МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ПРИКЛАДНОЙ И БИОМЕХАНИКЕ

Учебное пособие

Санкт-Петербург
Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
2015

УДК 612.76(07)
ББК 3973.23-а8я7+Е984с11я7

Авторы: **П. И. Бегун, Е. А. Лебедева, Д. А. Лобачева, О. В. Щепилина**

К63 Компьютерное моделирование в прикладной и биомеханике: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПБГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. 159 с.

ISBN 978-5-7629-1688-2

Содержит пять глав и приложения с заданиями к лабораторным работам и практическим занятиям в компьютерном классе по моделированию элементов конструкций и биологических объектов при использовании пакетов прикладных программ Solid Works и Mimics. С необходимой подробностью изложены алгоритмы исследования элементов конструкций и биологических объектов при статическом нагружении в рамках механики трехмерного твердого деформированного тела и алгоритмы исследования состояния потока при различных внешних условиях. В динамике рассмотрены алгоритмы расчета собственной частоты колебаний, усталости, устойчивости и нелинейности элементов конструкций и объектов. Все главы достаточно полно проиллюстрированы примерами.

Предназначено для бакалавров, обучающихся по направлениям 230100, 220100, 280700, 201000, 200100.

УДК 612.76(07)
ББК 3973.23-а8я7+Е984с11я7

Рецензенты: кафедра 24 СПбГУАП; д-р пед. наук, проф. А. В. Самсонова (НГУ им. П. Ф. Лесгафта, СПб).

Утверждено
редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

ISBN 978-5-7629-1688-2 ©СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015

Введение

В пособии рассматриваются особенности построения геометрических моделей конструкций и биологических объектов в программах SolidWorks и Mimics и алгоритмы их исследования в статике и динамике в пакетах прикладных программ SolidWorks Simulation, а также компьютерные методики исследования состояния потоков в объектах различной формы при различных внешних воздействиях.

Программное обеспечение предлагает следующие типы исследований: 1) статический анализ, 2) частота, 3) потеря устойчивости, 4) термические, 5) испытание на ударную нагрузку, 6) усталостное, 7) нелинейное статическое и нелинейное динамическое, 8) гармоническое, 9) случайное колебание, 10) конструкция сосуда, работающего под давлением, 11) исследование проектирования.

Процесс моделирования состоит в выделении свойств объекта и его взаимодействия с другими объектами, отражении особенности функционирования при различных внешних воздействиях и логическом анализе собранной информации. Модель отражает структуру и функцию системы-оригинала средствами структуры или функции элементов, из которых она строится. Важнейший этап моделирования объектов протезирования – построение модели. Модель – это умозрительное представление реального объекта, предназначенное для построения математической или физической модели, в которой отражены свойства реального объекта, необходимые для получения ответа на поставленную задачу. Математическая модель – это система математических соотношений – формул, уравнений, неравенств и т. д., отражающих существенные свойства объекта или явления. Это абстракция, в которой функционирование реальных объектов и взаимоотношений между ними заменены отношениями математических категорий. Искусство построения математической модели состоит в совмещении как можно большей лаконичности в ее математическом описании с достаточной точностью модельного воспроизводства именно тех сторон анализируемой реальности, которые интересуют при данном анализе. Использование компьютерных программ, основанных на численных методах, позволяет углубиться в области, которые остаются необслуженными аналитическими методами из-за больших трудностей в реализации. Аналитический метод и метод компьютерного численного анализа – взаимопроникающие и дополняющие друг друга методы. При

мощном программном обеспечении, компьютерный численный анализ занимает доминирующее положение.

В пособии изложены алгоритмы исследования элементов конструкций и биологических объектов при статическом нагружении в рамках механики трехмерного твердого деформированного тела и алгоритмы исследования состояния потока при различных внешних условиях. В динамике для приложения к исследованию элементов конструкций и объектов рассмотрены алгоритмы расчета собственной частоты колебаний, усталости, устойчивости и нелинейности. Все разделы пособия проиллюстрированы примерами.

Глава 1. ПОСТРОЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ И БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОМ ПАКЕТЕ SOLIDWORKS

Процесс построения геометрических моделей в SolidWorks начинается с создания эскиза, а создание эскиза начинается с выбора конструктивной плоскости, в которой будет строиться этот двумерный эскиз. Впоследствии этот эскиз можно тем или иным способом легко преобразовать в твердое тело. При создании эскиза доступен полный набор геометрических построений и операций редактирования. Нет никакой необходимости сразу точно выдерживать требуемые размеры, достаточно примерно соблюдать конфигурацию эскиза. Позже, если потребуется, можно изменить значение любого размера и наложить связи, ограничивающие взаимное расположение элементов эскиза – отрезков, дуг, окружностей и т. п. Эскиз может быть легко отредактирован в любой момент работы над моделью.

Для упрощения работы с трехмерной моделью на любом этапе проектирования и повышения ее наглядности в SolidWorks используется Дерево Конструирования в стиле Проводника Windows. Оно представляет собой своеобразную графическую карту модели, последовательно отражающую все геометрические примитивы, которые были использованы при создании детали, а также конструктивные оси и вспомогательные плоскости, на которых создавались двумерные эскизы. При работе же в режиме сборки Дерево Конструирования показывает список деталей, входящих в сборку, и обычно отображается в левой части окна SolidWorks, хотя его положение можно в любой момент изменить. Дерево Конструирования предоставляет мощные средства редактирования структуры модели или узла. Оно позволяет переопределять порядок следования отдельных конструктивных элементов либо целых деталей, создавать в пределах детали или сборки несколько вариантов конфигурации какого либо элемента и т. д.

1.1. Построение двумерных эскизов объектов

Все эскизы, как двумерные, так и трехмерные, строятся на трех взаимно ортогональных плоскостях Спереди, Сверху и Справа. Первоначальный выбор той или иной плоскости не имеет существенного значения, но этот набор позволяет создавать трехмерные элементы детали в трех направлениях. Обычно процесс рисования эскиза начинается с плоскости Спереди. Кроме

того, можно создавать свои собственные плоскости и построение эскиза начинать с них.

В каждом эскизе имеется своя исходная точка, поэтому в детали обычно бывает несколько исходных точек. Когда открыт эскиз, нельзя отключать отображение его исходной точки. Исходная точка отображается красным цветом в открытом эскизе и помогает определить координаты его точек. Рисование любого эскиза рекомендуется начинать с исходной точки, тогда элементы автоматически осуществляют привязку к ней и не требуют дополнительных взаимосвязей для полного определения эскизов.

Для ориентации плоскости эскиза в пространстве на экране в графической области отображается значок триады Система координат. Система координат появляется и в документах деталей и сборок, помогая ориентироваться в пространстве при просмотре моделей. Система координат служит только для справки, ее нельзя выбрать или использовать в качестве точки формирования. Систему координат можно скрыть или указать для нее цвета. При вращении плоскости с эскизом триада также вращается и показывает текущее пространственное положение плоскости эскиза. При построении эскиза необходимо следить, чтобы он имел замкнутый контур, а элементы эскиза не пересекались. SolidWorks допускает в одном эскизе несколько замкнутых контуров, формирующих многотельную деталь. В этом случае при вытягивании эскиза программа попросит указать расположение материала в контурах. В случае незамкнутого контура при вытягивании программа будет интерпретировать эскиз как тонкостенный элемент и попросит указать его толщину.

При создании эскизов можно вырезать, вставлять или копировать и вставлять один и более объектов, как из одного эскиза в другой, так и внутри одного эскиза. В процессе рисования появляются линии формирования, которые работают вместе с указателями, привязками и взаимосвязями, чтобы графически отобразить влияние объектов друг на друга. Линии формирования – это пунктирные линии, которые появляются по мере создания эскиза. Когда указатель приближается к высвеченным меткам, например, средним точкам, линии формирования используются в качестве ориентира в зависимости от существующих объектов эскиза.

Двумерные эскизы можно создавать только в плоскостях или на существующих гранях детали, а трехмерные – в трехмерном пространстве.

Запускаем программу и создаем новый файл. В появившемся окне во вкладке Шаблоны выбираем Деталь. На экране появляется пользовательский

интерфейс в режиме Эскиз (рис. 1.1). В верхней части интерфейса находится строка меню команд. В списке каждого меню имеется пункт Настройка меню, который позволяет настраивать вид списка. Ниже располагается лента Менеджера команд.

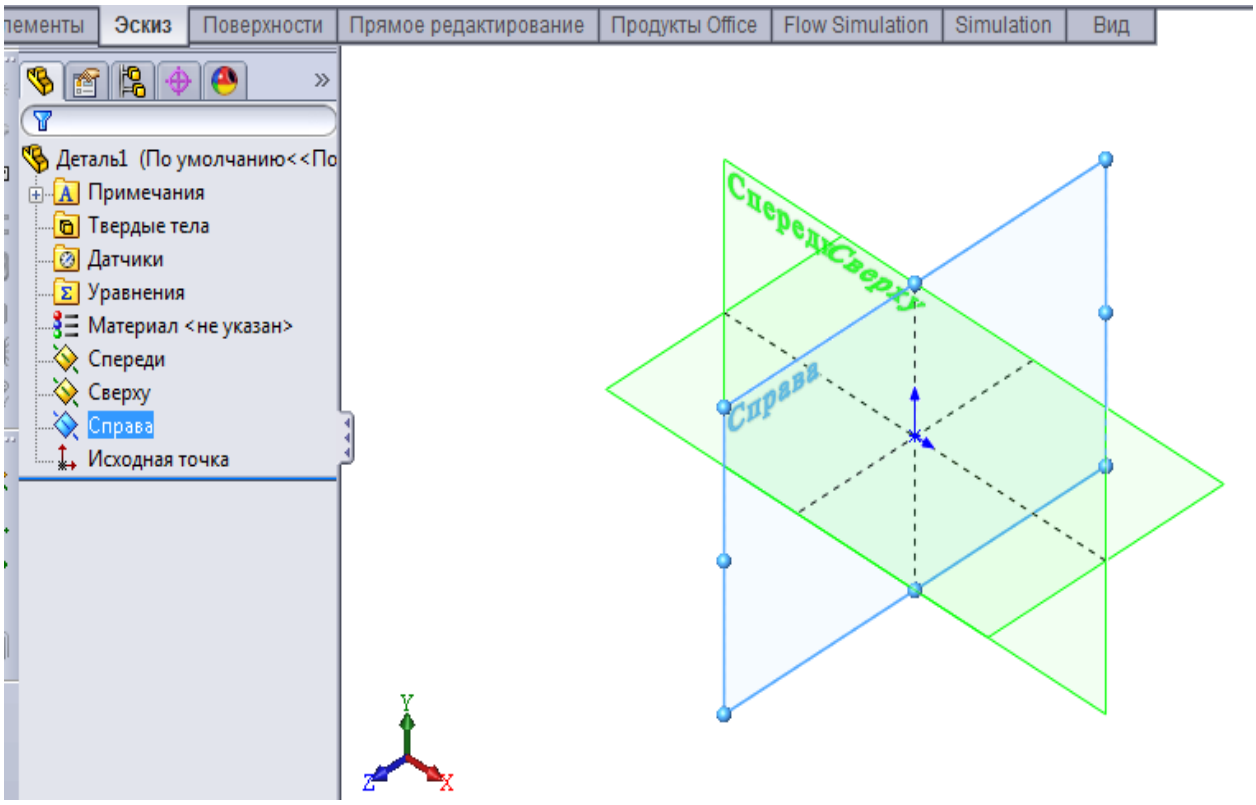


Рис. 1.1. Пользовательский интерфейс в режиме Эскиз

Большинство команд SolidWorks может быть вызвано несколькими способами:

– из строки меню;

– с помощью команд в соответствующей панели инструментов;

– с помощью Менеджера команд;

– с помощью горячих клавиш;

– нажатием правой кнопки для вызова контекстного меню.

Все значки собраны в инструментальные панели, которые тоже можно настраивать – отключать, переставлять, добавлять или убирать значки (рис. 1.2). Чтобы добавить значок на панель инструментов, необходимо найти его в соответствующей категории, а затем, наведя указатель мыши на соответствующий значок, нажать левую кнопку и, удерживая ее, перетащить значок в удобное для работы место на панели инструментов. Добавленный значок отобразится на экране в панели инструментов. Чтобы удалить значок, необходимо «схватить» его мышью в инструментальной панели окна про-

граммы и перетащить в окно настроек. После того, как кнопка мыши будет отпущена, значок исчезнет с экрана. Перестановка панели инструментов в области окна осуществляется простым перетаскиваем мышью, захватывая курсором заголовок панели.

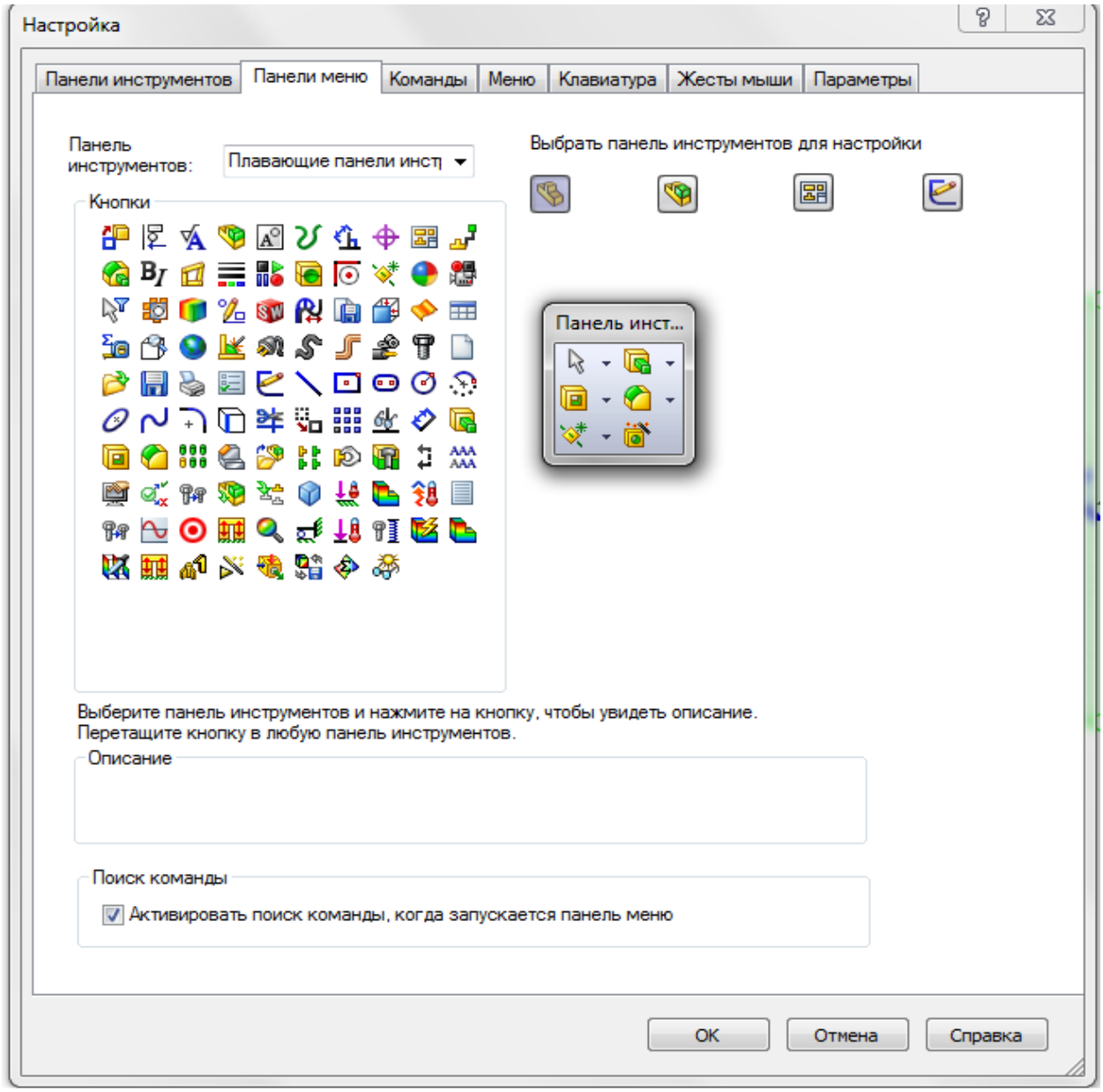


Рис. 1.2. Настройка инструментальной панели

По умолчанию в левой части экрана расположено поле Дерево конструирования, где отображаются все построения (рис. 1.3). Поскольку еще ничего не создано, Дерево конструирования пусто и имеются только исходные плоскости Спереди, Сверху и Справа, на которых можно начинать построение эскизов, и Исходная точка в месте пересечения стандартных плоскостей. Эти плоскости расположены друг к другу ортогонально, что позволяет эф-

фективно строить трехмерную модель, используя все три направления одновременно.

Чтобы перейти в режим рисования эскиза, надо выбрать в Дереве конструирования или прямо в графическом окне одну из плоскостей Спереди, Сверху или Справа и нажать на кнопку Эскиз. Программа перейдет в режим рисования эскиза. Если своевременно не выбрать плоскость, то программа после нажатия кнопки Эскиз попросит указать плоскость, где будет создаваться эскиз.

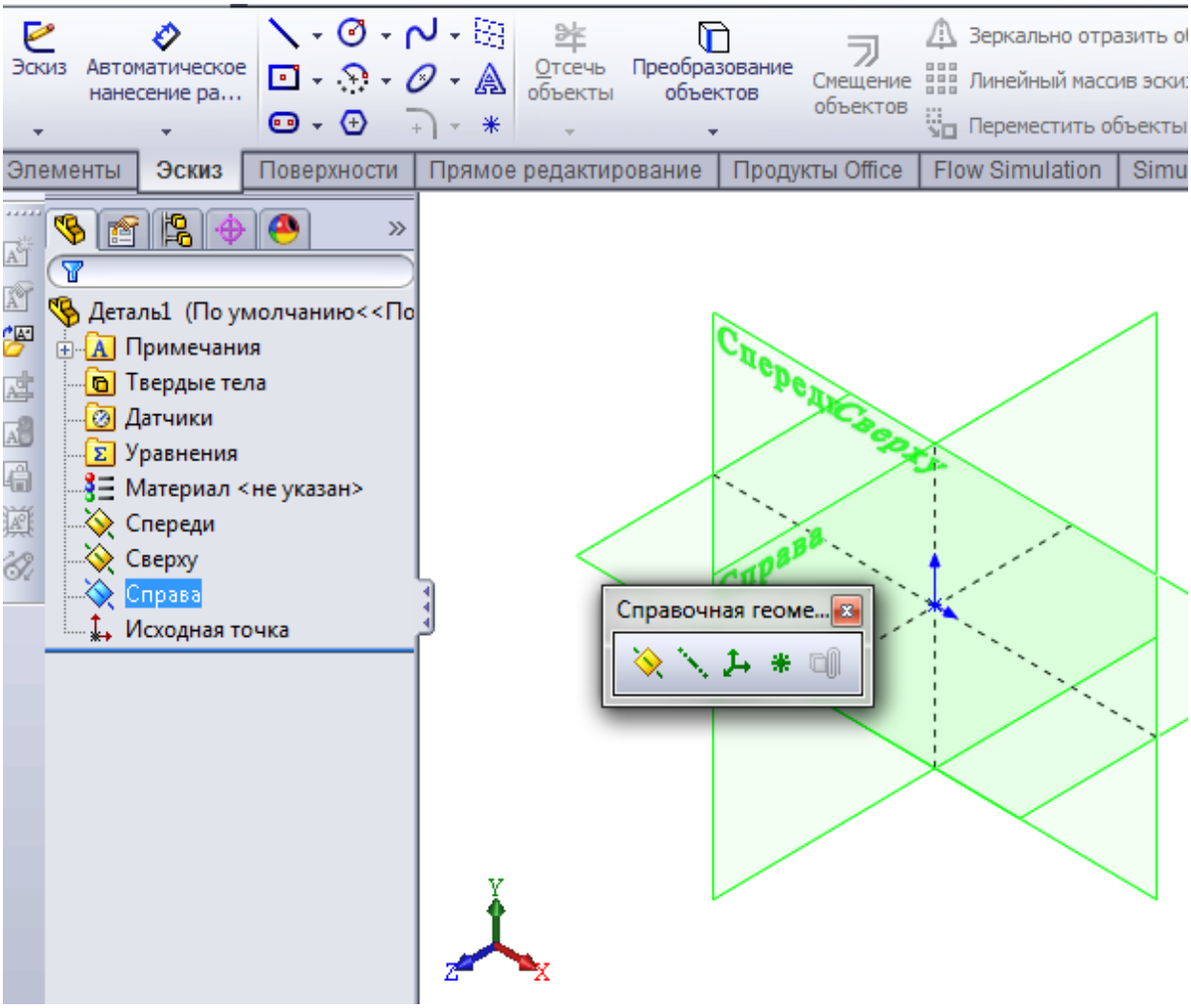


Рис. 1.3. Дерево конструирования

Для удобства рисования можно использовать координатную сетку (рис. 1.4). Для этого в команде Инструменты надо выбрать Параметры, затем перейти на вкладку Свойства документа и выбрать пункт Масштабная Сетка/Привязать. Появится поле Масштабная сетка, в нем можно настроить шаг сетки, интервал привязки или вообще ее убрать.

В центре экрана отображена Исходная точка. В этой точке пересекаются исходные плоскости Спереди, Сверху и Справа, которые, расположены ортогонально друг к другу.

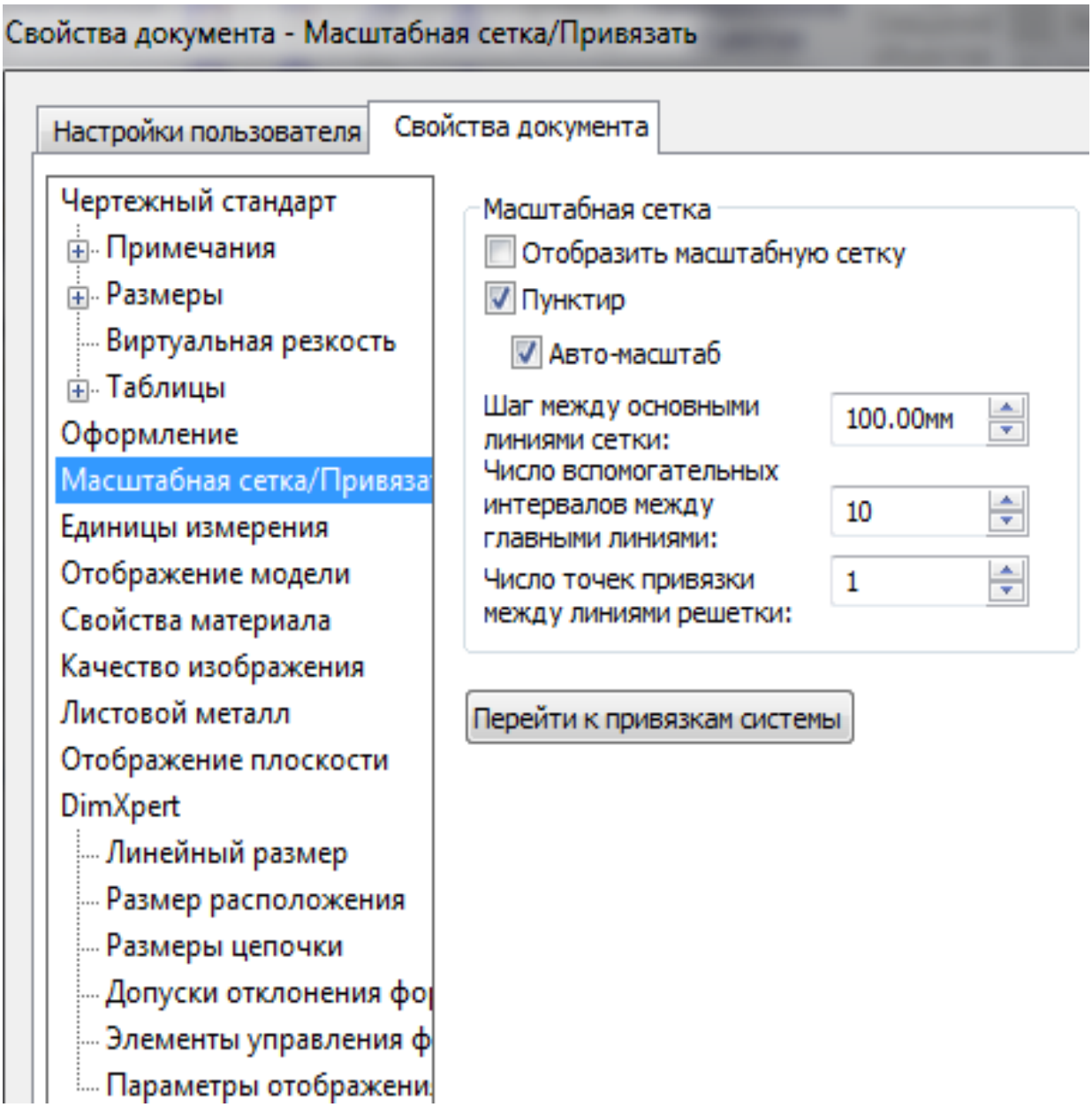


Рис. 1.4. Настройка масштабной сетки

Рисовать эскиз рекомендуется начинать с этой точки, хотя это и необязательно. Если начать эскиз с исходной точки, то элементы эскиза автоматически привязываются к ней. Если эскиз не будет содержать эту точку, то необходимо задать дополнительные размеры с целью определения положения эскиза относительно исходной точки.

1.1.1. Простые эскизы

Простые эскизы состоят из примитивов: отрезков, окружностей и дуг, соединенных в замкнутый контур. Рассмотрим создание простого эскиза.

Выберите плоскость Спереди и активируйте команду Эскиз. При этом Дерево конструирования перемещается в область построений. Такое перемещение Дерево конструирования позволяет осуществлять непрерывный контроль за процессом проектирования. Вместо Дерева конструирования в левой части экрана открывается окно Менеджера свойств выполняемой команды. Выберите Построение линии (рис. 1.5). Во вкладке Взаимосвязи можно задать положение предполагаемой линии, если известно, что она должна быть строго горизонтальна, вертикальна или располагаться под каким либо углом. Также может быть активна опция Как нарисовано.

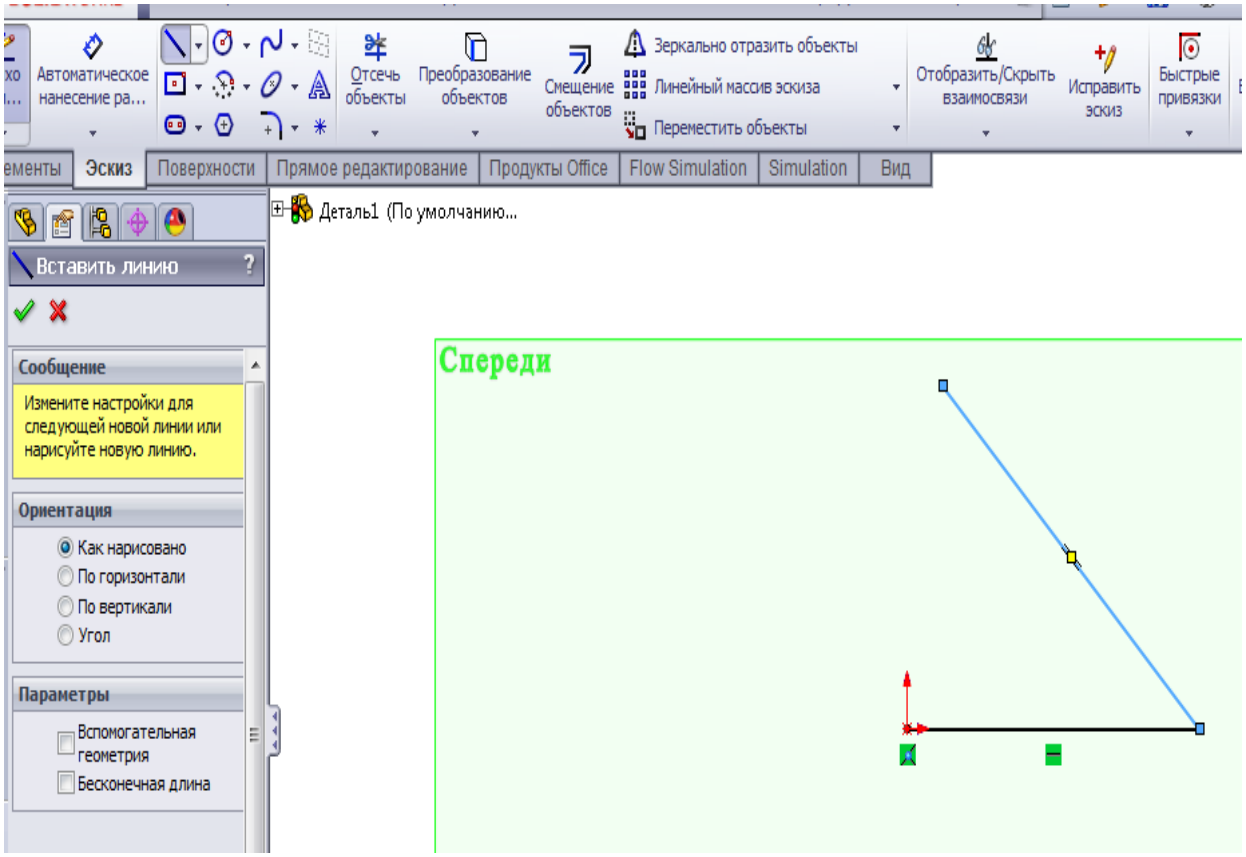


Рис. 1.5. Построение эскиза с использованием Линии

Подведите курсор к началу координат, где планируется расположить начальную точку линии. Рядом с ним должен возникнуть символ привязки. Нажмите левую кнопку мыши и, удерживая ее, перемещайте курсор к конечной точке линии. Как только курсор достигнет конечной точки отрезка, отпустите кнопку мыши.

При рисовании эскизов особой точности соблюдать не нужно: длина может несколько отличаться от заданной, а линия быть не строго горизонтальной. Все необходимые параметры можно откорректировать через Менеджер свойств (рис. 1.6). Однако, если нарисовать отрезок слишком длинным или слишком коротким, то, скорее всего, эскиз может принять неправильную форму при простановке размеров, и тогда потребуется дополнительная корректировка его элементов.

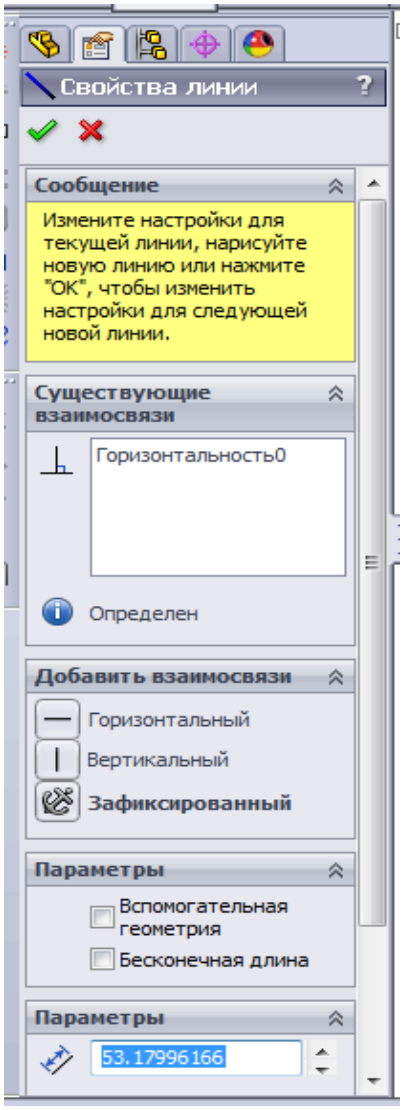


Рис. 1.6. Менеджер Свойств Линии

Если команда построения линий все еще активна, можно сразу же добавить в эскиз второй отрезок. Подведите курсор к концу отрезка, от которого вы хотите продолжить эскиз. Появление двух концентрических окружностей желтого цвета рядом с курсором свидетельствует о захвате конца отрезка, в результате чего оба отрезка будут соединены. Если не дождаться появления этого значка, то отрезки не соединятся, и эскиз окажется незамкнутым. Таким образом можно использовать и другие примитивы.

Чтобы полностью определить эскиз, можно наложить дополнительные взаимосвязи открыв команду Отобразить/Скрыть Взаимосвязи. Далее необходимо расставить размеры. Для этого вызовите команду Автоматическое нанесение размеров, щелкните мышью по выбранной линии, переместите курсор и укажите место установки поля размера. Если необходимо проставить линейный или угловой размер, выделите сначала одну линию, потом вторую и укажите место расположения поля размера. Значение размера можно откорректировать прямо в поле размера или в Менеджере свойств. Если эскиз недоопределен, его линии имеют синий цвет. Если эскиз полностью определен, все линии приобретают черный цвет (рис. 1.7).

Если эскиз переопределен, т. е. появляется лишний размер, который конфликтует с уже проставленными, эскиз приобретает желтый цвет. В слу-

чае возникновения конфликтов в эскизе программа SolidWorks имеет инструмент SketchXpert для их разрешения.

Чтобы запустить SketchXpert, щелкните мышью в строке состояния внизу графического окна в месте надписи Переопределен.

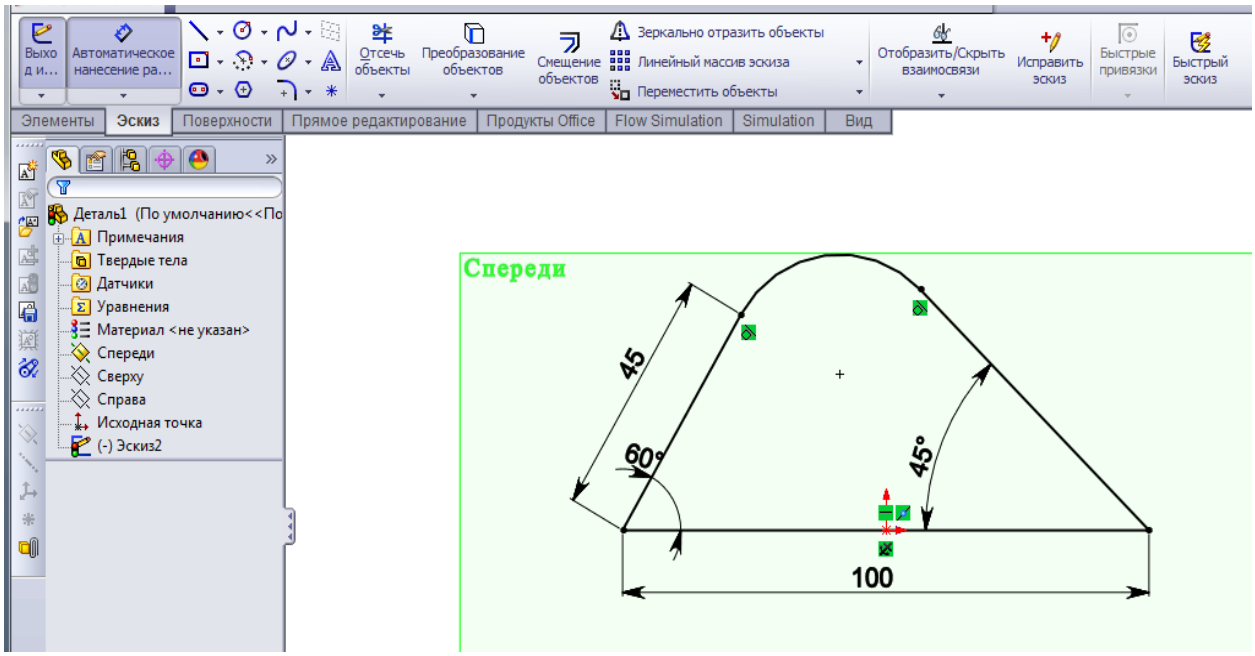


Рис. 1.7. Полностью определенный эскиз

В Менеджере свойств откроется диалоговое окно SketchXpert (рис. 1.8), в котором можно выбрать одну из кнопок:

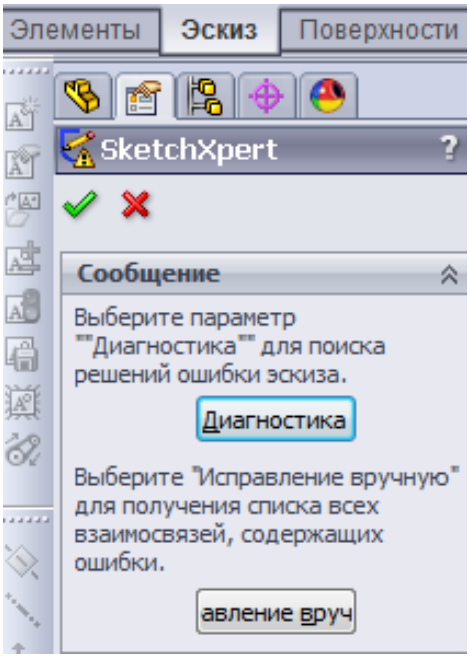


Рис. 1.8. SketchXpert

1. Диагностика – анализ возникшего конфликта. В разделе Результаты предлагаются варианты решения данного конфликта. Пользователь должен выбрать один из предлагаемых вариантов. После выбора необходимо нажать кнопку Принимаю для завершения команды.

2. Исправление вручную. Пользователь должен сам решить, какую взаимосвязь или размер необходимо удалить для разрешения конфликта. Для этого требуется щелкнуть мышью по конфликтному элементу в разделе Противоречивые взаимосвязи /размеры и нажать клавишу Delete.

Чтобы выйти из режима рисования эскиза, нажмите кнопку Выход из эскиза в панели инструментов Эскиз или красный крестик в правом верхнем

углу графической области построения эскиза. Для сохранения эскиза в файле детали выберите команду Файл/Сохранить или просто нажмите в панели управления Стандартная кнопку Сохранить.

Если эскиз симметричный, нет необходимости рисовать его полностью: можно нарисовать половину и использовать команду зеркального отображения объектов. Последовательность применения данной команды следующая:

– рисуются элементы эскиза;

– проводится осевая линия;

– осуществляется зеркальное отражение выбранных элементов.

1.1.2. Сложные эскизы

Простые эскизы состоят из примитивов – линий и окружностей. Их может быть много, но при этом эскиз все равно считается простым. Если в эскиз добавляются элементы, искажающие примитивы, то такой эскиз становится сложным. Такими элементами являются фаски и скругления.

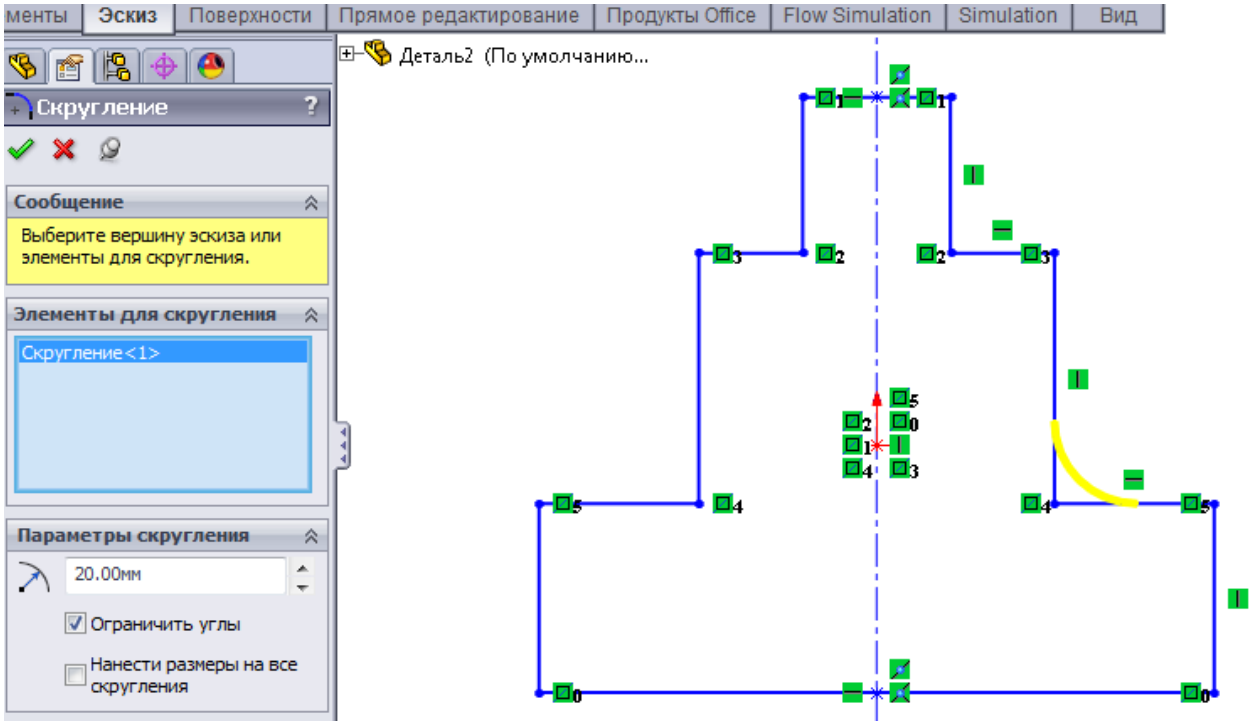


Рис. 1.9. Создание скругления в эскизе

Одну и ту же деталь можно получить двумя способами:

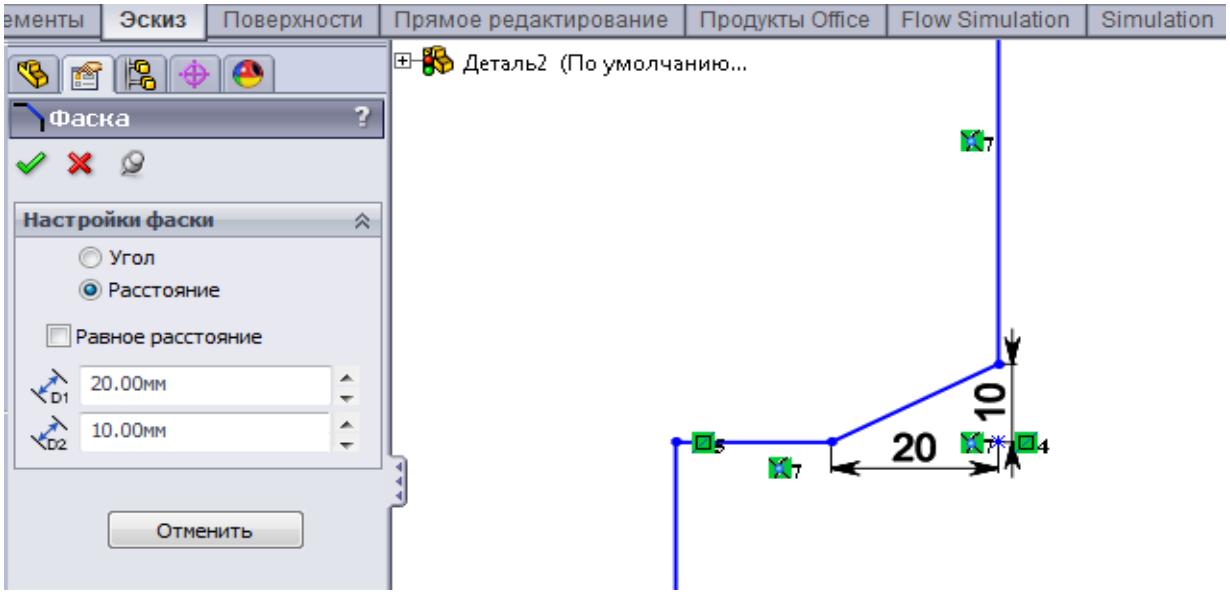
– нарисовать сложный эскиз, а затем вытянуть деталь, используя этот эскиз в качестве сложного профиля;

– нарисовать простой эскиз, затем вытянуть деталь, а уже после этого добавить в нее дополнительные элементы (именно этот вариант предпочтителен при планировании основания для детали).

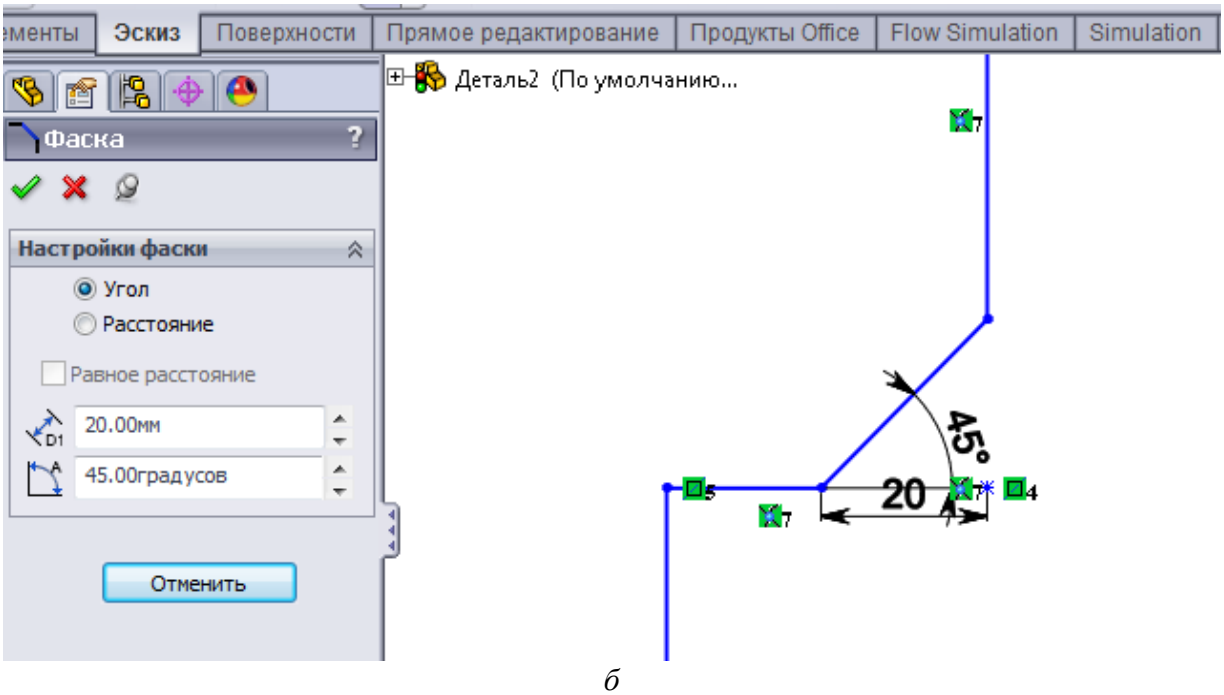
При выборе способа построений необходимо учитывать следующее:

– сложные эскизы перестраиваются быстрее. Скругления на эскизе повторно рассчитываются намного быстрее по сравнению с элементами скруглений в детали, хотя сложные эскизы труднее создавать и редактировать;

– простые эскизы являются более гибкими и легкими в использовании.



а



б

Рис. 1.10. Создание фаски в эскизе

Отдельные элементы в детали при необходимости можно переупорядочить или погасить. Вначале добавим в эскиз элемент скругления двух отрезков. Нажмите в панели инструментов Эскиз кнопку Скругление. В Менедже-

ре свойств появится диалоговое окно Скругление, в котором можно задать радиус скруглений (рис. 1.9). Этот размер задается в разделе Параметры скругления. Задав размер, укажите два отрезка, между которыми вы хотите скруглить угол.

Теперь добавим элемент «фаска». Для этого нажмите в панели инструментов Эскиз кнопку Фаска. В Менеджере свойств появится диалоговое окно Фаска, в котором имеется вкладка Настройка фаски.

В настройках можно задать параметры фаски следующими способами:

1. Если нужно сделать фаску с равными расстояниями, тогда необходимо активировать режим Расстояние и установить флажок Равное расстояние (и ниже в окне задать это расстояние). Катеты фаски в этом случае будут одинаковыми.

2. Если нужно сделать фаску с неравными расстояниями, тогда необходимо сделать активным режим Расстояние, снять флажок Равное расстояние и ниже в двух окнах задать расстояния по горизонтали и вертикали соответственно. Катеты фаски в этом случае будут не одинаковыми (рис. 1.10, *а*).

3. Если нужно задать фаску с помощью угла, тогда необходимо сделать активным режим Угол и ниже в двух окнах задать размер одного из катетов и угол наклона фаски (рис. 1.10, *б*).

Также для создания эскизов можно использовать массивы. Программа позволяет строить массивы двух типов – линейные и круговые. Линейные массивы используются для создания нескольких экземпляров одного или нескольких элементов эскиза, которые можно разместить на одинаковом расстоянии вдоль одной или двух траекторий.

Например, требуется построить эскиз плиты с ячейками сложной формы. Откройте для редактирования новую область построения и нарисуйте эскиз плиты и одной ячейки (рис. 1.11).

Чтобы не рисовать заданное число одинаковых элементов эскиза, воспользуйтесь командой Линейный массив в панели инструментов Эскиз. В Менеджере свойств появится диалоговое окно Линейный массив. Щелкните мышью в поле Объекты в массив и укажите все линии, из которых состоит та ячейка, которую необходимо размножить.

Имена этих линий должны отразиться в поле. Теперь задайте направление и количество элементов. Желтым цветом отразится предполагаемое расположение элементов.

Направления можно задавать одно или два. Причем количество ячеек в двух направлениях может быть как одинаковым, так и различным. Ячейки могут располагаться строго вдоль указанных осей или со смещением под заданным углом относительно исходной оси.

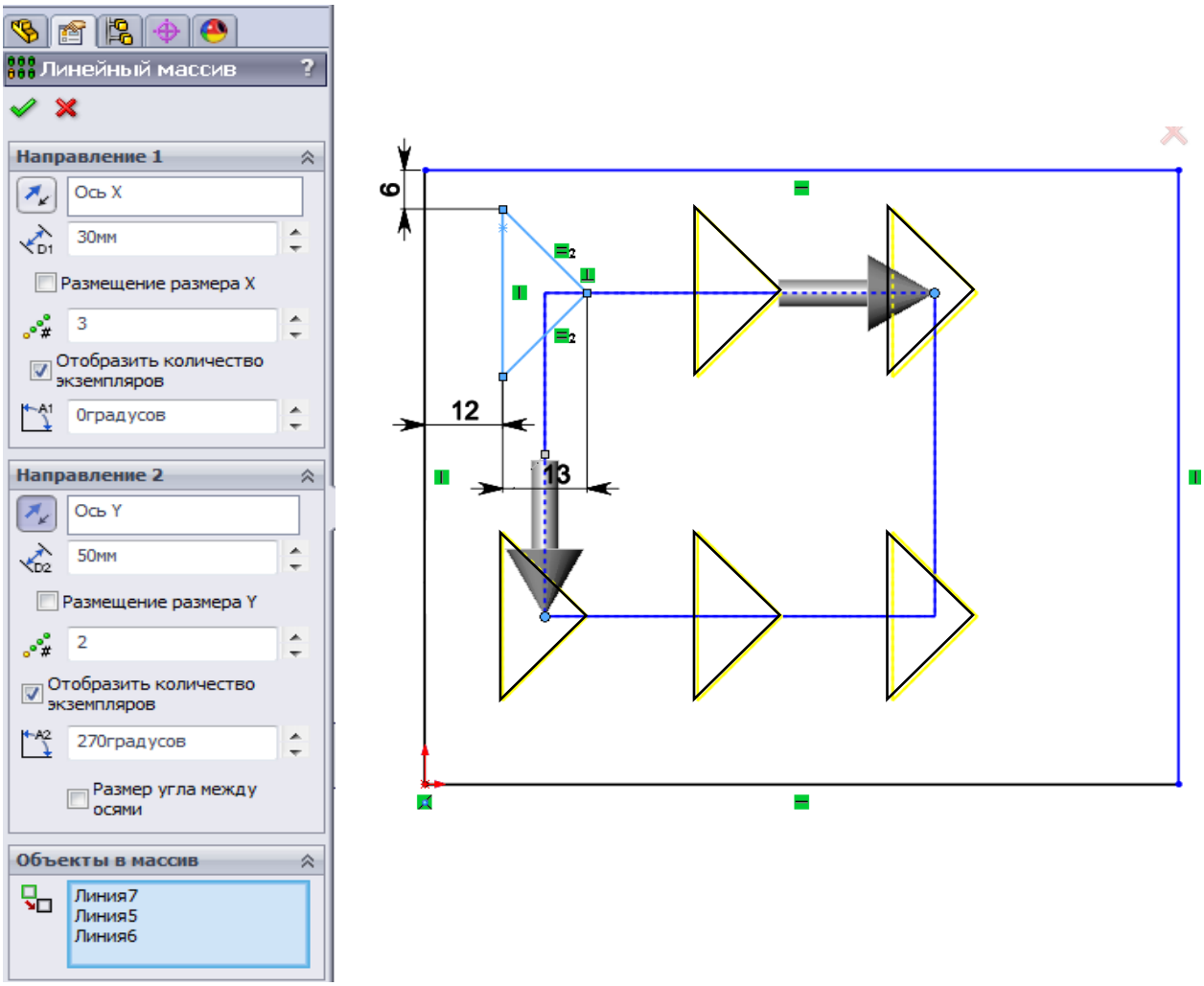


Рис. 1.11. Построение линейного массива треугольного элемента эскиза

Круговой массив применяется в случаях, когда необходимо нарисовать несколько одинаковых элементов эскиза вокруг некоторой точки. Для примера построим эскиз окружности с лепестками. Откройте для редактирования новую область построения и нарисуйте эскиз (рис. 1.12).

Воспользуемся командой Круговой массив в панели инструментов Эскиз. В Менеджере свойств появится диалоговое окно Круговой массив. Щелкните мышью в поле Объекты в массив и укажите полуокружность, которую необходимо повторить.

Программа автоматически определила только одну точку (начало координат), вокруг которой она может размножить выбранные элементы, авто-

матически расставила параметры во всех полях. Этой точкой является центр окружности, совпадающий с началом координат. Если бы таких точек было несколько, то необходимо было бы указать параметры Центр *X* и Центр *У*, задав координаты этого центра.

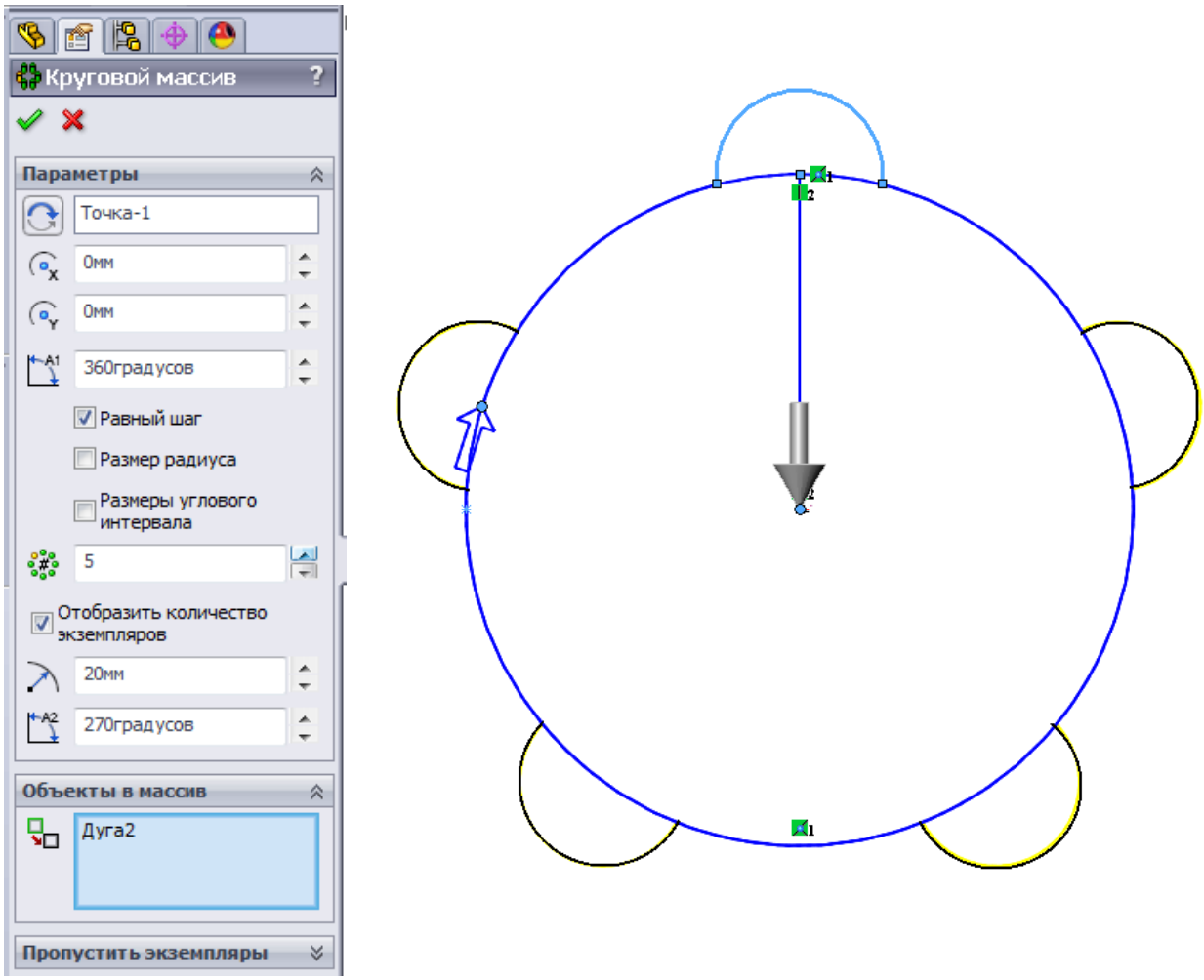


Рис. 1.12. Построение кругового массива дугообразного элемента эскиза

В поле Номер укажите общее количество таких полуокружностей. Значение Угол по умолчанию установлено 360º. Если потребуется размножить элементы не на полную окружность, то необходимо будет подкорректировать данный параметр. Размножать объекты можно с равным шагом, или используя параметры радиуса или углового интервала.

При построении массива можно пропускать некоторые экземпляры. Для этого в поле Пропустить экземпляры достаточно указать мышью те элементы, которые необходимо пропустить.

Сплайны предназначены для рисования сглаженных кривых. Задавая точные координаты точек сплайна в дальнейшем можно формировать сложный профиль. Из панели инструментов Эскиз вызовите команду Сплайн. В

Менеджере свойств появится диалоговое окно Сплайн. Чтобы завершить рисование сплайна, щелкните правой кнопкой мыши в графической области построения эскиза и в появившемся контекстном меню выберите курсор.

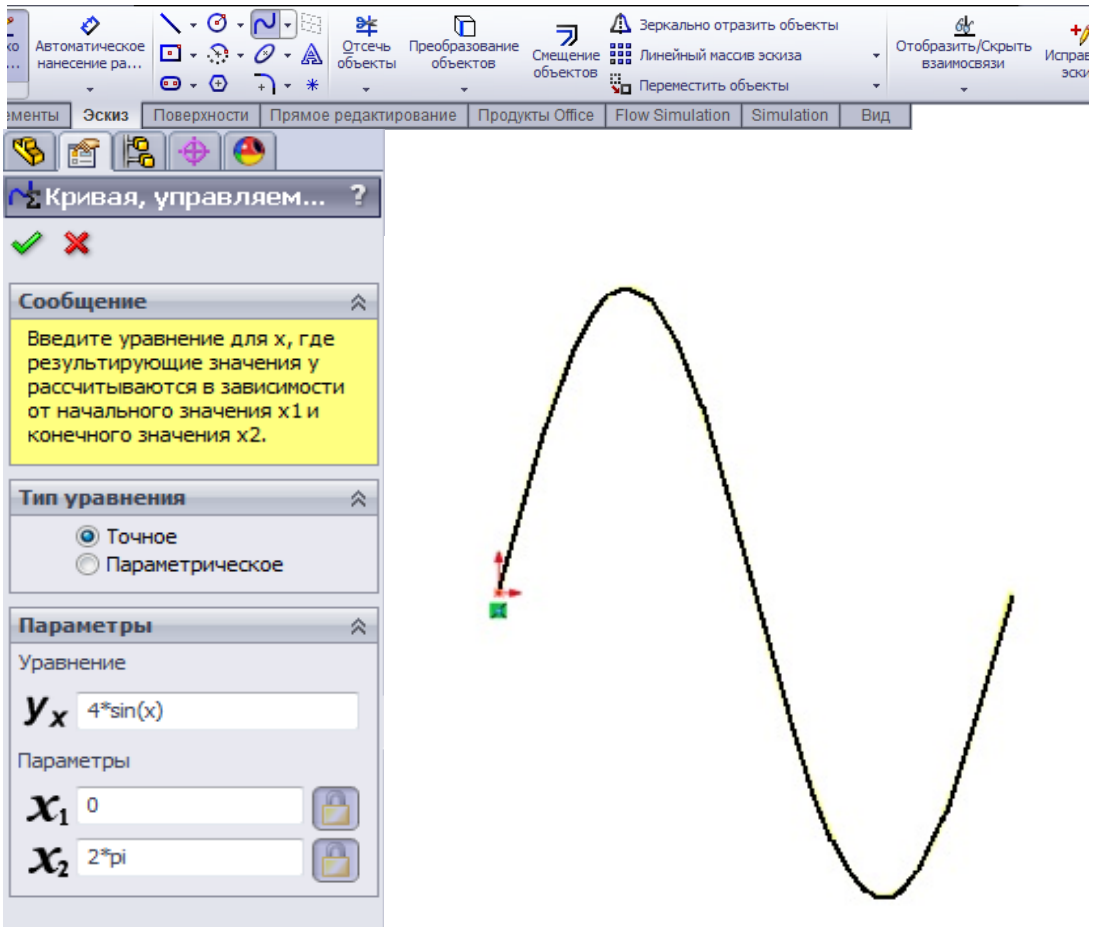


Рис. 1.13. Создание кривой сплайна с помощью уравнений

Если точки встанут неровно, положение точек можно подкорректировать. Для перемещения точки подведите курсор к ней. Рядом с курсором появится обозначение Точка, а сама точка подсветится голубым цветом. Теперь нажмите левую кнопку мыши и, захватив точку, переместите на новое место. Программа будет динамически перестраивать сплайн. Кроме того, если известны значения координат точки, то в открывшемся диалоговом окне Точка в поле Параметры можно задать точные координаты точки.

