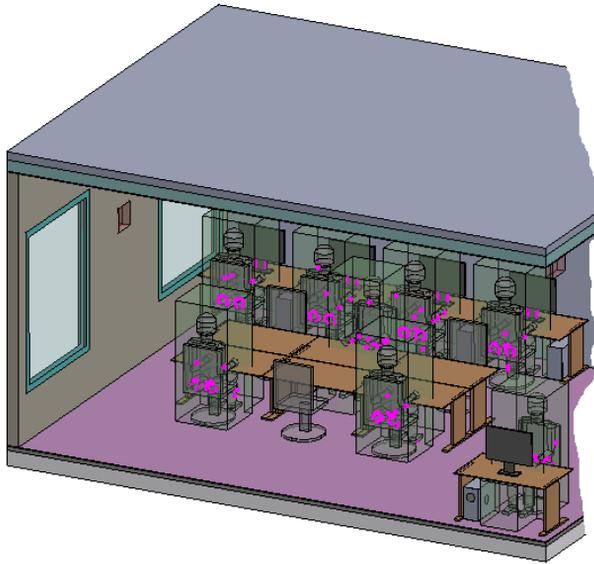


Рис. 2.306. Обрезанные ячейки

Кривые сходимости целей (средней по помещению температуры воздуха и средних температур по объемам, окружающим людей) показаны на рис. 2.307, а значения характеристик — на рис. 2.308. Потребовалось более 10–12 продувок (travels), чтобы достичь сходимости. Интересно, что "уверенная" сходимость по скоростям наступила (рис. 2.309) примерно после третьей продувки. Данный факт лишний раз аргументирует, что для подобных задач следует использовать именно "ручные" (субъективные) критерии сходимости.

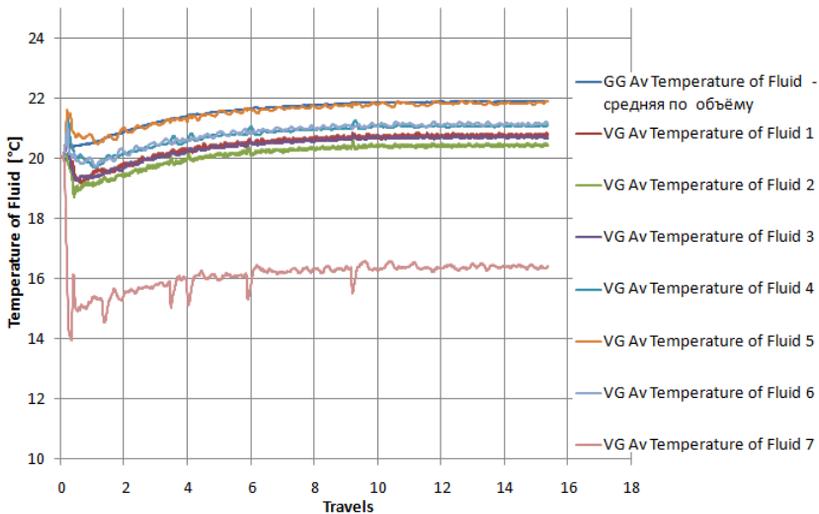


Рис. 2.307. Кривые сходимости целей — средней по объему температуры воздуха и средних температур

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value
GG Av Temperature of Fluid - средняя	[°C]	21,89836971	21,89952791
VG Av Temperature of Fluid 1	[°C]	20,83964289	20,75694167
VG Av Temperature of Fluid 2	[°C]	20,43275648	20,44611699
VG Av Temperature of Fluid 3	[°C]	20,89297109	20,71255312
VG Av Temperature of Fluid 4	[°C]	21,09388096	21,07984889
VG Av Temperature of Fluid 5	[°C]	21,90539587	21,85116546
VG Av Temperature of Fluid 6	[°C]	21,19359786	21,16255784
VG Av Temperature of Fluid 7	[°C]	16,42109582	16,37937777

Рис. 2.308. Состояние целей — температур в момент остановки расчета

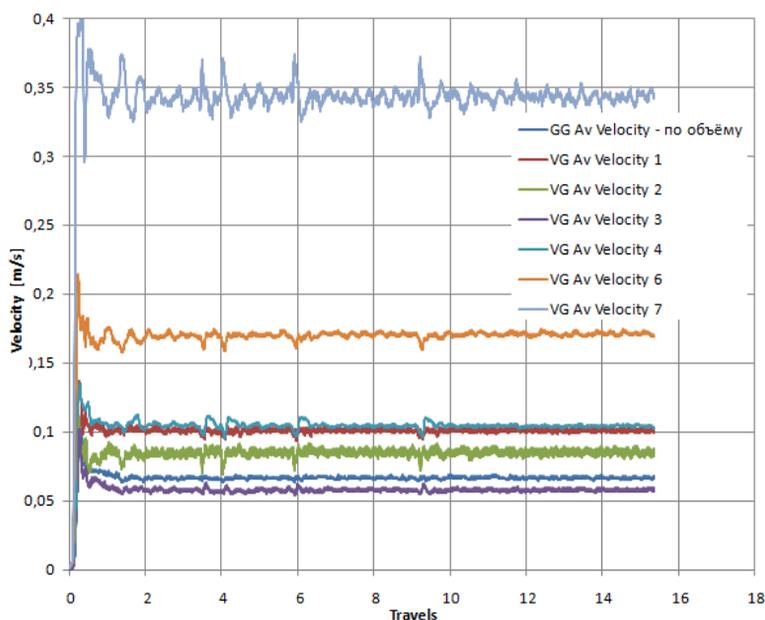


Рис. 2.309. Кривые сходимости целей — средней по объему скорости и средних скоростей

Средняя скорость в окрестности человека, сидящего возле кондиционера, составляет 0,34 м/с, а средняя температура воздуха — около 16 °С. Средняя же температура воздуха (22 °С) близка к комфортной. Средняя по объему скорость воздуха составляет около 0,06 м/с, что, как правило, меньше средних скоростей в окрестности персонала.

Диаграмма скорости и линии тока для сечения, проходящего через кондиционер и тело человека, сидящего под ним, показаны на рис. 2.310, 2.311. Для повышения "контрастности" верхняя граница шкалы была опущена до 1 м/с. Очевидно, что под кондиционером существует исключительно некомфортная зона, как из-за большой скорости, так и из-за низкой температуры. Если обратить внимание также на сечение диаграммы температуры, можно увидеть, что между спинками стульев, а также между телом человека и столом создались своего рода каналы, через которые происходит интенсивное течение.

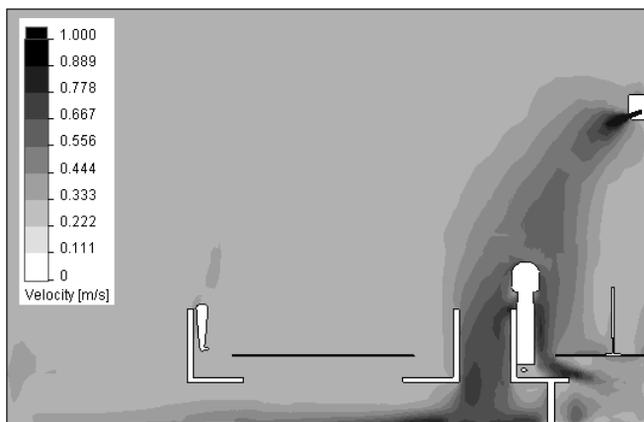


Рис. 2.310. Диаграмма скорости в сечении, проходящем через кондиционер

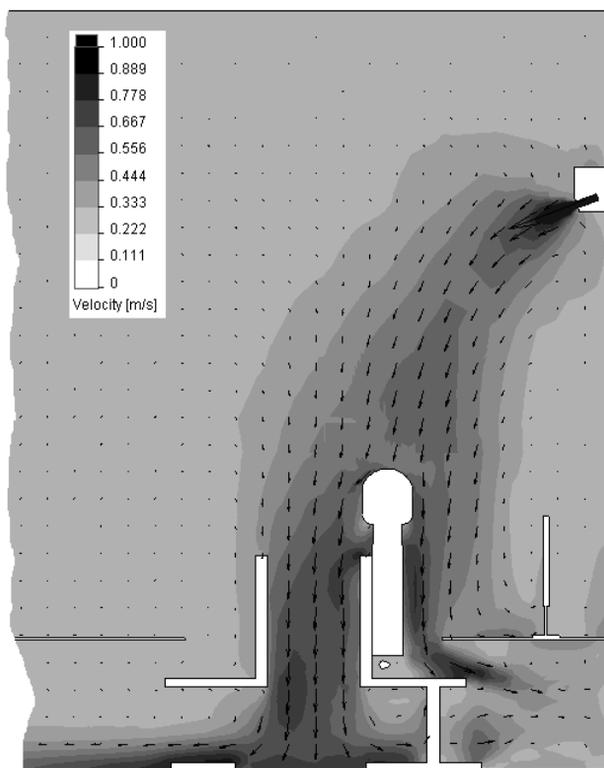


Рис. 2.311. Фрагмент диаграммы скорости в сечении, проходящем через кондиционер, с линиями тока

Границы шкалы на диаграмме температуры (рис. 2.312) были адаптированы так, чтобы получить наиболее информативную картину. Следует отметить, что темпе-

ратура внутри тела человека превышает $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, что обусловлено как неучетом движения жидкостей в теле, так и отсутствием отдачи тепла через пот и дыхание.

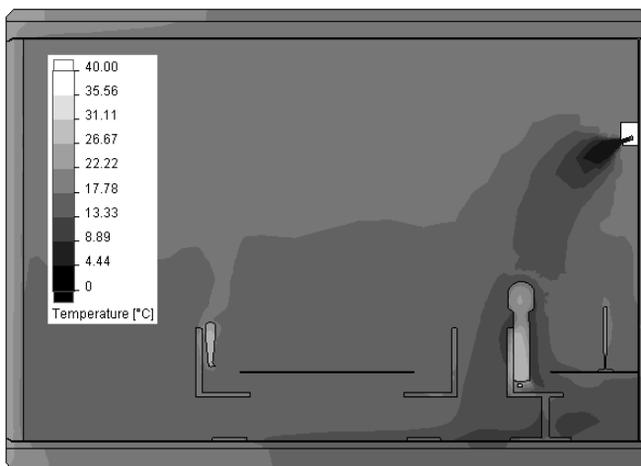


Рис. 2.312. Диаграмма температуры в сечении, проходящем через кондиционер

Если рассмотреть поле температур (в частности сечение, проходящее через системный блок у левой стены) более тщательно, то можно увидеть, что градиент температуры в стене отслеживается достаточно подробно. На рис. 2.313 видно, как действует теплая струя воздуха, "выходящая" из системного блока. Она нагревает боковую стену (которая, кстати, подвергается и действию нагретого внешнего воздуха), столешницу, образуя под столом своеобразную теплую нишу. Полезно было бы отодвинуть стол от стены, чтобы уменьшить нежелательную тепловую нагрузку на пространство под столом. Также, несмотря на незначительную мощность, приходящуюся на днище системного блока, он прогревает и участок пола под ним.

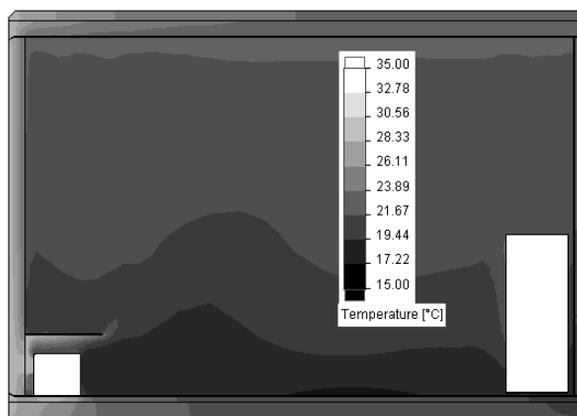


Рис. 2.313. Диаграмма температуры в сечении, проходящем через компьютер у левой стенки

Обращает внимание значительный температурный градиент воздуха в вертикальном направлении. Чтобы получить соответствующий график, строим эскиз (плоский или пространственный), содержащий линию, которая станет "абсциссой". Затем, используя процедуру **XY Plot** (График), получаем на базе этого эскиза результат в виде кривой зависимости характеристики (в данном случае температуры) от параметрического расстояния вдоль линии эскиза (рис. 2.314). Результат показан на рис. 2.315. Следует учесть, что график начинается от точки снаружи плиты потолка, а заканчивается в точке под плитой пола. Разница температуры воздуха между полом и потолком составляет около 7 °С. Для небольшого помещения это достаточно большая величина. Она является вполне достоверной, поскольку помещение моделируется достаточно подробно, включая принудительное движение воздуха под действием вентиляторов компьютеров.

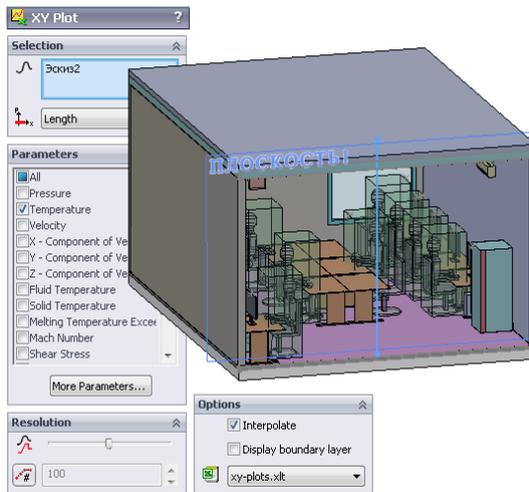


Рис. 2.314. Построение графика зависимости температуры от расстояния вдоль линии на эскизе, проходящем от низа плиты пола до верха плиты потолка

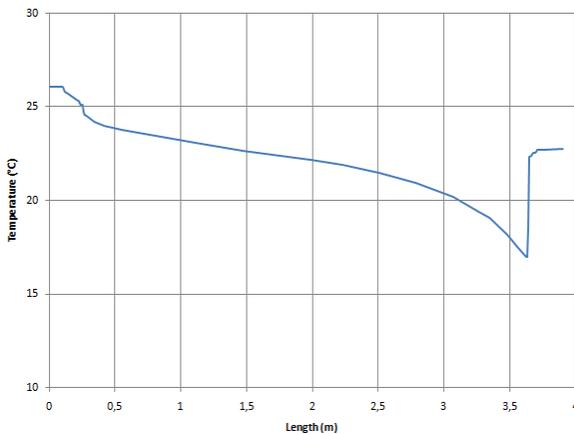


Рис. 2.315. Изменение температуры по высоте модели

Модуль HVAC Flow Simulation обладает функциональностью, позволяющей прогнозировать параметры теплового самоощущения, степень дискомфорта людей, подвергнутых действию окружающей среды, и оценить качество воздуха посредством соответствующих критериев. Эти инструменты используются при проектировании обитаемых кондиционируемых помещений и работоспособны, только если текущей средой является воздух.

Flow Simulation рассчитывает следующие параметры:

- Predicted Mean Vote (PMV) — средняя прогнозируемая оценка;
- Predicted Percent Dissatisfied (PPD) — допустимый процент неудовлетворенных (качеством воздуха);
- Operative Temperature — рабочая температура;
- Mean Radiant Temperature (MRT) — среднерадиационная температура;
- Effective Draft Temperature — действующая температура сквозняка;
- Air Diffusion Performance Index (ADPI) — коэффициент воздушной диффузии;
- Contaminant Removal Effectiveness (CRE) — эффективность удаления загрязнений;
- Local Air Quality Index (LAQI) — местное качество воздуха;
- Flow Angle — угол прохождения потока;
- LACI (Local Air Change Index) — коэффициент локального воздухообмена.

Большинство из этих параметров рассчитывается с учетом некоторых характеристик системы, которые определяются в окне **Default Reference Parameters** (Характерные параметры по умолчанию) (рис. 2.316):

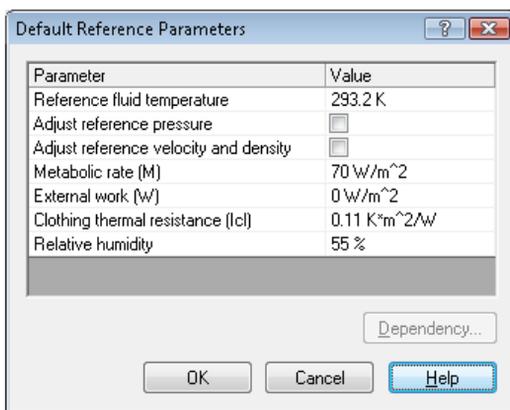


Рис. 2.316. Характерные параметры по умолчанию

- Metabolic rate (M)** — интенсивность превращения энергии химических реакций в теплоту и механическую энергию посредством метаболизма в человеческом теле;
- External work (W)** — фактическая механическая мощность, производимая индивидуумом;

- ❑ **Clothing thermal resistance (Icl)** — тепловое сопротивление, создаваемое одеждой;
- ❑ **Relative humidity** — относительная влажность.

Физический смысл понятий, описывающих тепловое состояние с точки зрения человека, разъяснен в *приложении 2*.

Чтобы ощутить разницу между различными представлениями температуры во Flow Simulation, рассмотрим три иллюстрации — сечения соответствующих функций вертикальной продольной плоскостью. На рис. 2.317 показано поле "просто" температуры; на 2.318 — среднерадационной (в отечественной терминологии — радиационно-эквивалентно-эффективной) температуры (Mean Radiant Temperature); на 2.319 — рабочей (Operative Temperature) температуры.

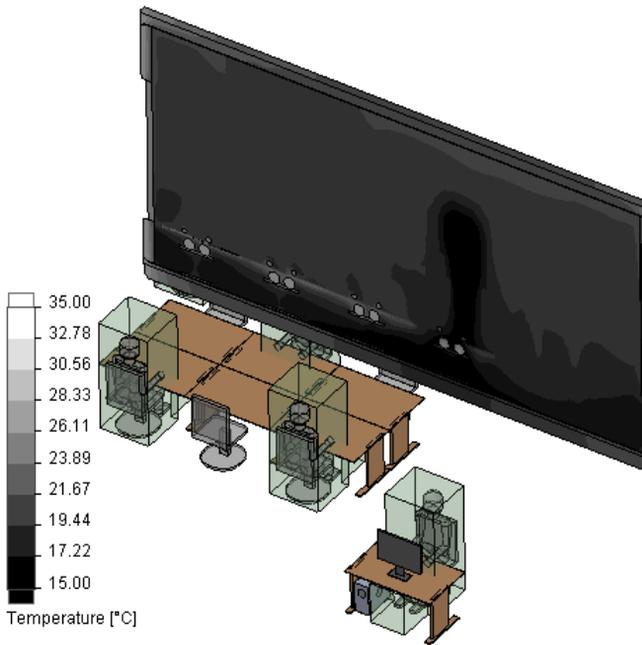


Рис. 2.317. Температура в продольном вертикальном сечении

Человеческое самоощущение определяется тепловым балансом в его теле. Этот баланс определяется физической активностью, одеждой, а также параметрами окружающей среды: температурой воздуха T_a , среднерадационной температурой T_r , относительной скоростью воздуха v и влажностью воздуха. Если эти параметры стали известны в результате расчета, то тепловое самоощущение человека может быть описано (спрогнозировано) посредством понятия Predicted Mean Vote (Средняя прогнозируемая оценка). Это целое число, которое предсказывает, как распределятся голоса значительной группы людей (табл. 2.1). Тепловой баланс достигается, если внутренняя тепловая энергия в теле равна выделению тепла в окружающую среду.

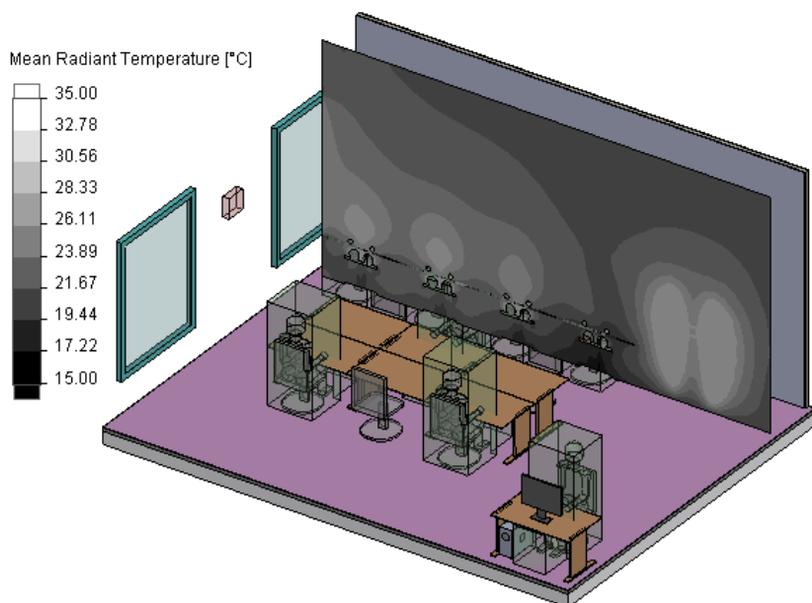


Рис. 2.318. Среднерадиационная температура

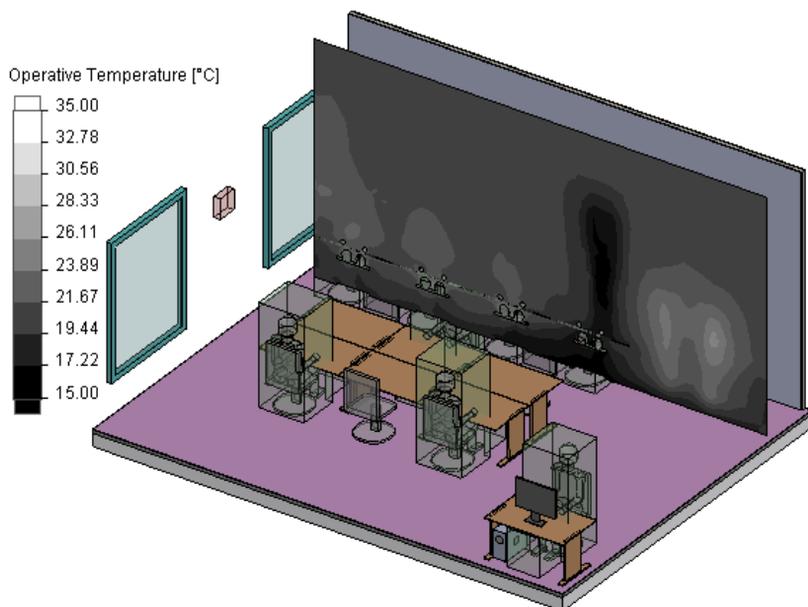


Рис. 2.319. Рабочая температура

В умеренной климатической среде система терморегуляции организма естественным образом изменяет температуру кожи и потовыделение, чтобы соблюсти тепловой баланс.

Таблица 2.1. Шкала оценок PMV

Холодно	Прохладно	Слегка прохладно	Нейтрально	Слегка тепло	Тепло	Жарко
-3	-2	-1	0	+1	+2	+3

Функция Predicted Mean Vote (PMV) (Средняя прогнозируемая оценка) показана на рис. 2.320. Как видно, минимальное значение находится за пределами тарированной шкалы, то есть состояние "хуже", чем "очень холодно". Также из диаграммы следует, что "теплой" является зона возле головы. Здесь следует иметь в виду, что мы имеем дело с взаимовлияющими сущностями: человек изменяет состояние воздуха возле себя, поэтому спланировать (достоверно) комфортную зону в малых помещениях можно только с учетом наличия людей в контексте этого помещения.

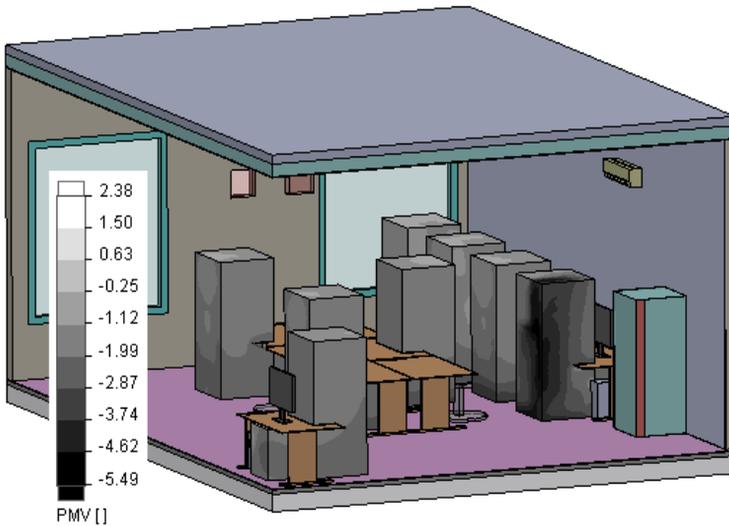


Рис. 2.320. Распределение средней прогнозируемой оценки

Прогнозируемый процент неудовлетворенных характеризует долю людей, испытывающих дискомфорт в данной окружающей среде. Данная характеристика имеет вероятностный характер (может принимать значения от 5 до 99,(9)%) и рассчитывается по формуле:

$$PPD = 100 - 95e^{(-0,03353 PMV^4 - 0,2179 PMV^2)}$$

График зависимости процента неудовлетворенных от средней прогнозируемой оценки показан на рис. 2.321. Как видно, мы имеем дело с симметричным статистическим распределением, имеющим минимум (5% неудовлетворенных) при нейтральной оценке.

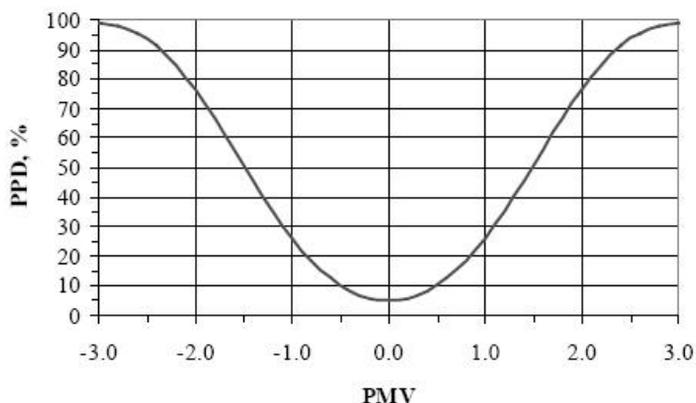


Рис. 2.321. График зависимости процента неудовлетворенных от средней прогнозируемой оценки

На рис. 2.322 показано распределение допустимого процента неудовлетворенных климатическими параметрами среды **Predicted Percent Dissatisfied (PPD)** на гранях характерных объектов модели. Наибольший интерес представляет состояние граней вспомогательных тел, охватывающих людей. Как видно, дискомфортной является область под кондиционером. Другие рабочие места создают проблемы для ступней ног, поскольку они находятся в интенсивном воздушном потоке с низкой температурой. Также не рекомендуется держать лицо близко к монитору и находиться возле передних углов холодильника, здесь источником дискомфорта является тепловое излучение.

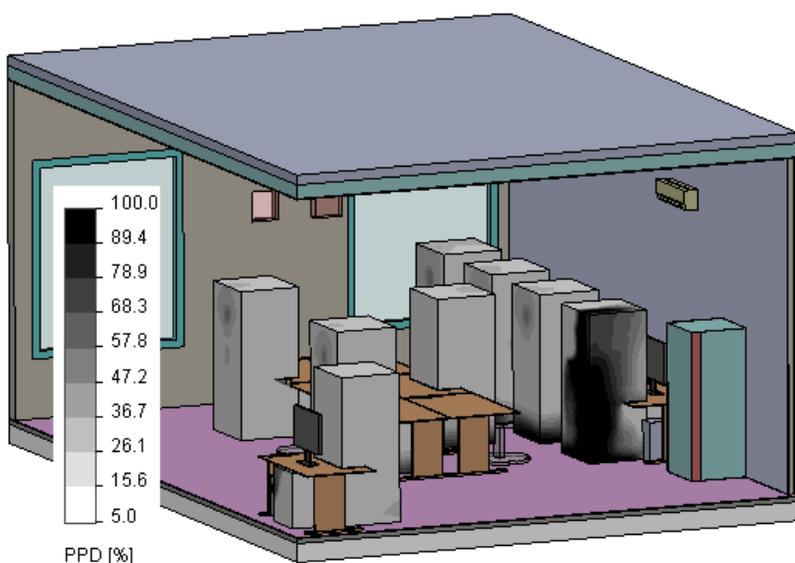


Рис. 2.322. Прогнозируемый процент неудовлетворенных

Действующая температура сквозняка EDT (Effective Draft Temperature) является мерой различия температуры между местным и средним ее значениями с учетом движения воздуха при условии, что влажность и излучение постоянны в рассматриваемом объеме. Исследования показывают, что большинство людей в сидячем положении ощущает себя комфортно, если EDT находится в интервале от $-1,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. На рис. 2.323 показано распределение температуры сквозняка во вспомогательных объемах. Как видно, локальные значения этой функции (именно они отображены на условных границах) существенно отличаются от комфортных. В частности существенно превышена температура сквозняка под столами.

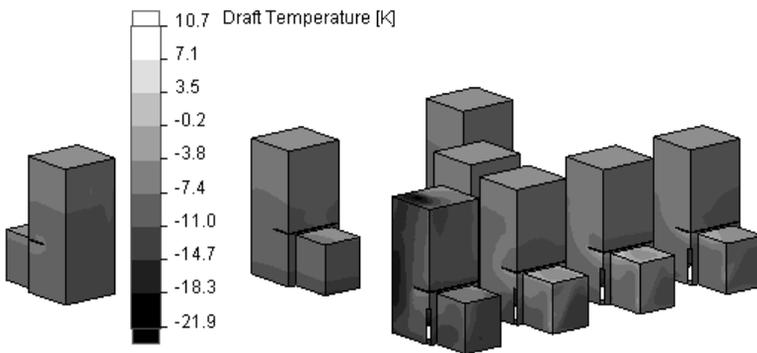


Рис. 2.323. Температура сквозняка

Коэффициент воздушной диффузии ADPI (Air Diffusion Performance Index) есть доля пространства, в которой скорость течения воздуха меньше, чем $0,35\text{ м/с}$, и температура сквозняка находится в интервале от $-1,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Следует учитывать, что понятие "пространство" здесь соответствует назначенному объему в окне **Volume Parameters** (Параметры в объеме), как показано на рис. 2.324 для состояния одного из условных объемов. В противном случае расчет ведется относительно всего объема текучей среды (в полости, находящейся в расчетном домене).

На рис. 2.325 показано распределение характеристики LACI (Local Air Change Index) (Показатель локального воздухообмена) на фоне пространственных линий тока. LACI характеризует отношение некоторого объема к объемному расходу воздуха, проходящему через этот объем. Здесь под движением воздуха понимается как собственно его перемещение "вместе" с потоком, так и составляющая, обусловленная диффузией.

Содержательную информацию несут и собственно линии тока. Как видно, холодный воздух из кондиционера, достигнув пола, разделяется на два потока. Один направляется к передней стене, попутно ветвясь на составляющие, которые нагреваются при взаимодействии с людьми и компьютерами у правой стенки и поднимаются к рециркуляционному входу в кондиционер. Часть этого потока достигает передней (нагретой) стенки, после чего, также нагревшись, поднимается и направляется к кондиционеру. Второй интенсивный поток от кондиционера следует к зад-

ней стенке в сторону двери, после чего, постепенно нагреваясь, организует вихревую структуру.

ПРИМЕЧАНИЕ

Flow Angle (Угол прохождения потока) — это опция, позволяющая оценить характеристики ламинарного (однонаправленного) течения в виде углов относительно осей (назначаемой пользователем системы координат).

Local Parameter	Minimum	Maximum	Average	Bulk Average	Vol	Integral Parameter	Value
Velocity [m/s]	9.668e-05	0.570	0.099	0.099	0.0	ADPI [%]	36.5
Fluid Temperature [°C]	18.02	53.34	20.82	20.80	0.0		
Mean Radiant Temperature [°C]	20.77	52.49	28.61	28.60	0.0		
Operative Temperature [°C]	19.64	52.75	24.92	24.91	0.0		
PPD [%]	5.0	100.0	12.7	12.7	0.0		
Draft Temperature [K]	-2.8	33.5	0.4	0.4	0.0		
Flow Angle (X) [°]	9.227e-04	178.139	78.284	78.150	0.0		
Flow Angle (Y) [°]	0.017	173.488	79.410	79.501	0.0		
Flow Angle (Z) [°]	0.868	179.540	97.101	97.289	0.0		

Рис. 2.324. Интегральные характеристики, в том числе и ADPI, в одном из условных объемов

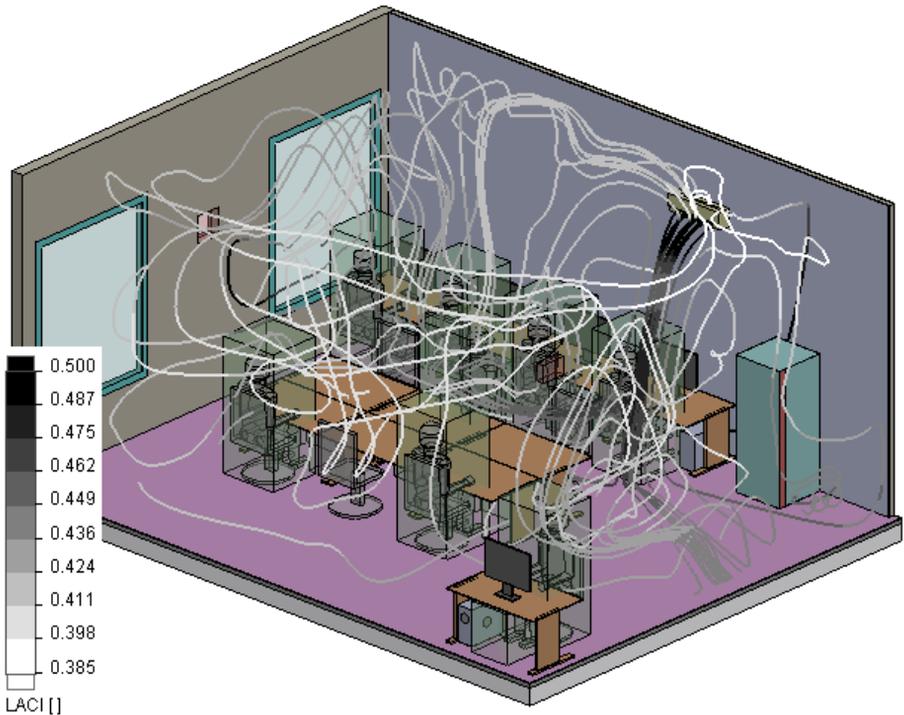


Рис. 2.325. Показатель локального воздухообмена на фоне линий тока, выходящих из кондиционера

Интересно сравнить обсуждаемые результаты с полученными для ситуации, когда в помещении не происходит рециркуляция, то есть весь воздух в кондиционер засасывается с улицы. Значения целей (средней температуры по всем объемам, окружающим людей, и по каждому из объемов) приведены на рис. 2.326. Очевидно, что из-за того, что на "вход" в кондиционер поступает более теплый воздух, температура повысилась. Причем рост произошел на 2,5–2,7 °С практически синхронно на всех уровнях: как в среднем, так и в наиболее теплом и наиболее холодном рабочем месте. Этот факт облегчает настройку системы кондиционирования и/или планировку помещений с целью достижения максимальной комфортности.

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value
GG Av Temperature of Fluid - средняя	[°C]	24,43892441	24,44666846
VG Av Temperature of Fluid 1	[°C]	23,36124301	23,39379455
VG Av Temperature of Fluid 2	[°C]	23,05201843	23,10336076
VG Av Temperature of Fluid 3	[°C]	23,36225912	23,36402191
VG Av Temperature of Fluid 4	[°C]	23,72147563	23,76026646
VG Av Temperature of Fluid 5	[°C]	24,28016791	24,48373207
VG Av Temperature of Fluid 6	[°C]	23,71318416	23,77388529
VG Av Temperature of Fluid 7	[°C]	19,08556389	19,14786527

Рис. 2.326. Значения температур в объемах, окружающих людей, для модели без рециркуляции

2.5.4. Выводы

После рассмотрения этой задачи напрашиваются следующие заключения. Модель описывает реальный объект. Очевидно, что для персонала данное помещение в рассмотренном режиме эксплуатации является некомфортным, причем это суждение основано на нескольких критериях, оцениваемых программой. Зонами дискомфорта является, по сути, половина рабочих мест. Надо сказать, что рассмотренное расположение блока кондиционера является вполне типовым для офисных помещений. По этой причине зона под модулем выхода и ее окружение в пределах нескольких метров становятся, по сути, непригодными для сколько-нибудь продолжительной деятельности. Поэтому типовой режим работы персонала в таких помещениях состоит в периодическом использовании кондиционера, что порождает проблему существенной неравномерности климата в течение рабочего времени: интенсивные охлаждения чередуются с продолжительной работой с превышением комфортной температуры. Это немногим лучше работы в интенсивном потоке холодного воздуха. Имеющиеся в современных кондиционерах регуляторы направления выходного потока на самом деле малоэффективны: в силу значительно большей плотности существенно охлажденный воздух быстро опускается, а увеличение его скорости на выходе (с целью направить поток вдоль потолка) создает дополнительный фактор дискомфорта, связанный с большой скоростью. Одним из решений могло бы стать размещение в помещении нескольких кондиционеров меньшей мощности, но это существенно удорожает систему.

Более оптимистичным является заключение о достойной функциональности Flow Simulation в совокупности с модулем HVAC применительно к задачам этого и смежных классов. Как видно, можно получить практически любую информацию, на базе которой можно оценивать имеющуюся ситуацию и предлагать улучшения.

Определенным ограничением является большая вычислительная трудоемкость задачи. Как можно было убедиться, корректная оценка состояния каждого рабочего места предполагает подробные модели разнообразных объектов и явлений: функционирования кондиционера, компьютеров, устройство рабочих мест. Единственным, пожалуй, способом сокращения размерности было бы пренебрежение теплопроводностью некоторых объектов. Их можно заменить изоляторами с заменой тепловыделения в соответствующих объемах на тепловыделение с граней (в силу исчезновения этих объемов). Также можно было бы заменить многослойные стенки их виртуальными аналогами, как это было сделано для передней и правой стенок.

2.6. Гидравлическая модель центробежного насоса

Целью данного раздела является построение гидравлической модели центробежного водяного насоса. Автор благодарит сотрудников ОАО "НПО Гидромаш" (Москва) за предоставленную геометрическую модель и результаты эксперимента. Геометрическая модель в разрезе вертикальной плоскостью показана на рис. 2.327. Как видно, на входе жидкость поступает непосредственно в рабочее колесо, а после выхода из него проходит через направляющий аппарат. Модель колеса, а также ее разрез плоскостью, проходящей через ось, показаны на рис. 2.328. Модель направляющего аппарата приведена на рис. 2.329.