Также рядом с каждой точкой сплайна появятся две стрелки, направленные в противоположные стороны касательно сплайна. Захватывая мышью стрелки и направляя их, можно регулировать положение сплайна.

Точки сплайна можно задавать не только вручную или с помощью координат, но и с помощью уравнений. Рассмотрим пример задания произвольного уравнения для создания сплайна. Откройте для редактирования эскиза но-

вую область построения и вызовите команду Кривая, управляемая уравнением в панели инструментов Эскиз. В Менеджере свойств откроется одноименное окно, в котором в разделе Параметры введите уравнение вида $y = f(x)$, которым будет описываться форма сплайна. Во вкладке Тип уравнения зададим Точное и введем уравнение $y = 4 * \sin(x)$ (рис. 1.13). В параметрах X1 и X2 задаются начальное и конечное значения аргумента соответственно. При этом начальную или конечную точку можно зафиксировать, нажав кнопку с изображением замка рядом с X1 или X2.

Если в типе уравнения выбрать Параметрическое, то координаты X и Y должны быть заданы как функции некоторого параметра t. В отличие от первого типа уравнения, где Y являлась функцией X , во втором случае уравнения для X и Y решаются по заданному диапазону значений параметра t. Например, зададим уравнения для X=((3+t)^2), Y=(6*(3+t)) и диапазон изменения t (0 и 10). И получим необходимую кривую.

1.2. Построение моделей твердых тел на основе двумерных эскизов объектов

Существует несколько базовых приемов, используя которые можно создать пространственные виды твердых тел на основе их двумерных эскизов. Эти приемы могут быть либо альтернативными, либо дополнять друг друга в процессе проектирования сложной детали.

Существуют следующие способы конструирования деталей:

1. Вытягивание – самый простой способ формирования пространственного вида твердого тела, основанный на вытягивании эскиза в одном или двух направлениях. Эта команда активизируется кнопкой Вытянутая бобышка/основание на панели инструментов Элементы. Функция команды заключается в заполнении виртуальным материалом объема, описываемого контуром эскиза при его параллельном прямолинейном перемещении. Можно осуществлять вытягивание эскиза под углом, т. е. формировать твердое тело в виде конуса. При вытягивании также можно создать тонкостенную деталь, указав это при выполнении команды и задав толщину стенки.

2. Вращение – также распространенный способ построения пространственного вида твердого тела. Эта команда запускается нажатием кнопки Повернутая бобышка/основание, расположенной на панели инструментов Элементы. При выполнении команды эскиз поворачивается вокруг заданной оси, а пространство, описываемое контуром эскиза в результате вращения,

заполняется виртуальным материалом твердого тела. При этом эскиз детали, формируемой методом вращения, обязательно должен состоять из контура детали и оси поворота. Вращение контура вокруг оси может осуществляться на любую желаемую величину угла, вплоть до 360º.

3. Оформление вырезов. Для формирования вырезов и отверстий в SolidWorks используются те же возможности, что и для создания пространственного вида твердого тела. Кнопки команд для оформления вырезов располагаются на панели инструментов Элементы, или можно воспользоваться командами меню Вставка/Вырез. Различают два основных вида вырезов: вытянутый и повернутый (запускаются одноименными командами).

Процесс создания вырезов отличается от процесса формирования пространственного вида твердого тела лишь тем, что объем, описываемый перемещением контура, в этом случае освобождается от виртуального материала твердого тела.

В SolidWorks существует также множество дополнительных возможностей, позволяющих формировать отдельные элементы деталей: фаски, скругления, уклоны, а также массивы (линейный, круговой) и зеркальное отражение.

Скругление. Эта команда активизируется нажатием одноименной кнопки на панели инструментов Элементы и позволяет скруглить любую выделенную кромку детали, необходимо лишь указать кромку и задать радиус ее скругления.

Фаска. Эта команда запускается кнопкой Фаска**,** которая также располагается на панели инструментов Элементы и позволяет «снять фаску» с указанной кромки детали. Для построения фаски необходимо указать параметры фаски – ее угол либо размеры в двух направлениях.

Купол. Эта команда дает возможность превратить одну из граней объемной детали в вогнутый или выпуклый купол, для чего нужно активизировать кнопку Купол на панели инструментов Элементы и задать расстояние, на которое должно произойти вытягивание купола.

Уклон. Благодаря этой команде можно изменять углы между гранями уже построенной детали. Команда запускается нажатием кнопки Уклон на панели инструментов Элементы, затем указывается тип и угол уклона, а также выбирается грань детали, положение которой в пространстве должно измениться.

Оболочка. Эта команда запускается нажатием кнопки Оболочка и позволяет из «твердотельной» детали сформировать «полую» деталь, при этом одна или несколько граней могут быть удалены, а остальные преобразуются в тонкостенные. При помощи этой команды можно построить также «замкнутую полую» деталь.

Массивы. Эти команды значительно ускоряют процесс конструирования деталей, так как позволяют размножать ранее созданные элементы детали. Команда Круговой массив применяется при проектировании деталей с множеством элементов, повторяющихся по кругу. Элементы получаются размножением одного элемента, созданного по этой команде, надо лишь указать их количество и ось массива. Линейный массив можно использовать для размножения ранее созданных элементов детали в двух направлениях, указав копируемый элемент и интервалы между элементами в каждом из двух направлений.

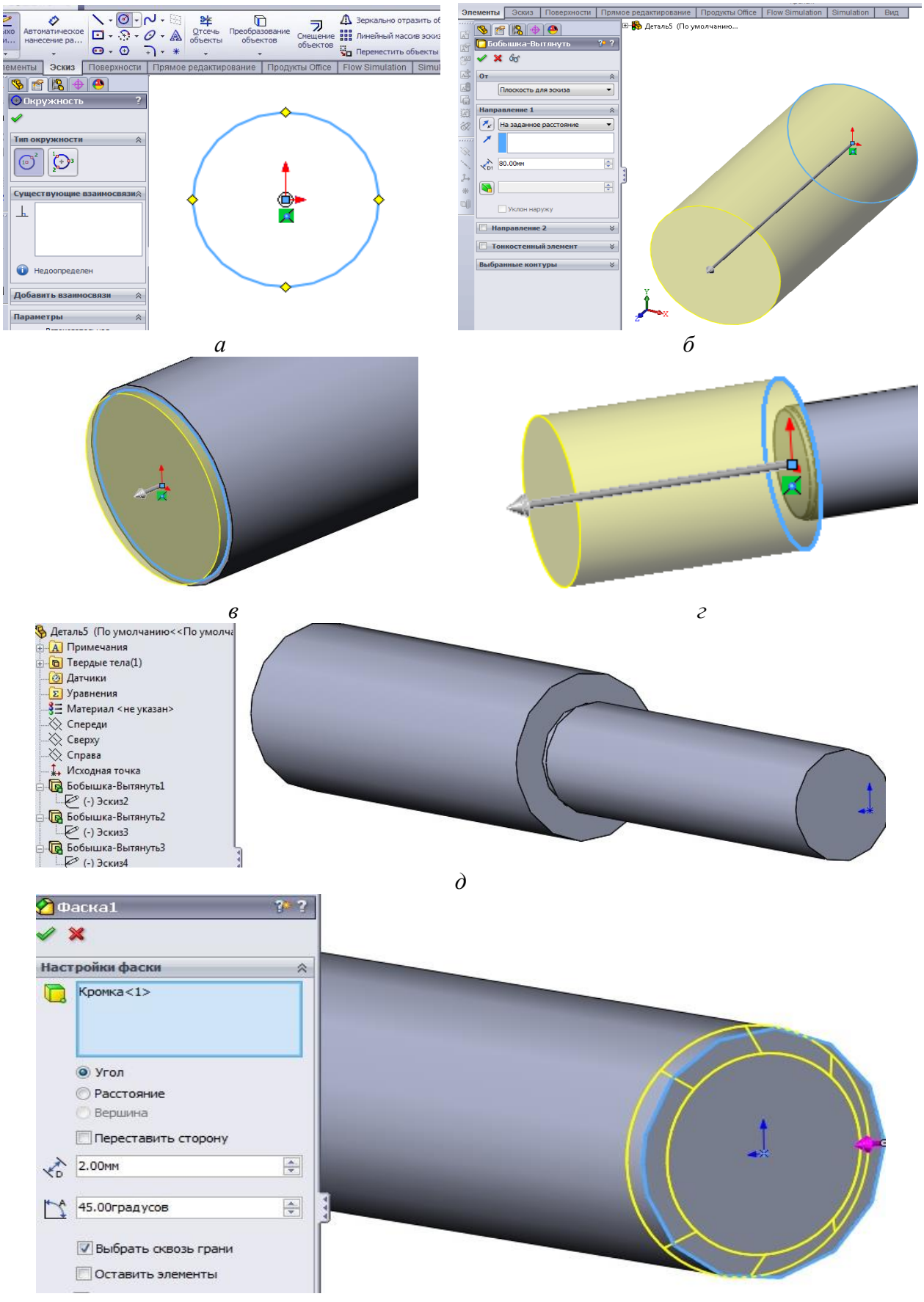
Зеркальное отражение. Эту команду удобно использовать при проектировании симметричных деталей. В этом случае достаточно построить лишь половину детали. Вторая половина строится как зеркальное отражение существующей.

Все перечисленные приемы построения деталей и ее отдельных элементов могут быть использованы как отдельно, так и в совокупности при конструировании сложной детали.

Рассмотрим вытягивание на примере построения трехступенчатого вала со шпоночными пазами.

Для построения этой детали выберем в Дереве конструирования плоскость Спереди. Войдите в Эскиз и нарисуйте эскиз конца вала, который представляет собой окружность диаметром 20 мм (рис. 1.14, *а*). Вытянем этот эскиз на 80 мм, для чего нажмем кнопку Вытянутая бобышка/основание на панели инструментов Элементы и в появившемся окне Вытянуть укажем глубину вытягивания 80 мм (рис. 1.14, *б*).

Оформим проточку вала. Для этого укажем правый плоский торец вала в качестве плоскости для построения следующего эскиза, войдем в эскиз, активизировав кнопку Эскиз на одноименной панели инструментов, и нарисуем эскиз в виде окружности диаметром 19 мм. Теперь вытянем этот эскиз на 2 мм, для чего нажмем кнопку Вытянутая бобышка/основание на панели инструментов Элементы и в окне Вытянуть укажем глубину вытягивания (рис. 1.14, *в*).



а *б* *в* *г* *д* *е*

Рис. 1.14. Этапы построения трехступенчатого вала

Прорисуем третью ступень вала. В качестве плоскости эскиза выберем плоский торец вала с диаметром 19 мм. Войдем в режим рисования эскиза и построим эскиз третьей ступени, которая также представляет собой окружность с диаметром 30 мм. Вытянем этот эскиз на 85 мм и получим вал, состоящий из трех ступеней (рис. 1.14, *г*). В результате получим трехступенчатый вал (рис. 1.14, *д*).

На ступенчатом валу предполагается наличие фаски размером 2×45º. Сначала выделим кромку, на которой будет сформирована фаска, для чего активизируем кнопку Фаска панели инструментов Элементы.

На экране дисплея отроется окно Фаска. В этом окне, в разделе Настройки фаски укажем кромку, на которой предполагается оформить фаску, а также ее размер (рис. 1.14, *е*).

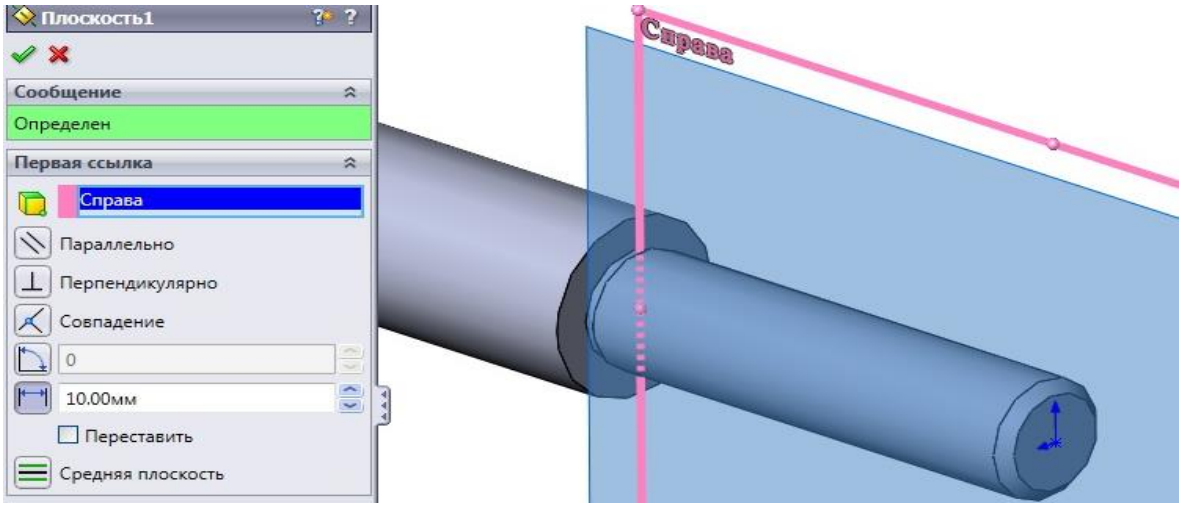
Следующим этапом конструирования вала станет построение шпоночного паза. Элементы детали типа шпоночных пазов можно оформить двумя способами, каждый из них имеет свои достоинства. Рассмотрим первый способ оформления паза.

Для построения эскиза создайте вспомогательную плоскость, параллельную плоскости Справа, для чего выделите ее в трехмерном пространстве. Затем откройте выпадающее меню Вставка/Справочная геометрия/Плоскость. В результате на экране появится окно Плоскость (рис. 1.15, *а*). В этом окне укажем расстояние смещения новой параллельной плоскости 10 мм. Новая плоскость смещена относительно плоскости Справа на 20 мм и является касательной к поверхности этого цилиндрического элемента. В результате проведенных построений в Дереве конструирования появилась новая строка Плоскость1.

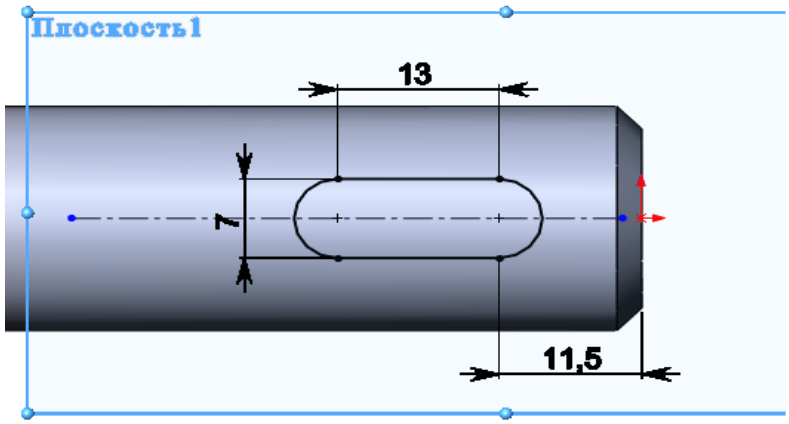
Выделите Плоскость1, войдите в эскиз и постройте эскиз шпоночного паза (рис. 1.15, *б*). Теперь вытяните вырез на 4 мм согласно конфигурации эскиза, для чего активизируйте кнопку Вырез/Вытянуть панели инструментов Элементы. В результате будет сформирован шпоночный паз на выходном конце ступенчатого вала (рис. 1.15, *в*).

Второй метод конструирования шпоночного паза также требует создания вспомогательной плоскости, только эта плоскость будет параллельна плоскости Спереди, располагаться от нее на расстоянии 136 мм и называться Плоскость2 в Дереве конструирования.

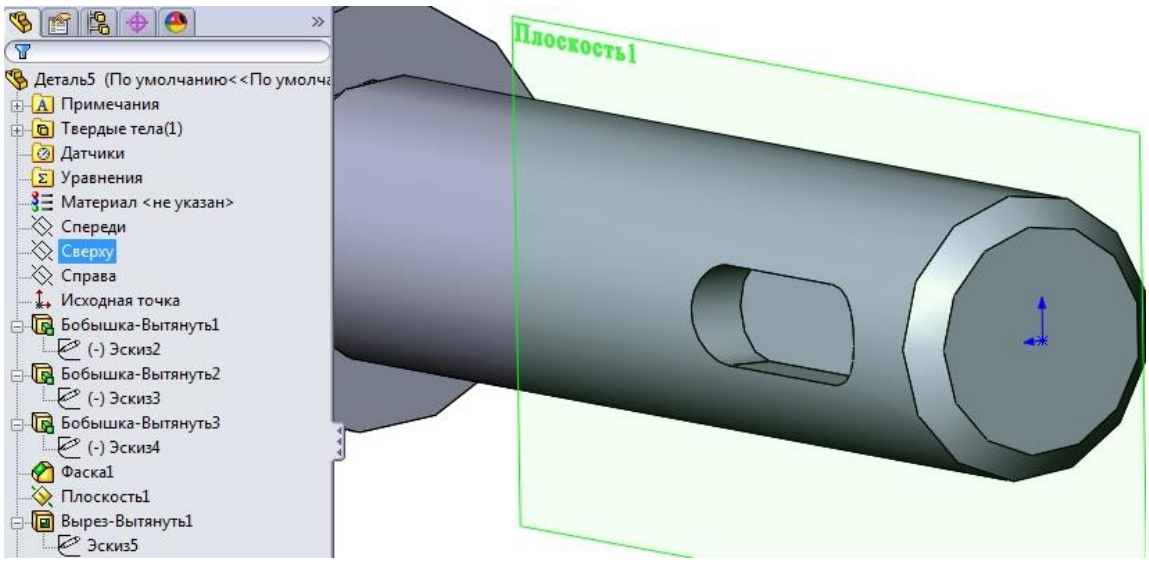
Выберем вспомогательную плоскость Плоскость2, войдем в эскиз и нарисуем эскиз шпоночного паза (рис. 1.16, *а*).



а



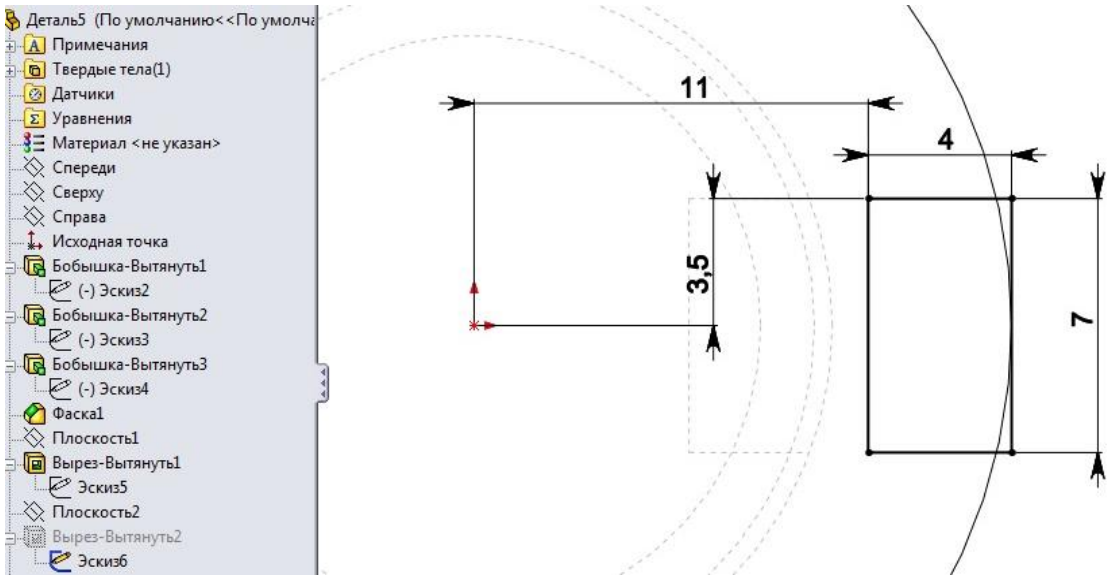
б



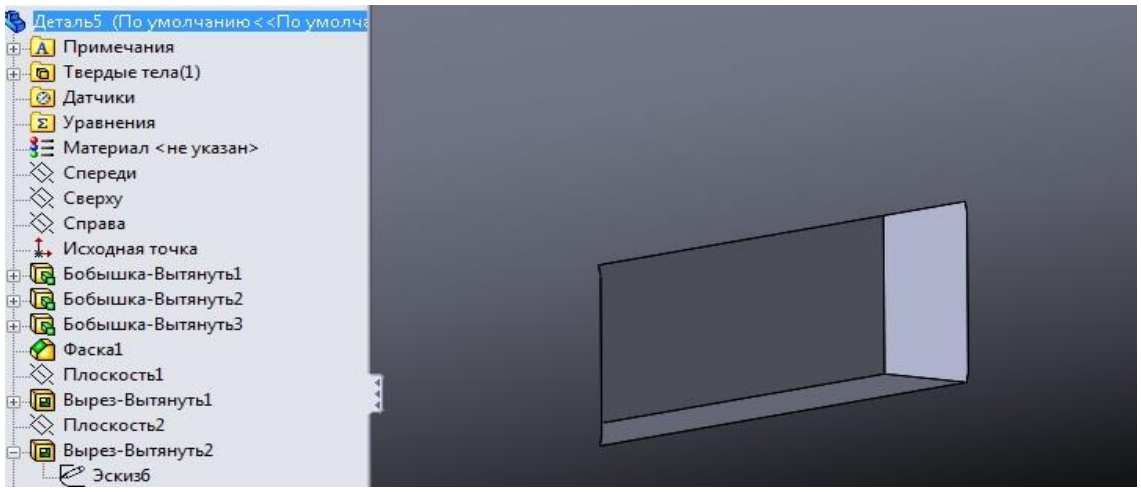
в

Рис. 1.15. Этапы построения паза на поверхности вала. Способ 1

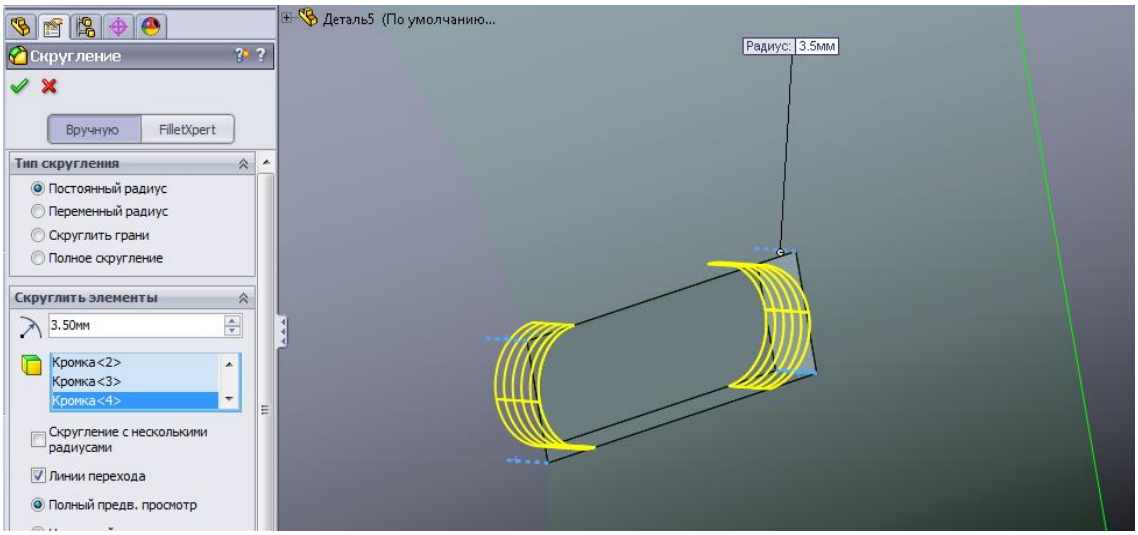
Затем оформим вырез согласно этому эскизу, нажав кнопку Вырез/Вытянуть на панели инструментов Элементы. Вытянем вырез на 20 мм, и в результате будет сформирована основа второго шпоночного паза (рис. 1.16, *б*).



а



б



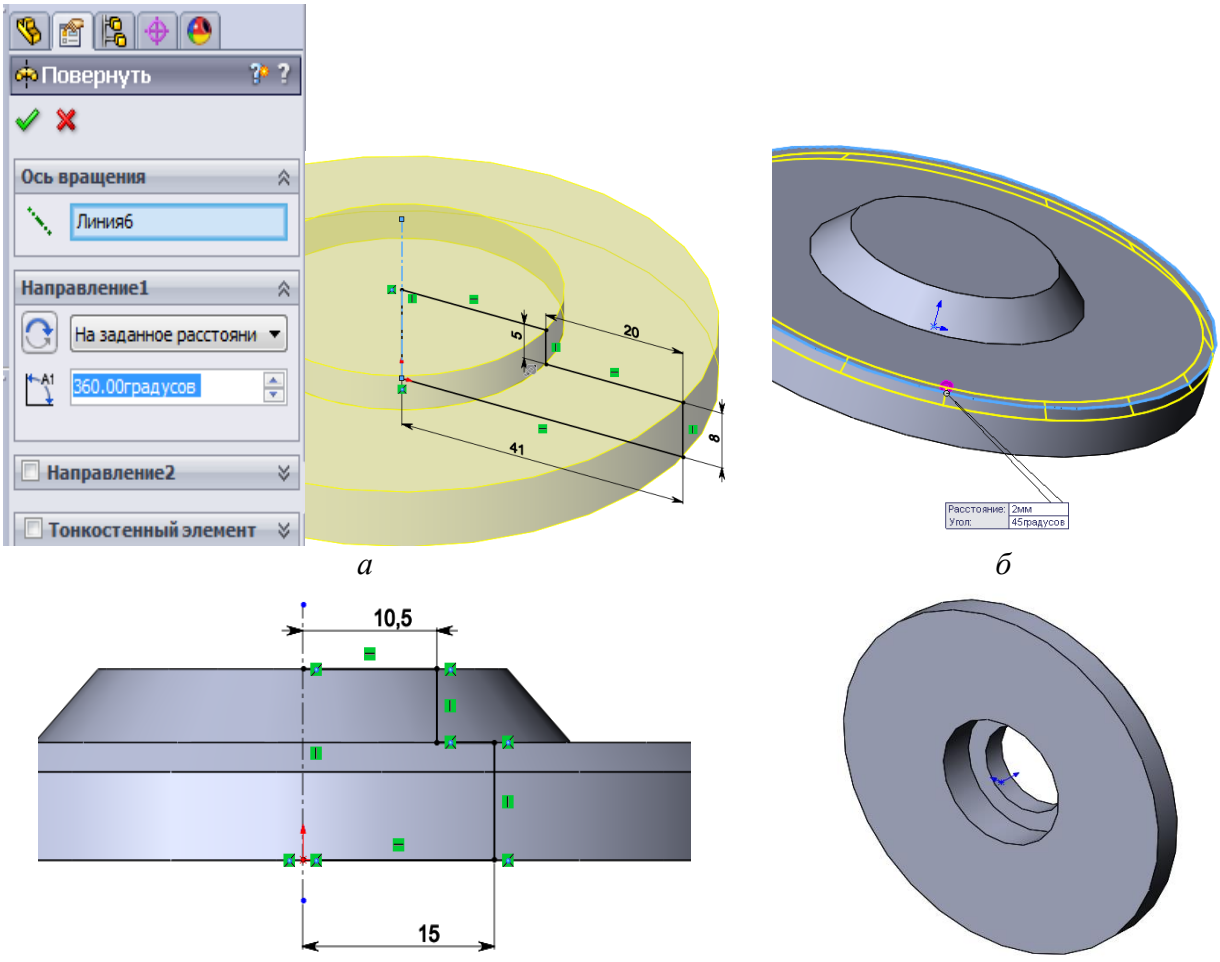
в

Рис. 1.16. Этапы построения паза на поверхности вала. Способ 2

Осталось оформить скругления шпоночного паза. Для этого активизируем кнопку Скругление на панели инструментов Эскиз (рис. 1.16, *в*). Укажем

скругляемые кромки и радиус скругления. В результате будет оформлен шпоночный паз.

Тела вращения широко используются в современном машиностроении. Представителем этого класса являются зубчатые колеса, манжеты и валы. Хотя такие детали в SolidWorks можно построить методом простого вытягивания, но использование команды Повернутая бобышка/основание позволяет значительно ускорить процедуру конструирования тел вращения. Кроме того, некоторые элементы деталей (вырезы), можно оформить только с использованием возможностей поворота эскиза вокруг оси.



а *б*

в *г*

Рис. 1.17. Этапы построения крышки

Существует несколько обязательных требований для построения тел вращения в SolidWorks:

– контур эскиза детали должен быть замкнутым;

– на эскизе должна быть изображена ось вращения;

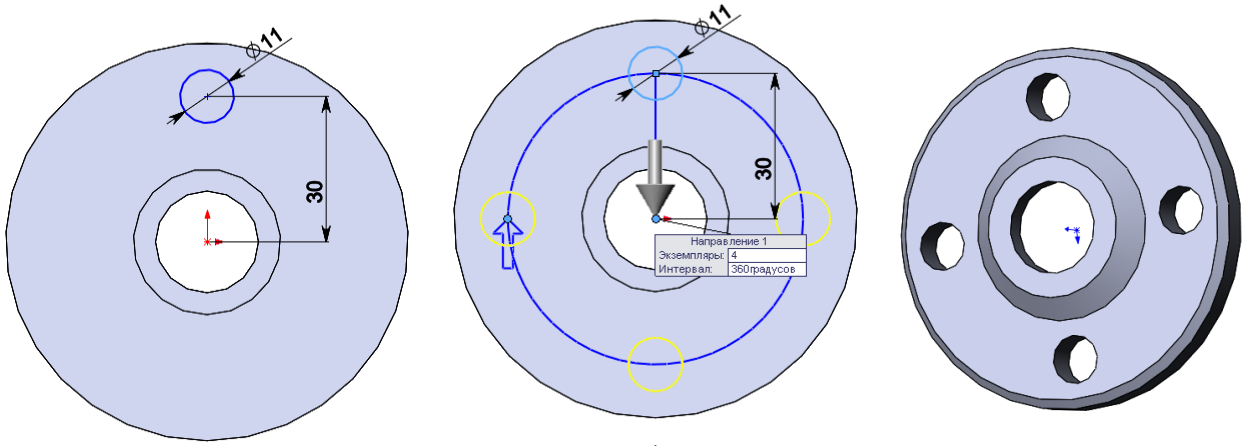
– контур эскиза не должен пересекать ось вращения;

– эскиз детали должен располагаться лишь в одной полуплоскости относительно оси вращения.

В случае, если эскиз не является замкнутым, программа сама предлагает его замкнуть и делает это, соединяя между собой крайние точки эскиза.

Рассмотрим построение тела вращения на примере крышки. Создайте на плоскости эскиз сечения крышки и ось вращения. Используйте команду Повернутая бобышка/основание, расположенную на панели инструментов Элементы (рис. 1.17, *а*). На ступеньке основания крышки оформите фаску. В окне Фаска, в разделе Настройки фаски укажите кромку для фаски, а также ее размер 5×45º. Аналогично постройте еще одну фаску размером 2×45º (рис. 1.17, *б*). Оформите вырез крышки методом поворота (рис. 1.17, *в*). Для построения эскиза выреза выберите плоскость, в которой располагается ось основания крышки. Таким образом получается основание крышки (рис. 1.17, *г*).

Создайте в крышке четыре отверстия для ее крепления на корпусе. Для этого выберите торцевую плоскость крышки и откройте новый эскиз. В этом эскизе нарисуйте окружность (рис. 1.18, *а*), которая затем оформит отверстие под крепеж.



а *б* *в*

Рис. 1.18. Этапы создания отверстий с использованием массива

На крышке должно быть четыре таких отверстия одинакового диаметра, равномерно расположенных по окружности под углом 90º. Постройте эти отверстия за один прием, расположив их в одном эскизе. Для этого воспользуйтесь командой Круговой массив (рис. 1.18, *б*). На экране дисплея откроется окно Круговой массив, где в окне Параметры укажите центр массива, количество элементов массива 4, радиус окружности массива 36 мм, и поставьте флажок Равный шаг. В разделе Объекты в массив отметьте ранее построен-

ную окружность с диаметром 11 мм. Закончите построение массива, и в результате получите эскиз отверстий под крепеж крышки.

Для оформления отверстий, согласно спроектированному эскизу, активизируйте кнопку Вытянутый вырез на панели инструментов Элементы (рис. 1.18, *в*). На экране откроется окно Вырез/Вытянуть, где в разделе Направление1 выберите граничное условие Насквозь. Таким образом, получится 4 отверстия под крепеж.

1.3. Построение трехмерных эскизов объектов и моделей твердых тел на их основе

Трехмерные эскизы объектов в SolidWorks реализуются двумя способами: при использовании непосредственно инструмента Трехмерный эскиз и набора двумерных эскизов, построенных на разных плоскостях и связанных между собой в трехмерном пространстве.

1.3.1. Трехмерные эскизы

При создании двумерного эскиза вся геометрия проецируется на плоскость, и все точки пространства, расположенные за плоскостью, оказываются вне видимости. Силуэтные кромки становятся плоскими объектами так, что определенные углы, скругления и цилиндры отображаются как дуги и линии. Поэтому для рисования какого-либо объекта сложной формы удобно пользоваться трехмерными эскизами.

При работе с Трехмерным эскизом можно воспользоваться графическим помощником, который помогает сохранить ориентацию во время рисования на нескольких плоскостях. Этот помощник называется Маркером координат. Маркером координат появляется при определении первой точки линии или сплайна на выбранной плоскости. С помощью маркера координат можно выбрать ось, вдоль которой необходимо выполнить рисование (рис. 1.19). В самом начале рисование выполняется относительно системы координат модели, используемой по умолчанию. Чтобы переключиться в одну из двух плоскостей по умолчанию, выберите требуемый инструмент эскиза и нажмите клавишу Tab. Отобразится исходная точка текущей плоскости эскиза.

Для создания трехмерных эскизов можно использовать любой из следующих инструментов:

– все инструменты окружности;

– все инструменты дуги;

– все инструменты прямоугольника;

– линии;

– сплайны;

– точки.

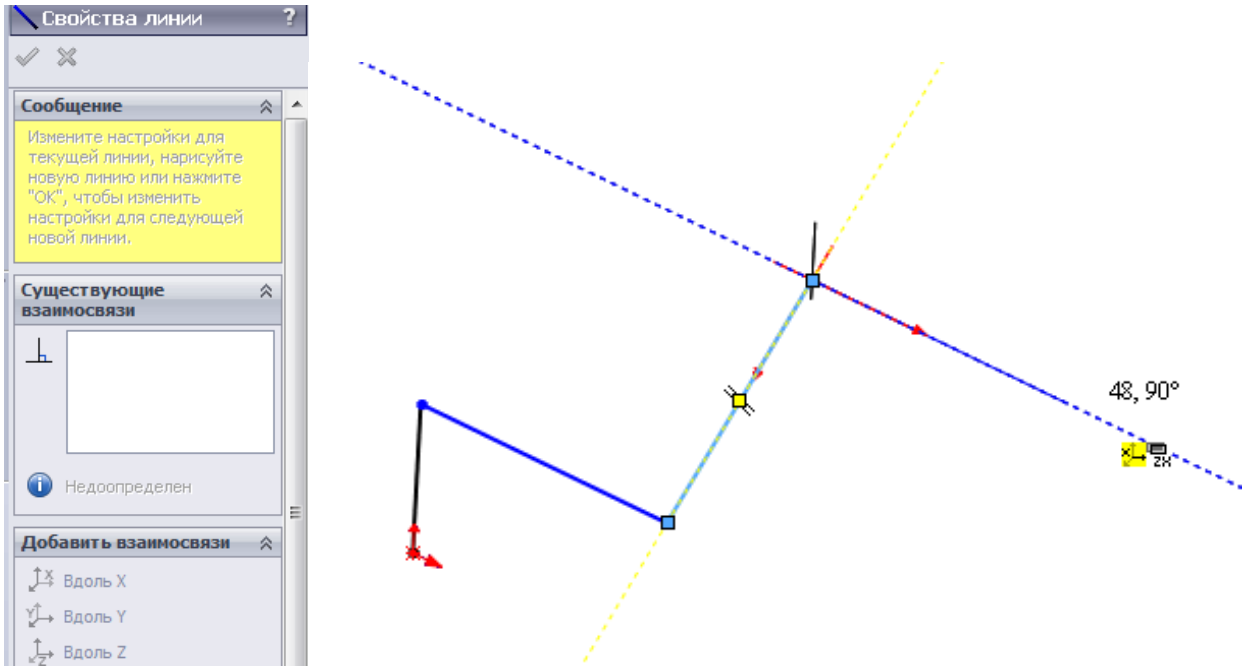


Рис. 1.19. Построение эскиза объекта при помощи инструмента Трехмерный эскиз

При рисовании трехмерного эскиза можно создавать объекты на рабочей плоскости или в любой произвольной точке трехмерного пространства. В трехмерном эскизе необходимо задавать взаимосвязи по всем трем координатам. В дальнейшем Трехмерный эскиз можно преобразовать в модель твердого тела с помощью команды Вытягивания.

1.3.2. Модели твердых тел на основе трехмерных эскизов

Модели твердых тел на основе набора двумерных эскизов, построенных на разных плоскостях и связанных между собой в трехмерном пространстве, строятся следующими способами:

1. *Вытягивание элемента по траектории*. Заключается в формировании твердого тела заполнением виртуальным веществом (материалом) объема, который образуется при перемещении профиля по некоторой траектории. Выполняется эта операция нажатием кнопки Вытянутая бобышка/Основание с панели инструментов Элементы. Для проектирования деталей по траектории необходимо создать как минимум два эскиза: эскиз профиля и эскиз траектории. В качестве профиля обычно выступает контур эскиза, который должен быть замкнутым, а в качестве траектории – контур эскиза, который мо-

жет быть и незамкнутым. В процессе перемещения профиль может оставаться параллельным самому себе или же сохранять неизменным начальный угол с траекторией.

Можно также задать вращение профиля в процессе его перемещения вдоль траектории. Кроме того, профиль может менять свои размеры и конфигурацию согласно форме направляющей кривой. Способом вытягивания элемента по траектории удобно создавать детали типа пружин, при этом траекторией является спираль. Как и в случае простого вытягивания, при формировании элемента по траектории можно проектировать тонкостенные детали. Эта возможность широко используется при конструировании трубопроводов.

2. *Вытягивание элемента по сечениям*. Активируется кнопкой Бобышка/основание по сечениям на панели инструментов Элементы и позволяет проектировать детали путем создания плавных переходов между профилями (сечениями). Профили представляют собой эскизы, расположенные в различных плоскостях. Эти плоскости могут располагаться как параллельно друг другу, так и под углом. При проектировании деталей с помощью команды Бобышка/основание по сечениям можно также использовать в качестве вспомогательного элемента направляющую кривую, в этом случае плавные переходы между профилями будут строиться согласно форме этой направляющей.

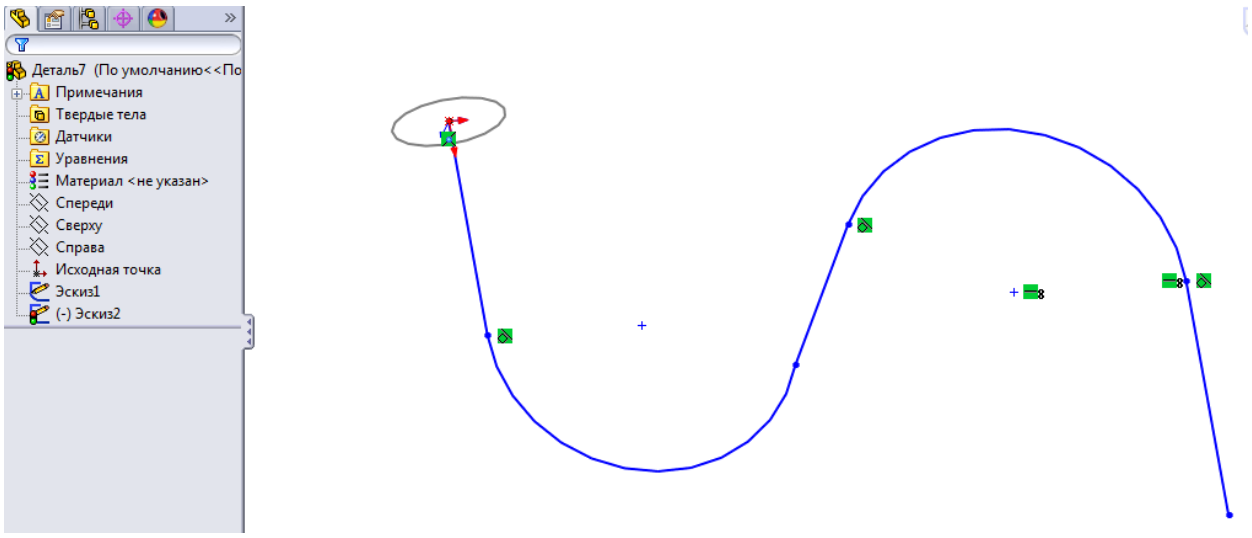
3. *Оформление вырезов*. Для формирования вырезов и отверстий используются те же возможности, что и для создания твердого тела – вырез по траектории и вырез по сечениям. Команды активируются нажатием одноименных кнопок.

Объекты трубчатой формы строятся с использованием команды Вытянутая бобышка/Основание по траектории. Типичным примером таких деталей являются изогнутые трубы.

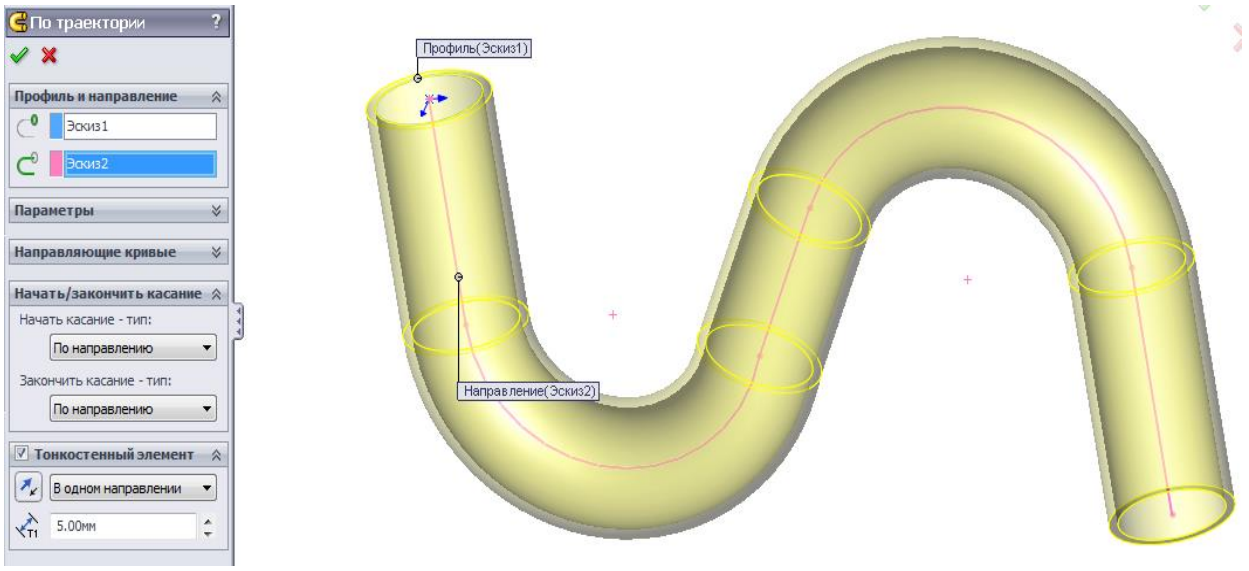
Для построения трубы как элемента по траектории необходимо нарисовать два эскиза: замкнутый профиль, который для трубы имеет вид окружности, и эскиз траектории (линию изгиба трубы).

Нарисуйте эскиз профиля трубы. Для этого в трехмерном пространстве SolidWorks выберите плоскость Спереди, войдите в эскиз и постройте окружность диаметром 60 мм, которая будет представлять в дальнейшем наружный диаметр трубы. Так будет создан профиль трубы.

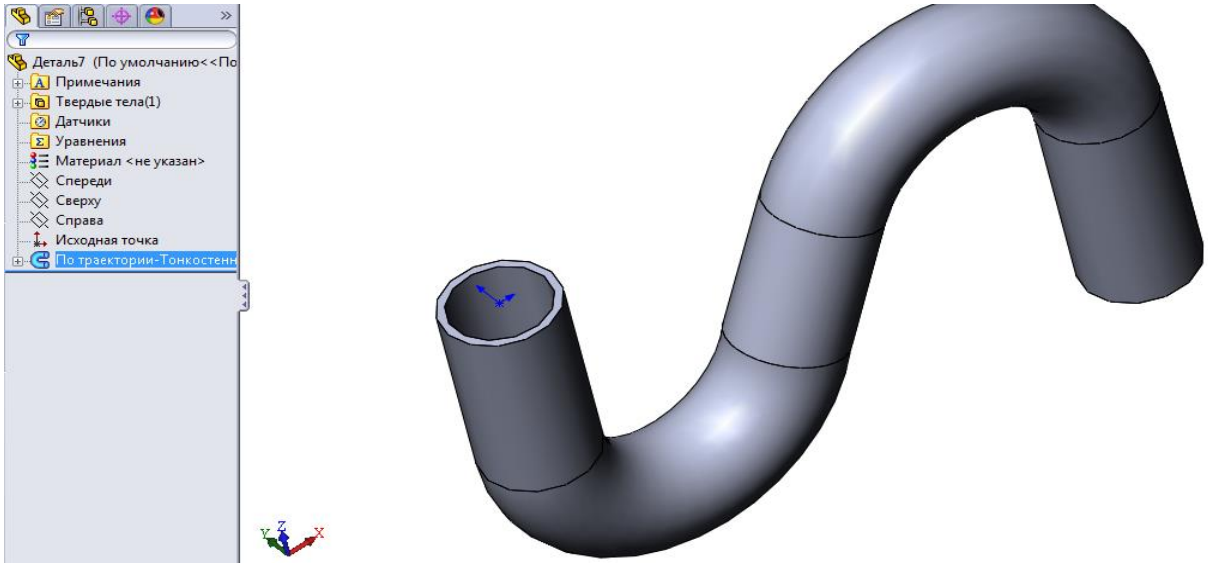
Постройте эскиз траектории, для чего выберите плоскость Сверху и войдите в режим рисования эскиза.



а



б



в

Рис. 1.20. Этапы построения объекта как элемента по траектории

Нарисуйте траекторию трубы (рис. 1.20, *а*). Эскиз траектории всегда строится в плоскости, расположенной под углом к плоскости профиля. Для этой цели можно выбрать плоскость Сверху, которая перпендикулярна плоскости Спереди, хотя можно выбрать и плоскость Справа. Кроме того, следует помнить, что траектория должна начинаться или пересекать плоскость, в которой расположен профиль.

В результате приведенных построений получилось два эскиза, которые обозначены в Дереве конструирования как Эскиз1 и Эскиз2.

Оформите трубу как вытянутую бобышку по траектории. Активизируйте кнопку Вытянутая бобышка/Основание на панели инструментов Элементы. На экране появится окно По траектории. В этом окне, в разделе Профиль и направление, выделите профиль Эскиз1, а также траекторию (направление) Эскиз2. Необходимо также указать, что деталь вытягивается как тонкостенный элемент с толщиной 5 мм (рис. 1.20, *б*).

Таким образом получаем трубу, построенную как тонкостенный элемент по траектории (рис. 1.20, *в*).

Детали сложной конфигурации можно создать, используя команду Бобышка/Основание по сечениям или Вырез по сечениям. Основной принцип построения элементов по сечениям заключается в плавном соединении профилей сечений детали, которые располагаются на разных плоскостях.

Профиль представляет собой замкнутый и непересекающийся эскиз на некоторой плоскости. Обязательное условие: плоскости с профилями должны быть расположены на некотором расстоянии друг от друга, параллельно или под углом.

Для создания новой вспомогательной (справочной) плоскости необходимо нажать кнопку Плоскость на панели инструментов Справочная геометрия или воспользоваться командой меню: Вставка/Справочная геометрия/Плоскость. После этого на экране появится окно Плоскость. В этом окне нужно указать основные параметры справочной плоскости, задав опорные данные в разделе Выбор, и выбрать способ ее построения:

1. *Расстояние смещения*. Задав расстояние, можно построить справочную плоскость, параллельную исходной плоскости.

2. *Параллельно плоскости*. Можно построить плоскость, параллельную любой существующей плоскости или грани и проходящую через указанную точку.

3. *Перпендикулярно*. Можно провести справочную плоскость перпендикулярно исходной.

4. *Под углом*. Дает возможность провести плоскость под углом к какой-либо плоскости или грани через линию, кромку или ось.

5. *Совпадение*. Можно провести плоскость, параллельную исходной и совпадающую с каким либо элементом (грань, кромка).

Если расстояние между плоскостями одинаково можно указать параметр Число задаваемых плоскостей.

Конструирование элемента по траектории начинается с построения эскизов (профилей сечений), которые располагаются либо на вспомогательных, либо на базовых плоскостях Дерева конструирования, либо на гранях ранее созданных элементов детали. Затем эти профили плавно соединяются между собой. Для создания точной формы элемента по сечениям можно использовать направляющую кривую. В общем случае при построении направляющей кривой необходимо соблюдать несколько правил:

– направляющая должна лежать в плоскости, которая пересекает профили сечений;

– направляющая должна пересекать все профили;

– направляющая кривая может быть длиннее элемента по сечениям;

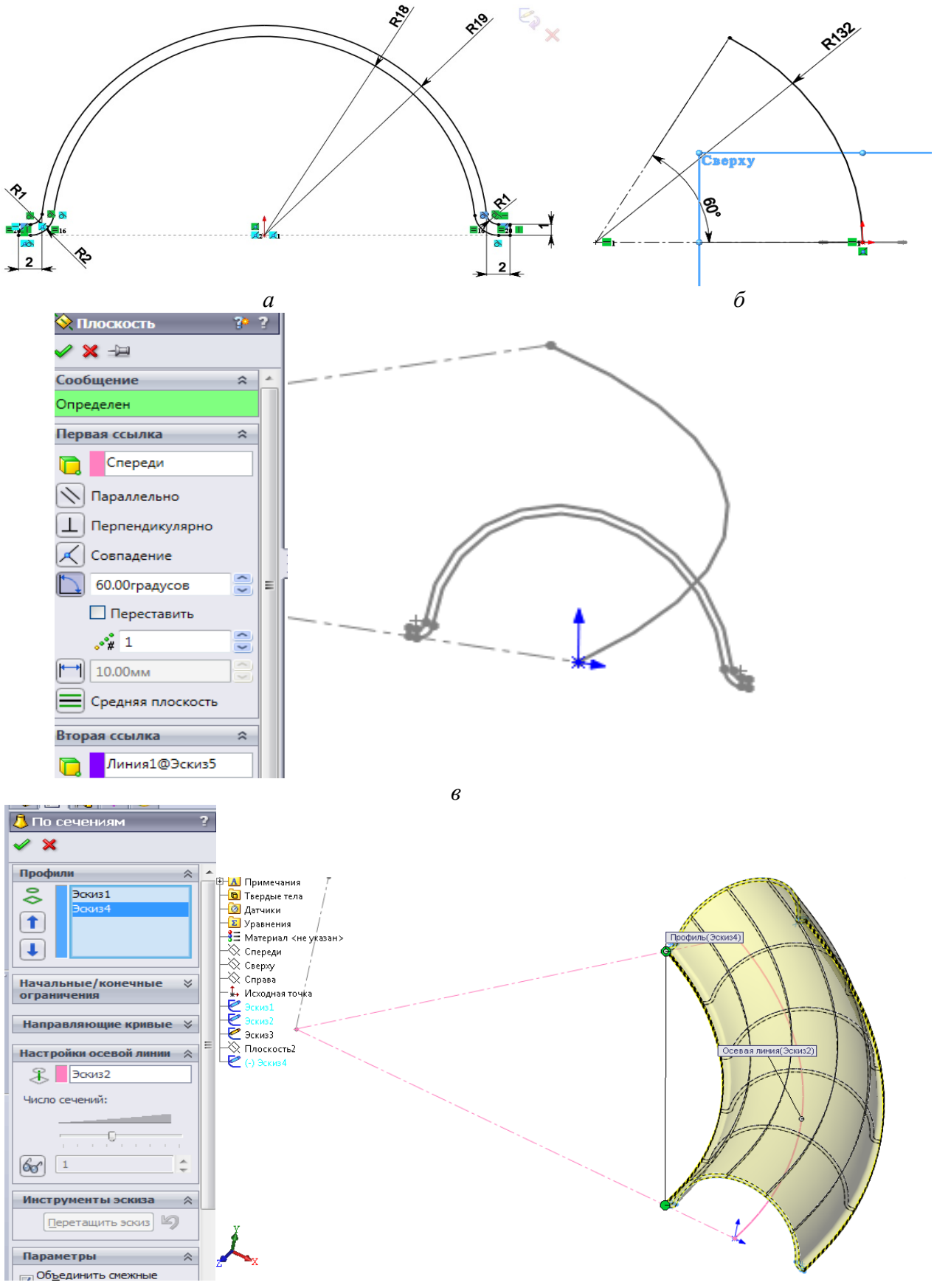
– в качестве направляющих можно использовать ранее созданные элементы, кромки объектов и любые другие кривые;

– направляющих может быть несколько.

Если направляющая кривая не пересекает профили, то при ее построении необходимо применять взаимосвязи Совпадение или Точка пронзания. В случае, если направляющая кривая отсутствует, ее роль выполняет виртуальная кривая, которая получается при соединении профилей друг с другом во время построения элемента по сечениям. В качестве направляющей также может выступать осевая линия, проходящая через середину сечений и не касающаяся их контуров.

Рассмотрим построение детали типа патрубок. Патрубок строится на основе двух профилей, которые соединяются между собой при помощи направляющей осевой линии. Для оформления патрубка необходимо создать два профиля, лежащие в разных плоскостях, и одну направляющую.

Откройте трехмерное пространство SolidWorks, выберите плоскость Спереди и войдите в эскиз. Нарисуйте эскиз левого конца патрубка (рис. 1.21, *а*). Этот эскиз в Дереве конструирования обозначится как Эскиз1.



а *б*

в

г

Рис. 1.21. Этапы построения объекта как элемента по сечениям

Теперь постройте направляющую кривую, для чего выберите плоскость Сверху (перпендикулярную плоскости эскиза) и нарисуйте направляющую, которая представляет собой дугу радиусом 132 мм (рис. 1.21, *б*). В данном случае используется вариант направляющей кривой, выступающей в роли осевой линии. В отличие от обычной направляющей, осевая направляющая не должна пересекаться и сопрягаться с контурами сечений.

Нарисуйте вспомогательную плоскость для построения второго профиля. Эта плоскость будет находится под углом 60º по отношению к плоскости Спереди. Поэтому сначала войдите в эскиз на плоскости Спереди и нарисуйте линию, через которую пройдет дополнительная плоскость. Эскиз вспомогательной линии обозначен в Дереве конструирования как Эскиз3. Затем нажмите кнопку Плоскость на панели инструментов Справочная геометрия. В появившемся окне Плоскость в разделе Выбор укажите плоскость Спереди, под углом к которой будет построена вспомогательная плоскость, и линию, через которою пройдет новая плоскость Линия1@Эскиз3. В этом окне также укажите метод построения справочной плоскости Под углом (рис. 1.21, *в*). Угол между плоскостями должен составлять 60º. Нажмите кнопку ОК и в Дереве конструирования появится Плоскость1. Постройте второе сечение патрубка. Для этого выберите Плоскость1 и повторите на ней эскиз сечения патрубка.

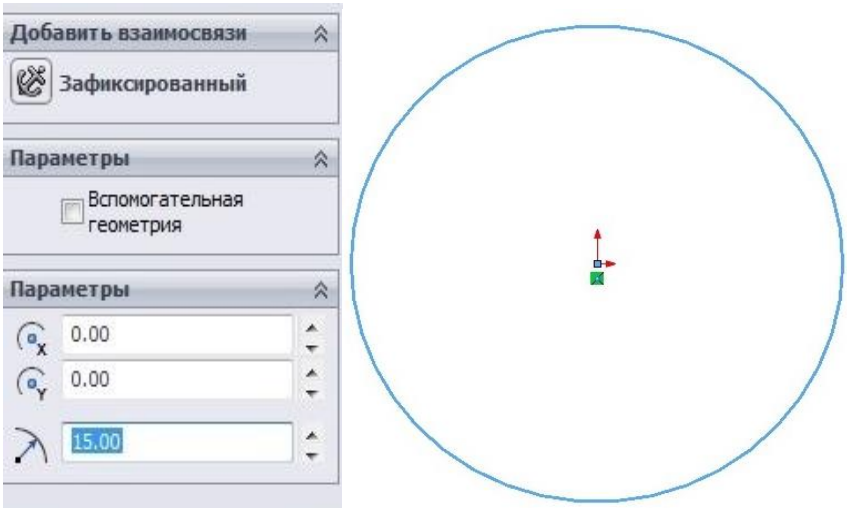
В результате должны получиться элементы: первое и второе сечения патрубка – Эскиз1 и Эскиз4, направляющая кривая – Эскиз2, вспомогательная плоскость Плоскость1 на основе Эскиза3.

Для оформления патрубка как элемента по сечениям необходимо плавно соединить между собой Эскиз1 и Эскиз4, используя направляющую кривую Эскиз2.

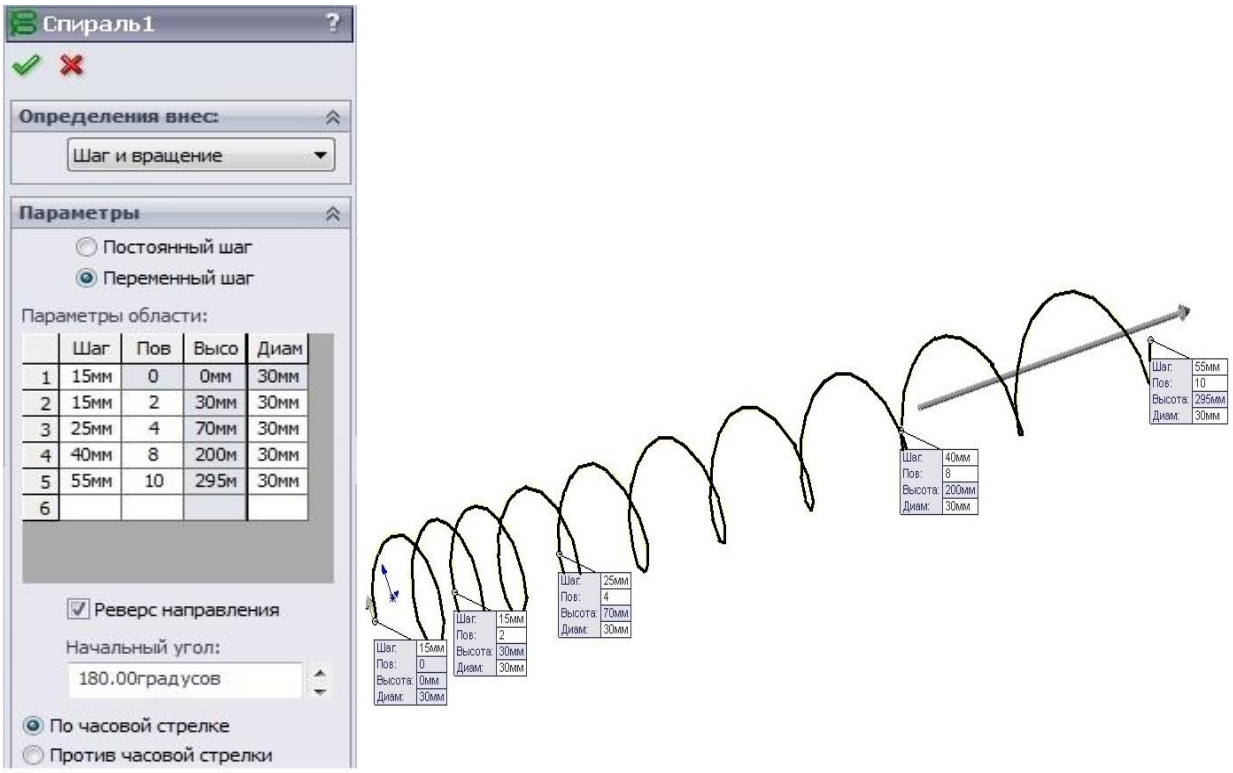
Постройте элемент по сечениям, для чего на панели инструментов Элементы активизируйте кнопку Бобышка/основание по сечениям. На экране появится окно По сечениям (рис. 1.21, *г*). В этом окне в разделе Выбор отметьте профили Эскиз1 и Эскиз4, а в разделе Настройки осевой линии укажите направляющую осевую Эскиз2. Нажмите кнопку ОК и закончите построение патрубка.

Действуя аналогичным образом можно построить вырез по сечениям.