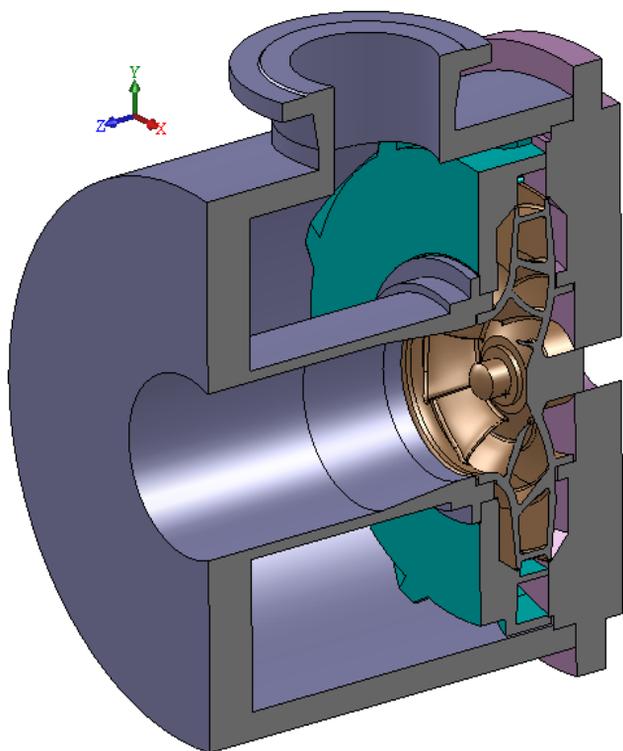


Рис. 2.327. Насос — геометрическая модель в разрезе

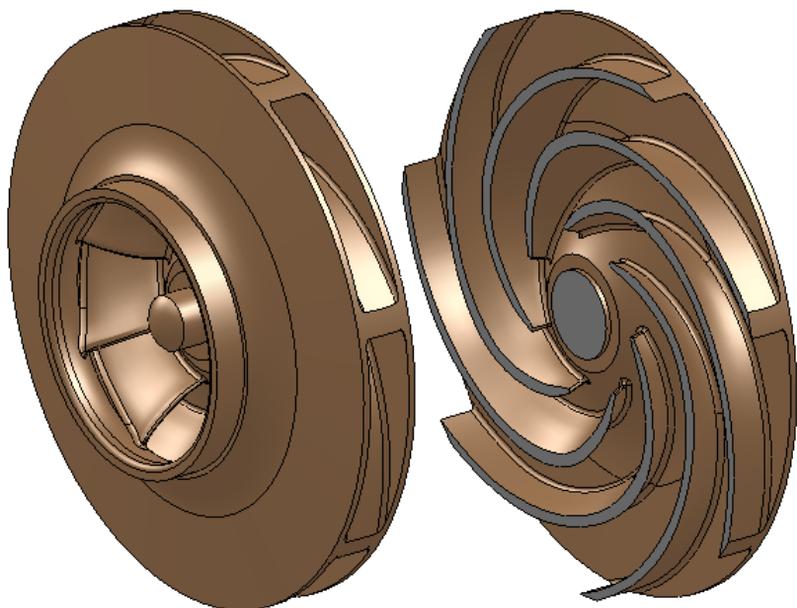


Рис. 2.328. Рабочее колесо

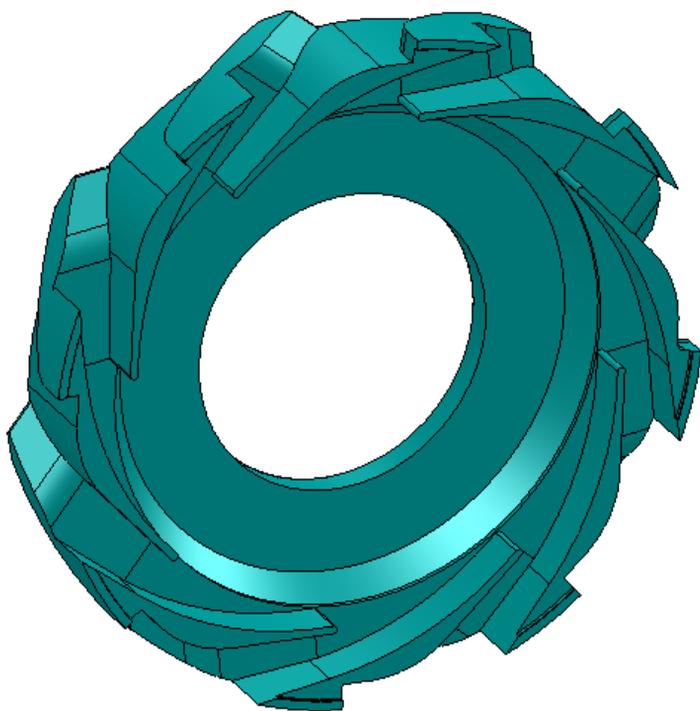


Рис. 2.329. Аппарат направляющий выходной

2.6.1. Постановка задачи

Требуется получить расходно-напорную характеристику насоса при частоте вращения ротора $\omega = 1450$ об./мин и номинальной подаче $Q_{\text{ном}} = 800$ м³/час. Желательно учесть шероховатость поверхностей — 25 мкм (именно эти единицы измерения в интерфейсе), кроме поверхностей каналов, которые внутри не подвергаются чистовой обработке. Здесь принимаем 50 мкм.

Особенность постановки задачи в том, что явно не задано рабочее давление на входе или выходе из устройства. Будем ориентироваться на входящее статическое давление 1 атм. Причина этой неопределенности состоит в том, что задание в явном виде давления на входе (в подобных ситуациях рекомендуется определять динамическое давление) и требуемого расхода на выходе не рекомендуется из-за плохой сходимости решения. Существенно лучший результат достигается при альтернативной комбинации граничных условий: статическое давление (или давление окружающей среды) на выходе и расход на входе.

В этой связи алгоритм идентификации граничных условий будет следующим. Учитывая, что максимальный напор данного насоса ориентировочно составляет около 90 м, будем сначала устанавливать на выходе давление окружающей среды (в данном контексте это статическое давление) 9 атм, после чего, задавшись требуемым расходом, получаем статическое давление на входе. Разницу между результатом и 1 атм вычитаем из исходного приближения (повторим, что в первой итерации

это 9 атм) и повторяем расчет. При разнице между желаемой и реальной величиной статического давления 10% удовлетворяемся состоянием модели для данного расхода. Из приведенных далее результатов будет видно, что зависимость большинства прогнозируемых характеристик от давления на выходе достаточно слабая.

Этап адаптации давления на выходе будем повторять для каждого из интересующих расходов.

2.6.2. Расчетная модель

Поскольку задача является внутренней, вводим заглушки, обеспечивающие формирование замкнутой области. Также на выходе добавлен патрубок, увеличивающий длину прямолинейного участка. Это сделано как для повышения степени реалистичности модели, так и для уменьшения вероятности появления вихрей, пересекающих грань с граничным условием в виде назначенного давления. В противном случае сходимость процесса может радикально ухудшиться.

На рис. 2.330 приведена расчетная модель, в которой на входе назначен объемный расход $600 \text{ м}^3/\text{час}$ (напоминаем, что он будет варьироваться), а на выходе — давление окружающей среды $853\,340 \text{ Па}$. Эта величина была установлена на основе нескольких ранее выполненных расчетов так, чтобы статическое давление на входе составляло (акцентируем внимание еще раз на том, что эта величина является расчетной и в явном виде нигде не назначается) примерно $101\,325 \text{ Па}$.

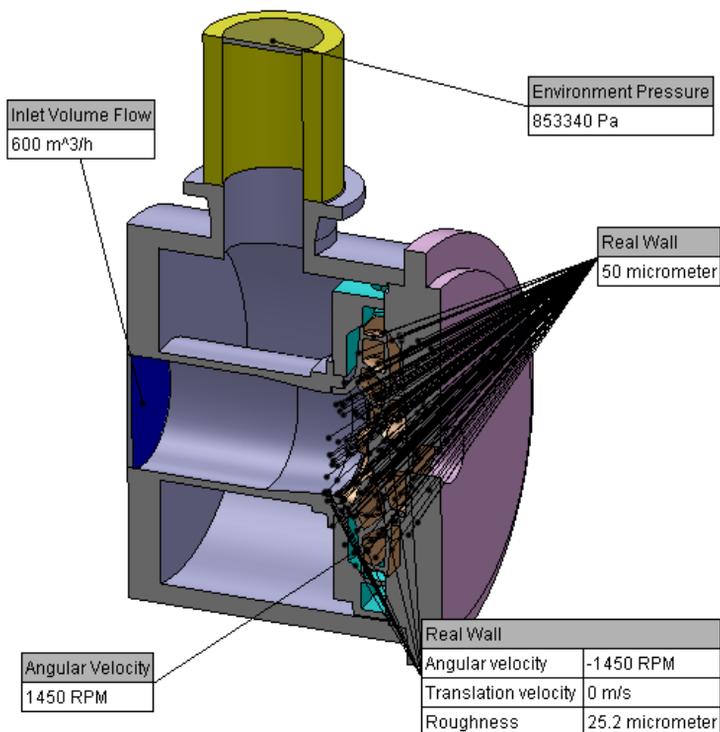


Рис. 2.330. Расчетная геометрическая модель с граничными условиями

Еще одним из условий, конкретизированным на рис. 2.331, является назначение вращающейся области (в модели и на прилагаемом диске она представляет собой прозрачное зеленое тело). Скорость его вращения 1450 об./мин. Те грани, которые не попали, полностью или частично, во вращающуюся область, но при этом принадлежат вращающемуся телу, нужно сделать "вращающимися" посредством придания им свойства движущейся стенки (рис. 2.332). Как видно, назначение вращения осуществляется относительно выбранной оси (в данном случае — X) локальной системы координат. Следует обратить внимание, что скорость вращения отрицательная, поскольку ось X локальной системы координат направлена противоположно направлению оси вращающегося тела (там скорость была положительной).

Самому компоненту присвоен (автоматически) атрибут **Disable** (рис. 2.333), что делает его прозрачным для текущей среды.

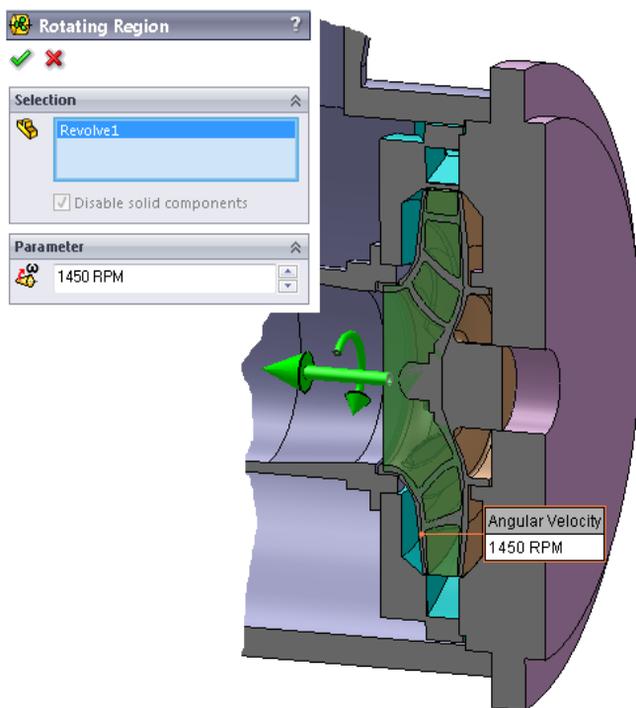


Рис. 2.331. Назначение вращающейся области

При решении задач с вращающимися областями следует учитывать еще ряд ограничений (замечания относятся к версии программы 2010 г.). Так, если в проекте учитывается действие силы тяжести, то она должна быть параллельна оси вращения, а направление потока параллельно направлению оси. Вращающиеся области не должны касаться или пересекаться. Эти частности затрудняют или делают невозможным моделирование встречно вращающихся винтов, если они расположены достаточно близко друг к другу, так как вращающиеся области имеют общую грань (рис. 2.334).

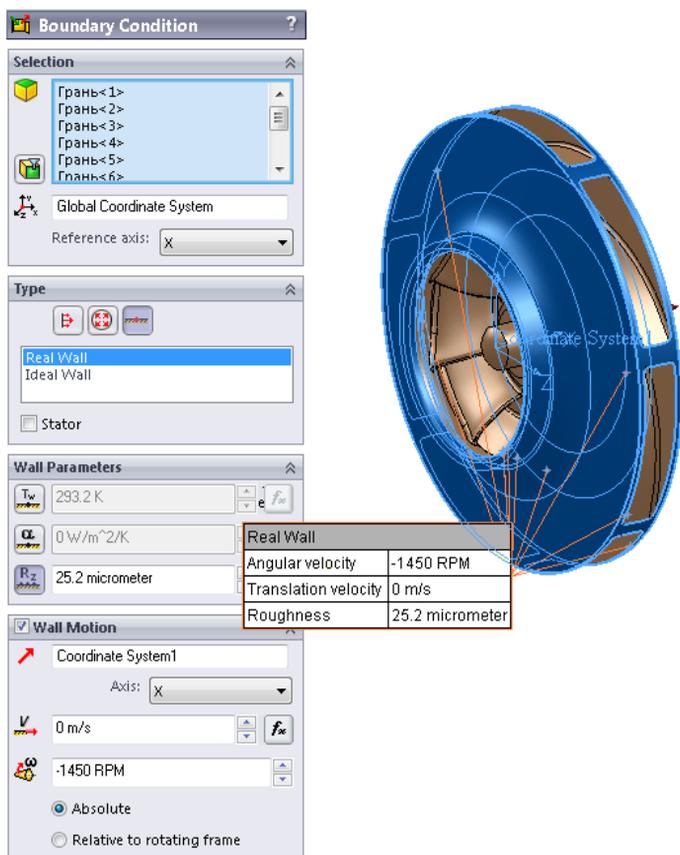


Рис. 2.332. Создание вращающихся граней, не попавших во вращающуюся область

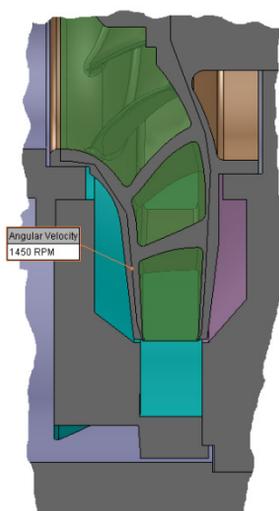


Рис. 2.333. Фиктивное тело для вращающейся области

Иногда возникает обратная задача: по известным параметрам потока (например, расходе на входе и давлении на выходе) определить скорость вращения крыльчатки в осевых водосчетчиках. В этом случае также приходится прибегать к итерационной процедуре: задаваясь различными угловыми скоростями вращающейся области нужно найти такую, когда крутящий момент на валу будет равен (близок) к нулю. Разумеется, можно придать этой последовательности большую эффективность, используя метод "золотого сечения".

Учитывая изложенные ограничения, моделировать радиальные крыльчатки в текущих версиях Flow Simulation невозможно.

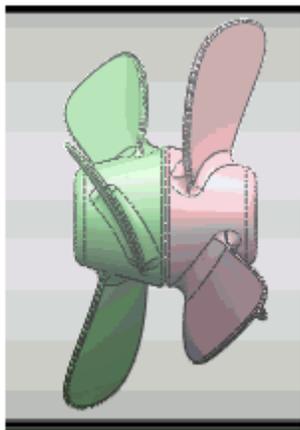


Рис. 2.334. Соосные винты

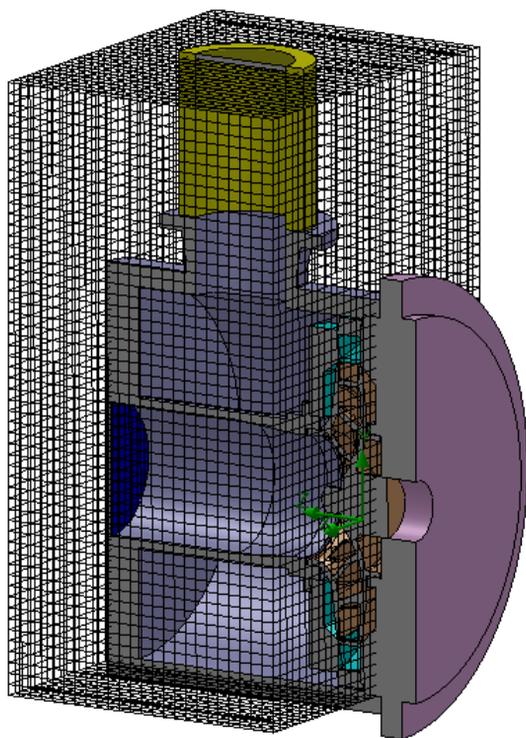


Рис. 2.335. Базовая сетка

Начальная сетка и ее параметры показана на рис. 2.335, 2.336. Другие вкладки окна **Basic Mesh** (Базовая сетка), настройки которых отличны от назначаемых по умолчанию, приведены на рис. 2.337, 2.338. С 1 до 2 были повышены значения параметров **Small solid features refinement level** (Критерий захвата малой особенности), **Tolerance refinement level** (Уровень разрешения сеткой малых особенностей модели); это изменение сопровождалось также уменьшением значения в поле **Tolerance refinement criterion** (Критерий разрешения сеткой выступов поверхности).

Также создаются объекты для адаптации сетки в радиальном зазоре между колесом и отводом. Параметр **Refine partial cells** (Уровень дробления всех частичных ячеек) увели-

чен до 5 применительно к наружной грани колеса (рис. 2.339) и кромкам (фактически граням скруглений) на входе в направляющий аппарат (рис. 2.340).

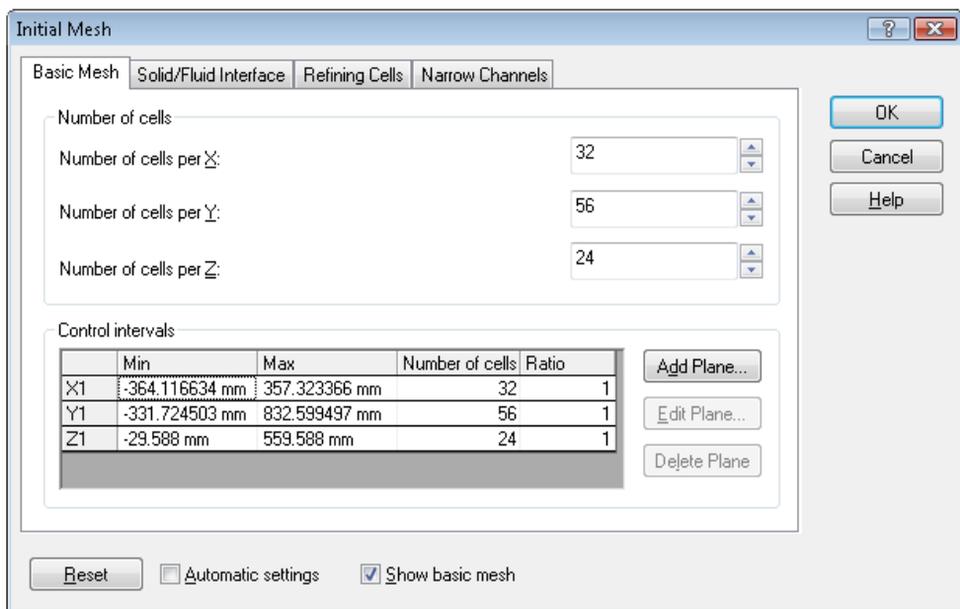


Рис. 2.336. Начальная сетка — параметры базовой сетки

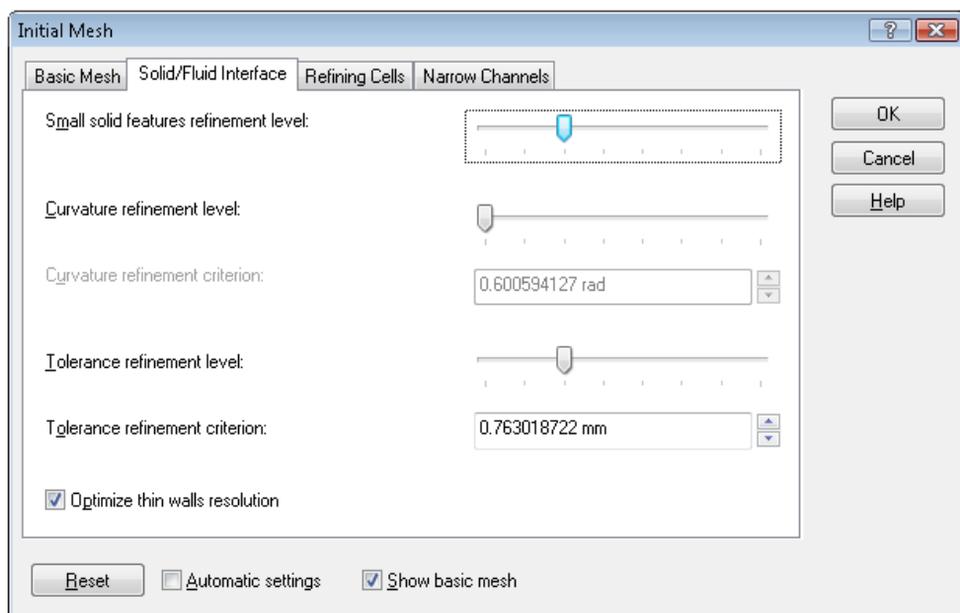


Рис. 2.337. Начальная сетка — вкладка **Solid/Fluid Interface** (Поверхность раздела твердых тел с текучей средой)

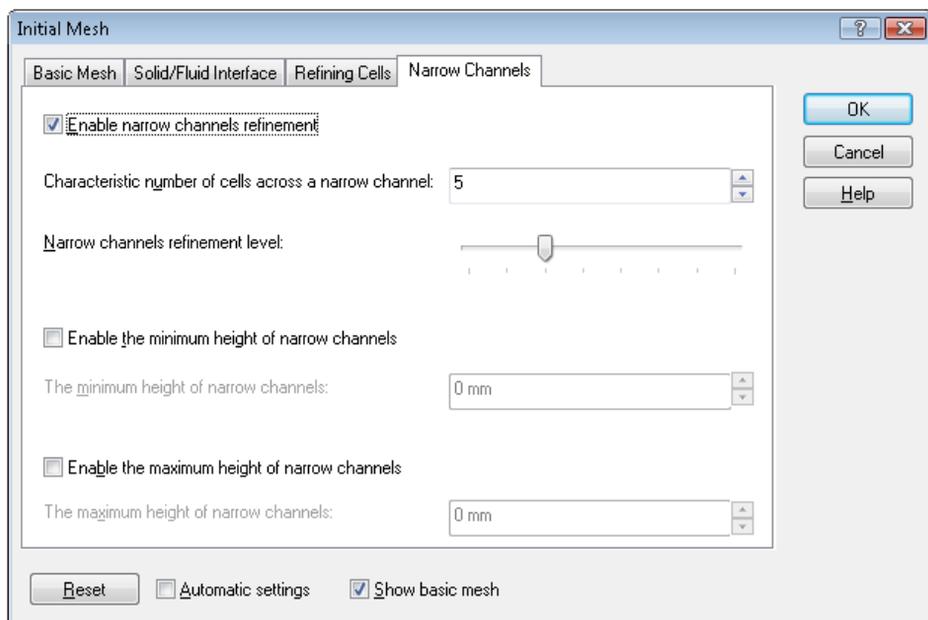


Рис. 2.338. Начальная сетка — вкладка **Narrow Channels** (Узкие каналы)

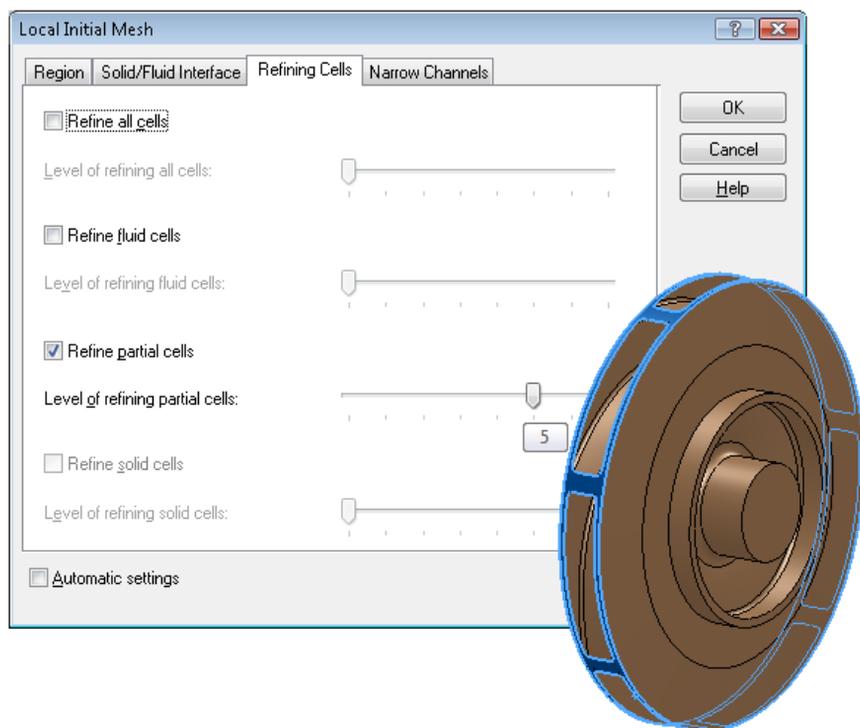


Рис. 2.339. Уплотнение сетки в окрестности наружной грани колеса

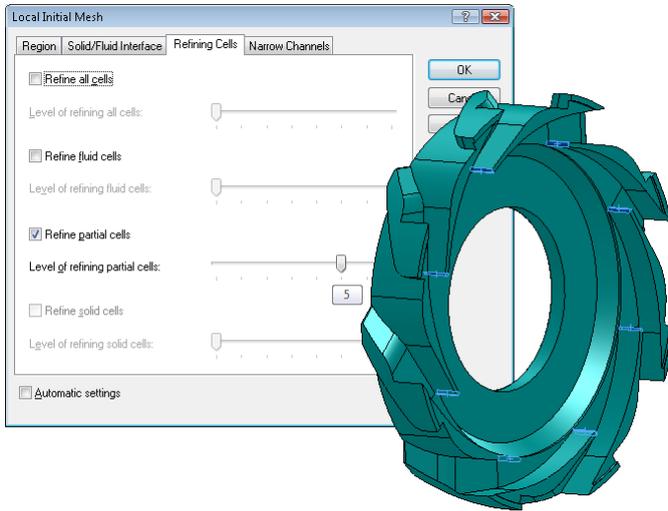


Рис. 2.340. Уплотнение сетки на входе в направляющий аппарат

Результуирующая сетка в вертикальных сечениях (продольном и поперечном) показана на рис. 2.341, 2.342. В ней получилось 171 332 жидкостных ячейки и 256 506 частичных ячеек. В принципе, это не слишком большая размерность, однако с учетом наличия вращающейся области задача потребовала около 4 Гбайт оперативной памяти (указан полный объем, включая SolidWorks и операционную систему).

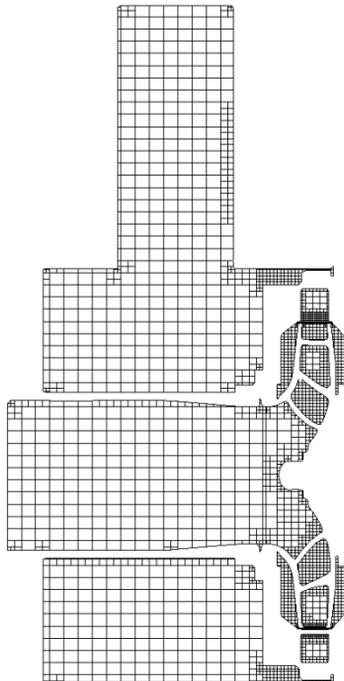


Рис. 2.341. Сетка в сечении вертикальной плоскостью

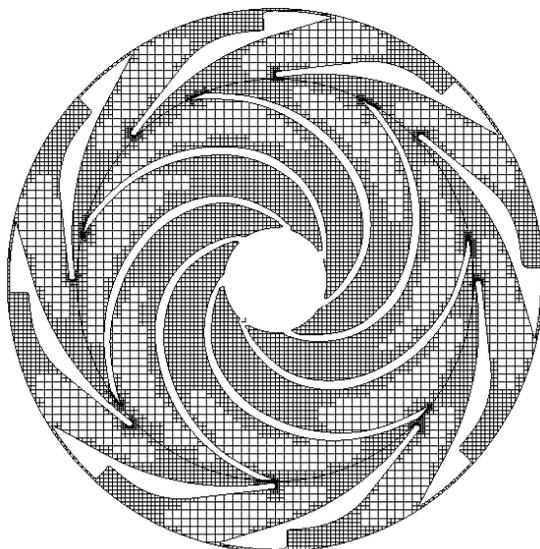


Рис. 2.342. Сетка в поперечном сечении, проходящем через колесо

В качестве целей (все они также будут использоваться для контроля сходимости) назначаем массовый расход, среднюю скорость и полное давление на входе и выходе, статическое давление на входе (рис. 2.343), а также разницу полных давлений (для этого используется инструмент **Equation Goal** (Функциональная цель), как показано на рис. 2.344). Последняя величина нужна для расчета напора, в принципе, делением на произведение $\rho \times g$ могла бы быть превращена в собственно напор (если игнорировать поправку на разницу высот входного и выходного сечений).

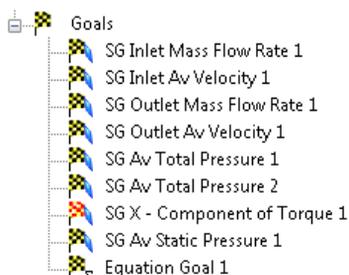


Рис. 2.343. Цели проекта

Расчет крутящего момента на колесе (действующего на колесо относительно его оси) также будем осуществлять через функционал целей, другой вариант — использование процедуры **Surface Parameters** (Параметры на поверхности). На первый взгляд, процедуры выбора объектов для расчета похожи, однако интерфейс программы применительно к целям более функционален. На рис. 2.345 показано, что для выбора совокупности граней на колесе активизируется фильтр выбора для тел (это базовая функциональность SolidWorks), результатом после указания колеса

являются все его колеса. После этого можно воспользоваться подходящими процедурами фильтрации граней, в данном случае это **Keep outer faces and faces in contact with fluid** (Оставить только внешние поверхности и поверхности контакта с текучей средой). Также из числа параметров в панели выбирается локальная система координат и соответствующий компонент крутящего момента.

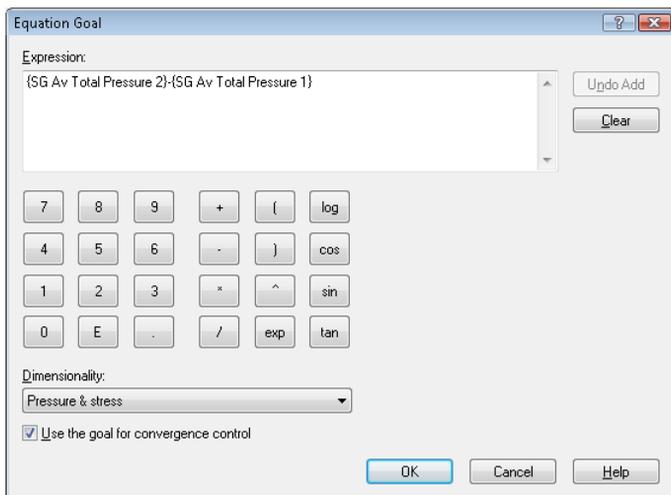


Рис. 2.344. Формирование цели — напора

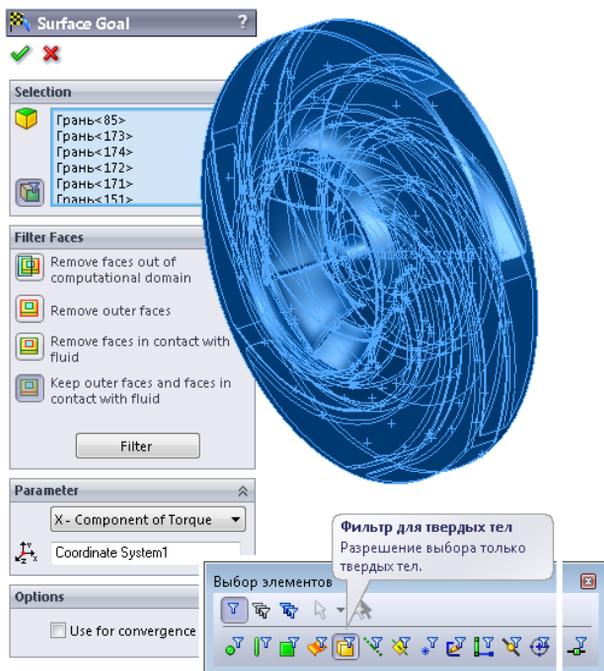


Рис. 2.345. Определение цели — крутящего момента на колесе

2.6.3. Базовый расчет

График сходимости одной из целей — разницы динамических давлений между выходом и входом, показан на рис. 2.346. Как видно, сходимость наступила достаточно быстро (на показанном графике абсциссой является число итераций, при этом одна продувка — в терминах программы Travel), после чего процесс стабилизируется.

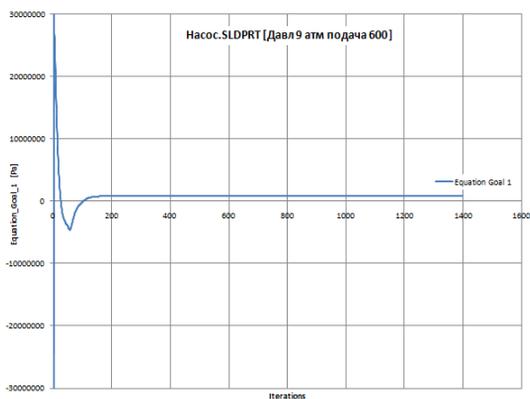


Рис. 2.346. График сходимости цели — разницы динамических давлений

Поле скоростей в вертикальном продольном сечении показано на рис. 2.347. В данном случае диапазон шкалы адаптирован к содержимому сечения (то есть в оставшемся объеме скорость может быть больше или меньше, чем максимум и минимум на шкале). На самом деле максимальная скорость в данном случае составляет 54,7 м/с при том, что средняя скорость на входе — 3,26, а на выходе — 5,38 м/с.

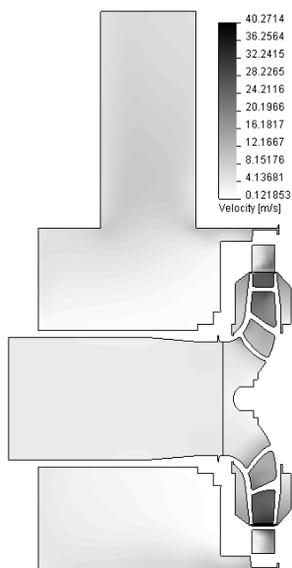


Рис. 2.347. Скорость в вертикальном продольном сечении

Поле скоростей в поперечном сечении, проходящем через турбину, показано на рис. 2.348 (пограничный слой не показан). Следует обратить внимание, что при переходе через границу вращающейся области может наблюдаться скачок скорости (равно как и остальных характеристик потока). Это объясняется тем, что условия неразрывности выполняются только "в среднем", поскольку алгоритм рассматривает не конкретный момент времени и заданное положение колеса относительно неподвижных объектов, а моделирует "бесконечное" время.

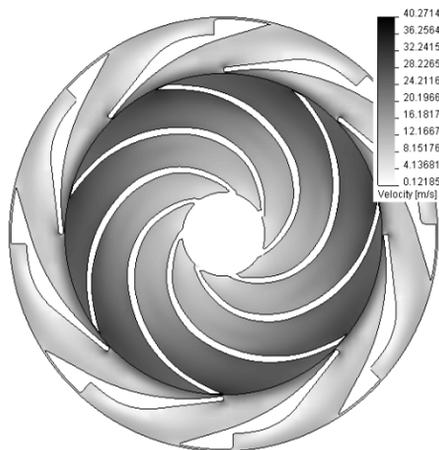


Рис. 2.348. Скорость в поперечном сечении

Линии тока (проекции векторов скорости) в поперечном сечении показаны на рис. 2.349. Настройки, обеспечивающие визуально приемлемый масштаб стрелок и расстояние между ними, производились на вкладке **Vectors** (Векторы) окна **View Settings** (Установки просмотра) (рис. 2.350, 2.351), а также на панели с настройками сечения **Cut Plot** (Картина в сечении).

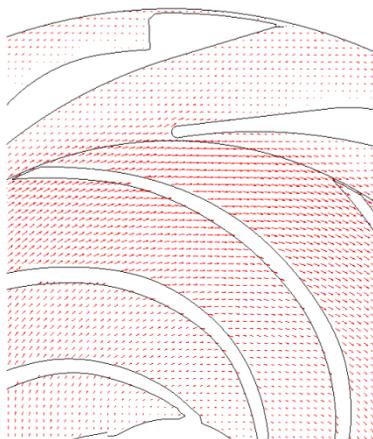


Рис. 2.349. Векторы скорости в поперечном сечении

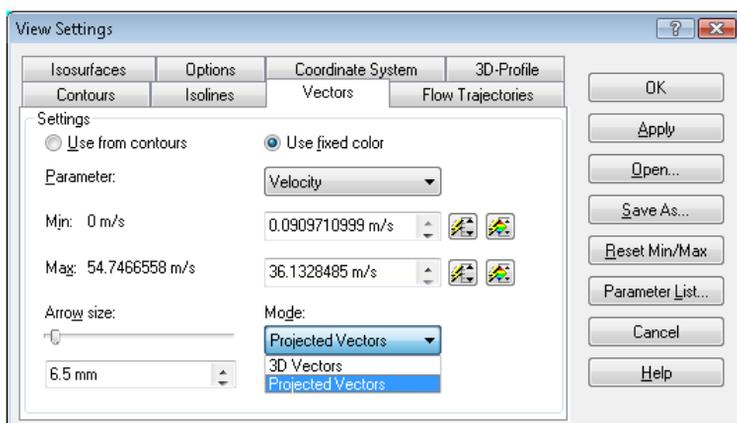


Рис. 2.350. Определение размера стрелок и типа проекции

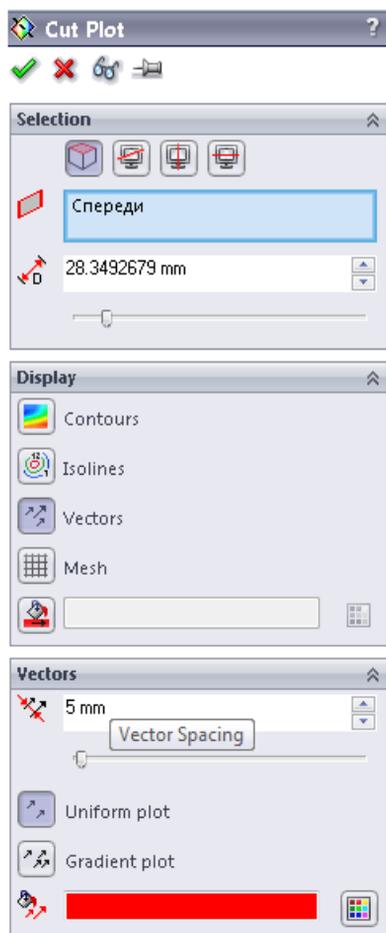


Рис. 2.351. Определение расстояния между стрелками

Линии тока в пространстве показаны на рис. 2.352. Применительно к данной задаче эта диаграмма, в частности, наталкивает на идею профилирования перехода из корпуса в выходной патрубков с целью уменьшения гидравлического сопротивления. Интересно сравнить данную диаграмму с полученной для меньшего расхода, например, $100 \text{ м}^3/\text{час}$ (рис. 2.353). Как видно, во входном канале появилась ощутимая закрутка. При этом средняя длина пути в полости существенно возросла. По этой причине пришлось увеличить параметр **Maximum Length** (Максимальная длина) для отсечения "слишком" длинных траекторий (от 10 000 мм до 50 000), чтобы сохранить большую часть из выходящих линий.

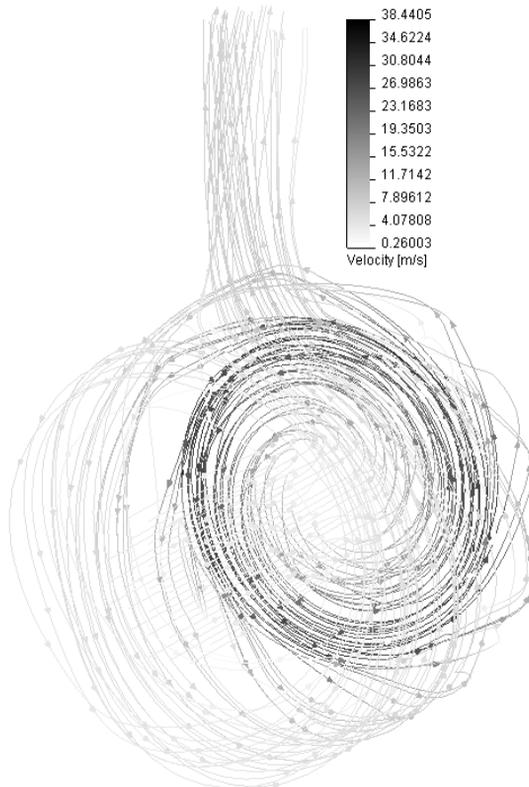


Рис. 2.352. Линии тока в пространстве

Распределение статического давления в продольном и поперечном сечении показано на рис. 2.354, 2.355. Анализируя диаграммы, следует иметь в виду, что среднее расчетное (напоминаем, что эта характеристика является производной от назначенного расхода и статического давления на выходе) статическое давление на входе составило 91 458 Па. Диапазон давления в сечениях соответствует фактическому диапазону функции в пределах именно этих сечений. Если же рассматривать полость, занятую текучей средой в целом, выясняется, что в системе присутствует отрицательное давление. Его минимальная величина в рассматриваемом режиме функционирования насоса составляет около $-232\,000$ Па. Это свидетельствует о потенциально возможной кавитации.

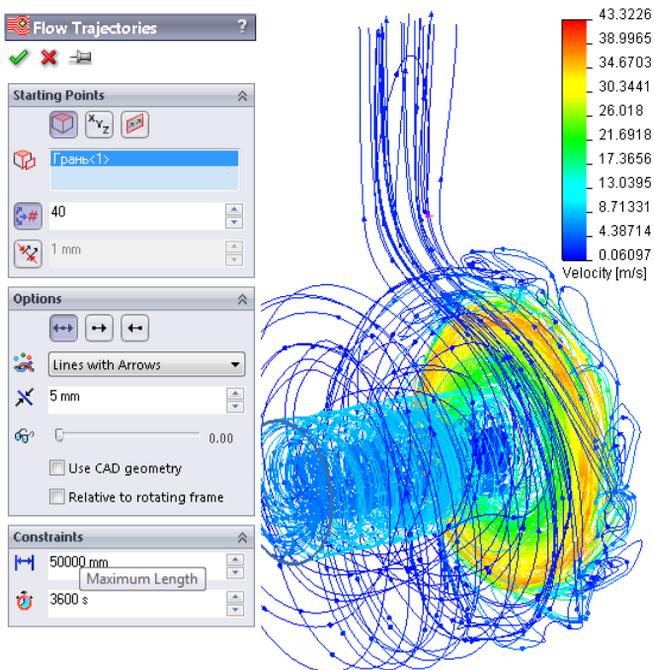


Рис. 2.353. Линии тока для расхода $100 \text{ м}^3/\text{час}$

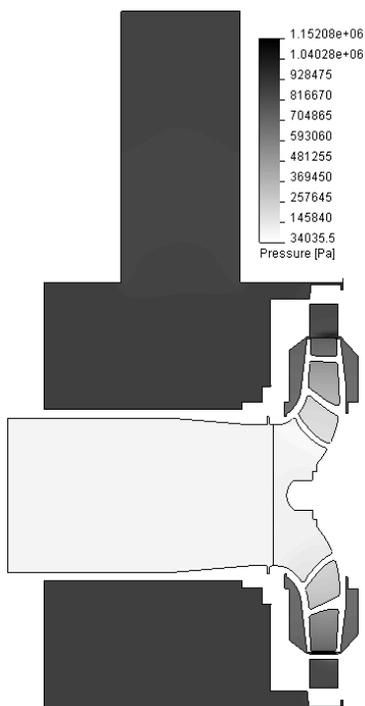


Рис. 2.354. Распределение статического давления в продольном сечении

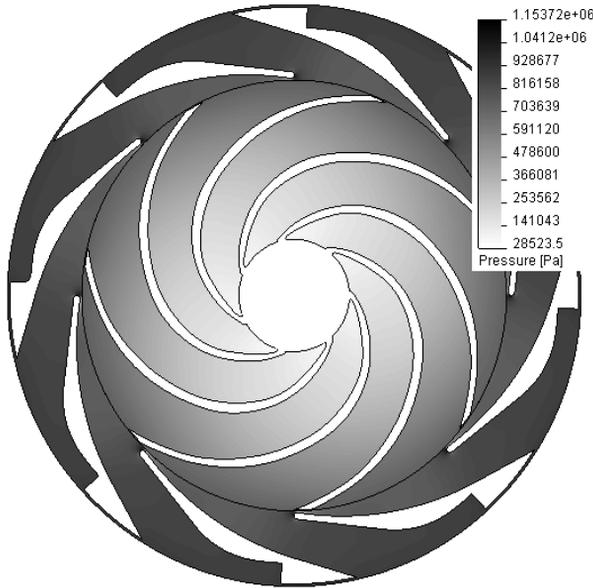


Рис. 2.355. Распределение статического давления в поперечном сечении

Наглядным инструментом для визуализации областей с характерным значением функции являются **Izosurfaces** (Изоповерхности). Настройка их параметров производится на одноименной вкладке окна **View Settings** (Установки просмотра), где посредством ползункового переключателя нужно установить пороговое значение функции (рис. 2.356). Результат выполнения команды приведен на рис. 2.357. Как видно, зоны разрежения развиваются за концами лопаток, они достаточно малы по объему.

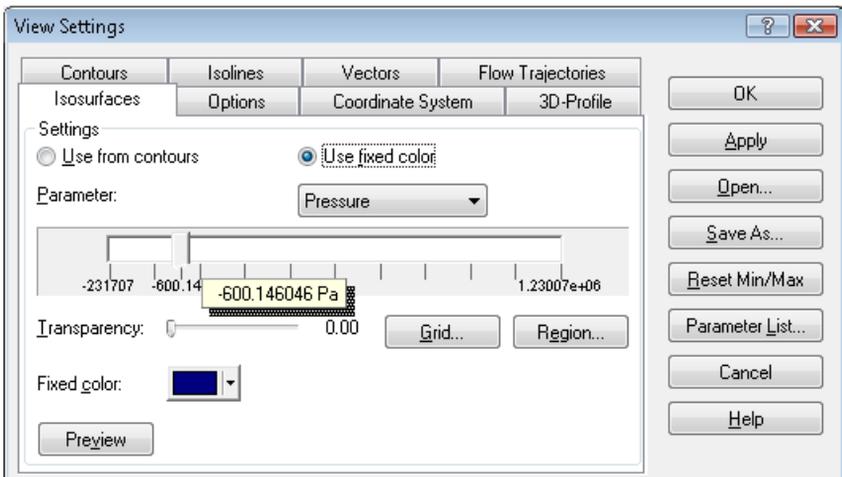


Рис. 2.356. Настройки отображения изоповерхностей

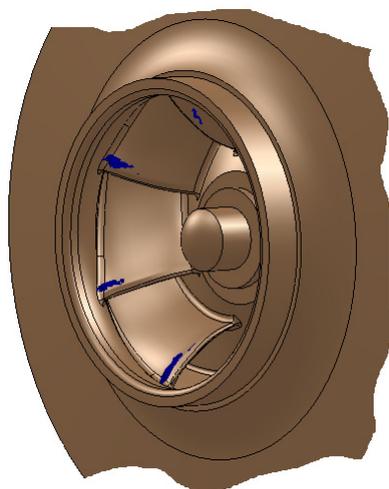


Рис. 2.357. Зоны отрицательного давления

2.6.4. Анализ сходимости

Из-за достаточной сложности геометрии проведем анализ сеточной сходимости. Применительно к телу, описывающему вращающуюся область, применим элемент управления **Local Initial Mesh** (Локальная начальная сетка) с параметрами, показанными на рис. 2.358. От глобальных настроек они отличаются тем, что регулятор **Level of refining fluid cells** (Уровень дробления всех ячеек в текучей среде) передвинут на уровень 2.

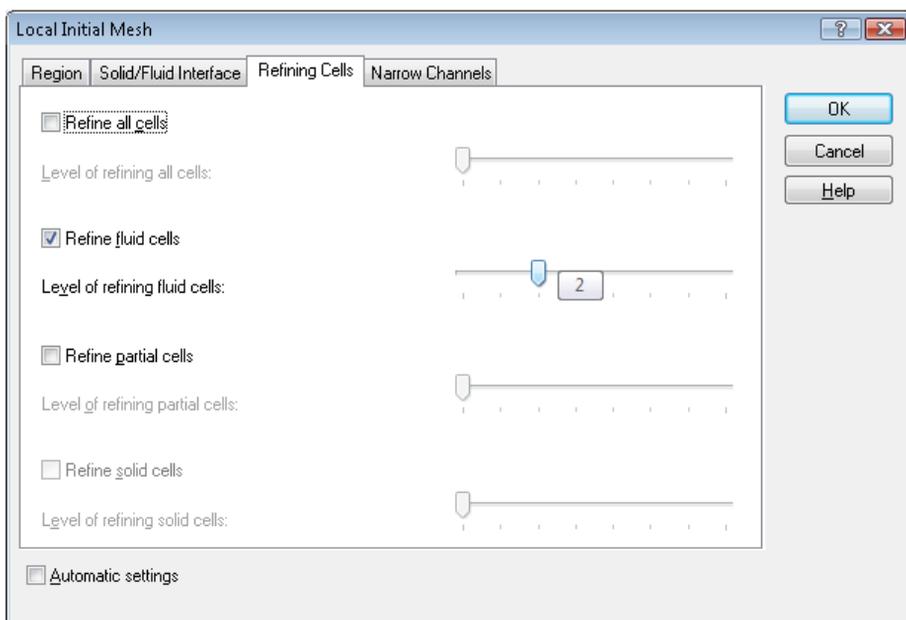


Рис. 2.358. Управление сеткой во вращающемся объеме

Также выполнено уплотнение сетки в канале до колеса, в направляющем аппарате и непосредственно за ним. Для этого создано вспомогательное тело, охватывающее эту область (рис. 2.359), которое затем отключено в окне **Component Control** (Управление компонентами) на рис. 2.360.

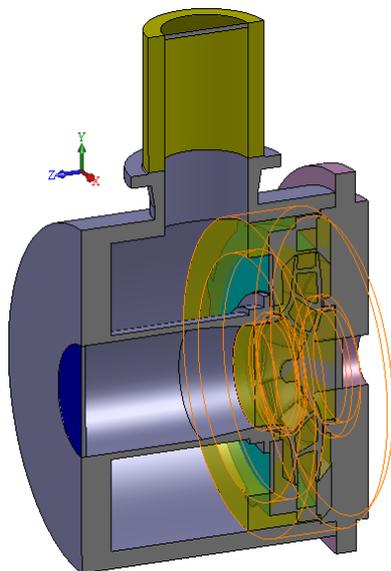


Рис. 2.359. Вспомогательное тело для уплотнения сетки внутри колеса и в окрестностях

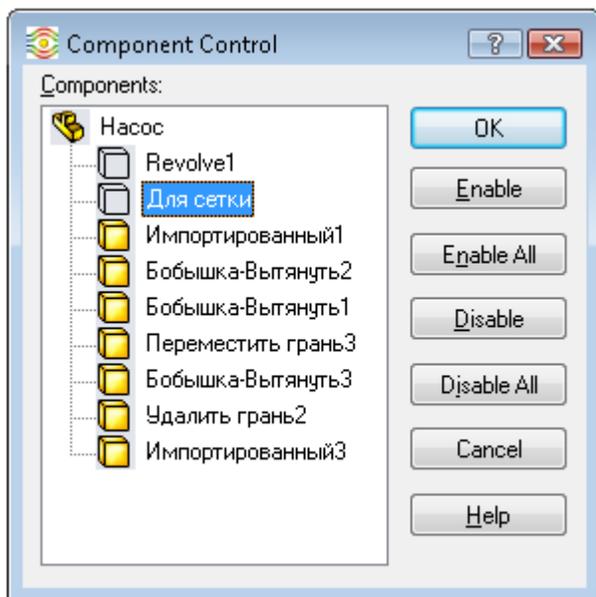


Рис. 2.360. Отключение вспомогательного тела

В объеме вспомогательного тела будет происходить адаптация сетки с уровнем 1 (рис. 2.361). Процесс осуществляется в режиме **Manual Only** (Адаптация вручную), и после того, как на графиках целей будет диагностирована уверенная сходимость, в фоновом режиме решателя подается команда **Refine** (Дробить). Настройки адаптации показаны на рис. 2.362.

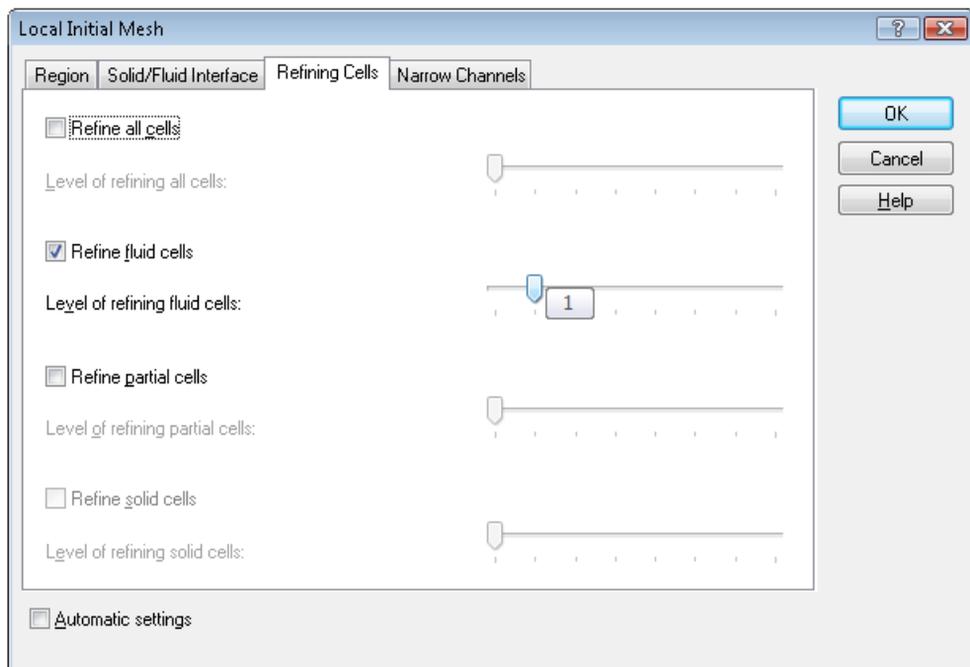


Рис. 2.361. Установка уровня дробления ячеек текучей среды во вспомогательном объеме

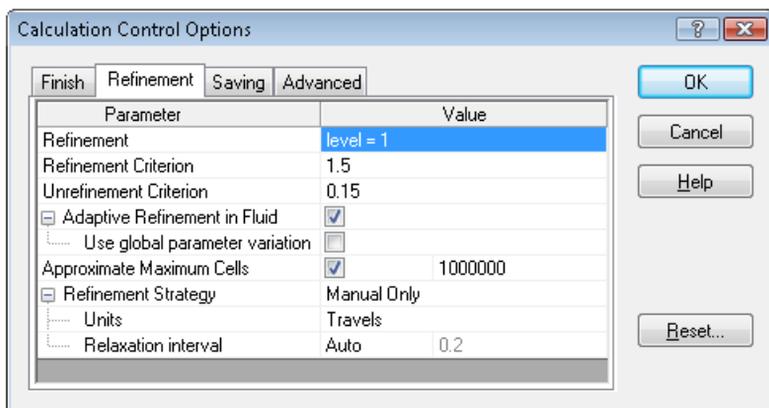


Рис. 2.362. Параметры адаптации сетки

Результирующая сетка после одного шага адаптации показана на рис. 2.363, а ее фрагмент — на рис. 2.364. График сходимости разницы давлений приведен на рис. 2.365. Как видно, после перестроения сетки на 579-ой итерации в процессе появились слабые возмущения, которые достаточно быстро установились, причем функция изменилась незначительно. Отклонения других целей также зафиксированы в пределах 5%. Таким образом, в первом приближении можно полагать, что сеточная сходимость практически достигнута. Дальнейший анализ будем проводить на базе результатов, полученных на сетке без дополнительного уплотнения и адаптации, поскольку это ощутимо увеличивает размерность задачи.

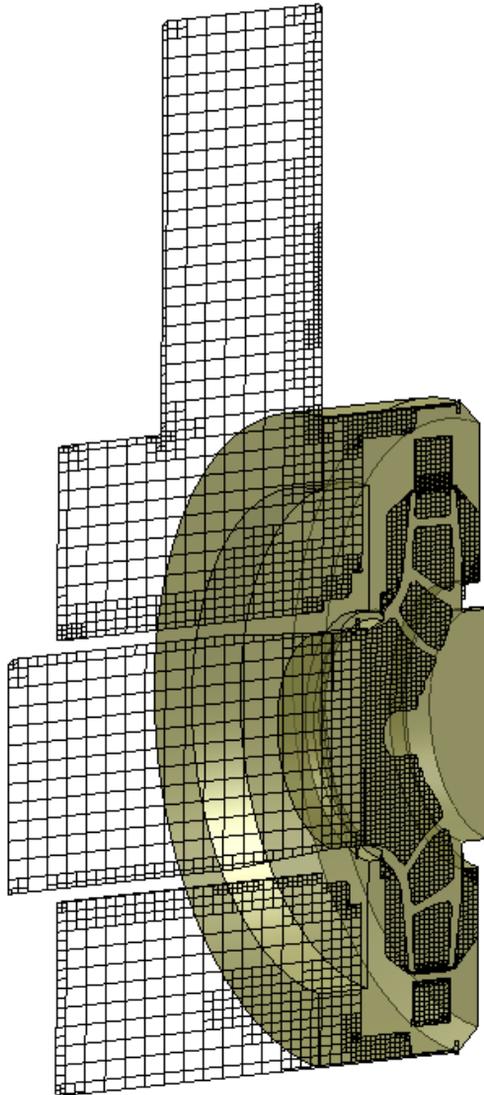


Рис. 2.363. Результирующая сетка после адаптации

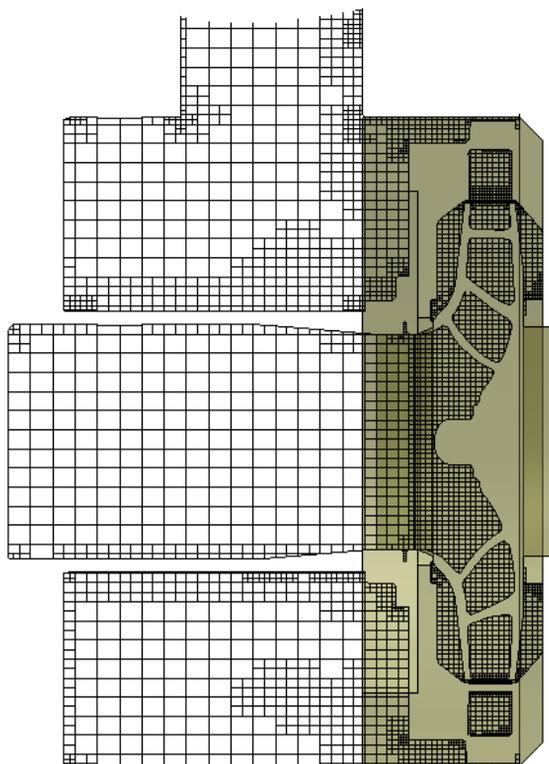


Рис. 2.364. Результирующая сетка после адаптации — фрагмент

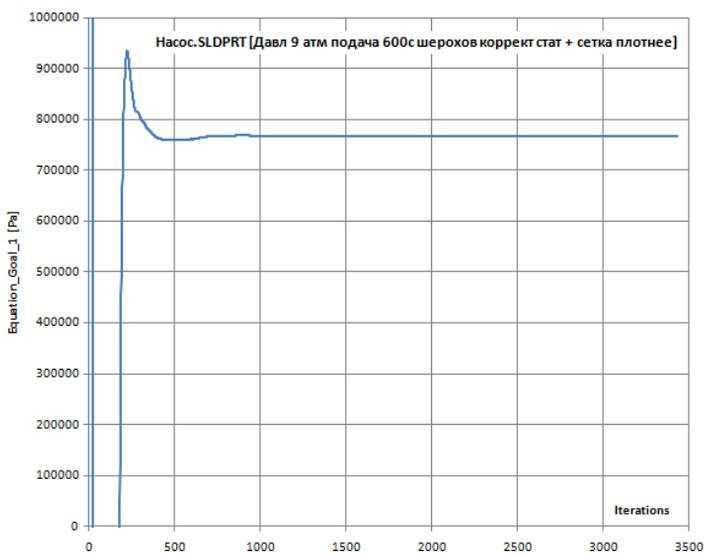


Рис. 2.365. График цели — разницы динамических давлений в зависимости от номера итерации с учетом адаптации

2.6.5. Расчет при различных расходах

Построение кривых расходных характеристик начнем с анализа влияния граничных условий. Как упоминалось, на входе назначается объемный расход, а на выходе — статическое давление (или давление окружающей среды). При этом выполняется итерационная "подгонка" давления на выходе с целью получения для данного расхода статического давления на входе равного (примерно) 1 атм. Тем не менее, поскольку в программе используется модель несжимаемой жидкости, результаты (зависимость между расходом и напором, мощность, потребный крутящий момент) не должны существенно зависеть от давления на входе. Оно, в частности, может получаться и отрицательным; это справедливо, если в расчетной модели не учитывается возможность кавитации.

Графики зависимости градиента давления и крутящего момента от расхода для моделей с давлением на выходе 9 атм и давлением на выходе же, адаптированным к расчетному давлению на входе 1 атм, показаны на рис. 2.366, 2.367. Как видно, графики практически одинаковы, за исключением давления в некотором, достаточно узком диапазоне. Это предоставляет возможность избежать итерационной процедуры подгонки давления на выходе. Такое поведение системы является следствием гипотезы несжимаемой жидкости без учета кавитации (возможной).

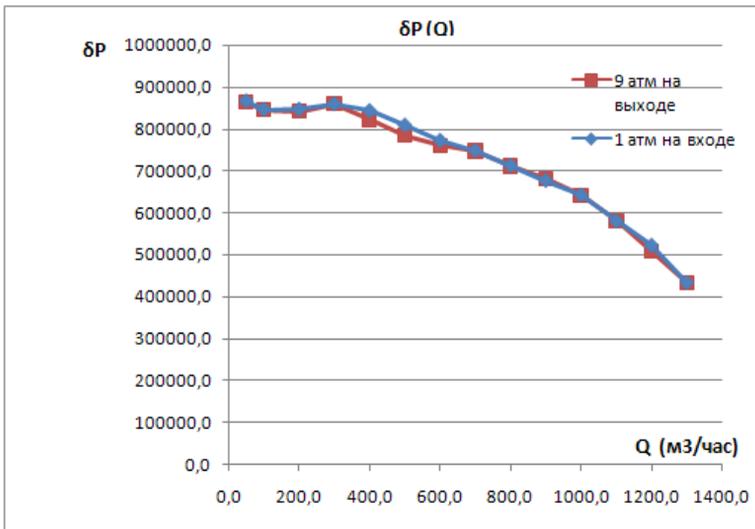


Рис. 2.366. Разница полного давления в зависимости от расхода

Графики зависимости напора от расхода — экспериментальный и расчетный — показаны на рис. 2.368. Как видно, в целом наблюдается удовлетворительное соответствие: в пределах рабочих расходов различие в результатах не превышает 13%. Примерно при 1000 м³/час кривые пересекаются. Как представляется, одним из источников несоответствия является отличие в геометрии реальной турбины и ее математической модели. Вполне возможно, что она создавалась без учета способа

конкретной реализации изделия или с отклонениями от нее. Не следует отрицать особенности математических моделей в программе и реализации соответствующих алгоритмов. В области малых расходов существенную поправку в численную модель может вносить геометрия входного канала: здесь закрутка потока начинается на входе или даже до него. Поэтому нужно удлинять входной патрубок или учесть другую компоновку присоединения, приблизившись к реальности.

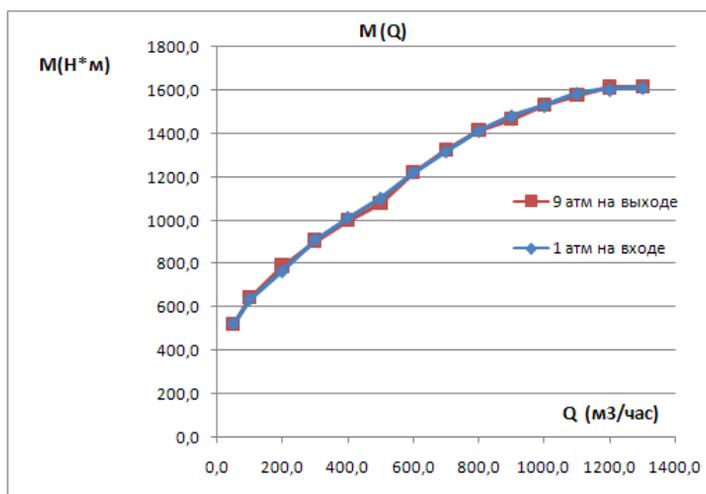


Рис. 2.367. Крутящий момент в зависимости от расхода

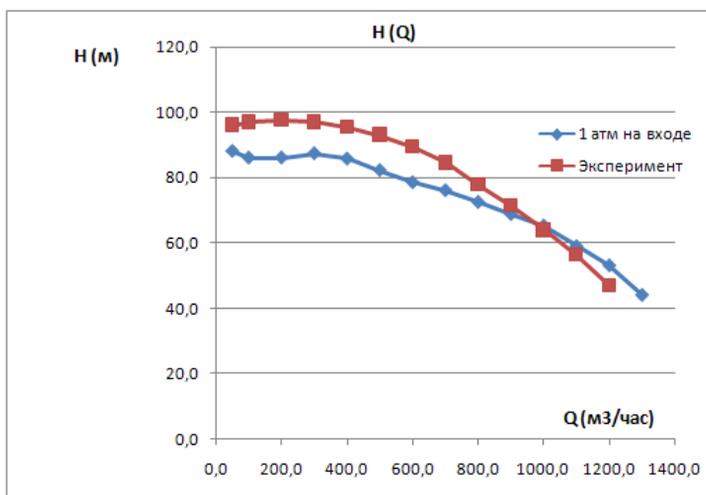


Рис. 2.368. Расходно-напорная характеристика — эксперимент и расчет

График зависимости гидравлического коэффициента полезного действия от расхода показан на рис. 2.369. Как видно, максимальный КПД находится в интервале 900–1000 м³/час.

КПД здесь рассчитывался по формуле:

$$\eta = \frac{N_{\text{полезн}}}{N_{\text{агрегата}}},$$

где:

$$N_{\text{полезн}} = Q \times \rho \times g \times H; \quad N_{\text{агрегата}} = M \times \omega.$$

В формуле угловая скорость ω имеет размерность рад/с; расход Q — м³/сек.

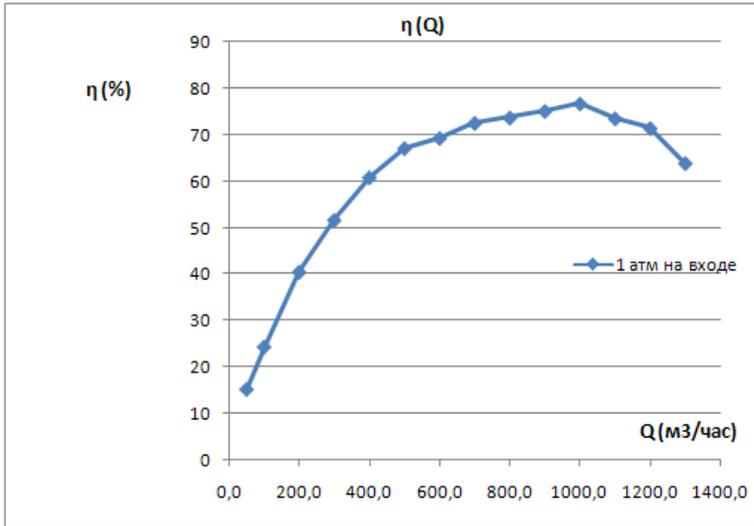


Рис. 2.369. Зависимость гидравлического КПД от расхода

2.6.6. Учет кавитации

Как упоминалось, в окрестности корня лопаток диагностированы зоны отрицательного давления, что есть признак кавитационного режима. Для его моделирования активизируем опцию **Cavitation** (Кавитация) в окне **General Settings** (Общие установки), определяя одновременно величины параметра **Dissolved gas mass fraction** (Массовая доля растворенного в воде газа). По умолчанию эта доля равна 0,00001, что является типичным значением при нормальных условиях.

Во Flow Simulation, начиная с версии 2010 г., присутствуют две модели кавитации: инженерная и изотермическая. Первая применима исключительно к воде, предполагая замену ее условно-однородной средой. Инженерная модель позволяет имитировать локальное вскипание жидкости в областях с интенсивным локальным нагревом. При этом возможен учет тепловых эффектов. Изотермическая модель доступна только для несжимаемых жидкостей со свойствами, назначаемыми пользователем. При этом аппроксимация подразумевает изотермическое двухфазное течение.

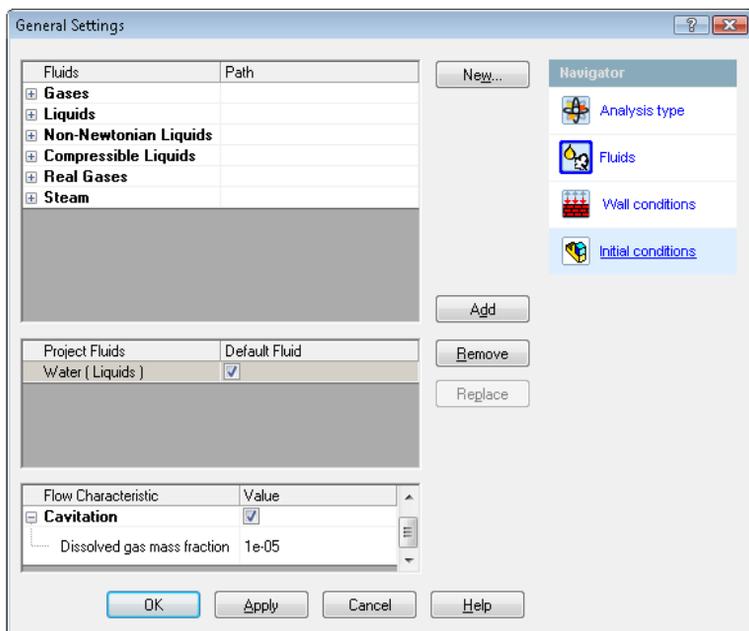


Рис. 2.370. Учет кавитации

Алгоритм расчета моделей с кавитацией таков, что области с этим эффектом "растут" достаточно медленно, из-за чего счет при стандартных параметрах настройки может остановиться до достижения реальной сходимости. В этой связи желательно в число целей включить среднюю плотность (**Average Density**) и, во-вторых, в условиях завершения установить для параметра **Analysis interval (travels)** (Интервал анализа (продувки)) величину 2,5. Более уверенная диагностика сходимости обеспечивается также и визуальным контролем целей с ручным завершением счета. Эти манипуляции осуществляются на вкладке **Finish** (Завершение) окна **Calculation Control Options** (рис. 2.371). Обратите внимание, что для опции **Finish Conditions** (Условия завершения) выбрано отличное от умолчания значение **If all are satisfied** (Если все цели удовлетворены).

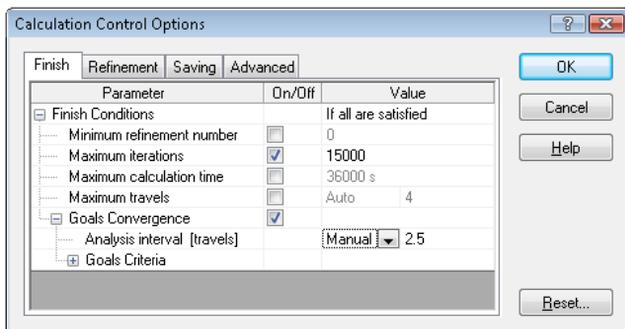


Рис. 2.371. Критерии завершения счета для моделей с кавитацией

Особенности реализации инженерной модели кавитации во Flow Simulation следующие (в версии 2010 г.):

- ❑ Она применима только для воды.
- ❑ Свойства несконденсированного газа эквивалентны свойствам воздуха.
- ❑ Температура и давление в области фазового перехода должны находиться в интервале: $T = 277,15\text{--}583,15$ °К, $P = 800\text{--}107$ Па.
- ❑ Если расчет завершился или принудительно остановлен и состояние опции **Cavitation** (Кавитация) было изменено, то расчет продолжить нельзя.
- ❑ Модель с кавитацией не допускает расчет областей без условий flow openings (отверстия с заданным течением) на входе или выходе.
- ❑ Результат расчета не включает детализированной информации о состоянии области с кавитацией, в частности параметров пузырьков пара.
- ❑ Область, где вероятно существование кавитации, должна быть качественно разрешена расчетной сеткой.
- ❑ Объемная доля воды в жидком состоянии на входе должна быть не менее 0,1.

Изотермическая модель кавитации позволяет моделировать двухфазное течение технических жидких сред без детализации структуры.

- ❑ Температура процесса постоянна, и тепловые эффекты не рассматриваются.
- ❑ Жидкая фаза считается несжимаемой текучей средой.
- ❑ Плотность газовой фазы, состоящей из пара и растворенного газа, подчиняется модели идеального газа.
- ❑ В качестве растворенного газа могут назначаться воздух, двуокись углерода, гелий и метан. По умолчанию растворенным газом считается воздух с массовой долей 10^{-4} . Допустимо изменение этой величины в интервале $10^{-2} - 10^{-6}$.

Данная модель может быть применена к произвольной жидкости со свойствами пользователя. При этом после активизации опции **Cavitation effect** (Явление кавитации) следует назначить параметры: **Molar mass** (Молярная масса); **Saturation pressure** (Давление насыщения) **Temperature** (Температура).

Прежде всего, обращаем внимание на радикальное ухудшение сходимости. При неизменной размерности задачи для стабилизации целей (на рис. 2.372, 2.373 приведены зависимости для полных давлений на входе и выходе без кавитации и с ее учетом) требуется примерно в 7 раз больше итераций.

После учета кавитации интегральные результаты изменились следующим образом: напор уменьшился с 771 600 до 769 000 Па, а крутящий момент — с 1222 до 1214 Нм.

Распределение плотности в поперечном сечении, проходящем через области с кавитацией, показано на рис. 2.374, а объемная доля пара — на рис. 2.375. Как видно, проблемные зоны локализуются вблизи концов лопаток в зоне отрицательной кривизны, подтверждая прогноз, сделанный ранее на основе информации о распределении давления.

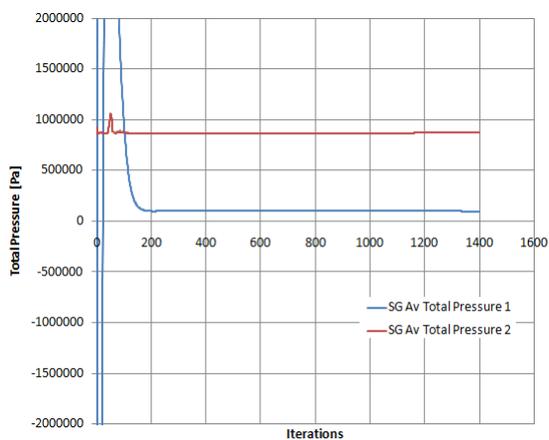


Рис. 2.372. Графики сходимости целей для модели без учета кавитации

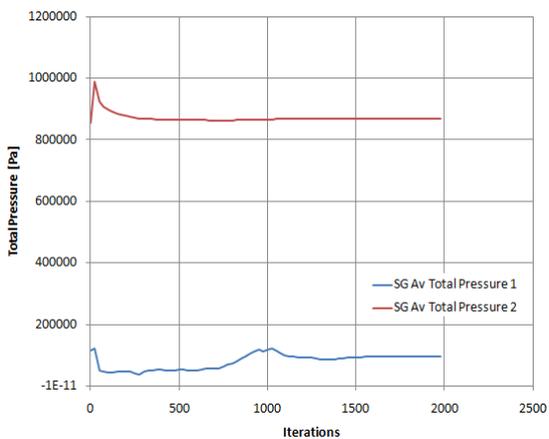


Рис. 2.373. Графики сходимости целей для модели с учетом кавитации

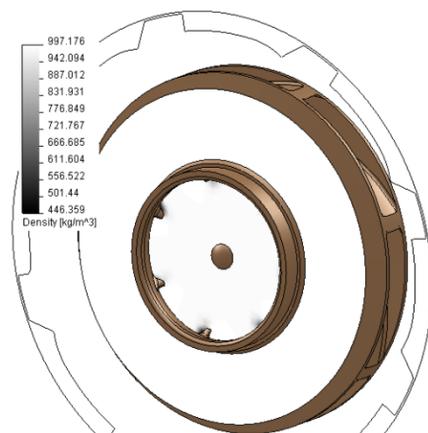


Рис. 2.374. Диаграмма плотности в поперечном сечении, проходящем через зоны кавитации

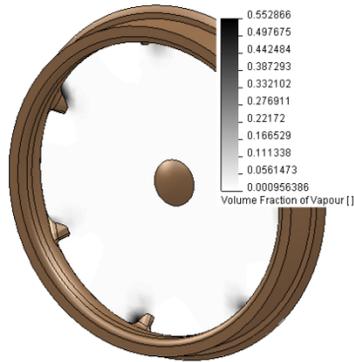


Рис. 2.375. Диаграмма распределения объемной доли пара в поперечном сечении

Интересующую функцию можно показать в виде распределения на поверхности колеса, как на рис. 2.376, а также в виде зон, в которых ее значение имеет величину в назначенном пользователем интервале (на рис. 2.377 это более 20%).

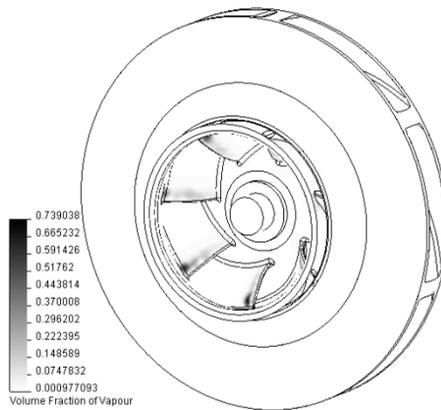


Рис. 2.376. Распределение объемной доли пара на поверхности колеса

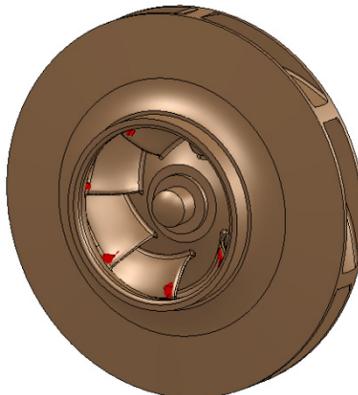


Рис. 2.377. Области с объемной долей водяного пара более 20%

Следует учесть, что попытка найти параметр **Volume Fraction of Vapor** (Объемная доля пара) среди доступных для отображения терпит неудачу. Дело в том, что списке **Parameter** (Параметр) изначально находятся не все из возможных параметров визуализации, а только основные. Чтобы сделать доступными и другие параметры, необходимо их включить в окне **Display Parameters** (Параметры визуализации) (рис. 2.378), вызываемом при нажатии кнопки **Parameter List** (Список параметров). Кроме того, список визуализируемых параметров можно расширить за счет добавления дополнительных параметров, которые задаются в виде функций (на основе стандартных математических операций) от стандартных единиц измерения Инженерной базы данных.

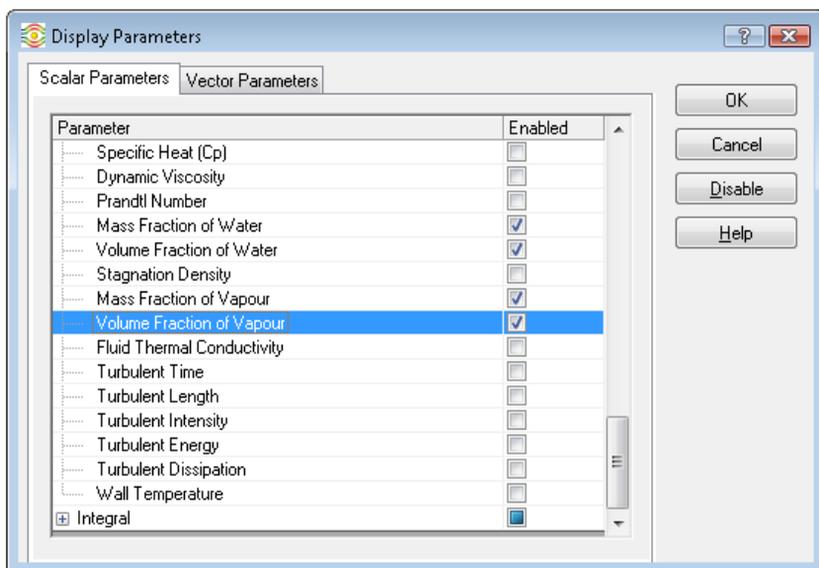


Рис. 2.378. Расширение списка параметров, доступных для визуализации

Специфические результаты, доступные при учете кавитации:

- Volume fraction of vapour — объемная доля пара;
- Mass fraction of vapour — массовая доля пара;
- Volume fraction of water — объемная доля воды (применительно к кавитационным эффектам);
- Mass fraction of water — массовая доля воды (применительно к кавитационным эффектам).

2.6.7. Выводы

Подводя итог задаче расчета центробежного насоса, можно сделать вывод о достаточной эффективности Flow Simulation для решения задач с вращающимися областями. Процедуры подготовки расчетной модели и сетки обладают малой трудоемкостью, а вычислительный процесс демонстрирует удовлетворительную сеточную сходимость.

2.7. Исследование гидропривода буровой установки

Целью данного раздела является построение модели гидравлического двигателя. Автор благодарен сотрудникам фирмы "ВНИИБТ-Буровой инструмент" (Пермь) за предоставленную геометрическую модель и взаимодействие в ходе решения задачи. Геометрическая модель в разрезе вертикальной плоскостью показана на рис. 2.379. Как видно, на входе жидкость поступает в направляющий аппарат, после которого попадает в рабочее колесо, которое приводит в движение пустотелый вал. Увеличенный фрагмент направляющего аппарата и турбины показан на рис. 2.380.