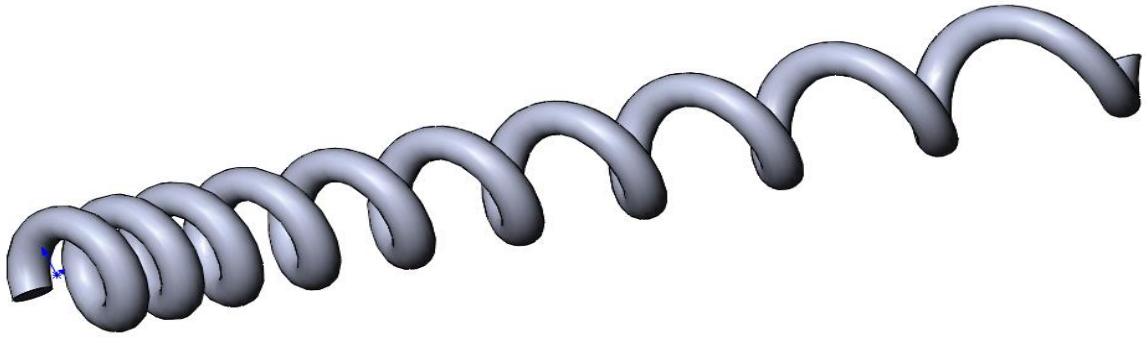
Еще одним способом вытягивания по траектории является создание моделей при использовании элемента Спираль.



а



б



в

Рис. 1.22. Этапы построения объекта с использованием элемента Спираль

Этот элемент удобно использовать, когда необходимо построить трубу, закрученную вокруг оси, находящейся вне эскиза сечения, или, например, когда есть необходимость создать резьбу на объекте (при помощи удаления материала).

Последовательность построения при использовании данного элемента отличается от обычной лишь тем, что в качестве эскиза траектории выступает Спираль.

Для построения элемента Спираль необходимо построить эскиз окружности, которая описывает спираль (рис. 1.22, *а*), выбрать элемент Спираль в панели инструментов Элементы и задать необходимые характеристики – шаг и вращение (количество витков).

Шаг спирали может быть неравномерным (рис. 1.22, *б*). Таким образом получится спираль, которая может быть в дальнейшем использована для вытягивания элемента по траектории (рис. 1.22, *в*).

В SolidWorks существуют вспомогательный элемент, который можно использовать для создания модели твердого тела, – поверхность. Программа позволяет строить поверхности различной сложности и конфигурации, а затем на их основе создавать трехмерные модели деталей.

Поверхность – это элемент нулевой толщины, играющий вспомогательную роль при построении твердого тела и не отображающийся на чертеже детали.

Существует несколько способов создания поверхностей. Эти способы во многом схожи с проектированием моделей твердых тел. Построить поверхность можно методом простого вытягивания, поворотом контура вокруг оси, а также создать как элемент по траектории или по сечениям.

Поверхности можно удлинить, отсечь, скруглить, починить (заполнить), сшить и т. д. Все перечисленные команды находятся на панели инструментов Поверхности.

1.4. Построение моделей биологических объектов и изделий

Биологические объекты и изделия техники представляют собой сложные многотельные конструкции, которые невозможно смоделировать одной деталью. Поэтому для создания моделей объектов, состоящих из нескольких твердых тел, необходимо создавать сборки из множества различных компонентов. Компонентами в сборке являются отдельные детали или другие сборки, которые называют узлами сборки.

В SolidWorks можно построить сборки двух типов: сборку «снизу вверх» и сборку «сверху вниз».

Сборка «снизу вверх» представляет собой сборку конструкции из готовых деталей. Для построения такой сборки детали должны быть заранее спроектированы и сохранены в отдельных файлах. Конструкция или узел собираются из этих деталей аналогично реальной сборке. В процессе сборки необходимо детали помещать в трехмерное сборочное пространство и указывать условия их сопряжения друг с другом.

При проектировании сборки «сверху вниз» сначала создается компоновочный эскиз сборки, а уже на его основе строятся отдельные детали. Эти детали сразу являются встроенными в общую сборку. Такой тип сборки удобен тем, что при изменении компоновочного эскиза сборки автоматически изменяются размеры и конфигурации составляющих ее деталей.

Для создания сборки запустите программу, выберите Новый документ SolidWorks с шаблоном Сборка и нажмите кнопку ОК.

В виртуальном пространстве можно разместить компоненты сборки, которыми являются детали или сборочные единицы. Шаблон Сборка отличается от шаблона Деталь присутствием в Дереве конструирования строки Группа сопряжений.

1.4.1. Сборка «снизу вверх»

Такой способ построения подразумевает существование готовых трехмерных моделей деталей, из которых будет создана сборка. После того, как открыто трехмерное пространство в шаблоне Сборка, поместите в сборочное пространство детали сборки. Для этого выберите команду меню Вставка/Компонент/Из файла или активизируйте кнопку Вставить компоненты на панели инструментов Сборка.

В результате на экране откроется окно Вставить компонент. Используя кнопку Обзор, найдите файл с нужной деталью для размещения в сборке. После того, как выбран файл детали, нажмите кнопку Открыть. В результате этих действий происходит автоматическое возвращение в сборочное пространство, где указателем мыши необходимо обозначить место для размещения исходной точки первой детали сборки. При желании можно совместить исходную точку сборочного пространства с исходной точкой этой детали. Когда точка выбрана, щелкните левой кнопкой мыши, и деталь расположится

в пространстве. Аналогичным образом в сборочное пространство помещаются все детали, необходимые для построения сборки.

При создании сборки можно зафиксировать детали, т. е. сделать их неподвижными в пространстве. Зафиксирована деталь или нет, можно узнать по ее имени в Дереве конструирования. Если напротив обозначения детали стоит префикс (ф), то она зафиксирована, и ее невозможно переместить. Если префикс имеет вид (-), то деталь не зафиксирована, и ее положение в пространстве не определено. Первая деталь сборки автоматически является зафиксированной. Зафиксировать или освободить деталь можно, если щелкнуть правой кнопкой мыши по названию детали в Дереве конструирования и на появившейся панели в разделе Компонент отметить Зафиксировать или Освободить. Незафиксированные детали в сборочном пространстве можно легко перемещать, нажав кнопку Переместить компонент на панели инструментов Сборка. Вращать незафиксированные детали позволяет кнопка Вращать компонент. Чтобы собрать детали в единую конструкцию, нужно задать условия сопряжения. Для этого на панели инструментов Сборка необходимо активизировать кнопку Условия сопряжения. Появится окно Сопряжение (рис. 1.23), где в разделе Выбор сопряжений следует указать сопрягаемые объекты (плоскости, поверхности, кромки, оси, грани) и тип сопряжения. Объекты выделяются при помощи левой кнопки мыши, имена сопрягаемых объектов указываются в окне Объекты для Сопряжения, в разделе Выбор сопряжений. Тип сопряжения объектов выбирается в одном из трех разделов окна Сопряжения:

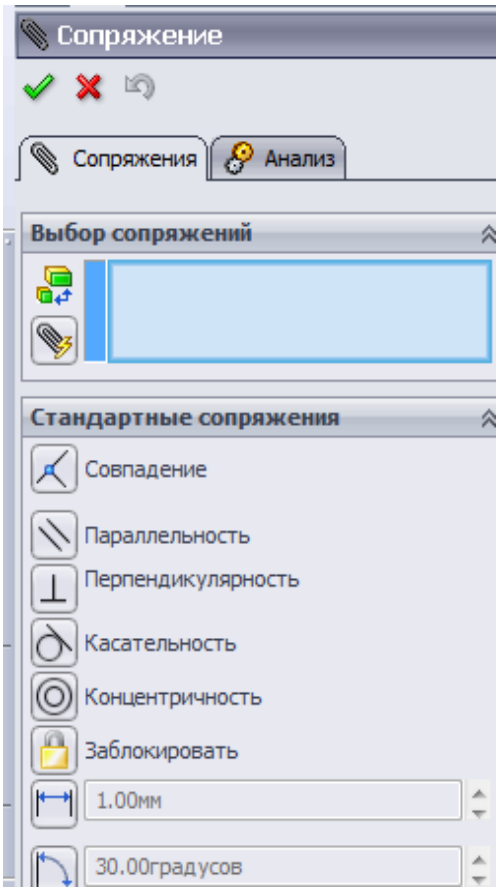


Рис. 1.23. Стандартные сопряжения

– Стандартные сопряжения;

– Дополнительные сопряжения;

– Механические сопряжения.

В общем случае для создания сборки можно использовать виды сопряжений из раздела Стандартные сопряжения (рис. 1.23):

– Совпадение. Элементы деталей (оси, кромки, поверхности, грани) совпадают на бесконечности;

– Параллельность. Указывает на параллельное расположение граней, поверхностей, кромок или осей деталей;

– Перпендикулярность. Выбранные элементы располагаются под углом 90º относительно друг друга;

– Касательность. Указывает на касательность отмеченных поверхностей, при этом хотя бы одна поверхность должна быть неплоской (сферической, цилиндрической, конической);

– Концентричность. Обеспечивает концентричное расположение цилиндрических, конических, сферических поверхностей и кромок;

– Заблокировать. Позволяет привязать два компонента сборки друг к другу, сохраняя их взаимное расположение и ориентацию;

– Расстояние. Выделенные поверхности, оси, кромки располагаются на указанном расстоянии;

– Угол. Выделенные элементы располагаются под некоторым углом.

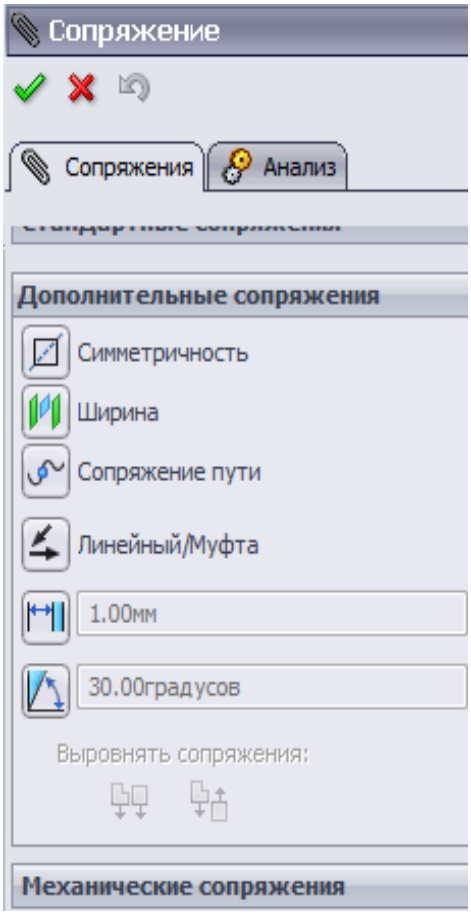


Рис. 1.24. Дополнительные сопряжения

В окне Сопряжения имеется раздел Дополнительные сопряжения. В этом разделе доступны шесть типов сопряжений: Симметричность, Ширина, Сопряжение пути, Линейный/Муфта, Расстояние, Угол (рис. 1.24):

– Симметричность позволяет расположить два похожих элемента симметрично относительно плоскости или плоской грани. Использовать это сопряжение можно для следующих объектов: точки (вершины), линии (кромки, оси), плоскости, плоские грани, сферы равных радиусов, цилиндрические с равными радиусами;

– Ширина позволяет центрировать выступ некоторой детали по ширине канавки другой сопрягаемой детали;

– Сопряжение пути ограничивает выбранную точку на компоненте (обычно какую-нибудь вершину) по отношению к пути, то есть некоторая точка объекта может перемещаться в сборке только по определенному пути, который состоит из кромок, кривых или элементов эскиза;

– Линейный/Муфта устанавливает взаимосвязь между перемещением одного компонента и перемещением другого компонента;

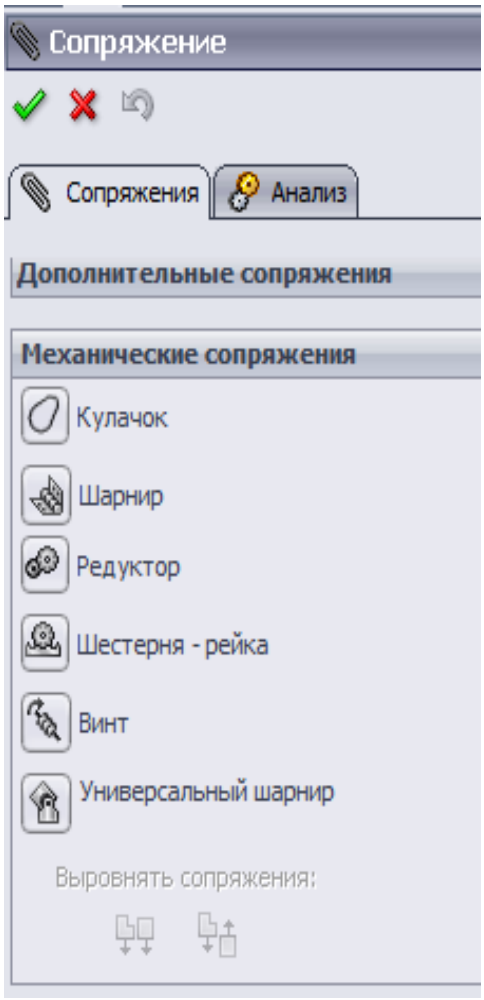


Рис. 1.25. Механические сопряжения

– Расстояние позволяет создать сопряжение, при котором некоторый компонент сборки может перемещаться в определенном диапазоне расстояний от другого компонента. Минимальное и максимальное расстояние указывается в специальных областях Максимальное значение и Минимальное значение.

– Угол позволяет создать сопряжение, при котором некоторый компонент сборки может перемещаться в определенном диапазоне углов относительно другого компонента. Минимальное и максимальное значения угла указываются в специальных областях Максимальное значение и Минимальное значение.

– Сопряжения Расстояние и Угол позволяют фиксировать расстояние и угол между компонентами сборки в определенных пределах при их перемещении относительно друг друга.

В разделе Механические сопряжения располагаются (рис. 1.25):

Кулачок позволяет установить касательное расположение или совпадение поверхности какой-либо детали с поверхностью кулачка;

Шарнир обеспечивает вращение одного компонента сборки вокруг оси другого компонента, т. е. моделируется работа соединения типа шарнир. Сопряжение Шарнир тождественно одновременному заданию двух сопряжений Концентричность и Совпадение (при этом исключается перемещение вдоль оси);

Редуктор позволяет осуществлять в сборке вращение двух компонентов (например, зубчатых колес) относительно друг друга вокруг выбранной оси. Для такого сопряжения необходимо указать оси вращения и передаточное отношение в разделе Пропорция;

Шестерня-рейка организует такое взаимное сопряжение между компонентами сборки, при котором линейное перемещение одной детали (рейки) приводит к вращению другой детали (шестерни) и наоборот;

Винт моделирует относительное перемещение двух концентрично расположенных компонентов сборки аналогично резьбовому соединению, т. е. при вращении одной детали происходит линейное перемещение другой детали с учетом заданного шага;

Универсальный шарнир – это сопряжение, при котором вращение одного компонента сборки (входного вала) вокруг своей оси приводит к вращению другого компонента (выходного вала) вокруг своей оси.

Все заданные сопряжения сборки указываются в Дереве конструирования в Группе сопряжений. Наименование каждого сопряжения включает имена участвующих в нем компонентов. При необходимости сопряжения можно удалить или редактировать, используя возможности Дерева конструирования.

После того, как заданы все необходимые сопряжения между деталями и зафиксированы детали, которые в реальной сборке остаются неподвижными сборка считается законченной.

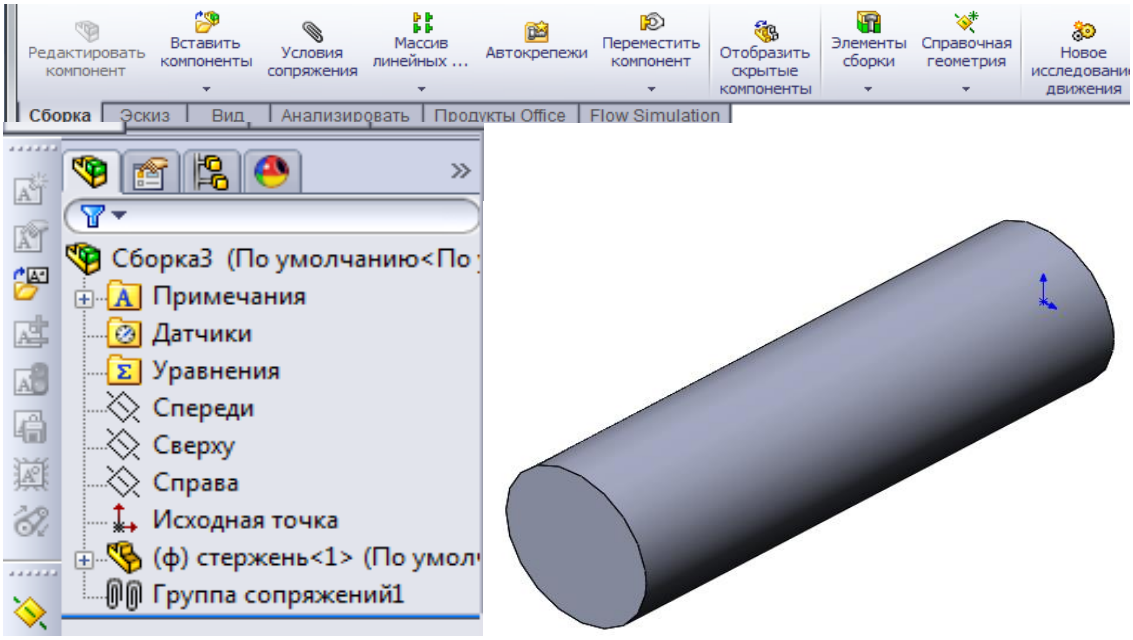
Показателем правильно выполненной сборки является отсутствие конфликтных сопряжений в Дереве конструирования и возможность беспрепятственного перемещения деталей, подобно движению в реальном объекте. Осуществить движение деталей можно при помощи кнопки Переместить компонент.

Рассмотрим построение сборки «сверху вниз». Воспользуйтесь заранее сконструированными деталями или постройте новые.

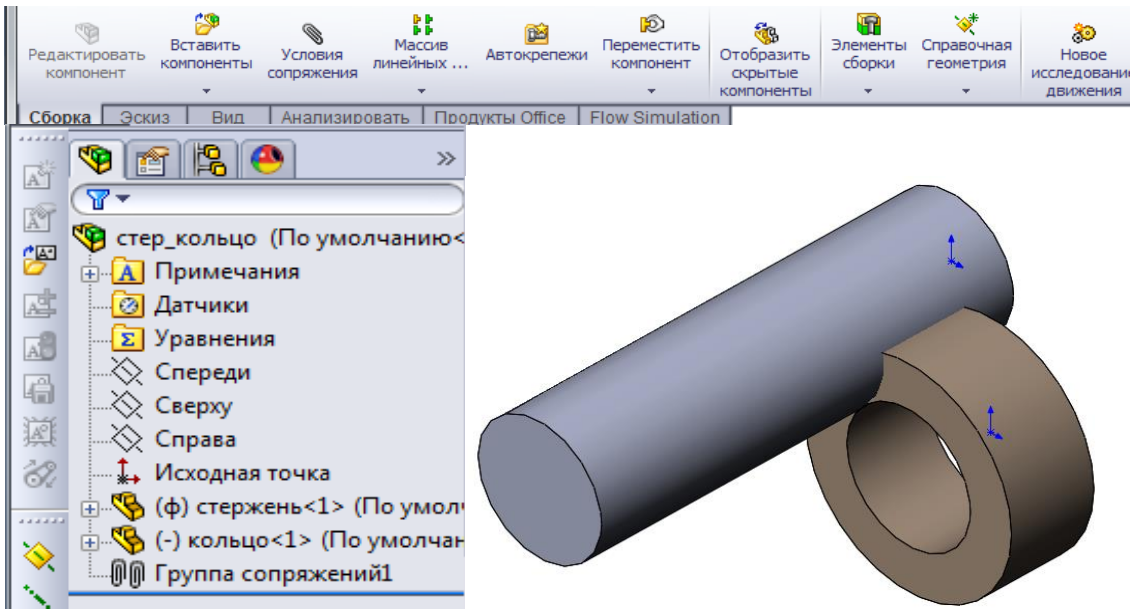
Для построения сборки запустите программу и войдите в режим создания сборки, выбрав шаблон Сборка. Поместите в сборочное пространство первую деталь, для этого активизируйте команду меню Вставка/Компонент/Из файла или воспользуйтесь кнопкой Вставить компоненты на панели инструментов Сборка.

В открывшемся окне Вставить компонент нажмите кнопку Обзор, выберите в рабочем каталоге файл детали и нажмите кнопку Открыть.

В сборочном пространстве курсором укажите месторасположение детали, совместив ее исходную точку с исходной точкой сборки (рис. 1.26, *а*). Деталь разместится в трехмерном пространстве, а в Дереве Конструирования появится строка (ф) Имя детали1. Префикс (ф) означает зафиксированное положение детали в сборочном пространстве.



а



б

Рис. 1.26. Этапы перемещения компонентов в сборку

Первая деталь, вставляемая в сборку, всегда является зафиксированной. Аналогичным образом поместите в сборочное пространство вторую деталь, но ее исходную точку не совмещайте с исходной точкой сборки. Разместите Деталь2 в любом месте трехмерного пространства (рис. 1.26, *б*).

Прежде чем задать сопряжения, можно сориентировать детали в пространстве с учетом конфигурации создаваемой сборки. Для этого активизируйте кнопку Вращать компонент. Если положение деталей по отношению друг к другу не окажет влияния на сборку, этого можно не делать.

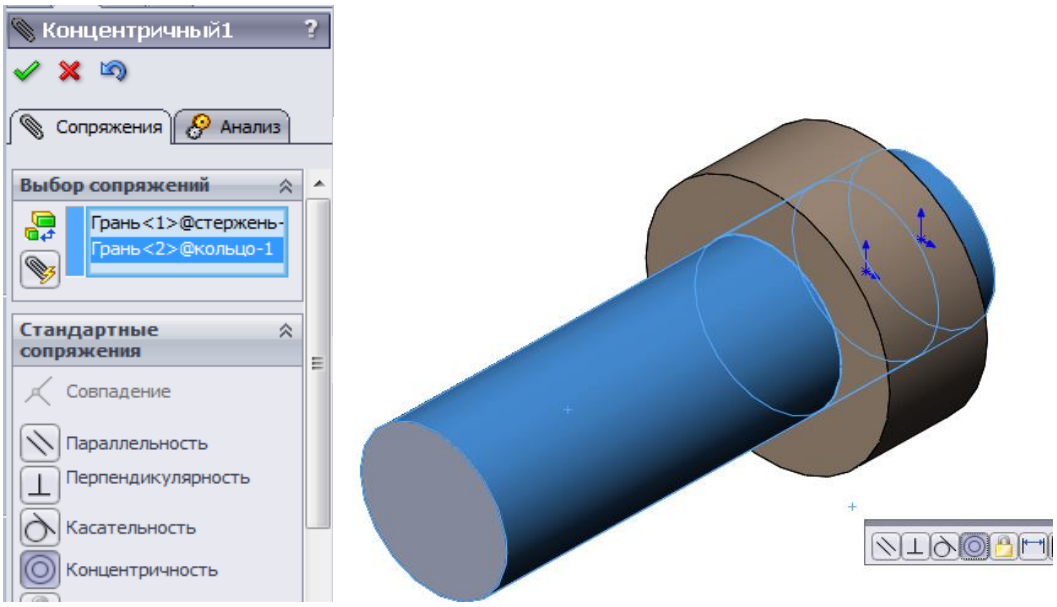
Чтобы собрать две детали в единую конструкцию, необходимо задать условия сопряжения. Для этого на панели инструментов Сборка активизируйте кнопку Условия сопряжения. На экране появится окно Сопряжения, где надо указать сопрягаемые элементы деталей и типы сопряжений: концентричность – для цилиндрических граней (рис. 1.27, *а*) и расстояние – для плоских поверхностей (рис. 1.27, *б*).

Закончите создание сборки, нажав кнопку ОК. В результате получатся две детали в сборе, а в Дереве конструирования в Группе сопряжений появятся два сопряжения.

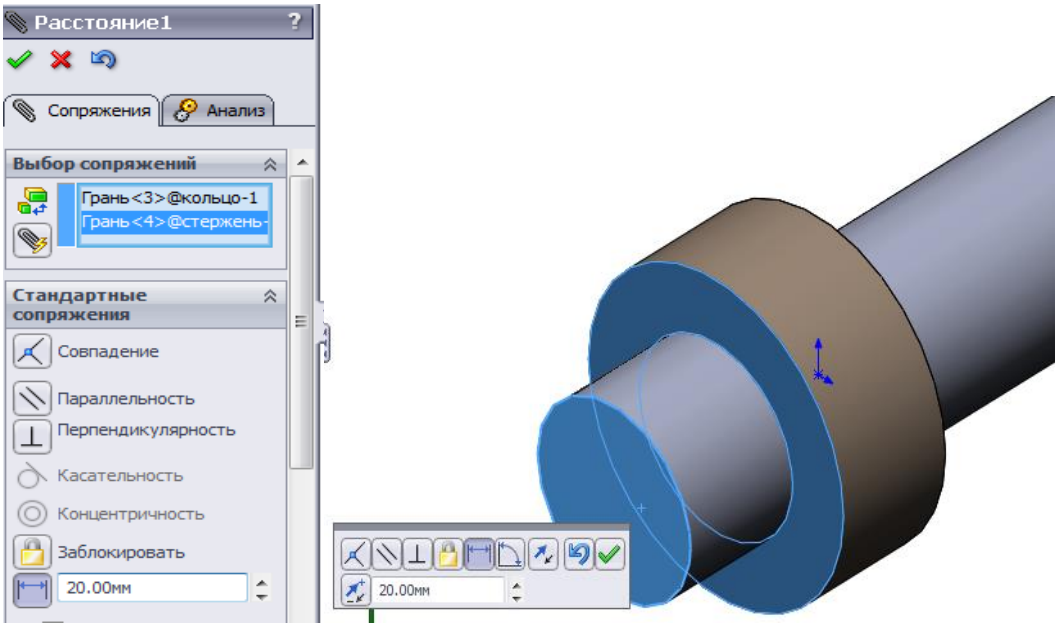
Если необходимо полностью определить сборку, то следует добавить еще одно сопряжение, например, используя плоскости построения (совпадение плоскостей Сверху для Детали1 и Детали2). Если сборка полностью определена (рис. 1.27, *в*), то значок (-) рядом с именем Детали2 исчезает. Этот означает, что детали 1 и 2 передвигаться относительно друг друга не могут.

Иногда возникает необходимость переориентировать деталь относительно трехмерного пространства сборки. Для этого можно задать условия сопряжения между плоскостями сборки и гранями детали, например, совпадение плоскости Сверху и основания и совпадение боковых поверхностей с плоскостями Спереди и Сбоку. Таким образом, деталь получит однозначную ориентацию в трехмерном сборочном пространстве, и ее фиксирование теперь не требуется.

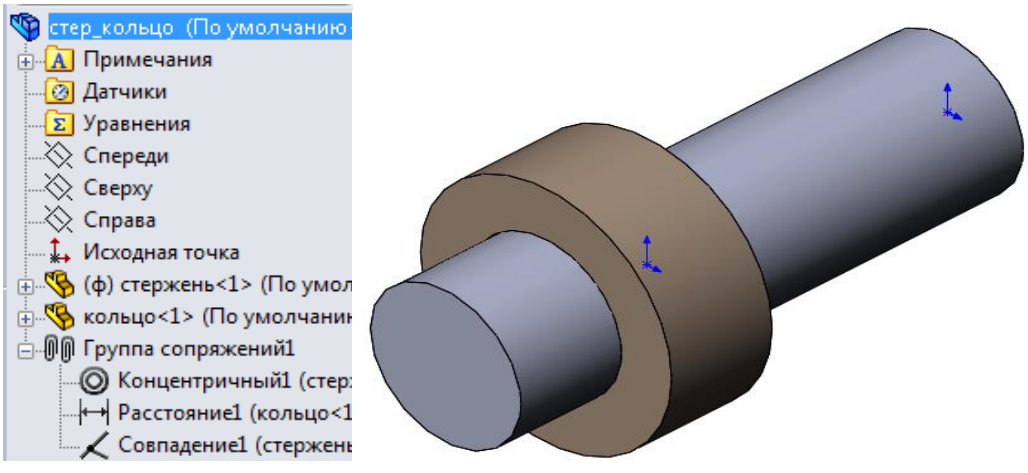
Если в сборку необходимо вставить несколько одинаковых деталей с одинаковым набором сопряжений, то для ускорения процесса сборки можно использовать команду Зеркально отразить компоненты. Чтобы воспользоваться этой командой, необходимо построить плоскость зеркального отражения. В Дереве конструирования эта плоскость обозначится как Плоскость1. Далее надо открыть меню Вставка/Зеркально отразить компоненты. На экране откроется окно Зеркально отразить компоненты/ Шаг 1: Выбранные объекты, в котором в разделе Плоскость для зеркального отображения укажите Плоскость1, а в разделе Зеркально отразить компоненты – необходимую деталь.



а



б



в

Рис. 1.27. Этапы создания сопряжений

Для выбора деталей при зеркальном отражении нужно лишь щелкнуть по их объемному изображению левой кнопкой мыши. Выбор компонентов также можно осуществить в Дереве конструирования.

В строке имен копируемых компонентов указывается их состояние. Если нажать кнопку Создать зеркально отраженное исполнение, это будет означать, что новый компонент – абсолютная копия оригинала, зеркально перенесенного относительно указанной плоскости. Затем нужно задать имена новых деталей, так как зеркально отраженные версии компонентов должны иметь имена, отличные от своих аналогов. Дальше необходимо указать, какую информацию о модели вы хотите перенести на копию. После завершения команды получается зеркальное отображение детали вместе с его геометрией и расположением.

Если в модели были созданы дополнительные объекты при помощи массива, например, отверстия под крепеж, то ускорить процедуру сборки можно, используя команду меню Вставка/Массив компонентов/Управляемый элементом. На экране откроется окно Управляемый элементом. В разделе Компоненты для массива указываем детали, которые будут собираться по массиву, например, винты. В разделе Производный элемент помещаем название массива. В результате винты займут все отверстия, а в Дереве конструирования появится строка Производный массив1.

При формировании сборки можно установить детали не во все отверстия. Для этого необходимо на этапе построения в окне Управляемый элементом либо в режиме редактирования определения после создания сборки в окне Производный линейный массив раздела Пропустить экземпляры указать те детали, которые не нужно использовать в сборке.

1.4.2. Сборка «сверху вниз»

Для проектирования сборки методом «сверху вниз» необходимо открыть трехмерное пространство SolidWorks и выбрать режим работы программы со сборками, выполнив команду Файл/Новый/Сборка. Затем в Дереве конструирования выберите плоскость, например Спереди, войдите в эскиз и постройте компоновочный эскиз сборки. При рисовании эскиза нужно обязательно задать взаимосвязи между элементами (линиями, окружностями, дугами и т. д.). В целом компоновочный эскиз сборки должен быть определен. Когда закончите создание эскиза, выйдите из него, при этом в Дереве конструирования рядом с именем сборки появится значок расположения

(рис. 1.28). Теперь можно сохранить сборку и начать проектирование отдельных ее деталей.

Для проектирования деталей на основе компоновочного эскиза необходимо выбрать команду меню Вставка/Компонент/Новая деталь или воспользоваться командой Создать панели инструментов Сборка. В результате в Дереве конструирования над строкой Группа сопряжений появится новая ветвь с именем детали.

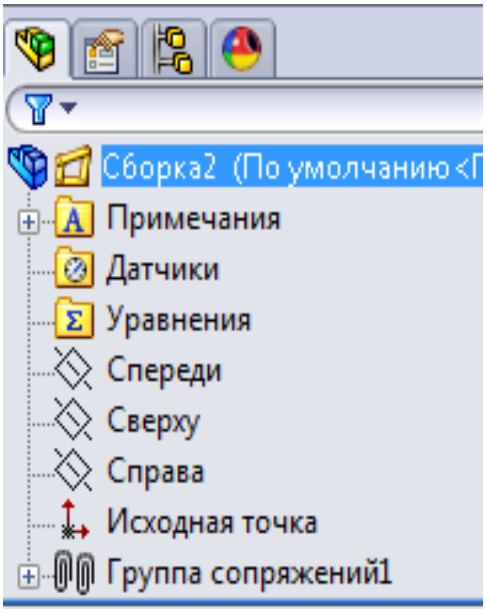


Рис. 1.28. Создание сборки на основе расположения

Теперь можно начать построение детали. При этом компоновочный эскиз сборки остается на экране в качестве вспомогательного объекта. Построение детали в режиме сборки «сверху вниз» аналогично конструированию детали в шаблоне Деталь, но сначала нужно выйти из сборки и войти в режим редактирования детали. Для этого выделите строку с именем детали в Дереве конструирования курсором мыши и во всплывающем меню активизируйте команду Редактирование детали. В результате активируется режим редактирования детали, при этом строка с именем детали в Дереве конструирования будет выделена синим цветом (рис. 1.29, *а*).

Теперь откройте Дерево конструирования новой детали и выберите плоскость для создания эскиза первого элемента этой детали. Нарисуйте эскиз, далее на его основе проектируйте деталь, оформляя окружности, фаски, скругления, вырезы и другие элементы (рис. 1.29, *б*).

При создании эскизов деталей сборки необходимо использовать взаимосвязи между компоновочным эскизом сборки и эскизом детали.

Чтобы приступить к созданию следующей детали, необходимо отредактировать сборку, т. е. выйти из режима редактирования детали. Для перехода в режим редактирования сборки нужно щелкнуть правой кнопкой мыши на имени детали и выбрать в появившемся контекстном меню команду Редактировать сборку: Имя сборки или нажать на значок сборки в правом верхнем углу области построения. В результате сборка будет перестроена, и получится возможность сконструировать другие детали сборки.

При построении сборки методом «сверху вниз», во время проектирования деталей на основе компоновочного эскиза, в файле детали автоматически создаются виртуальные файлы проектируемых деталей. При необходимости эти виртуальные файлы можно сохранить как реальные, указав их имя и месторасположение (каталог и папку).

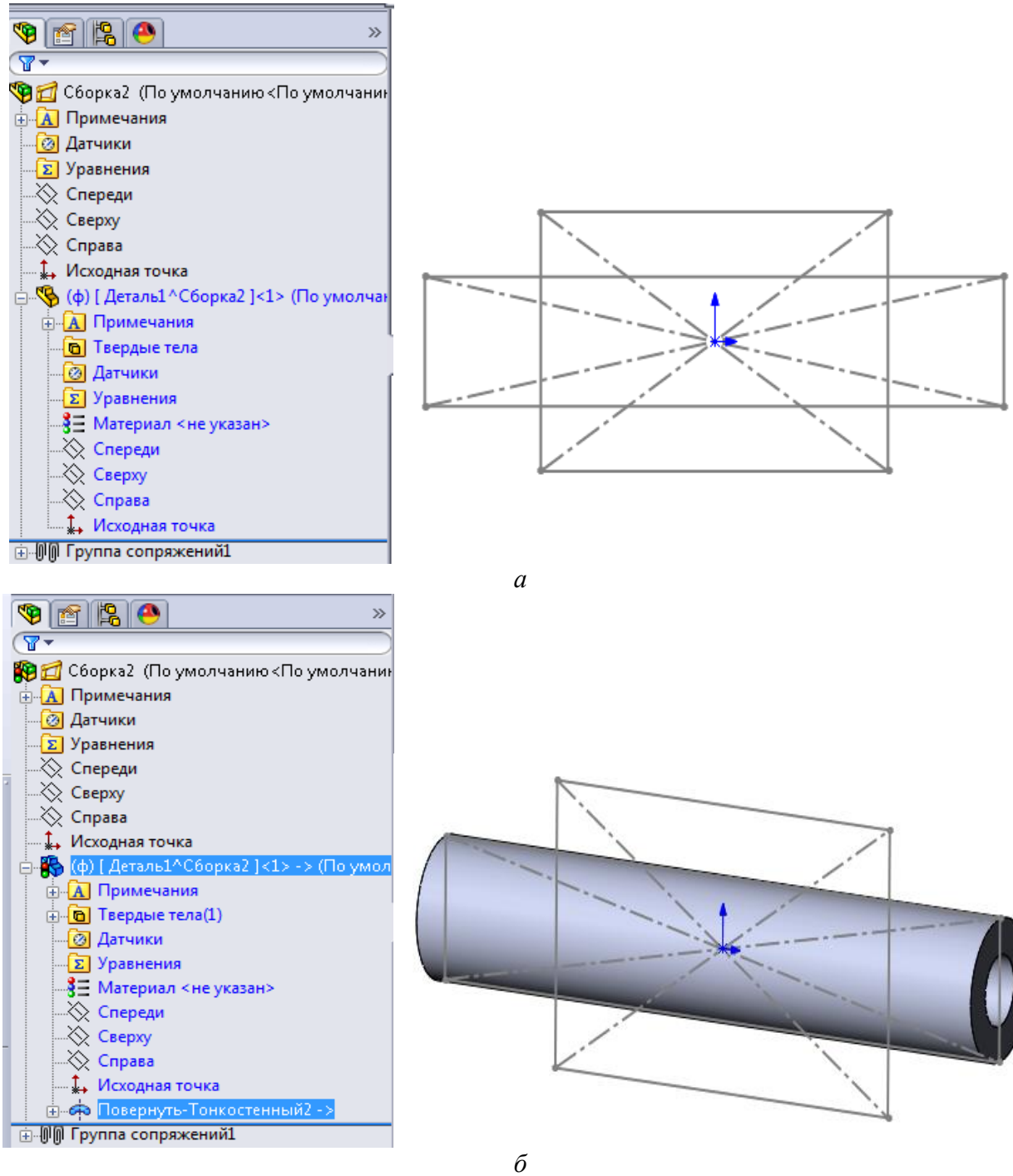


Рис. 1.29. Этапы редактирования детали с учетом расположения

Основное достоинство сборки «сверху вниз» состоит в том, что при редактировании компоновочного эскиза сборки происходит автоматическое

изменение всей сборки и деталей, входящих в нее. Для изменения эскиза сборки необходимо в Дереве конструирования щелкнуть правой кнопкой мыши на имени сборки и выбрать во всплывающем меню в разделе Расположение команду Компоновка.

Рассмотрим другой пример: ременная передача, состоящая из двух шкивов и ремня.

Для проектирования сборки такого типа откройте новую сборку. В Дереве конструирования выберите плоскость, например, Спереди, и откройте эскиз, где будет построен компоновочный эскиз сборки (рис. 1.30, *а*). При рисовании эскиза в обязательном порядке задайте взаимосвязи между его элементами – касательность линий к окружностям. В целом эскиз должен быть определен. Сохраните файл.

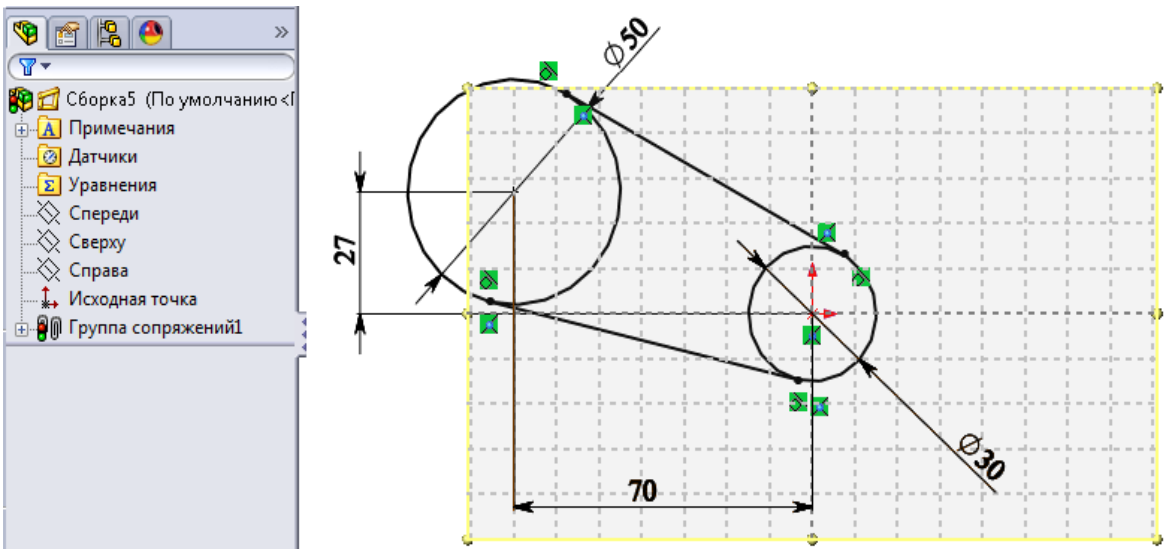
На основе компоновочного эскиза сборки спроектируйте деталь Шкив1. Для этого создайте новую деталь в сборке. В результате в Дереве конструирования появится строка [Деталь1^Ременная передача]1. Квадратные скобки в имени детали указывают на то, что деталь является виртуальным компонентом, т. е. ее на самом деле еще не существует.

Теперь можно начинать построение шкива. Сначала нужно выйти из сборки и войти в режим редактирования детали. Затем в Дереве конструирования детали выберите плоскость, на которой создайте эскиз шкива. В данном случае таким элементом является плоскость Спереди.

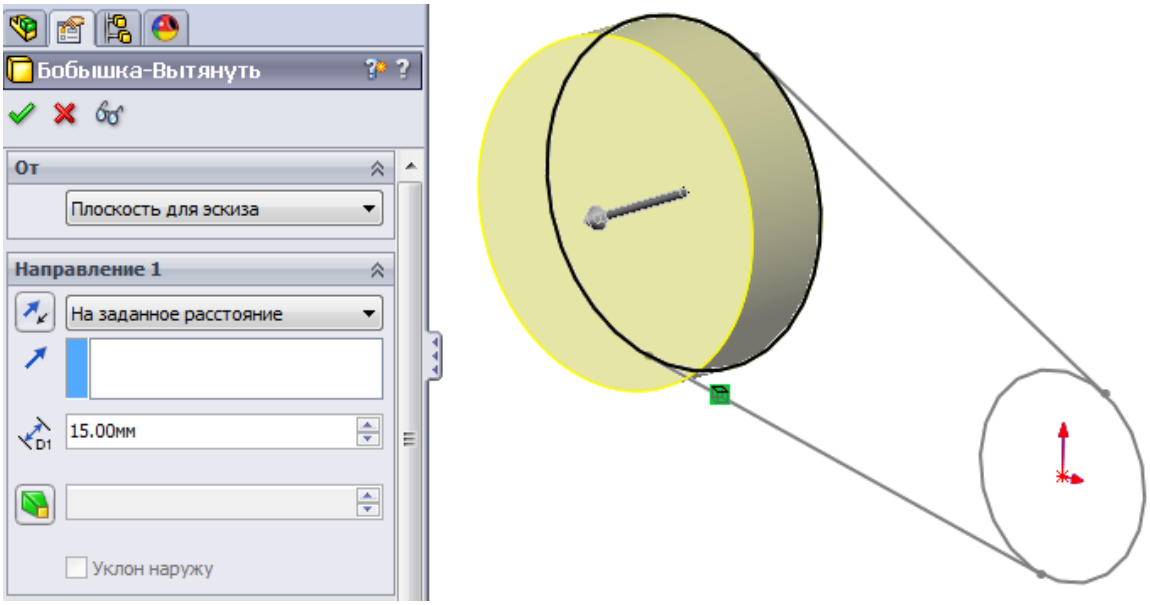
После выбора плоскости войдите в режим рисования эскиза, где нарисуйте эскиз шкива, который представляет собой окружность. Определите взаимосвязи между эскизом шкива и компоновочным эскизом сборки: окружность эскиза новой детали должна быть концентрична с Дугой1 на эскизе сборки, и эти окружности равны. Можно воспользоваться и командой Преобразование панели инструментов Эскиз.

Не выходя из эскиза, нажмите кнопку Вытянутая бобышка/основание и вытяните эту окружность на 15 мм. В результате появится объемное изображение заготовки шкива (рис. 1.30, *б*). Теперь на новой детали оформите край для фиксации ремня.

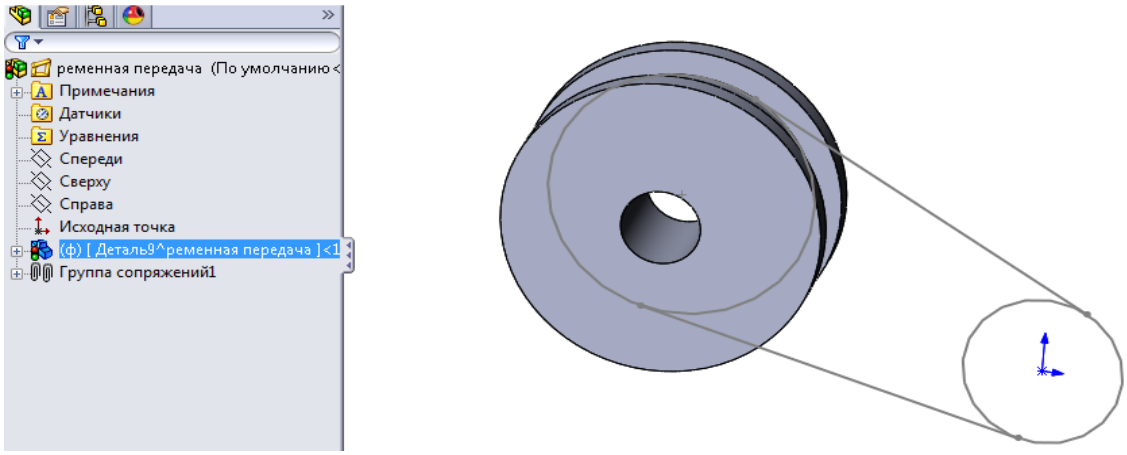
Для этого нарисуйте эскиз края на плоском торце заготовки шкива, который представляет собой окружность, концентричную с окружностью заготовки шкива, с радиусом на 5 мм больше радиуса заготовки. Вытяните эту окружность на 5 мм, в результате будет построен первый край шкива.



а



б



в

Рис. 1.30. Этапы построения первого шкива модели ременной передачи

Таким же образом постройте второй край шкива и оформите центральное отверстие в шкиве для его крепления на валу.

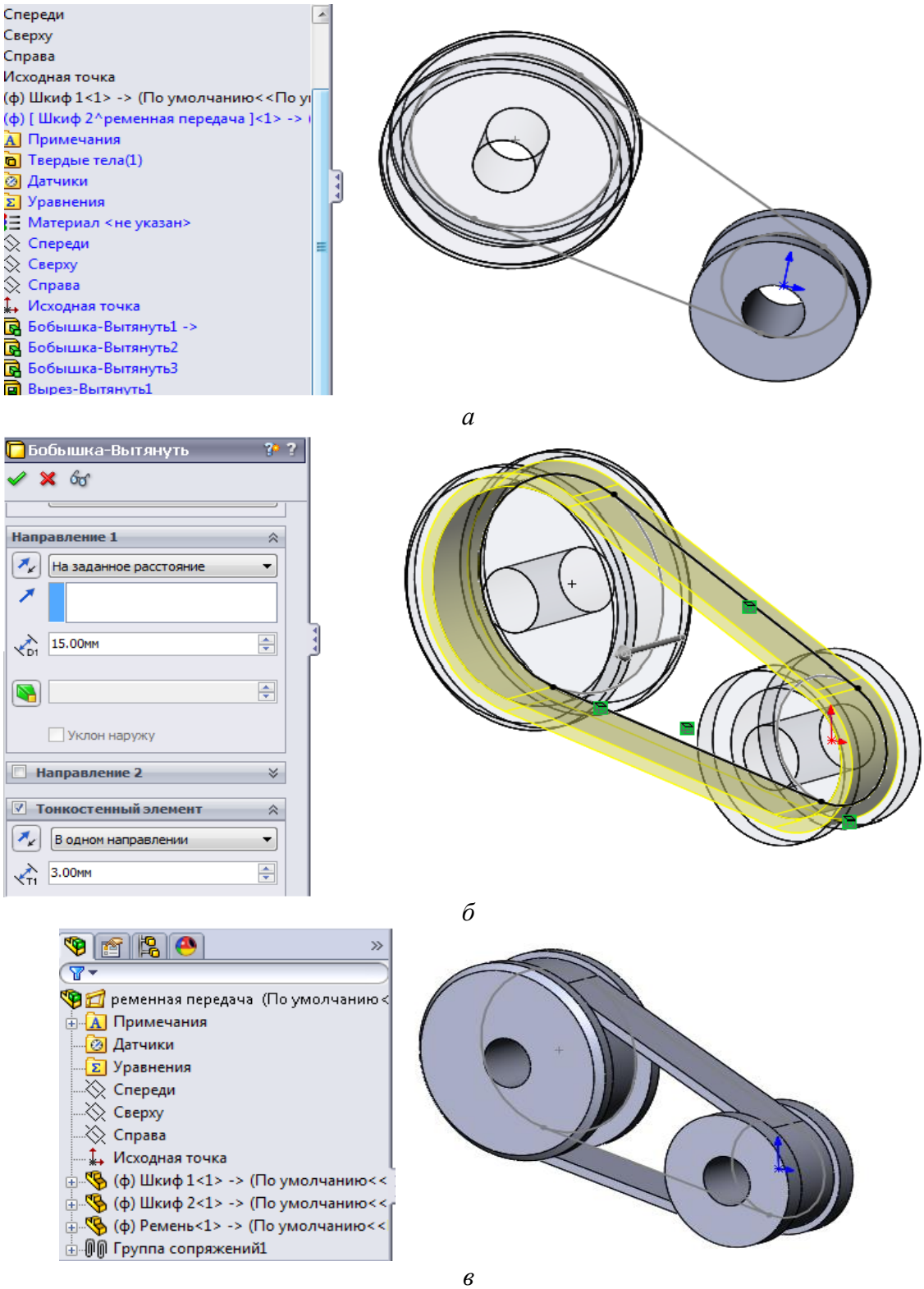


Рис. 1.31. Этапы построения модели ременной передачи

Войдите в эскиз и нарисуйте отверстие в виде окружности диаметром 15 мм, концентричное с заготовкой шкива. Вытяните вырез, используя гранич-

ное условие Насквозь (рис. 1.30, *в*). На кромках шкива оформите фаски размером 2×45º.

Шкив создан, однако приступить к построению второй детали сборки невозможно находясь в режиме редактирования детали. Выйдите из этого режима, сборка будет перестроена, а вы получите возможность сконструировать остальные детали ременной передачи.

Теперь можно переименовать деталь. Новое имя детали также будет заключено в квадратные скобки, которые указывают на то, что деталь является виртуальным компонентом сборки. Чтобы сохранить виртуальный компонент в его собственном внешнем файле, щелкните правой кнопкой мыши имя детали и выберите в контекстном меню команду Сохранить деталь (во внешнем файле). На экране откроется окно Сохранить как, в котором нужно указать путь для сохранения этого файла.

Аналогично можно построить деталь Шкив2 (рис. 1.31, *а*).

Создайте еще одну деталь сборки Ремень. Вставьте новую деталь и войдите в режим редактирования этой детали. Выберите в Дереве конструирования детали плоскость Спереди, на которой и оформите эскиз ремня.

При построении этого эскиза сначала нарисуйте эскиз, полностью совпадающий с эскизом сборки, при этом задайте следующие взаимосвязи:

– концентричность окружностей в эскизе ремня и эскизе сборки;

– равенство окружностей в эскизе ремня и эскизе сборки;

– касательность линий к окружностям в эскизе ремня.

Затем удалите дуги окружностей, не участвующие в формировании геометрии ремня (внутренние части дуг) и вытяните контур ремня на 15 мм как тонкостенный элемент толщиной 3 мм (рис. 1.31, *б*). Выйдите из режима редактирования детали и задайте для детали имя Ремень.

В результате создана не только сборка (рис. 1.31, *в*), но и составляющие ее детали: Шкив1, Шкив2 и Ремень.

Глава 2. ПОСТРОЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ПО ТОМОГРАММАМ В ПАКЕТЕ MIMICS

Для биомеханического моделирования биологических объектов на основе механики деформируемого твердого тела с использованием метода конечных элементов необходима адекватная биологическому объекту трехмерная геометрическая модель. Данные для построения геометрических моделей

биологических объектов можно получить из трех источников: 1) 3D анатомических атласов типа Glasklar Human 3D, Interactive Hip и т. д.; 2) специальных сетевых приложений построения 3D моделей типа Google SketchUp; 3) графических баз данных ПИК (архивы 3D моделей костей человека).

Эти источники созданы на основе технологий построения трехмерных геометрических моделей в CAD-системах. Недостатком моделей, построенных по материалам этих источников является то, что они отражают биологические структуры «среднестатистического человека» и не учитывают индивидуальные особенности структур конкретного биологического объекта.

Для построения индивидуальных геометрических моделей биологических объектов используют компьютерные или магнитно-резонансные томограммы.



Рис. 2.1. Трехмерная модель бедренной кости

Результатом клинических исследований на томографе является срез (slice) по плоскости, проходящий через изучаемый орган. Для построения геометрических моделей «слайсы» изучаемого органа представляют в виде файла, содержащего одну или несколько исследовательских сессий, а также в виде нескольких каталогов, каждый из которых содержит файлы (кадры) одной исследовательской сессии. Шаг между срезами (разрешение томограммы) менее 1 мм.

Для построения трехмерных геометрических моделей (рис. 2.1) в программе Mimics используют двумерные срезы (рис. 2.2) клинических томограмм.

Эти трехмерные геометрические модели затем могут быть напрямую переданы в другие программы, например Solid Works, для анализа методом конечных элементов.

Основная процедура по переходу к 3D модели – сегментация. При помощи сегментации выделяют интересующие биологические объекты на срезах. Сегментация необходима для извлечения максимального объема данных из изображения. Эта информация затем используется для создания 3D модели.



Рис. 2.2. Томографические срезы поясничного отдела позвоночника

Компьютерные и магниторезонансные томограммы содержат информацию в виде градаций серого. Mimics позволяет пользователю создавать модели на основании значений серого (числа Хаунсфилда). Значение серого – это число, определяющее яркость пикселя (белый, серый, черный). Есть прямая связь между плотностью материала и значением серого на томограмме. С помощью Mimics можно построить 3D-модели на данных, которые контрастны на томограмме.

Базовая сегментация выполняется при помощи выделения областей с одинаковыми или похожими значениями яркости, т. е. обозначением диапазона яркости.

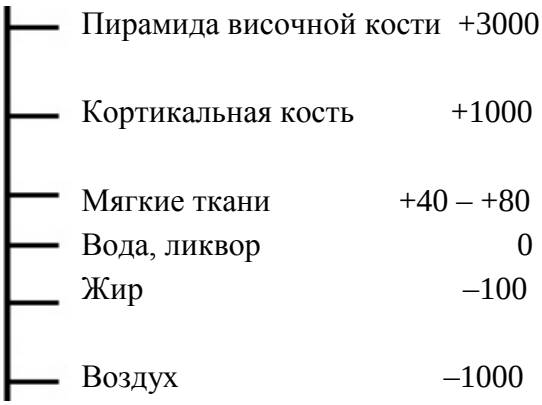


Рис. 2.3. Значения числа Хаунсфилда (*HU*) для воздуха и биологических тканей

При томографии, после сканирования объекта и компьютерной обработки сигнала, реконструируется графическое изображение среза – графическая матрица. Каждой ячейке матрицы соответствует рассчитываемый компьютером коэффициент абсорбции тканей, выражаемый в единицах Хаунсфилда (*HU*). Коэффициент абсорбции тканей показывает насколько ткань способна поглощать (ослаблять) рентгеновские лучи. Чем больше коэффициент абсорбции ткани, тем сильнее она поглощает излучение, тем меньше фотонов излучения доходит до детектора томографа и тем более белой она выглядит на компьютерной томограмме: кость самая белая, воздух самый черный.

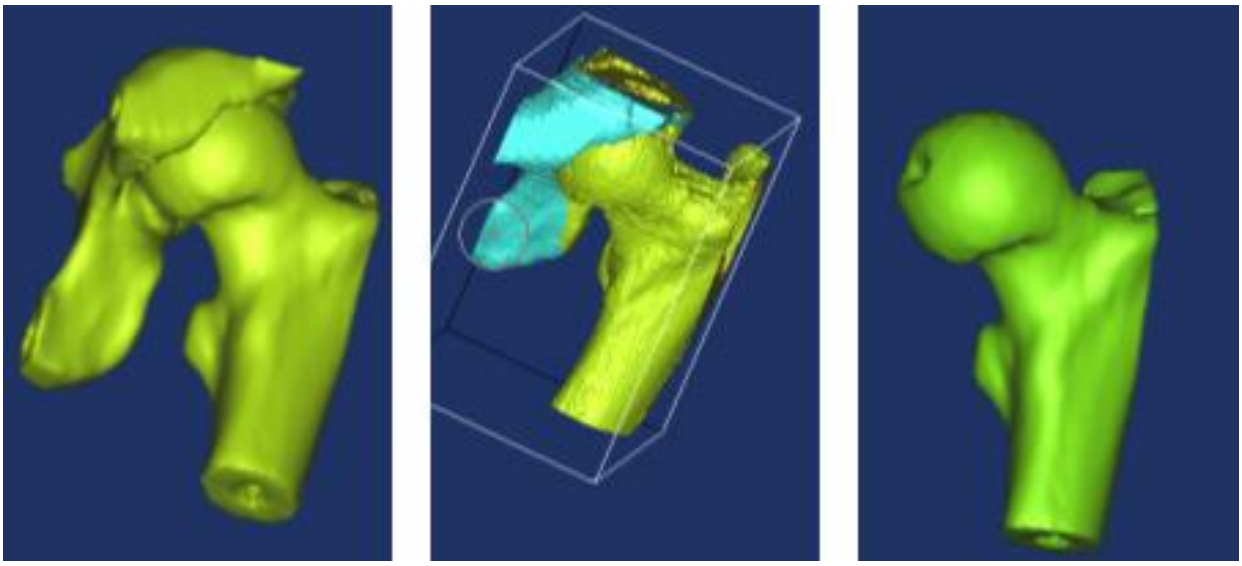


Рис. 2.4. Отделение головки бедра при редактировании 3D-модели в программе Mimics

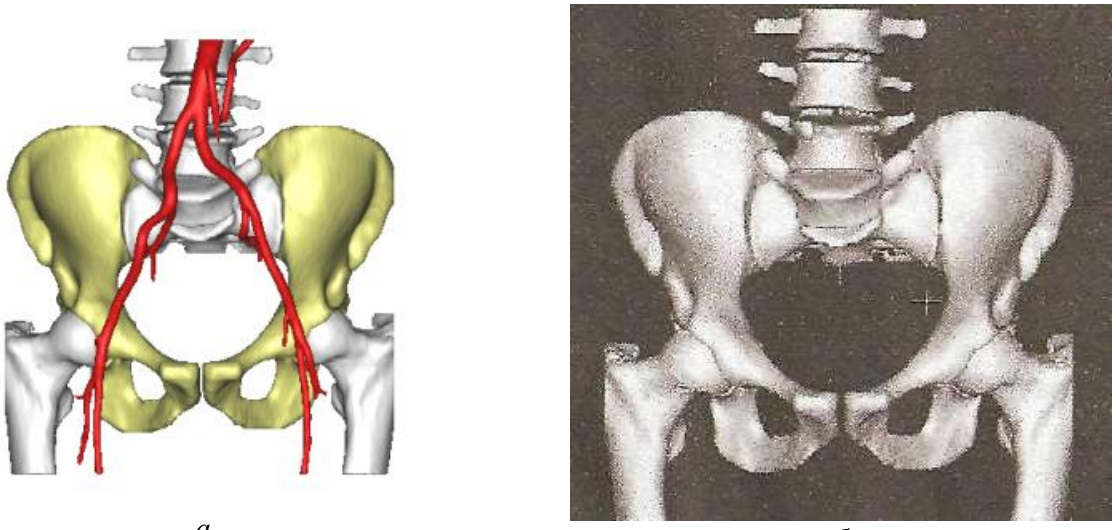
Шкала единиц Хаунсфилда (денситометрических показателей) – шкала линейного ослабления излучения по отношению к дистиллированной воде, рентгеновская плотность которой при стандартных давлении и температуре была принята за 0 *HU*.

Диапазон единиц шкалы, соответствующих коэффициенту поглощения рентгеновского излучения нормальными анатомическими структурами организма, составляет от –1024 до +1024.

Отрицательные величины шкалы соответствуют воздуху и жировой ткани, положительные – мягким тканям, костной ткани и более плотным материалам, например, металлам (рис. 2.3).

Базовая сегментация в программе Mimics выполняется при помощи выделения областей с одинаковыми или похожими значениями яркости, то есть обозначением диапазона яркости.

Программа Mimics содержит набор средств, для сегментации при обработке изображений на 2D видах (XY, XZ и YZ), и инструмент редактирования на данных 3D (рис. 2.4).



а *б*

Рис. 2.5. Схемы трехмерных биологических объектов, полученные в программе Mimics при сегментации: *а* – брюшная аорта и таз; *б* – таз

Используя сегментацию, данные о размерах пикселя и расстояние между срезами исходных изображений в программе Mimics можно построить 3D-модель (рис. 2.5) с точностью, соответствующей точности данных сканирования.

Компьютерные томограммы, представленные градациями серого, содержат данные о плотности вещества. Эти данные можно применять в программе Mimics для назначения свойств материала (рис. 2.6).

Измеряя с помощью полилиний коэффициент абсорбции костной ткани в единицах Хаунсфилда (*HU*), можно рассчитать механические свойства биологических структур по следующим формулам:

$$\rho = 1{,}067\ HU + 131, \qquad (1)$$

$$E = 3{,}64\rho - 506, \qquad (2)$$

где ρ – плотность в кг/м^3, E – модуль упругости (МПа), HU – коэффициент абсорбции костной ткани в единицах Хаунсфилда.

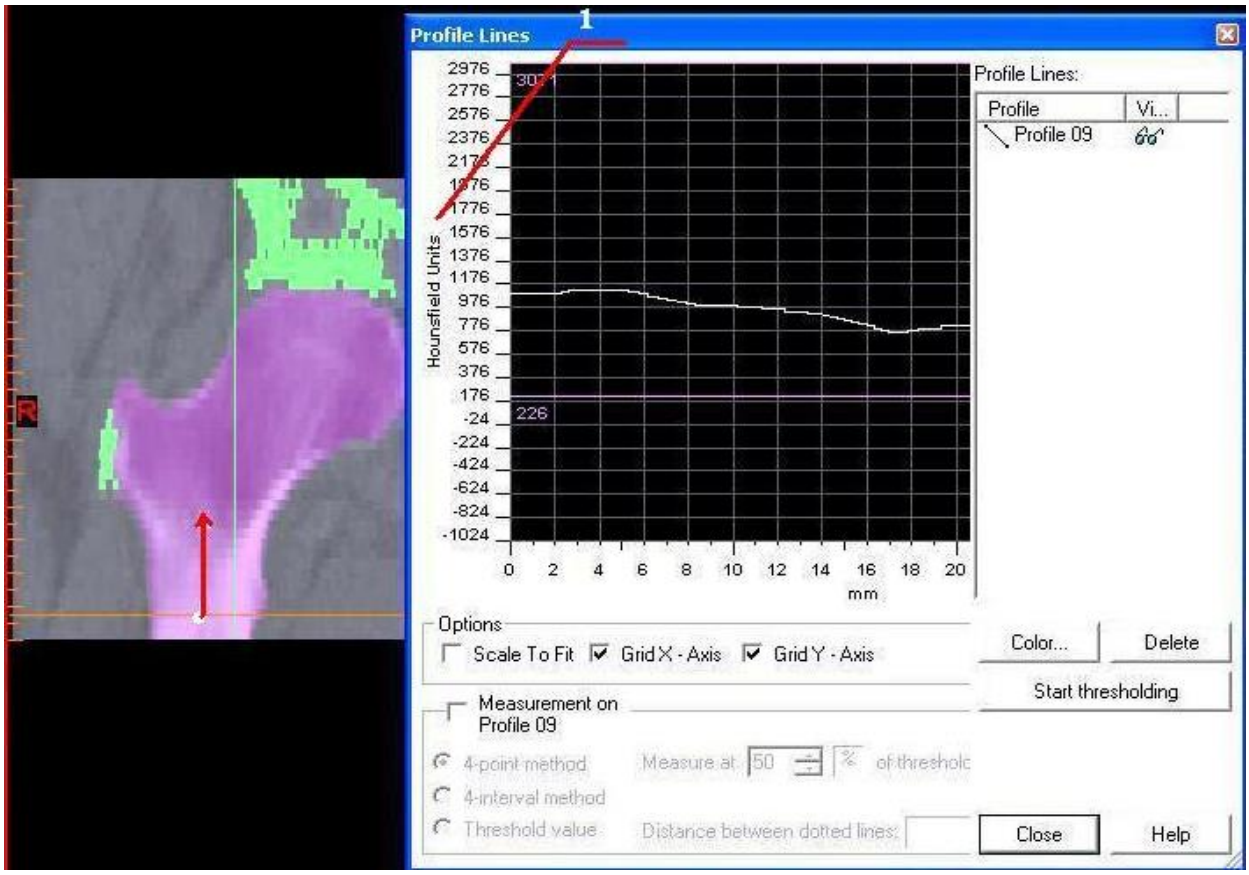


Рис. 2.6. Схема задания механических свойств материалов

В программу Mimics можно импортировать протезы (рис. 2.7), имплантаты и с ее помощью, например, в программе SolidWorks проводить предоперационное прогнозирование результатов коррекции и протезирования.

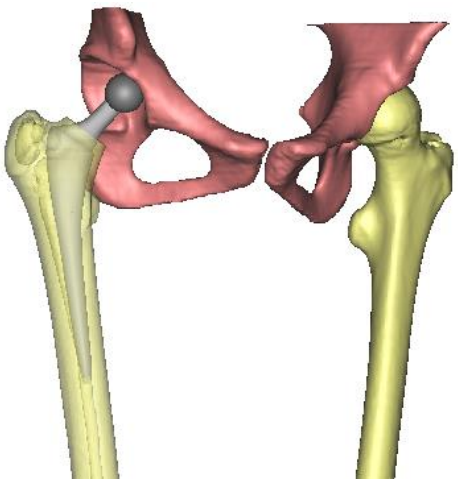


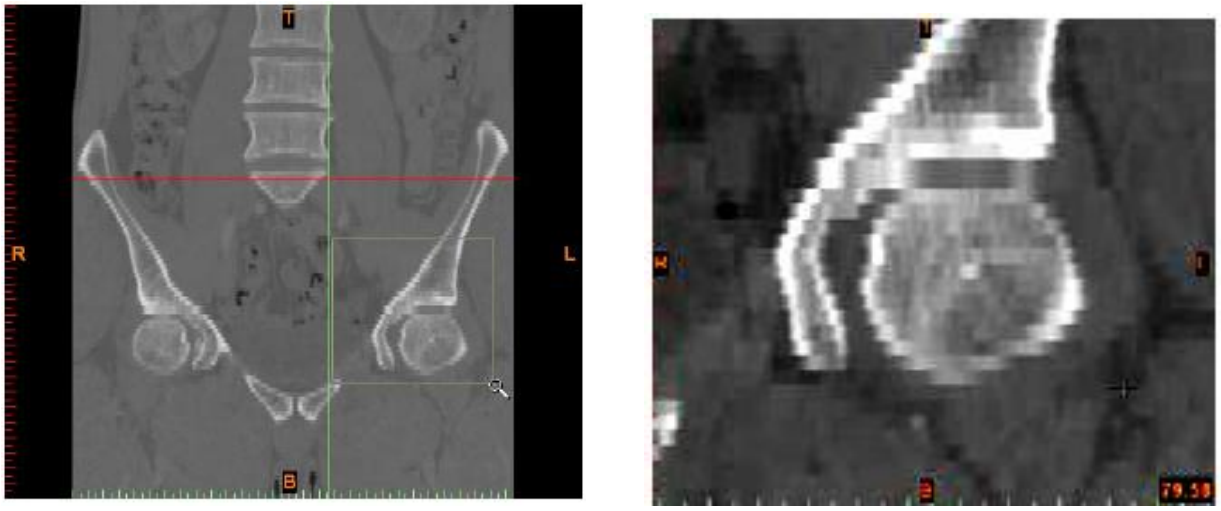
Рис. 2.7. Схема размещения бедренного имплантата

Кадрирование – это изменение количества пикселей в изображении путем «отсечения» пикселей вокруг выбранной области. Кадрирование дает возможность обрезать на изображении все лишнее и сосредоточить внимание на нужном элементе.

Кадрирование позволяет установить соответствие значений серого цвета на томограмме значениям серого цвета на мони-

торе. Значение серого на изображениях компьютерных томограмм выражается соответственно шкале Хаунсфилда. Эта шкала состоит из 4095 значений, которые соответствуют 256 значениям серого на экране.

Диапазон, покрывающий всю гистограмму, отобразит все видимые на томограмме ткани. Сужение диапазона позволит лучше выделить незначительные различия яркости в мягких тканях или костей, так как яркость распределяется среди 256 отображенных значений.



а *б*

Рис. 2.8. Схемы масштабирования объекта

Рассмотрим основные вопросы, связанные с навигацией системы и проводимыми измерениями.



а *б*

Рис. 2.9. Схемы измерений: *а* – расстояний между объектами; б – величины угла

Для масштабирования объекта выделяем интересующую область на одной из проекций и нажимаем на значок Zoom на панели инструментов главного меню. На рис. 2.8, *а*, *б* приведен пример масштабирования объекта. Для

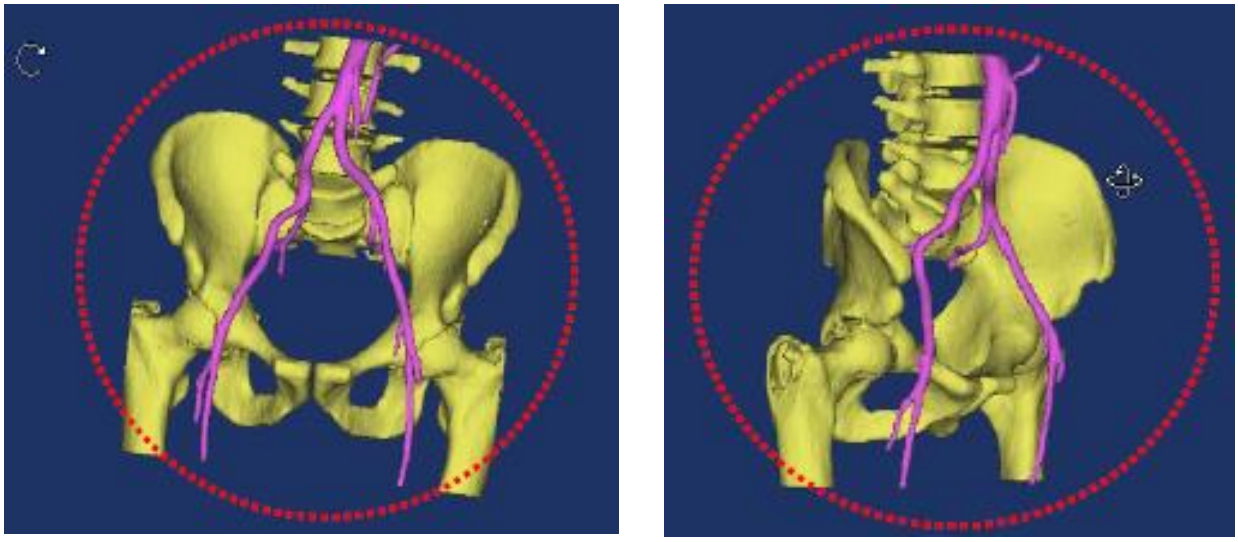
отмены масштабирования проекции или локальной области на ней, нажимаем левой кнопкой мыши на значок UnZoom и на соответствующую область.

С видами предусмотрены следующие операции: 1) увеличение на весь экран нажатием кнопки Полный экран; 2) перемещение нажатием левой кнопки на значок Pan Once и смещение проекции удержанием на ней левой кнопки мыши.



Рис. 2.10. Схема измерения плотности объекта

Для измерений активируют панель инструментов Tools. Для измерения длины используют инструмент Measure distance. На томографическом срезе указывают две точки, между которыми и определяется расстояние (рис. 2.9, *а*). Аналогично на томографическом срезе инструментом Measure angle определяют величины углов, указав базовые точки (рис. 2.9, *б*).



а *б*

Рис. 2.11. Схемы вращения трехмерного объекта

Для измерения плотности используют инструмент Density measurement, который определяет среднюю плотность внутри выделенной области в форме эллипса или прямоугольника. При этом на проекцию объекта также выводится величина площади рассматриваемой области и величина отклонения плотности в пределах этой области (рис. 2.10).

При работе с трехмерными моделями удобно использовать функцию вращения Rotate. Функция вращения включается при нажатии левой кнопки мыши и движении мыши на трехмерном виде объекта. Если кнопку мыши отпустить, функция вращения выключится (рис. 2.11, *а*). В зависимости от места активирования мыши будут реализованы различные режимы вращения трехмерного объекта.

Если нажать левую кнопку мыши за пределами окружности, описывающей объект, ось вращения будет перпендикулярна экрану. При нажатии кнопки в центре трехмерного объекта можно вращать его вокруг вертикальной и горизонтальной осей (рис. 2.11, *б*).

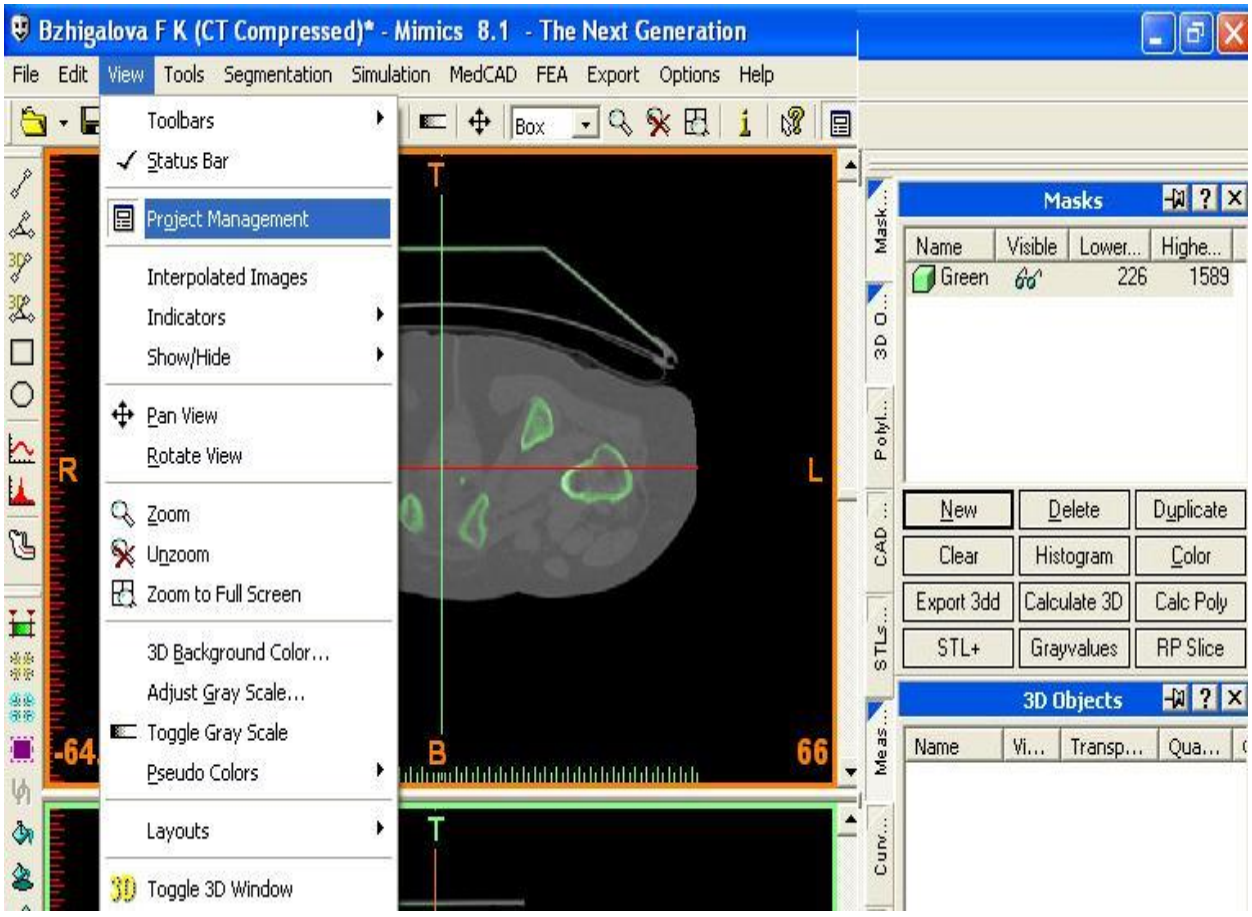


Рис. 2.12. Интерфейс панели инструментов Project Management

Чтобы работать с маской и строить трехмерную модель, необходимо активировать дополнительное меню Project Management (рис. 2.12), позволяющее выполнять операции создания новой маски New, удаления маски Delete, создания копии маски Duplicate, очистки маски Clear, изменения цвета маски Color.

В левой нижней части экрана расположена панель инструментов Маски (рис. 2.13).

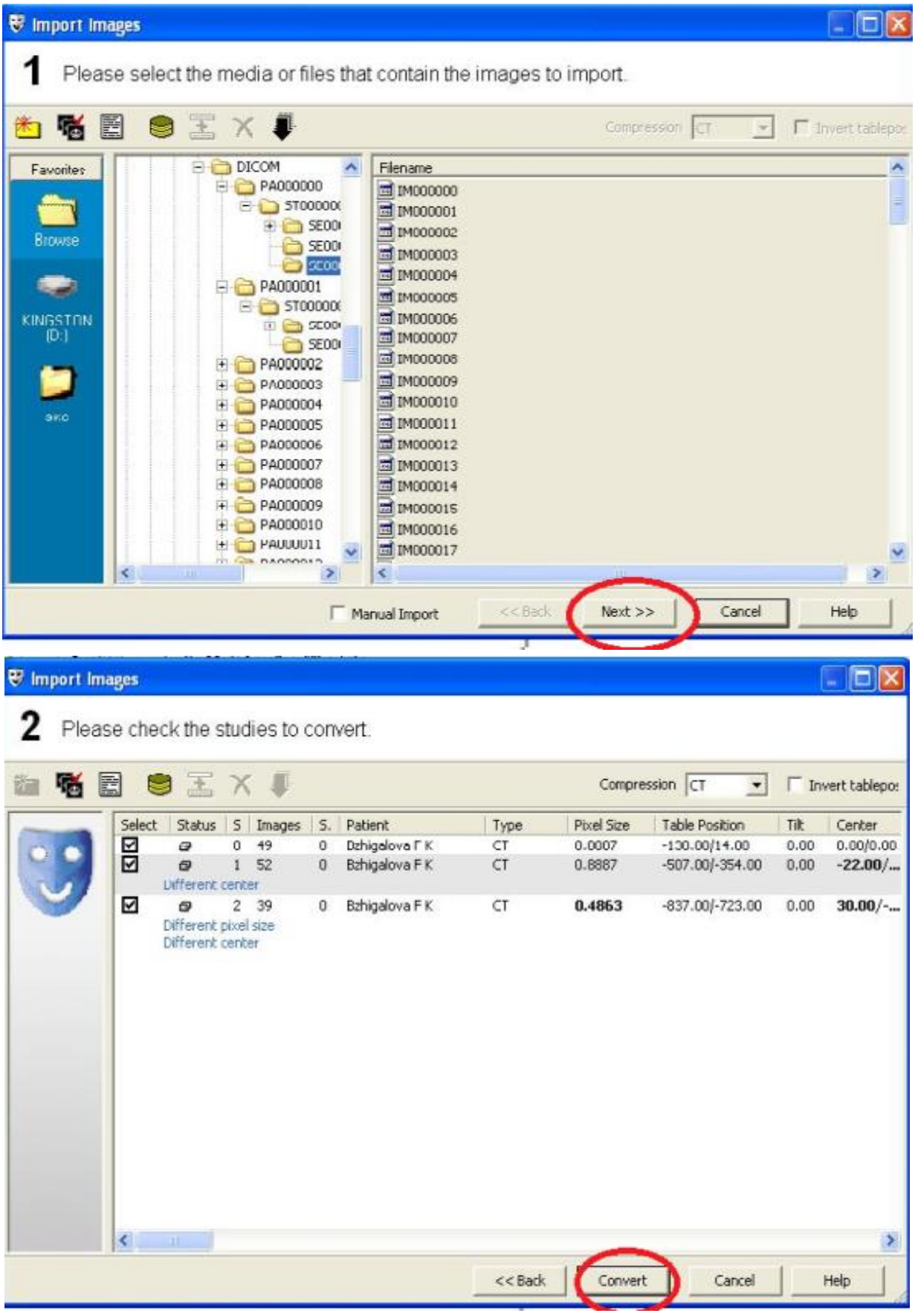


Рис. 2.13. Интерфейсы, иллюстрирующие последовательность открытия файлов в программе Mimics

Если панель инструментов Маски не отображается, следует выбрать последовательность команд Вид/Маски в строке главного меню. Панель инструментов Маски можно перемещать по экрану, располагать и фиксировать в любом месте.

Для получения трехмерного изображения в программном комплексе Mimics используется следующий алгоритм:

1) кадрирование изображений, 2) создание маски сегментации – выбор диапазона сегментации (Thesholding), 3) операции с маской: редактирование (Draw, Erase, Local Theshold), булевы операции, заполнение пустот, 4) реконструкция модели по маске, 5) преобразование сетки в Remesher, 6) экспорт полученной модели в SolidWorks.

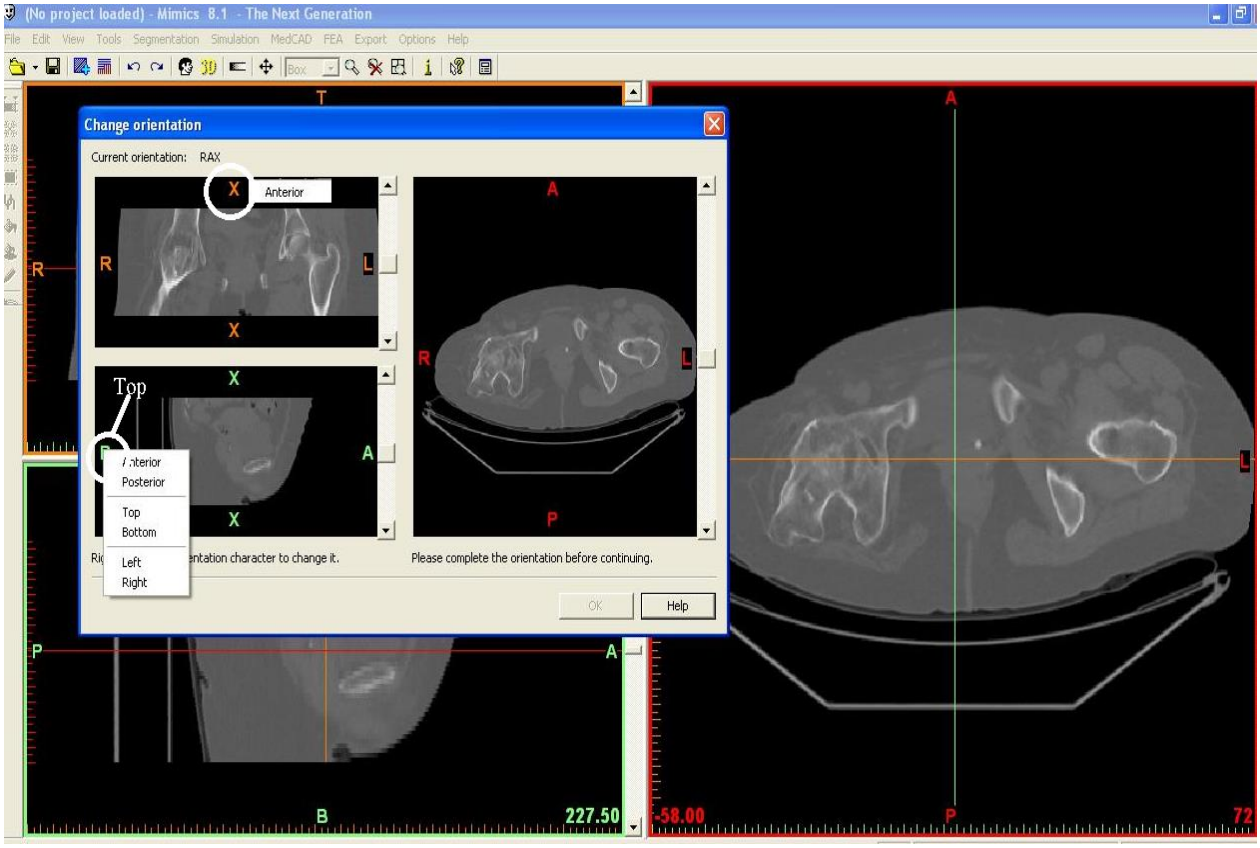


Рис. 2.14. Схема изменения ориентации объекта в программе Mimics

Кадрирование изображения заключается в импорте срезов КТ в Mimics. Используя главное меню выполняем следующие операции: 1) открываем файлы КТ через главное меню File–Import Images, 2) находим в интерфейсе Проводник базу данных сохраненных КТ, 3) выбираем папку КТ пациента, 4) преобразовываем изображение из формата dicom в вид, читаемый программой Mimics. Для этого выделяем файл и нажимаем кнопку Convert (рис. 2.13).

Изменение ориентации проекций объекта, построенных автоматически по срезам томограммы в программе, выполняют следующими командами: anterior (спереди), posterior (сзади), top (сверху), bottom (снизу), left (слева), right (справа) (рис. 2.14).

Создание маски сегментации. Построение маски начинается с выбора диапазона сегментации Thesholding по рентгеновской плотности структур биологического объекта.



Рис. 2.15. Схема определения диапазона сегментации

В главном меню Tools/Thesholding по умолчанию исходно заданная рентгеновская плотность (коэффициент абсорбции тканей в единицах Хаунсфилда) 1787, что соответствует среднему значению кортикальной ткани (рис. 2.15).

Выбор диапазона сегментации необходим для создания первого выделения объекта сегментации. Объект может быть выделен либо на основе только одного нижнего порога, либо на основе порогового диапазона. В первом случае объект сегментации будет содержать все пиксели в изображениях со значениями больше или равными пороговому. Во втором случае значение пикселей должно быть между двумя пороговыми значениями.

Пороговое значение может быть изменено перемещением ползунка в пороговой панели инструментов в режиме реального времени. Пороговое значение будет отображаться в Пороговой панели инструментов (Thesholding). Соответственно будет изменяться и площадь сегментации.

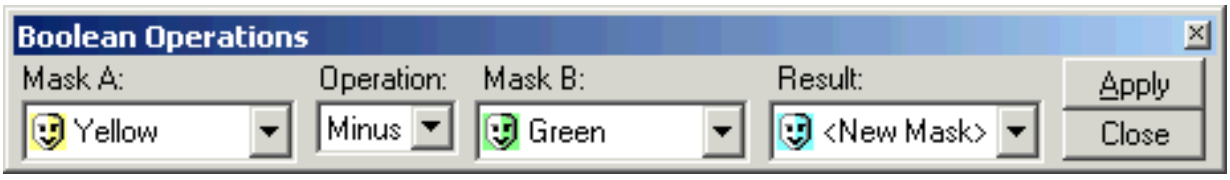


Рис. 2.16. Панель инструментов Булевы операции

В поле Min и Max пороговое значение рентгеновской плотности может быть увеличено или уменьшено с помощью элементов управления. Для сохранения вновь заданных значений выполняется команда Enter.

Для сокращения времени работы с масками при отделении составных компонентов объекта, используют Булевы операции (рис. 2.16).

Все функции ручного редактирования Edit mask (рис. 2.17) осуществляются на активной маске. Можно рисовать, стирать, или восстановить изображение с определенного порогового значения.



Рис. 2.17. Панель ручного редактирования маски

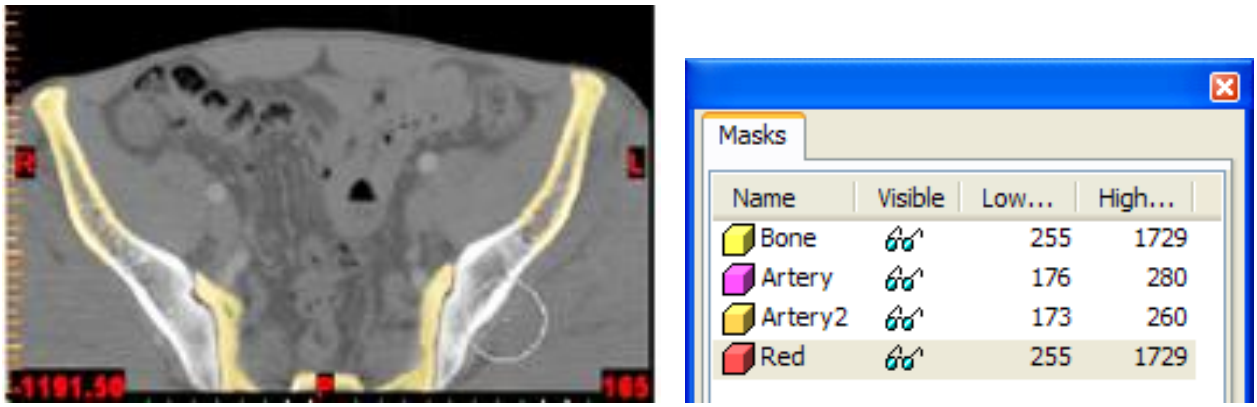
Используют следующие типы курсора редактирования: квадрат, прямоугольник, круг, эллипс или лассо. Размер курсора редактирования может быть изменен в интерактивном режиме. При этом размер файла будет изменяться, если перемещать мышь при нажатии на кнопку Ctrl и на левую кнопку мыши.

Операция Draw позволяет рисовать в активном режиме маски, а операция Erase – стирать в активном режиме маски.

Пример 2.1. Отделение позвонков от тазовой кости

По данным КТ построена исходная маска позвоночника с тазовыми костями (рис. 2.18, *а*).

Задавая диапазон чисел Хаунсфилда для костной ткани создаем маску кости Bone. В интерфейсе панели инструментов Project Management делаем маску Bone активной, выделяя ее, создаем копию Red, используя команду Duplicate (рис. 2.18, *б*).



а *б*

Рис. 2.18. Работа с маской позвоночника с тазовыми костями:
а – маска позвоночника с тазовыми костями; *б* – интерфейс панели Project Management

Воспользуемся инструментом Edit mask для отделения маски позвоночника от тазовых костей. Этот инструмент позволяет редактировать маску, как обычную картинку (рис. 2.19).

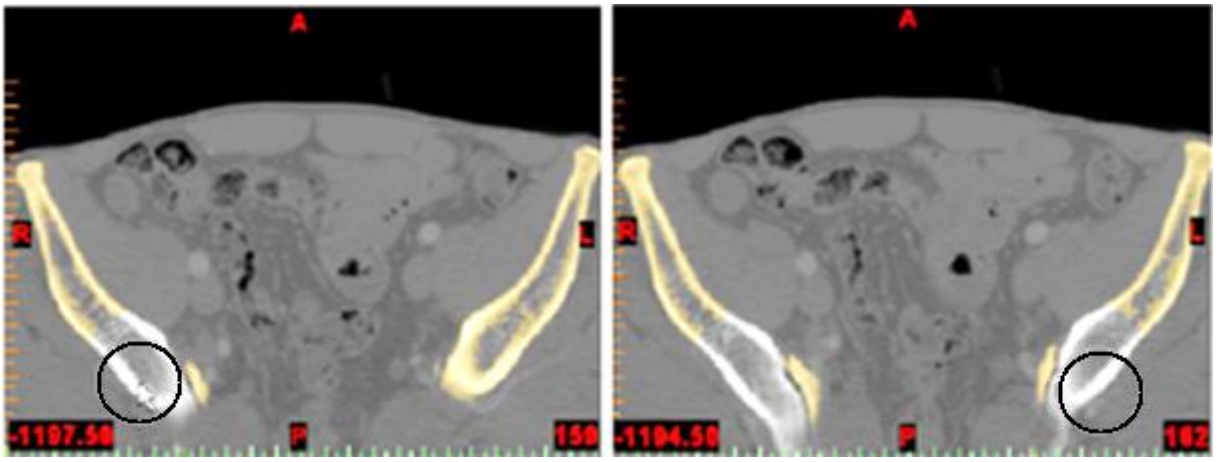


Рис. 2.19. Редактирование маски

После удаления участков позвонка с маски Bone получаем две маски, наложенные друг на друга (Bone – тазовые кости и Red, включающщая позвоночник и тазовые кости). Так как маска Bone исходная, то она будет находиться впереди маски Red.

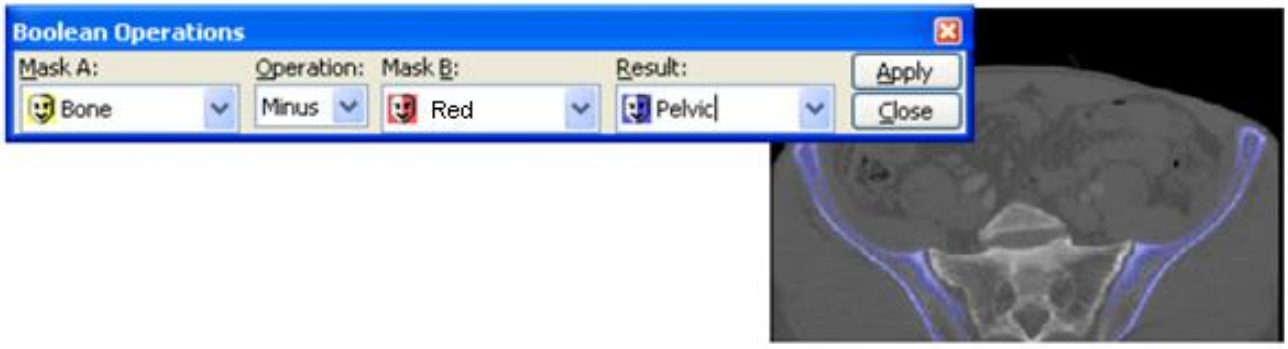


Рис. 2.20. Разделение масок объектов

Чтобы создать маску только из костей таза, используем панель инструментов Boolean operation. На месте Mask A выбираем маску Bone, на месте Mask B выбираем маску Red.

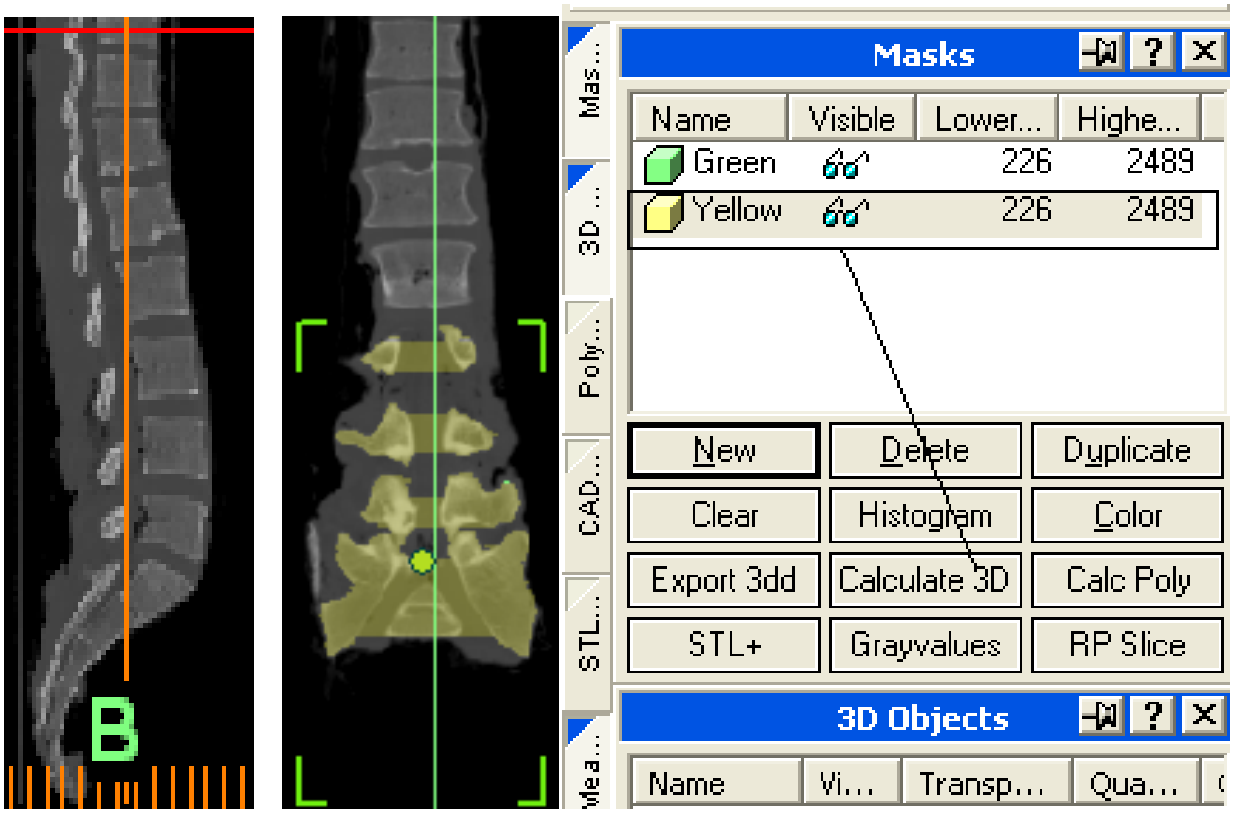
Далее выполняем операцию вычитания одной маски из другой Minus и получаем маску Pelvic (рис. 2.20).

Пример 2.2. Реконструкция модели по маске

Рассмотрим создание трехмерной модели биообъекта на примере позвоночных дисков.

По данным компьютерной томографии было получено 120 срезов с шагом 0,75 мм (рис. 2.21, *а*). Чем меньше шаг компьютерного исследования, тем точнее модель биологического объекта.

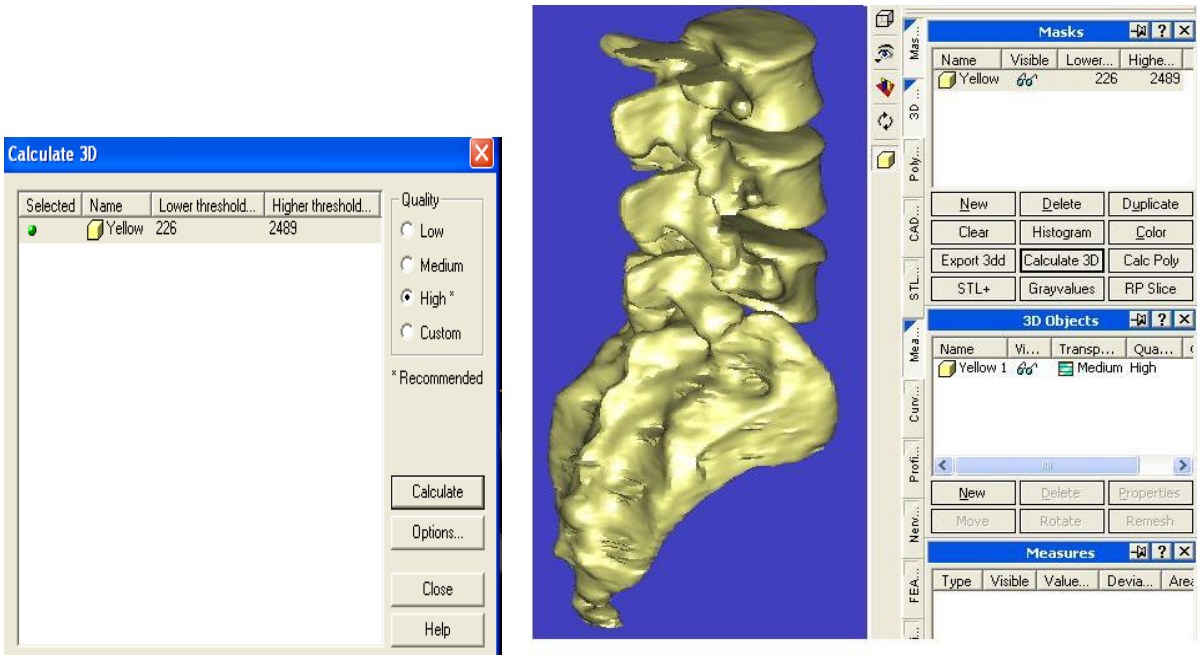
Во вкладке Masks создана маска Yellow (рис. 2.21, *б*).



а *б*

Рис. 2.21. Данные КТ позвоночных дисков
а – КТ позвоночных дисков; *б* – выделение активной маски

Чтобы построить 3D-модель, выделим маску и нажмем находящуюся внизу вкладки кнопку Calculate 3D.



а *б*

Рис. 2.22. Трехмерная модель позвоночника

Далее открываем диалоговое окно Calculate 3D (рис. 2.22, *а*), в котором можно изменить параметр качества построения модели. Последующим нажатием кнопки Calculate создается новая трехмерная модель (рис. 2.22, *б*).

Более высокие значения качества High потребуют несколько большего времени при расчете, но результатом будет более точная 3D-модель.

В этом случае, если строится предварительная модель объекта, достаточно выбрать самый низкий уровень построения Low.

Далее появится окно, которое сообщит, что модель будет состоять из нескольких объектов. Для продолжения построения следует нажать Yes.

Пример 2.3. Построение трехмерной модели, состоящей из нескольких компонентов

По данным КТ строятся маски кортикальной и спонгиозной костной тканей бедренной кости (рис. 2.23).

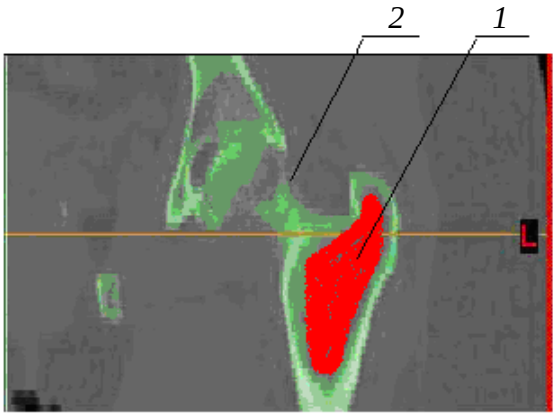


Рис. 2.23. Маски костной ткани:
1 – спонгиозной; *2* – кортикальной

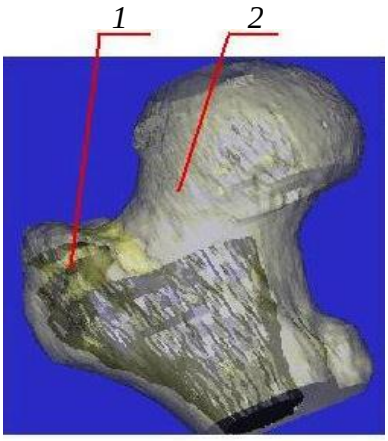


Рис. 2.24. Фрагмент бедренной кости, состоящий:
1 – из кортикальной ткани;
2 – спонгиозной ткани

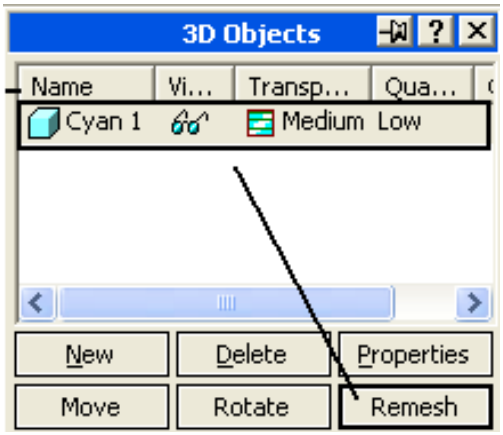


Рис. 2.25. Схема запуска команды Remesh

Эта операция разделения необходима, так как структура костной ткани неоднородна. При построении модели выделяются компоненты с разными диапазонами значений рентгеновской плотности.

После разделения маски с помощью булевых операций построена трехмерная модель, состоящая из двух компонентов (рис. 2.24).

Для выполнения процедуры редуцирования трехмерного объекта и создания

поверхностной сетки необходимо выделить трехмерный объект и нажать кнопку Remesh (рис. 2.25).Процесс преобразования поверхностной сетки состоит из четырех этапов.

Этап 1 – редуцирование (Reduce). Для выполнения этапа необходимо установить следующие параметры (рис. 2.26):

– Reduce Mode – Edge,

– Values – Tolerance = 0.05, Number of Iteration = 5 и Angle = 30 Degrees).

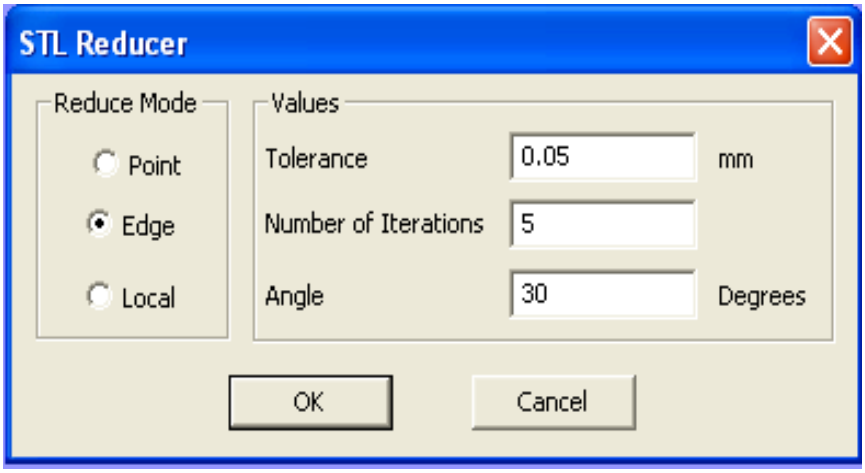


Рис. 2.26. Схема редуцирование объекта

Этап 2 – автоматическая перестройка сетки (Auto Remesh): порог качества поверхности 0,4; максимальная геометрическая ошибка 0,3.

Сохраняется первоначальное качество сетки: число итераций 4; число итераций перемещения 1; максимальная длина ребра 5.

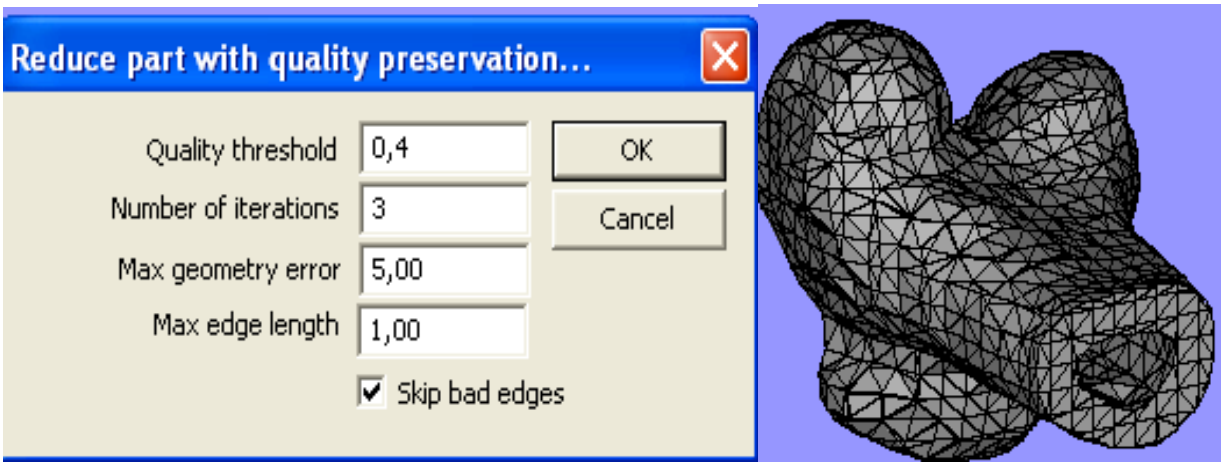


Рис. 2.27. Схема операции удаление треугольников низкого качества

Этап 3 – удаление треугольников с сохранением качества (Quality Preserving Reduce Triangles). Метод ребра: порог качества поверхности 0,4; максимальная геометрическая ошибка 0,3; максимальная длина ребра 5;

число итераций 3. Необходимо пропускать плохие ребра и удалять треугольники низкого качества (рис. 2.27).

Сохранение результатов и импорт в SolidWorks. Перед сохранением результатов необходимо выполнить настройку папок на «разрешение отображения скрытых файлов» в системе Windows: Пуск – Проводник – Сервис – Свойства папки – Вид – Скрытые папки и файлы (показать скрытые файлы и папки).

Чтобы импортировать модель в SolidWorks необходимо выбрать функцию Сохранить изменения и, не закрывая окно Remesh, запустить SolidWorks. В директории C:\Documents and Settings\User\Local Settings\Temp\MimicsTemp_01_52_07 открыть файл temp remesh.stl.

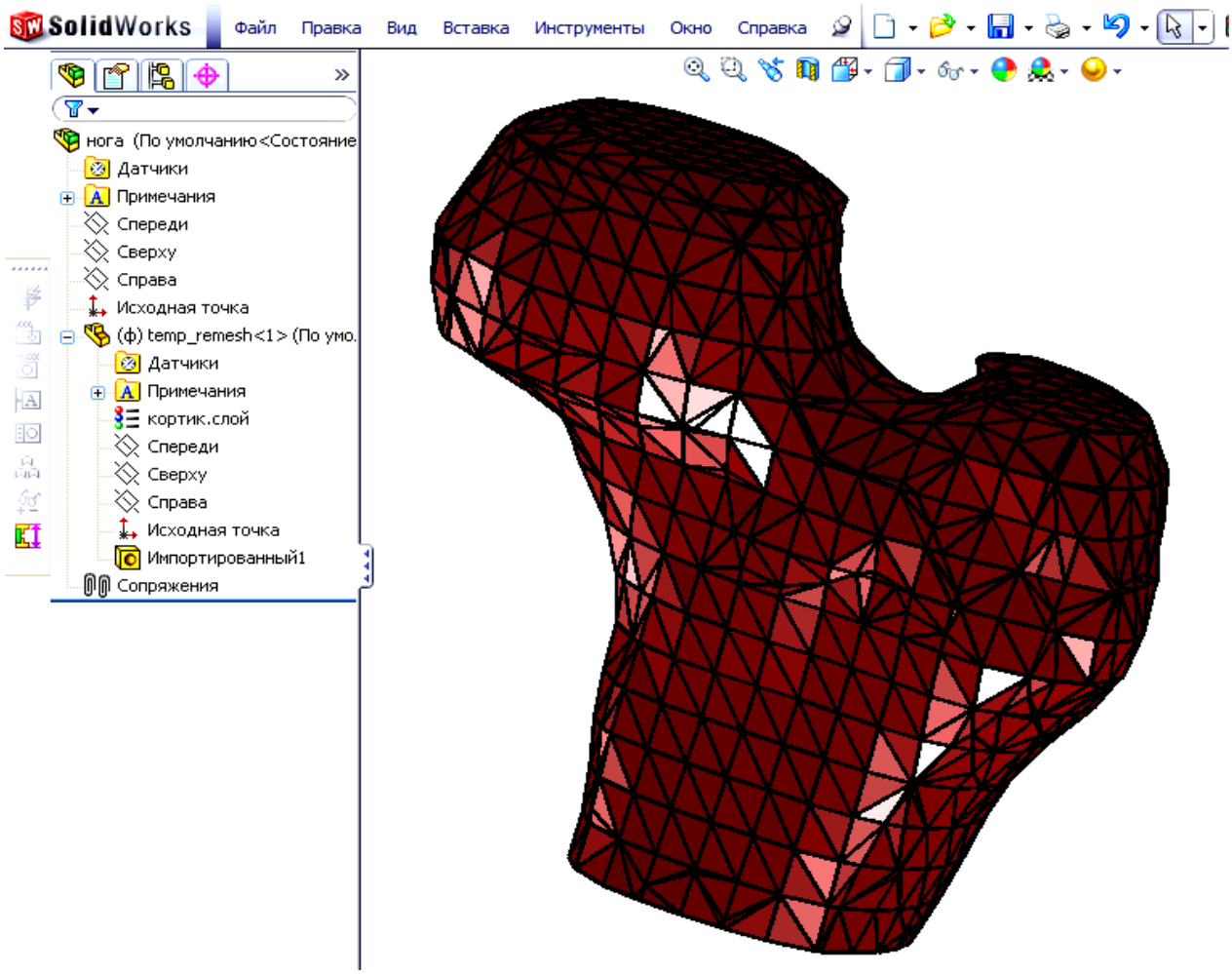


Рис. 2.28. Импорт полученной модели в SolidWorks

После открытия файла в SolidWorks не следует проводить распознавание элементов. Если при открытии файла выводится сообщение, что у импортируемой модели слишком много поверхностей, это означает, что маска отредактирована некорректно.

Иллюстрация открытия импортируемой модели в SolidWorks представлена на рис. 2.28.

Для описания поверхностной геометрической 3D-модели в программе Mimics применен формат STL. Формат STL – формат файла, используемый для хранения трехмерных моделей. Информация об объекте представляет описание треугольников, из которых состоит поверхность объекта.

Основное его достоинство – это простота по сравнению с другими форматами. Формат STL позволяет достаточно точно описать сложную нерегулярную структуру биологического объекта для дальнейшего биомеханического анализа.

Формат STL для описания 3D-модели использует мелкие элементы – треугольники, имеющие форму, далекую от равносторонней. Они не годятся для анализа МКЭ, так как напряжения на одном конце треугольника могут быть значительно выше, чем на другом.

Для анализа биологического объекта методом конечных элементов необходимы элементы – треугольники как можно более близкие по форме к равносторонним. Поэтому после импорта модели в SW для проведения исследования строится своя сетка конечных элементов.

Глава 3. РЕАЛИЗАЦИЯ СТАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ В SOLIDWORKS SIMULATION

3.1. Общие сведения о SolidWorks Simulation

SolidWorks Simulation – это система анализа конструкций, полностью интегрированная с SolidWorks. SolidWorks Simulation обеспечивает анализ напряжения, потери устойчивости, оптимизации, а также частотный и термический анализ на одном экране.

Программное обеспечение использует метод конечных элементов (МКЭ). МКЭ – это численный метод анализа технических конструкций. МКЭ принят в качестве стандартного метода анализа благодаря его универсальности и пригодности для работы на компьютерах. МКЭ делит модель на много малых частей простых форм, называемых элементами, эффективно заменяющими сложную задачу несколькими простыми, которые необходимо решить совместно. Элементы имеют общие точки, называемые узлами. Процесс деления модели на малые части называется созданием сетки. Поведение

каждого элемента по всем возможным сценариям опоры и нагрузки хорошо известно. Метод конечных элементов использует элементы различных форм.

Реакция в любой точке элемента интерполируется из реакции узлов элементов. Каждый узел полностью описывается рядом параметров, зависящих от типа анализа и используемого элемента. Например, температура узла полностью описывает его реакцию в термическом анализе. Для расчетов конструкции реакция узла представляется тремя перемещениями и тремя вращениями. Они называются степенями свободы (DOF). Анализ с использованием МКЭ называется анализом конечных элементов (FEA).

Если панели инструментов нет, ее надо добавить через Настройки/Добавления. После добавления появляется вкладка Simulation (рис. 3.1).

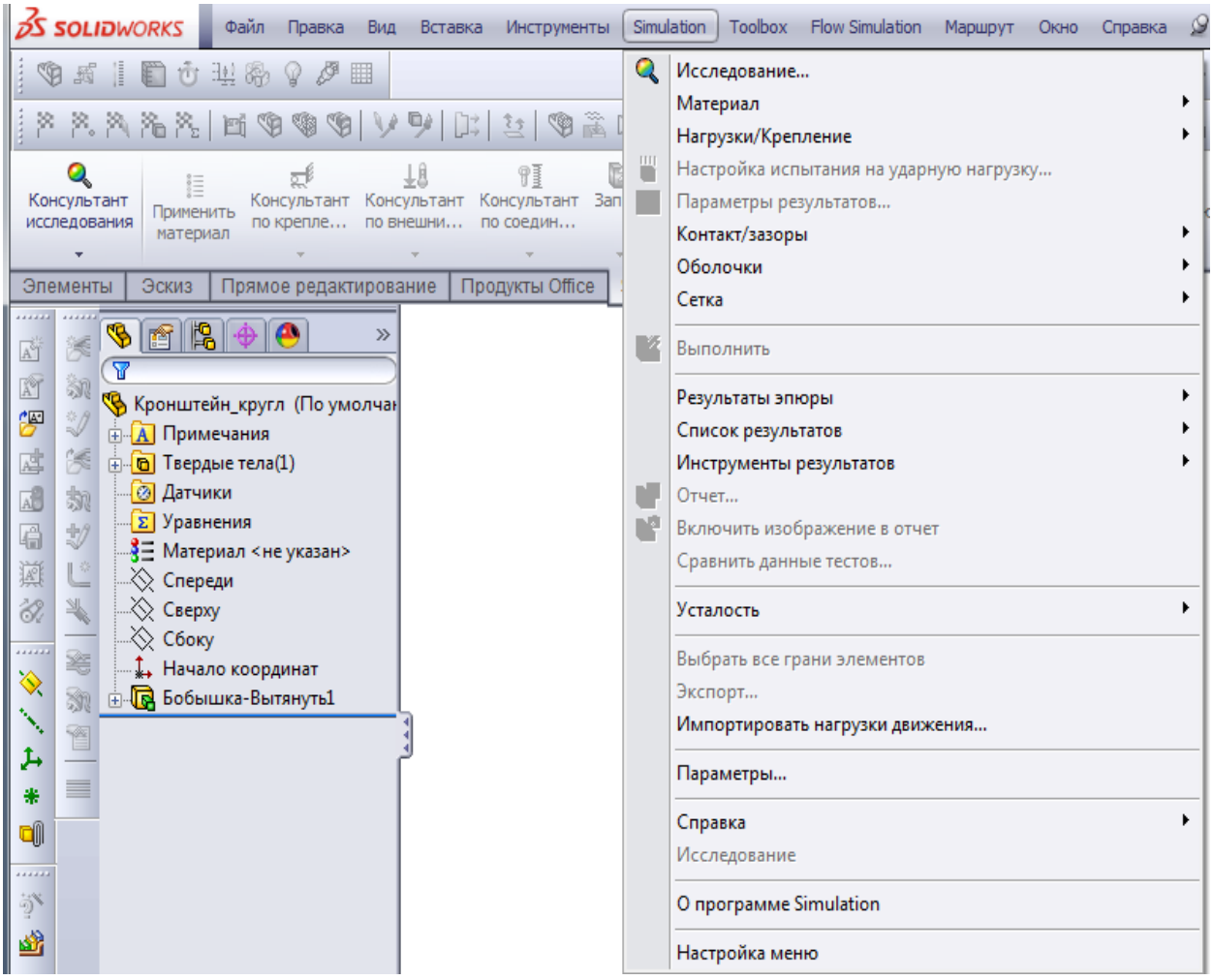


Рис. 3.1. Вкладка Simulation

Дерево исследования Simulation схоже с деревом Менеджера свойств. Можно использовать систему меню или Дерево исследования Simulation, чтобы управлять аналитическими исследованиями. Дерево исследования Simulation более предпочтительно, чем система меню, поскольку оно облада-

ет интуитивным представлением и системой контекстного меню для правой кнопки мыши.

Программа создает вкладку внизу графической области для каждого исследования. Чтобы просмотреть или изменить параметры исследования, можно переключаться в процессе работы между вкладками исследований Simulation. Программа присваивает уникальный значок каждому типу исследования для легкой идентификации типа исследования.

Подпапки определяют параметры исследования. Например, каждое исследование конструкции имеет внутренние папки: Крепления, Внешние нагрузки и Соединения. Определение нагрузки появится в папке Внешние нагрузки, определение ограничения появятся в папке Крепления и определение контакта появится в папке Соединения. Крепления, нагрузки и соединители можно группировать в папках.

Контекстные меню для правой кнопки мыши предоставляют контекстные параметры. Перетаскивание и размещение (или копирование и вставка) и дублирование помогут быстро определить последующие исследования.

Дерево исследования Simulation обеспечивает удобный просмотр наиболее важной информации аналитических исследований в документе.

Исследование моделирования определяется следующими факторами: 1) размеры модели, 2) тип исследования и связанные параметры для определения назначения анализа, 3) свойства материала, 4) нагрузки и граничные условия.

Чтобы начать решение необходимо нажать кнопку Новое исследование. Откроется диалоговое окно Исследование (рис. 3.2). Определите имя исследования, тип анализа и свойства. Свойства исследования задают параметры, связанные с конкретным типом анализа.

Программа автоматически назначает необходимый тип сетки для тел на основе элементов их геометрии. Для всех твердотельных моделей создается сетка с твердотельными тетраэдральными элементами.

Для удобства работы в программе есть быстрые советы и консультант. Быстрые советы являются набором всплывающих сообщений, которые появляются во время определения исследований. Эти сообщения дают советы и направляют при определении исследования, его запуске и просмотре результатов. Большинство сообщений имеют гиперссылки. Нажмите на гиперссылку, чтобы увидеть соответствующий элемент интерфейса пользователя. Для

запуска Быстрых советов нажмите Справка/Быстрые советы. Консультант Simulation помогает выбрать тип исследования, определить нагрузки, крепления, соединения и объяснения результатов. Количество шагов, необходимых для выполнения анализа, зависит от типа исследования.

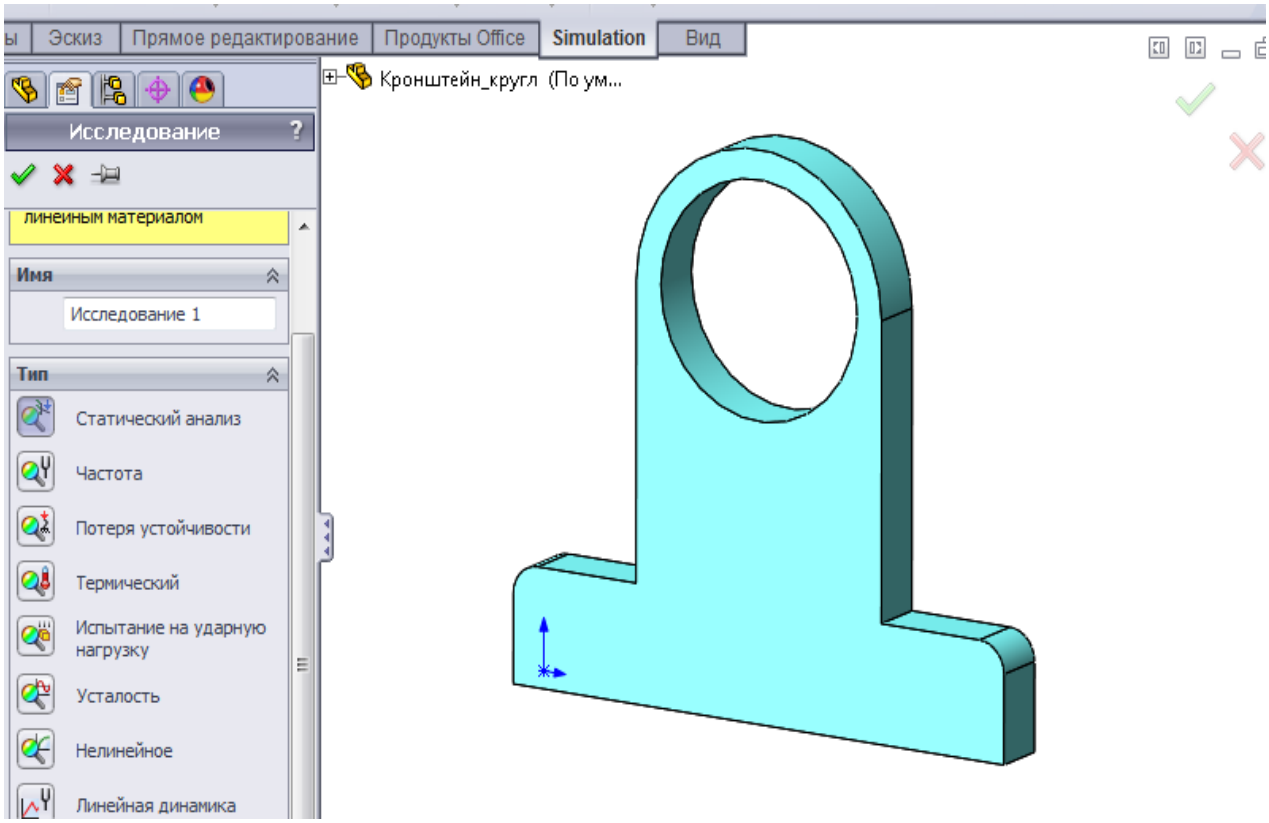


Рис. 3.2. Запуск исследования

Для завершения исследования выполните следующие шаги:

1. Создайте исследование, определяя тип анализа и его параметры. При необходимости определите параметры исследования. Параметром может быть размер модели, свойства материала, значение силы или любое другое вводимое значение.