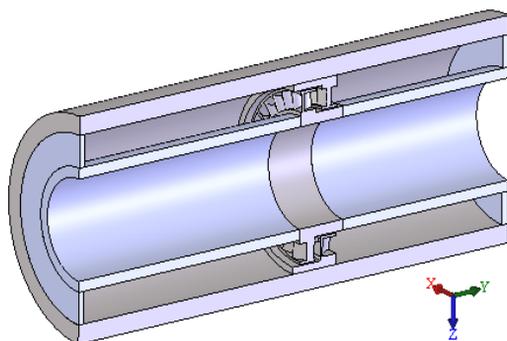


Рис. 2.379. Гидропривод — расчетная геометрическая модель в разрезе

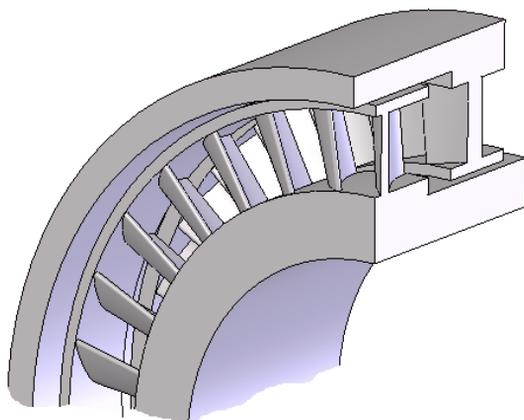


Рис. 2.380. Фрагмент рабочего колеса (на переднем плане) и направляющего аппарата

2.7.1. Постановка задачи

Ранее была рассмотрена задача для гидравлического насоса, где определяющей является расходно-напорная характеристика — зависимость напора от расхода при назначенной скорости вращения колеса. Остальные диаграммы являются произ-

водными от данной, а также от диаграммы зависимости между расходом и потребным для его реализации крутящим моментом.

В этом примере мы имеем дело с "пассивной" турбиной, когда существующий поток текучей среды приводит ее в движение, причем скорость стабилизируется из-за достижения равновесия между крутящим моментом, создаваемым турбиной, и моментом сопротивления приводимых во вращение устройств. Здесь одной из наиболее информативных (по крайней мере, с точки зрения имитации в расчете) является зависимость между числом оборотов турбины и создаваемым крутящим моментом при фиксированном расходе.

Остальные аспекты задачи в большинстве своем вполне аналогичны описанным для случая с активной турбиной.

2.7.2. Расчетная модель

Общие настройки проекта показаны на рис. 2.381–2.383. Учитывая, что в геометрической модели могут присутствовать полости, в частности, уплотнения, которые не обязательно учитывать в модели течения, активизируем опцию **Exclude cavities without flow conditions** (Исключить полости без граничных условий).

На иллюстрации видно, что активизирована опция **Gravity** (Гравитация), учитывающая переменную плотность. В данном случае этот эффект в силу большого расхода незначителен. Иногда (при малых расходах) он может быть вреден, поскольку порождает дополнительные конвективные токи, приводящие к вихрям на гранях с назначенным давлением. В конечном счете, это может привести к расходимости вычислительного процесса.

В качестве текучей среды назначаем воду: если рабочим телом является иная жидкость, то ее следует добавить в инженерную базу данных в группы **Liquids** (Жидкости) или **Gases** (Газы) с назначением необходимых характеристик.

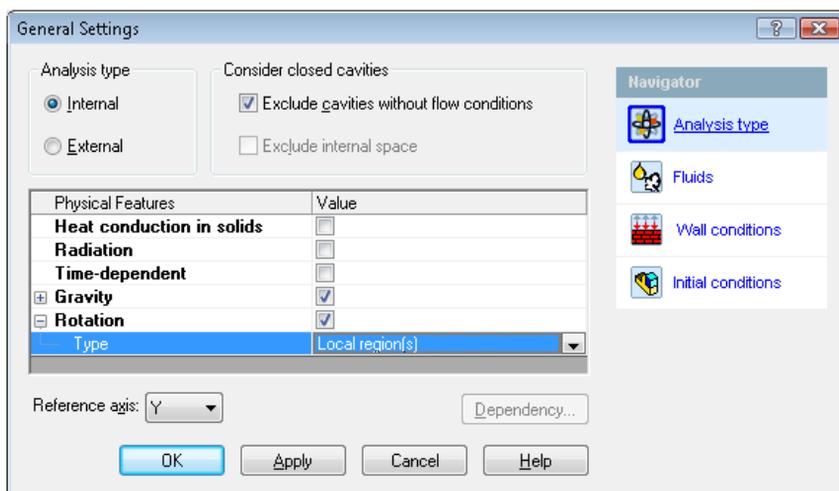


Рис. 2.381. Выбор внутренней задачи с локальными вращающимися областями

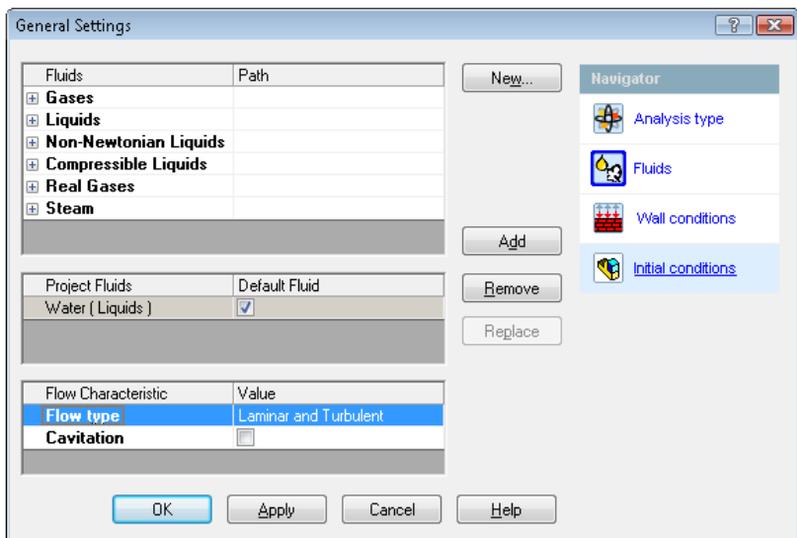


Рис. 2.382. Выбор текущей среды

Начальные условия оставляем назначенными по умолчанию (рис. 2.383). Здесь можно наблюдать активную опцию **Pressure potential** (Давление в точке отсчета). Если эта опция включена, то задаваемое в качестве начальных и граничных условий статическое давление рассматривается как давление в точке начала используемой в расчете глобальной системы координат проекта, а необходимое для проведения расчета абсолютное давление определяется по этому давлению как функция плотности, координат и гравитационного ускорения. В противном случае задаваемое в качестве начальных и граничных условий статическое давление рассматривается как абсолютное.

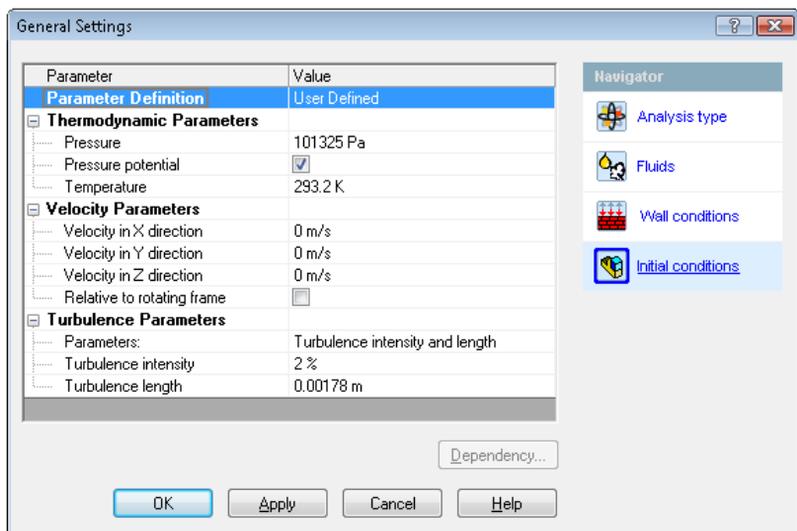


Рис. 2.383. Начальные условия

В задачах с насосами учитывать гравитационные эффекты имеет смысл, если точки входа и выхода расположены вдоль вектора силы тяжести (или, в общем случае, ускорения, порождаемого другими причинами) на значимом расстоянии.

Для имитации вращения создаем вспомогательную деталь (тело), охватывающую с некоторым запасом турбину. Следует обратить внимание, что диаметр тела превышает внутренний размер проходного сечения, а торец со стороны направляющего аппарата располагается примерно посередине зазора между ним и турбиной. Для "вращающейся" области назначаем угловую скорость и присваиваем телу атрибут **Disable** (Отключить), делая тело "прозрачным" для текучей среды (рис. 2.384).

Если какие-то грани попали, полностью или частично, во вращающуюся область, а в реальности неподвижны, то им следует посредством панели **Boundary Condition | Wall | Real Wall** (Граничное условие | Стенка | Реальная стенка) присвоить граничное условие **Stator** (Статор). Результат этих действий совместно с другими граничными условиями показан на рис. 2.385.

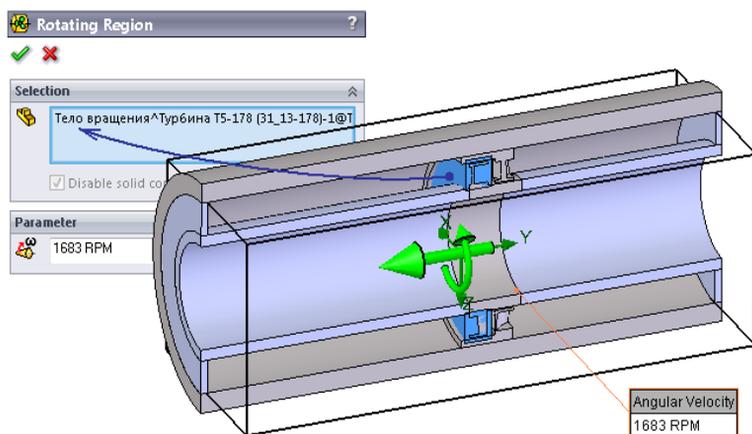


Рис. 2.384. Определение вращающейся области

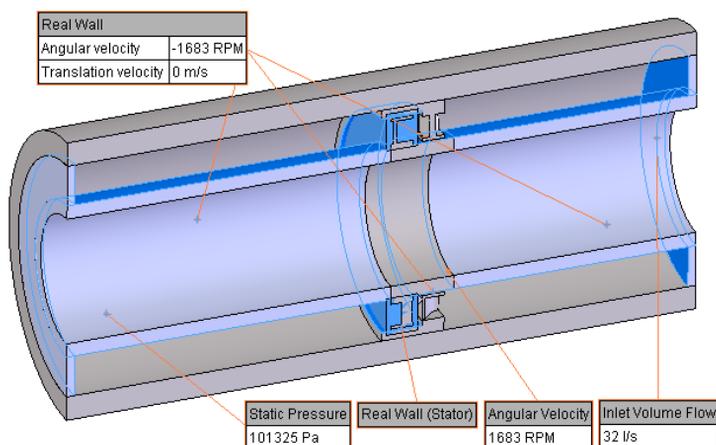


Рис. 2.385. Результат назначения граничных условий

В установках начальной сетки отключаем режим **Automatic settings** (Автоматические настройки), устанавливая число ячеек базовой сетки по координатам согласно рис. 2.387 (результат показан на рис. 2.386), критерии дробления сетки на поверхности раздела с текучей средой — согласно рис. 2.388, а дробление в узких каналах — до 3 ячеек при условии, что в системе можно реализовать уровень адаптации 6 (рис. 2.389).

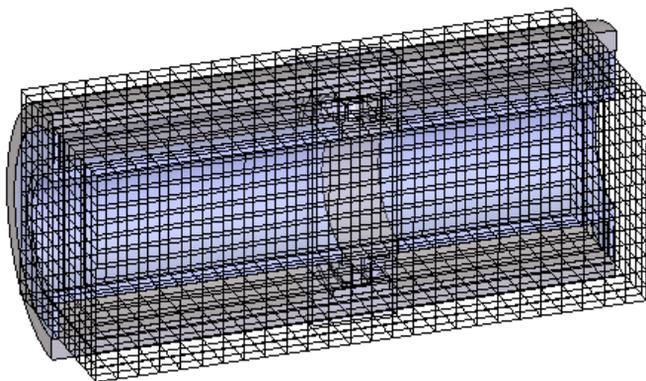


Рис. 2.386. Базовая сетка

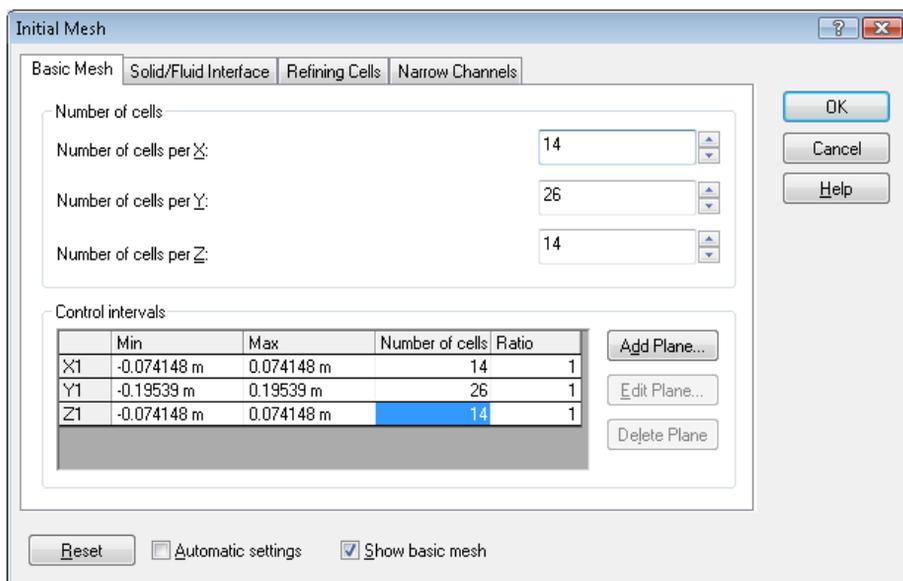


Рис. 2.387. Начальная сетка — параметры базовой сетки

Для более интенсивной адаптации сетки на рабочем колесе, направляющем аппарате и в зазоре между ними используем функционал **Local Initial Mesh** (Локальная начальная сетка) (рис. 2.390). Предварительно создаем деталь (тело), охватывающее данную область.

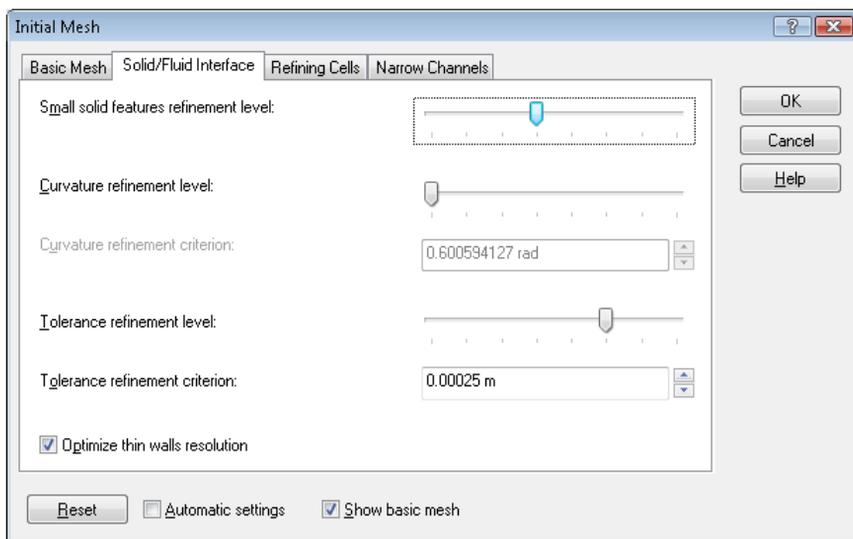


Рис. 2.388. Начальная сетка — вкладка **Solid/Fluid Interface** (Поверхность раздела твердых тел с текучей средой)

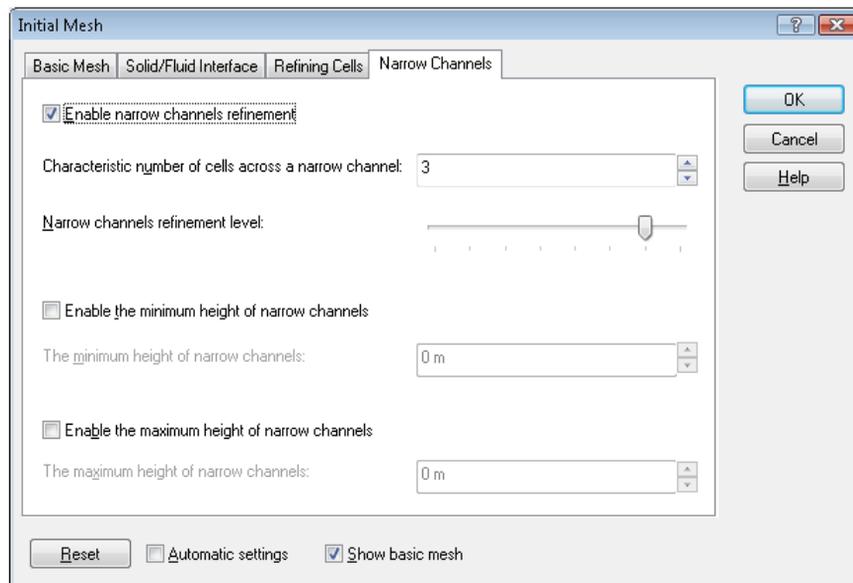


Рис. 2.389. Начальная сетка — вкладка **Narrow Channels** (Узкие каналы)

Повышаем до 6 (общая настройка была 5) уровень дробления ячеек по критерию захвата выступов поверхностей (**Tolerance refinement criterion**), дробим до уровня 2 все ячейки, попавшие в область (рис. 2.391), и повышаем до 4 желаемое число ячеек поперек узких каналов (рис. 2.393) с одновременным снижением (по отношению к глобальным настройкам) максимального уровня дробления (рис. 2.392).

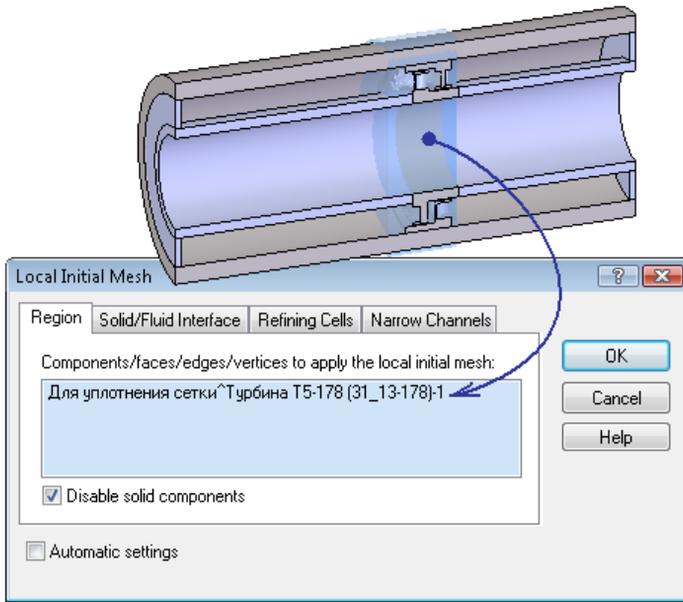


Рис. 2.390. Назначение области для локальной адаптации сетки

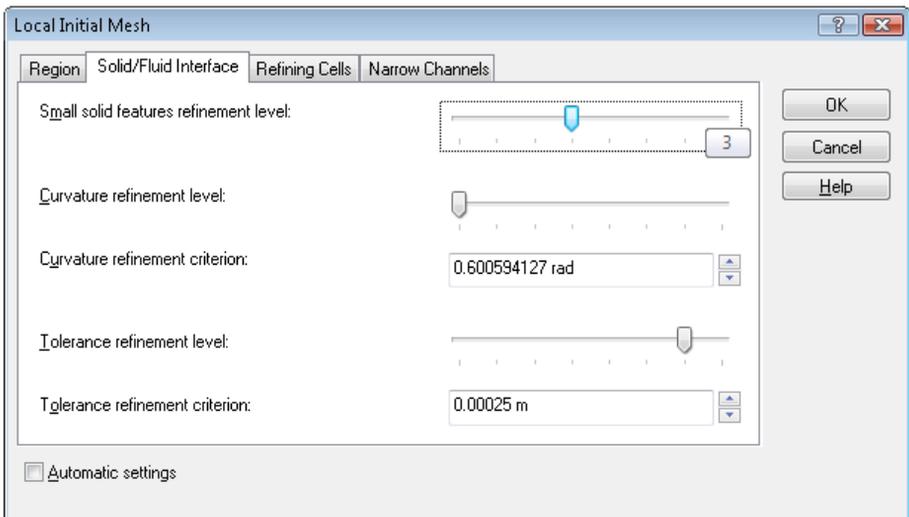


Рис. 2.391. Локальная начальная сетка — вкладка **Solid/Fluid Interface**
(Поверхность раздела твердых тел с текучей средой)

Результирующая сетка в вертикальном сечении и ее фрагмент показаны на рис. 2.394, 2.395. В ней получилось 350 006 жидкостных ячеек и 452 585 частичных ячеек. Относительно большая по сравнению с задачей для насоса размерность объясняется необходимостью смоделировать систему тонких каналов между деталями ротора и статора, где по толщине получились искомые четыре ячейки. В то же время отно-

сительно полученного результата сетка достаточно рациональна: вдоль лопатки присутствуют 10–12 ячеек. Напоминаем, что области действия алгоритмов могут пересекаться, поэтому один и тот же результат можно получить несколькими способами.

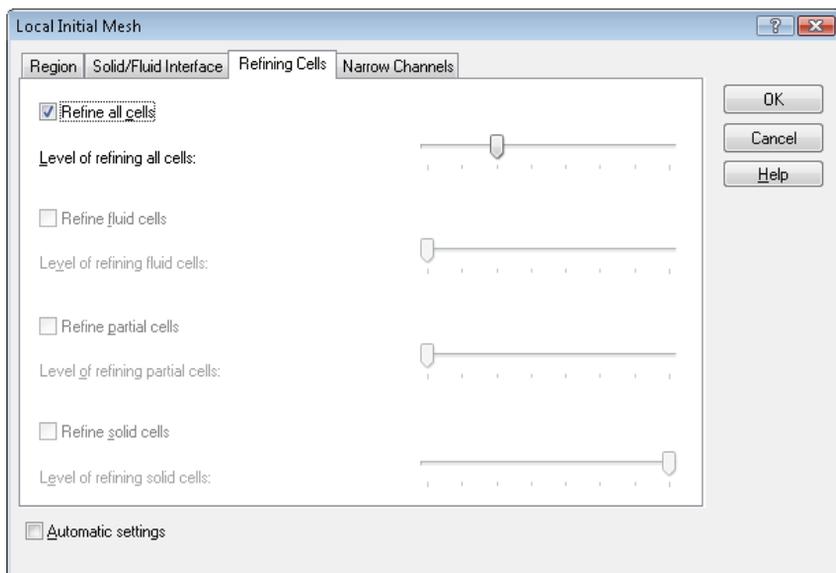


Рис. 2.392. Локальная начальная сетка — вкладка **Refining Cells** (Дробление ячеек)

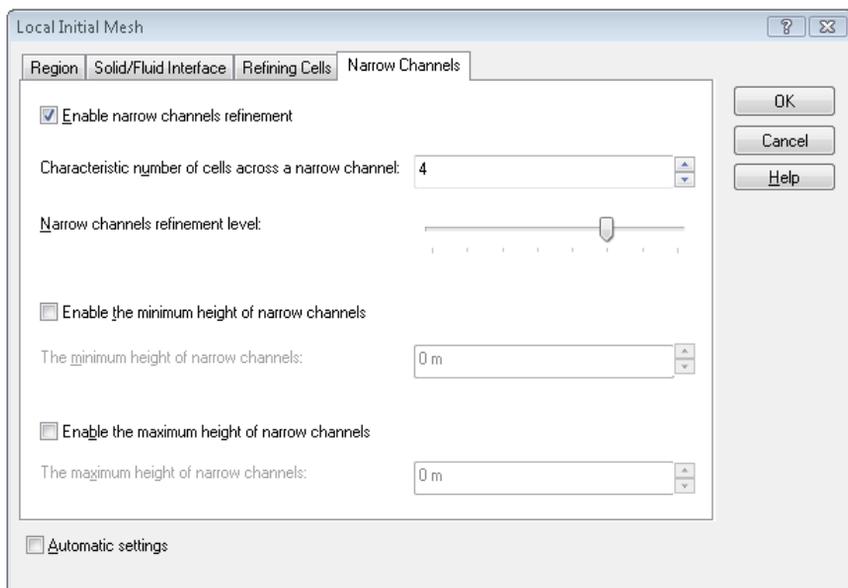


Рис. 2.393. Локальная начальная сетка — вкладка **Narrow Channels** (Узкие каналы)

Также с целью проверки сходимости задача решалась и на более редкой сетке. Мы не приводим соответствующие иллюстрации, ограничившись демонстрацией сравнения оценок результирующих характеристик устройства.



Рис. 2.394. Сетка в сечении вертикальной плоскостью

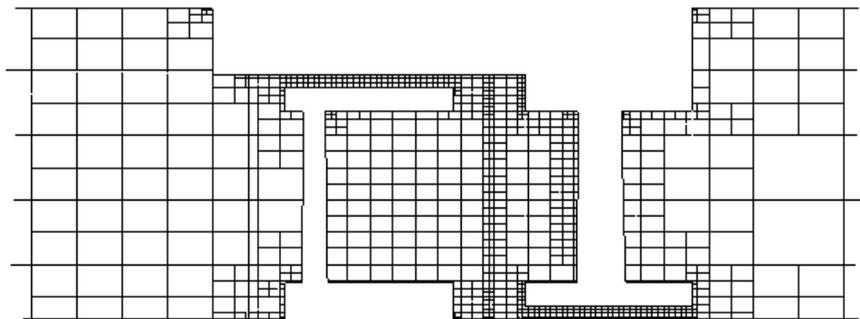


Рис. 2.395. Сетка в сечении вертикальной плоскостью — фрагмент

В качестве "обязательных" (в смысле функционально необходимых для данной задачи) целей используем разницу полного давления между входом и выходом, а также крутящий момент и осевую силу на колесе (его гранях).

2.7.3. Результаты и их интерпретация

В целом данная задача не продемонстрировала каких-либо сюрпризов в ходе решения, проявив стабильную и быструю сходимость. Соответствующая диаграмма для разницы динамических давлений между входом и выходом показана на рис. 2.396. Надо сказать, что для силовых факторов, момента и осевой силы, сходимость наступает еще раньше. Однако визуальная оценка может быть сделана, исходя из того, что после достижения сходимости выполнено несколько сот итераций: был определен критерий завершения процесса, требующий помимо собственно сходимости также и выполнения некоторого заведомо большого числа итераций.

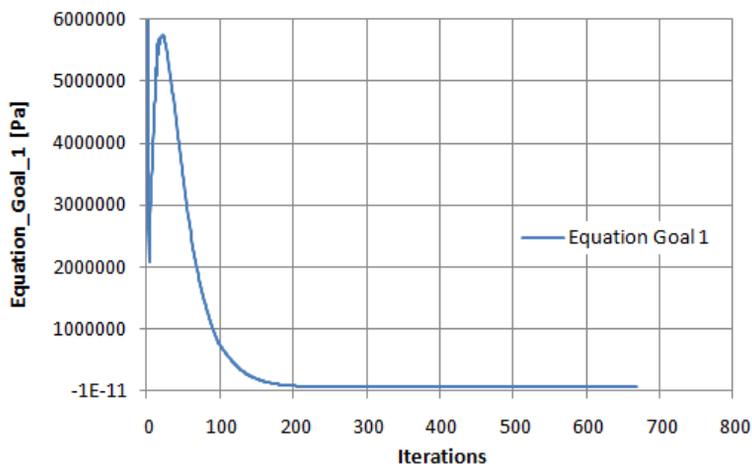


Рис. 2.396. График сходимости цели — разницы динамических давлений

Распределение скорости в продольном сечении показано на рис. 2.397, а статического давления — на рис. 2.398. Давление на фоне линий тока показано на рис. 2.399. Как видно, поток приобретает крутку, причем она начинает проявляться еще до направляющего аппарата, зарождаясь практически у входа в трубу. Это говорит о том, что входной участок трубы не может быть меньше, чем присутствующий в модели (1,5 диаметра среднего проходного сечения). Если присмотреться к диаграмме более внимательно, то можно увидеть, что на входном отрезке крутка развивается более интенсивно вблизи вала. Тому есть очевидное объяснение: внутренняя труба вращается вместе с турбиной, а поток, обладая вязкостью, раскручивается вместе со стенкой, к которой он (по модели течения) полностью прилипает. Это является дополнительным аргументом в пользу более длинных "заходных" участков, чтобы течение перед попаданием в возмущенную зону приобрело установившийся характер.

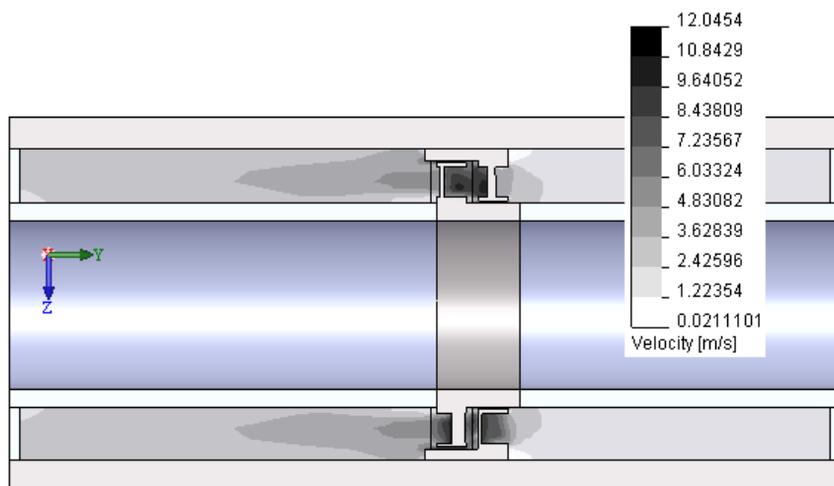


Рис. 2.397. Продольное сечение поля скорости

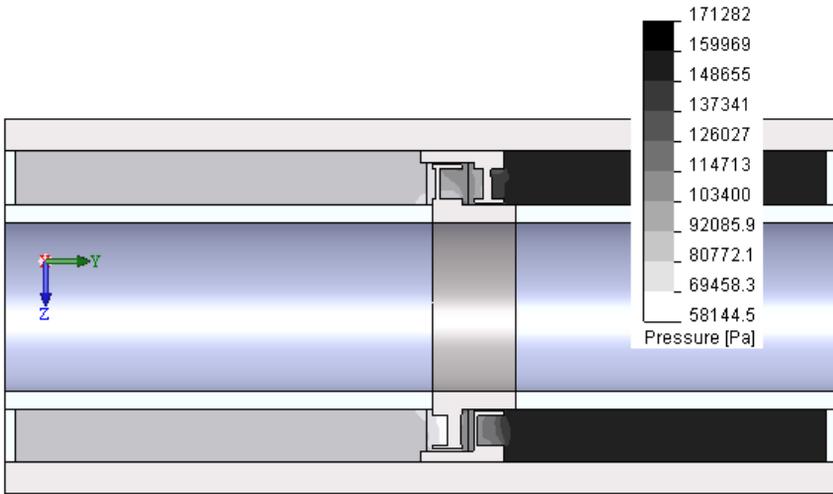


Рис. 2.398. Продольное сечение поля статического давления

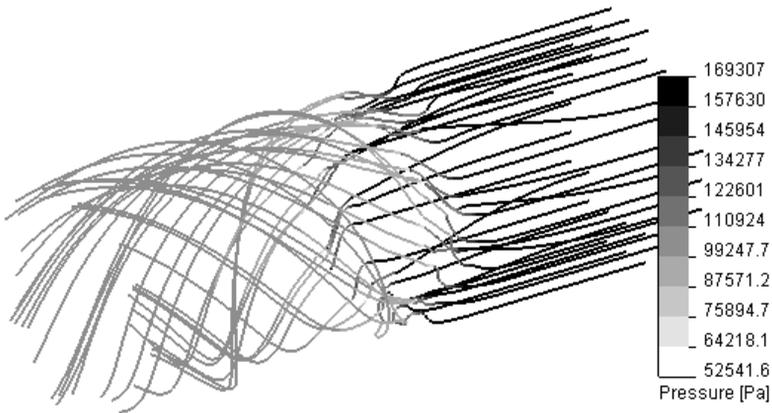


Рис. 2.399. Статическое давление на фоне линий тока

Результат нескольких расчетов, отличающихся различной (назначенной) величиной скорости вращения (об./мин), в виде диаграмм крутящего момента и осевой силы показан на рис. 2.400, 2.401. Как видно, график момента является прямой линией, которая хорошо коррелирует с результатами эксперимента. При измельчении сетки соответствие становится практически идеальным. После достижения скоростью вращения некоторой величины момент становится равным нулю. Это соответствует свободному вращению турбины, когда вращающее усилие, создаваемое потоком, равно моменту, порождаемому силами сопротивления. Более высокая (назначаемая) скорость вращения порождает отрицательный момент. Физический смысл этой величины в том, что для поддержания такой угловой скорости требуется прикладывать крутящий момент в противоположном направлении, то есть двигатель превращается в своего рода насос.

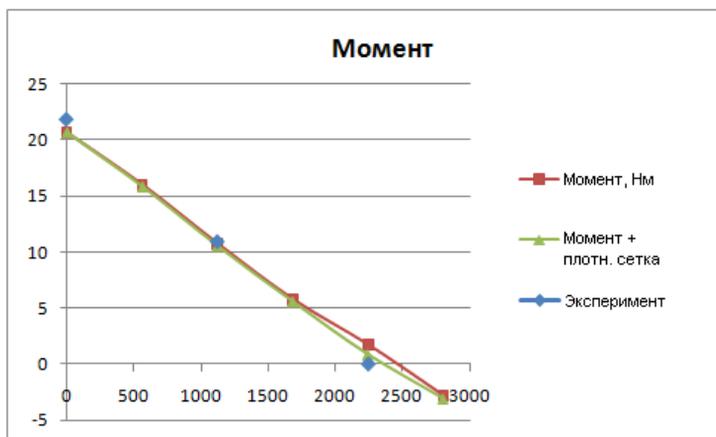


Рис. 2.400. Зависимость крутящего момента на турбине от скорости вращения

Зависимость осевой силы от скорости вращения имеет менее тривиальный характер. Понятно, что с ее увеличением до состояния свободного вращения (применительно к воздушным винтам это состояние называется авторотацией) осевая сила, связанная с гидравлическим сопротивлением системы, уменьшается. Величина уменьшения составляет около 23–24%. Однако при приближении к равновесному состоянию процесс уменьшения замедляется — на графике для модели с более плотной сеткой присутствует перегиб. Продолжать исследование при еще более высокой угловой скорости неразумно.

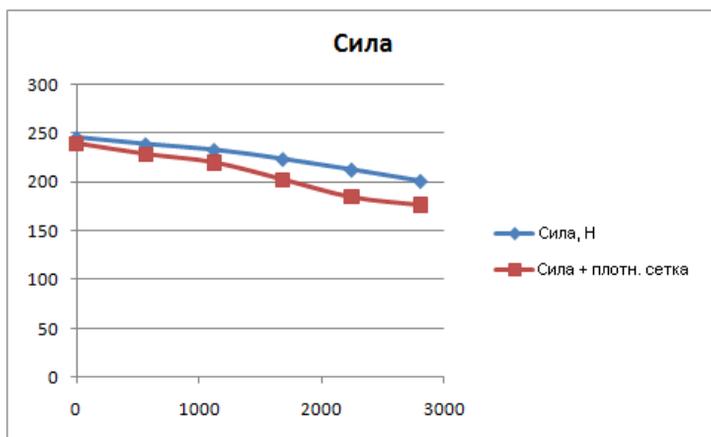


Рис. 2.401. Зависимость осевой силы от скорости вращения

2.7.4. Выводы

Данный пример демонстрирует степень пригодности Flow Simulation для решения задач с "пассивными" вращающимися объектами. Учитывая достаточную степень сложности геометрии, наличия направляющего аппарата, узких каналов, вращающе-

гося вала, возможность получить достоверный прогноз характеристик изделий с относительно малыми, во всех смыслах, затратами — крайне позитивный факт.

2.8. Газодинамика автомобильного турбокомпрессора

Целью данного раздела является построение гидравлической модели радиального турбокомпрессора. Автор благодарит сотрудников ЗАО "НПО ТУРБОТЕХНИКА" (Протвино) за предоставленную геометрическую модель и результаты эксперимента.

2.8.1. Постановка задачи

Требуется исследовать работу конструкции в режиме, когда окружная скорость на внешней части рабочего колеса составляет 450 м/с. Результатом моделирования должна быть рабочая кривая компрессора — повышение давления в зависимости от приведенного к атмосферному давлению расхода воздуха на входе. Под повышением давления будем понимать отношение статического (без учета скоростного напора) давления на выходе относительно статического же давления на входе. Также должна быть собрана первичная информация, позволяющая определить коэффициент полезного действия агрегата.

Внешний вид расчетной геометрической модели с различных сторон показан на рис. 2.402, 2.403.

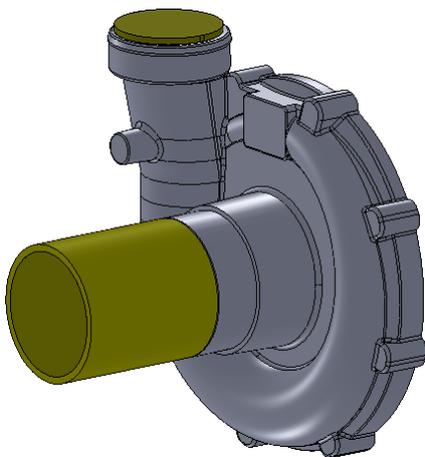


Рис. 2.402. Турбокомпрессор — вид спереди

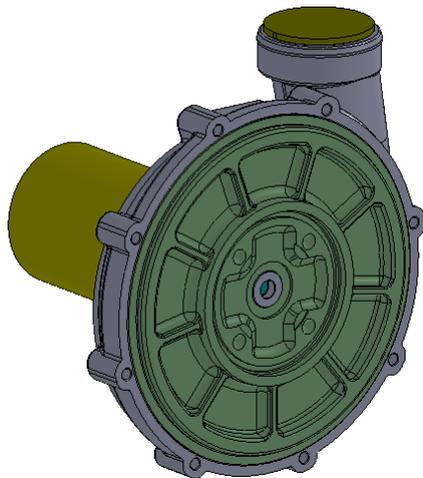


Рис. 2.403. Турбокомпрессор — вид сзади

Разрез вертикальной плоскостью показан на рис. 2.404. Как видно, конструкция имеет полуоткрытое рабочее колесо с осевым входом (отдельно оно показано на рис. 2.405) и безлопаточный диффузор в виде улитки (рис. 2.406).

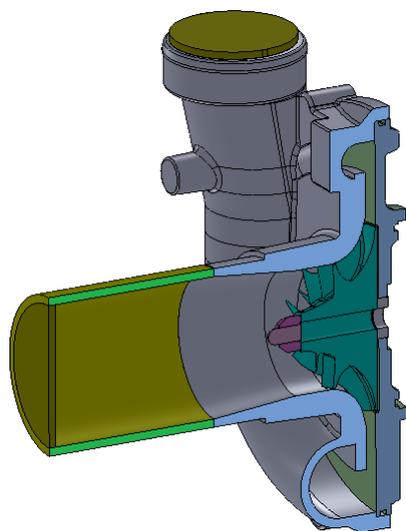


Рис. 2.404. Разрез продольной вертикальной плоскостью

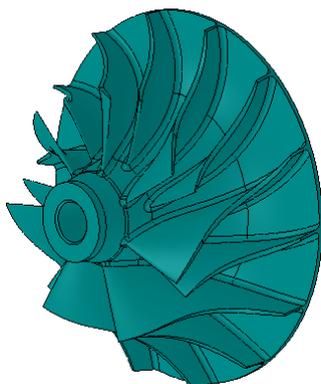


Рис. 2.405. Рабочее колесо

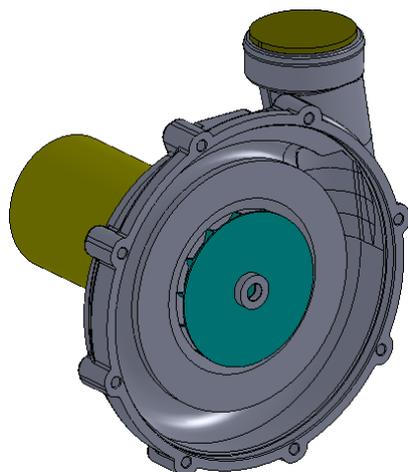


Рис. 2.406. Разрез поперечной плоскостью в зоне диффузора

2.8.2. Расчетная модель

Подготовленная разработчиками устройства геометрическая модель оказалась вполне корректной. Поэтому адаптация для расчета состояла в дополнении ее входным патрубком с заглушкой и приложением заглушки к выходу из диффузора. Отметим, что входной патрубок выполнен достаточно коротким, это объясняется малой вязкостью рабочей среды, из-за чего во всех мыслимых режимах крутка потока не достигнет входа (имеется в виду вход в геометрическую модель).