2. Определите свойства материала. Этот шаг не обязателен, если свойства материала были определены при построении модели. Исследования усталости материала и оптимизации используют справочные исследования для определения материала.

3. Задайте ограничения и нагрузки. Исследования усталости материала и оптимизации используют справочные исследования по ограничениям и предельным нагрузкам. Исследования на ударную нагрузку позволяют определять ограничения и предельные нагрузки только по заданным при установке параметрам.

4. Определите контакт компонентов и наборы контактов.

5. Создайте сетку.

6. Запустите исследование.

7. Просмотрите результаты.

Можно определять свойства материала, нагрузки, ограничения и создавать сетку в любом порядке. Однако следует определить все необходимые параметры ввода перед запуском исследования.

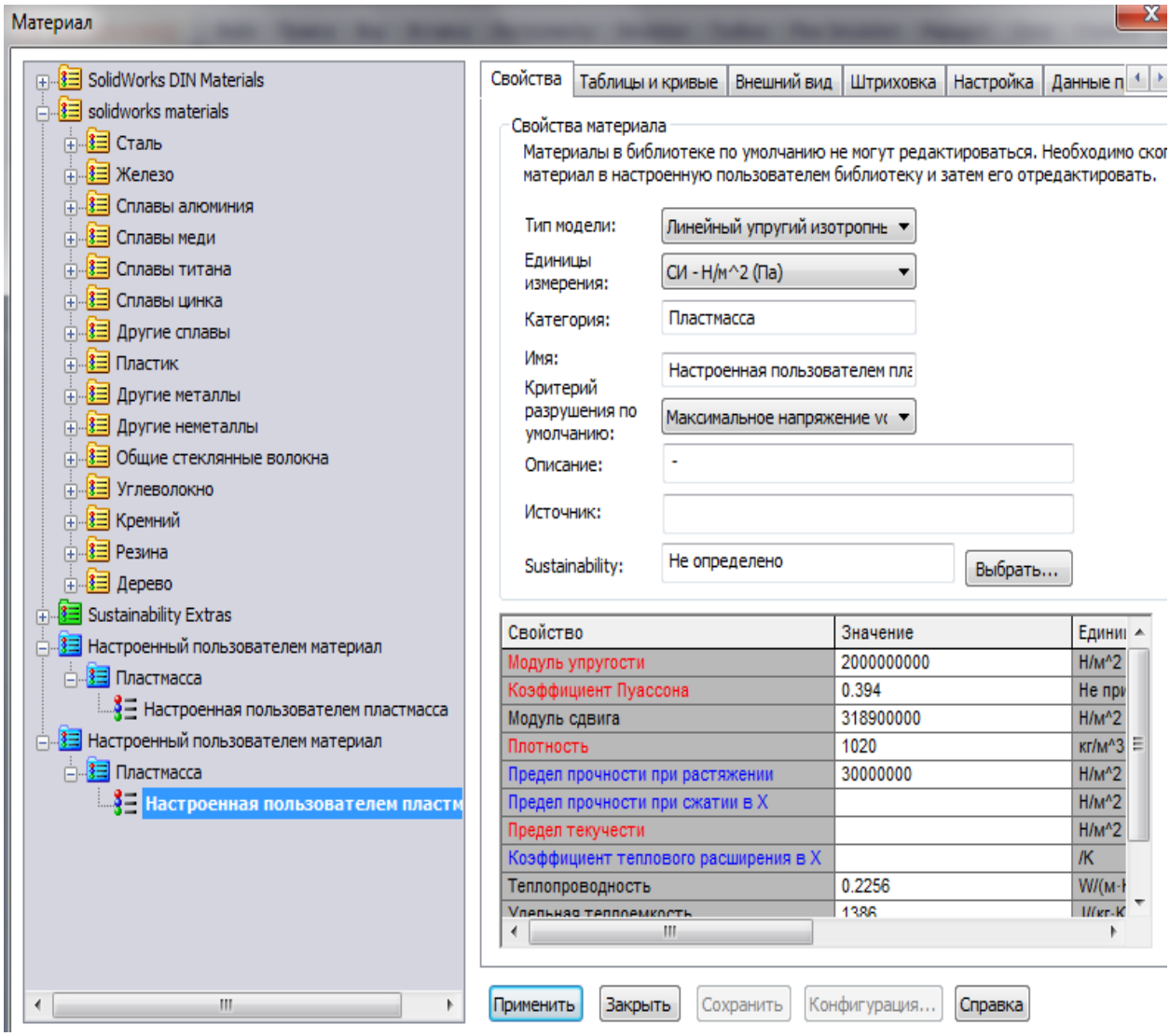


Рис. 3.3. Определение свойств материала

Прежде чем запустить исследование, необходимо определить все свойства материала, запрашиваемые соответствующим типом анализа и определенной моделью материала. Модель материала описывает его поведение и определяет требуемые свойства. Линейные изотропные и ортотропные модели материала доступны для всех конструкционных и термических исследований. Свойства материала могут быть также заданы в качестве функции температуры.

В диалоговом окне Материал выделяются обязательные и необязательные свойства (рис. 3.3). Описание красным цветом указывает, что свойство является обязательным на основе типа активного исследования и модели материала. Описание синим цветом указывает, что свойство не обязательно. В сборках твердых тел каждый компонент может иметь различный материал.

Существует три способа определить свойства материала:

1. Использовать материалы, назначенные деталям в системе при моделировании.

2. Выбрать материал из библиотек материалов по умолчанию или из любой библиотеки материалов, определенной пользователем.

3. Указать значения требуемых свойств вручную.

Крепления и нагрузки определяют условия среды модели. Каждое условие ограничения или нагрузки представлено значком в Дереве исследования Simulation. Программа предоставляет контекстные параметры для определения ограничений. Например, если все выбранные поверхности являются цилиндрическими или выбрана координатная ось, программа ожидает от пользователя определения радиальных, окружных и осевых ограничений.

Нагрузки и крепления полностью ассоциативны и автоматически подстраиваются под изменения формы. Функциональные возможности Перетащить и Вставить в Дереве исследования Simulation позволяют скопировать исследования, папки и элементы.

Соединитель имитирует поведение устройства, не требуя создания подробных форм. Программа позволяет определить жесткий и пружинный, штифт, болтовые соединители упругого основания, а также соединители сварных точек и подшипниковые соединители. Такие соединители встречаются во многих конструкциях реальной жизни.

Крепления, нагрузки и соединители можно группировать в папках. Нажмите правой кнопкой мыши на Соединения, Крепления или Внешние нагрузки в Дереве исследования Simulation и выберите Создать новую папку. Перетащите соответствующие соединения, крепления или внешние нагрузки в папку или нажмите правой кнопкой мыши на имя папки и выберите объект, чтобы создать его в папке.

Задание направлений часто необходимо во время уточнения модели и просмотра результатов. При определении модели используются направления для уточнения ортотропных свойств материала, ограничений и нагрузок. При просмотре результатов необходимы направления для просмотра таких ре-

зультатов, как перемещения, напряжения, нагрузки и тепловой поток в некоторых направлениях.

Применяя нагрузки, используйте Менеджер свойств для выявления направлений. Используйте отрицательные значения для противоположных направлений. В сборке пользователь может использовать справочную геометрию из сборки, компонентов с внешними ссылками или узлов сборки.

Систему координат определяют 3 направления: *x*, *y* и *z*. Система координат по умолчанию используемая программным обеспечением, называется глобальной системой и основывается на Плоскости1. Начало координат глобальной системы координат находятся в начале координат детали или сборки. Плоскость1 – это верхняя справочная плоскость, которая отображается в дереве конструирования Менеджера свойств и может иметь другое имя. Справочная система координат показывает глобальные *x*-, *y*- и *z*-направления. Все остальные системы координат рассматриваются как локальные координатные системы.

Справочная ось определяет радиальное, окружное и осевое направления. При определении перемещения вдоль окружности задайте угол (Θ) в градусах. Это устанавливает линейное перемещение в направлении по окружности (*v*) при: $v = r \cdot \Theta \cdot \pi/180$, где r – радиус узла, на который распространяется ограничение, соответствующее справочной оси. Можно использовать ось цилиндрической грани в качестве справочной.

После выбора материалов, определения нагрузок и ограничений и создания сетки модели можно запустить исследование для расчета результатов. Если запустить исследование перед созданием его сетки, программное обеспечение создаст сетку модели и запустит исследование.

Для запуска исследования нажмите правой кнопкой мыши его значок в Дереве исследования Simulation и выберите Запустить или нажмите Запустить на основной панели инструментов Simulation.

Теперь при запуске одного или нескольких исследований Simulation они могут работать в фоновом режиме. По завершении сеанса SolidWorks исследование Simulation выполняется в фоновом режиме. По завершении исследования Simulation результаты сохраняются в отведенном для этого каталоге. Можно запустить все исследования. Для этого в диспетчере команд Simulation выберите Запустить все исследования. Для просмотра состояния запущенного исследования Simulation можно навести указатель на соответствующую вкладку.

Программа предлагает различные решающие программы для наиболее эффективной обработки задач различных типов и размеров. Решающие программы используют новую технологию решения больших систем совместных уравнений для сокращения времени решения, требуемой памяти и места на диске.

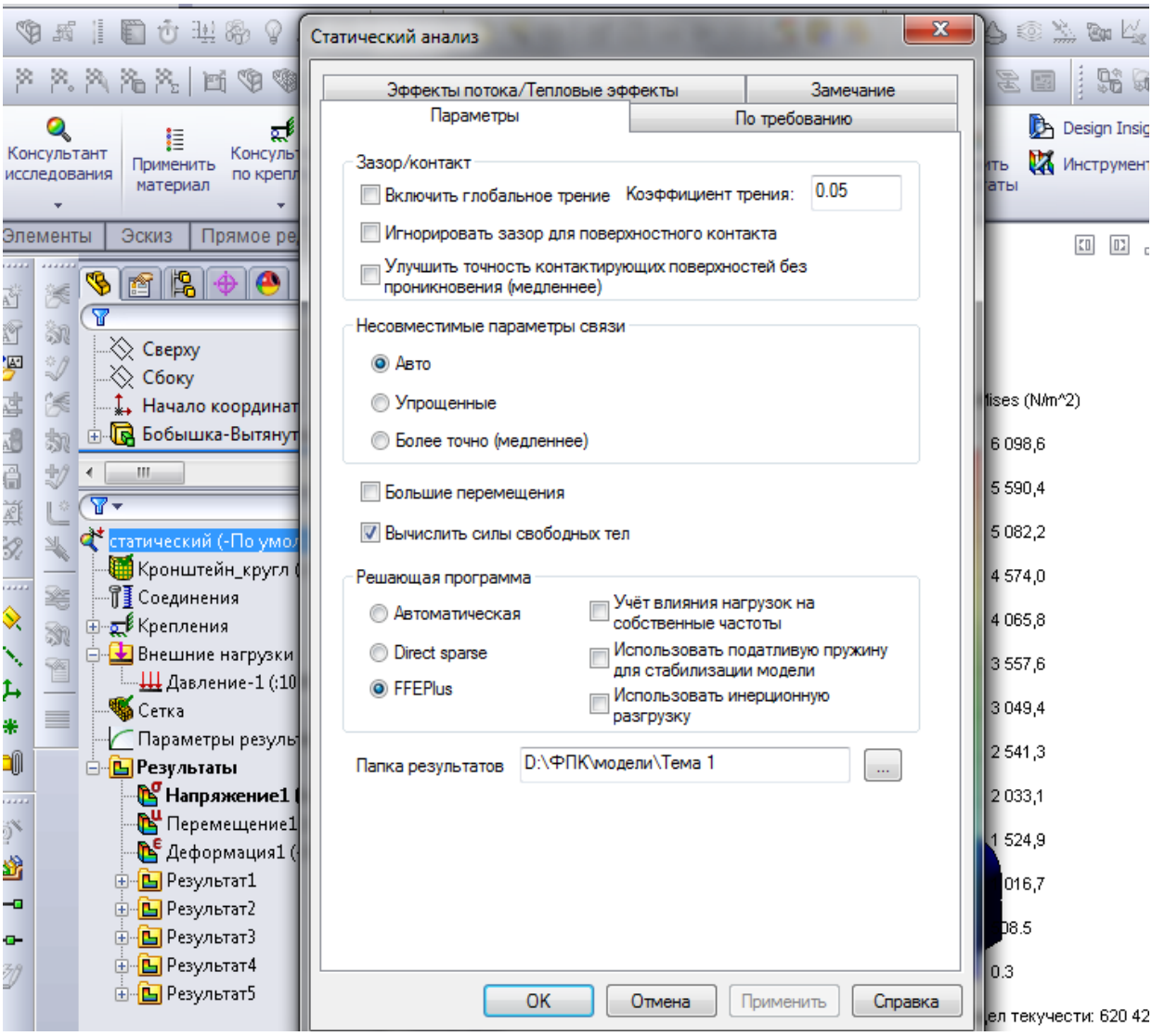


Рис. 3.4. Выбор решающей программы

Программа предлагает следующие варианты решения (рис. 3.4):

1. *Автоматически*. Программа автоматически выбирает решающую программу Direct sparse или FFEPlus.

2. Решающая программа Direct sparse.

3. Решающая программа FFEPlus (итеративная).

Следует выбирать решающую программу при определении свойств исследования. Обе решающие программы должны дать одинаковые ответы при условии, что использована одна сетка. Однако производительность и ско-

рость будут меняться и зависят от типа и размера задачи. Решающая программа FFEPlus особенно эффективна для больших задач (более 300000 степеней свободы).

Окно Статус решающей программы отображается при запуске исследования. Кроме данных о состоянии оно отображает: 1) использование памяти, 2) время решения, 3) данные об исследовании (степени свободы, число узлов, число элементов), 4) данные о решающей программе, например, тип решающей программы, 5) предупреждение.

Все статические исследования, использующие решающую программу FFEPlus (итеративную), дают возможность доступа к графику сходимости и параметрам решающей программы. График сходимости помогает визуализировать процесс сходимости решения. Параметры решающей программы помогают манипулировать итерациями решающей программы для улучшения точности или скорости получения менее точных результатов. Можно использовать существующие значения решающей программы или изменить максимальное допустимое число итераций и ограничивающий порог. Чтобы улучшить точность, уменьшите значение порога остановки. В ситуациях с медленной сходимостью можно увеличить скорость с менее точными результатами увеличением значения порога остановки или уменьшения максимального числа итераций.

После запуска анализа можно просматривать сообщения решающей программы, щелкнув правой кнопкой мыши папку Результаты и выбрав Сообщения решающей программы. Типы сообщений: количество узлов, время решения, ошибки, предупреждения и т. д. Заметим, что это те же самые сообщения, что появляются в окне во время анализа.

После запуска анализа программное обеспечение создает эпюры результатов, настраиваемые по умолчанию (рис. 3.5). Можно просматривать эпюру при двойном нажатии ее значка в Дереве исследования Simulation.

Можно также определить другие эпюры, щелкнув правой кнопкой мыши на папке результатов и выбрав команду Определить. При определении эпюры можно использовать справочные системы координат. Например, можно просматривать радиальные и касательные напряжения, выбирая ось при определении эпюры напряжений. Можно связывать эпюры результатов с именованными видами.

Инструменты для просмотра результатов включают в себя: 1) окаймляющие эпюры, 2) эпюры сечений, 3) изоповерхности, 4) анимации,

5) зондирование, 6) виды с разнесенными частями. Для эпюр сечений можно выбрать плоские, цилиндрические и/или сферические секущие инструменты. Утилита Ограничение предназначена для удобного просмотра сечений и эпюр изоповерхностей.

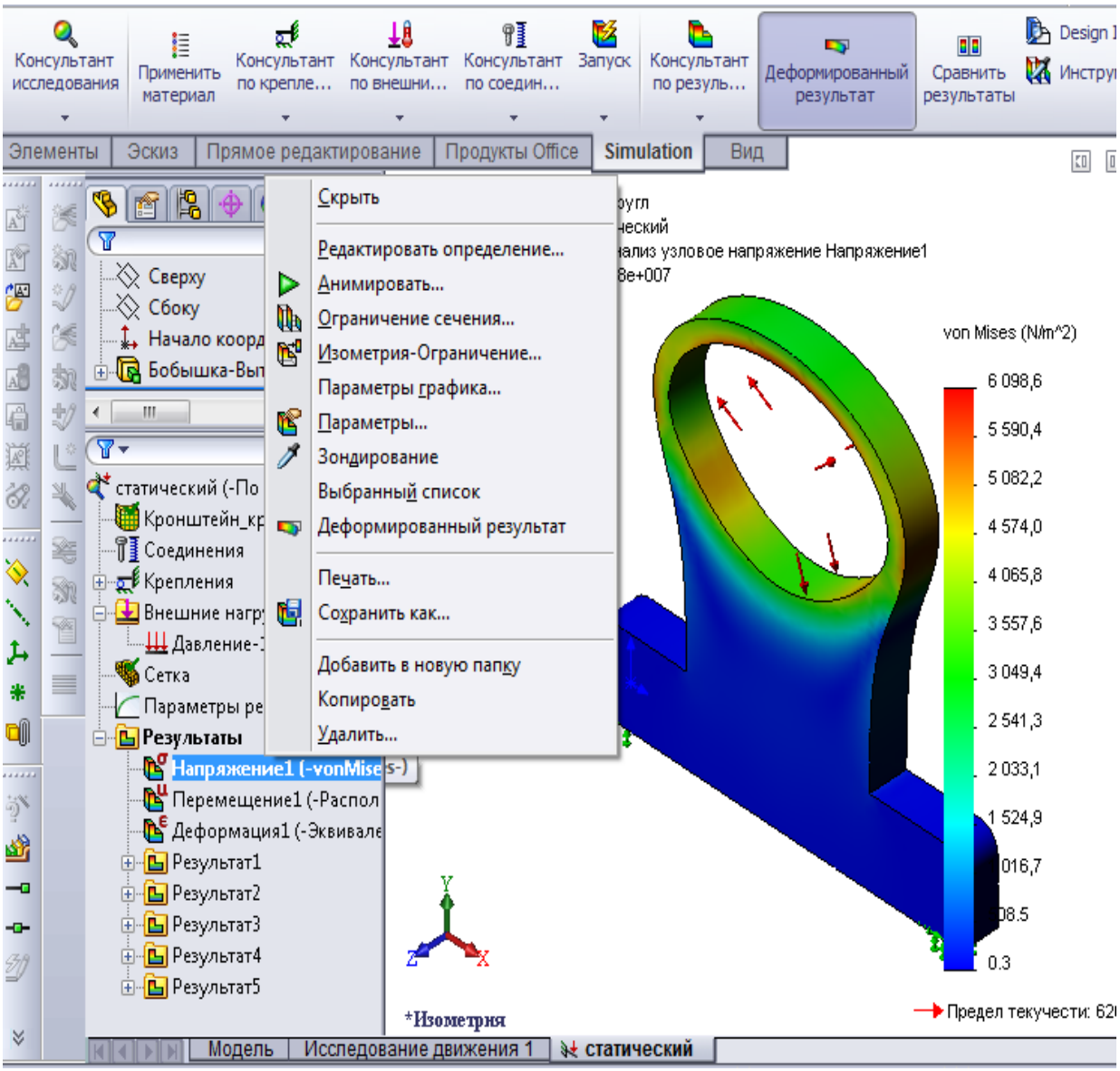


Рис. 3.5. Настройка эпюры напряжений

Возможно создание структурного отчета, который автоматически включает в себя все доступные эпюры. Помощник для отчетов направляет вас при редактировании отчета и включении в него эпюр результатов. Чтобы запустить Помощника для отчетов нажмите правой кнопкой мыши папку Отчет и выберите строку Определить.

Возможно сохранять эпюры результатов в форматах eDrawing, bitmap, JPEG, VRML, XGL и ZGL. Можно сохранять анимации в формате видео-

файлов AVI. Можно автоматически включать эпюры результатов в отчет исследования. Чтобы сохранить эпюру в любом из этих форматов, нажмите правой кнопкой мыши значок эпюры и выберите Сохранить как. Чтобы сохранить все эпюры в формате JPEG, выберите параметр Автоматически сохранять все эпюры в JPEG -файлах в диалоговом окне Отчет.

Функция Что неверно? позволяет вам просматривать ошибки и предупреждения в текущем состоянии исследования Simulation. Для отображения ошибок и предупреждений с помощью функции Что неверно?, в дереве исследования Simulation нажмите правой кнопкой мыши значок исследования со значком ошибки и выберите Что неверно?. Если имеется ошибка, ее необходимо исправить, чтобы запустить исследование. Если имеется предупреждение, касающееся элемента, вы можете запустить исследование или просмотреть существующие результаты.

При статических исследованиях помощник расчета запаса прочности пошагово направляет оператора в оценке прочности конструкции на основании выбранных критериев разрушения. Он вычисляет запас прочности всей модели, основываясь на следующих критериях:

– максимального напряжения по Мизесу;

– максимального напряжения сдвига;

– напряжения Мора-Кулона;

– максимального напряжения по нормали.

3.2. Интерфейс SolidWorks Simulation

В графической области отображаются:

1) условные обозначения определенных нагрузок и граничных условий, а также параметры сетки;

2) эпюры, представляющие нагрузку, напряжение, деформацию, резонансные частоты и т. д. Возможно разделение графической области для отображения нескольких результатов одновременно;

3) символы, представляющие нагрузки, крепления, соединители, параметры сетки.

Условные обозначения – это заполненные текстом окна, которые появляются в графической области, когда используются определенные инструменты. Можно перетаскивать условные обозначения в необходимое место. Можно отредактировать значения, показанные в условных обозначениях, для изменения воздействия нагрузки или граничного условия.

При добавлении нагрузки, ограничения или других элементов управления программное обеспечение добавляет символы к модели (рис. 3.6). Можно дважды щелкнуть эти символы, чтобы получить доступ к Менеджеру свойств для осуществления управления.

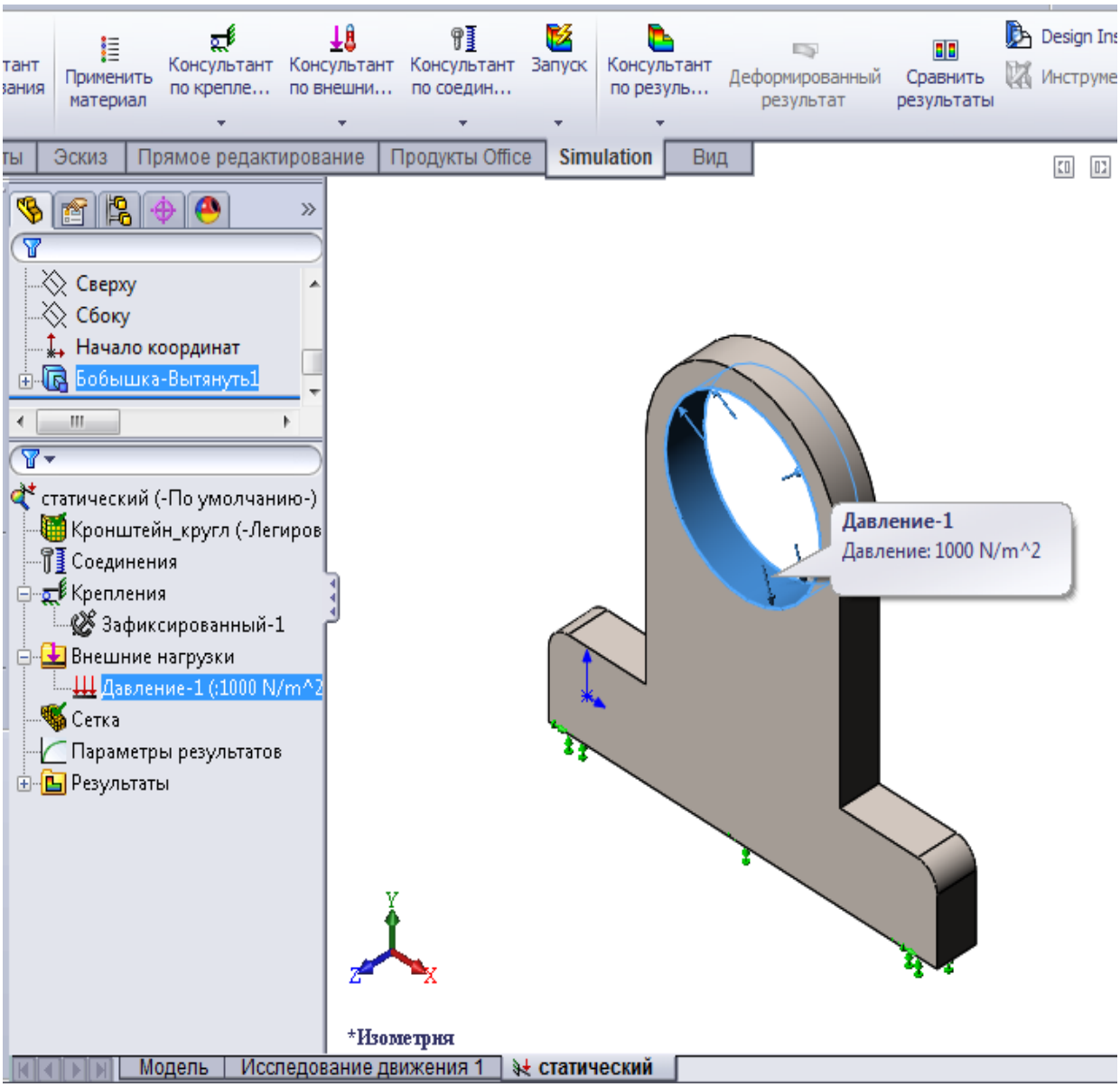


Рис. 3.6. Обозначение нагрузки на модели

Возможно скрывать или отображать символы в графической области, щелкнув правой кнопкой мыши элемент управления в Дереве исследования Simulation. Чтобы скрыть все нагрузки, крепления или соединения, нажмите правой кнопкой мыши Внешние нагрузки, Крепления или Соединения, соответственно, и выберите Скрыть все.

Чтобы скрыть или отобразить все условные обозначения сразу, выполните одно из следующих действий:

1) выберите Скрыть/отобразить элементы (панель инструментов Управляемый просмотр) или выберите и очистите параметр Просмотр условных обозначений Simulation.

2) нажмите Вид/Условные обозначения Simulation. При наведении курсора на эти символы Simulation программа отображает подробную информацию об элементе.

Дерево исследования Simulation является предпочтительным параметром интерфейса, благодаря его компактному интуитивному представлению исследований конструкции и контекстным меню для правой кнопки мыши. Все факторы, определяющие исследование, представлены значками подпапок или элементов. Перетаскивание, размещение (или копирование и вставка) и дублирование помогут быстро определить несколько исследований.

Дерево исследования Simulation помогает:

1. Определять и осуществлять управление сценариями проектирования.

2. Получать доступ к соответствующим параметрам, щелкнув правой кнопкой мыши на значке папки или элемента.

3. Крепления, нагрузки и соединители можно группировать в папках.

4. Устанавливать материалы и прикладывать нагрузки и ограничения.

5. Определять глобальные и локальные условия контакта.

6. Устанавливать параметры сетки, определять управление и создавать модель сетки.

7. Запускать анализ и экспортировать модель конечных элементов.

8. Создавать элементы результата и управлять их настройками.

9. Фильтровать дерево исследований Simulation.

10. Переименовать элемент, дважды щелкнув через паузу по его названию.

11. Просмотреть или изменить определение элемента, щелкнув правой кнопкой мыши его значок в Дереве исследования Simulation и выбрав Редактировать определение.

12. Редактировать общие данные для соединителей одного типа.

13. Сохранять изображения, анимировать и создавать отчеты исследования.

После успешного исследования программное обеспечение создает эпюры результатов в папке Результаты, которая записывает параметры результатов или обновляет существующие эпюры результатов.

Инструмент Фильтр в верхней части Дерева исследования Simulation можно использовать для фильтрации отображаемых в дереве элементов. Например, можно использовать фильтр:

– для текстовых значений в Дереве исследования Simulation (имена деталей, материалы и значения);

– типов креплений (неподвижные, на плоской грани и симметричные);

– эпюр результатов (напряжение, смещение, температура).

Также можно отфильтровать графический вид для отображения только отфильтрованных результатов.

Чтобы отфильтровать Дерево исследований Simulation в верхней его части в поле фильтра введите ключевое слово для отображения желаемых объектов. Чтобы заново отобразить все элементы закройте фильтр.

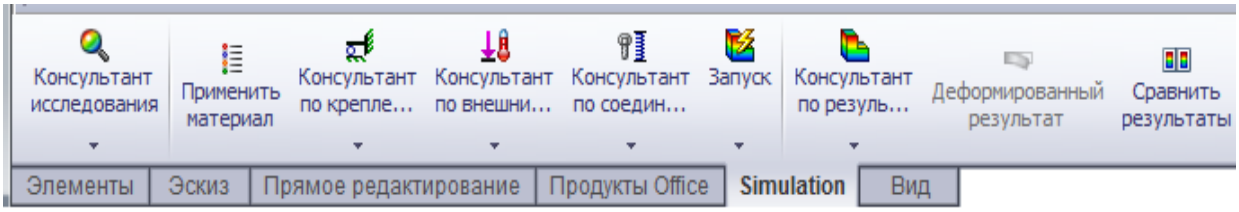


Рис. 3.7. Панели инструментов Simulation

Панели инструментов Simulation предоставляют «горячие» клавиши для часто используемых операций. Можно настроить панели инструментов, добавляя кнопки, скрывая или перемещая их. Поведение идентично панелям инструментов в SolidWorks (рис. 3.7).

Кроме того, можно использовать Simulation Command Manager (Диспетчер команд). Программа делает доступными кнопки на основании состояния и типа аналитического исследования. Например, инструмент Термический анализ доступен во всплывающей панели инструментов Инструменты результатов только после запуска термического исследования.

Можно вводить выражения в поля, допускающие ввод числовых значений. Например, чтобы использовать компонент результирующей силы в 50 Н, ориентированный под углом 30° к выбранному направлению, введите 50 cos (pi/6) для параметра Сила в поле Сила/Вращающий момент в окне Внешние нагрузки. Чтобы уменьшить параметрическое значение плотности 7800 кг/м^3 на одну треть, введите 7800/3 для параметра Значение пользователя в диалоговом окне Добавить параметры.

Программа поддерживает условия контакта для статических исследований сборок (рис. 3.8). При необходимости можно учитывать воздействие

трения между контактирующими поверхностями. Значок Соединения появится в Дереве исследования Simulation. Параметры Наборы контактов и Контакт компонентов относятся к параметрам, связанным с контактом.

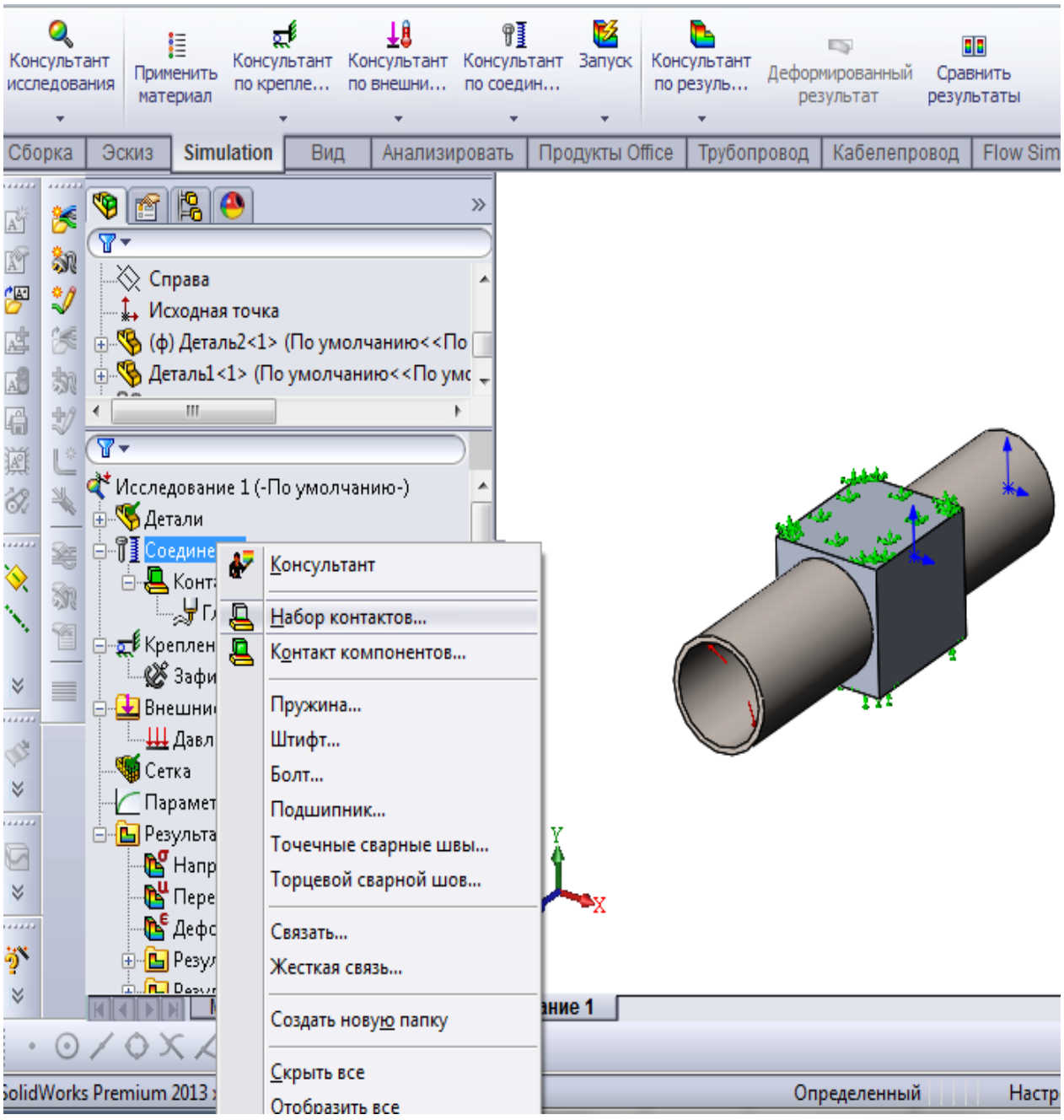


Рис. 3.8. Определение соединения компонентов

Исследования, учитывающие условия контакта, требуют более длительного времени решения, чем подобные задачи без условий контакта. При активном флажке большого перемещения в свойствах статического исследования потребуется дополнительное время в связи с тем, что нагрузка увеличивается постепенно.

По умолчанию программное обеспечение предполагает, что компоненты сборки соединены своими контактирующими границами. Интерфейс пользователя предоставляет общие, компонентные и местные параметры для определения условий контакта. Глобальные настройки применяются в случае, когда не определены ни местные, ни компонентные настройки. Компонентные настройки применяются до тех пор, пока не заданы местные настройки.

Условие контакта местной поверхности (грань к грани) позволяет смоделировать сопротивление термического контакта для термических исследований.

Условие контакта при плотной посадке необходимо для моделирования задач плотной посадки. Условия контакта представлены сеткой. Изменение условий контакта требует повторного создания сетки модели.

Глава 4. АЛГОРИТМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ И БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В ДИНАМИКЕ

Если упругую систему вывести из равновесия ударом или внезапным приложением силы, то силы упругости системы в новом положении уже не будут уравновешиваться нагрузкой, и возникнут колебания.

Конструкция может быть описана системой с одной, двумя или большим числом степеней свободы. Под числом степеней свободы понимают число независимых параметров, однозначно определяющих положение системы в данный момент времени. Любая конструкция содержит бесконечное число материальных точек и, следовательно, имеет бесконечное число степеней свободы. Стержень с распределенной массой представляет собой систему с бесконечным числом степеней свободы.

4.1. Основные сведения

Собственные частоты колебаний являются обобщенными приведенными параметрами динамической расчетной схемы. Определение собственных частот колебаний – важная задача. Изделия при эксплуатации испытывают воздействие различных вынуждающих сил, переменных во времени, не зависящих от состояния системы и поддерживающих ее колебания. При совпадении или относительной близости собственных частот колебаний и частот вынуждающих сил появляются резонансные эффекты.

Возбуждение колебаний может быть 1) силовым, если вибрации возбуждаются вынуждающими силами, 2) кинематическим, если они возбужда-

ются сообщением точкам системы заданных движений, не зависящих от состояния системы, 3) параметрическим, если колебания возбуждаются не зависящим от состояния системы изменением во времени одного или нескольких ее параметров (массы, массового момента инерции, коэффициента жесткости, коэффициента сопротивления).

Запуск частотного анализа выполняется следующей последовательностью команд: Продукты Office – SolidWorks Office – CosmosWorks Designer – Панель Simulation – Новое исследование – Частотное исследование.

При проведении частотного исследования необходимо выполнить следующее: 1) задать в свойствах исследования количество частот для расчета, 2) определить материал для каждого элемента конструкции, 3) ввести ограничения по перемещению, 4) создать сетку модели и запустить исследование.

Для просмотра результатов исследований необходимо нажать правой кнопкой мыши на папку Результаты и вывести результаты расчета Эпюры перемещений или Список резонансных частот.

Пример 4.1. Расчет собственной частоты колебаний плоского диска

Геометрические параметры диска: диаметр диска D = 100 мм, толщина диска h = 5 мм. Материал диска сталь углеродистая плотность материала $\rho = 7800$ кг/м^3; модуль нормальной упругости $E = 2{,}1 \cdot 10^{11}$ Па. Расчетная схема диска, закрепленного по наружному контуру, представлена на рис. 4.1. Выполнив операции, указанные ранее, определим величину низшей частоты собственных колебаний диска f = 9283,8 Гц.

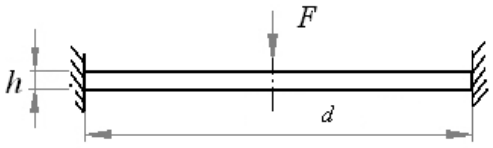


Рис. 4.1. Расчетная схема диска

Пример 4.2. Расчет трех низших собственных частот колебаний плоской прямоугольной пластины и перемещений на резонансной частоте 100 Гц

Геометрические параметры пластины: длина a = 100 мм, ширина b = 30 мм, толщина h = 5 мм. Материал пластины титан: плотность материала $\rho = 4600$ кг/м^3; модуль нормальной упругости $E = 2{,}1 \cdot 10^{11}$ Па. Расчетная схема закрепленной пластины, представлена на рис. 4.2.



Рис. 4.2. Расчетная схема плоской пластины

Результат расчета:

1) низшие собственные частоты колебания соответственно равны: f_1 = 400,48 Гц, f_2 = 2232,4 Гц, f_3 = 2476 Гц. Эпюры перемещения на каждой частоте представлены на рис. 4.3, *а–в*.

4.2. Алгоритм расчета потери устойчивости

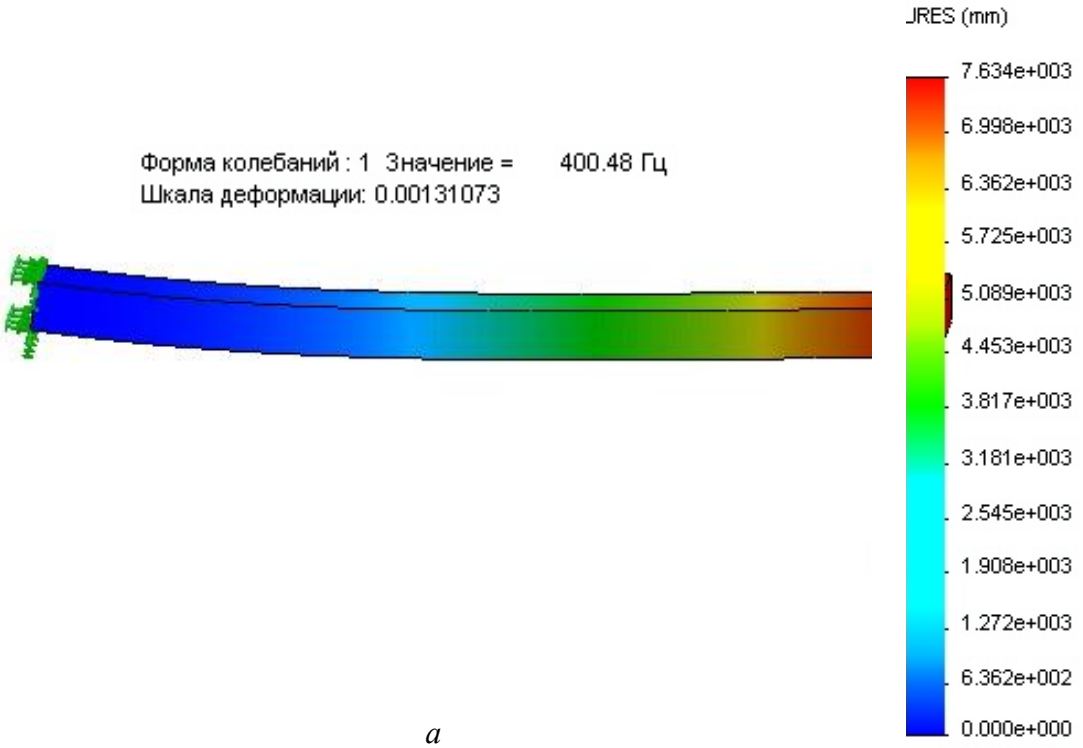
Устойчивость конструкции – способность конструкции противостоять внешним силам, стремящимся вывести ее из исходного состояния статического или динамического равновесия.

Форма, которую модель принимает во время потери устойчивости, называется формой режима потери устойчивости, а нагрузка – критической.

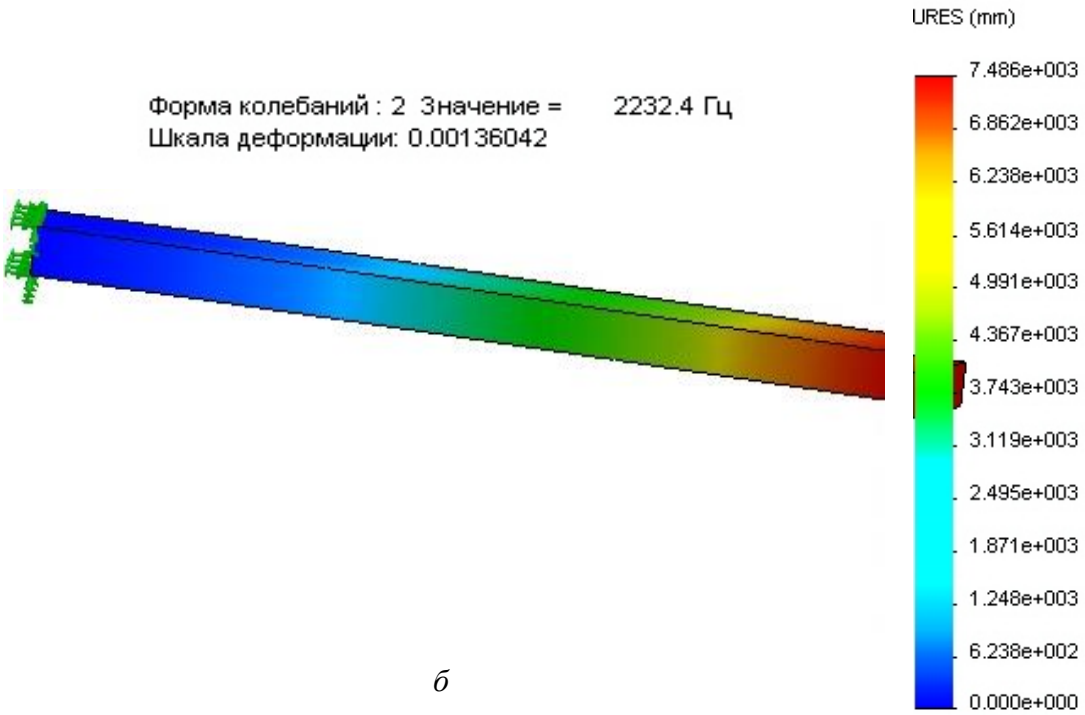
Детали и сборки с тонкостенными элементами при нагружении в осевом направлении изгибаются при относительно малых осевых воздействиях.

Такие конструкции могут выйти из строя вследствие потери устойчивости, несмотря на то, что напряжения намного ниже критических уровней. Для таких конструкций опасная продольная нагрузка становится критическим конструктивным фактором.

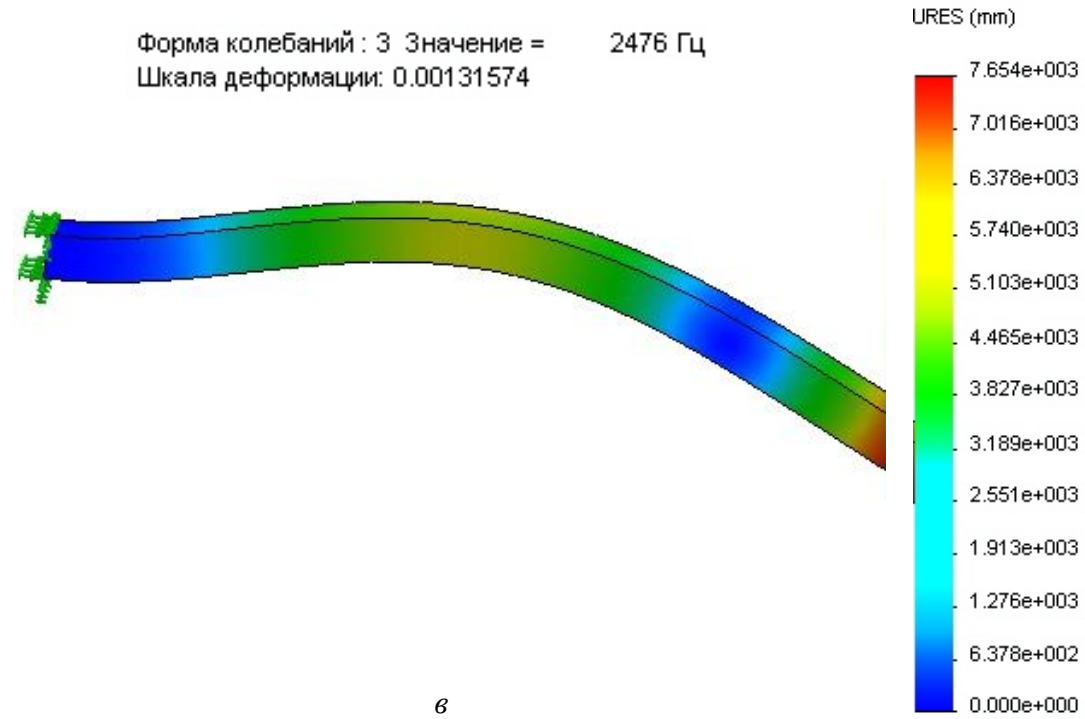
Анализ потери устойчивости обычно не требуется для толстостенных конструкций, так как разрушение происходит ранее, вследствие больших напряжений.



а



б



в

Рис. 4.3. Эпюры перемещений титановой пластины при собственных колебаниях с частотами: а – f_1 = 400,48 Гц; *б* – f_2 =2232,4 Гц; *в* – f_3 = 2476 Гц

Коэффициент критической продольной нагрузки (BLF в программе Solid Works) равен коэффициенту запаса прочности при потере устойчивости к приложенным нагрузкам. В таблице показана расшифровка возможных значений BLF.

Значение коэффициентов критической продольной нагрузки

Значение BLF (запас прочности)	Состояние потери устойчивости	Примечания
1 BLF	Потеря устойчивости не прогнозируется	Приложенные нагрузки меньше, чем вычисленные критические нагрузки. Потеря устойчивости не ожидается
0 BLF 1	Прогнозируется потеря устойчивости	Приложенные нагрузки превышают вычисленные критические нагрузки. Ожидается потеря устойчивости
BLF = 1	Прогнозируется потеря устойчивости	Приложенные нагрузки равны вычисленным критическим нагрузкам. Ожидается потеря устойчивости
BLF = –1	Потеря устойчивости не прогнозируется	Потеря устойчивости происходит, когда направления примененных нагрузок реверсированы. Например, если к брусу прикладывается нагрузка растяжения, то BLF должен быть отрицателен. Брус не потеряет устойчивость
–1 BLF 0	Потеря устойчивости не прогнозируется	Потеря устойчивости прогнозируется, если реверсировать все нагрузки
BLF –1	Потеря устойчивости не прогнозируется	Потеря устойчивости не ожидается, даже если реверсировать все нагрузки

Для анализа устойчивости в Solid Works нужно осуществить перечисленные действия:

1. Открыть диалоговое окно в Дереве исследования Simulation и выбрать Исследование. Определить Свойства исследования и установить количество режимов. Первый режим ассоциируется с самой низкой критической продольной нагрузкой. Программа вычисляет по умолчанию только самый низкий режим.

2. Определить материал для каждого элемента конструкции. Для этого необходимо щелкнуть правой кнопкой мыши на его значке в Дереве исследования Simulation и выбрать Применить/Редактировать материал. Плотность является обязательным свойством материала.

3. Определить Ограничения. Нажать правой кнопкой мыши на папку Нагрузка/Ограничение в дереве исследования Simulation и выбрать Ограничения.

4. Определить нагрузки. Правой кнопкой мыши щелкнуть папку Нагрузка/Ограничения в дереве исследования Simulation и выбрать необходимый вид нагрузки.

5. Создать сетку модели и запустить исследование. Перед запуском можно использовать диалоговое окно Параметры для команды на создание эпюр для всех форм режимов автоматически.

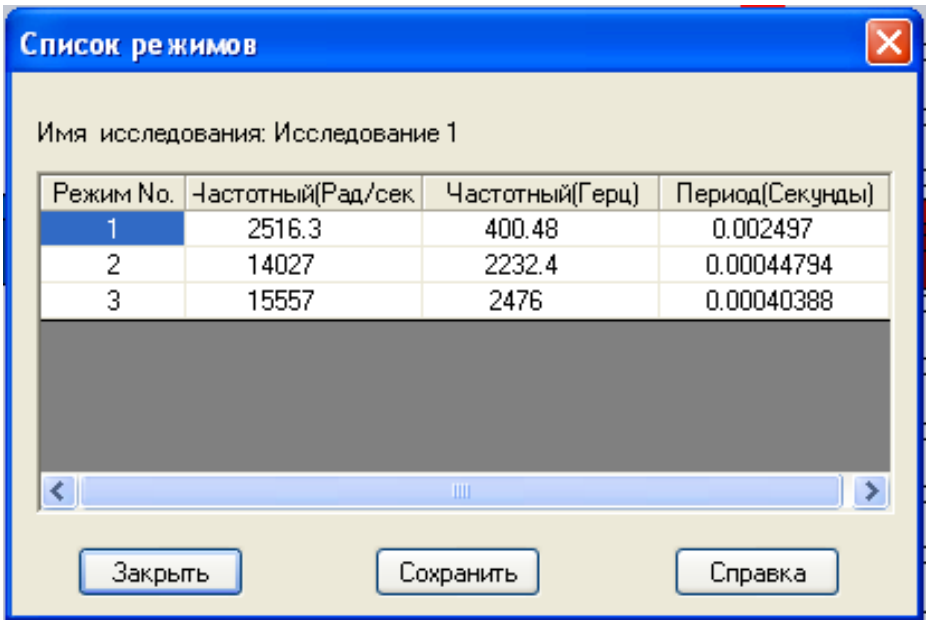


Рис. 4.4. Список резонансных частот титановой пластины

6. Вывести результаты. Щелкнуть правой кнопкой мыши на папку Результаты и выбрать опцию Показать коэффициенты критической нагрузки.

Пример 4.3. Расчет потери устойчивости титановой пластины рис. 4.5

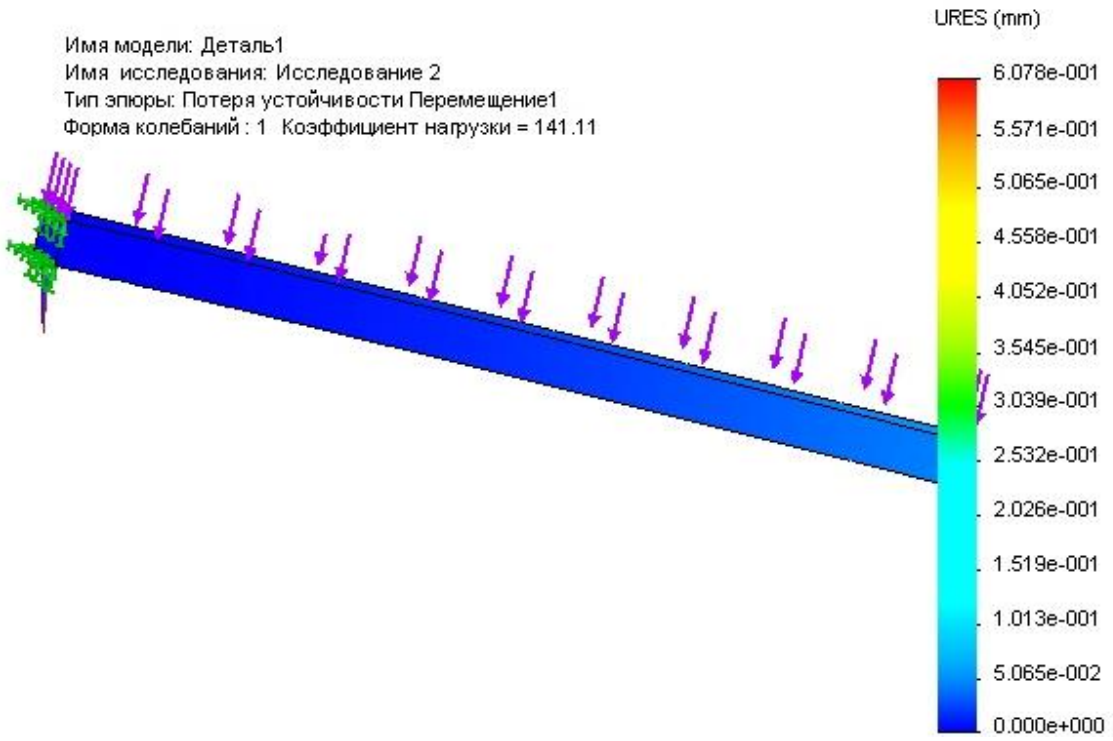


Рис. 4.5. Эпюра перемещений титановой пластины

Геометрические параметры, механические свойства и характер закрепления пластины соответствуют примеру 4.2.

В центр пластины на верхней плоскости приложена нагрузка F = 1000 Н. Выполнив проведенную ранее последовательность операций, получим эпюру перемещений (рис. 4.5) и коэффициент нагрузки BLF. Согласно выполненному расчету, пластина не теряет устойчивость. Для пластины, выполненной из резины ($E = 6{,}1 \cdot 10^6$ Па) коэффициент потери устойчивости BLF = – 0,21. Пластина теряет устойчивость.

4.3. Алгоритм исследования усталости элемента конструкции

На основании результатов испытаний при симметричном цикле строится кривая усталости (рис. 4.6). Эта кривая показывает, что с увеличением числа циклов нагружения *n*, величина максимального напряжения, при котором происходит разрушение материала, значительно уменьшается. При этом для многих материалов, например, углеродистой стали, можно установить такое наибольшее напряжение цикла, при котором образец не разрушается после любого числа циклов. Это напряжение называют пределом выносливости δ_{-1}.

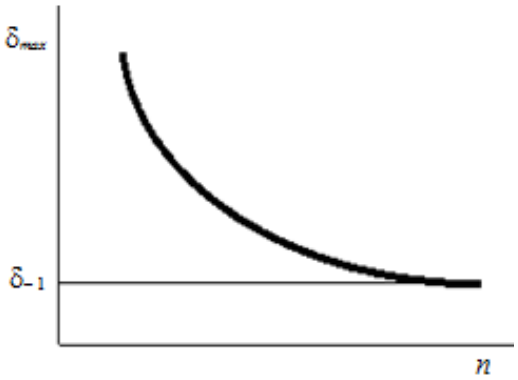


Рис. 4.6. Кривая усталости

Запуск усталостного анализа выполняется следующей последовательностью команд: Продукты Office – SolidWorks Office – CosmosWorks Designer – Панель Simulation – Новое исследование – Усталость – События постоянной амплитуды с определенными циклами.

Предварительно проводится статическое или динамическое исследование, на базе которого проводится расчет усталости конструкции или структур биологического объекта.

По умолчанию программа предлагает исследование на 1000 циклов нагружения. При этом число циклов по желанию можно изменить.

Характер нагружения может задаваться: 1) полностью реверсировано (рис. 4.7, *а*); 2) с определяемым пользователем коэффициентом нагрузки (рис. 4.7, *б*); 3) с отсчетом от нуля (рис. 4.7, *в*).

При задании характера нагружения полностью реверсированно программа устанавливает знакопеременное напряжение на каждом узле равным соответствующему значению напряжения в базовом статическом исследовании, домноженном на коэффициент масштабирования. Максимальное и минимальное значения составляющих напряжения равны по величине и противоположны по направлению.

При условии, что определенный пользователем коэффициент нагрузки равен R, программа получает один из пиков из справочного исследования с учетом заданного коэффициента масштабирования. Другой пик вычисляется умножением первого пика на R. Затем в программе автоматически вычисляется величина знакопеременного напряжения $(S\cdot(1-R))/2$. Величина S – экстремальное значение составляющей напряжения в справочном статическом исследовании.

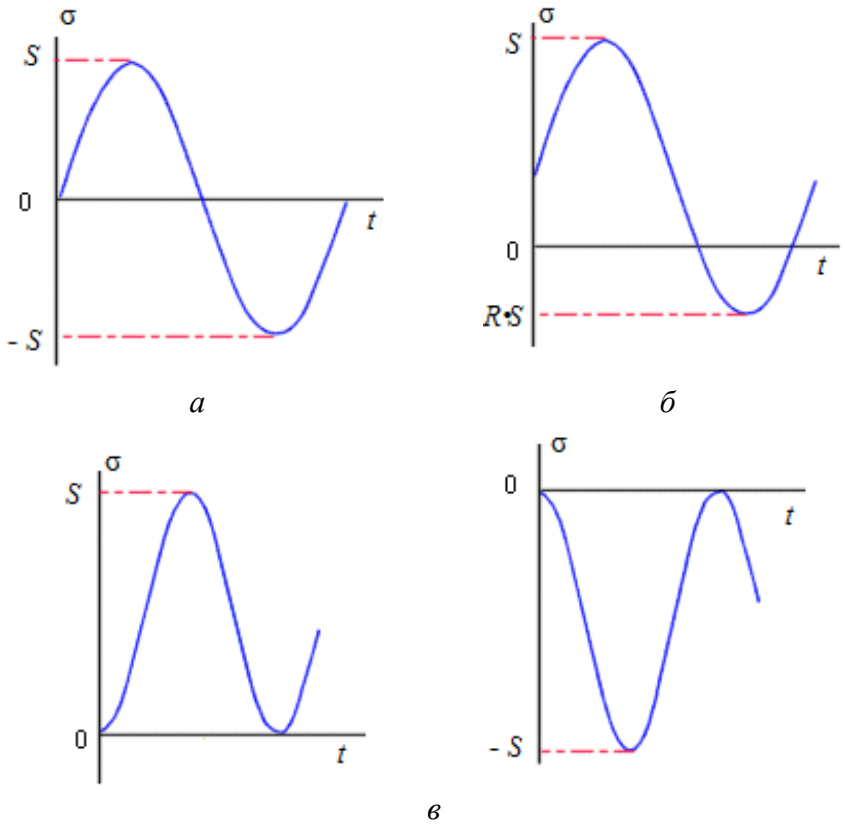


Рис. 4.7. Схемы циклического нагружения

При задании характера нагружения отсчетом от нуля в программе устанавливается знакопеременное напряжение на каждом узле, равное половине соответствующего значения напряжения в базовом статическом исследовании (указывается в поле тип Исследование), домноженном на коэффициент масштабирования. Программа получает один из пиков из базового статического исследования и устанавливает другой пик на 0.

Для определения результатов необходимо щелкнуть правой кнопкой мыши команду Параметры результатов и выбрать команду Определить/Редактировать для запроса результатов во всех узлах или только на граничных узлах.

Для просмотра результатов исследования на усталость следует: 1) дважды щелкнуть на значке в папке результатов для отображения связанной эпюры, 2) для определения эпюры правой кнопкой мыши щелкнуть на папке Результаты и выбрать папку Определить эпюру усталости, 3) нажать правой кнопкой мыши на папку Результаты и выбрать папку Список результатов усталостного анализа.