Поскольку предполагается расчет с вращающимися областями, в окне **General Settings** (Общие установки) на странице **Analysis type** (Тип задачи) активизируем опцию **Rotation** (Вращение) в варианте **Local region(s)** (Локальные области), предполагающую осевую симметрию вращающихся объектов и произвольную (с учетом соответствующих требований Flow Simulation к симметрии потока, входящего во вращающуюся область) форму остальных объектов (рис. 2.407). Также активизируем опцию **Exclude cavities without flow conditions** (Исключить полости без граничных условий), исключающую анализ течения в полостях, в которых не будут поставлены какие-либо граничные условия.

Решаем внутреннюю (Internal) задачу.

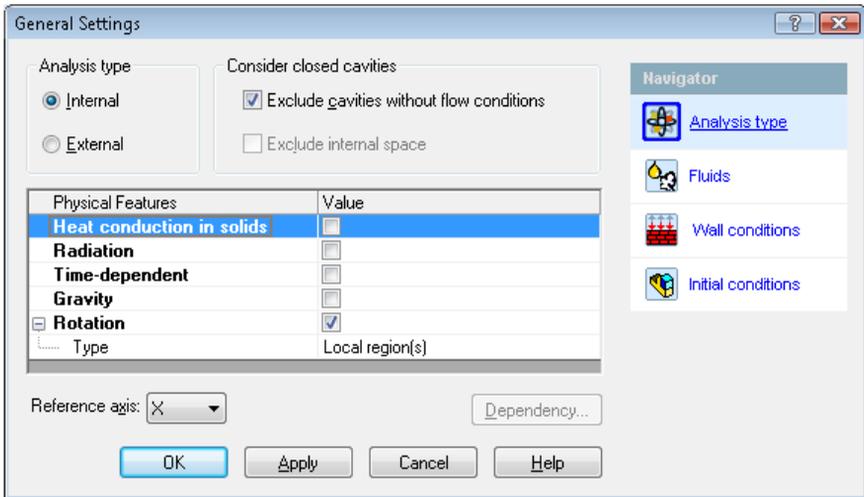


Рис. 2.407. Внутренняя задача с вращающимися областями

На странице **Fluids** (Текучие среды) для условия **Default wall thermal condition** (Тепловое условие на стенках по умолчанию) принимаем вариант **Wall temperature** (Температура стенки). Дело здесь в том, что нагрев воздуха в турбине имеет два источника. Первый — собственно сжатие, второй — внутреннее трение (Flow Simulation реализует вязкую модель течения). Последний фактор особенно актуален в узкой щели между плоскими стенками колеса и корпуса. Если условиться об адиабатичности стенок, то из-за того, что эта зона является "тупиковой" полостью, теплообмен посредством массопереноса будет незначительным. Тогда возникает самовозбуждающийся процесс: нагрев, рост вязкости из-за нагрева, увеличение интенсивности выделения тепла. Вязкость воздуха при атмосферном давлении при нагреве от 300 °К до 400 °К возрастает примерно на 30%.

В таком случае для нашей модели температура в полости может превысить 500 °С. Это нереалистично ввиду того, что при таких температурах существенную роль начинает играть теплообмен среды с корпусом через стенки. Разумеется, исчерпывающим инструментом было бы совместное решение задачи теплопроводности и течения — включается опция **Heat conduction in solids** (Теплопередача в твердых

телах). Это, однако, потребовало бы нерационально больших вычислительных ресурсов при незначительном — для данной задачи — повышении качества.

Поэтому принимаем (волевым путем), что внутренние стенки имеют (по умолчанию) температуру 40 °С, которая в дальнейшем может быть переопределена для отдельных стенок. Более точная величина температуры может быть заимствована из эксперимента или же получена (оценена) расчетом посредством модели с учетом теплопроводности тел. Здесь полезным может быть использование процедуры "замораживания" течения, когда его параметры заимствуются из модели с течением, но предполагается, что параметры среды неизменны, а учитывается только эффект теплопроводности и — факультативно — теплообмен излучением. Последнее для данной задачи абсолютно необязательно.

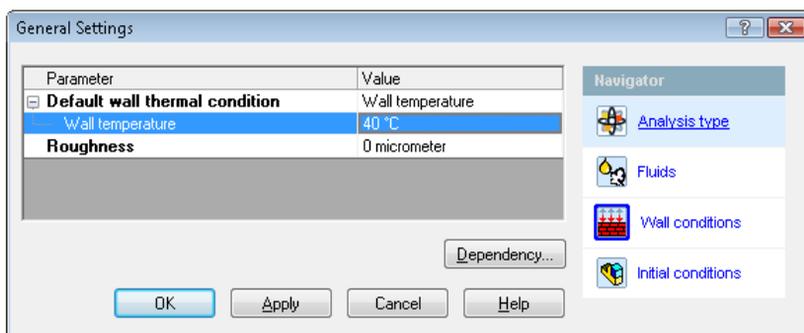


Рис. 2.408. Назначение температуры стенок по умолчанию

Как и в предыдущих задачах с вращающимися областями, предварительно нужно создать деталь/тело, охватывающую все грани, принадлежащие вращающимся телам, за исключением, быть может, граней, полученных поворотом относительно оси, совпадающей с осью вращения (не имеющей разрывов в окружном направлении).

В данном случае (рис. 2.409) вспомогательное тело полностью охватывает рабочее колесо, проникая в окружающие детали. Это сделано потому, что размещать границу вспомогательного тела в зазоре между колесом и корпусом не рекомендуется, если зазор достаточно малый, и между наружными гранями колеса и охватывающими гранями вспомогательного тела не удастся построить несколько (в идеале 3–4) полных или частичных ячеек текучей среды. В конкретном случае зазор небольшой, поэтому среду, в нем протекающую, "относим" к вращающейся области.

При назначении вращающейся области определяем угловую скорость всех объектов, заключенных в ней.

Отметим, что в панели команды **Rotating Region** (Вращающаяся область) была отмечена опция **Disable solid components** (Деактивировать твердые тела), делающая соответствующее тело прозрачным для текучей среды.

Поскольку в тело, определяющее вращающиеся объекты, попали (полностью или частично) грани, принадлежащие неподвижным телам, то следует в явном виде переопределить граничные условия, порожденные условием **Rotating Region** (Вращающаяся область). Для этого используем граничное условие **Wall** (Стенка) в

варианте **Real Wall** (Реальная стенка) с опцией **Stator** (Статор). Соответствующие стенки показаны на рис. 2.410. Как видно, в избранное множество были включены грани, которые целиком или фрагментами пересеклись с "вращающимся" телом.

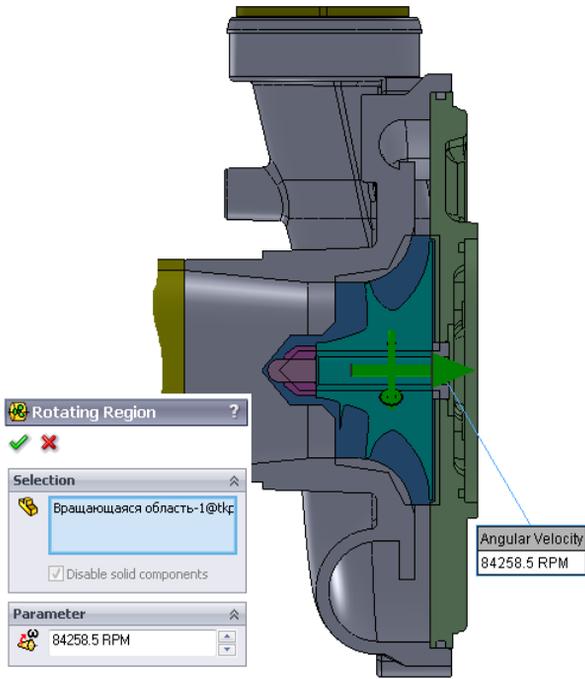


Рис. 2.409. Определение вращающейся области

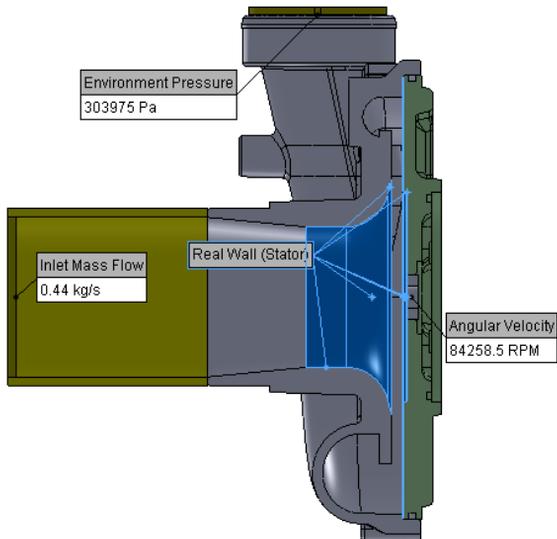


Рис. 2.410. Граничные условия

На той же иллюстрации показан результат применения граничных условий к входу и выходу. Здесь принципиальным является вопрос о том, какое сочетание условий "вход-выход" является уместным в данном случае. С точки зрения здравого смысла, мы должны были бы назначить давление на входе и расход на выходе. Кстати говоря, подобное сочетание рекомендуется реализовать в варианте "полное давление" или "давление окружающей среды" в сочетании с массовым расходом. Если система "обнаружит", что грань, для которой назначено давление Environment Pressure (Давление внешней среды), является именно входом, то соответствующее давление будет интерпретировано как полное давление. Выходное условие в виде массового (а не объемного расхода или скорости) рекомендуется назначать потому, что оно непротиворечиво интерпретируется алгоритмом в ситуации, когда в процессе течения изменяется плотность среды и на выходе присутствует сложный профиль скорости.

Однако в данном случае оптимальное (с точки зрения конкретной задачи) сочетание граничных условий оказалось неработоспособным. Это выражается в расходимости вычислительного процесса, завершающейся аварийной остановкой решателя. Расчет становится крайне чувствительным к параметрам сетки и собственно условиям.

По этой причине остается прибегнуть к "типовой" комбинации условий: расходу (в данном случае массовому) на входе и статическому давлению (в варианте "давление окружающей среды") на выходе. Очевидным следствием является то, что давление на входе будет результатом расчета, отличающимся, само собой, от атмосферного давления. По сравнению с задачей для гидравлического центробежного насоса, этот факт является существенно более негативным. Дело в том, что используется сжимаемая модель газа, в которой свойства существенно зависят от давления (в том диапазоне его изменения, который существует в данной задаче). Поэтому обязательной является адаптация граничных условий (давления на выходе) к требуемому давлению на входе. Если более конкретно, то после расчета и идентификации статического давления на входе разница между расчетной величиной и требуемой (атмосферным давлением) вычитается из назначенного давления на выходе с повторением расчета.

Возникает закономерный вопрос о том, какую величину давления следует назначать на выходе в качестве первой оценки. Здесь, в идеале, нужно иметь "хорошее" приближение для характеристики компрессора, извлекая из расходно-напорной кривой величину повышения давления и, соответственно, оценочного давления на выходе. Если же кривая строится впервые, то для всех рассчитываемых расходов назначаем произведение максимального (оценочного же) повышения давления на атмосферное давление.

Панели с граничными условиями на входе и выходе показаны на рис. 2.411.

Параметры начальной сетки и ее вид в вертикальном продольном сечении показаны на рис. 2.412. Как видно, используется именно автоматическая начальная сетка с уровнем 3.

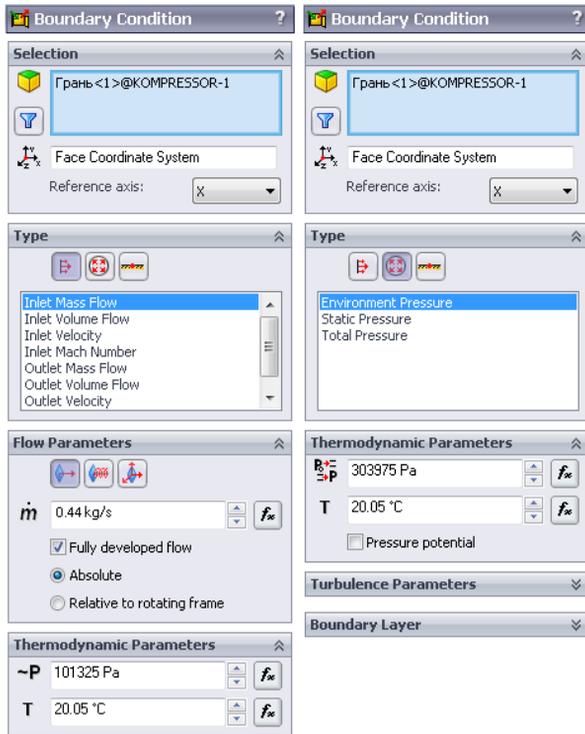


Рис. 2.411. Граничные условия на входе и выходе

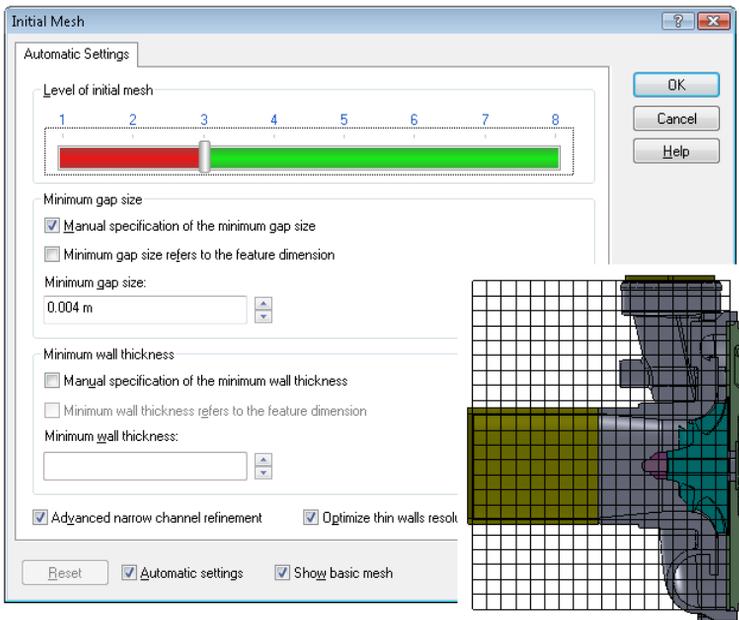


Рис. 2.412. Настройки начальной сетки и сама начальная сетка

Адаптацию (уплотнение) начальной сетки осуществляем в характерных объемах, описывающих канал. Первый из них — для этого было создано вспомогательное тело (деталь), покрывает зазор между рабочим колесом и корпусом. Это тело вращения с толщиной, позволяющей "внедрить" его в тела корпуса и колеса (рис. 2.413). Там же показаны настройки **Local Initial Mesh** (Локальной начальной сетки), ассоциированной с этим телом (как водится, нужно данному телу присвоить атрибут **Disable** (Отключено), превращающий его в прозрачное для текущей среды). Характерной настройкой, управляющей плотностью ячеек текущей среды, здесь является **Refine fluid cells** (Дробить все ячейки в текущей среде) — установлен уровень 5 — и **Tolerance refinement level** (Уровень разрешения сеткой выступов поверхности), для которого установлен уровень 2 при величине **Tolerance refinement criterion** (Критерий разрешения сеткой выступов поверхности) равной 1,25 мм. Эта величина задает допустимую максимальную выпуклость (то есть допустимое максимальное расстояние) h поверхности модели в ячейке относительно плоского многоугольника, аппроксимирующего данную поверхность в ячейке.

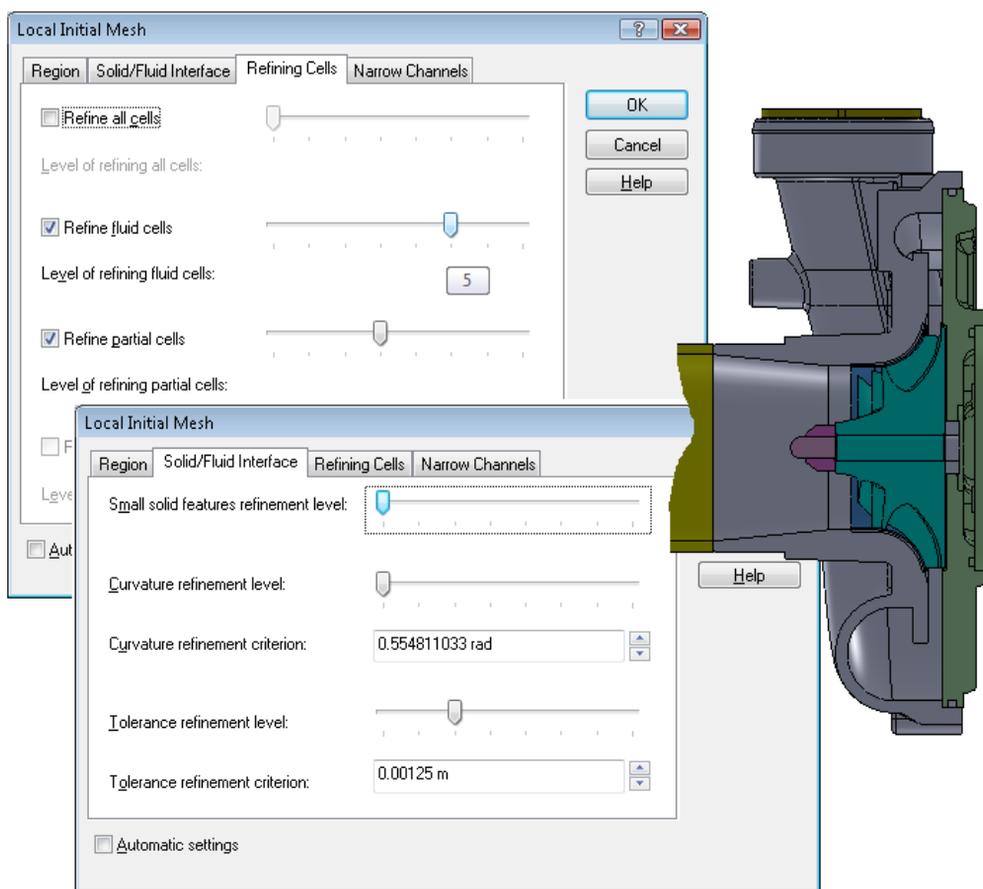


Рис. 2.413. Параметры адаптации сетки в теле, описывающем зазор между колесом и корпусом

Еще одна зона адаптации сетки — область в окрестности колеса, включая зазор между стенкой колеса и корпусом, а также диффузор. Здесь также используется вспомогательное (прозрачное для среды) тело. Параметры адаптации сетки показаны на рис. 2.414. Как видно, ползунковый регулятор **Small solid feature refinement level** (Уровень разрешения сеткой мелких особенностей модели) установлен в положение 3. Этот элемент управления предназначен для удовлетворения критерия разрешения начальной расчетной сеткой мелких особенностей модели. Он требует, чтобы максимальный угол между нормальными к поверхности модели в расчетной ячейке не превышал 120° .

Регулятор **Curvature refinement level** (Уровень разрешения сеткой кривизны поверхности) задает допустимый максимальный уровень дробления ячейки базовой сетки для удовлетворения критерия разрешения начальной расчетной сеткой кривизны поверхности модели. В данном случае он установлен в положение 3 при величине **Curvature refinement criterion** (Критерий разрешения сеткой кривизны поверхности), равной 0,1 рад. С точки зрения геометрического смысла данный параметр — это допустимый максимальный угол (в радианах) между нормальными 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. Этот критерий в определенных ситуациях (параметрах геометрии) пересекается по функциональности с критерием **Small solid feature refinement level**.

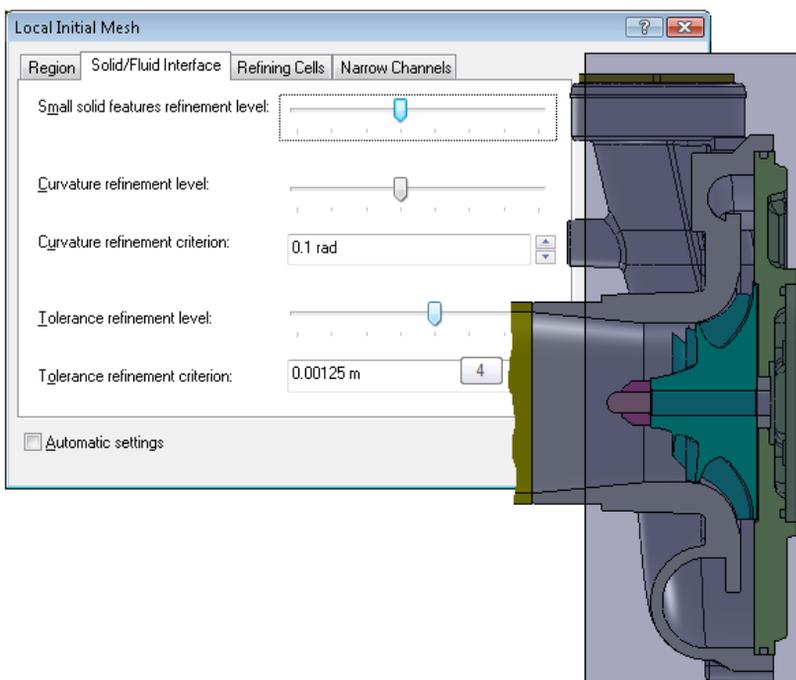


Рис. 2.414. Настройки сетки на поверхности раздела твердых тел с текучей средой

На вкладке **Refining Cells** (Дробление ячеек) (рис. 2.415) устанавливаем регулятор, определяющий дробление текучей среды, в первое положение и дробление частичных ячеек — во второе. Также на вкладке **Narrow Channels** (Узкие каналы) запрашиваем, чтобы генератор сетки постарался расположить поперек таких каналов пять ячеек при допустимом уровне дробления 5. В данном случае конкретизировать границы размеров, определяющих, является ли канал "узким", мы не будем, поскольку все каналы, присутствующие в модели, должны быть качественно разрешены сеткой.

В качестве целей определяем необходимые характеристики, в частности статическое давление на входе и выходе. На основе этих двух целей создаем **Equation Goal** (Функциональную цель), являющуюся повышением давления. Также в число целей включаем крутящий момент на гранях вращающихся объектов (рис. 2.416), среднюю и максимальную скорость текучей среды (эти две цели будут полезны для контроля сходимости), ряд других параметров состояния. В число "обязательных" в данной ситуации целей входит массовый расход на выходе, контролирующий соблюдение закона сохранения массы.

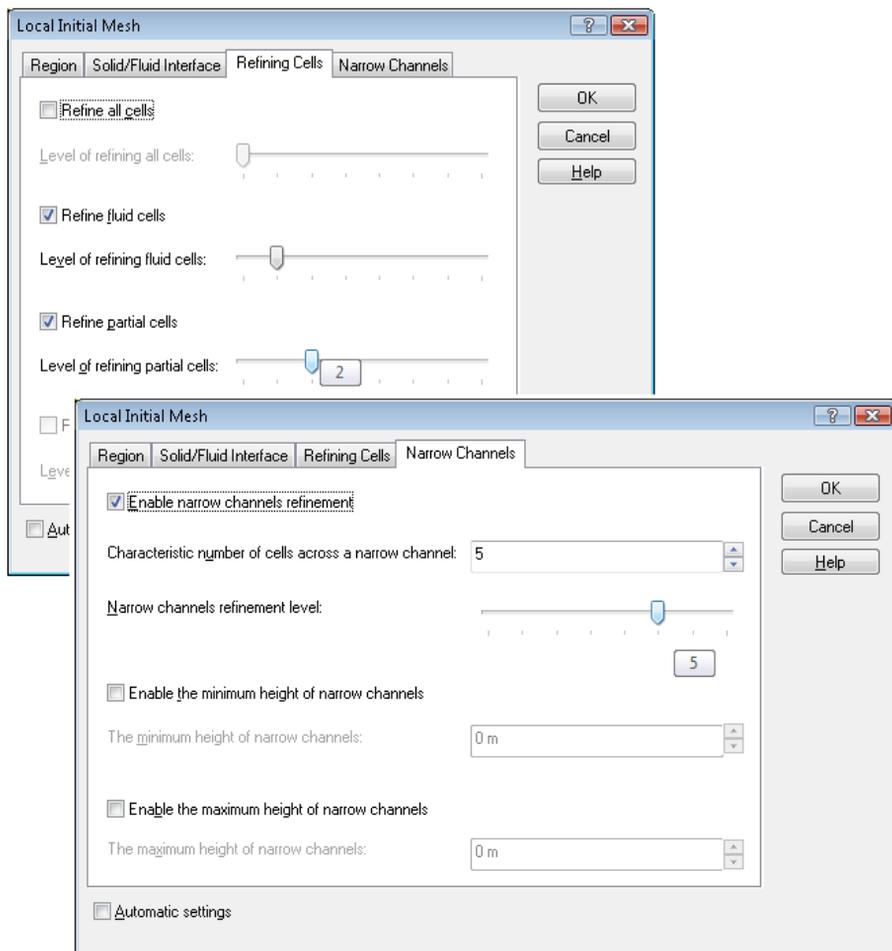


Рис. 2.415. Адаптация сетки в узких каналах

Для предотвращения преждевременного автоматического останова расчета необходимо заранее (это можно сделать и после начала расчета через окно монитора) в диалоговом окне **Calculation Control Options** (Опции управления расчетом) задать условие **If all are satisfied** (Если все цели удовлетворены) и заведомо большое максимальное число итераций (Maximum iterations) (рис. 2.417). Этот прием особенно актуален, в частности, для задач с вращающимися объектами (похожая ситуация складывается также в моделях с естественной конвекцией, смешиванием сред, кавитацией), когда формальная сходимость, основанная на программных критериях, не есть сходимость фактическая.

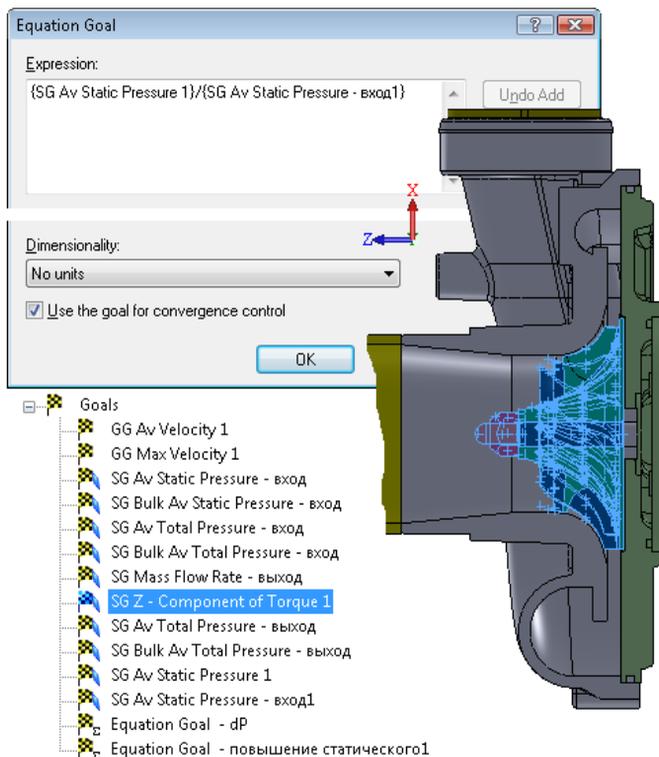


Рис. 2.416. Цели проекта

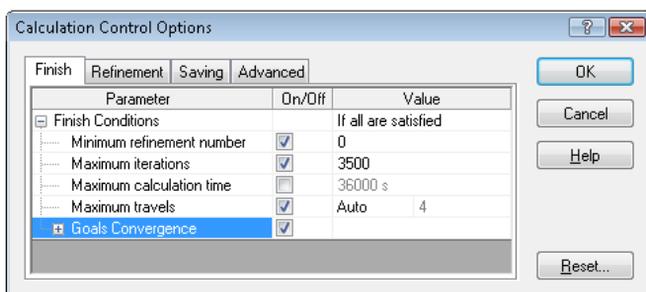


Рис. 2.417. Переопределение критериев завершения расчета

2.8.3. Результаты и их интерпретация

Расчетная сетка в различных сечениях и ее фрагменты показаны на рис. 2.418–2.420. Как видно, в зазорах между колесом и корпусом располагается около трех ячеек. Это недостаточно для получения точной картины течения в зазоре, однако позволяет получить принципиальную оценку происходящего.

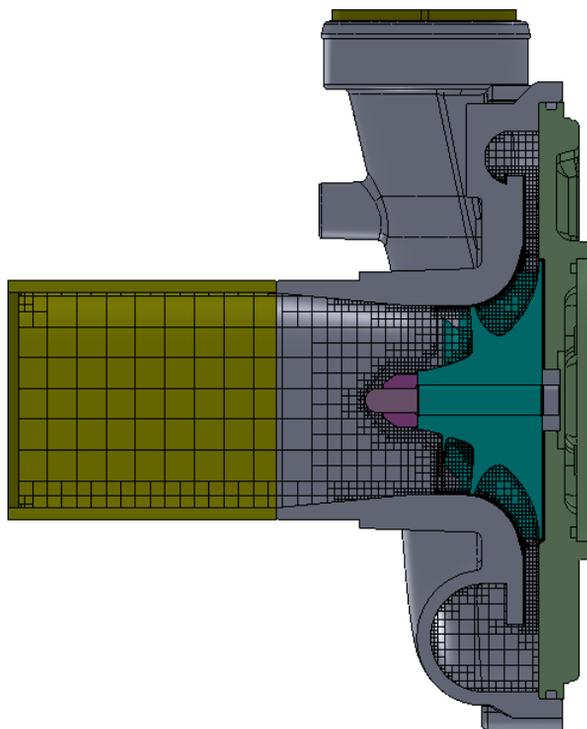


Рис. 2.418. Расчетная сетка в вертикальном продольном сечении

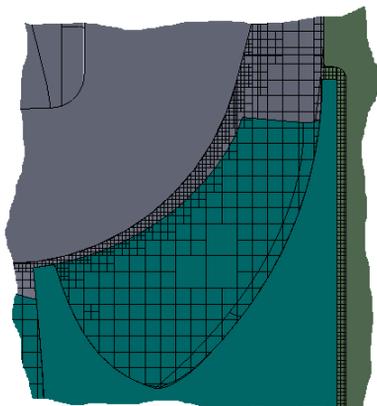


Рис. 2.419. Фрагмент сетки в окрестности зазоров между колесом и корпусом

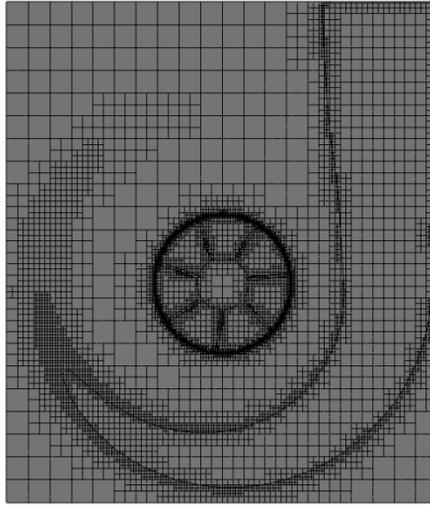


Рис. 2.420. Расчетная сетка в поперечном сечении, проходящем через диффузор и рабочее колесо

Окно **Results Summary** (Отчет по результатам) показано на рис. 2.421. Как видно, сетка содержит около 1 млн жидкостных и частичных жидкостных ячеек. Есть предупреждение о том, что выявлено значительное число ячеек, где течение является сверхзвуковым.

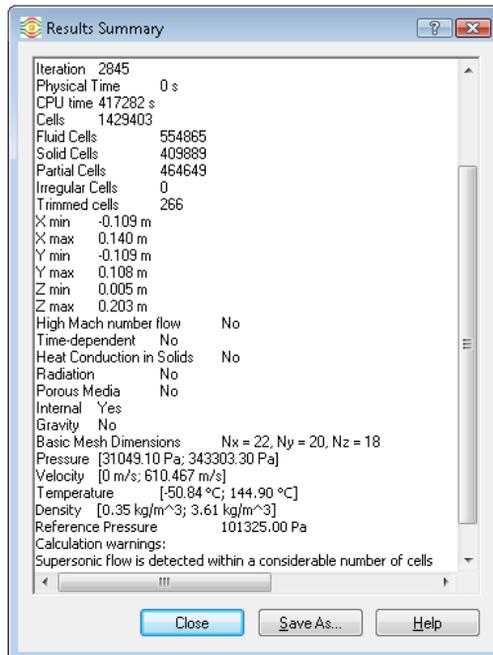


Рис. 2.421. Протокол расчета

Характерные кривые целей: повышения статического давления и массового расхода на выходе приведены на рис. 2.422, 2.423. Обратите внимание, что первый график имеет абсциссой **Travels** (Продувки), которые более объективно характеризуют сходимость процесса (применительно к данной системе). Как видно, потребовалось более десяти продувок для достижения сходимости по критерию повышения давления. Стабилизация массового расхода произошла гораздо быстрее, однако для этого выполнено около 250 итераций, что соответствует примерно одной продувке.

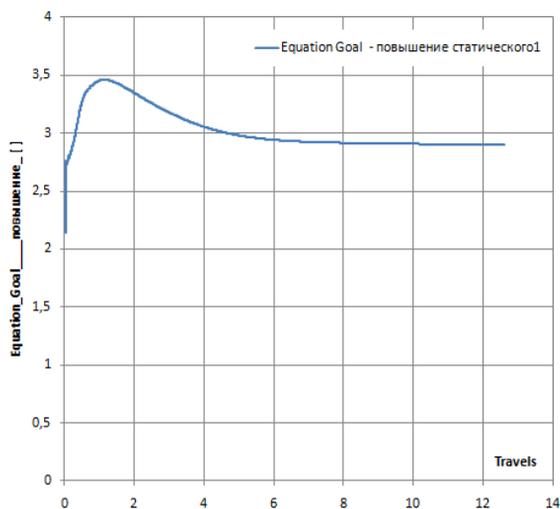


Рис. 2.422. Сходимость цели "Повышение статического давления" в зависимости от числа продувок

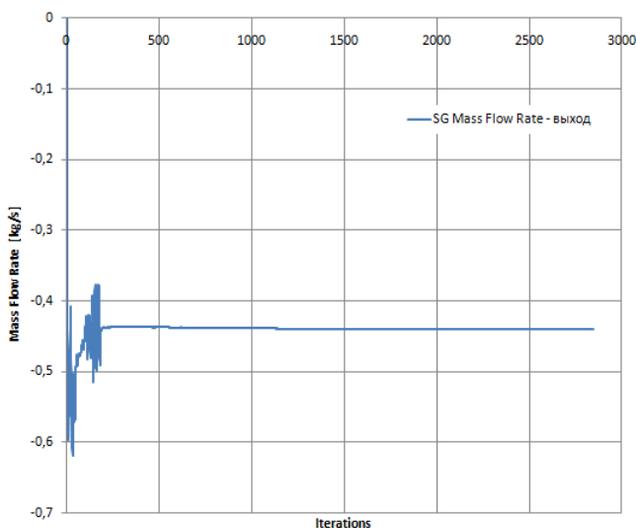


Рис. 2.423. Сходимость цели "Массовый расход на выходе" в зависимости от числа итераций

Кривые сходимости среднего и среднемассового полного давления на входе и выходе показаны на рис. 2.424. Как видно, эти две характеристики тождественные на входе, приобрели некоторое различие на выходе. Это обусловлено тем, что температура и давление воздуха в пределах выходного сечения непостоянны.

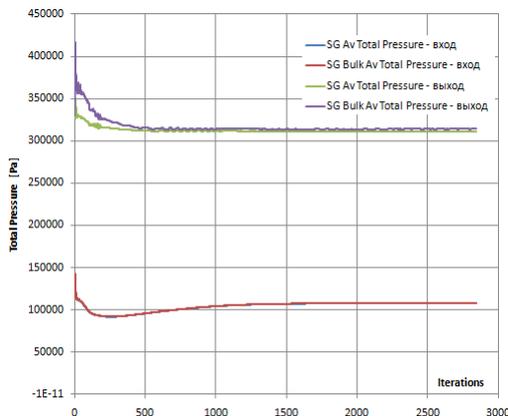


Рис. 2.424. Кривые сходимости полного среднего и среднемассового давления на входе и выходе

Сечение поля скорости показано на рис. 2.425. Как видно, вблизи выхода из каналов течение приобретает существенно сверхзвуковой характер, причем максимальная (для данного расхода) скорость составила 610 м/с. Верхняя граница шкалы на иллюстрации соответствует максимальной скорости в пределах сечения.

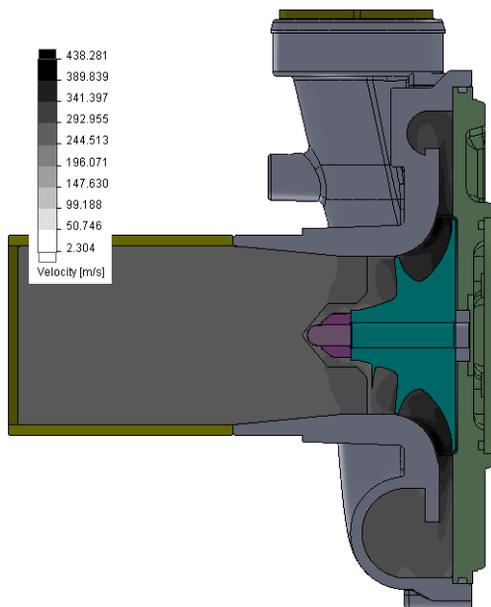


Рис. 2.425. Поле скорости в продольном сечении

Распределение давления в том же сечении показано на рис. 2.426. На следующей (рис. 2.427) иллюстрации показано распределение температуры. Как видно, характер изменения температуры вполне следует давлению.

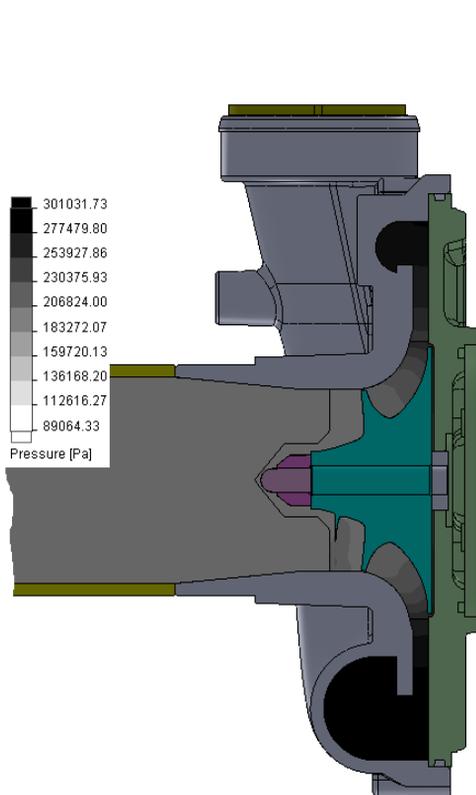


Рис. 2.426. Давление в вертикальном сечении

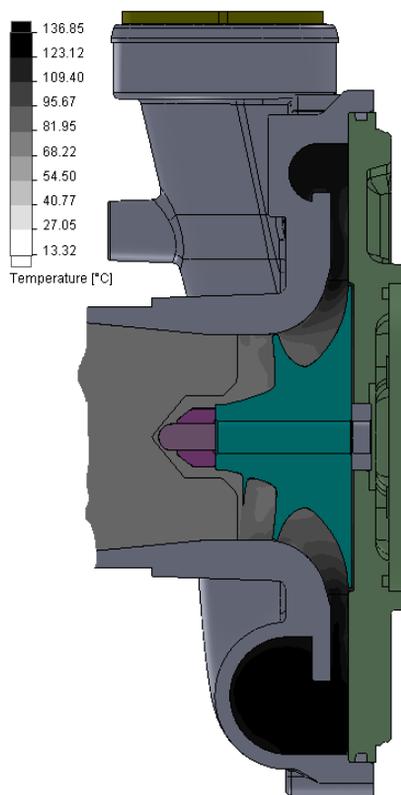


Рис. 2.427. Температура в вертикальном сечении

Для специалиста в области газодинамики компрессоров интерес могут представлять параметры турбулентного течения. Одна из характеристик — турбулентная энергия в вертикальном сечении (рис. 2.428).

Распределение давления в каналах колеса и в диффузоре показано на рис. 2.429. Как видно, вне колеса это совокупность концентрических окружностей, то есть рост давления в этой области обусловлен преимущественно центробежной силой.

Распределение давления на линиях тока показано на рис. 2.430. Здесь обращает внимание закручивание потока на выходе из улитки диффузора при малом влиянии вращения турбины на вход из-за малой вязкости текучей среды. Также видны зоны пониженного давления непосредственно после попадания в каналы колеса.

Результирующие характеристики среды на выходе получаем посредством команды **Surface Parameters** (Параметры на поверхности). Результат показан на рис. 2.431. Как видно, в пределах сечения плотность, скорость, температура, параметры турбулентности ощутимо отличаются.

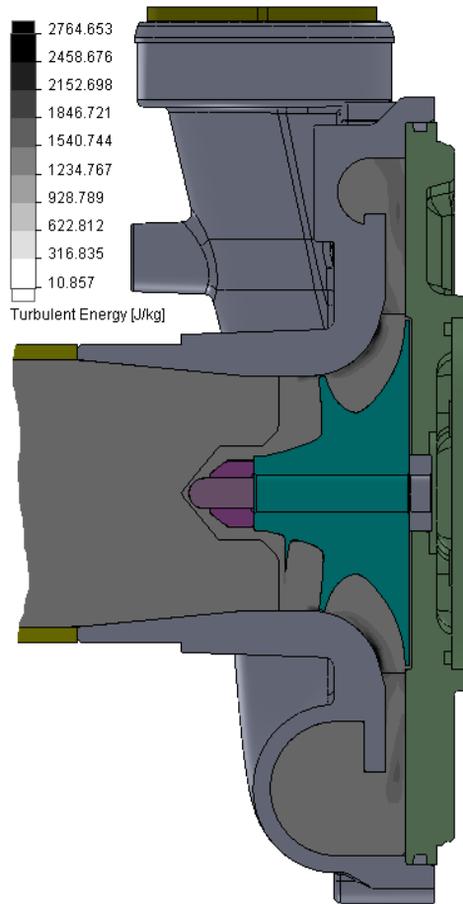


Рис. 2.428. Турбулентная энергия в вертикальном сечении

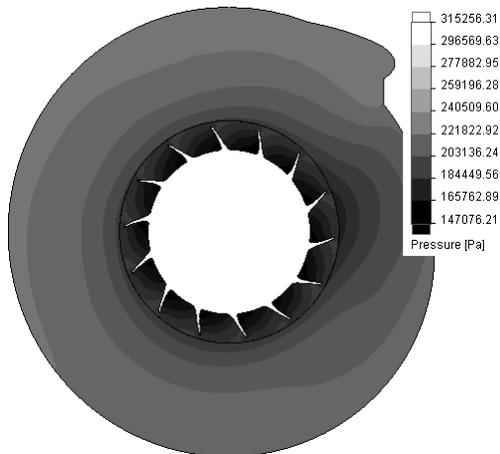


Рис. 2.429. Распределение давления в поперечном сечении

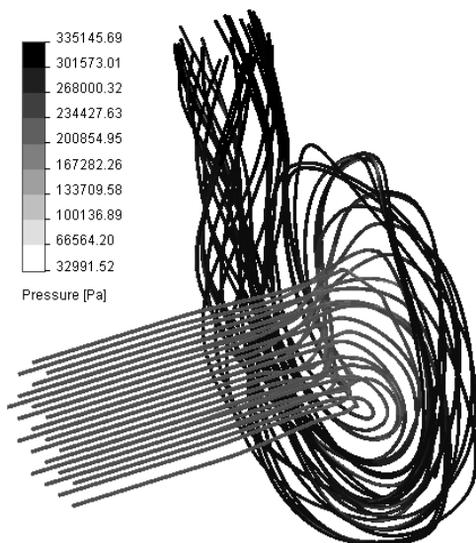


Рис. 2.430. Давление на фоне линий тока

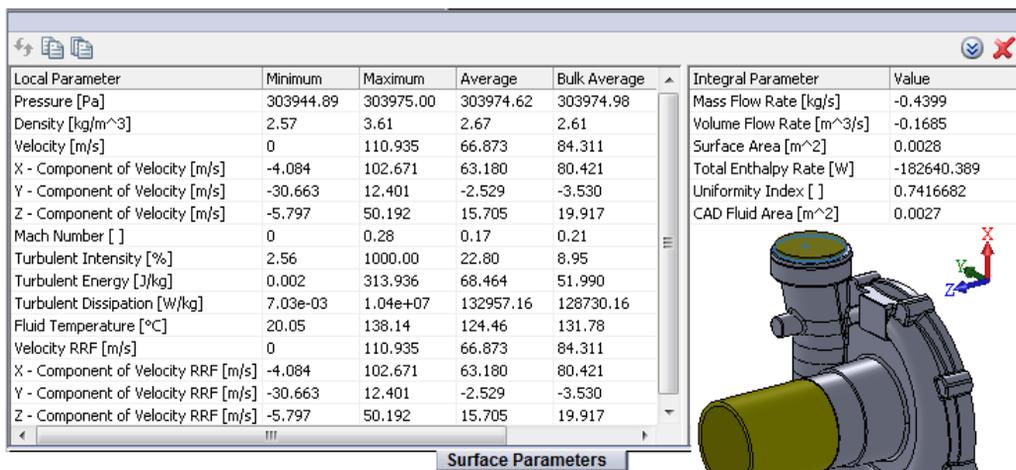


Рис. 2.431. Параметры течения на выходе

На рис. 2.432 расчетные точки для повышения статического давления собраны в кривую, где абсциссой является расход на входе. При этом для некоторых точек (с относительно большим расходом) пришлось применить описанную итерационную процедуру "подгонки" назначаемого давления на выходе под рассчитанное давление на входе. Там же приведена экспериментальная кривая данного агрегата. С учетом того, что значение ординаты начинается не с нуля, а с единицы, в рабочем диапазоне расходов графики почти совпадают.

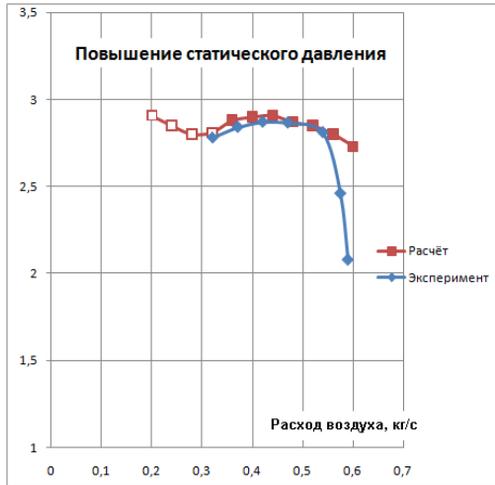


Рис. 2.432. Расчетная и экспериментальная кривые повышения давления

Чтобы установить причину абсурдного результата расчета в области низких расходов (соответствующие точки на кривой выделены пустыми квадратами), рассмотрим график сходимости массового расхода на выходе при назначенном расходе на входе 0,32 кг/с (рис. 2.433). Как видно, расход имеет пульсирующий характер (по сравнению с прямым участком на рис. 2.424 для расхода 0,44 кг/с). При еще меньших расходах размах пульсаций увеличивается вплоть до аварийной остановки решателя. Так вычислительная система реагирует на неустойчивую (в реальности) работу компрессора в области помпажа. Отметим, что экспериментальная точка пересечения линии помпажа с кривой (при данном расходе) соответствует расходу порядка 0,30–0,32 кг/с, а область колебаний простирается до 0,36–0,38 кг/с. Таким образом программа позволяет с высокой точностью идентифицировать момент потери устойчивости течения при уменьшении расхода.

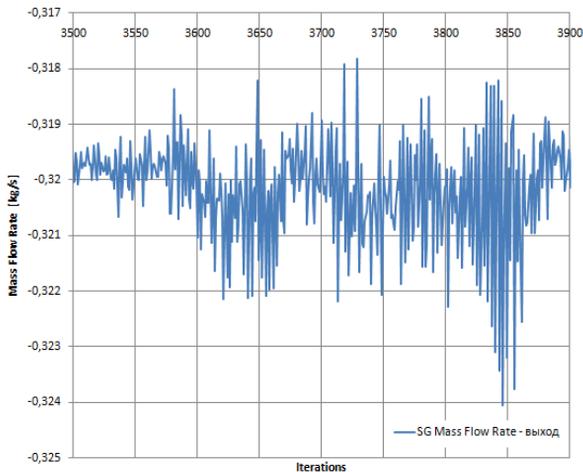


Рис. 2.433. Массовый расход на выходе для расхода на входе 0,32 кг/с

Сложнее (посредством инструментов Flow Simulation) объяснить расходимость в результатах при больших расходах. Как представляется, дело в том, что при увеличении расхода возрастает скорость течения, как в среднем, так и локально. При этом область со сверхзвуковым течением при расходе 0,55–0,6 кг/с практически перекрывает межлопаточное пространство колеса на выходе (на рис. 2.434 выделены объемы сверхзвукового течения для расхода 0,56 кг/с). Это делает неактуальными рекомендации справочной системы программы о том, что допускается расчет по модели течения "малым числом Маха" вплоть до 3М, если задача стационарная и область сверхзвукового течения относительно мала по сравнению с расчетным объемом.

К сожалению, модель течения с большим числом Маха во Flow Simulation неприменима к задачам с вращающимися областями, поэтому идентификация момента, когда расчет во Flow Simulation становится некорректным при больших расходах, является неформальной процедурой.

Расчетная кривая потребного крутящего момента в зависимости от расхода показана на рис. 2.435. Зависимость в указанном диапазоне, как видим, практически линейна. Эта информация может использоваться для определения коэффициента полезного действия агрегата. Мы не приводим расчет этой характеристики, поскольку в расчетной модели присутствует теплообмен через стенки, подбор методики становится нетривиальной задачей. Тем не менее для прикладного специалиста Flow Simulation предоставляет необходимую первичную информацию.

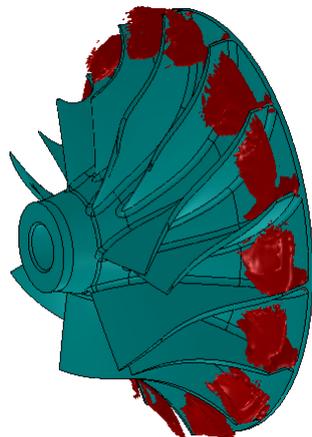


Рис. 2.434. Области с числом Маха >1 при расходе 0,56 кг/с

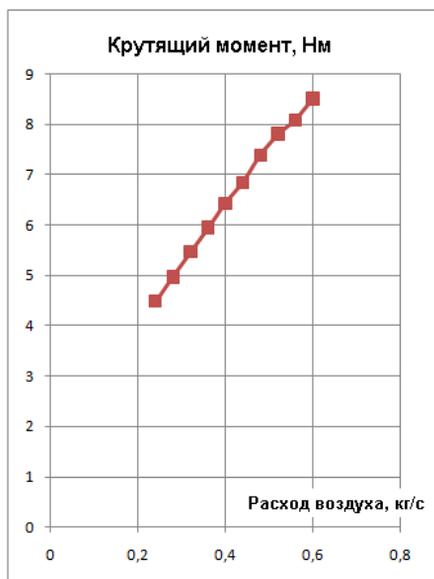


Рис. 2.435. Расчетная кривая крутящего момента

2.8.4. Выводы

Завершая описание задачи расчета радиального турбокомпрессора, можно отметить, что, при известных навыках, Flow Simulation является приемлемым инструментом для прогнозирования характеристик подобных агрегатов. Следует подчеркнуть, что это заключение сделано применительно к устройству (и режиму его работы) с окружной скоростью колеса 450 м/с, достаточно большой для изделий данного класса. При меньших скоростях, как представляется, диапазон расходов, для которых возможно достоверное прогнозирование, будет расширяться.

Определенным недостатком методики является большая размерность, поскольку анализируется устройство без каких-либо упрощений типа циклической симметрии, сетка имеет почти миллион ячеек, а также существует необходимость итерационной корректировки граничных условий ввиду невозможности назначения (в явном виде) давления на входе.

Совокупность этих факторов приводит к тому, что получение одной точки (угловая скорость в сочетании с расходом) занимает до нескольких суток расчета на компьютере с "типовой" конфигурацией. Некоторой компенсацией может стать одновременный расчет нескольких точек, но только при наличии достаточной оперативной памяти. Например, данная задача при расчете двух моделей потребовала около 7 Гбайт оперативной памяти, что (в компьютере с 8 Гбайт оперативной памяти) сохраняет возможность работы в независимой сессии SolidWorks с какой-либо простой геометрической моделью.



Глава 3

Кинематика и динамика — SolidWorks Motion

Содержание главы ограничивается двумя учебными примерами. Они отобраны потому, что иллюстрируют достаточно сложные для самостоятельного освоения процедуры SolidWorks Motion. Первая задача посвящена свежей (на момент написания книги) функциональности, позволяющей моделировать системы с движениями, управляемыми событиями. Это единственно приемлемый инструмент для имитации систем типа роботов, манипуляторов — устройств, оснащенных какими-либо датчиками.

Второй пример вкратце иллюстрирует возможности программы по генерации функциональных зависимостей. В данном случае они используются для создания модели троса.

3.1. Кинематика устройства сортировки

В данном разделе используется модель и информация из раздела "Lesson 10, Event Based Simulation" учебного пособия SolidWorks Motion 2011. Целью данного раздела является построение кинематической модели узла сортировки деталей на основе процедур SolidWorks Motion, относящихся к группе движений, управляемых событием (**Event based motion simulation**).

3.1.1. Постановка задачи

Рассмотрим устройство, показанное на рис. 3.1. Оно предназначено для сортировки падающих кубиков. Те, которые не имеют отверстий, должны попасть в ближний к толкателю лоток (дальний от наблюдателя), кубики с отверстиями — в дальний (ближний к наблюдателю). Предполагается, что система "знает", какой кубик падает: с отверстием или без, хотя, в принципе, можно посредством соответствующих датчиков (Sensor) реализовать распознавание объектов.

Если в канал упал кубик без отверстия, то первый толкатель должен переместить его до ближайшего лотка, после чего второй толкатель отправляет кубик в первый лоток. Кубик с отверстием перемещается первым толкателем на большее расстояние, после чего он подвергается действию третьего толкателя и попадает во второй лоток.

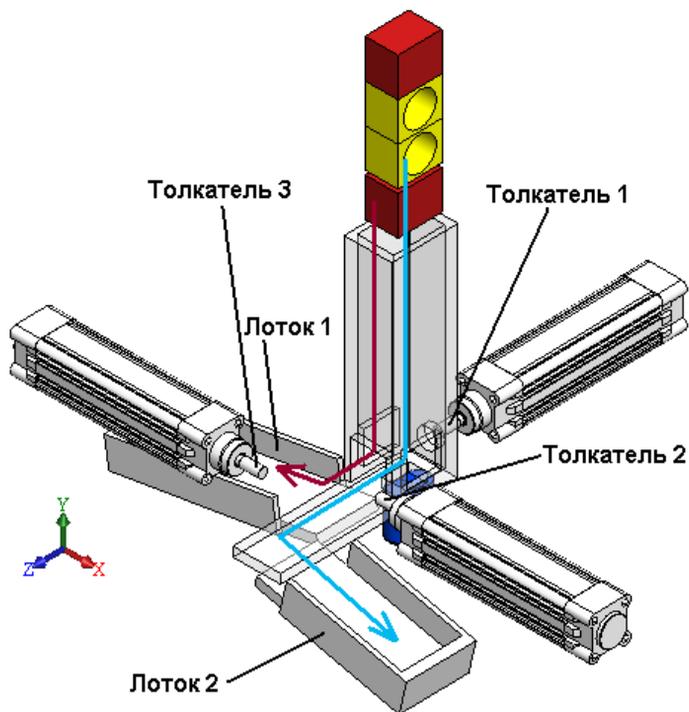


Рис. 3.1. Схема работы устройства сортировки

3.1.2. Подготовка геометрической модели

На рис. 3.2 приведено дерево конструирования SolidWorks, из которого видно, что перед синтезом модели движения в модели геометрической оставлены только три сопряжения, определяющие взаимосвязь Концентричность между цилиндрическими гранями толкателей и соответствующими им отверстиями в приводах. Эта взаимосвязь разрешает поступательное перемещение толкателя вдоль общей оси и вращение относительно нее. Остальные взаимосвязи, изначально присутствовавшие в сборке, погашены после ее формирования. После этого необходимые детали (по сути, все, кроме кубиков и толкателей) были зафиксированы (посредством одноименной команды SolidWorks). Этот прием достаточно эффективен при решении задач анализа движения сложных систем, поскольку, во-первых, облегчает работу программы, которая не должна анализировать заведомо predetermined сущности, и, во-вторых, пользователю легче разбираться в уменьшившемся объеме информации.

Следует учесть, что модификацию сопряжений в сборке можно осуществлять как собственно в модели SolidWorks, так и после создания исследований движения. В последнем случае манипуляции с сопряжениями будут действовать исключительно в активном исследовании. Также собственно модель SolidWorks используется для погашения/высвечивания деталей и узлов (в модели движения это сделать невозможно).

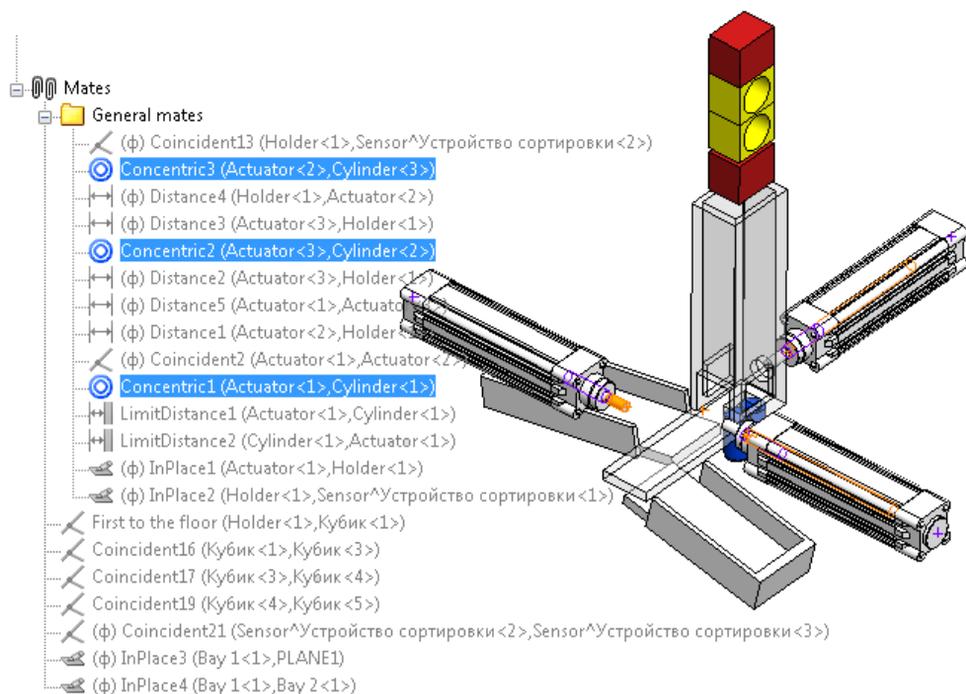


Рис. 3.2. Действующие сопряжения

Чтобы гарантировать модель движения от случайного изменения, рекомендуется перед серьезной правкой модели (изменение состава сборки, формирование/разбиение узлов, погашение сопряжений) исключить SolidWorks Motion из числа активных модулей SolidWorks.

3.1.3. Построение модели движения

Данная задача может быть решена посредством инструмента Motion Analysis (Анализ движения). Он становится доступен только после активизации SolidWorks Motion в добавлениях SolidWorks (рис. 3.3). Другие инструменты моделирования движения, такие как **Движение сборки** (Animation) и **Базовое движение** (Basic Motion), не имеют достаточную для данной задачи функциональность.

ПРИМЕЧАНИЕ

Несмотря на то, что SolidWorks Motion входит и в лицензию SolidWorks Premium, и в Simulation Professional и Simulation Premium, движение на основе событий доступно только в последних двух типах лицензий. Соответственно при сетевом лицензировании необходимо, чтобы на конкретном рабочем месте была заимствована одна из этих лицензий.

Решаемая задача может быть квалифицирована как динамическая, поскольку число степеней свободы явно больше нуля и присутствует неопределенность в реакции системы (она должна быть инвариантна относительно исходной последовательности кубиков).

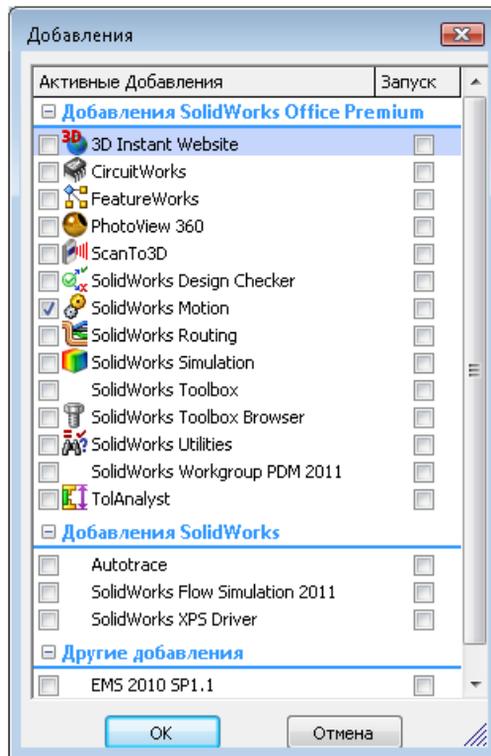


Рис. 3.3. Активизация модуля SolidWorks Motion

Модель исследования движения в SolidWorks Motion есть совокупность действий (задач), управляемых датчиками (сенсорами). Эти действия могут выполняться последовательно или же перекрываться во времени. Каждая задача определяется управляющим событием (триггером) и состоит в выполнении некоторого действия, которое управляет движением. Условие переключения может зависеть от состояния датчика или же от начала или завершения других выполняемых задач. Триггеры (управляющие события) могут связываться с двигателями, силами, сопряжениями или же могут остановить движение объекта. Следует учитывать, что для двигателей, задействованных в движениях, управляемых событиями, предусмотрена специальная разновидность — Серводвигатель (Servomotor), в то время как силы являются "универсальной" сущностью.

Создаем новое исследование движения соответствующей командой из контекстного меню строки с вкладками (**Модель** и др.) внизу графического окна (рис. 3.4).

В списке **Тип исследования** (Type of Study) выбираем **Анализ движения** (Motion Analysis) (рис. 3.5).

Оцениваем в первом приближении продолжительность процесса как 7 с, для чего устанавливаем ключевую точку на шкале времени в соответствующее положение (рис. 3.6). Если выяснится, что время процесса (не решения) будет другим, корректировка осуществляется элементарно.

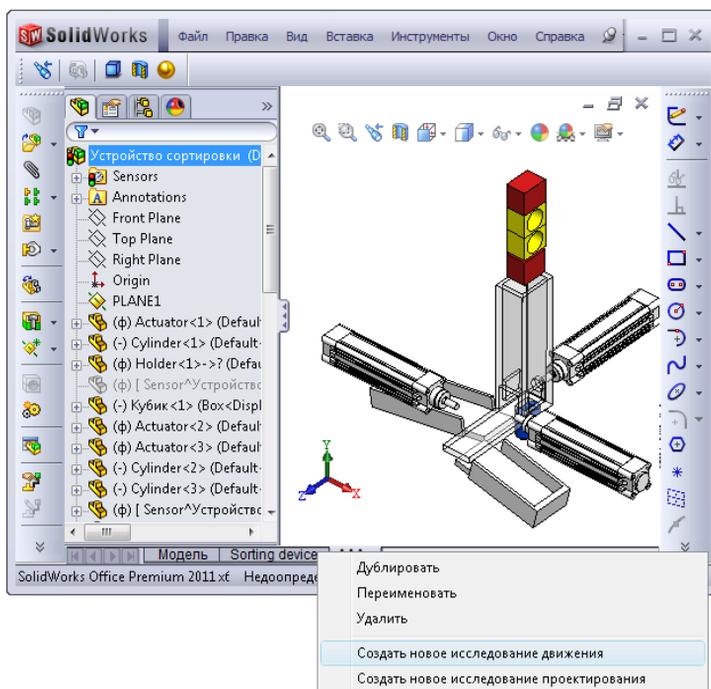


Рис. 3.4. Создание нового исследования движения

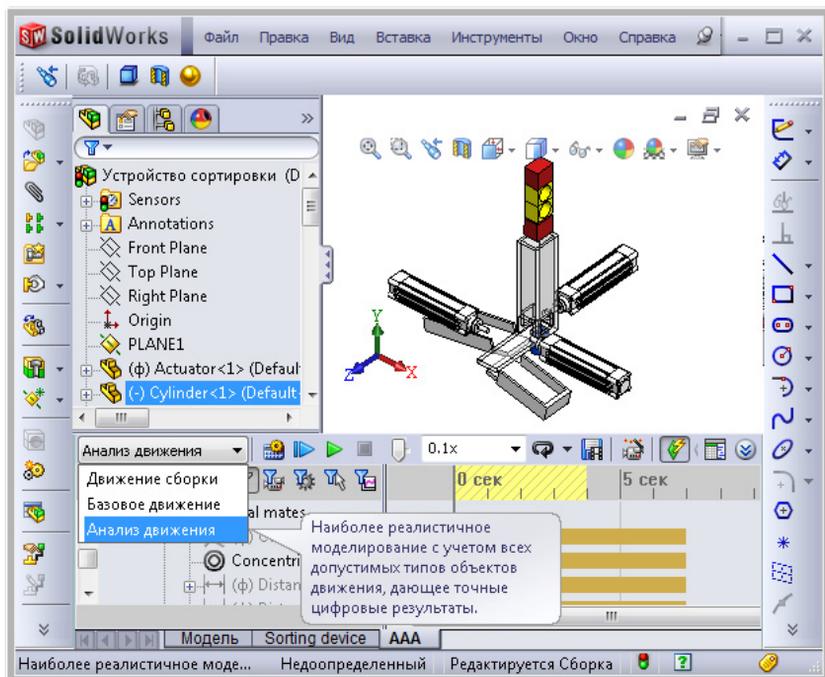


Рис. 3.5. Выбор типа исследования движения

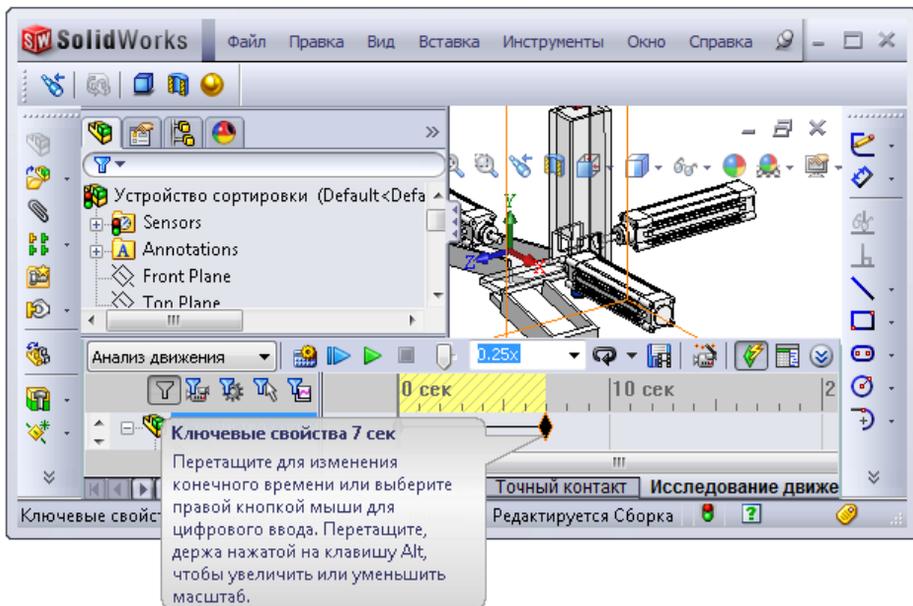


Рис. 3.6. Установка времени процесса

Следующий шаг — создание датчиков (рис. 3.7). Первый из них идентифицирует момент, когда расстояние между одним из кубиков без отверстий (это и есть разделение кубиков по типу, осуществляемое пользователем) и гранью вспомогательного тела (это цилиндр под дном канала) уменьшается до 12 мм (рис. 3.8). С учетом того, что толщина дна составляет 10 мм, этот датчик, будучи использован в триггере, инициирует назначенную реакцию (задачу) до того, как некий кубик достигнет дна.

Создаем еще один датчик близости с такими же параметрами, но для кубиков с отверстиями (рис. 3.9), связывая его с торцом другого вспомогательного цилиндра.

Параметры вычислительного процесса настраиваем командой **Свойства исследования движения** (Motion Study Properties) согласно рис. 3.10. Как видно, установлена достаточно большая частота кадров — параметру **Кадров в секунду** (Frames per second) присвоено значение 200 — и относительно малый максимальный шаг решателя — **Максимальный размер шага интегратора** (Maximum Integrator Step Size) сделан равным 0,01 с. Напомним, что эти две настройки никак не связаны между собой. Первая управляет качеством анимации, вторая — собственно вычислениями. Им присвоены достаточно малые значения, так как решается задача сравнительно быстротекущего трехмерного контактного взаимодействия.

В ходе отработки расчетной модели можно использовать настройки, обеспечивающие компромисс между точностью и скоростью расчета. Например, на этом этапе мы не будем использовать "точный" трехмерный контакт, ограничившись настройками по умолчанию. Кстати говоря, эти сущности различаются тем, что в "точном" варианте используется геометрическое представление, присутствующее в SolidWorks, а в упрощенном — триангуляция, генерируемая расчетным модулем, причем точность аппроксимации может быть изменена пользователем посредством регулятора **Разрешение 3D контакта** (3D Contact Resolution).

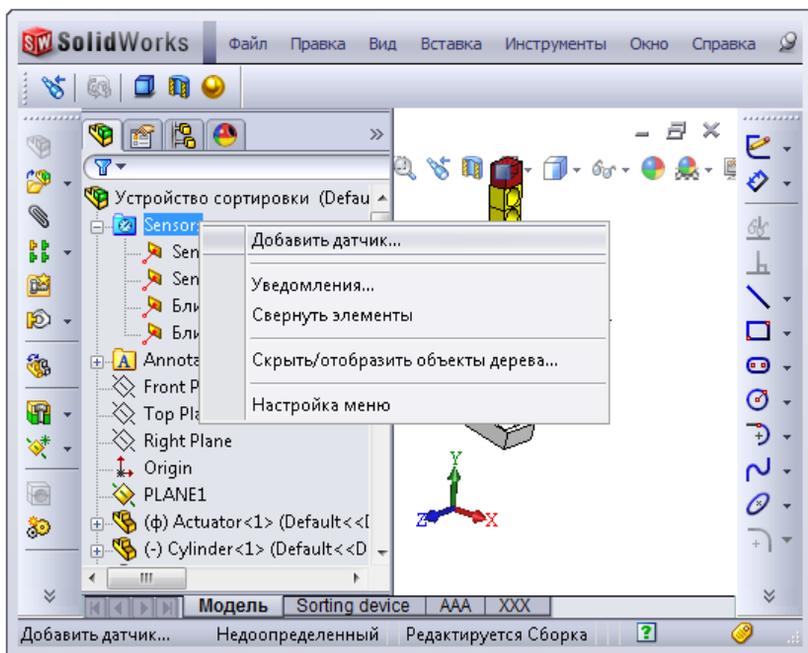


Рис. 3.7. Создание датчика

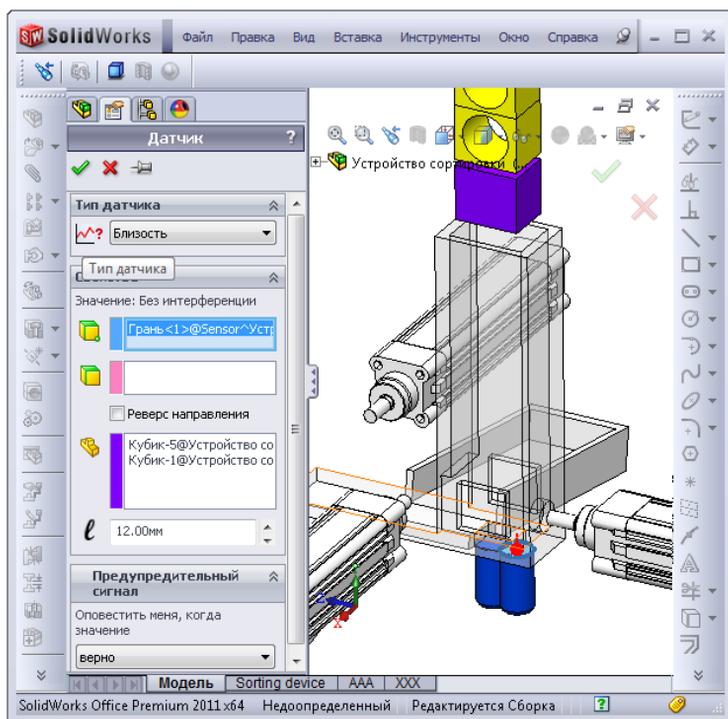


Рис. 3.8. Параметры датчика близости для кубиков без отверстий

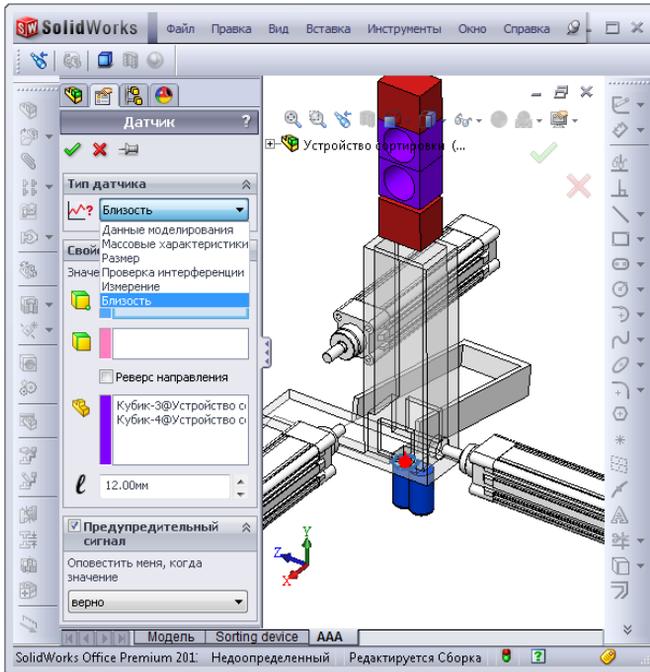


Рис. 3.9. Параметры датчика близости для кубиков с отверстиями

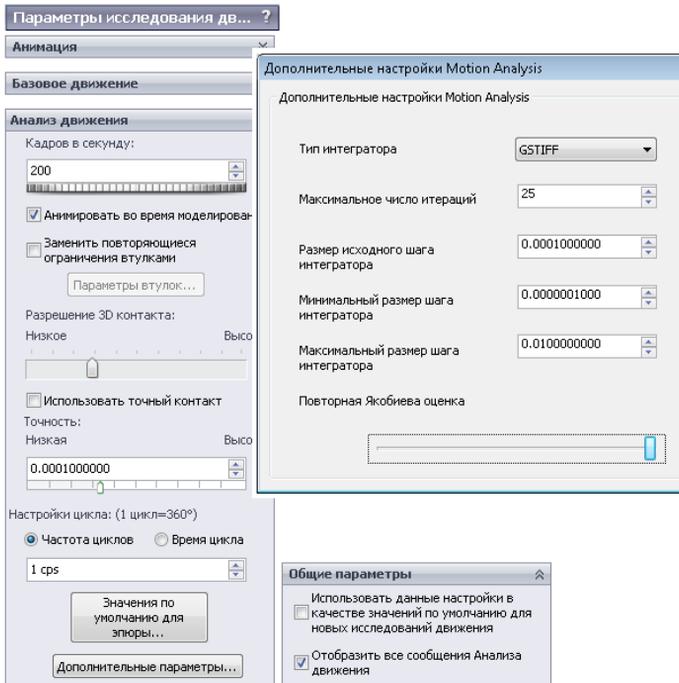


Рис. 3.10. Настройки вычислительного процесса

Назначаем силу тяжести, определив направление ее действия плоскостью **Сверху** (Top) (рис. 3.11).

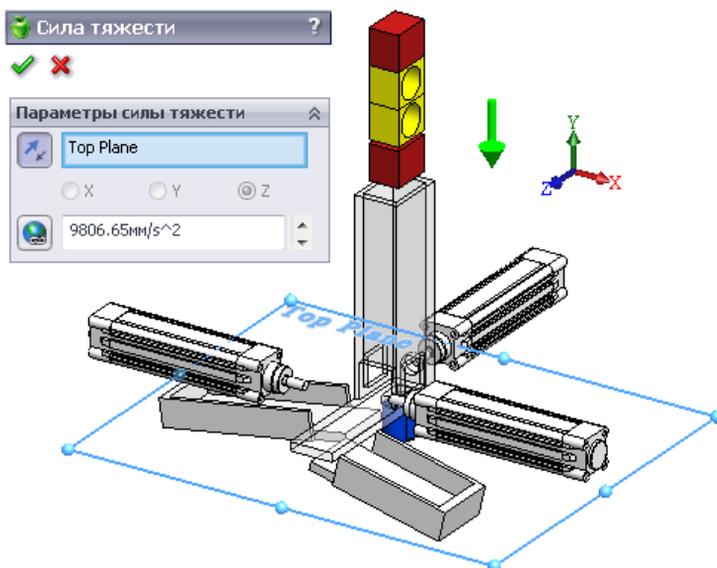


Рис. 3.11. Назначение силы тяжести

Взаимодействие кубиков между собой, а также с другими деталями будем описывать посредством инструмента **Контакт** (Contact). Он наиболее пригоден для задач, управляемых событиями. Однако контакты и гравитация не могут быть включены/отключены в процессе симуляции ни посредством изменения состояния в ключевых точках, ни посредством триггеров.

ПРИМЕЧАНИЕ

Другие кинематические связи (сопряжения) допускают изменение состояния только через погашение/высвечивание в ходе времени, что в абсолютном большинстве случаев неудобно, поскольку требует создания ключей. Ключи же не могут управляться триггерами.

Рисунок 3.12 иллюстрирует создание контакта между всеми кубиками и окружением: каналом и первым толкателем. Как видно, контактирующие объекты собраны в две группы: внутри группы взаимодействие не учитывается. В документации подчеркивается, что образование групп (корректное) повышает вычислительную эффективность.

Группам присвоен материал, который связывается с содержимым группы: кубики будут "акриловыми", а детали — "стальными". Эти ассоциации ограничены функциональностью групп, а она описывает исключительно контактное взаимодействие: из базы данных программы заимствованы параметры этого взаимодействия. Из этого следует, что в других контактных условиях объектам могут быть присвоены

ны другие свойства. Более того, в контактах, на самом деле, определяются не свойства материалов объектов, а свойства пар этих материалов при взаимодействии.

Напомним, что собственно материал (если быть точным, его плотность, как единственная используемая в модели движения характеристика) назначается на уровне детали.

ПРИМЕЧАНИЕ

При экспорте нагрузок движения в SolidWorks Simulation последний использует характеристики жесткости: модуль упругости и коэффициент Пуассона, которые могут присутствовать в свойствах материала или же должны быть переопределены в ходе работы с расчетной моделью.