Пример 4.4 Расчет коэффициента разрушения в плоском диске при нагрузке постоянной силой в 1000 Н на протяжении 1000 циклов с отчетом от нуля

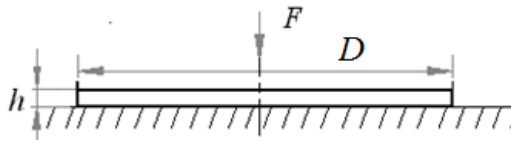


Рис. 4.8. Расчетная схема статической нагрузки плоского диска

Коэффициент разрушения – параметр, определяющий отношение максимального напряжения, при котором происходит разрушение материала при циклической нагрузке, к экстремальному напряжению в элементе конструкции после выполнения заданного числа циклов нагружения.

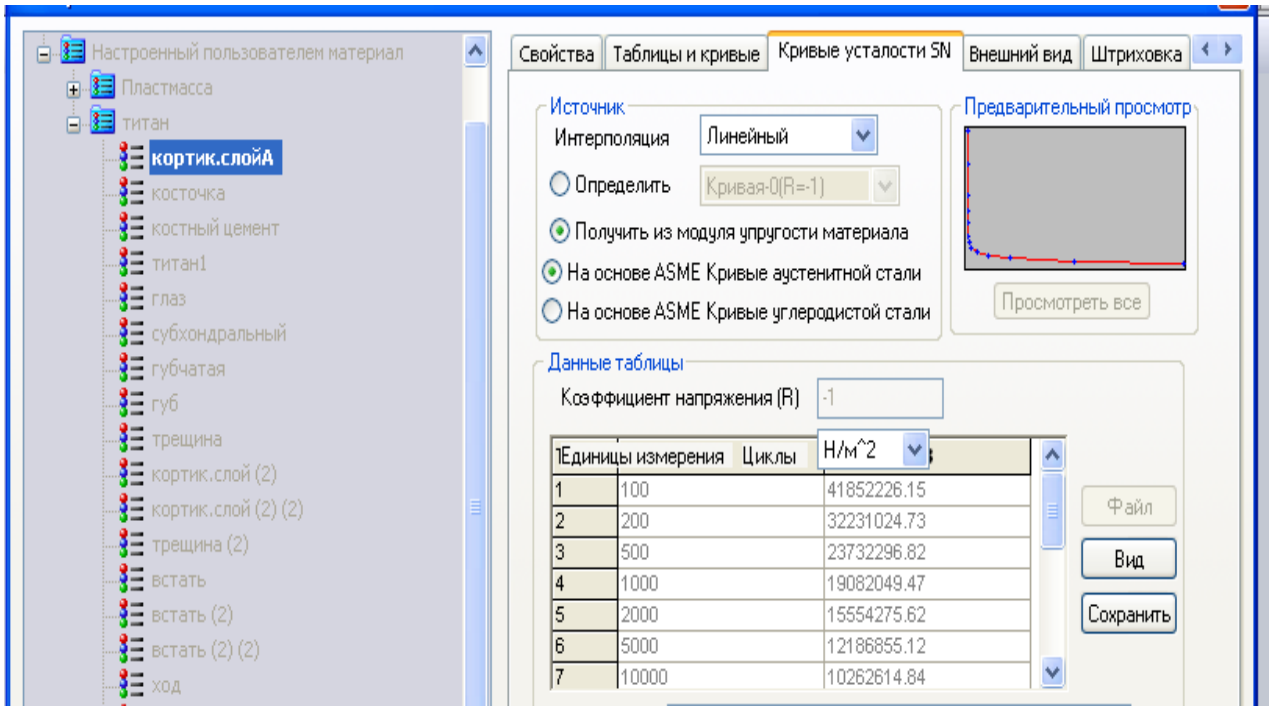


Рис. 4.9. Определение кривой усталости S–N

Расчетная схема диска представлена на рис. 4.7. Геометрические параметры диска: диаметр D = 100 мм, толщина h = 5 мм. Материал диска – сталь углеродистая; плотность материала ρ = 7800 кг/м^3; модуль нормальной упругости E = 2,1·10^{11} Па.

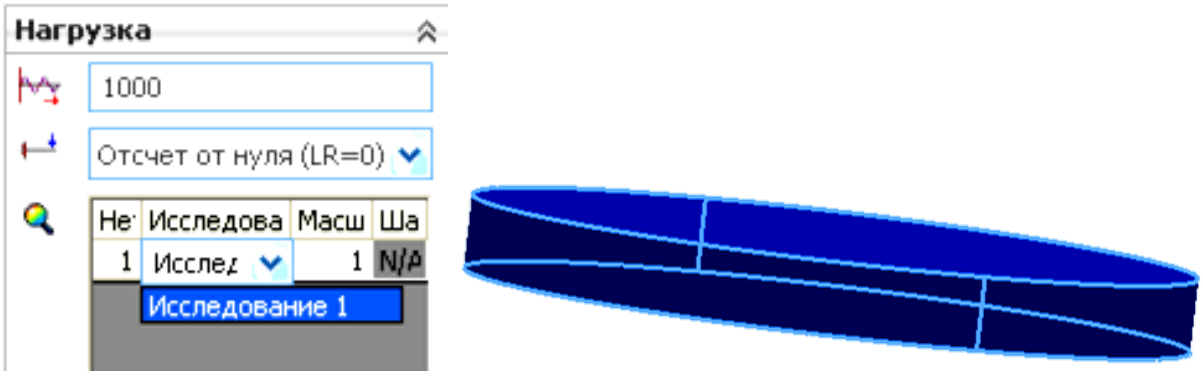


Рис. 4.10. Параметры нагрузки в окне исследования

Материал диска выполнен из аустенитной стали (кривая усталости задана в соответствие с табличными значениями из Библиотеки материалов, рис. 4.9). При наличии экспериментальных данных кривая усталости материала может задаваться самостоятельно.

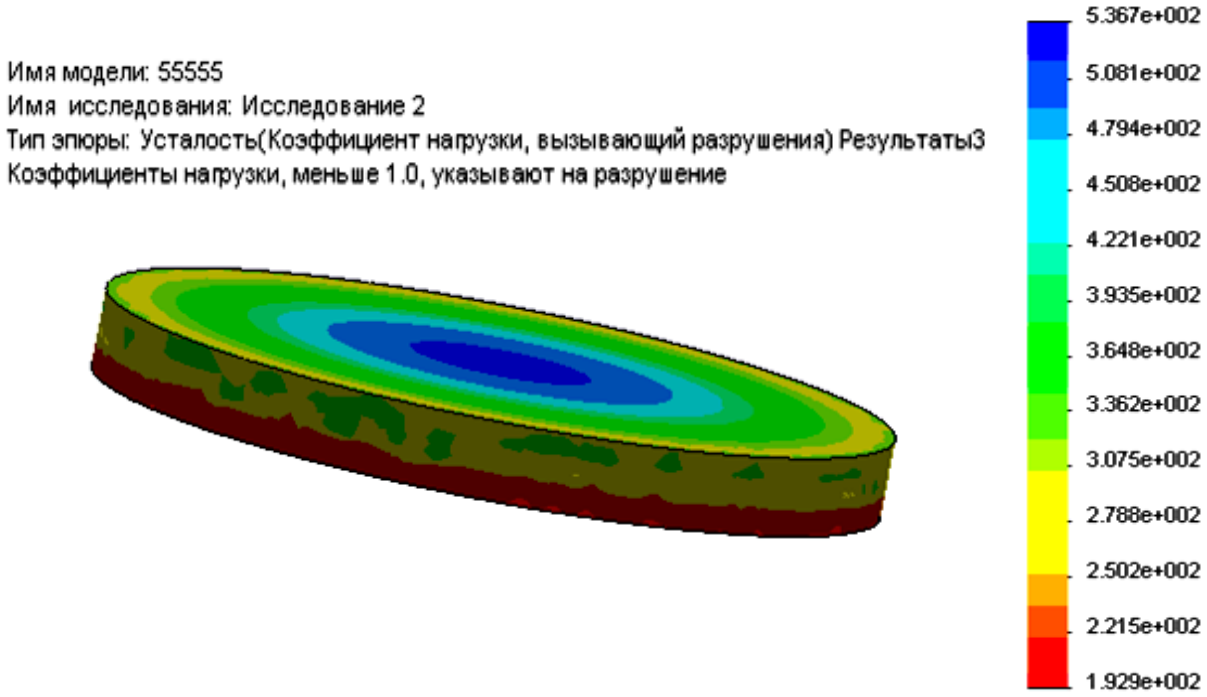


Рис.4.11. Эпюра коэффициентов разрушения в элементах диска

Из поля Исследование извлекаем данные статического расчета, который был выполнен ранее по заданной расчетной схеме нагружения (рис. 4.8), и

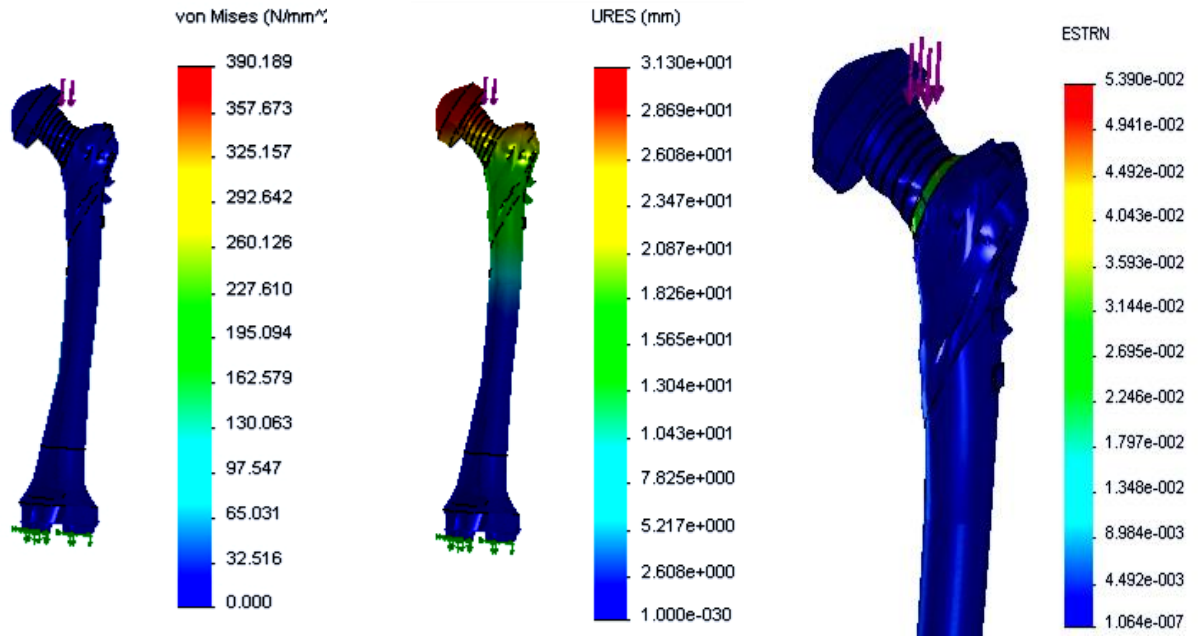
задаем параметры нагрузки: 1) число циклов 1000, 2) характер нагружения отчет от нуля, 3) коэффициент масштабирования нагрузки – 1 (рис. 4.10).

Запускаем усталостный расчет при 1000 циклов. Нажмем правой кнопкой мыши на папку Результаты, в которой выбираем вкладку Список результатов усталостного анализа – коэффициент нагрузки, вызывающий разрушение.

Диапазон изменения коэффициента разрушения изменяется в пределах от 192 до 536 (рис. 4.11). Полученные значения показывают, что конструкция устойчива при заданном режиме нагружения.

Пример 4.5. Результаты исследования на усталость системы бедренная кость–регенерат–имплантат

При построении модели введем следующие допущения: 1) кость схематизирована двумя однородными изотропными слоями кортикальным и спонгиозным, 2) имплантат выполнен из однородного материала по техническим характеристикам производителя, 3) регенерируемый участок в разломе шейки бедренной кости так же однороден и изотропен, 4) материалы кортикального, спонгиозного слоев и регенерируемого участка удовлетворяют условиям сплошности, 5) в материалах отсутствуют начальные напряжения.



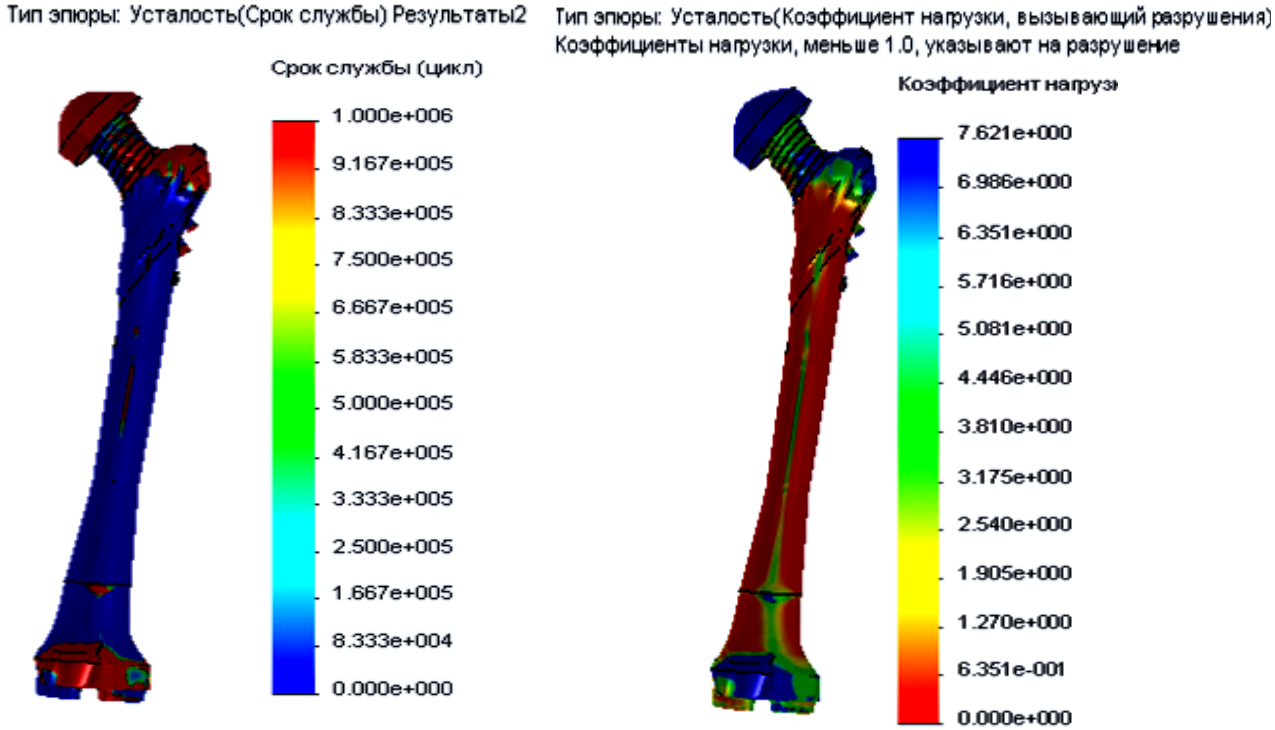
а *б* *в*

Рис. 4.12. Эпюры при статической нагрузке системы «бедренная кость–регенерат–имплантат»: *а* – напряжений; *б* – перемещений; *в* – относительных удлинений

Для каждого элемента сборки выбираем кривую усталости материала. Для имплантата – аналогичную углеродистой стали, а для компонентов

биологических структур – аналогичную аустенитной стали. Пересчет кривой усталости в программе выполняется в соответствии с заданными модулями упругости. Заданы следующие модули упругости для: 1) титановых имплантатов $E_1 = 1{,}1 \times 10^{11}$ Па; 2) кортикальной ткани $E_2 = 4{,}5 \times 10^{9}$ Па; 3) спонгиозной ткани $E_3 = 1{,}75 \times 10^{9}$ Па; 4) регенерата $E_4 = 7{,}6 \times 10^{6}$ Па.

Результаты статического исследования напряженно-деформированного состояния системы «бедренная кость–регенерат–имплантат» при нагрузке 2600 Н приложенной к головке бедренной кости приведены на рис. 4.12, *а – в*.



а *б*

Рис. 4.13. Эпюры в системе бедренная кость–регенерат–имплантат»:
а – срока службы; *б* – коэффициента нагрузки, вызывающей разрушения

Результаты усталостного анализа представлены на рис. 4.13, *а*, *б*. Усталостный анализ позволяет прогнозировать разрушение конструкции от усталости материала. Если коэффициент нагрузки, вызывающей разрушение, >1, то конструкция пригодна к эксплуатации при заданном числе циклов.

4.4. Алгоритм выполнения нелинейного динамического исследования элемента конструкции

При линейной постановке задачи вводятся условия линейной зависимости между внешним воздействием и составляющими перемещения в элементах конструкции. Нелинейный анализ может использоваться для решения за-

дач с нелинейностью, вызванной поведением материала, большими перемещениями и условиями контакта. При этом при постановке задачи учитывается изменение модуля упругости материала и характер деформации при изменении величины внешнего воздействия.

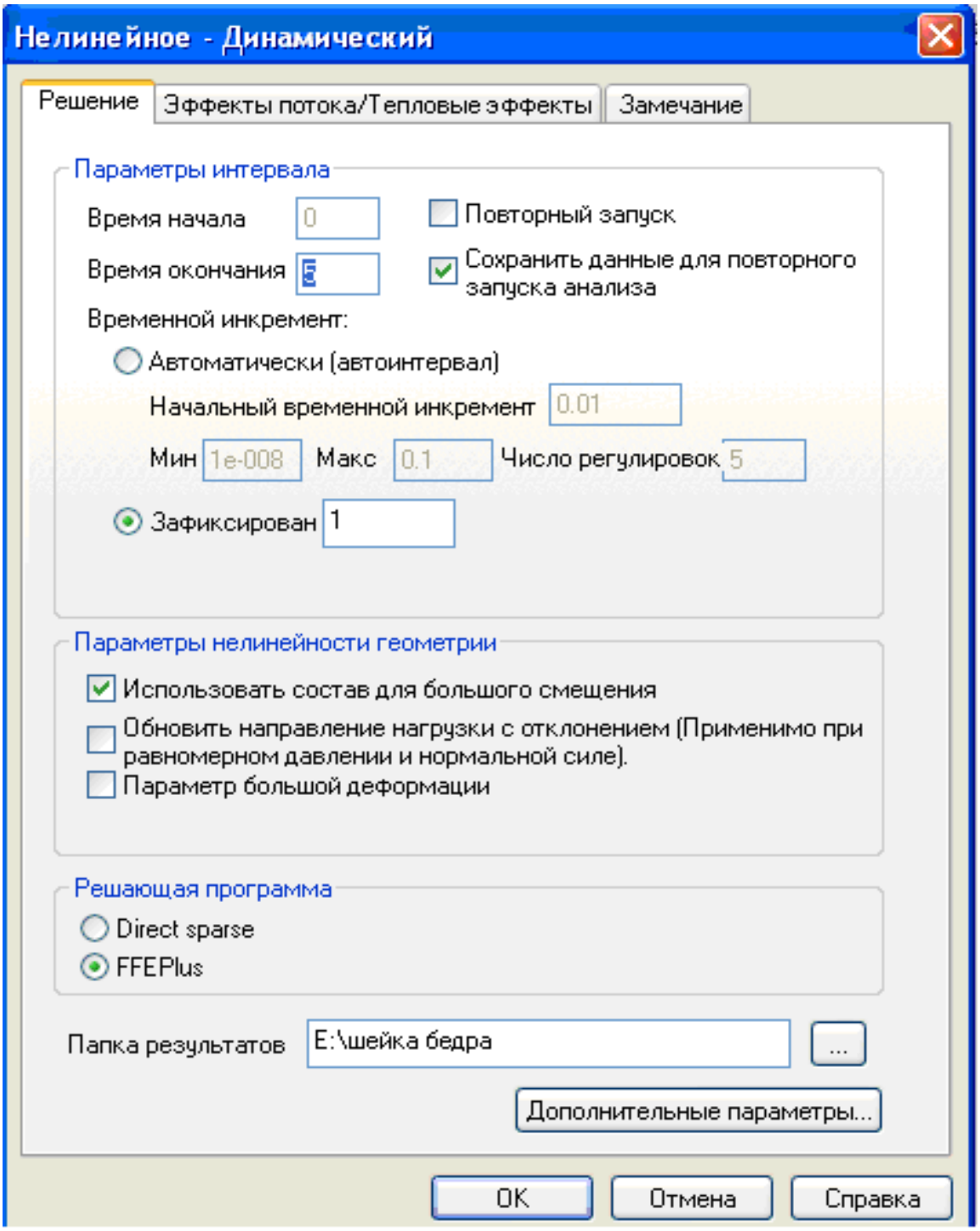
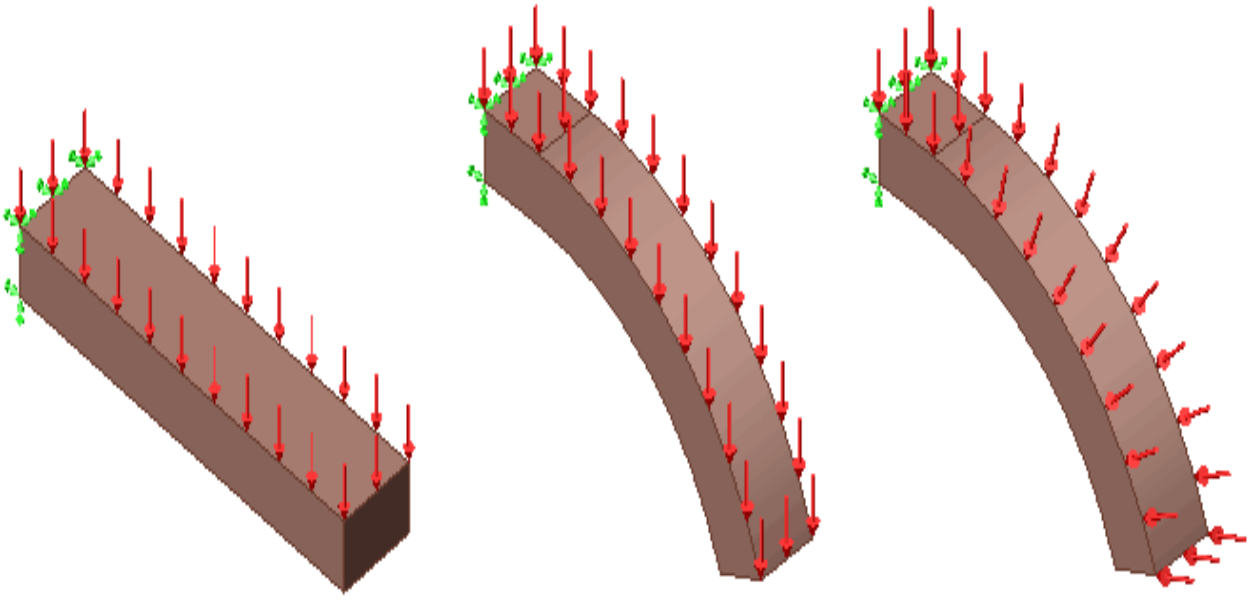


Рис. 4.14. Меню свойств нелинейного динамического анализа

Конструкции, подвергающиеся большим перемещениям, могут иметь существенные изменения формы, вызванные деформациями под воздействи-

ем внешних нагрузок. Эти деформации могут быть причиной нелинейной реакции конструкции при увеличении или понижении жесткости.

Нелинейное поведение материала могут вызвать несколько факторов. Существует зависимость отношения «напряжения–деформации» материала от хронологии нагрузок (как в задачах пластичности), продолжительности нагрузки (как при текучести материала) и температуры (как в термопластичности).



а *б* *в*

Рис. 4.15. Выбор направления нагрузки с отклонением

Особый класс нелинейных задач – задачи, имеющие отношение к изменению характера граничных условий конструкции, подвергаемой анализу во время движения. Это контактные задачи: 1) вибрирование конструкций, 2) контакты зубьев зубчатых колес, 3) посадки, 4) резьбовые соединения. Все эти задачи требуют оценки учета изменяющихся границ контакта.

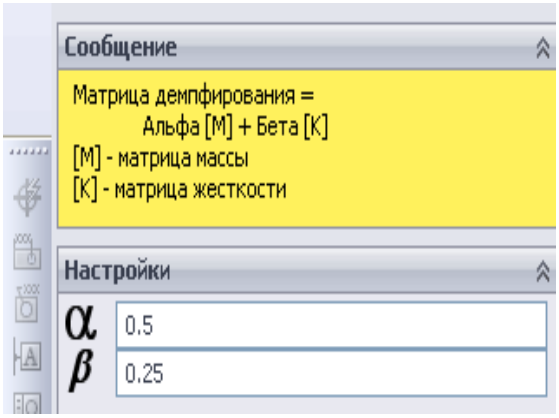


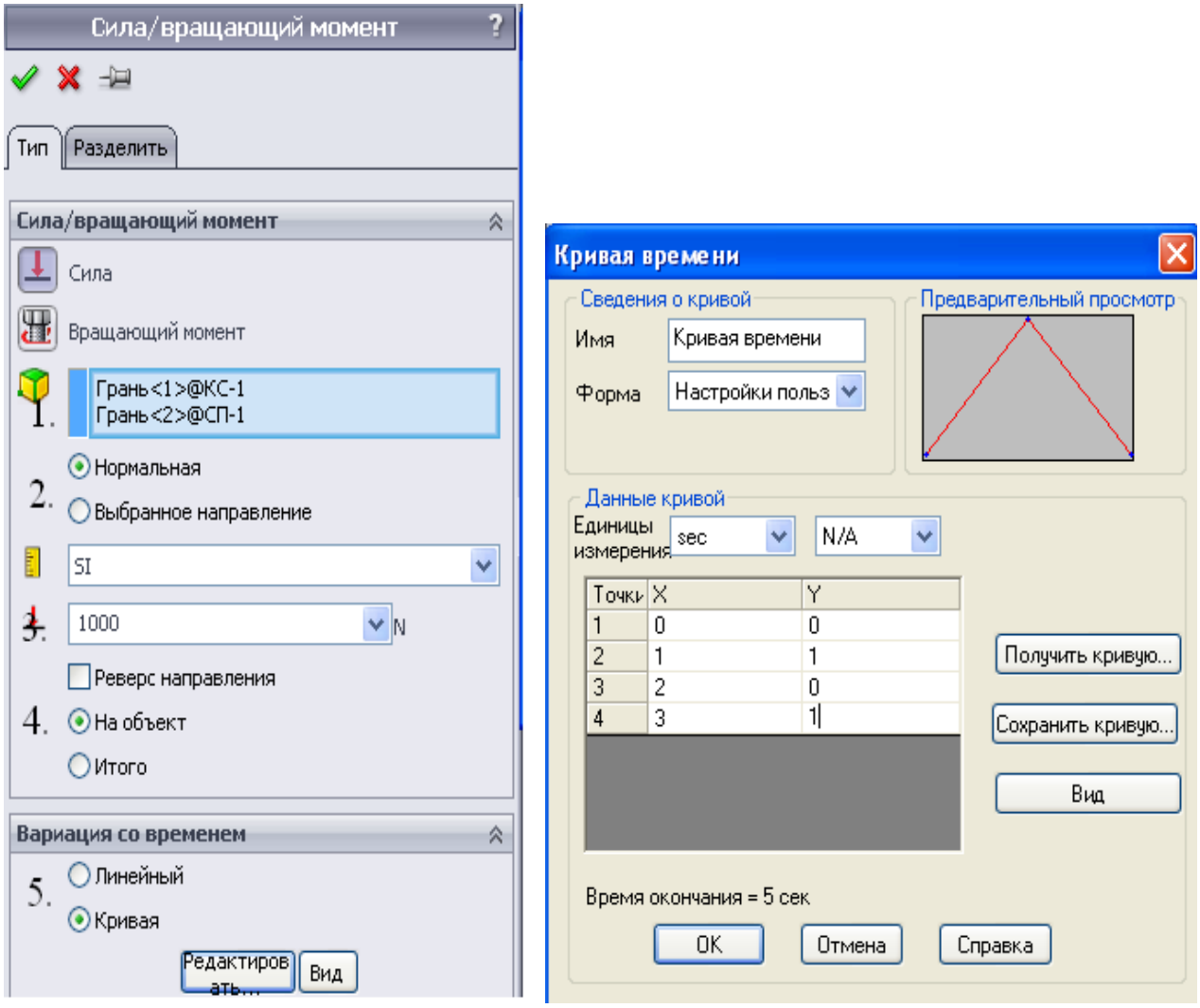
Рис. 4.16. Задание параметров демпфирования

Запуск нелинейного динамического анализа выполняется последовательностью команд: Продукты Office – Solid Works Office – Cosmos Works Designer – Панель Simulation – Новое исследование – Нелинейное – Динамическое исследование.

Настраиваем свойства нелинейного динамического анализа. Для этого нажимаем правой кнопкой мыши на значок Исследование и запускаем меню Свойства нелинейного динамического анализа (рис. 4.14).

Параметры интервала времени задаем на вкладке Решение меню Свойств. Задаем время начала исследования, окончания исследования и временный интервал между шагами задания внешнего воздействия.

Также есть возможность выполнить 1) повторный запуск, 2) сохранить данные для повторного запуска последнего успешного шага решения, 3) создать новое решение.



а *б*

Рис. 4.17. Схема последовательности задания нагрузки

Параметры нелинейного анализа. Для нелинейного исследования реализуется постановка задачи больших перемещений. При этом нагрузка всегда остается нормальной к поверхности оболочки для каждого шага нагружения (решения).

На рис. 4.15 представлена графика характера приложения нагрузки на недеформированную поверхность (рис. 4.15, *а*) и при направлении нагрузок на следующих шагах нагружения (рис. 4.15, *б*, *в*).

Для проведения исследования предлагается выбрать одну из решающих программ: Direct Sparse или FFEPlus.

Программа Direct Sparse имеет большую вероятность сходимости для нелинейных задач. Программа FFEPlus требует меньше памяти, но дает менее точные результаты.

При анализе необходимо задать метод управления решением. Например, можно задавать управление силой или перемещением. Метод управления силой позволяет управлять каждой нагрузкой и ограничивать ее на различных отрезках времени воздействия.

В программе также предусмотрено задание демпфирования по схеме Ньюмарка. Коэффициенты матрицы демпфирования $\alpha = 0{,}5$ и $\beta = 0{,}25$ представлены во вкладке Демпфирование (рис. 4.16).

Последовательность задания нагрузки проиллюстрирована на рис. 4.17, *а*, *б*: 1) выбор грани, на которую действует внешняя сила, 2) выбор направления нагрузки, 3) задание значения (коэффициента) нагружения, 4) табличное задание внешней силы на каждом шаге нагружения.

Пример 4.6. Динамическое нелинейное исследование

Рассмотрим результат динамического нелинейного исследования сплошного двухслойного цилиндра с разными модулями упругости (рис. 4.18).

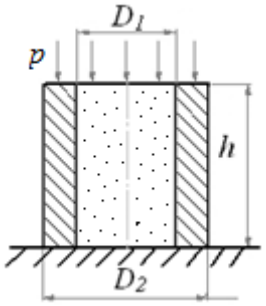
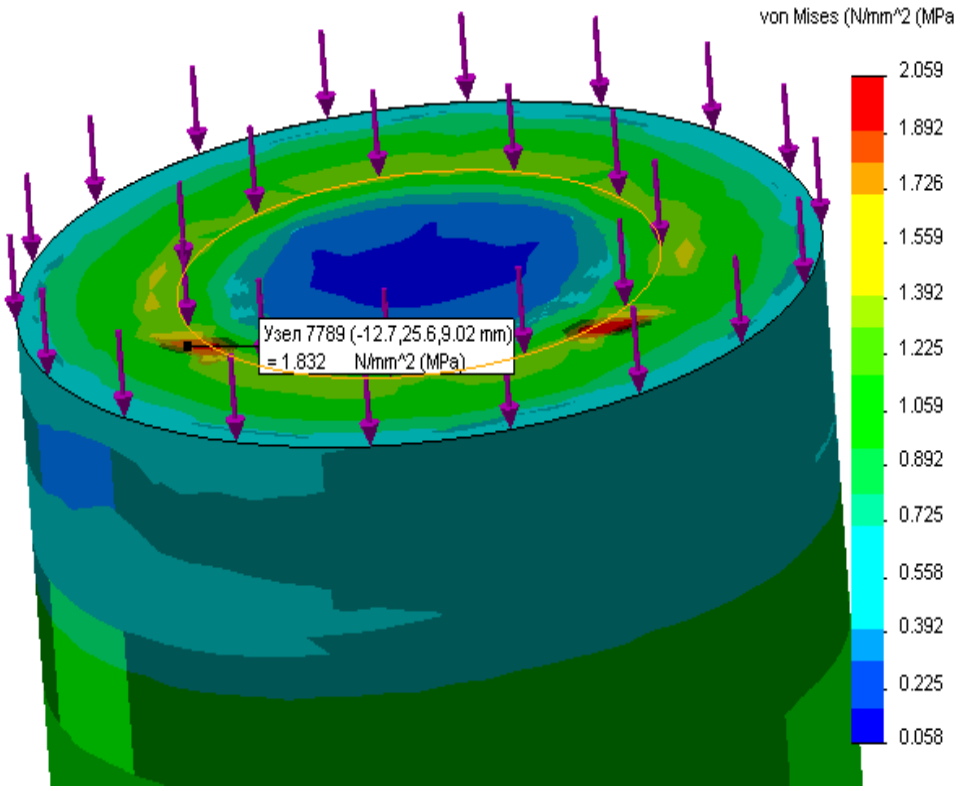


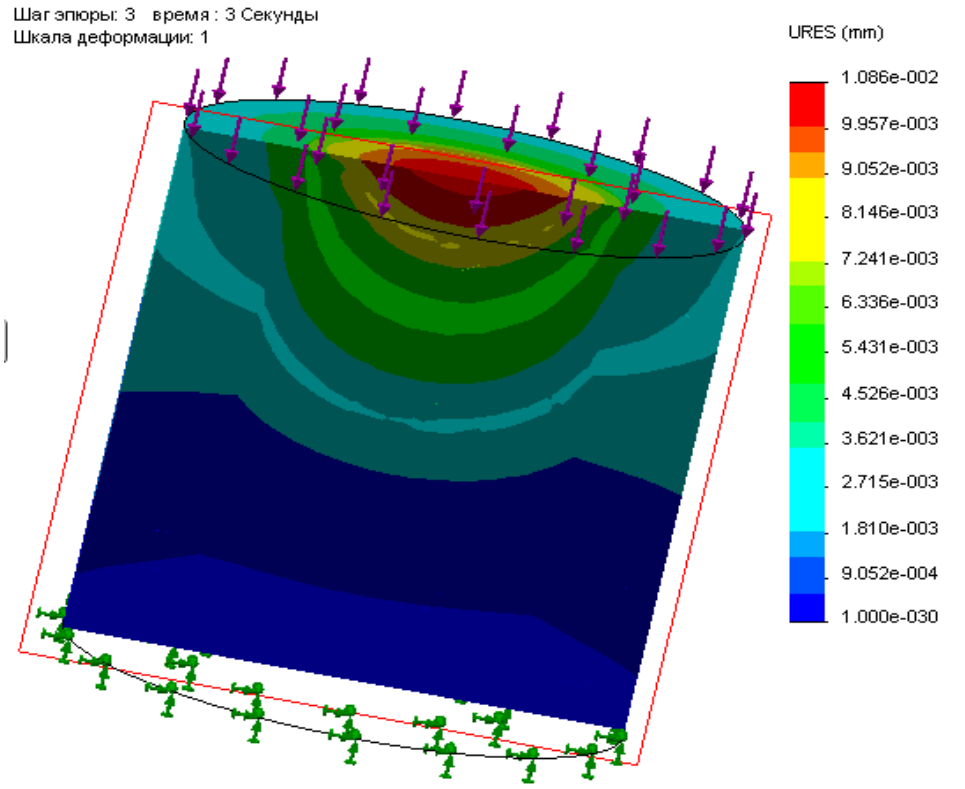
Рис. 4.18. Расчетная схема двухслойного цилиндра при динамической нагрузке

Наружный и внутренний диаметры соответственно равны $D_2 = 50$ мм; $D_1 = 30$ мм; высота цилиндра $h = 50$ мм; модули нормальной упругости наружного и внутреннего слоев соответственно $E_2 = 4{,}5 \cdot 10^9$ Па; $E_1 = 1{,}75 \cdot 10^9$ Па; коэффициенты Пуассона 0,3. Расчет нагрузки ведется в течение 5 сек. Интервал разбит на 5 временных шагов. Приложенная нагрузка $p = 5 \cdot 10^5$ Па. Коэффициенты нагрузки соответственно равны $k_1 = 1$; $k_2 = 0{,}5$; $k_3 = 1$; $k_4 = 0{,}5$; $k_5 = 1$.

После выполнения нелинейного динамического анализа рассмотрим результаты исследования.



а



б

Рис. 4.19. Эпюры в двухслойном цилиндре: *а* – напряжений; *б* – перемещений

Результаты расчета напряженно-деформированного состояния в двухслойном цилиндре через 3 сек. после начала нагружения приведены на

рис. 4.19. Используя команду Инструменты эпюры/Зондирование выделим точки максимального значения напряжения (рис. 4.20).

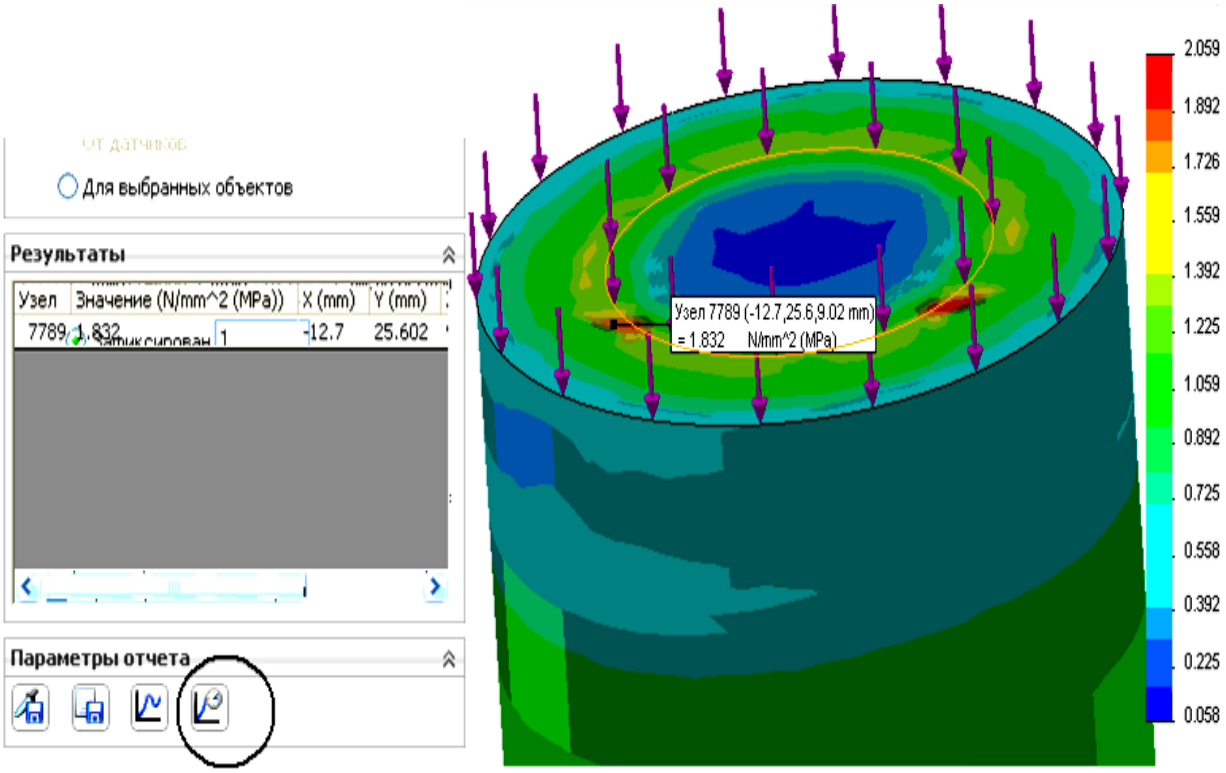


Рис. 4.20. Результат зондирования

После статистической обработки результат нелинейного динамического анализа можно представить в графическом виде (рис. 4.21).

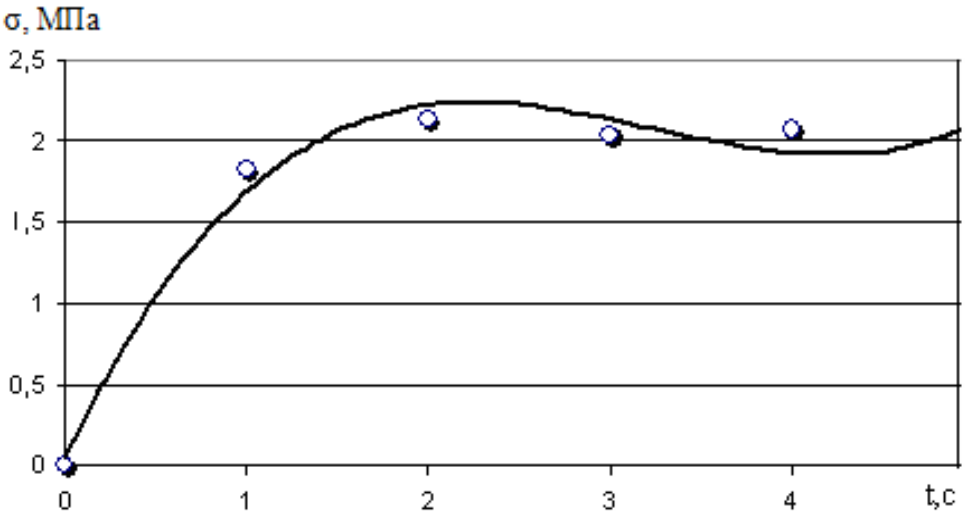
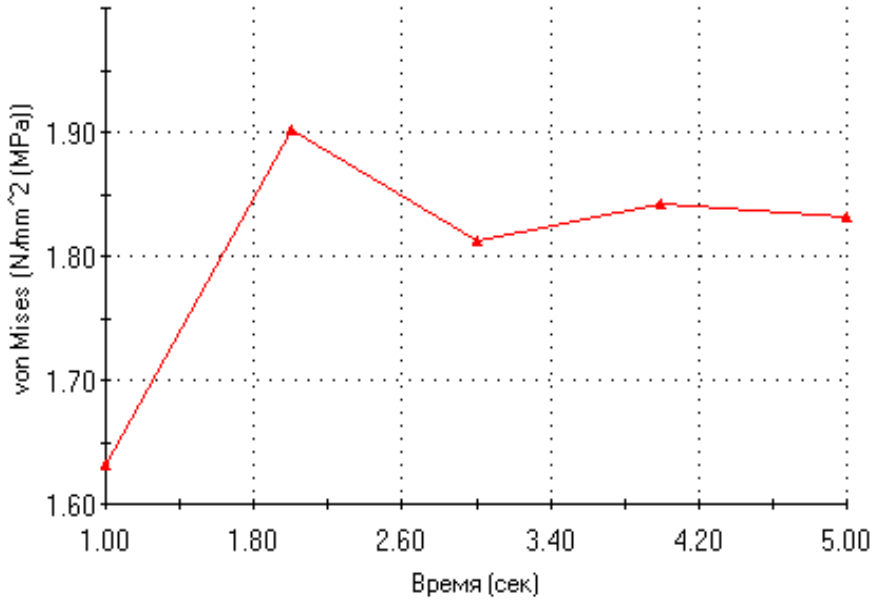


Рис. 4.21. График зависимости изменения напряжения от времени

Изменение напряжения во времени содержится в Отчете. Отчет может быть представлен, как в графическом (рис. 4.22, *а*), так и в текстовом виде (рис. 4.22, *б*).



а

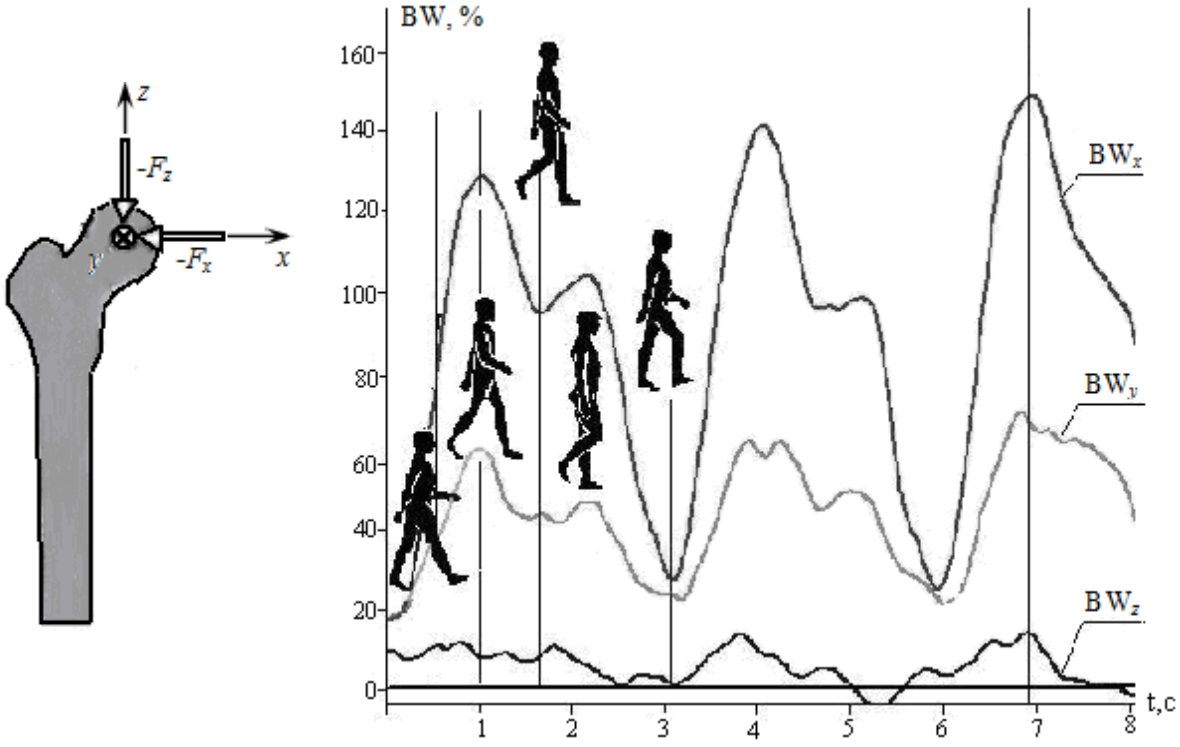
Имя исследования: Исследование 1					
Тип эпюры: Нелинейное узловое напряжение Напряжение1					
21:52, суббота, Декабрь 13, 2014					
Название X: Время (сек)					
Название Y: von Mises (N/mm^2 (MPa))					
Точка, X, Y1 (Узел 7100)					
1, 1	,1.8334	,			
2, 2	,2.1382	,			
3, 3	,2.0365	,			
4, 4	,2.0705	,			
5, 5	,2.0592	,			

б

Рис. 4.22. Виды отчета: *а* – графический; *б* – текстовый

Пример 4.7. Динамический нелинейный анализ системы «бедренная кость–регенерат–имплантат»

Нагрузка прикладывается к головке бедренной кости человека по трем осям, исходя из выбранной системы координат (рис. 4.23, *а)* и изменение нагрузки происходит согласно экспериментальным данным (рис. 4.23, *б)*.



а *б*

Рис. 4.23. Параметры нагружения

Внешняя нагрузка прикладывается в течение 1,5 сек. с шагом 0,1 сек. BW – отношение прикладываемой нагрузки к весу тела человека.

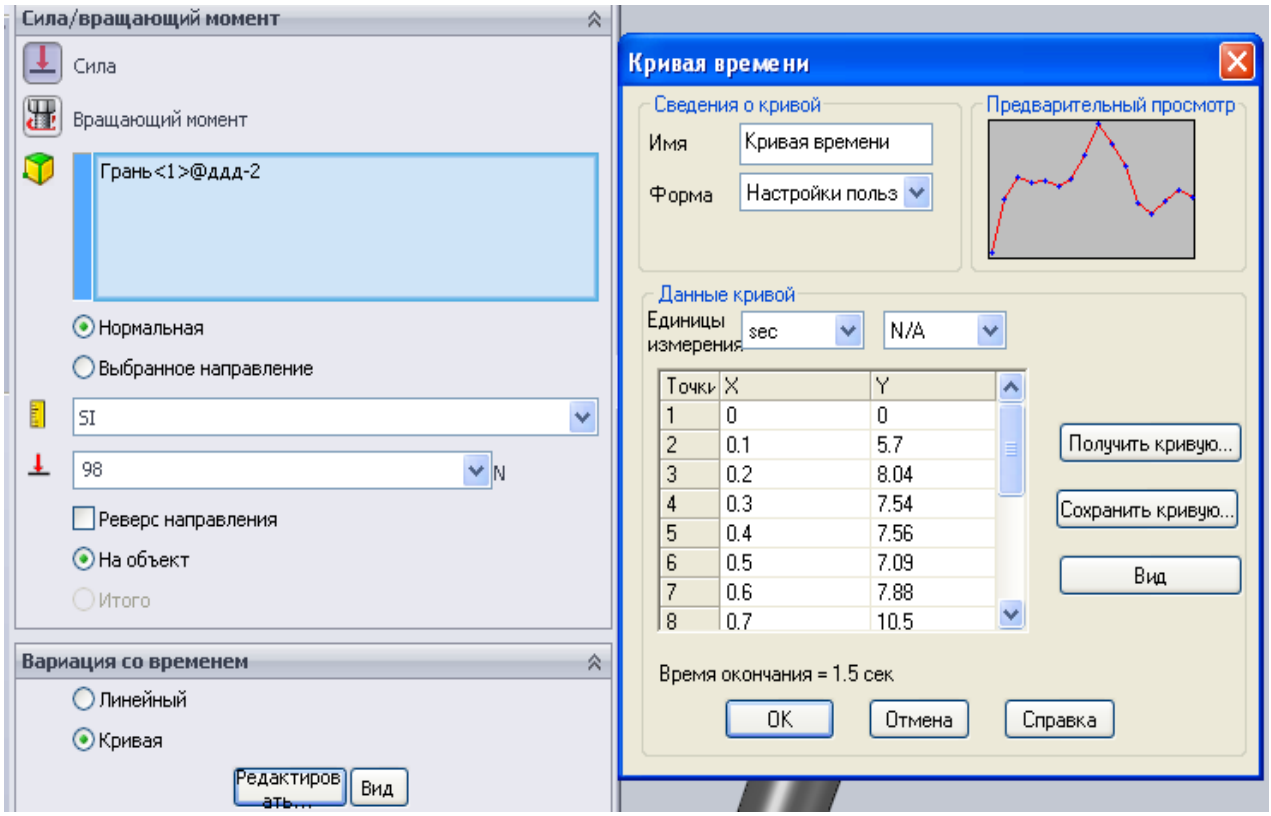
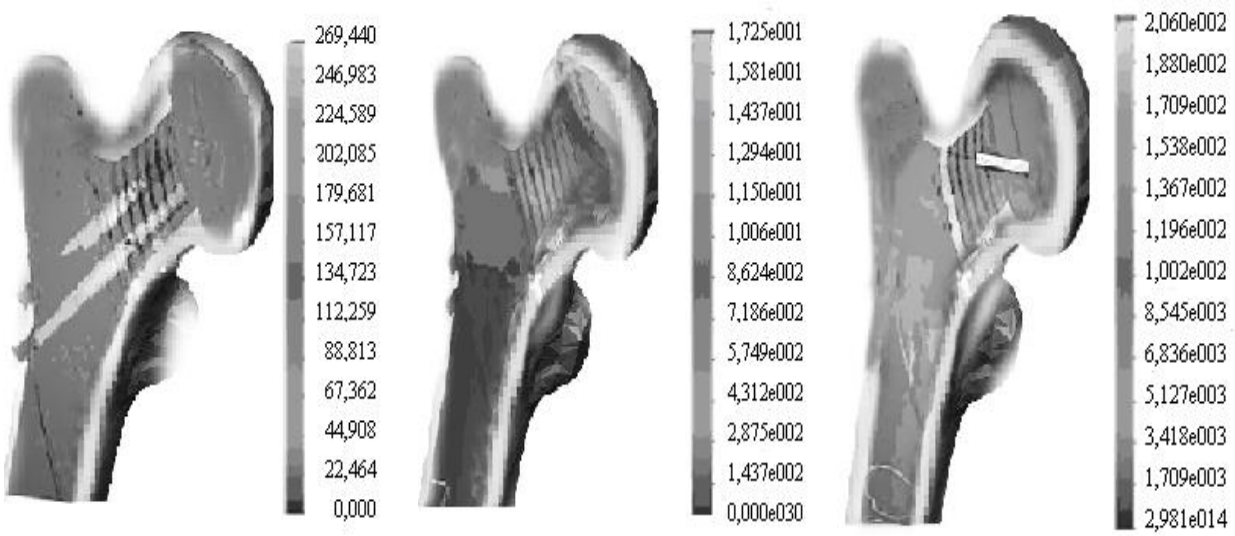


Рис. 4.24. Кривая нагружения по оси *z*

В системе SW кривая нагружения по оси *z* представлена на рис. 4.24. Результаты проведенных расчетов на момент времени t = 1,5 с представлены на рис. 4.25.



а *б* *в*

Рис. 4.25. Эпюры НДС системы «бедренная кость–регенерат–имплантат»

Приведены эпюры напряжений (рис. 4.25, *а*), перемещений (рис. 4.25, *б*) и деформаций (рис. 4.25, *в*) в системе «бедренная кость–регенерат–имплантат».

При исследовании напряженно-деформированного состояния элементов конструкции и биологических объектов в статике и динамике всегда следует иметь в виду, что величина напряжений, деформаций и перемещений при одном и том же абсолютном значении нагрузки будут значительно больше при динамическом характере нагружения.

Глава 5. МОДЕЛИРОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛЕЙ ПОТОКА В SOLIDWORKS FLOW SIMULATION

SolidWorks Flow Simulation – это приложение оценки гидроаэродинамики, с помощью которого определяется траектория прохождения жидкости в деталях или моделях сборки.

Прежде чем провести этот анализ, необходимо подготовить модель:

1. Сделайте прозрачной геометрию, окружающую полость, чтобы при просмотре результатов можно было видеть траекторию потока. Для настройки прозрачности отключите функцию Графика Real View.

2. Убедитесь в наличии впускного и выпускного отверстий.

3. Закройте впускное и выпускное отверстия крышками, которые должны быть твердотельными элементами, например, созданными при помощи вытягивания. Диаметр крышки должен соответствовать диаметру отверстия (рис. 5.1).

Далее можно запускать SolidWorks Flow Simulation. Для этого выберите Flow Simulation/Project/New. Откроется окно нового проекта (рис. 5.2).

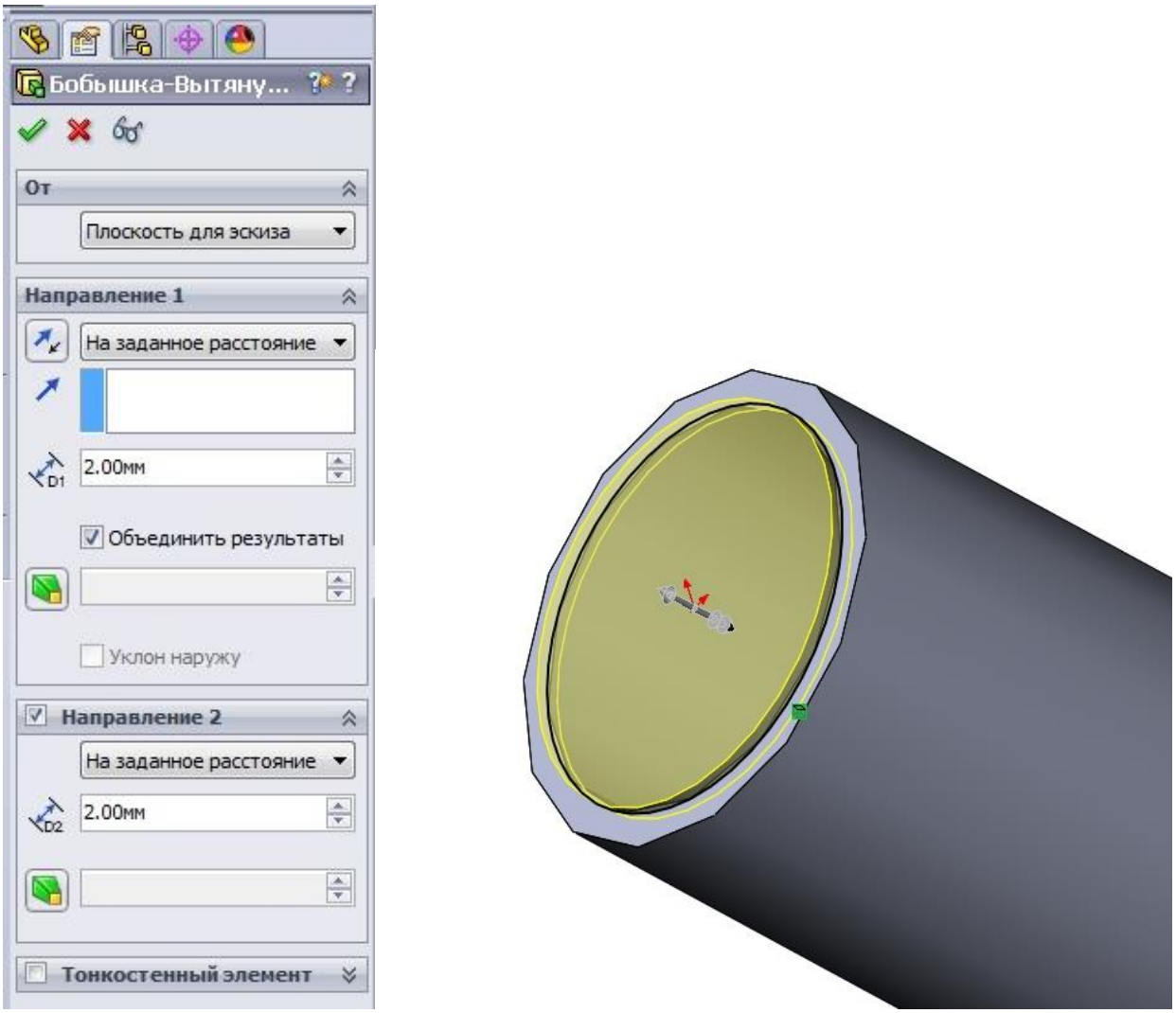


Рис. 5.1. Создание крышки на отверстии

Если нужно проанализировать поток *внутри* модели, то такой тип анализа называется Internal. Альтернативный тип анализа – External, когда поток движется *около* модели.

Для выполнения анализа необходима одна полностью замкнутая полость в модели. Если объем жидкости в полости равен нулю, полость не является полностью замкнутой. В этом случае отобразится запрос на закрытие отверстий модели.

Чтобы проверить геометрию, прочитайте информацию в окне сообщения Property Manager (Менеджере свойств). Сообщение содержит информацию о пригодности геометрии для анализа. Или активизируйте команду Check Geometry в панели инструментов Flow Simulation/Tools.

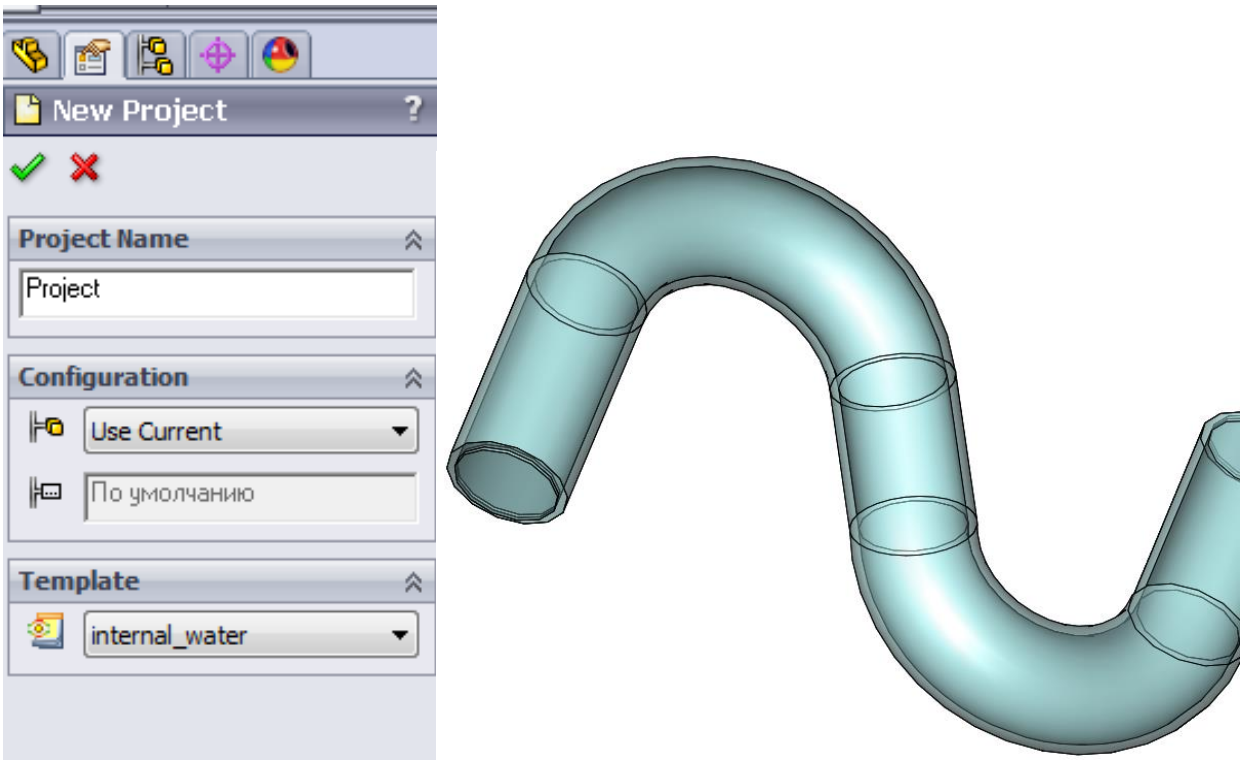


Рис. 5.2. Создание нового проекта

Если геометрия пригодна для анализа, задайте параметры Property Manager. Если геометрия непригодна для анализа, продолжите выполнение данной процедуры, чтобы закрыть впускное и выпускное отверстия. Нажмите на OK и закройте впускное и выпускное отверстия с помощью твердотельного элемента.