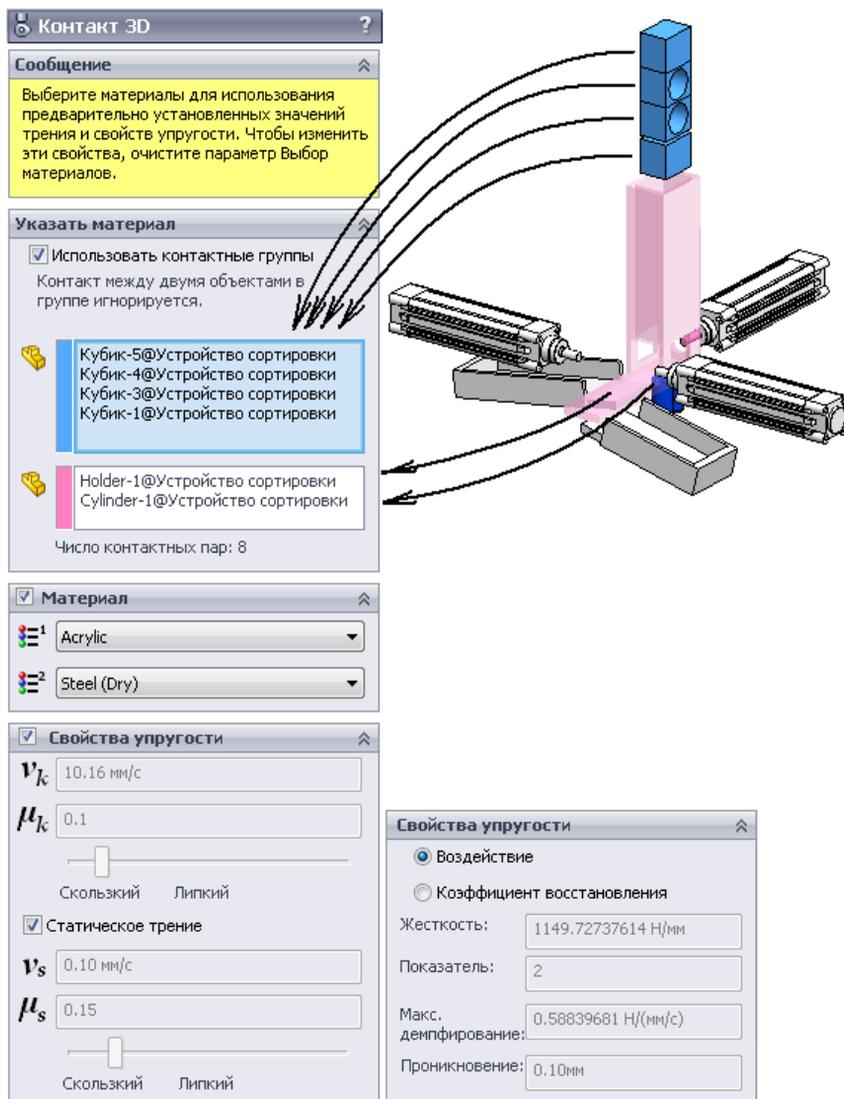


Рис. 3.12. Контакты между кубиками и каналом с толкателем

Взаимодействие кубиков между собой описывается независимым контактным условием — без использования групп (рис. 3.13). Здесь каждый кубик может контактировать с каждым.

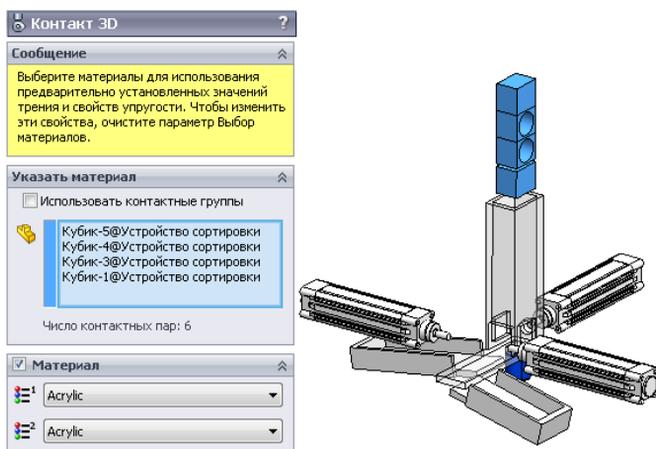


Рис. 3.13. Контакты кубиков друг с другом

На рис. 3.14, 3.15 показаны контакты для сплошных кубиков со вторым толкателем и первым лотком, для кубиков с отверстиями — с третьим толкателем и вторым лотком. Как видно, не планируется (соблюдение этой договоренности обеспечивается последующими действиями пользователя при создании модели движения) попадание, например, кубиков с отверстиями в ближайший лоток под действием первого толкателя. Если же модель будет некорректной, то такие кубики "не увидят" ни толкателя, ни лотка.

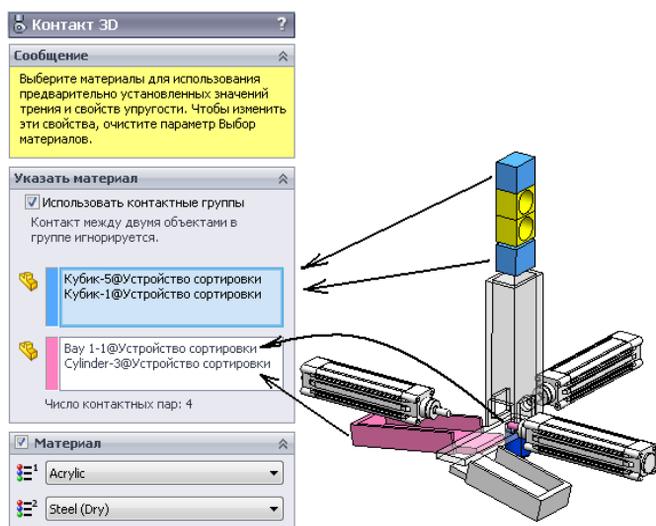


Рис. 3.14. Контакты между кубиками без отверстий и первым лотком с соответствующим толкателем

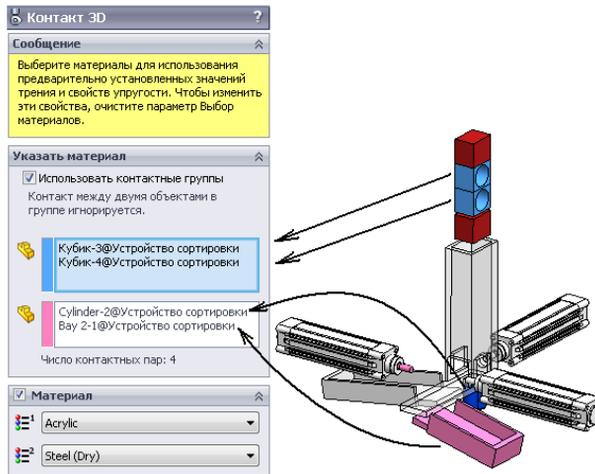


Рис. 3.15. Контакты между кубиками с отверстиями и вторым лотком с соответствующим толкателем

Создаем серводвигатель с поступательным (линейным) перемещением для каждого из трех толкателей (рис. 3.16–3.18). От "традиционных" двигателей он отличается тем, что не подчиняется predetermined движению, а управляется исключительно событиями (триггерами), в качестве которых могут выступать состояние датчиков, состояние событий или непосредственно "состояние" времени. В процессе описания серводвигателя поле **Местоположение двигателя** (Motor Location) "заполняем" гранью **торца** толкателя. Ее же (нормаль к ней) программа автоматически воспримет в качестве направления движения.

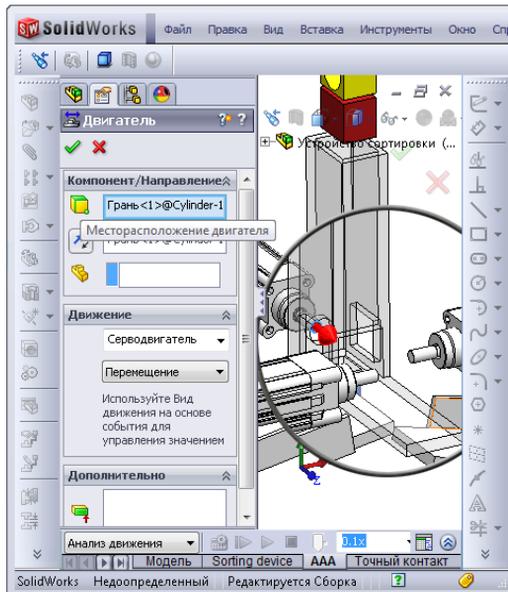


Рис. 3.16. Серводвигатель первого толкателя

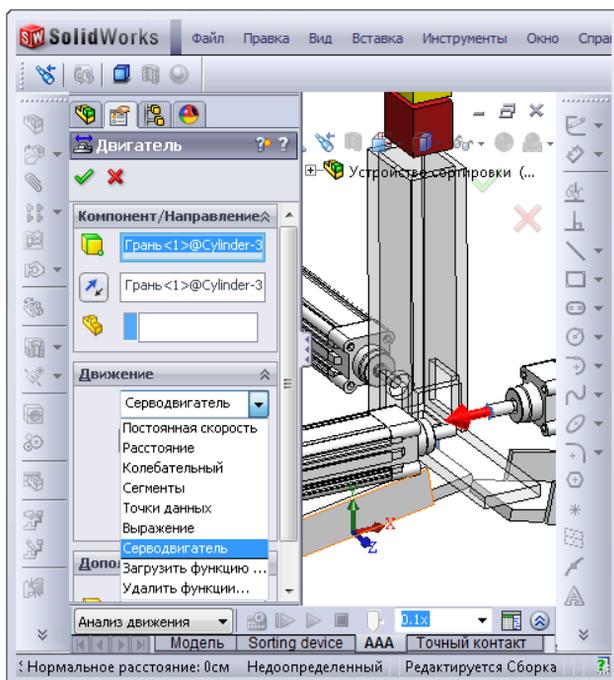


Рис. 3.17. Серводвигатель второго толкателя

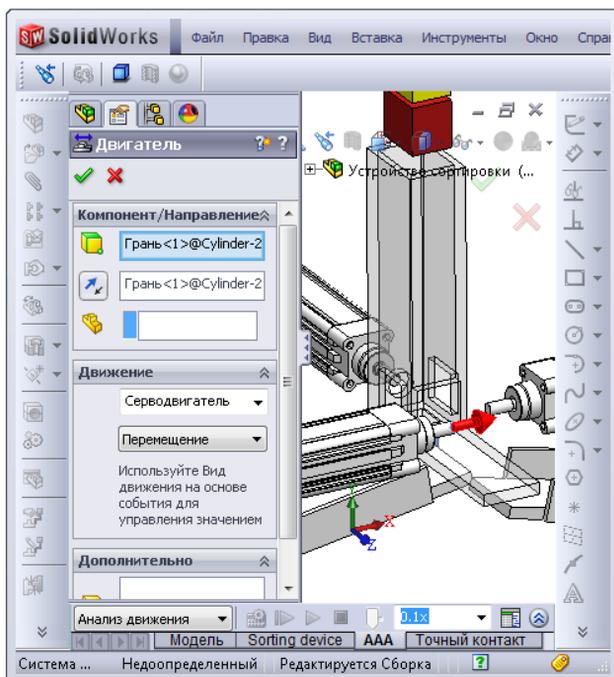


Рис. 3.18. Серводвигатель третьего толкателя

Чтобы получить доступ к соответствующим функциям, переключаем временную шкалу (**Timeline View**) к виду движения на основе события (**Event-based Motion View**) (рис. 3.19).

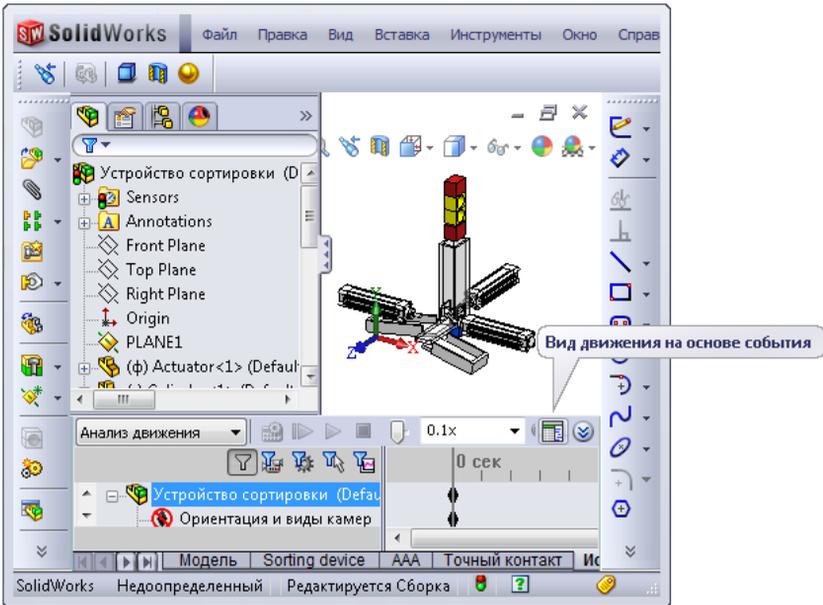


Рис. 3.19. Переключение к виду движения на основе события

Получившийся интерфейс будет выглядеть, как показано на рис. 3.20. Обратный переход осуществляется нажатием той же кнопки, вид которой изменился.

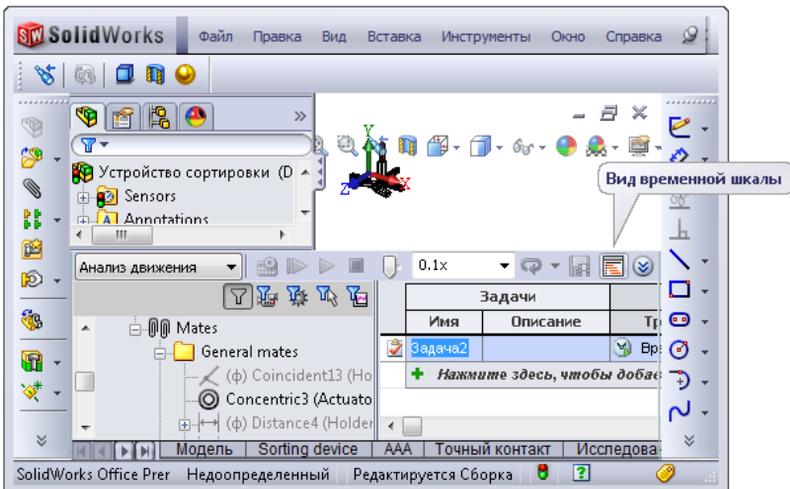


Рис. 3.20. Переключение к виду на основе временной шкалы

Работа в интерфейсе с движениями на основе события состоит в манипуляциях с задачами (**Task**), в то время как в интерфейсе с временной шкалой нужно для каждой сущности (двигателя, сопряжения) определить собственный независимый от других период (периоды) времени, в течение которого она функционирует по предопределенному закону.

Задача инициируется управляющим событием (единственным) и состоит в выполнении некоторого действия, которое управляет движением сборки. Триггер (Управляющее событие) зависит от текущего времени, состояния датчика или же управляется началом или завершением ранее определенной задачи. Кстати говоря, помимо перечисленного, интерфейс триггера содержит также состояние других триггеров.

Действия (содержание задачи) могут быть следующие:

- ❑ **Остановить анализ движения (Stop)** — остановка движения всех компонентов системы;
- ❑ **Двигатели (Motors)** — включение или выключение какого-либо двигателя, изменение его скорости согласно выбранному закону (доступны только предопределенные профили);
- ❑ **Forces (Силы)** — включение или выключение силы какой-либо силы или ее изменение согласно выбранному (из числа имеющихся) профилю;
- ❑ **Mates (Сопряжения)** — включение (высвечивание) или выключение (погашение) выбранного сопряжения.

Сформировав первичную информацию для движения под управлением событиями (сопряжения, датчики и двигатели), приступаем к созданию событий. Для этого переключаем интерфейс к виду движения на основе события.

Создание задачи осуществляется посредством команды **Нажмите здесь, чтобы добавить** (Click here to add) в Таблице задач (Tasks design table) — задача будет создана в конце списка или же из контекстного меню некоторой задачи из числа имеющихся (рис. 3.21). Кстати говоря, строки можно перетаскивать стандартными движениями мыши, воздействуя на элемент первого столбца.

Содержание меню очевидно, за исключением двух пунктов: **Заблокировать оценку задачи** (Lock Task Evaluation), который предотвращает пересчет ранее выполненного анализа на данном шаге в последующих расчетах, и **Таблица задач экспорта** (Export Task Table) — экспорт таблицы задач в файл с расширением csv для дальнейшего использования в программах управления автоматикой.

Первой задачей будет выталкивание сплошного кубика первым толкателем так, чтобы кубик занял позицию напротив второго толкателя. Создав некую задачу, ее можно переименовать; мы назовем ее **Вытолкнуть сплошной кубик**. Создаем для нее триггер, используя соответствующую кнопку (рис. 3.22).

Из числа сущностей, которые могут стать инициаторами события, выбираем в появившемся окне датчик **Близость к сплошному кубику** (рис. 3.23).

В строке рассматриваемой задачи в столбце **Условие** (Condition) выбираем пункт **Включить предупреждение** (Alert On), что соответствует активизации триггера (изменению состояния задачи), если состояние датчика изменилось. Выбор **Выключить предупреждение** (Alert Off) активизирует триггер, если датчик выключается.

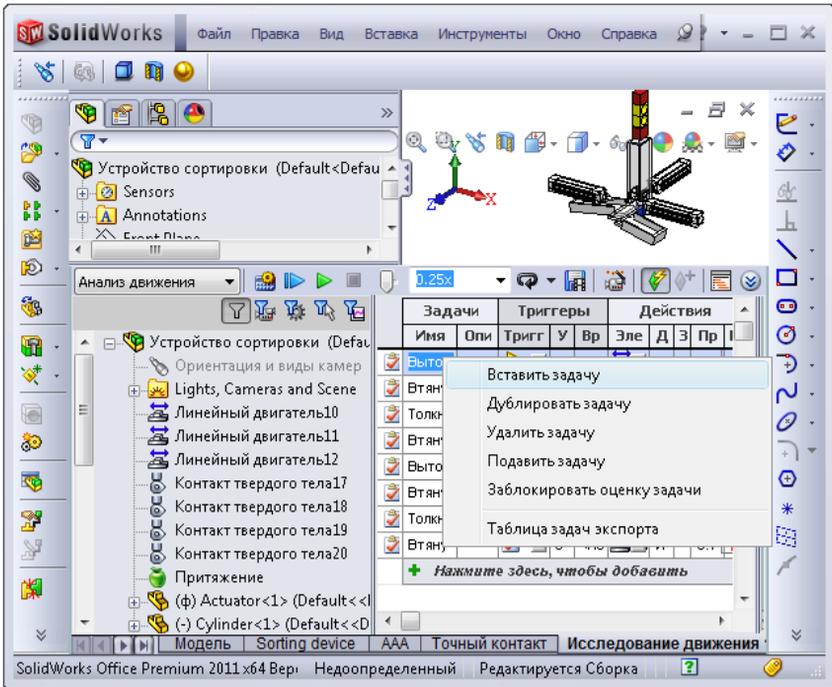


Рис. 3.21. Создание задачи

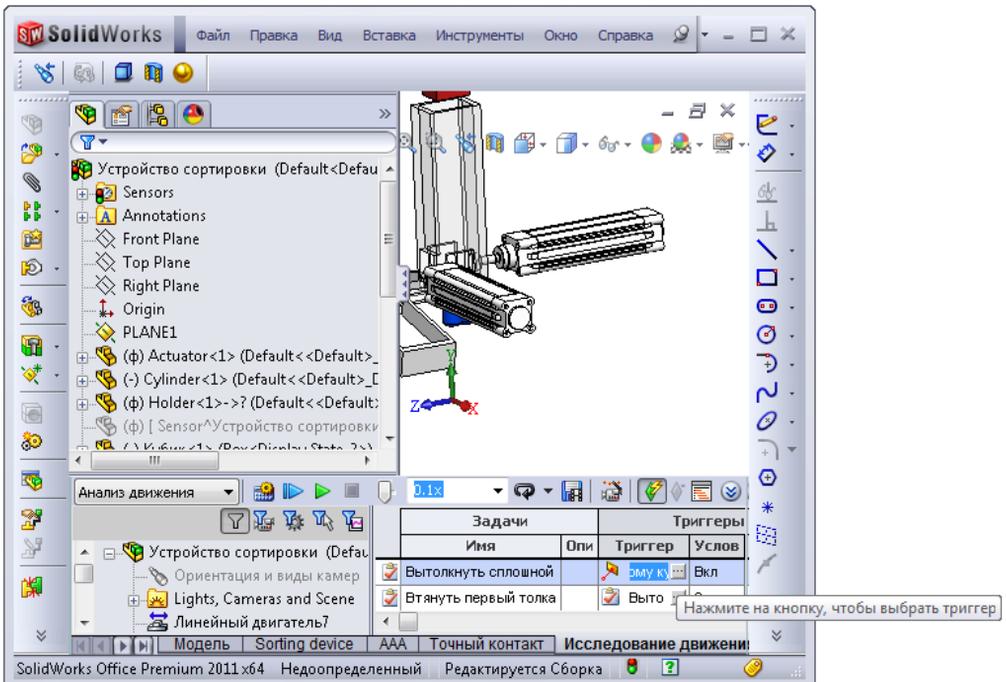


Рис. 3.22. Создание триггера для задачи выталкивания сплошного кубика

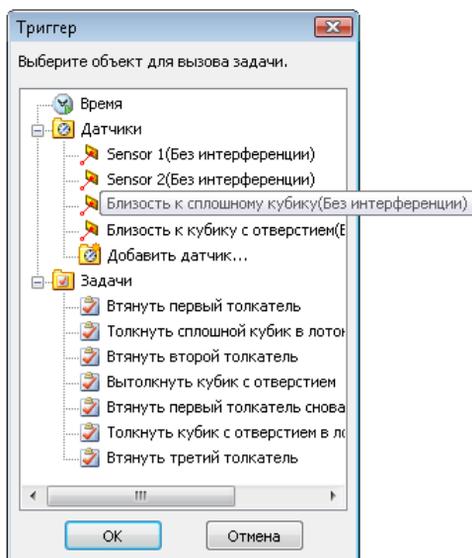


Рис. 3.23. Выбор состояния датчика близости к сплошному кубику в качестве триггера для задачи выталкивания кубика данного типа

В столбце **Время/Задержка** (Time/Delay) вводим 0, 1, что будет интерпретировано системой, как задержка 0,1 с перед выполнением действий, которые мы свяжем с этой задачей.

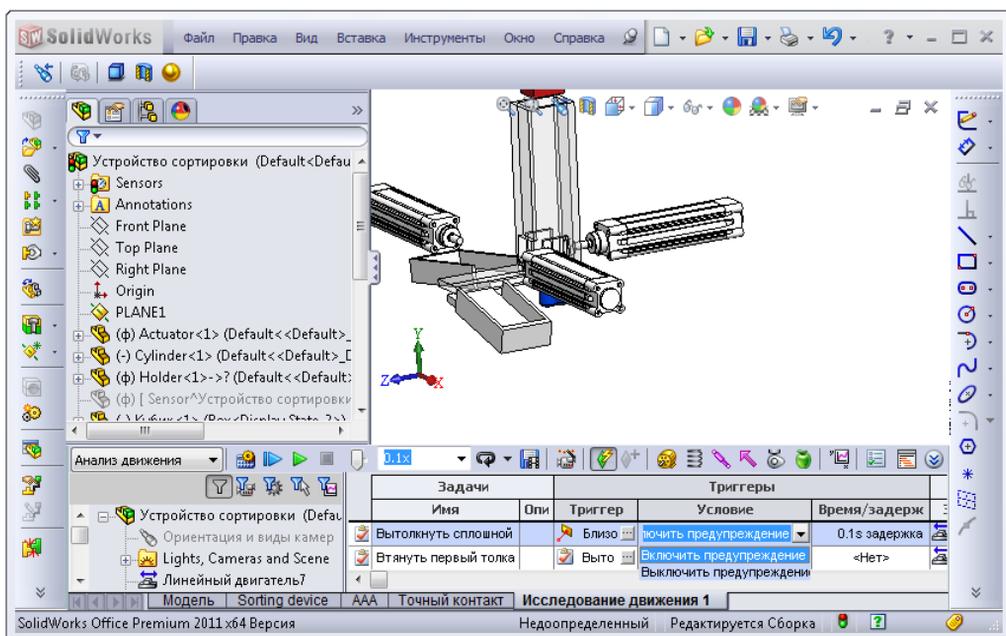


Рис. 3.24. Назначение активизации действия при изменении состояния триггера

Определение действия, следующего за изменением состояния триггера, производится из окна (рис. 3.25), появляющегося после нажатия соответствующей кнопки в таблице задач (рис. 3.26). Мы выбираем серводвигатель первого толкателя.

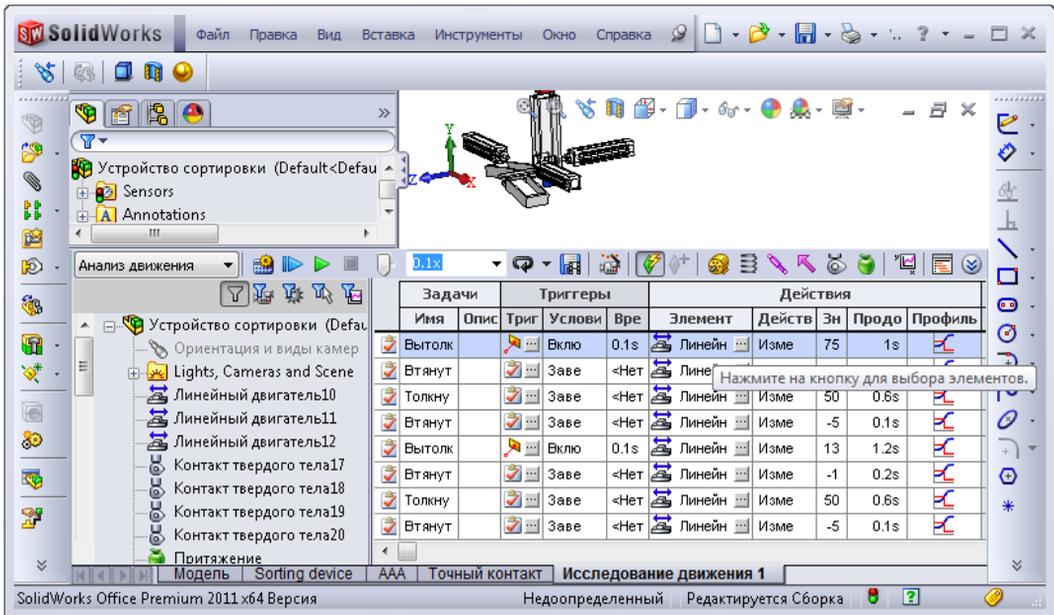


Рис. 3.25. Создание действия при изменении состояния триггера первой задачи

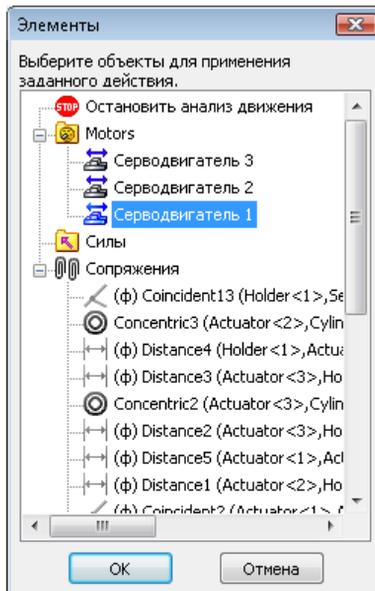


Рис. 3.26. Выбор сущности, управляемой первой задачей

Из доступной номенклатуры действий, которые способен выполнить выбранный объект (серводвигатель первого толкателя), выбираем **Изменить** (Change) (рис. 3.27).

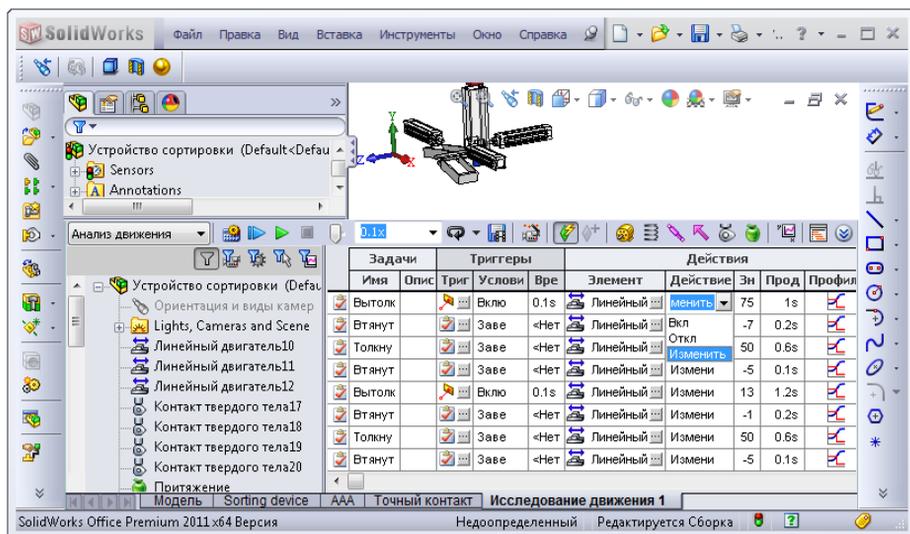


Рис. 3.27. Определение действия, связанного с двигателем первого толкателя

Поскольку двигатель был создан как линейный, в поле, соответствующее столбцу **Значение** (Value), вводим число 75, которое программа автоматически интерпретирует как 75 мм (рис. 3.28).

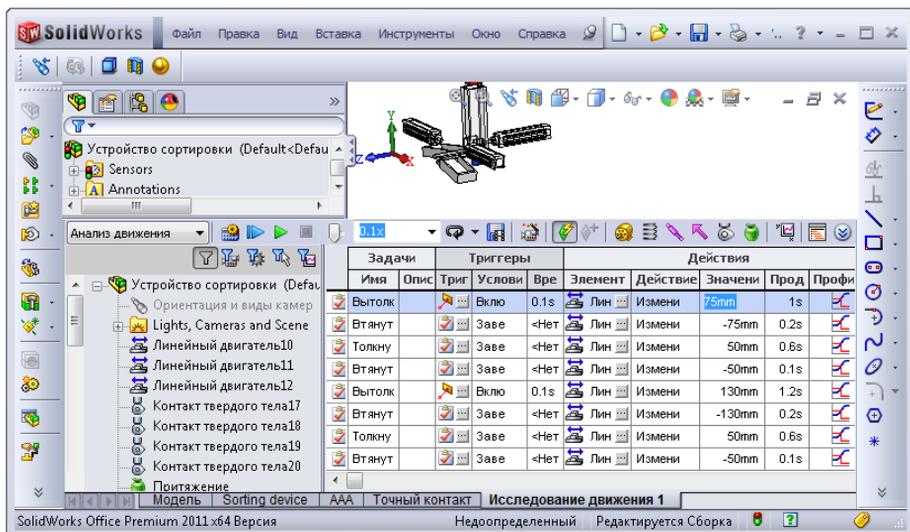


Рис. 3.28. Величина перемещения первого толкателя

В столбец **Продолжительность** (Duration) вводим число 1, что будет понято системой как 1 с, это продолжительность данной задачи (рис. 3.29).

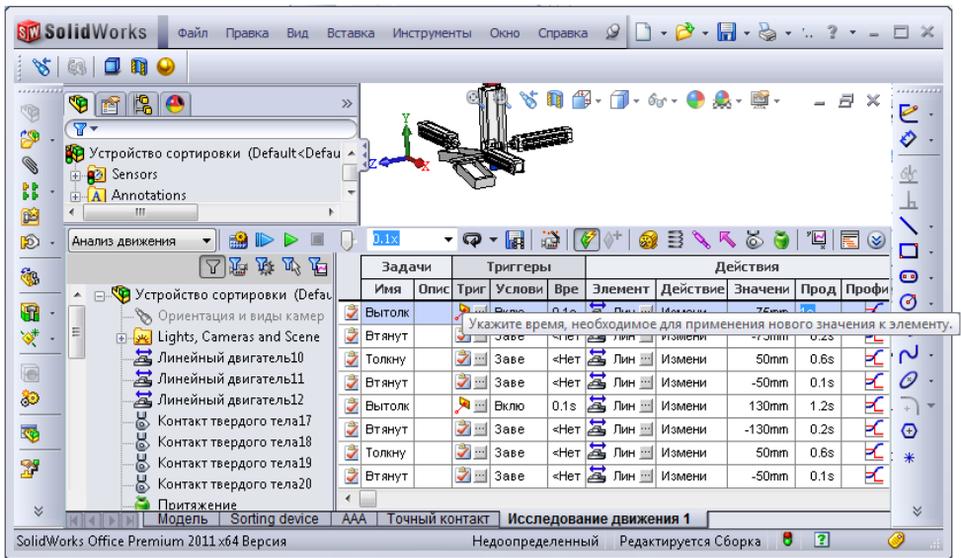


Рис. 3.29. Время, в течение которого перемещается первый толкатель

Из множества доступных для пользователя законов описания движения элемента (в данном случае линейного двигателя) выбираем **Гармонический** (Harmonic) (рис. 3.30).

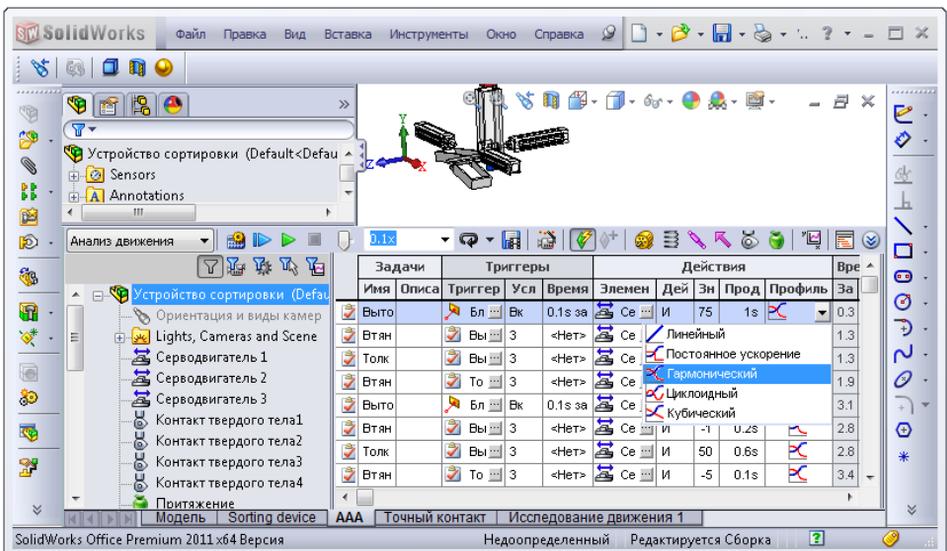


Рис. 3.30. Профиль скорости первого толкателя

Вторая задача (втягивание первого толкателя) управляется триггером, содержание которого — завершение задачи выталкивания сплошного кубика (рис. 3.32). Втягивание выполняется на величину 75 мм за время 0,2 с по гармоническому закону (рис. 3.31). Субъектом управления является, как и в первой задаче, сервопривод первого толкателя

Задачи		Триггеры			Действия				
Имя	Описа	Триггер	Услови	Время/	Элемент	Действ	Знач	Продо	Профил
Вытолкнуть сплошной кубик		Близость к	Вклю	0.1s зад	Сервод	Изме	75m	1s	
Втянуть первый толкатель		Вытолкнут	Заве	<Нет>	Сервод	Изме	-75m	0.2s	

Рис. 3.31. Вторая задача — втягивание первого толкателя

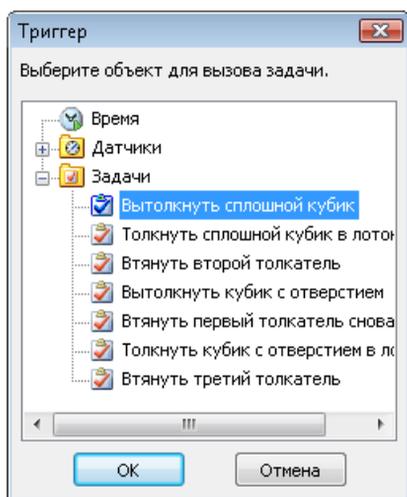


Рис. 3.32. Состояние задачи выталкивания сплошного кубика в качестве триггера задачи втягивания первого толкателя

Третья задача (выталкивание сплошного кубика в первый лоток вторым толкателем) управляется таким же (по содержанию) триггером, что и вторая задача: завершение первой задачи — это выталкивание сплошного кубика (рис. 3.34). Действие выполняется для Сервопривода 2, который перемещается на 50 мм за 0,6 с по гармоническому закону (рис. 3.33).

Задачи		Триггеры			Действия				
Имя	Описа	Триггер	Услови	Время/	Элемент	Действ	Знач	Продо	Профил
Вытолкнуть сплошной кубик		Близость к	Вклю	0.1s зад	Сервод	Изме	75m	1s	
Втянуть первый толкатель		Вытолкнут	Заве	<Нет>	Сервод	Изме	-75m	0.2s	
Толкнуть сплошной кубик в		Вытолкнут	Заве	<Нет>	Сервод	Изме	50m	0.6s	

Рис. 3.33. Третья задача — выталкивание сплошного кубика в первый лоток вторым толкателем

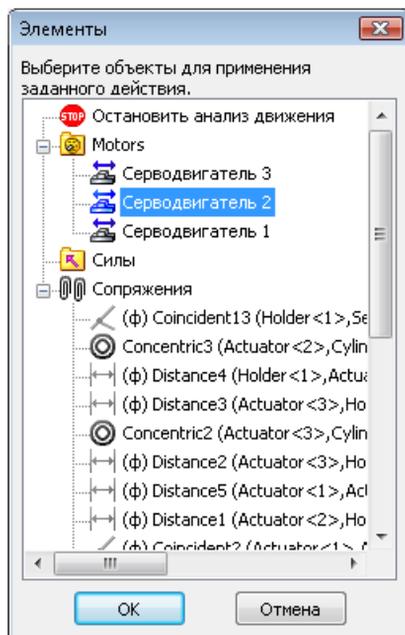


Рис. 3.34. Выбор серводвигателя, управляемого третьей задачей

Четвертая задача (втягивание второго толкателя) управляется триггером, суть которого в завершении третьей задачи (выталкивание сплошного кубика). Задача состоит в перемещении второго толкателя в отрицательном направлении на 50 мм за 0,1 с по гармоническому закону (рис. 3.35).

Задачи		Триггеры			Действия						
Имя	Описа	Триггер	Услов	Время/	Элемент	Действ	Значен	Прод	Профил		
Вытолкнуть сплошной кубик			Близость	Вкл	0.1s зад		Сервод	Изме	75mm	1s	
Втянуть первый толкатель			Вытолкну	Зав	<Нет>		Сервод	Изме	-75mm	0.2s	
Толкнуть сплошной кубик в			Вытолкну	Зав	<Нет>		Сервод	Изме	50mm	0.6s	
Втянуть второй толкатель			Толкнуть	Зав	<Нет>		Сервод	Изме	-50mm	0.1s	

Рис. 3.35. Четвертая задача — втягивание второго толкателя

Следующие четыре задачи (рис. 3.36) определяют поведение системы при обработке кубиков с отверстием. Они в целом аналогичны уже сформулированным четырем задачам для кубиков без отверстий: задача инициируется триггером, построенным на датчике близости кубиков с отверстиями. Перемещение кубика (критерий — выполнение задачи 5 по выталкиванию кубика с отверстием) под действием первого толкателя осуществляется не на 75, а на 130 мм; втягивание первого толкателя выполняется, само собой, на -130 мм, по завершении чего третий толкатель толкает кубик (с отверстием, поскольку только эти кубики могут взаимодействовать с третьим толкателем) во второй лоток (только кубики с отверстиями могут

входить в контакт с этим лотком) за 0,6 с, после чего возвращается обратно в течение 0,1 с по гармоническому закону.

Задачи		Триггеры			Действия				
Имя	Описа	Триггер	Услов	Время/	Элемент	Действ	Значен	Прод	Профил
Вытолкнуть сплошной кубик		Близость	Вкл	0.1s зад	Сервод	Изме	75mm	1s	
Втянуть первый толкатель		Вытолкну	Зав	<Нет>	Сервод	Изме	-75mm	0.2s	
Толкнуть сплошной кубик в		Вытолкну	Зав	<Нет>	Сервод	Изме	50mm	0.6s	
Втянуть второй толкатель		Толкнуть	Зав	<Нет>	Сервод	Изме	-50mm	0.1s	
Вытолкнуть кубик с отверстия		Близость	Вкл	0.1s зад	Сервод	Изме	130mm	1.2s	
Втянуть первый толкатель		Вытолкну	Зав	<Нет>	Сервод	Изме	-130mm	0.2s	
Толкнуть кубик с отверстием		Вытолкну	Зав	<Нет>	Сервод	Изме	50mm	0.6s	
Втянуть третий толкатель		Толкнуть	Зав	<Нет>	Сервод	Изме	-50mm	0.1s	

Рис. 3.36. Задачи, определяющие поведение системы при взаимодействии с кубиками с отверстием

После нажатия кнопки **Рассчитать** (Calculate) система не только выполняет расчет, но и формирует граф, моделирующий последовательность задач и их логические взаимосвязи (диаграмму Ганта) (рис. 3.37), а также содержимое вида на основе временной шкалы (рис. 3.38). В отличие от задач с predetermined движениями, в данном случае временная шкала есть потомок по отношению к содержимому шкалы на основе событий, и никакие контрольные точки, за исключением времени процесса, не могут быть изменены.

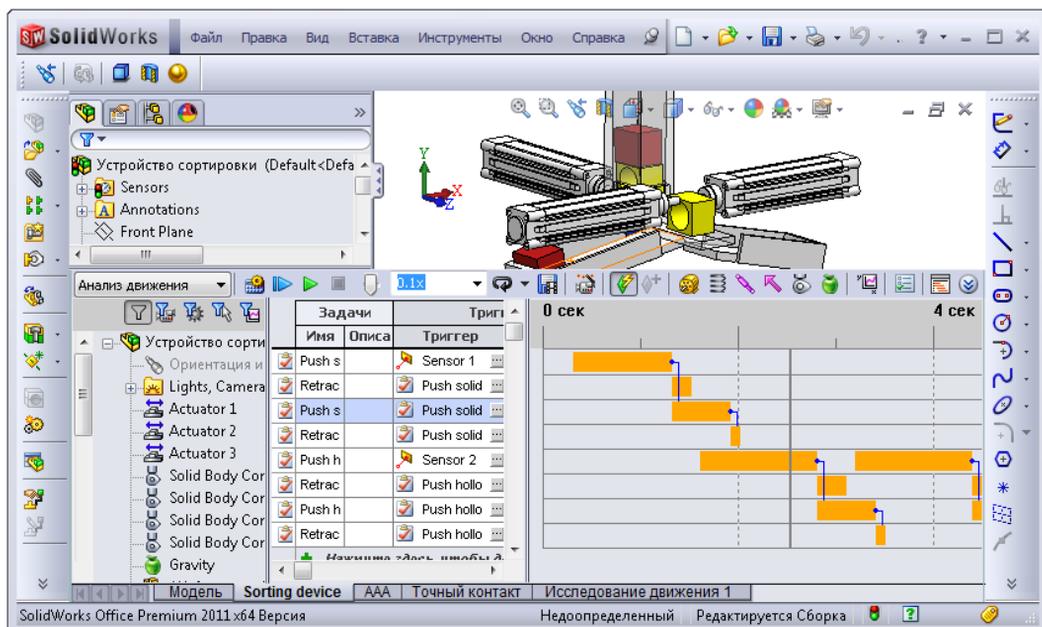


Рис. 3.37. Диаграмма Ганта

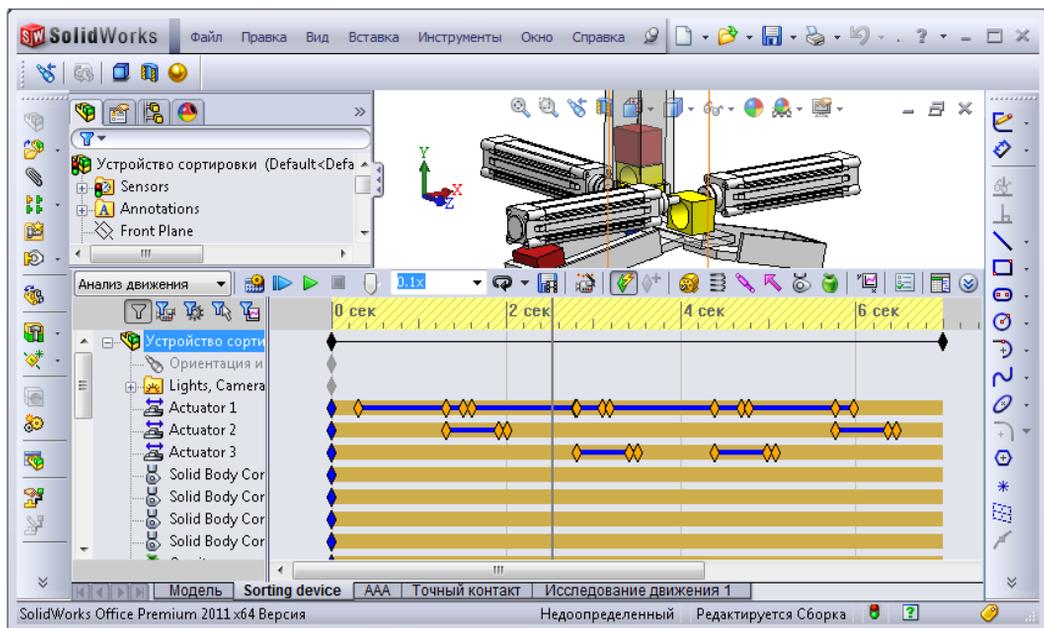


Рис. 3.38. Вид на основе временной шкалы

Завершив формирование структуры задачи, можно уточнить модель посредством учета "точного" трехмерного контакта.

3.1.4. Выводы

Рассмотренная задача является показательным примером функциональности, связанной с моделированием движения без "жесткой" логики. В данном случае система учитывает несколько типов неопределенности: первый — произвольное число кубиков. То, сколько из них "успевает" упасть, зависит исключительно от назначенного интервала времени. Тем не менее, если увеличить число кубиков, то система их "не увидит", если пользователь не назначит дополнительные контакты между новыми кубиками и окружением, причем эти контакты различны для кубиков с отверстиями и без. Второй фактор, обладающий определенной независимостью от оператора — число кубиков различных типов (с отверстиями и без). Здесь изменение содержимого должно сопровождаться действиями пользователя по уточнению контактов. Абсолютно независимым от пользователя является этап продвижения кубика толкателями. Здесь изменение времени выталкивания автоматически компенсируется системой, поскольку последующие задачи стартуют после завершения предыдущих.

Реализованные в модуле алгоритмы не свободны и от ограничений. Основным является, пожалуй, отсутствие ветвлений. То есть каждая задача управляется единственным триггером, например, завершение минимум одной из нескольких предыдущих задач или же выполнение нескольких предыдущих не поддерживаются.

3.2. Имитация троса в модели движения

В данном разделе используется модель и информация из SolidWorks Knowledge Base, статья S-018874.

Целью данного раздела является построение имитационной модели троса в исследовании движения. Также — в первом приближении — будут продемонстрированы приемы работы в Конструкторе функций (Function Builder).

3.2.1. Постановка задачи

Способ имитации тросовой подвески принципиально зависит от задачи. Если конструкция такова, что некий объект уже висит на тросах, находясь в состоянии равновесия, то симитировать трос можно посредством условных пружин. При этом нелинейность троса может быть воспроизведена посредством использования нелинейности в пружинах (доступны целые степени и обратные степени зависимости усилия от удлинения с первой по четвертую). Также пружина может обладать демпфирующими свойствами. Имеются как линейные, так и нелинейные (со степенью от -4 до 4) демпферы. Предварительный натяг пружины реализуется через назначение ее длины, отличающейся от реального геометрического размера между используемыми в программе объектами. В этом качестве могут использоваться грани и кромки (фактически же используются центры этих объектов), а также вершины и справочные точки.

Алгоритму с пружинами в SolidWorks Motion присуще ограничение: пружины могут быть только двустороннего действия.

Однако если трос имеет свободный ход, то до момента, когда он начнет натягиваться, усилие в нем будет близким к нулю. В этом случае замена троса пружиной некорректна. Можно, конечно, предложить использовать вместо пружины некую механическую конструкцию, обеспечивающую свободный ход, в которой присутствует виртуальная пружина.

В данном разделе будет рассмотрен алгоритм, заменяющий трос силой, величиной которой зависит от текущих параметров системы. В терминах SolidWorks Simulation это Сила Действия/Противодействия (Action/Reaction Force).

Ограничением алгоритма является неучет массово-инерционных характеристик троса. Документация к программе предлагает заменять трос совокупностью стержней с шарнирными взаимосвязями (их можно реализовать через сопряжения между справочными точками, принадлежащими деталям). При этом "жесткие" сопряжения заменяются (в интерфейсе SolidWorks) так называемыми податливыми втулками. Подбором податливости и вязкости втулок предлагается смоделировать податливость и демпфирующие свойства троса. Это, надо сказать, трудоемкая и малоалгоритмизуемая операция, прибегать к которой следует только при крайней необходимости.

3.2.2. Подготовка геометрической модели

Геометрическая модель показана на рис. 3.39. Как видно, это два параллелепипеда, один из которых (верхний) зафиксирован. Другой связан с ним сопря-

жениями, оставляющими только вертикальное перемещение. В сопряжениях присутствует расстояние (Distance4), которое определяет взаимное положение деталей в начальный момент времени по высоте. В модели движения оно будет погашено.

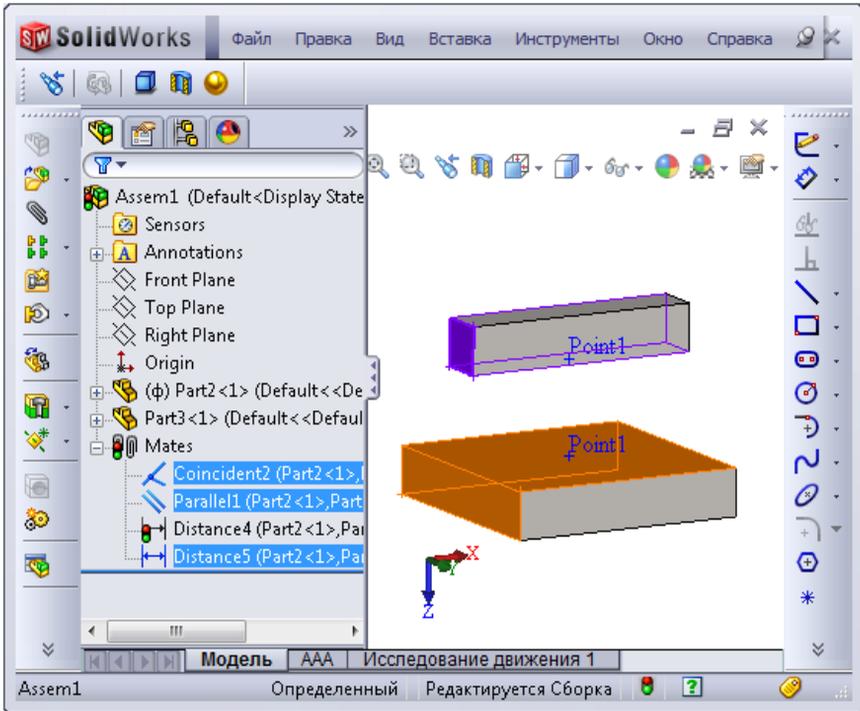


Рис. 3.39. Геометрическая модель

Также имеются две справочных точки, они будут использоваться при построении диаграмм взаимного перемещения и скорости.

3.2.3. Построение модели движения

Расчетная модель показана на рис. 3.40. Это простейшая система, однако ее вид соответствует расчету с учетом условного троса. Предварительно нужно выполнить расчет без используемой для этого силы, имитирующей действие троса.

Расчет (нужно не забыть его выполнить) нужен был исключительно для того, чтобы построить две диаграммы: относительного перемещения между точками (как взаимное смещение) и относительной скорости (рис. 3.41, 3.42). Мы не приводим сами диаграммы, так как на первом этапе смысла в них нет.

Обратите внимание, что сформированные функции дают скалярные (не имеющие знака) характеристики. Это сделано, поскольку в выражении для силы нужны именно абсолютные величины расстояния и скорости.

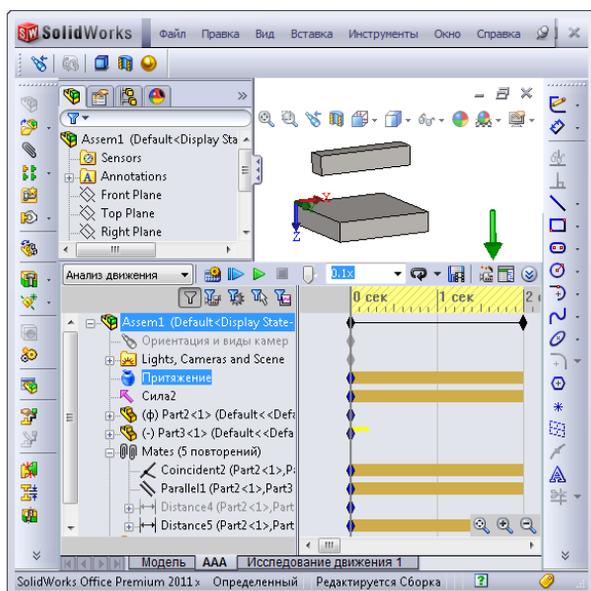


Рис. 3.40. Модель движения

При желании можно изменить название функции, как показано на иллюстрациях, это сделает дальнейшие операции более наглядными. Изменение названий выполняется подобно переименованию объектов в проводнике Windows.

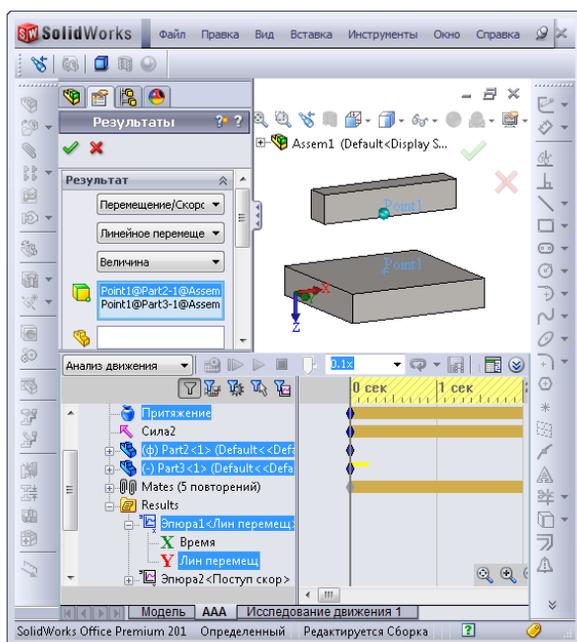


Рис. 3.41. Построение эпюры расстояния между точками

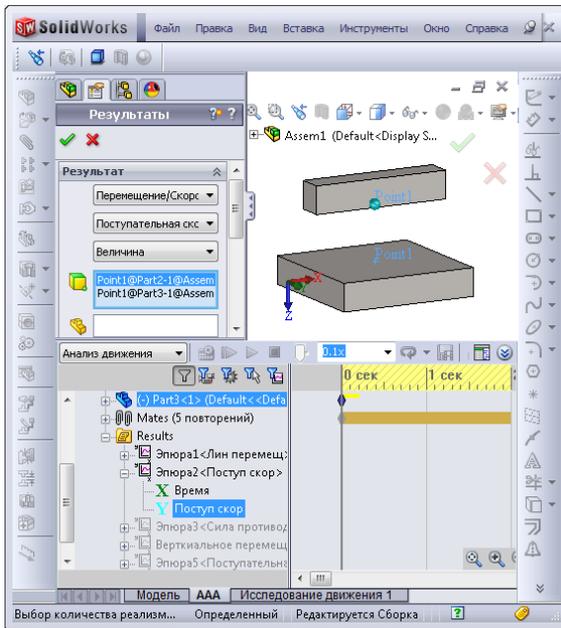


Рис. 3.42. Построение эпюры относительной скорости точек

Создаем силу в варианте **Действие и противодействие** (Action & Reaction), а для закона изменения силы в разделе **Функция силы** (Force Function) выбираем **Выражение** (Expression) (рис. 3.43). Вслед за этим открывается окно **Конструктор функций** (Function Builder). Повторный вход в это окно осуществляется нажатием кнопки **Правка** (Edit).

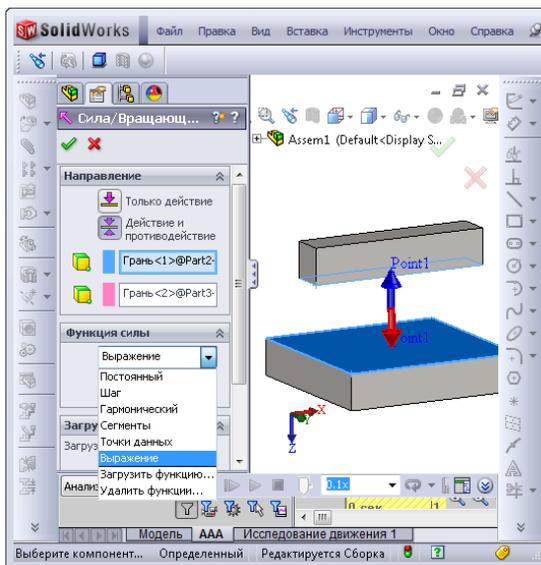


Рис. 3.43. Создание силы Действия/Противодействия

В поле **Определение выражения** (Expression Definition) вводим зависимость для силы как функцию расстояния между точками и взаимной скорости:

$$IF(\{\text{Лин перемещ}\}-L:0,0,-10000*((\{\text{Лин перемещ}\}-L)**1.5+STEP(\{\text{Лин перемещ}\},L,50,75.1,0))*\{\text{Поступ скор}\}))$$

Здесь:

- $L = 75$ — длина троса, мм;
- $\{\text{Лин перемещ}\}$ — обозначение функции из эпюры расстояния между точками;
- $\{\text{Поступ скор}\}$ — обозначение функции из эпюры относительной скорости тросов;
- 1000 — жесткость троса k , Н/мм;
- 50 — максимальная демпфирующая способность троса C_{\max} в Н/(мм/с);
- 1.5 — показатель степени n в выражении для нелинейной жесткости пружины $f = k \times x^n$ в Н/(мм/с);
- 75.1 — расстояние наибольшего проникновения, на котором происходит полное демпфирование, то есть этот процесс начинается при расстоянии L с вязкостью C_{\max} и заканчивается при $L + 0,1$ с нулевым демпфированием.

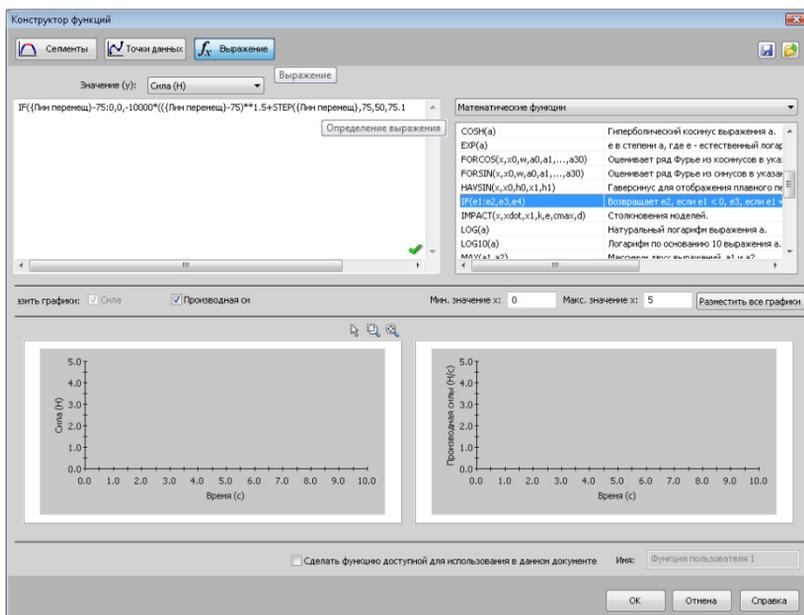


Рис. 3.44. Окно Конструктор функций

Ввод названий результатов (эпюр) при формировании выражения можно осуществлять как непосредственно с клавиатуры, так и выбором (двойным щелчком мыши) из списка в поле **Элементы выражения** (Expression Elements). Оно становится

доступно после выбора элемента **Результаты исследования движения** (Motion Study Results) из списка в заголовке окна, как показано на рис. 3.45.

ПРИМЕЧАНИЕ

В программе присутствует неточность, выражающаяся в том, что при дублировании исследования движения эпюры в результатах перенумеровываются так, что диаграммы имеют сквозную нумерацию между исследованиями. Их эквиваленты в формулах пользователя автоматически не переименовываются.

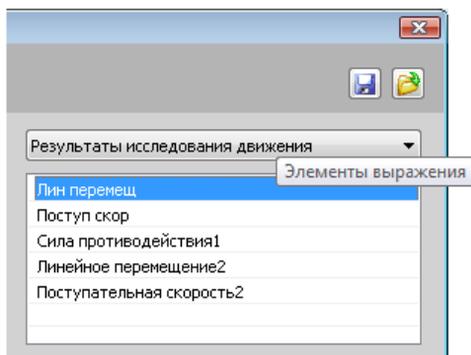


Рис. 3.45. Выбор результата в качестве аргумента выражения

На рис. 3.46, 3.47, 3.48 показаны эпюры взаимного положения и скорости точек, а также реактивной силы. Как видно, у системы есть свободный ход, то есть трос длиннее, чем начальное расстояние между точками.

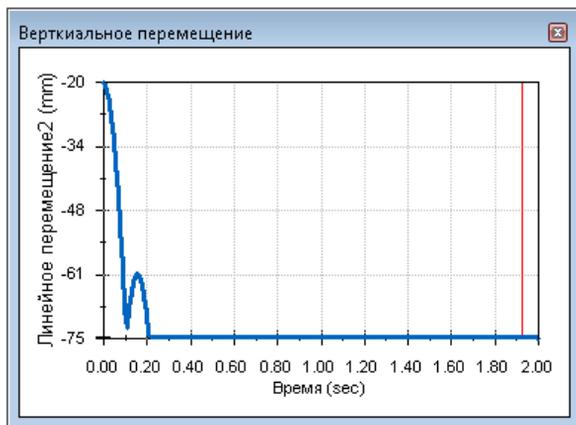


Рис. 3.46. Эпюра вертикального расстояния между точками

Однако если сопоставить содержимое диаграмм, то можно найти противоречие между характером изменения силы, возникающей между деталями, и эпюрами скорости и перемещения. Например, скорость изменяет знак, а график силы, порожд-

дающей это движение, содержит только три отрезка: два прямых и почти прямой участок между ними (рис. 3.48).

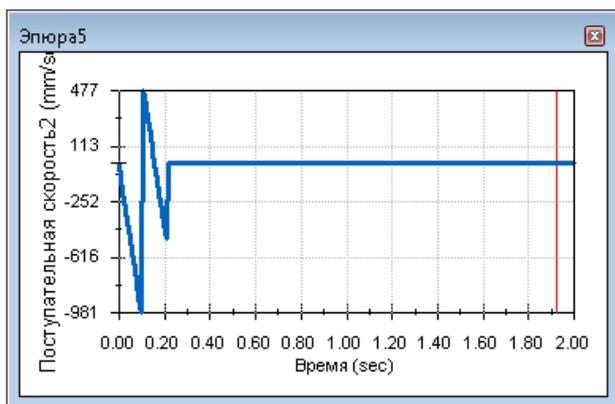


Рис. 3.47. Эпюра относительной скорости в вертикальном направлении

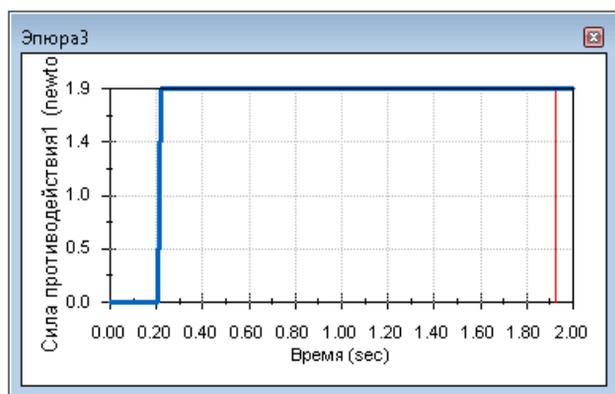


Рис. 3.48. Эпюра силы действия/противодействия

В этой связи возникает подозрение, что настройки вычислительной процедуры не адекватны задаче. Нажав кнопку **Свойства исследования движения** (Motion Study Properties), в одноименной панели изменяем до 1000 величину кадров в секунду (Frames per second). Следует обратить внимание, что из трех кнопок с похожими названиями следует использовать находящуюся в разделе **Анализ движения** (Motion Analysis). Собственно настройки алгоритма доступны по нажатию кнопки **Дополнительные параметры** (Advanced Options), в измененном варианте соответствующее окно показано на рис. 3.49. Изменения настроек состояли в уменьшении шага интегратора.

Результирующие диаграммы, полученные расчетом с модифицированными настройками, показаны на рис. 3.50–3.52. Как видно, они не противоречат здравому смыслу.

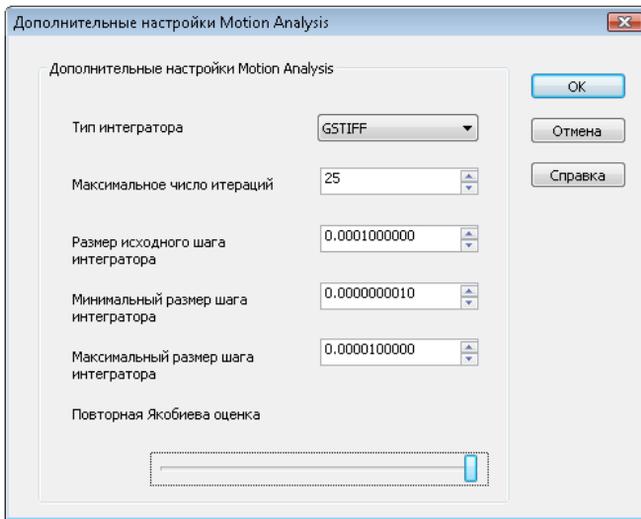


Рис. 3.49. Модифицированные настройки решателя

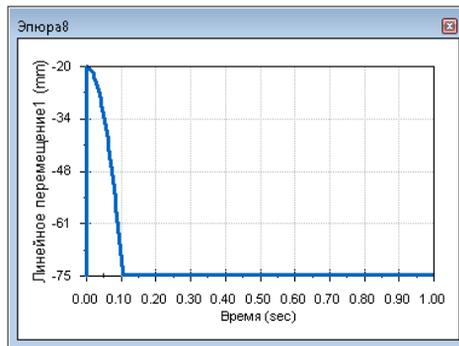


Рис. 3.50. Эпюра вертикального расстояния между точками — уточненное решение

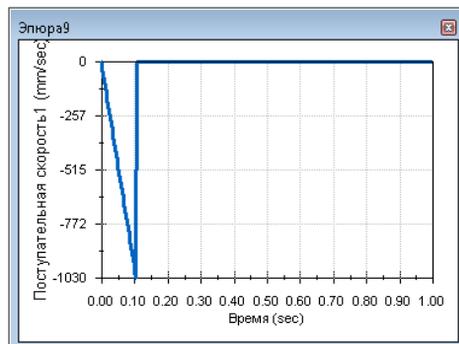


Рис. 3.51. Эпюра относительной скорости в вертикальном направлении — уточненное решение

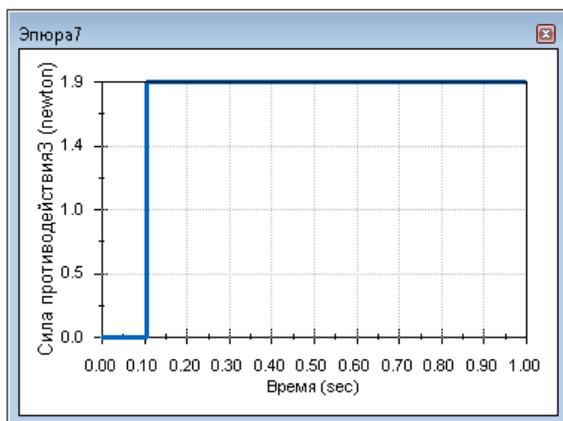


Рис. 3.52. Эпюра силы действия/противодействия — уточненное решение

3.2.4. Выводы

Данный раздел иллюстрирует развитый функционал современных версий SolidWorks Motion в части описания всевозможных функциональных зависимостей. Пользователь имеет возможность описывать функции посредством непрерывных сплайнов на основе точек, кусочно-сплайновой аппроксимации и через выражения. В первых двух случаях автоматически рассчитываются производные и отображаются их графики.

Этот функционал позволяет описывать многие реалии, не имеющие прямых аналогов в SolidWorks Motion.

Приложения

Приложение 1

Матрица функциональности SOLIDWORKS FLOW SIMULATION

ФУНКЦИОНАЛЬНОСТЬ	FLOW SIMULATION	FLOW SIMULATION & ELECTRONIC COOLING (Расчет радио-электронных устройств)	FLOW SIMULATION & HVAC (Расчет вентиляции, отопления и кондиционирования)
Содержание анализа			
Двух- и трехмерный анализ	•	•	•
Плоскости симметрии	•	•	•
Внутреннее и внешнее течение	•	•	•
Ламинарное, турбулентное течение и переходный режим	•	•	•
Нестационарное течение	•	•	•
Дозвуковое, трансзвуковое и сверхзвуковое течение	•	•	•
Расчет относительной влажности в газах	•	•	•
Одновременный теплообмен теплопередачей и теплопереносом	•	•	•
Теплопередача в телах	•	•	•
Течение с учетом гравитации	•	•	•

(продолжение)

ФУНКЦИОНАЛЬНОСТЬ	FLOW SIMULATION	FLOW SIMULATION & ELECTRONIC COOLING (Расчет радио-электронных устройств)	FLOW SIMULATION & HVAC (Расчет вентиляции, отопления и кондиционирования)
Моделирование движения капель и частиц	•	•	•
Кавитация	•	•	•
Нагрев постоянным током	•	•	•
Свойства текучих сред и тел			
Сжимаемая и несжимаемая жидкость	•	•	•
Сжимаемый газ	•	•	•
Реальный газ	•	•	•
Водяной пар	•	•	•
Неньютоновская жидкость	•	•	•
Библиотека излучательных свойств поверхностей тел	•	•	•
Библиотека строительных материалов	–	–	•
Библиотека контактных тепловых сопротивлений	–	•	–
Библиотека типовых печатных плат	–	•	–
Расширенная база материалов	–	•	•
Инструменты создания расчетных моделей			
Несколько анализов в одной модели SolidWorks	•	•	•
Автоматическая идентификация полостей	•	•	•

(продолжение)

ФУНКЦИОНАЛЬНОСТЬ	FLOW SIMULATION	FLOW SIMULATION & ELECTRONIC COOLING (Расчет радио-электронных устройств)	FLOW SIMULATION & HVAC (Расчет вентиляции, отопления и кондиционирования)
Параметрический расчет	•	•	•
Проверка геометрии	•	•	•
Инженерная база данных	•	•	•
Газодинамический калькулятор	•	•	•
Условия (сущности) тел и окружающей среды			
Скорость	•	•	•
Число Маха (для газов)	•	•	•
Массовый и объемный расход	•	•	•
Статическое, полное и давление окружающей среды	•	•	•
Виртуальные вентиляторы	•	•	•
Расширенная библиотека вентиляторов			•
Пористые среды	•	•	•
Перфорированные пластины	•	•	•
Движение стенок "в плоскости" (поступательное и вращательное)	•	•	•
Вращающиеся области	•	•	•
Тепловые источники (мощность, тепловой поток)	•	•	•
Температура	•	•	•

(продолжение)

ФУНКЦИОНАЛЬНОСТЬ	FLOW SIMULATION	FLOW SIMULATION & ELECTRONIC COOLING (Расчет радио-электронных устройств)	FLOW SIMULATION & HVAC (Расчет вентиляции, отопления и кондиционирования)
Излучение с поверхности	•	•	•
Источник излучения			•
Солнечное излучение	•	•	•
Библиотека данных по мощности излучения в зависимости от географии, времени суток и атмосферных условий	•	•	•
Контактное тепловое сопротивление	•	•	•
Термоэлектрические охладители (элементы Пельтье)	•	•	•
Библиотека элементов Пельтье	–	•	
Виртуальные радиаторы	•	•	•
Спектрально-зависимые характеристики пропускания и поглощения тел	–	–	•
Модель слоистой печатной платы	–	•	–
Виртуальные тепловые трубки	–	•	–
Модель двухрезисторных компонентов	–	•	–
Библиотека двухрезисторных компонентов	–	•	–
Параметры прохождения постоянного тока (сила тока, напряжение)	–	•	–
Контактное сопротивление прохождению постоянного тока	–	•	–

(окончание)

Инструменты визуализации и обработки результатов			
ФУНКЦИОНАЛЬНОСТЬ	FLOW SIMULATION	FLOW SIMULATION & ELECTRONIC COOLING (Расчет радио-электронных устройств)	FLOW SIMULATION & HVAC (Расчет вентиляции, отопления и кондиционирования)
Сечения	•	•	•
Диаграммы на поверхности	•	•	•
Изоповерхности	•	•	•
Линии тока	•	•	•
Траектории и параметры движения частиц	•	•	•
Интегральные результаты по телу и поверхности, результаты в точке	•	•	•
Графики функций одного параметра	•	•	•
Множественная анимация	•	•	•
Расчет характеристик комфортности (среднепрогнозируемая оценка, процент неудовлетворенных, рабочая температура, показатель локального воздухообмена и др.)	–	–	•
Инструменты интерфейса			
Отчет в формате MS Word	•	•	•
Публикация результатов в eDrawings	•	•	•
Сохранение диаграмм в форматах BMP, JPEG, PNG, VRML и AVI	•	•	•
Сохранение результатов в MS Excel	•	•	•
Экспорт сетки конечных объемов	•	•	•
Экспорт результатов (давления, температуры и коэффициентов конвективной теплоотдачи) в SolidWorks Simulation	•	•	•

Приложение 2

Физический смысл понятий, описывающих тепловое состояние с точки зрения человека

Среднерadiационная температура (Mean Radiant Temperature) рассчитывается по формуле:

$$T_r^4 = \frac{1}{4\sigma} \int I_{diffuse}(\Omega) d\Omega + \frac{1}{4\sigma} \sum I_{sun},$$

где $I_{diffuse}$ — интенсивность диффузного (рассеянного) теплового излучения ($\text{Вт}/(\text{м}^2 \times \text{рад})$); I_{sun} — интенсивность солнечного излучения ($\text{Вт}/\text{м}^2$); σ — константа Стефана—Больцмана.

При расчете среднерadiационной температуры алгоритм предполагает, что степень черноты всех граней в расчетном домене равна 1.

Рабочая температура (Operative Temperature) есть однородная температура визуально черного окружающего пространства, в котором субъект будет получать то же самое количество теплоты посредством излучения в совокупности с конвекцией, как если бы он находился в среде с неоднородной температурой

$$T_c = \frac{T_r + T_a \sqrt{10v}}{1 + \sqrt{10v}},$$

где T_r — среднерadiационная температура, °C; T_a — температура воздуха, °C; v — скорость воздуха, м/с.

ПРИМЕЧАНИЕ

Несмотря на значительную схожесть формулировок, "рабочая температура" в терминах Flow Simulation не тождественна отечественному понятию "результатирующая температура".

Predicted Mean Vote (PMV) — средняя прогнозируемая оценка:

$$PMV = (0,303e^{-0,036M} + 0,028) \times \left\{ \begin{aligned} & (M - W) - 3,05 \times 10^{-3} [5733 - 6,99(M - V) - p_a] - \\ & - 0,42 [(M - V) - 58,15] - 1,7 \times 10^{-5} M (5867 - p_a) - 0,0014 M (34 - T_a) - \\ & - 3,96 \times 10^{-8} f_{cl} [(T_{cl} + 273)^4 - (T_r + 273)^4] - f_{cl} h_c (T_{cl} - T_a) \end{aligned} \right\}.$$

Здесь T_{cl} — температура поверхности одежды.

$$T_{cl} = 35,7 - 0,028(M - W) - \\ - I_{cl} \left\{ 3,96 \times 10^{-8} f_{cl} \left[(T_{cl} + 273)^4 - (T_r + 273)^4 \right] + f_{cl} h_c (T_{cl} - T_a) \right\},$$

где

$$h_c = \max \left[2,38(T_{cl} - T_a)^{0,25}; 12,1\sqrt{v} \right]; \\ f_{cl} = \left\{ \begin{array}{l} 1,00 + 1,29I_{cl}, \text{ если } I_{cl} \leq 0,078 \frac{\text{м}^2}{\text{К} \times \text{Вт}} \\ 1,05 + 0,645I_{cl}, \text{ если } I_{cl} > 0,078 \frac{\text{м}^2}{\text{К} \times \text{Вт}} \end{array} \right\}.$$

Обозначения:

- I_{cl} ($\text{м}^2 \times \text{К}/\text{Вт}$) — тепловое сопротивление одежды, под которым понимается сопротивление теплопередаче из-за одежды. Эта константа является интегральной характеристикой, описывающей как покрытые части тела, так и непосредственно взаимодействующие со средой, в частности руки и лицо;
- f_{cl} — отношение площадей, покрытых и непокрытых одеждой;
- f_a (Па) — парциальное давление водяного пара, рассчитанное в соответствии с кривой насыщения, температурой воздуха и относительной влажностью;
- h_c ($\text{Вт}/\text{м}^2 \times \text{К}$) — коэффициент конвективной теплоотдачи поверхности тела.

Contaminant Removal Effectiveness (CRE) (Эффективность удаления загрязнений) — характеристика, оценивающая эффективность системы вентиляции с точки зрения удаления загрязненного воздуха из пространства с целом. Для пространства с хорошим перемешиванием $CRE = 1$. Большие значения — лучше, меньшие — хуже. Эта величина рассчитывается, только если в модели присутствует более одной текучей среды. Правила расчета CRE следующие:

$$CRE = \frac{C_e}{\langle C \rangle},$$

где C_e — среднемассовая доля примесей, вычисленная по граням, через которые поток выходит из расчетной области; $\langle C \rangle$ — среднемассовая доля примесей, вычисленная в пределах всей расчетной области.

Local Air Quality Index (LAQI) (Местное качество воздуха) — этот критерий подобен CRE, но оценивает эффективность системы вентиляции с точки зрения удаления загрязнений из каждой точки пространства:

$$LAQI = \frac{C_e}{C},$$

где C_e — среднemasсовая доля примесей, вычисленная по граням, через которые поток выходит из расчетной области; C — среднemasсовая доля примесей, вычисленная в точке.

EDT (Effective Draft Temperature) (Действующая температура сквозняка) рассчитывается по формуле:

$$T_d = T - T_m - 7,6553(v - 0,1524).$$

Здесь $T(^{\circ}\text{C})$ — локальная температура; $T_m(^{\circ}\text{C})$ — средняя по рассматриваемому объему температура; v (м/с) — локальная скорость.

Приложение 3

Описание компакт-диска

На прилагаемом DVD-диске содержатся цветные иллюстрации, которые, применительно к результатам расчетов, являются намного более информативными, чем оформленные в градациях серого. Также там находятся модели, соответствующие изложенному материалу, в формате SolidWorks с информацией о постановке задачи в Simulation. Если результаты имеют объем, позволяющий разместить их на диске, то они также присутствуют. Ряд моделей, в силу ограничения авторских прав, пришлось преобразовать в формат eDrawings, где доступна собственно геометрия (без возможности провести измерения) и диаграммы с результатами. Модели и результаты собраны в папке Модели, иллюстрации — в папке Цветные иллюстрации. В исходном состоянии они занимают около 7 Гбайт.

Модели и расчеты выполнены в различных версиях SolidWorks, однако гарантировать их открытие совместно с условиями расчетов и результатами можно только в версии 2011 г. SP 3.0 и более свежих.

В настройках Simulation следует изменить расположение папок с результатами, как показано на рис. П1. Также рекомендуется размещать файлы с моделями, чтобы все папки "на пути к ним" содержали только латинские символы, поскольку некоторые релизы Simulation порождают ошибки при обработке путей с кириллицей. Также следует контролировать, чтобы папки с моделями имели доступ на изменение и запись.

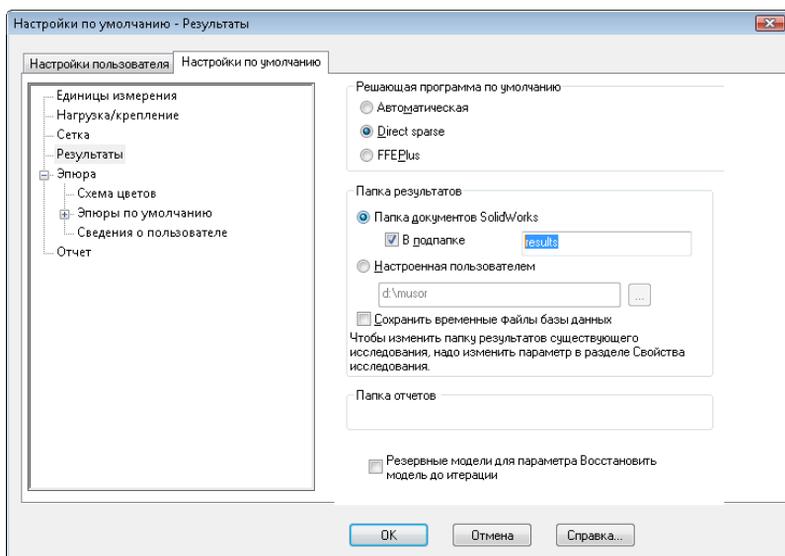


Рис. П1