Или воспользуйтесь командой Create Lids в панели инструментов Flow Simulation/Tools**.** Данная команда позволяет создавать крышки на указанных гранях автоматически.

В SolidWorks Flow Simulation можно использовать следующие функции:

1. Анализ теплообмена.

2. Расчет теплового потока вблизи адиабатных стенок или в твердотельных моделях.

3. Указание различных типов источников тепла.

4. Назначение моделям различных материалов, которые хранятся в инженерной базе данных.

5. Определение собственных материалов способом задания им значений физических свойств, таких как теплопроводность, теплоемкость и т.д.

6. Расчет теплоты излучения. Инженерная база данных содержит излучающие поверхности – стенка черного тела, стенка белого тела, серое тело с произвольным альбедо, а также широкий спектр поверхностей реальных материалов.

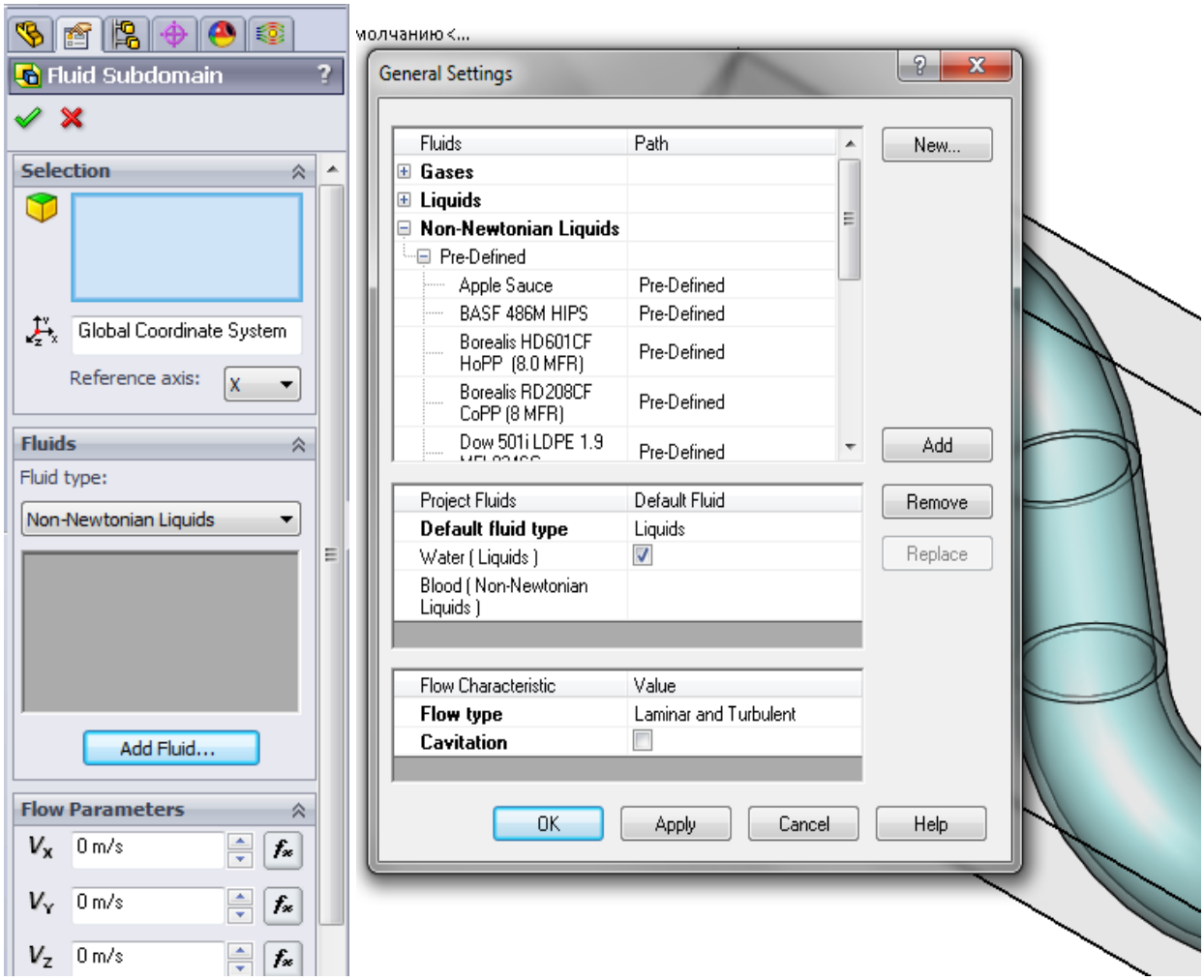


Рис. 5.3. Выбор жидкости потока

Характеристики анализа в Flow Simulation будут меняться в зависимости от типа потока. Возможны следующие варианты анализа:

1. Анализ потока до десяти жидкостей различных типов (жидкости, газы/пар, реальные газы, вязкопластичные жидкости, а также сжимаемые жидкости). База данных содержит множество жидкостей с определенными свойствами.

2. Анализ проблемы с участием нескольких жидкостей различного типа при условии разделения их областей с помощью подобластей, т. е. текучие среды должны быть разделены стенками.

3. Анализ взаимного растворения сред. Смешивать можно только жидкости одного типа (две разных жидкости или два разных газа).

4. Определение жидкостей.

После того, как модель стала полностью замкнутой, можно задать характеристики потока, выбрав тип жидкости или газа и указав дополнительные параметры потока (скорость, если это необходимо) (рис. 5.3). Flow Simulation может просчитывать проект с любым типом потока: только турбулентный, только ламинарный, ламинарный и турбулентный. Flow Simulation также может работать с низким и высоким числом Маха сжимаемых потоков газов.

Далее необходимо задать условия впускного и выпускного отверстий потока (рис. 5.4).

Для этого выбирается грань, к которой будут применены граничные условия впускного отверстия. Грань должна соприкасаться с жидкостью. Можно выбрать только одну грань для впускного отверстия. Обязательным условием является использование показателя Давление для условия либо впускного, либо выпускного отверстия.

Основные показатели впускного отверстия:

1. *Давление*. Программа использует давление в качестве показателя потока. Задайте значение в поле Давление среды. SolidWorks Flow интерпретирует это значение как суммарное давление входящих потоков, а также как статическое давление для исходящих потоков. Такая же интерпретация применяется в случае прохождения вихря через впускное или выпускное отверстие. Если показатель Давление используется как для впускного, так и выпускного отверстия, то давление во впускном отверстии не должно превышать давление в выпускном отверстии.

2. *Мощность потока*. Программа использует мощность потока в качестве показателя потока. Задайте значение в поле Мощность потока.

3. *Величина потока*. Программа использует величину потока в качестве показателя потока. Задайте значение в поле Величина потока.

Далее выбирается грань, к которой необходимо применить граничные условия выпускного отверстия. Грань должна соприкасаться с жидкостью. Показатели для выпускного отверстия:

1. *Давление*. Задайте значение в поле Давление среды.

2. *Мощность потока*. Задайте значение в поле Мощность потока.

При задании граней, которые служат границами впускного и выпускного отверстий, программа обозначит стрелками направление потока.

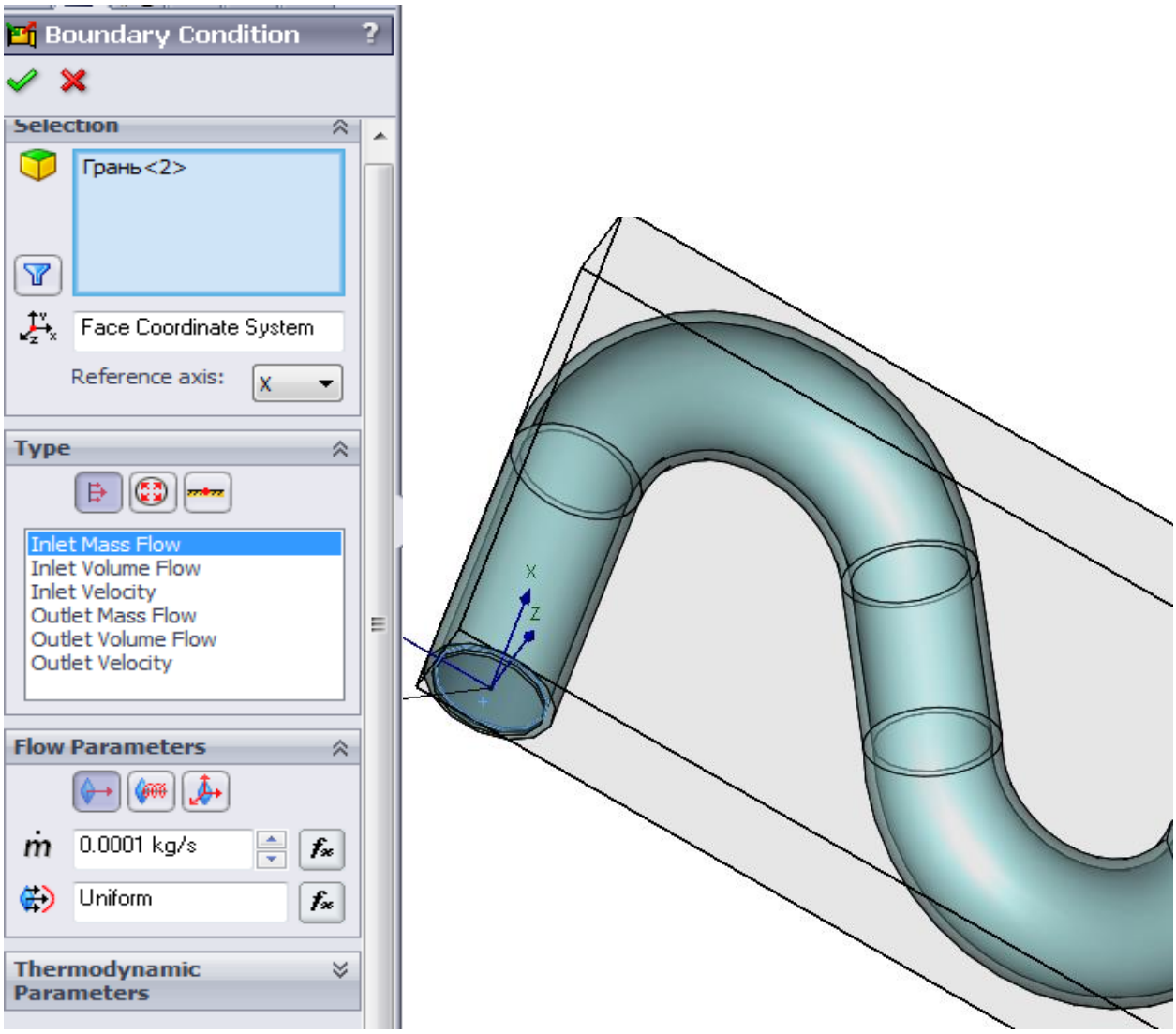


Рис. 5.4. Задание граничных условий на входном отверстии

Также в окне граничных условий можно указать параметр Real Wall или Ideal Wall для учета влияния стенок на движение жидкости.

Далее во вкладке Global Goals выбираются параметры, которые необходимо рассчитать при проведении анализа потока. Например, можно выбрать среднее значение скорости потока (рис. 5.5).

После того, как заданы все входные параметры, можно выполнить расчет. Для этого щелкните правой кнопкой мыши на названии проекта и в выпадающем меню выберите Run, или в меню Flow Simulation выберите Solve/Run.

Программа начнет расчет. Подробности расчета можно отслеживать в отдельном окне. После того, как программа закончит расчет, в папке Резуль-

таты необходимо выбрать тип представления результатов. Например, можно выбрать траектории. Траектории являются касательными к скорости потока в каждой точке. Откроется окно настроек траекторий, где можно задать необходимые параметры (рис. 5.6, *а*) – число линий траекторий, тип отображения (линии или шарики), отображаемый параметр, а также грань, от которой будут двигаться траектории.

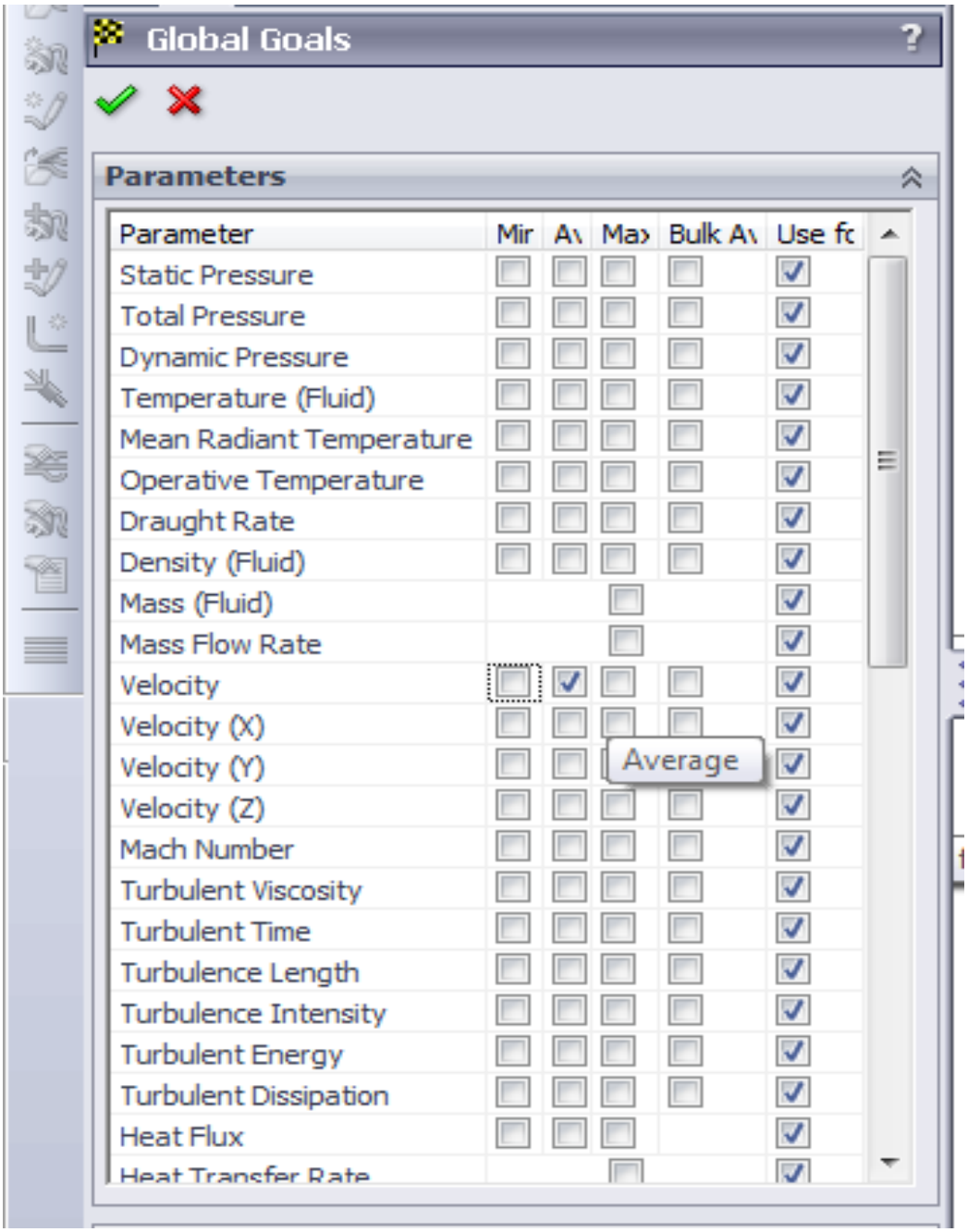
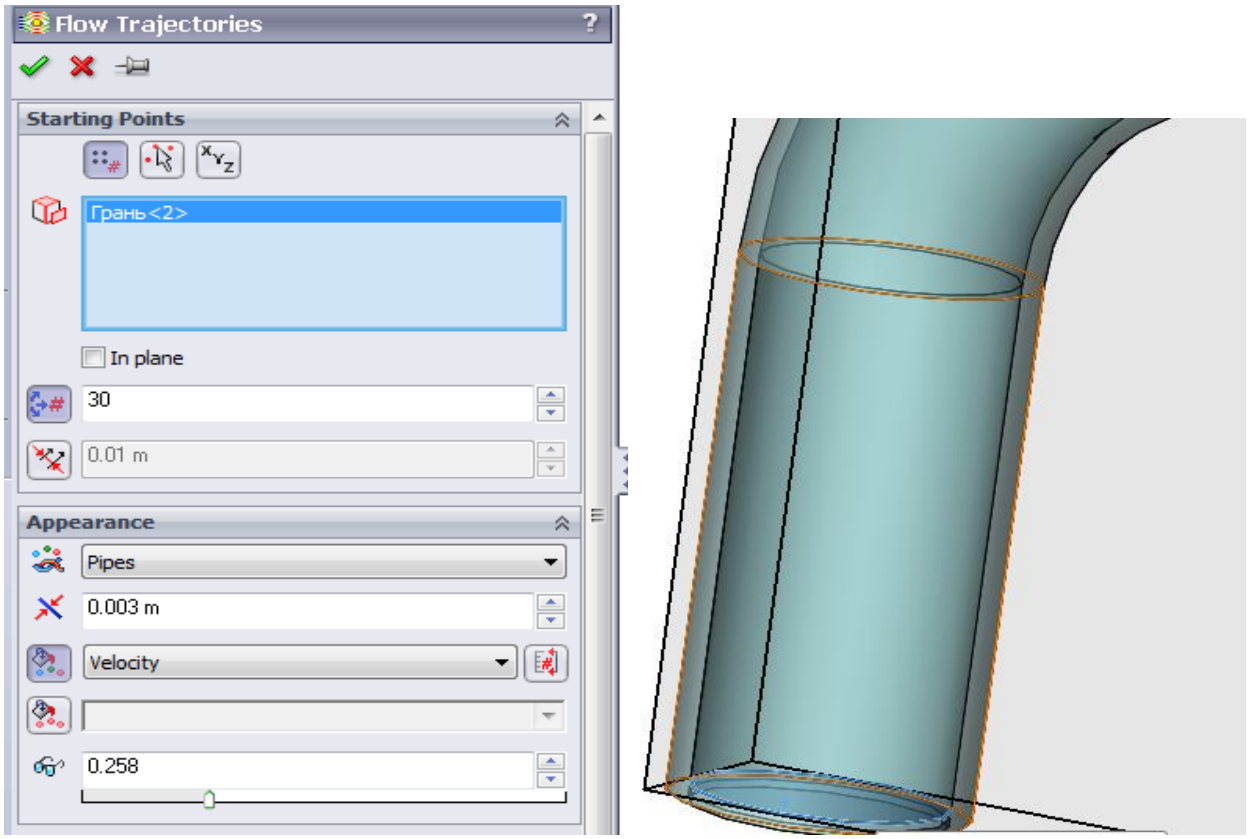


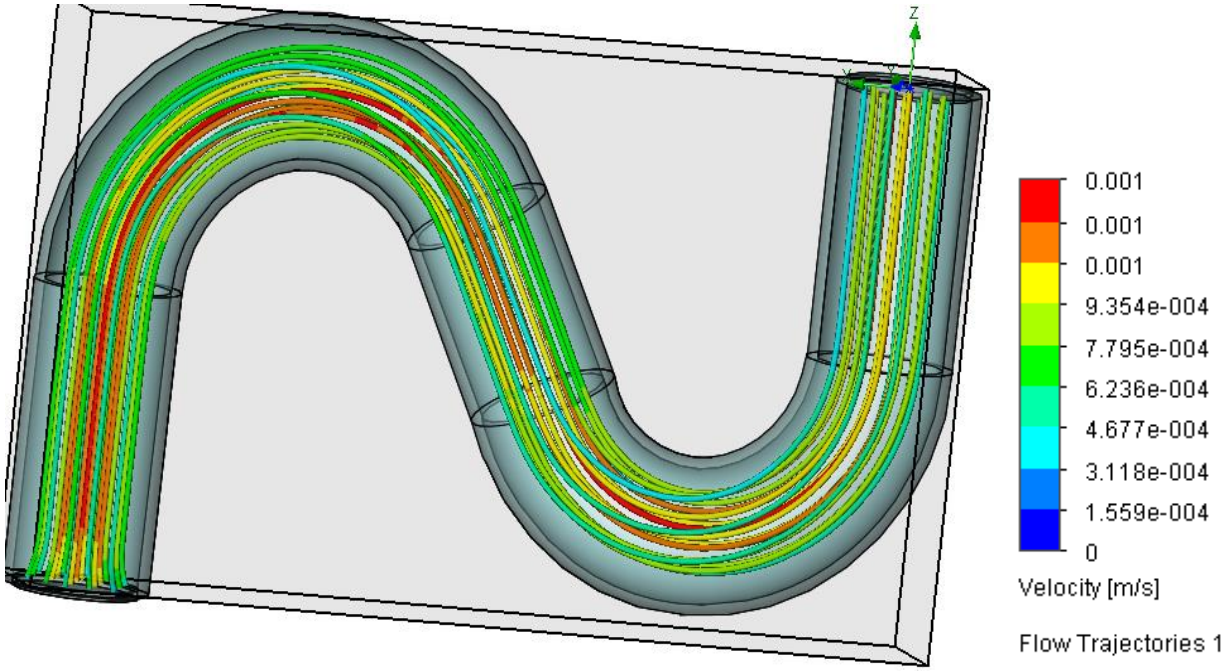
Рис. 5.5. Выбор целей исследования

В результате получается эпюра изменения скорости в процессе движения потока по трубке (рис. 5.6, *б*). Можно создать наглядную картину изме-

нения скорости потока во время движения. Для этого щелкните правой кнопкой мыши на название эпюры траекторий в папке Результаты и выберите Play. Программа начнет проигрывать виртуальное движение потока и изменение скорости в процессе этого движения.



а



б

Рис. 5.6. Траектории скорости потока

Также это движение можно сохранить в виде отдельного видеоролика формата AVI. Для этого вместо параметра Play выберите параметр Animation. Программа будет проигрывать ролик в отдельном окне, в котором можно настраивать параметры анимации и сохранить видеоролик в рабочей или любой другой папке.

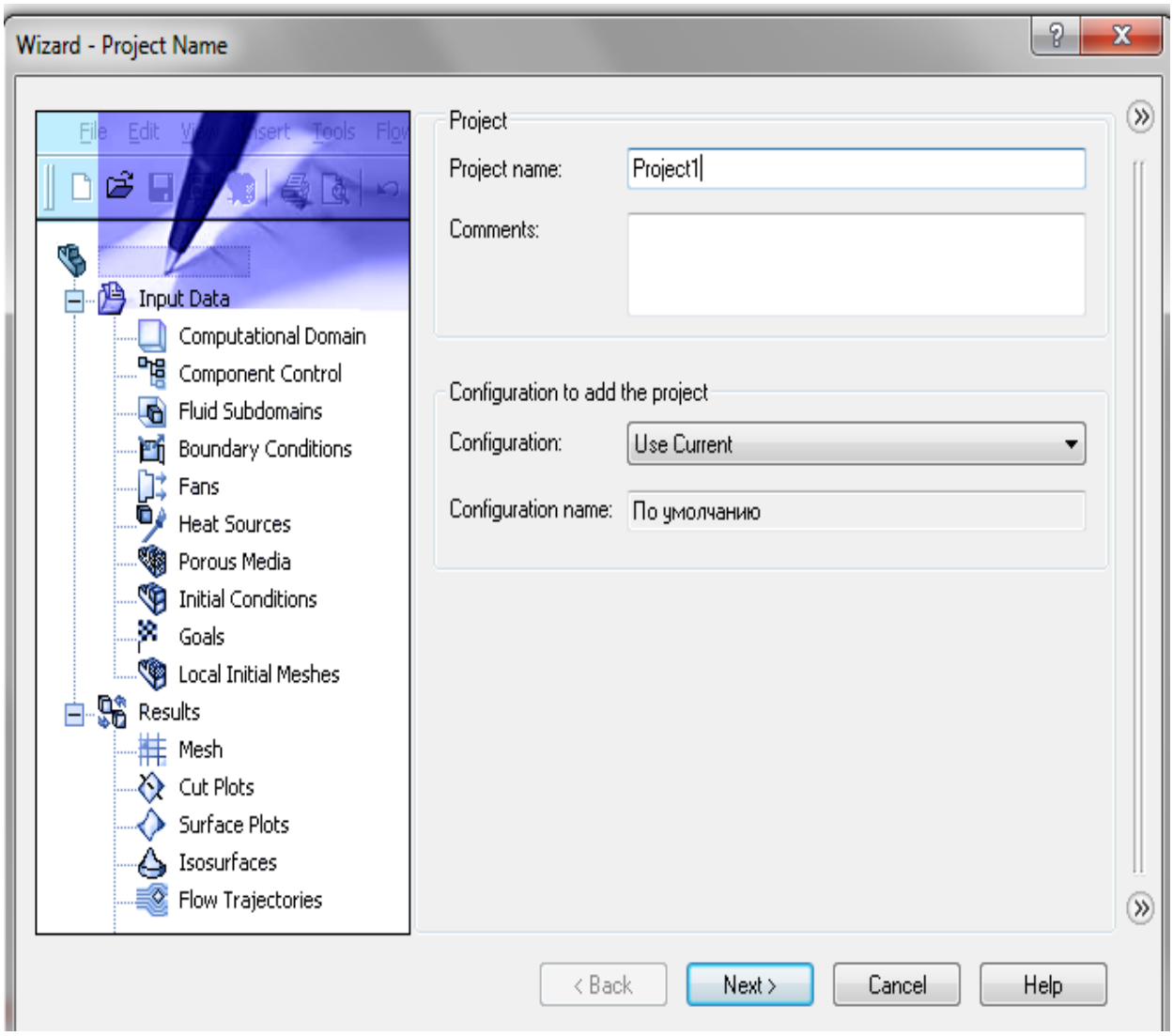


Рис. 5.7. Создание проекта при помощи Wizard

Можно сохранить снимок траекторий потоков в виде изображения JPEG. Изображения автоматически сохраняются в папке fxp1, которая находится в той же папке, что и модель.

Можно создать отчет в формате Microsoft Word, содержащего всю информацию по проекту, максимальные значения скорости потока, а также все снятые изображения. Сохраните отчет в нужном месте.

Альтернативным способом задания параметров анализа объекта в Flow Simulation является использование помощника.

Чтобы активировать помощника нажмите Flow Simulation/Project/Wizard. В появившемся окне выберите Create new, чтобы создать новую конфигурацию, и назовите ее Project1 (рис. 5.7). Flow Simulation создаст новую конфигурацию и сохранит все данные в новой папке.

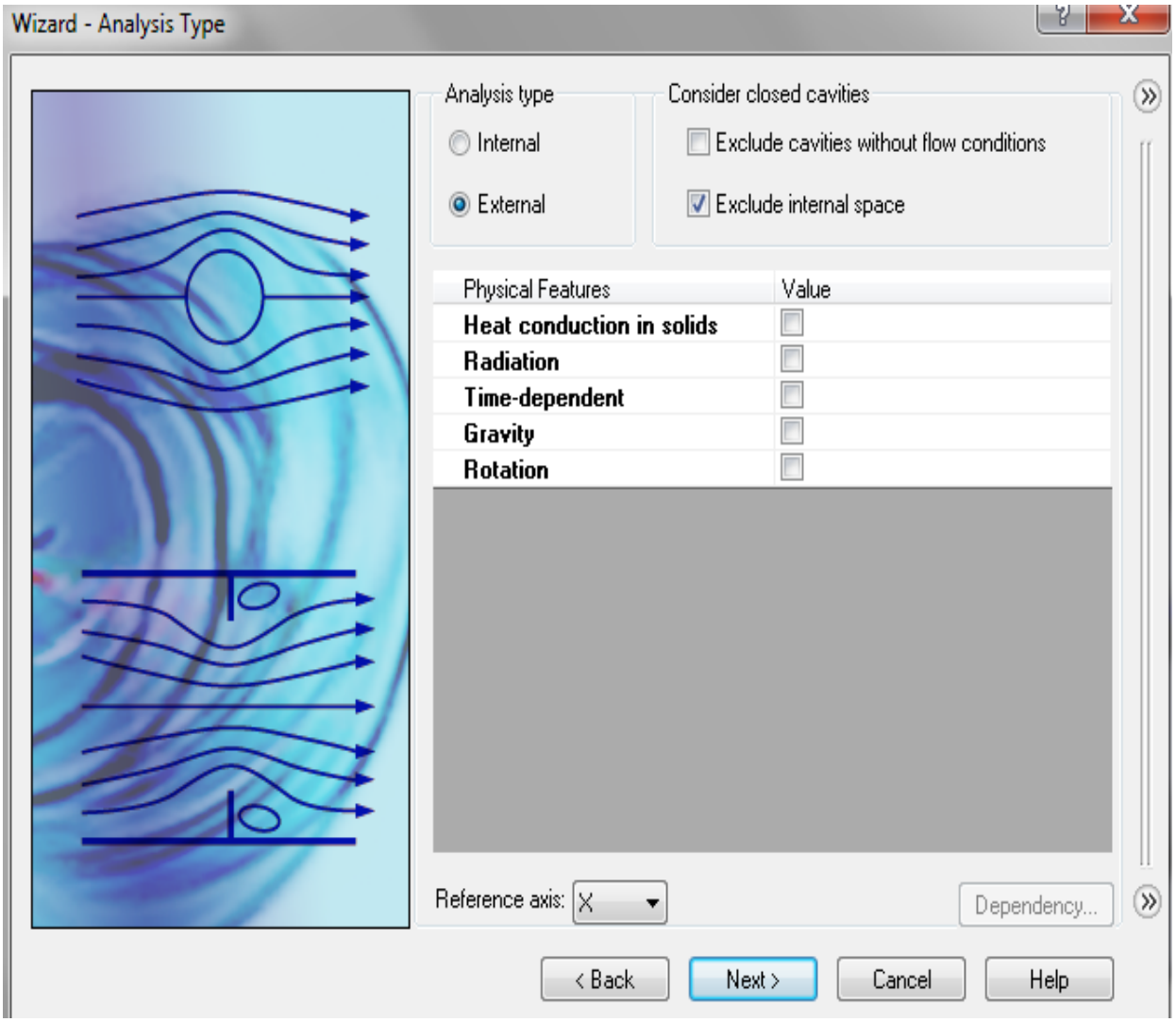


Рис. 5.8. Выбор типа анализа и дополнительных параметров

Выберите систему единиц измерения. После закрытия Wizard вы можете в любой момент изменить систему единиц измерения, нажав Flow Simulation-Units. В Flow Simulation есть несколько предустановленных систем единиц измерения. Можно создать свою собственную систему единиц измерения и переключаться между ними в любое время.

Выберите тип анализа Internal, если хотите проанализировать поток сквозь модель. Или выберите тип анализа External, если поток движется около модели (рис. 5.8). Внешний тип анализа потока применяется при обтекании модели потоком, например, поток вокруг самолетов, автомобилей, строений и т. д. Для внешнего анализа удаленными границами являются границы

вычислительной области. Можно решить комбинированную внешнюю и внутреннюю задачу в проекте Flow Simulation, например, поток вокруг и через здание. Если исследование включает в себя комбинацию внутреннего и внешнего потоков, вы должны установить внешний тип анализа External.

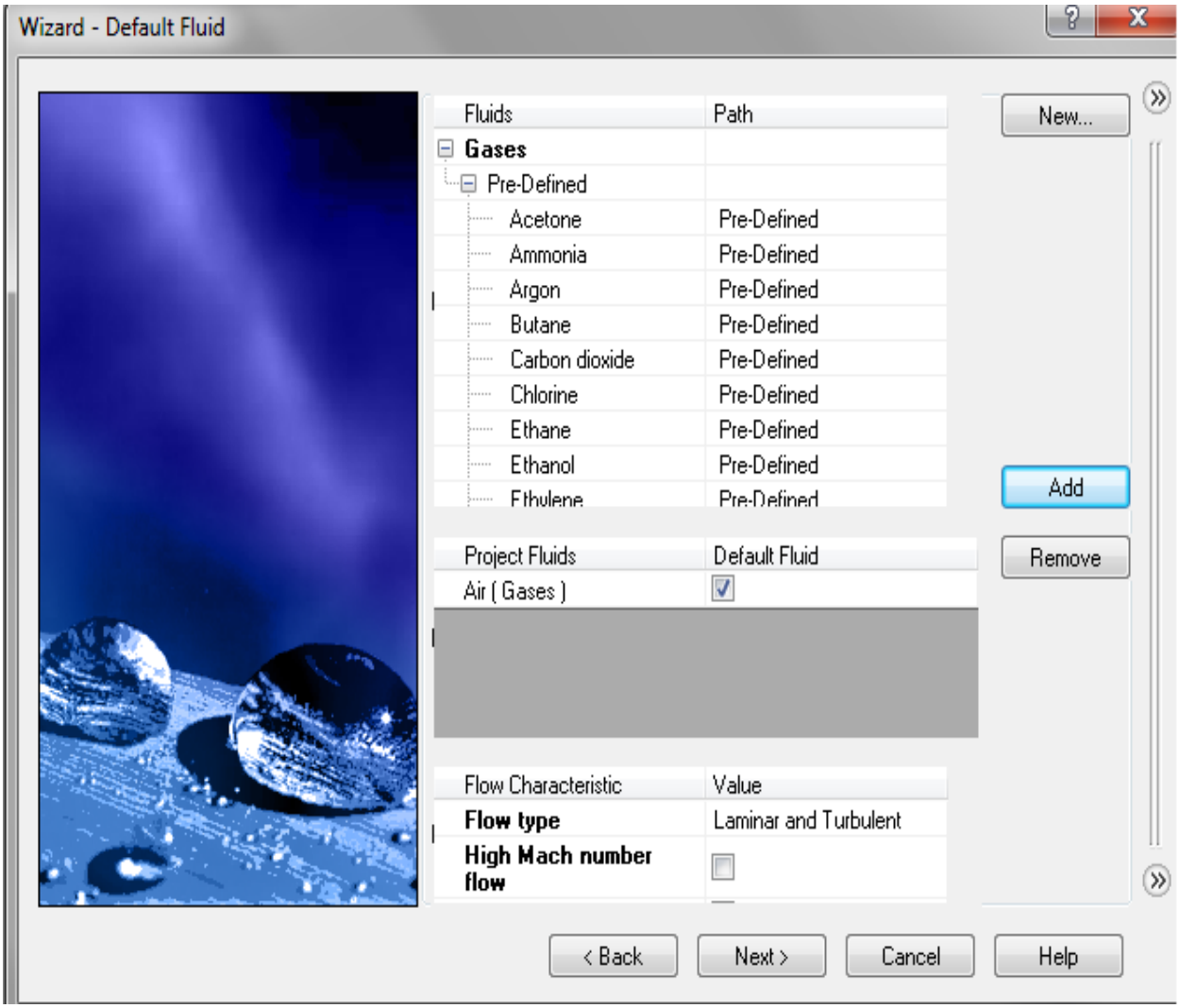
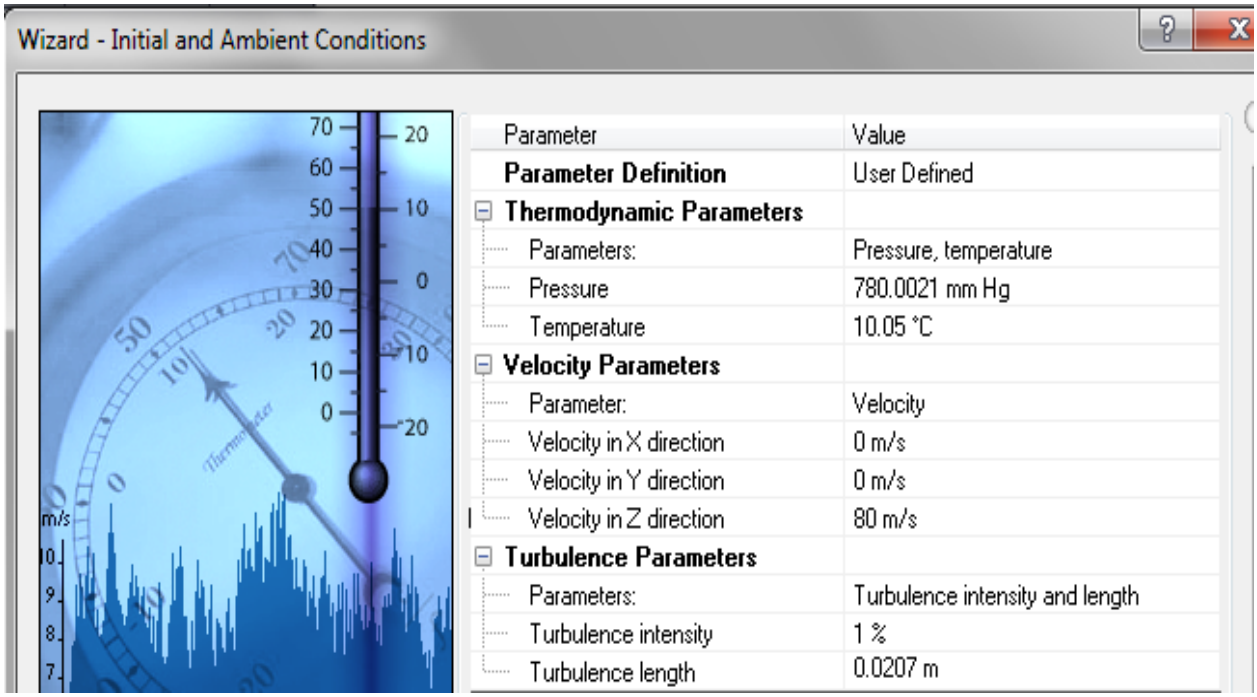


Рис. 5.9. Выбор типа потока

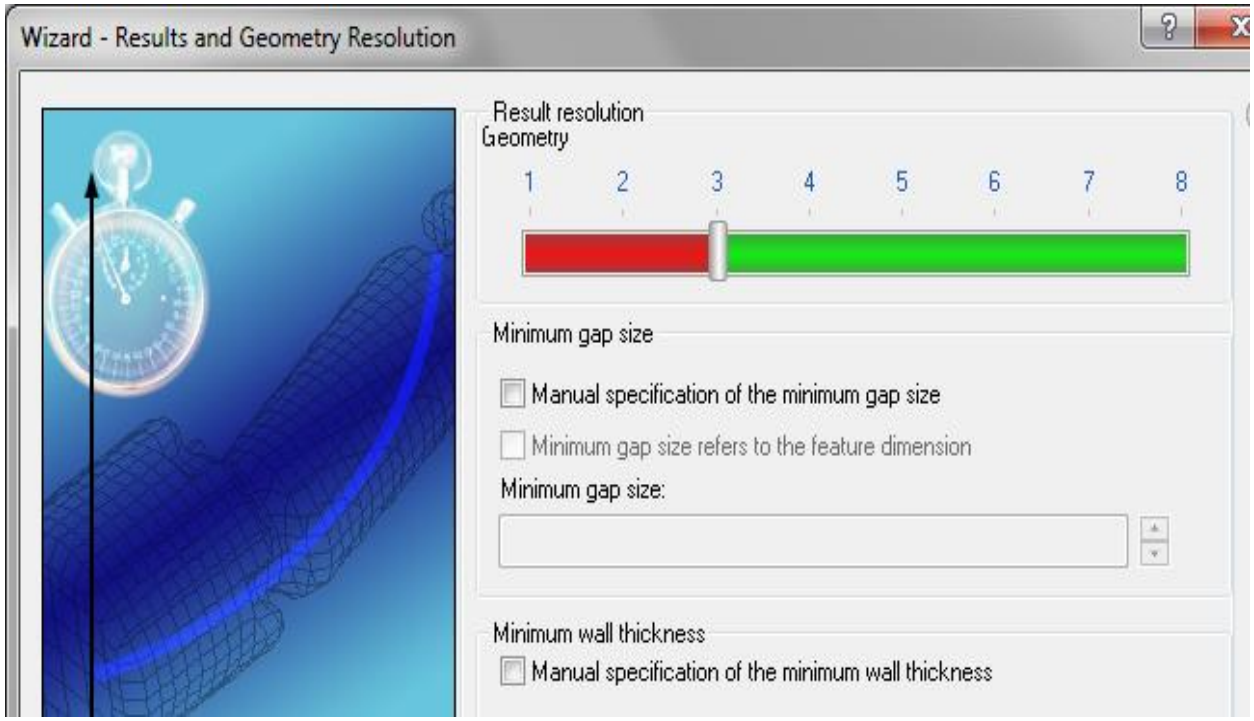
Программа содержит опцию Exclude cavities without flow condition, которая позволять игнорировать полости, несущественные для анализа. Поэтому, если в модели есть полости, которые не оказывают существенного влияния на характеристики потока, их можно исключить из анализа, активировав данную команду, и в результате Flow Simulation не будет тратить дополнительные память и ресурсы процессора для их обработки, а значит, время анализа значительно уменьшится.

В колонке Fluids раскройте раздел Gases и выберите, например, Air в качестве текучей среды. Чтобы выбрать текучую среду, щелкните два раза по ней левой клавишей мыши или выделите ее и нажмите Add (рис. 5.9).

Если не выбрана опция теплообмена внутри твёрдых тел, доступны только опции определения теплообмена поверхностей, контактирующих с текучей средой. Этот шаг определяет начальные параметры стен.



а



б

Рис. 5.10. Панели параметров потока и точности полученных результатов

Значение Adiabatic wall означает идеально изолированные стенки. Если задать граничное условие Real Wall, то можно установить желаемое значение

шероховатости стен всей модели. R_z – параметр, отвечающий за шероховатость. Оставьте значение по умолчанию Adiabatic wall.

В следующем окне можно задать начальные параметры давления, температуры и скорости: Pressure 708 mm Hg; Temperature 10 °C; Velocity in Z direction 80 m/s. В пункте Turbulence Parameters установите следующие параметры: Turbulence intensity 1% ; Turbulence length 0.0205 m (рис. 5.10, *а*).

Result Resolution – это мера желаемой точности полученных результатов (рис. 5.10, *б*). Этот параметр контролирует не только плотность сетки, но также задает много других параметров для вычислительной программы, например, критерии конвергенции.

При высоких значениях Result Resolution будет создана более детальная сетка и установлены более строгие критерии конвергенции.

Таким образом, Result Resolution определяет баланс между точностью результатов и временем, необходимым на вычисления. Ручной ввод значений минимального зазора (minimum gap size) и минимальной толщины стенки (minimum wall thickness) важен, когда модель включает мелкие элементы. Установка этих значений дает уверенность, что при создании сетки мелкие элементы будут учтены. Например, можно установить минимальную величину канала протока текучей среды в качестве минимального зазора.

Нажмите Finish. Теперь Flow Simulation создал новую конфигурацию с прикрепленными к ней данными исследования. Новая конфигурация носит имя, введенное в Wizard.

Так как характеристики среды указаны, можно перейти к расчету. Запустите расчет FloWorks/Solve/Run.

Создайте с помощью траекторий движения жидкости/газов в пространстве Flow trajectories распределение давления (рис. 5.11, *а*), скорости (рис. 5.11, *б*) или турбулентности воздуха (рис. 5.11, *в*).

С помощью инструментов Results можно получить визуальное отображение следующих результатов:

– эпюры трехмерных профилей;

– эпюры вырезов;

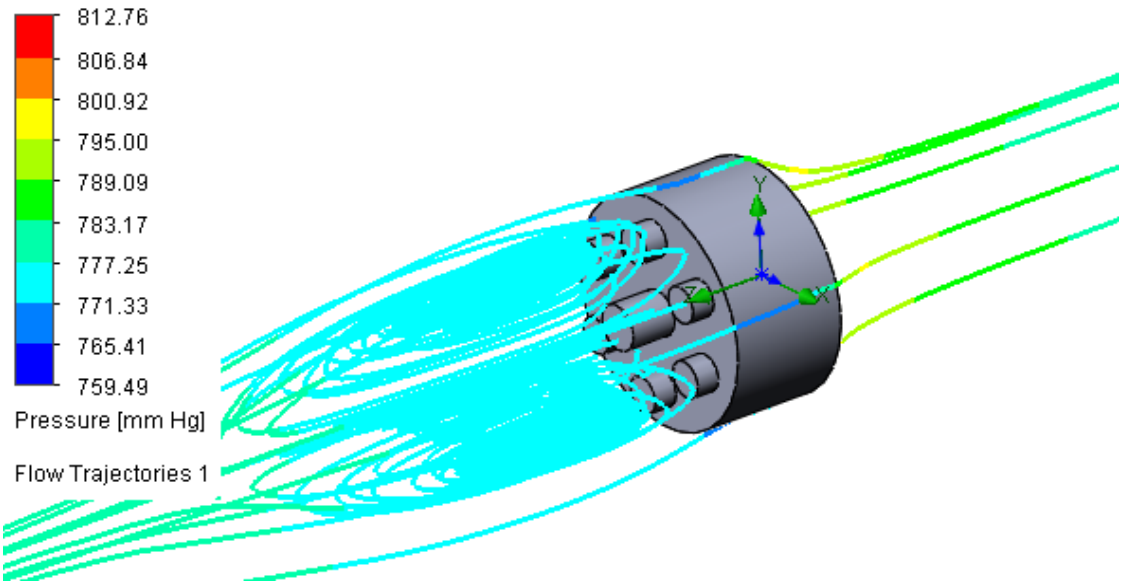
– эпюры поверхностей;

– изометрические поверхности;

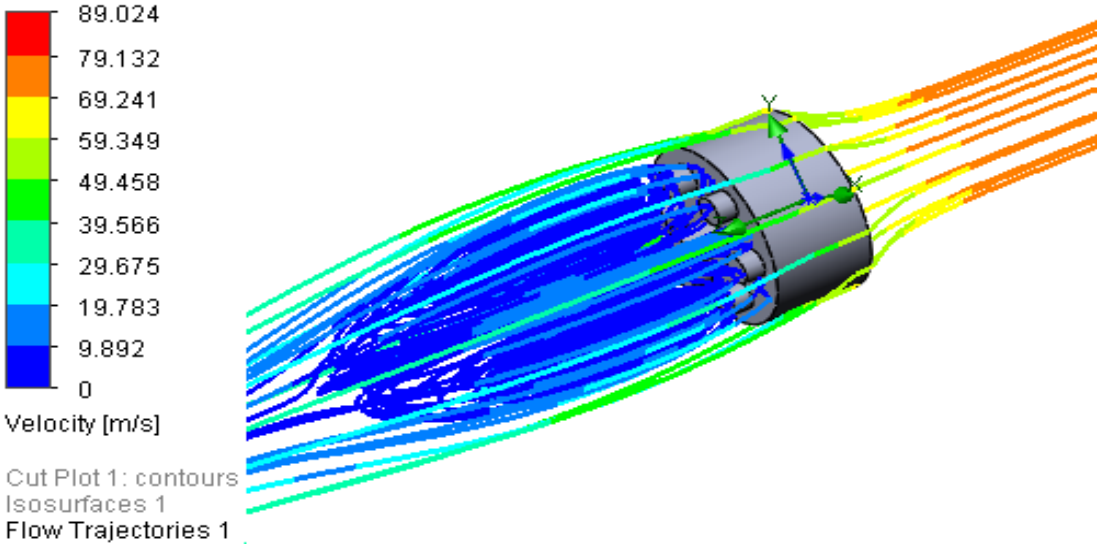
– траектории потока;

– исследование частиц;

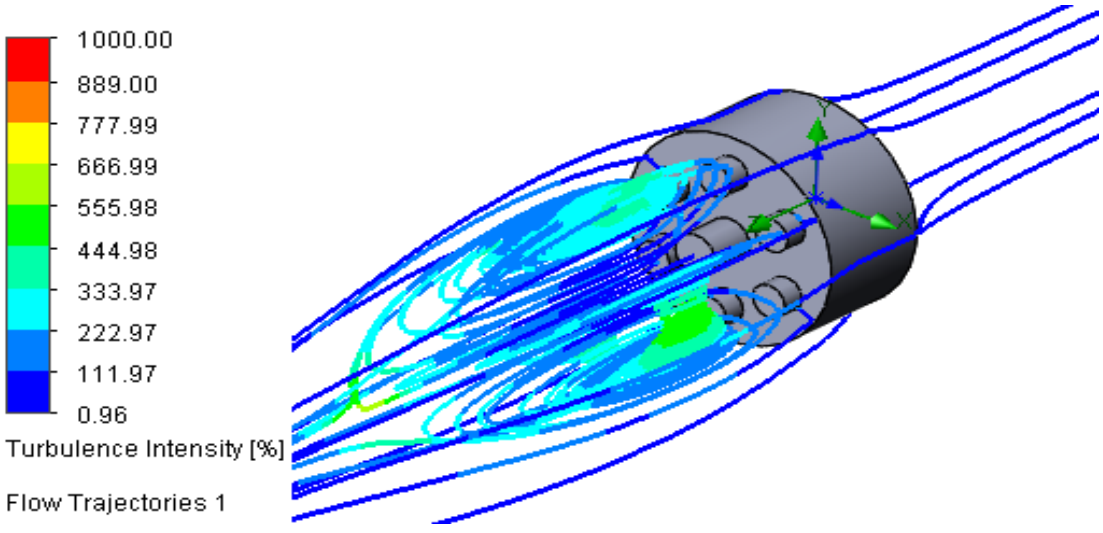
– параметры точки, поверхности и объема;



а



б



в

Рис. 5.11. Траектории изменения движения воздуха

– эпюры XY;

– цели;

– отчеты;

– анимации.

Кроме того, можно получить окончательное значение любого физического параметра, включая величину потока, падение давления и т. д., на заданный момент или максимальное, минимальное, среднее или средневзвешенное значение для поверхности или области объема.

Глава 6. ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Варианты заданий 1 – 6 построены для кровеносных сосудов, представленных в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Тип кровеносного сосуда	Вариант задания									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Левая венечная артерия	*									
Правая венечная артерия		*								
Общая сонная артерия			*							
Наружная сонная артерия				*						
Внутренняя сонная артерия					*					
Внутренняя грудная артерия						*				
Брюшной отдел аорты							*			
Позвоночная артерия								*		
Подключичная артерия									*	
Грудной отдел аорты										*

Задание 1. Исследование напряженно-деформированного и критического состояний кровеносного сосуда с бляшкой ранней стадии развития

Определить давление в гибком баллоне, необходимое для дилатации кровеносного сосуда с бляшкой ранней стадии развития (рис. 6.1) в зависимости от ее длины.

После дилатации внутренний радиус R сегмента сосуда в зоне расположения бляшки должен находиться в пределах 1,05…1,1 внутреннего радиуса сосуда $R_{вс}$. Длина бляшки $l_б$ = 2…5 мм. Длина выделенного в модели сегмента сосуда $l_с = 5\ l_б$. Варианты задания приведены в табл. 6.2.

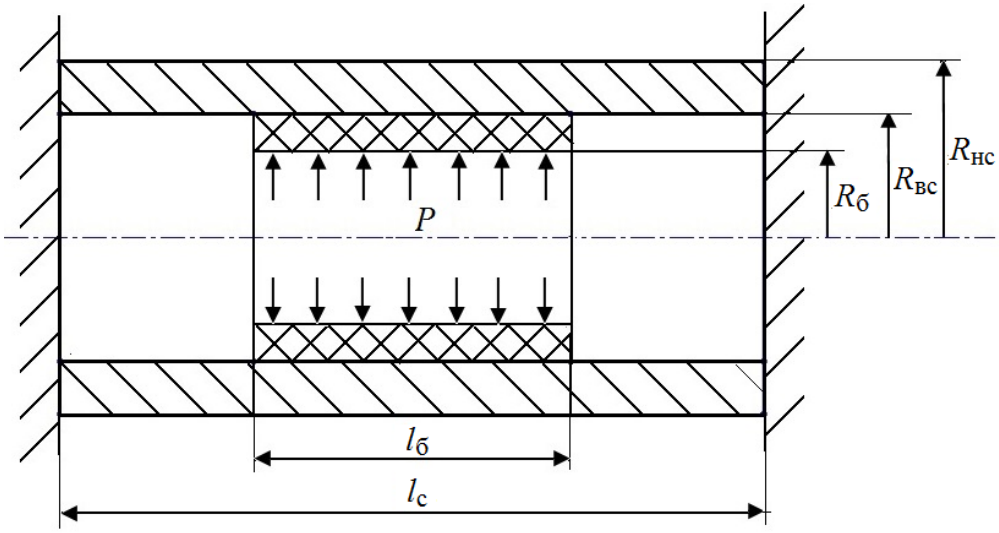


Рис. 6.1. Схема содержательной модели баллонной дилатации кровеносного сосуда с бляшкой ранней стадии развития

Таблица 6.2

Параметры патологически измененного кровеносного сосуда	Варианты задания 2									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Отношение радиуса бляшки $R_б$ к радиусу сосуда $R_{вс}$	0,5	0,6	0,7	0,5	0,6	0,7	0,5	0,6	0,7	0,5
Отношение модуля нормальной упругости бляшки $E_б$ к модуля нормальной упругости $E_{вс}$	0,5	0,3	0,4	0,6	0,7	0,8	0,4	0,3	0,5	0,6

Задание 2. Исследование напряженно-деформированного и критического состояний кровеносного сосуда с сегментированной бляшкой ранней стадии развития

Определить давление в гибком баллоне, необходимое для дилатации кровеносного сосуда с сегментированной бляшкой ранней стадии развития (рис. 6.2) в зависимости от радиуса бляшки $R_б$.

После дилатации внутренний радиус R сегмента сосуда в зоне расположения бляшки должен находиться в пределах 1,05…1,1 внутреннего радиуса сосуда $R_{вс}$.

Радиус бляшки меняется $R_б$ = (0,4 … 0,8) $R_{вс}$ с равным шагом.

Длина выделенного в модели сегмента сосуда $l_с = 5\, l_б$. Варианты задания приведены в табл. 6.3.

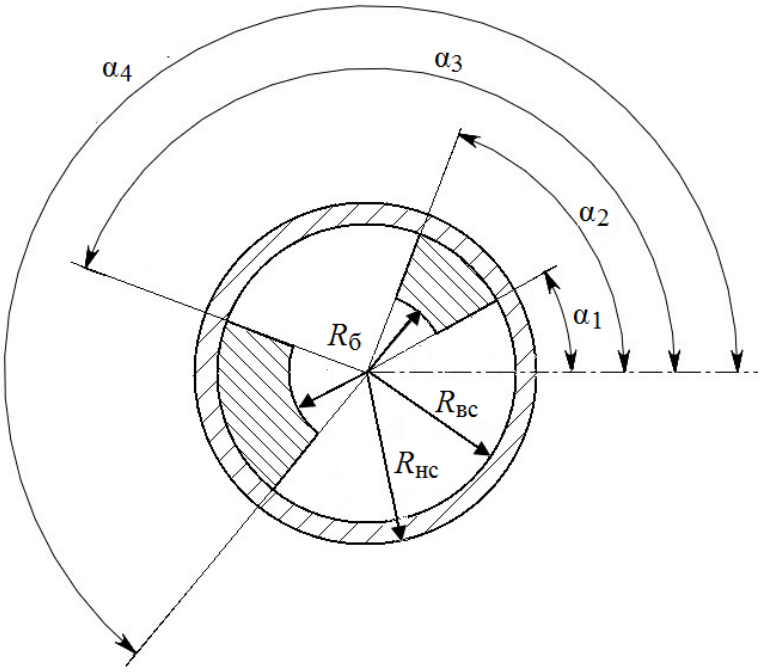


Рис. 6.2. Схема поперечного сечения геометрической модели кровеносного сосуда с бляшкой ранней стадии развития

Таблица 6.3

Параметры патологически измененного кровеносного сосуда	Варианты задания 2									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Длина бляшки $l_б$, мм	2	3	4	5	6	2	3	4	5	6
Отношение модуля нормальной упругости бляшки $E_б$ к модулю нормальной упругости $E_{вс}$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,5	0,6	0,7	0,8	0,6
α_1	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75
α_2	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
α_3	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240
α_4	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300

Задание 3. Исследование напряженно-деформированного и критического состояний кровеносного сосуда с капсулированной бляшкой поздней стадии развития

Определить давление в гибком баллоне, необходимое для дилатации кровеносного сосуда с бляшкой поздней стадии развития (рис. 6.3) в зависи-

мости от отношения модуля нормальной упругости капсулы бляшки $E_{кб}$ к модулю нормальной упругости бляшки $E_б$.

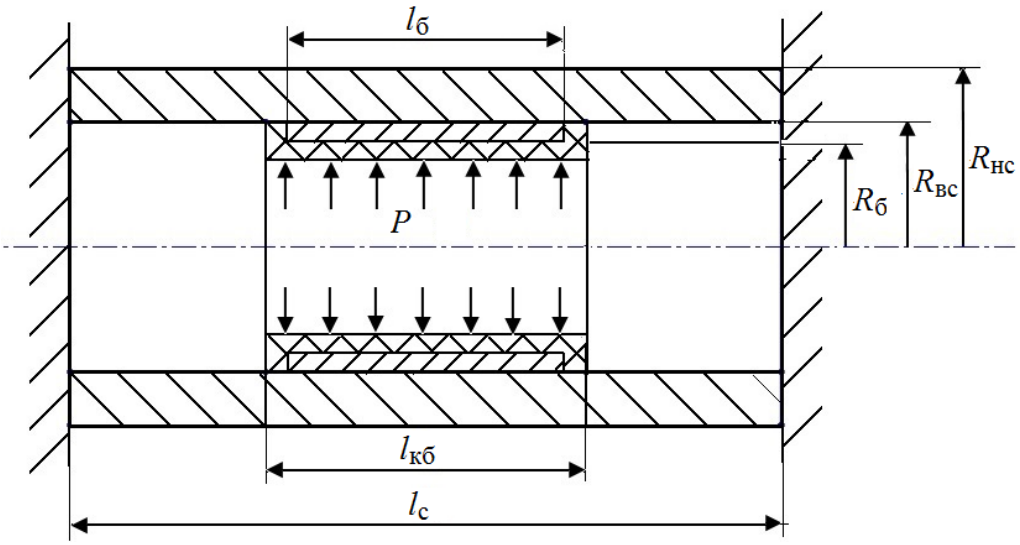


Рис. 6.3. Схема модели баллонной дилатации кровеносного сосуда с бляшкой поздней стадии развития

Таблица 6.4

Параметры патологически измененного кровеносного сосуда	Варианты задания 3									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Отношение радиуса бляшки $R_б$ к радиусу сосуда $R_{вс}$	0,5	0,6	0,7	0,5	0,6	0,7	0,5	0,6	0,7	0,5
Отношение модуля нормальной упругости бляшки $E_б$ к модулю нормальной упругости сосуда $E_{вс}$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,5	0,6	0,7	0,8	0,6
Длина бляшки, мм	2	3	4	5	6	2	3	4	5	6
Отношение толщины капсулы бляшки $h_{кб}$ к длине бляшки $l_б$	0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2	0,1

После дилатации внутренний радиус R сегмента сосуда в зоне расположения бляшки должен находиться в пределах 1,05…1,1 внутреннего радиуса сосуда $R_{вс}$.

Отношение модуля нормальной упругости капсулы бляшки к модулю нормальной упругости бляшки $E_{кб}/ E_б = 2 \ldots 10$.

Длина выделенного в модели сегмента сосуда $l_c = 5\ l_б$. Варианты задания приведены в табл. 6.4.

Задание 4. Исследование напряженно-деформированного и критического состояний сферической аневризмы кровеносного сосуда

Построить зависимость экстремальных значений напряжений в сегменте кровеносного сосуда со сферической аневризмой (рис. 6.4):

– от толщины стенки аневризмы h_a, изменяющейся в диапазоне 0,1…0,5 от толщины стенки сосуда h_c;

– радиуса сферической аневризмы R_a, изменяющейся в диапазоне 2…10 от радиуса сосуда R_c.

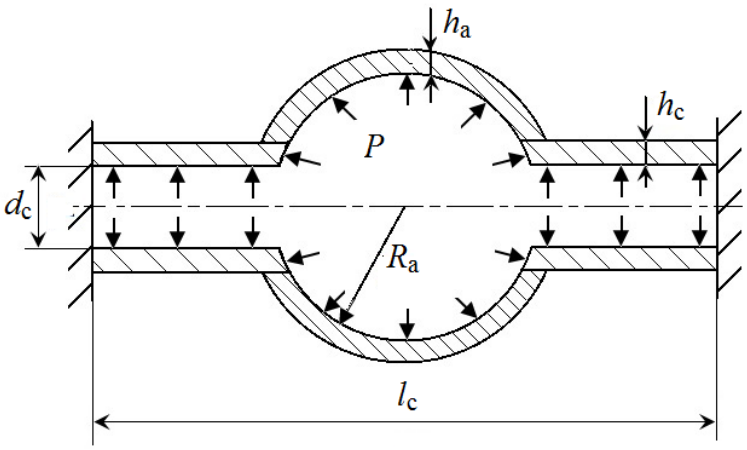


Рис. 6.4. Схема модели кровеносного сосуда со сферической аневризмой

Таблица 6.5

Параметры патологически измененного кровеносного сосуда	Варианты задания 4									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Отношение радиуса аневризмы R_a к диаметру сосуда d_c	1,5	2	2,5	3	3,5	1,5	2	2,5	3	3,5
Отношение толщины стенки аневризмы h_a к толщине стенки сосуда h_c	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1

Проанализировать критическое состояние аневризмы. Давление в кровеносном сосуде p = 220 мм рт. ст. (29,3 кПа). Длина сегмента сосуда $l_c = 10\ R_a$. Варианты задания приведены в табл. 6.5.

Задание 5. Исследование напряженно-деформированного и критического состояний куполообразной аневризмы кровеносного сосуда

Построить графическую зависимость экстремальных значений напряжений в сегменте кровеносного сосуда с куполообразной аневризмой (рис. 6.5) :

– от толщины стенки аневризмы h_a, изменяющейся в диапазоне 0,1…0,5 от толщины стенки сосуда h_c;

– радиуса сферической аневризмы R_a, изменяющейся в диапазоне 2…10 от радиуса сосуда R_c.

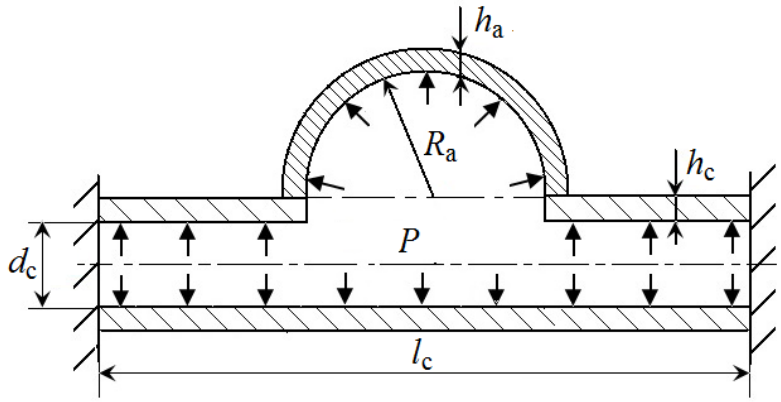


Рис. 6.5. Схема модели кровеносного сосуда с куполообразной аневризмой

Таблица 6.6

Кровеносный сосуд	Варианты задания 5									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Отношение радиуса аневризмы R_a к диаметру сосуда d_c	1,5	2	2,5	3	3,5	1,5	2	2,5	3	3,5
Отношение толщины стенки аневризмы h_a к толщине стенки сосуда h_c	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1

Проанализировать критическое состояние аневризмы. Давление в кровеносном сосуде p = 220 мм рт. ст. (29,3 кПа). Длина сегмента сосуда $l_c = 10\ R_a$. Варианты задания приведены в табл. 6.6.

Задание 6. Исследование напряженно-деформированного и критического состояний мешотчатой аневризмы кровеносного сосуда

Построить графическую зависимость экстремальных значений напряжений в сегменте кровеносного сосуда с мешотчатой аневризмой (рис. 6.6):

– от толщины стенки аневризмы h_a, изменяющейся в диапазоне 0,1…0,5 от толщины стенки сосуда h_c;

– радиуса сферической аневризмы R_a, изменяющейся в диапазоне 2…10 от радиуса сосуда R_c.

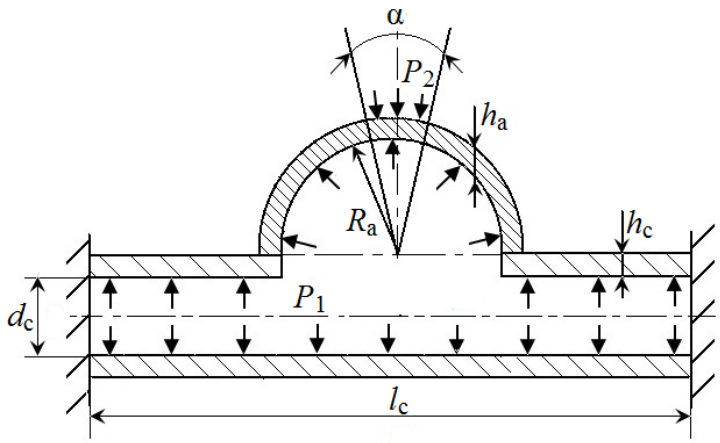


Рис. 6.6. Схема модели кровеносного сосуда с мешотчатой аневризмой

Таблица 6.7

Кровеносный сосуд	Варианты задания 6									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Отношение радиуса аневризмы R_a к диаметру сосуда d_c	1,5	2	2,5	3	3,5	1,5	2	2,5	3	3,5
Отношение толщины стенки аневризмы h_a к толщине стенки сосуда h_c	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1
Центральный угол α, град	30	45	20	30	45	20	30	45	20	20

Проанализировать критическое состояние аневризмы. Давление в кровеносном сосуде $p_1 = 220$ мм рт. ст. (29,3 кПа). Длина сегмента сосуда $l_c = 10\ R_a$.

Таблица 6.8

Параметры для модели левого желудочка сердца	Варианты заданий 7 – 10									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Длина левого желудочка $L = 1{,}5 \cdot b$, мм	120	130	140	150	120	130	140	150	120	130
Ширина левого желудочка a, мм	40	42	45	47	50	40	42	45	47	50
Толщина стенки левого желудочка h_c, мм	10	12	15	10	12	15	10	12	15	10
Модуль нормальной упругости желудочка $E_ж \cdot 10^5$, Па	1,85	1,85	1,85	1,85	1,85	1,85	1,85	1,85	1,85	1,85
Давление в левом желудочке $p \cdot 10^{-4}$, Па	1,6	1,7	1,8	1,9	1,6	1,7	1,8	1,9	1,8	1,9

Поверхностную нагрузку на аневризму p_2 определить из условия отсутствия перемещений в сегменте аневризмы при действии давлений p_1 и p_2. Варианты задания приведены в табл. 6.7.

Варианты заданий 7–10 построены для исследования напряженно-деформированного состояния в левом желудочке сердца при различных патологиях и коррекции. Общие для заданий исходные данные представлены в табл. 6.8.

Задание 7. Исследование напряженно-деформированного и критического состояний аневризмы левого желудочка сердца

Построить зависимость экстремального значения напряжения в аневризме левого желудочка (рис. 6.7)

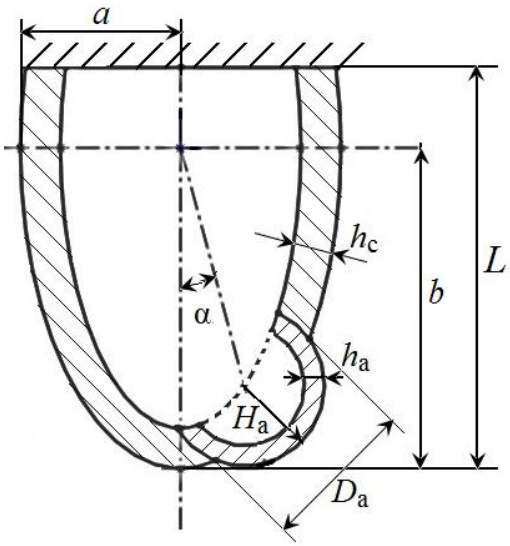


Рис. 6.7. Схема модели левого желудочка с аневризматическим образованием

от модуля нормального упругости аневризмы.

Отношение модуля нормальной упругости аневризмы $E_а$ к модулю нормальной упругости левого желудочка сердца $E_ж$ = 0,5; 1,5; 2. Проанализировать критическое состояние аневризмы. Варианты задания приведены в табл. 6.9.

Таблица 6.9

Параметры аневризмы левого желудочка сердца	Варианты задания 7									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Отношение диаметра основания аневризмы $D_а$ к толщине стенки левого желудочка $h_с$	0,5	1	1,5	2	2,5	0,5	1	1,5	2	2,5
Отношение высоты купола аневризмы $H_а$ к толщине стенки левого желудочка $h_с$	1,5	1,7	1,8	2	1,5	1,7	1,8	2	1,2	1,1
Толщина стенки аневризмы $h_а$, мм	5	6	7	5	6	7	5	6	7	5
Угол α, град	30	45	60	90	120	150	180	30	45	60

Задание 8. Исследование напряженно-деформированного и критического состояний левого желудочка сердца с некротизированным участком

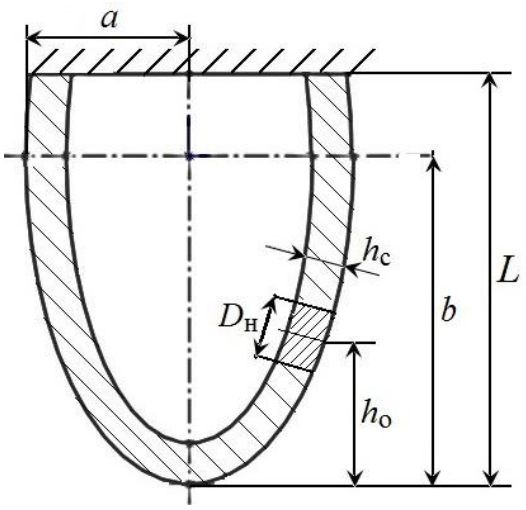


Рис. 6.8. Схема модели левого желудочка с некротизированным участком

Построить зависимость экстремального значения напряжения левого желудочка сердца с некротизированным участком (рис. 6.8) от модуля нормального упругости некротизированного участка.

Отношение модуля нормальной упругости некротизированного участка $E_н$ к модулю нормальной упругости желудочка $E_ж$ 0,5; 1,5; 2; 3.

Таблица 6.10

Параметры некроза левого желудочка сердца	Варианты задания 8									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Отношение диаметра некротизированного участка $D_н$ к толщине стенки левого желудочка $h_с$	0,5	1	1,5	2	2,5	0,5	1	1,5	2	2,5
Отношение высоты расположения оси некротизированного участка $h_о$ к полуоси b	0,5	0,4	0,6	0,5	0,3	0,6	0,5	0,5	0,6	0,7

Проанализировать критическое состояние левого желудочка сердца. Варианты задания приведены в табл. 6.10.

Задание 9. Исследование напряженно-деформированного и критического состояний левого желудочка сердца с коррегированной аневризмой

Построить зависимость экстремального значения напряжения в левом желудочке сердца от модуля нормального упругости имплантата (рис. 6.9).

Отношение модуля нормальной упругости имплантата $E_и$ к модулю нормальной упругости желудочка $E_ж$ = 1,25; 1,5; 2; 2,5.

Проанализировать критическое состояние левого желудочка. Варианты задания приведены в табл. 6.11.

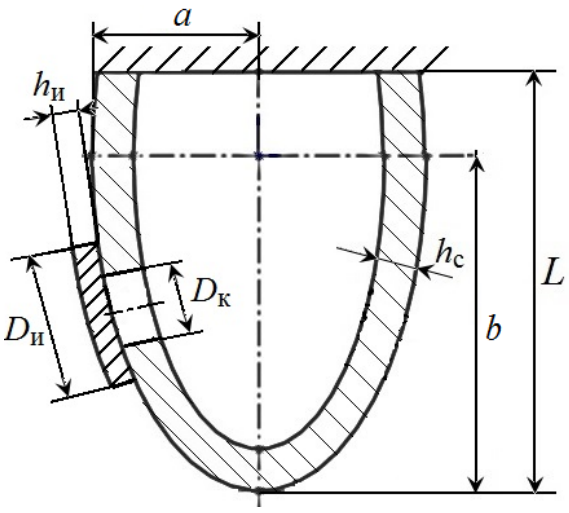


Рис. 6.9. Схема модели левого желудочка с коррегированной аневризмой

Таблица 6.11

Параметры основания коррегированной аневризмы и имплантата	Варианты задания 10									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Отношение диаметра основания коррегированной аневризмы $D_а$ к толщине стенки левого желудочка $h_с$	0,5	1	1,5	2	2,5	0,5	1	1,5	2	2,5

Окончание табл. 6.11

Параметры основания коррегированной аневризмы и имплантата	Варианты задания 10									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Отношение высоты имплантата $H_и$ к толщине стенки левого желудочка $h_с$	0,5	0,7	0,8	1	2	0,6	0,9	1,3	1,2	1,1
Отношение диаметра имплантата $D_и$ к основанию коррегированной аневризмы $D_к$	1,5	1,6	1,7	1,8	2	1,5	1,6	1,7	1,8	2
Отношение высоты расположения оси коррегированного участка $h_о$ к полуоси b	0,5	0,5	0,4	0,6	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,6

Варианты заданий 11 – 13 приведены для исследования напряженно-деформированного состояния в структурах глаза. Общие для заданий исходные данные представлены в табл. 6.12.

Таблица 6.12

Параметры глазного яблока	Варианты заданий									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Внутренний радиус сетчатки $R_с$, мм	12	11,5	11,6	11,8	12,1	12	11,5	11,6	11,8	12,1
Диаметр основания роговицы $d_{ро}$, мм	12	11	11,6	12,4	12	11	11,6	12,4	12	11
Радиус кривизны роговицы $R_{рк}$, мм	40	42	45	47	50	40	42	45	47	50
Толщина склеры $H_{ск}$, мм	0,7	0,6	0,65	0,72	0,75	0,7	0,6	0,65	0,72	0,75
Толщина роговицы $H_р$, мм	0,5	0,55	0,58	0,6	0,7	0,55	0,58	0,6	0,5	0,55
Толщина сосудистой оболочки $H_{со}$, мм	0,35	0,32	0,34	0,36	0,32	0,34	0,35	0,32	0,34	0,36
Толщина сетчатки $H_с$, мм	0,4	0,38	0,39	0,41	0,42	0,38	0,39	0,41	0,4	0,38

Окончание табл. 6.12

Параметры глазного яблока	Варианты заданий									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Диаметр жесткой мозговой оболочки dм, мм	4	4,5	5	4	4,5	5	4,6	4,7	4,8	4,9
Радиус решетчатой пластинки $r_{рп}$, мм	0,9	1	1,1	1,2	0,9	1	1,1	1,2	1	1,1
Внутриглазное гидростатическое давление $p_{вг}$, мм рт. ст.	15	20	25	30	35	25	30	35	15	20

Задание 11. Исследование напряженно-деформированного состояния глаза при компрессии

Исследовать влияние модулей нормальной упругости роговицы $E_р$ и склеры $E_{ск}$ на напряженно-деформированное состояние в структурах глазного яблока при компрессии (рис. 6.10).

Построить зависимость экстремального значения напряжения, перемещения и деформации от модулей нормальной упругости роговицы $E_р$ и склеры $E_{ск}$.

Модули нормальной упругости роговицы $E_р$ и склеры $E_{ск}$ изменяются в следующих диапазонах:

– $E_р = 1…14$ МПа;

– $E_{ск} = 5…20$ МПа.

Давление компрессии:

$p_к = 50; 75; 100; 150$ Па.

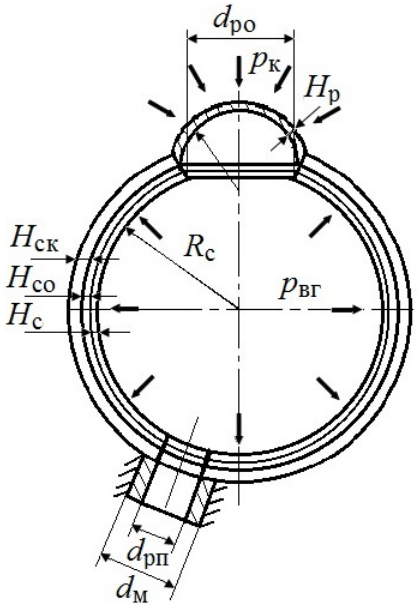


Рис. 6.10. Схема с модели глазного яблока при компрессии

Задание 12. Исследование напряженно-деформированного состояния глаза при измерении внутриглазного давления по Маклакову

Исследовать влияние модулей нормальной упругости роговицы $E_р$ и склеры $E_{ск}$ на погрешности при измерении внутриглазного давления по Маклакову (рис. 6.11). Построить зависимость внутриглазного давления от модуля нормальной упругости роговицы $E_р$ (склеры $E_{ск}$). Модули нормальной упругости роговицы $E_р$ и склеры $E_с$ изменяются в следующих диапазонах:

1. $E_р$ = 1…14 МПа;

2. $E_с$ = 5…20 МПа.

Схема модели глазного яблока при измерении внутриглазного давления по Маклакову приведена на рис. 6.11.

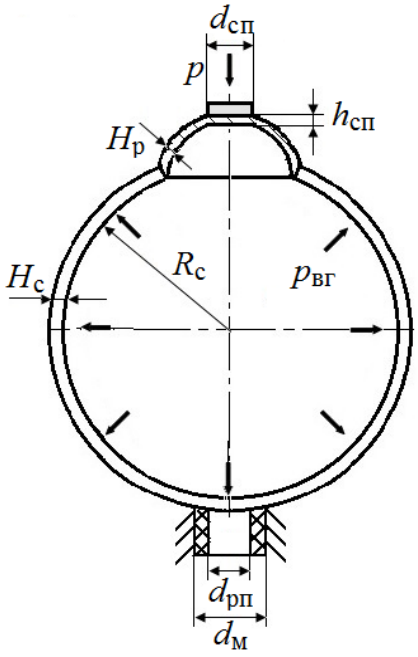


Рис. 6.11. Схема модели глазного яблока при измерении внутриглазного давления

Варианты задания приведены в табл. 6.13. Принятые в медицинской практике соотношения между диаметром кружка сплющивания и внутриглазным давлением приведены в табл. 6.14.

Таблица 6.13

Параметры задания	Варианты задания 12									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Диаметр зоны сплющивания роговицы, $d_{сп}$, мм	3	4	5	6	7	8	5	6	7	8
Вес грузика p,г	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

Таблица 6.14

Таблица Маклакова (груз 10 г)

Давление, мм рт. ст	Диаметр кружка сплющивания, мм	Давление, мм рт. ст	Диаметр кружка сплющивания, мм
105	2.9	28	5.55

Окончание табл. 6.14

Давление, мм рт. ст	Диаметр кружка сплющивания, мм
98	2.95
92	3.1
87	3.1
82	3.2
77	3.3
73	3.4
69	3.45
65	3.55
62	3.8
59	3.85
55	4
54	4.05
51	4.1
49	4.15
47	4.2
45	4.25
43	4.3
41	4.5
39	4.6
38	4.7
36	4.8
35	5
34	5.05
32	5.2
31	5.3
30	5.4
29	5.5

Давление, мм рт. ст	Диаметр кружка сплющивания, мм
27	5.6
26	5.8
25	5.85
24	6
23	6.05
22	6.2
21	6.7
20	6.8
20	6.85
19	6.95
18	6.97
18	7.05
17	7.15
17	7.17
16	7.2
16	7.5
15	7.6
15	7.7
14	7.8
14	8.05
13	8.1
13	8.15
13	8.2
12	8.5
12	8.6
12	8.65
12	8.9

Задание 13. Исследование напряженно-деформированного состояния глаза при измерении внутриглазного давления по методу Гольдмана

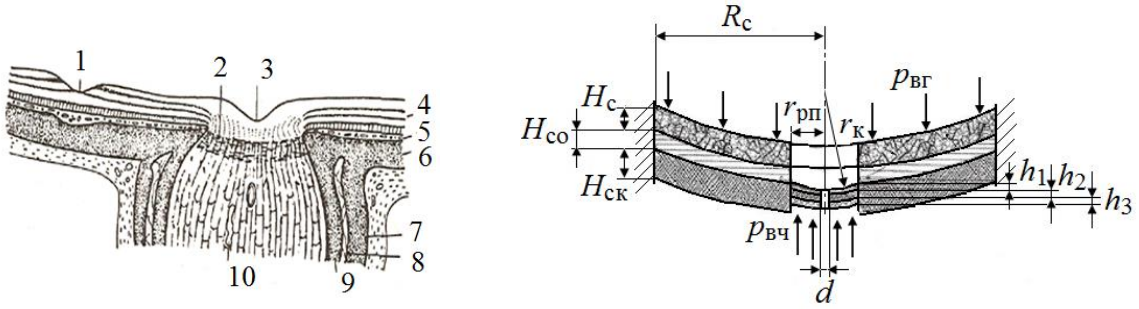
Исследовать влияние модулей нормальной упругости роговицы $E_р$ и склеры $E_с$ на погрешности при измерении внутриглазного давления по методу Гольдмана (рис. 6.11). Построить зависимость ВГД от модуля нормальной упругости роговицы $E_р$ (склеры $E_с$). Модули нормальной упругости роговицы $E_р$ и склеры $E_с$ изменяются в следующих диапазонах: 1. $E_р$ = 1…14 МПа; 2. $E_с$ = 5…20 МПа. Схема модели глазного яблока при измерении внутриглазного давления по Гольдману приведена на рис. 6.9. Варианты задания приведены в табл. 6.15.

Таблица 6.15

Параметры задания	Варианты задания 13									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Диаметр зоны сплющивания роговицы $d_{сп}$, мм	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Вес грузика p, г	3	4	5	6	5	6	4	3	5	6

Задание 14. Исследование напряженно-деформированного состояния зрительного нерва

Установить зависимости экстремального значения напряжения и перемещения в структурах диска зрительного нерва (рис. 6.12) от градиента внутриглазного и внутричерепного давлений. Внутриглазное давление: 15…40 мм рт. ст. Внутричерепное давление: 10 мм рт. ст. Варианты задания приведены в табл. 6.16.



а *б*

Рис. 6.12. Диск зрительного нерва: *а* – схема; *б* – модель (1 – макула сетчатки; 2 – решетчатая пластинка; 3 – физиологическая экскавация диска; 4 – сетчатка; 5 – сосудистая оболочка; 6 – склера; 7 – твердая мозговая оболочка; 8 – паутинная оболочка; 9 – мягкая оболочка; 10 – центральные сосуды сетчатки)

Таблица 6.16

Параметры диска зрительного нерва	Варианты задания 14									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Внутренний радиус сетчатки $R_с$, мм	12	11,5	11,6	11,8	12,1	12	11,5	11,6	11,8	12,1
Толщина склеры $H_{ск}$, мм	0,7	0,6	0,65	0,72	0,75	0,7	0,6	0,65	0,72	0,75
Толщина сосудистой оболочки $H_{со}$, мм	0,35	0,32	0,34	0,36	0,32	0,34	0,35	0,32	0,34	0,36
Толщина сетчатки $H_с$, мм	0,4	0,38	0,39	0,41	0,42	0,38	0,39	0,41	0,4	0,38

Окончание табл. 6.16

Параметры диска зрительного нерва	Варианты задания 14									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Радиус решетчатой пластинки $r_{рп}$, мм	0,9	1	1,1	1,2	0,9	1	1,1	1,2	1	1,1
Радиус кривизны решетчатой пластинки $r_к$, мм	3	2,9	3,1	3	2,9	3,1	3	2,9	3,1	3
Толщина первого слоя решетчатой пластинки h_1, мм	0,05	0,6	0,07	0,05	0,6	0,07	0,07	0,05	0,6	0,05
Толщина второго слоя решетчатой пластинки h_2, мм	0,1	0,11	0,12	0,11	0,12	0,1	0,11	0,12	0,11	0,12
Толщина третьего слоя решетчатой пластинки h_3, мм	0,15	0,16	0,17	0,18	0,15	0,16	0,17	0,18	0,15	0,16
Модуль нормальной упругости первого слоя решетчатой пластинки E_1, МПа	1,1	1	1,2	1,25	1,1	1	1,2	1,25	1,1	1
Модуль нормальной упругости второго слоя решетчатой пластинки E_2, МПа	1,3	1,4	1,35	1,3	1,35	1,3	1,4	1,35	1,3	1,35
Модуль нормальной упругости третьего слоя решетчатой пластинки E_3, МПа	1,7	1,75	1,8	1,7	1,75	1,8	1,7	1,75	1,8	1,7
Диаметр артериального отверстия d, мм	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08

Варианты заданий 15–16 приведены для исследования напряженно- деформированного состояния в структурах барабанной перепонки.

Общие для заданий исходные данные представлены в табл. 6.17.

Таблица 6.17

Параметры модели барабанной перепонки	Варианты заданий										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Радиус барабанной перепонки $R_{бп}$, мм	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

Окончание табл. 6.17

Параметры модели барабанной перепонки	Варианты заданий										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Высота барабанной перепонки $H_{бп}$, мм	1,6	1,65	1,7	1,6	1,65	1,7	1,6	1,65	1,7	1,65	1,7
Толщина барабанной перепонки $h_{бп}$, мм	0,09	0,1	0,11	0,09	0,1	0,11	0,09	0,1	0,11	0,1	0.1
Угол сектора расслабленной части барабанной перепонки 2α, град	60	50	60	50	60	50	60	50	60	50	60
Расстояние по образующей от центра барабанной перепонки до центра эллиптического участка сопряжения барабанной перепонки с рукояткой молоточка c, мм	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25
Радиус перфорации r_1, мм	0,5	0,6	0,5	0,6	0,5	0,6	0,5	0,6	0,5	0,5	0,6
Модуль нормальной упругости основного участка барабанной перепонки $E_{бп}$, МПа	8	9	10	11	8	9	10	11	9	10	10
Модуль нормальной упругости расслабленной части барабанной перепонки $E_{рч}$, МПа	4	5	6	4	5	6	4	5	6	5	6
Гидростатическое давление на барабанную перепонку p, Па	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,5	2	1,5
Коэффициент Пуассона материала барабанной перепонки ν	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Большая полуось рукоятки молоточка b, мм	1,6	1,5	1,7	1,6	1,5	1,7	1,6	1,5	1,7	1,6	1,7

Окончание табл. 6.17

Параметры модели барабанной перепонки	Варианты заданий										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Малая полуось рукоятки молоточка *a*, мм	0,65	0,6	0,7	0,65	0,6	0.7	0,65	0,6	0,7	0,65	0,7
Расстояние от центра барабанной перепонки до центра перфорации $R_{цп}$, мм	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3

Задание 15. Исследование напряженно-деформированного состояния барабанной перепонки

Определить наиболее благоприятное, с точки зрения напряженно-деформированного состояния, место перфорации барабанной перепонки (рис. 6.13). Угол между образующей в центре сектора и центром ции β = 0; 45; 60; 90; 120º. Расстояние по образующей от центра барабанной перепонки до центра перфорации $R_{цп}$ = 1; 2; 3; 4 мм. Варианты задания приведены в табл. 6.18.

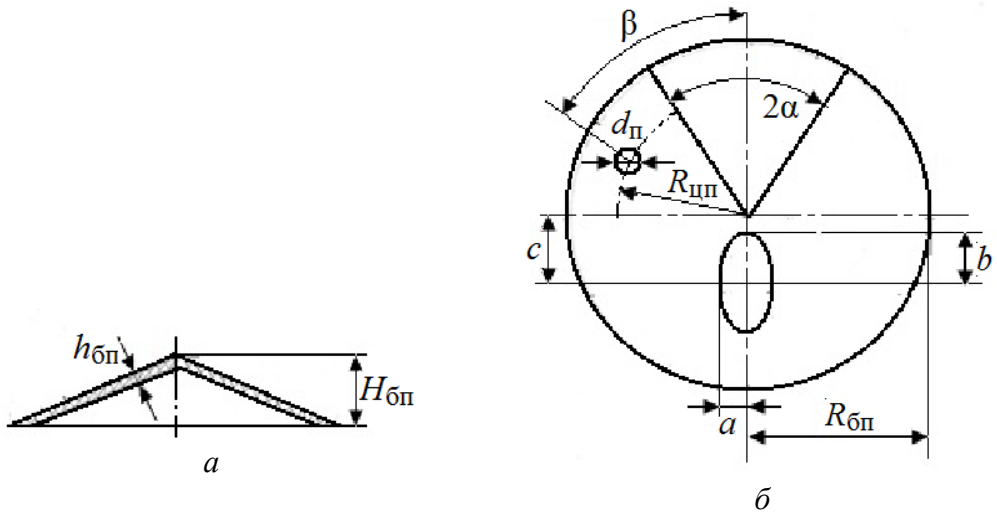


Рис. 6.13. Схема модели барабанной перепонки с перфорацией: а – вид сбоку (сечение); *б* – вид сверху

Задание 16. Исследование напряженно-деформированного состояния корригированной барабанной перепонки

Исследовать напряженно-деформированное состояние барабанной перепонки, корригированной после перфорации (рис. 6.14).

Угол между образующей в центре сектора и центром ции β = 0; 45; 60; 90; 120º. Расстояние по образующей от центра барабанной

перепонки до центра перфорации $R_{цп}$ = 1; 2; 3; 4 мм. Варианты задания приведены в табл. 6.18.

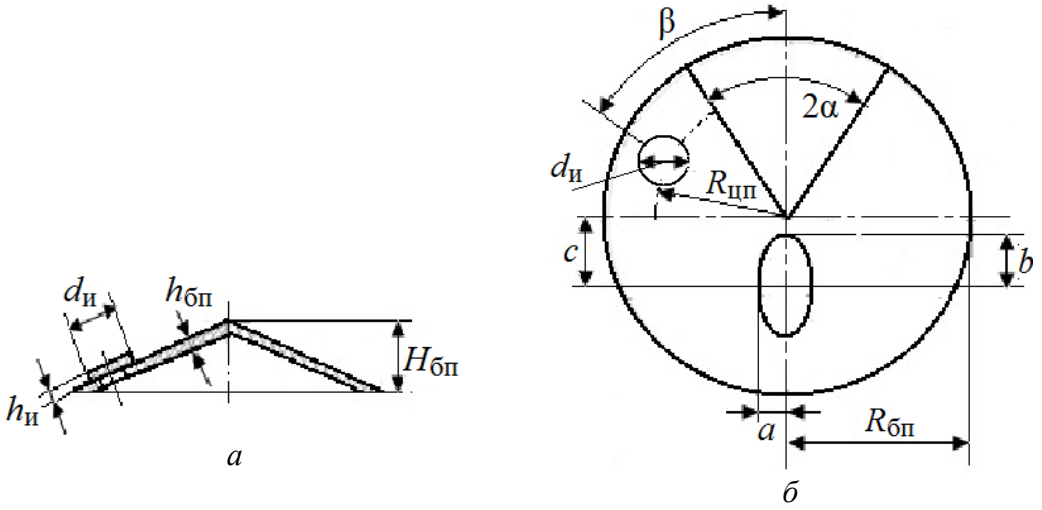


Рис. 6.14. Схема содержательной модели барабанной перепонки, корригированной после перфорации: *а* – вид сбоку (сечение); *б* – вид сверху

Таблица 6.18

Параметры имплантата	Варианты задания 16										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Радиус имплантата $R_и$, мм	0,7	0,8	0,9	1	0,7	0,8	0,9	1	0,8	0,9	1
Толщина имплантата $h_и$, мм	0,08	0,1	0,12	0,08	0,1	0,12	0,08	0,1	0,12	0,1	0,1
Модуль нормальной упругости имплантата (кожа) $E_и$, кПа	10	15	20	10	15	20	10	15	20	15	20

Варианты заданий 17–19 приведены для исследования напряженно-деформированного состояния в структурах мочевого пузыря. Общие для заданий исходные данные представлены в табл. 6.19.

Таблица 6.19

Параметры модели мочевого пузыря	Варианты заданий										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Толщина стенки h_1, мм	2	2,5	3	3,5	2	2,5	3	3,5	2,5	3	3
Высоты мочевого пузыря H, мм	40	50	60	70	80	90	100	60	70	80	75

Окончание табл. 6.19

Параметры модели мочевого пузыря	Варианты заданий										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Отношение h_2/h_1	1,5	1,55	1,6	1,65	1,7	1,5	1,55	1,6	1,65	1,7	1,6
Отношение h_3/h_1	1,9	1,95	2	2,5	1,9	1,95	2	2,5	2	2,5	2
Модуль нормальной упругости стенки мочевого пузыря $E_{мп}$, МПа	0,8	0,7	0,65	0,75	0,6	0,8	0,7	0,65	0,75	0,6	0.7
Коэффициент Пуассона стенки мочевого пузыря υ	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
Отношение ширины к высоте мочевого пузыря S/H	1,05	1,1	1,2	1,15	1,25	1,1	1,2	1,15	1,25	1,1	1,2
Внутренний радиус открытого сфинктера r_c, мм	1,1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,1	1,2	1,3	1,4	1,1	1,2
Ширина кольца закрепления шейки мочевого пузыря $h_к$, мм	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

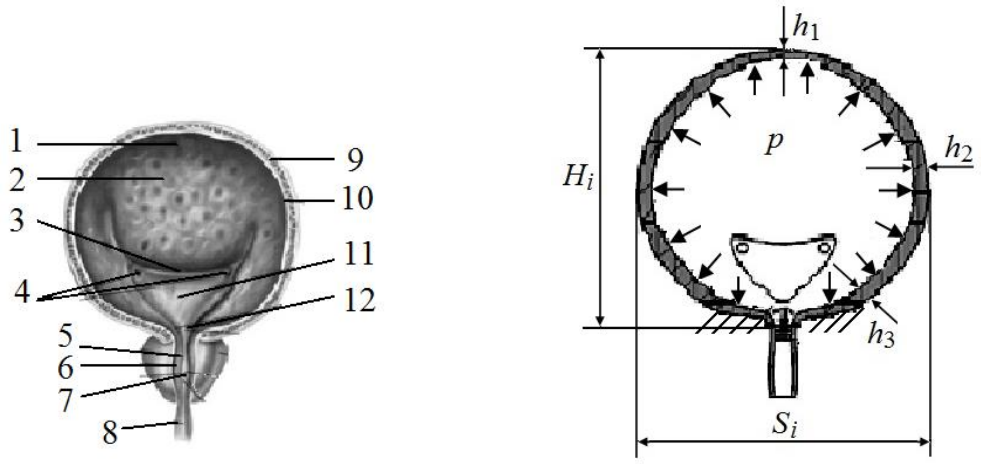
Задание 17. Исследование напряженно-деформированного состояния в мочевом пузыре

Исследовать напряженно-деформированное состояние в мочевом пузыре (рис. 6.15) во время открытия внутреннего сфинктера.

Установить зависимости экстремальных значений напряжений и перемещений в стенке мочевого пузыря во время открытия внутреннего сфинктера от:

1) высоты мочевого пузыря $H_i = 40…100$ мм;

2) толщины стенки мочевого пузыря $h_1 = 2…4$ мм.



а *б*

Рис. 6.15. Мочевой пузырь: *а* – схема; *б* – модель: (1 – дно; 2 – тело; 3 – межмочеточниковая складка; 4 – отверстия мочеточников; 5 – простатическая часть мочеиспускательного канала; 6 – гребень мочеиспускательного канала; 7 – синус предстательной железы; 8 – перепончатая часть мочеиспускательного канала; 9 – мышечная стенка; 10 – слизистая оболочка; 11 – треугольник; 12 – отверстие мочеиспускательного канала)

Давление в мочевом пузыре во время открытия внутреннего сфинктера p = 40 см вод. ст. (4 кПа). Варианты задания приведены в табл. 6.19.

Задание 18. Исследование напряженно-деформированного состояния в мочевом пузыре с дивертикулом

Исследовать напряженно деформированное состояние в мочевом пузыре с патологическим образованием – дивертикулом (рис. 6.16) во время открытия внутреннего сфинктера.

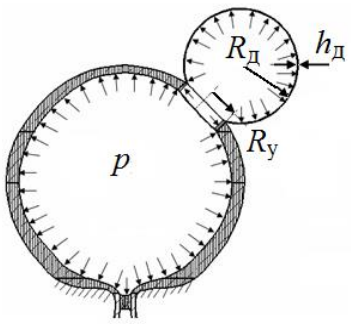


Рис. 6.16. Схема модели мочевого пузыря с дивертикулом

Построить графические зависимости экстремальных значений напряжений и перемещений в стенке мочевого пузыря с дивертикулом во время открытия внутреннего сфинктера от: высоты мочевого пузыря H_i = 40…100 мм; толщины стенки мочевого пузыря h_1 = 2…4 мм.

Давление в мочевом пузыре во время открытия внутреннего сфинктера p = 40 см вод. ст. (4 кПа). Варианты задания приведены в табл. 6.20.

Таблица 6.20

Параметры дивертикула	Варианты задания 18										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Радиус устья дивертикула $R_{у}$, мм	10	11	9	8	8	9	10	11	8	9	10
Радиус дивертикула $R_{д}$, мм	15	16	20	24	26	28	30	32	34	36	16
Толщина стенки дивертикула $h_{д}$, мм	1	1,5	1,5	1,5	1	1	1	1,5	1,5	1,5	1
Угол между прямой, проходящей через центры мочевого пузыря, дивертикула, и горизонтальной плоскостью, град	30	45	60	30	45	60	30	45	60	45	60

Задание 19. Исследование напряженно-деформированного состояния в мочевом пузыре с рубцом

Исследовать напряженно деформированное состояние в мочевом пузыре с рубцом (рис. 6.17) во время открытия внутреннего сфинктера. Построить графические зависимости экстремальных значений напряжений и перемещений в стенке мочевого пузыря с рубцом во время открытия внутреннего сфинктера от модуля нормальной упругости рубца $E_{р}$ = 4…10 МПа. Давление в мочевом пузыре во время открытия внутреннего сфинктера p = 40 см вод. ст. (4 кПа). Варианты задания приведены в табл. 6.21.

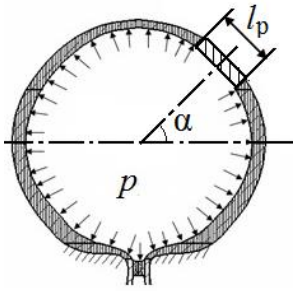


Рис. 6.17. Схема модели мочевого пузыря с рубцом

Таблица 6.21

Параметры рубца	Варианты задания 19										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Ширина рубца, мм	2	3	4	5	2	3	4	5	3	4	2
Длина рубца $l_{р}$, мм	4	6	10	10	4	6	10	10	6	10	8

Окончание табл. 6.21

Параметры рубца	Варианты задания 19										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Угол между прямой, проходящей через центр мочевого пузыря, середину рубца и горизонтальной плоскостью α, град	30	40	60	30	45	60	30	45	60	45	60

Задание 20. Исследование напряженно-деформированного состояния сегмента белой линии живота с патологическим образованием

Построить графическую зависимость экстремальных значений напряжений в сегменте белой линии живота с патологическим образованием от модуля нормальной упругости белой линии. Модуль упругости белой линии $E_{бл} = 0{,}78 \ldots 78$ МПа. Поверхностное давление 0,1 МПа. Коэффициенты Пуассона структур 0,4. Варианты задания приведены в табл. 6.22.

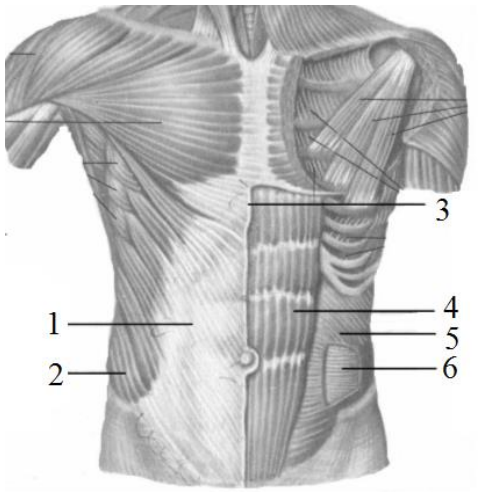


Рис. 6.18. Мышечный слой передней брюшной стенки:
1 – фасциальный футляр (апоневроз) прямой мышцы живота; 2 – наружная косая мышца живота; 3 – белая линия живота; 4 – прямая мышца живота; 5 – внутренняя косая мышца живота; 6 – поперечная мышца живота

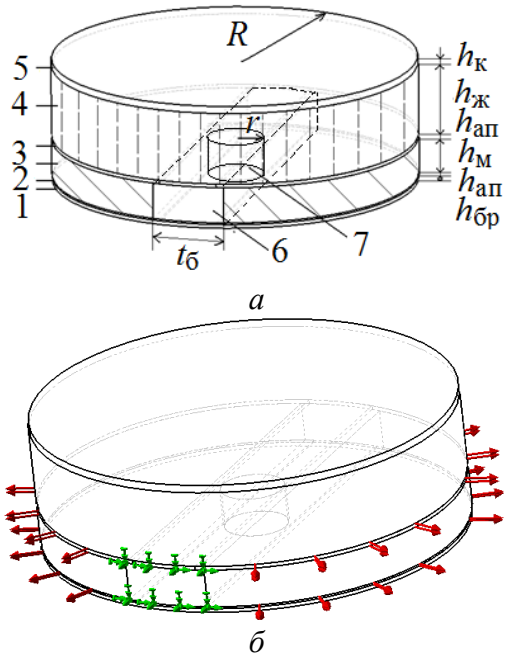


Рис. 6.19. Сегмент белой линии живота с патологическим образованием: *а* – схема геометрической модели; *б* – схема модели с нагрузкой и закреплением (1 – брюшина; 2 – прямые мышцы; 3 – апоневрозы прямых мышц; 4 – подкожно-жировая клетчатка; 5 – кожа; 6 – белая линия живота; 7 – патологическое отверстие)

Таблица 6.22

Параметры сегмента	Варианты задания 20										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Радиус патологического отверстия r, мм	5	6	7	8	4	5	6	7	8	4	5
Радиус Выделенного сегмента R, мм	50	60	70	80	40	50	60	70	80	40	50
Ширина белой линии живота $t_б$, мм	15	16	17	18	19	20	17	18	19	20	18
Толщина кожи $h_к$, мм	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	1,7	1,8	1,9	2,0	1,8
Толщина подкожно-жировой клетчатки $h_ж$, мм	15	16	17	18	19	20	17	18	19	20	18
Толщина апоневрозов $h_{ап}$, мм	0,8	0,9	1	1,2	1, 1	0,8	0,9	1	1,2	1, 1	1
Толщина мышц $h_м$, мм	8	9	10	11	12	9	10	11	12	8	11
Толщина белой линии $h_{бл}$, мм	8	9	10	11	12	9	10	11	12	8	10
Толщина брюшины (фасции) $h_{бр}$, мм	0,9	1	1,2	1, 1	0,8	0,9	1	1,2	1, 1	1	1
Модуль упругости кожи $E_к$, МПа	2	2,5	3	2	2,5	3	2	2,5	3	2,5	2
Модуль упругости подкожно-жировой клетчатки $E_ж$, кПа	0,8	0,9	1	1,1	1,2	0,8	0,9	1	1,1	1,2	0,9

Окончание табл. 6.22

Параметры сегмента	Варианты задания 20										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Модуль упругости апоневрозов $E_{ап}$, МПа	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3	2,7	2,8	2,9	3	2,5
Модуль упругости мышц $E_{м}$, МПа	0,1	0,11	0,12	0,1	0,11	0,12	0,1	0,11	0,12	0,1	0,12
Модуль упругости брюшины (фасции) $E_{бр}$, МПа	1	1,1	1,2	0,8	0,9	1	1,1	1,2	0,9	1	1

Задание 21. Исследование напряженно-деформированного состояния в грыжевом выпячивании

Установить зависимость экстремальных значений напряжений в грыжевом выпячивании от модуля нормальной упругости грыжевого мешка $E_{гм}$ = 0,4…0,6 МПа. Варианты задания приведены в табл. 6.23.

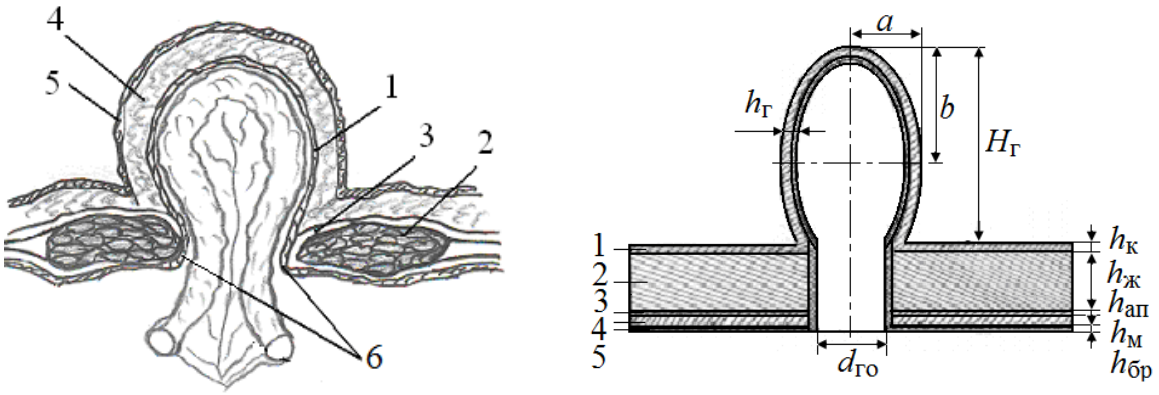


Рис. 6.20. Схемы: *а* – грыжевого выпячивания (1 – грыжевой мешок, 2 – мышцы, 3 – апоневротические мешки прямых мышц, 4 – подкожно-жировая клетчатка, 5 – кожа, 6 – грыжевые ворота); *б* – геометрическая схема содержательной модели

Таблица 6.23

Параметры сегмента	Варианты задания 20										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Толщина кожи $h_к$, мм	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	1,7	1,8	1,9	2,0	1,9

Окончание табл. 6.23

Параметры сегмента	Варианты задания 20										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Толщина подкожно-жировой клетчатки $h_{ж}$, мм	15	16	17	18	19	20	17	18	19	20	18
Толщина апоневрозов $h_{ап}$, мм	0,8	0,9	1	1,2	1, 1	0,8	0,9	1	1,2	1, 1	0,8
Толщина мышц $h_{м}$, мм	8	9	10	11	12	9	10	11	12	8	8
Толщина брюшины (фасции) $h_{бр}$, мм	0,9	1	1,2	1, 1	0,8	0,9	1	1,2	1, 1	1	1
Модуль упругости кожи $E_{к}$, МПа	2	2,5	3	2	2,5	3	2	2,5	3	2,5	2,5
Модуль упругости подкожно-жировой клетчатки $E_{ж}$, кПа	0,8	0,9	1	1,1	1,2	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,2
Модуль упругости апоневрозов $E_{ап}$, МПа	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3	2,7	2,8	2,9	3	2,5
Модуль упругости мышц $E_{м}$, МПа	0,1	0,11	0,12	0,1	0,11	0,12	0,1	0,11	0,12	0,1	0,1
Модуль упругости брюшины (фасции) $E_{бр}$, МПа	1	1,1	1,2	0,8	0,9	1	1,1	1,2	0,9	1	1,2
Малая полуось грыжевого мешка эллипсоидальной формы a, мм	13	12	10	11	14	13	12	10	11	14	10
Большая полуось грыжевого мешка эллипсоидальной формы b, мм	26	20	22	24	18	26	20	22	24	18	20
Толщина стенки грыжевого мешка $h_{г}$, мм	2	1,8	2	2,1	1,9	2	1,8	2	2,1	1,9	2
Высота грыжевого мешка $H_{г}$, мм	40	35	30	45	40	35	30	45	30	45	30

Окончание табл. 6.23

Параметры сегмента	Варианты задания 20										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Модуль нормальной упругости грыжевого мешка $E_{гм}$, МПа	0,5	0,55	0,6	0,65	0,5	0,55	0,6	0,65	0,6	0,65	0,6
Диаметр грыжевого отверстия $d_{го}$, мм	10	12	12	10	8	12	10	8	8	12	8

ПРИЛОЖЕНИЯ

1. Свойства материалов протезов и имплантатов

В табл. П.1.1–П.1.12 приведены значения механических свойств материалов протезов и имплантатов: 1) временных сопротивлений при растяжении $\sigma_р$ и сжатии $\sigma_с$, 2) предела прочности при изгибе $\sigma_и$, 3) модуля нормальной упругости, 4) разрушающего относительного удлинения $\varepsilon_р$, 5) твердости по Бринэлю НВ, 6) плотности материала ρ.

Таблица П.1.1

Механические свойства титана

Марка	Свойства		
	$\sigma_р$, МПа	$\sigma_с$, МПа	$\varepsilon_р$, %
Grade1	270–380	280	22
Grade2	280–450	350	20
Grade3	350–520	420	18
Grade4	500–600	560	15
ВТ1-00	270	300	30
ВТ1-0	290	400	30

Таблица П.1.2

Свойства благородных металлов

Металл	$\sigma_р$, МПа	θ, %	НВ, МПа
Золото	120	40–50	185
Серебро	150–180	48–50	500
Платина	150–170	50	500
Палладий	185	55	610

Таблица П.1.3

Сравнительные параметры материалов на основе углерода

Параметры	Кость	Пироуглерод	Углекон-М
$\sigma_и$, МПа	20–40	28–60	150–190
E, ГПа	2,5	1,2–1,7	1,4–2,8
$\varepsilon_р$, %	2,0	1,6	1,1–1,5

Таблица П.1.4

Свойства литьевых полимеров, полученных разными методами

Показатель	Полиэтилен получен методом давления		
	высокого	среднего	низкого
ρ, г/ см^3	0,92–0,93	0,96–0,97	0,94–0,96
E, МПа	150–250	800–1500	550–800
$\sigma_р$, МПа	12–16	27–33	22–35
$\varepsilon_р$, %	150–600	200–400	200–900
$\sigma_и$, МПа	12–17	25–40	20–38

Таблица П.1.5

Свойства синтетических смол

Смолы	ρ, Мг/м^3	$\sigma_р$, МПа	$\varepsilon_р$, %
Полиэтилен	0,91–0,97	10–15	300–750
Полипропилен	0,90–0,91	30–40	400–700
Полистирол	1,05	35–60	1–4
Политетрафторэтилен	2,30	15–30	250–300
Поливинилхлорид	1,40–1,70	30–50	50–150
Полиметилметакрилат	1,20	40–70	2–10
Полиамиды	1,10–1,15	70–90	90

Примечание: В таблице приведены приближенные данные для синтетических смол без наполнителей.

Таблица П.1.6

Механические свойства фторопластов

Марка	ρ, кг/м^3	$\sigma_р$, МПа	$\sigma_с$, МПа	$\varepsilon_р$, %
Ф4	2120–2200	14,7–34,5	11,8	250–500
Ф4Д	2190–2260	12,7–31,8	11,8	100–590

Таблица П.1.7

Механические свойства полиамидов

Свойство	Полиамид			
	П-12	П-11	П-6,10	П-6
ρ, г/см^3	1,02	1,04	1,08	1,13
$\sigma_р$, МПа: – сухой – в воде	 59 55	 65 61	 58 57	 68 60
$\varepsilon_р$, % – сухой – в воде	 240 230	 280 280	 65 300	 170 310
$\sigma_и$, МПа – сухой – в воде	 74 68	 73 53	 117 57	 121 42

Таблица П.1.8

Свойства нетканого полотна из повторно используемого коллагена

Характеристика	Значение
Толщина, мм	0,4
ρ, г/м^2	20
$\sigma_р$, МПа: – в сухом состоянии – во влажном состоянии	 2–4,5 0,5–1
$\varepsilon_р$, %: – в сухом состоянии – во влажном состоянии	 5 5

Таблица П.1.9

Свойства однонаправленного армированного угле-угольного композита

Характеристика	Значение
ρ, г/см^3	1,6–1,7
E, ГПа	120–150
$\sigma_р$, МПа: – параллельно направлению армирования – перпендикулярно к оси волокон	 600–800 30–35

Таблица П.1.10

Механические свойства различных форм углеродсодержащих материалов

Материал	$\sigma_и$, МПа	E, ГПа
Изотропный пироуголь	520	28
Пиролитический графит	140	24
Стеклоуголь	170	24
Специальный графит (для композита)	130	25
Композит уголь-уголь	800	180

Таблица П.1.11

Свойства материалов, применяемых в эндопротезировании суставов

Материал	E, ГПа	$\sigma_р$, МПа
Сплав Co-Cr	230	900–1540
Аустенитная нержавеющая сталь EN58	200	540–1000
Аустенитная нержавеющая сталь	200	230–1160
Сплав Ti–Al–V	106	780–1050
Оксид алюминия	365	6–55
Полиэтилен	1	30
Компактная кость	7–30	50–150

Таблица П.1.12

Сравнительные данные о некоторых свойствах натуральных и искусственных волокон

Волокнистый материал	E, ГПа	$\sigma_р$, МПа	$\varepsilon_р$, %
Целлюлоза (сухая)	80	900	2,3
Хитин	80	4000	4,2
Коллаген (мокрое сухожилие)	2	100	8–10
Е-стекло	70	1500–2000	2,0–3,0
Углеродное волокно	200–400	1900–2600	0,5–1,5
Борное волокно	400	3400	0,5–1,0

Окончание табл. П1.12

Волокнистый материал	E, ГПа	σ_p, МПа	ε_p, %
Кевлар-49 (ароматический полиамид – органическое волокно)	130	2700	2,0–3,5
Сталь (высокое содержание углерода)	210	2800	0; 5

2. Геометрические параметры и механические свойства кровеносных сосудов

В табл. П.2.1 приведены максимальные D_{max} и минимальные D_{min} значения диаметров сосудов, а в табл. П.2.2–П.2.13 – усредненные значения механических характеристик кровеносных сосудов: 1) разрушающего напряжения σ_p и разрушающего относительного удлинения в продольном направлении ε_p; 2) касательного модуля упругости в продольном направлении $E_1^{к}$ (h_0 – начальная толщина стенки сосуда; 1 – продольное нагружение; 2 – окружное нагружение); 3) степень удлинения λ.

Таблица П.2.1

Максимальные и минимальные значения диаметров кровеносных сосудов

Кровеносный сосуд	D_{max}, мм	D_{min}, мм
Аорта	30,30	16,00
Венечная артерия		
– правая	4,15	1,59
– левая	3,80	1,91
Плечеголовной ствол аорты	15,30	7,00
Грудной отдел аорты	22,0	13,40
Брюшной отдел аорты	16,60	9,55
Чревный ствол	7,64	4,15
Нижняя брыжеечная артерия	3,50	2,23
Почечная артерия		
– правая	5,73	2,87
– левая	5,73	3,18
Общая подвздошная артерия:		
– правая	11,46	6,09
– левая	12,10	4,46
Наружная подвздошная артерия (парная)	9,87	4,77
Внутренняя подвздошная артерия:		
– правая	8,91	2,87
– левая	8,28	1,91
Бедренная артерия:		
– правая	11,79	3,50
– левая	9,58	3,50

Окончание табл. П.2.1

Кровеносный сосуд	D_{max}, мм	D_{min}, мм
Подколенная артерия (парная)	5,09	3,18
Общая сонная артерия (парная)	8,28	4,77
Наружная сонная артерия: – правая – левая	 5,73 5,41	 2,87 2,55
Внутренняя сонная артерия: – правая шейная часть – левая	 7,00 6,68	 3,08 3,50
Позвоночная артерия: – правая – левая	 4,15 4,77	 3,18 3,18

Таблица П.2.2

Механические характеристики магистральных сосудов (возраст 39–40 лет)

Кровеносный сосуд	h_0, мм	$\sigma_р$, МПа	$\varepsilon_р$, %	$E_1^к$, МПа при σ_1, МПа			
				0,05	0,1	0,2	0,4
Аорта: – передняя стенка – задняя стенка	 2,35 2,26	 1,11 0,71	 0,455 0,419	 0,84 1,0	 1,36 1,72	 2,52 2,44	 3,89 3,45
Артерия: – общая сонная – внутренняя сонная – общая подвздошная – бедренная	 1,66 1,59 1,63 1,89	 1,99 1,56 1,86 1,32	 0,607 0,524 0,390 0,400	 0,78 0,82 0,97 1,01	 1,25 1,31 1,7 1,68	 2,49 2,51 3,11 3,14	 4,24 4,22 5,65 5,36
Большая подкожная вена ноги	1,52	3,92	0,373	2,13	2,13	5,3	8,5

Таблица П.2.3

Механические характеристики стенок аорты

Параметр	Отдел аорты	Направление нагружения	Возраст, лет						
			0–9	10–19	20–29	30–39	40–49	50–59	60–69
$\sigma_р$, МПа	Восходящий	1 2	0,86 1,36	0,86 1,36	0,76 1,18	0,73 1,18	0,68 1,04	0,68 1,04	0,68 1,04
	Нисходящий	1 2	1,22 1,49	1,02 1,31	1,02 1,31	1,02 1,06	0,89 1,06	0,64 0,74	0,53 0,74
	Брюшной	1 2	1,62 1,52	1,62 1,42	1,12 1,22	0,84 1,22	0,84 1,22	0,7 0,90	0,70 0,90

Окончание табл. П.2.3

Параметр	Отдел аорты	Направление нагружения	Возраст, лет						
			0–9	10–19	20–29	30–39	40–49	50–59	60–69
$\varepsilon_р$, %	Восходящий	1	60	111	106	91	79	74	68
		2	56	111	104	84	79	70	62
	Нисходящий	1	85	85	74	74	62	56	43
		2	83	98	98	85	74	74	60
	Брюшной	1	102	102	94	69	69	56	56
		2	103	103	114	87	79	62	62

Приняты обозначения: 1 – продольное нагружение; 2 – окружное нагружение.

Таблица П.2.4

Механические характеристики стенок общей сонной артерии

Параметр	Направление нагружения	Возраст, лет						
		0–9	10–19	20–29	30–39	40–49	50–59	60–69
$\sigma_р$, МПа	1	1,38	1,38	1,38	1,19	1,19	1,02	1,02
	2	1,63	1,63	1,63	1,14	1,14	0,80	0,80
$\varepsilon_р$, %	1	145	145	100	100	87	60	60
	2	113	113	98	88	88	63	63

Таблица П.2.5

Характеристики легочного ствола

Параметр	Артерии	Направление нагружения	Возраст, лет				
			20–29	30–39	40–49	50–59	60–69
$\sigma_р$, МПа	Восходящий отдел аорты	1	0,76	0,73	0,68	0,68	0,68
		2	1,18	1,18	1,04	1,04	1,04
	Легочный ствол	1	0,64	0,64	0,54	0,54	0,54
		2	0,93	0,93	0,93	0,93	0,84
$\varepsilon_р$, %	Восходящий отдел аорты	1	106	91	79	74	68
		2	104	84	79	70	62
	Легочный ствол	1	132	108	108	100	93
		2	126	94	94	94	87

Таблица П.2.6

Свойства тканей подвздошной артерии

Возраст, лет	$\sigma_р$, МПа	
	$\sigma_{р1}$	$\sigma_{р2}$
11–20	4,14	4,63
21–30	2,20	3,07

Окончание табл. П.2.6

Возраст, лет	$\sigma_р$, МПа	
	$\sigma_{р1}$	$\sigma_{р2}$
31–40	1,55	1,75
41–50	1,02	1,31
51–60	0,70	1,21
61–70	0,78	0,92
71 и старше	0,79	0,88

Таблица П.2.7

Свойства тканей бедренной артерии

Параметр	Направление нагружения	Возраст, лет			
		20–29	30–39	40–49	50–59
$\sigma_р$, МПа	1 2	1,8 2,0	2,0 1,7	1,8 1,3	1,4 0,9
$\varepsilon_р$, %	1 2	105 76	86 76	82 66	82 63

Таблица П.2.8

Характеристики стенок внутренней сонной артерии

Возраст, лет	h_0, мм	$\varepsilon_р$, %	E_1, МПа	$\sigma_{р1}$, МПа
21–35	1,31	54,19	0,9	2,6
36–50	1,52	56,0	0,9	1,7
41–75	1,59	44,43	1,2	1,7

Таблица П.2.9

Характеристики венечных артерий

Возраст, лет	Венечная артерия	λ_2	E_2^*, МПа, при σ_2 = 0,1 МПа
27	Правая:		
	– верхний отдел	1,27	1,41
	– нижний отдел	1,28	1,40
	Левая:		
	– верхний отдел	1,26	1,14
	– нижний отдел	1,18	2,39
42	Правая:		
	– верхний отдел	2,01	2,01
	– нижний отдел	1,39	1,39
	Левая:		
	– верхний отдел	2,77	2,77
	– нижний отдел	2,89	2,89

Окончание табл. П.2.9

Возраст, лет	Венечная артерия	λ_2	E_2^*, МПа, при σ_2 = 0,1 МПа
61	Правая: – верхний отдел Левая	 2,78 2,91	 2,78 2,91

Таблица П.2.10

Изменение свойств артерий мышечного типа

Параметр	Возраст, лет				
	20–29	30–39	40–49	50–59	60–69
$\sigma_р$, МПа	1,00	1,00	0,76	0,76	0,68
$\varepsilon_р$, %	1,00	1,00	0,89	0,89	0,81

Таблица П.2.11

Механические свойства мозговых артерий

Артерия	Возраст, лет	h_0, мм	$\varepsilon_р$, %	E_1, МПа	$\sigma_{р1}$, МПа
Основная	21–35 36–50 51–75	0,71 0,72 0,88	21,95 21,32 18,06	4,0 5,2 5,8	2,3 2,2 1,4
Средняя	21–35 36–50 51–75	0,60 0,74 0,75	17,13 17,73 14,27	7,6 12,0 11,9	4,9 3,5 3,0
Передняя	21–35 36–50 51–75	0,41 0,75 0,75	21,77 21,94 16,59	8,3 11,2 10,7	4,7 3,7 3,3

Таблица П.2.12

Механические свойства стенок плечевой артерии

Параметр	Артерия	Направление нагружения	Возраст, лет		
			20–29	40–49	60–69
$\sigma_р$, МПа	Плечевая	1 2	1,5 1,4	1,2 0,9	1,2 0,8
	Локтевая	1 2	1,6 1,4	1,3 1,1	1,3 0,8
$\varepsilon_р$, %	Плечевая	1 2	114 83	92 80	85 72
	Локтевая	1 2	118 73	100 69	89 65

Таблица П.2.13

Механические свойства стенок подколенной артерии

Параметр	Вена	Направление нагружения	Возраст, лет		
			20–29	40–49	60–69
$\sigma_р$, МПа	Нижняя полая	1 2	1,5 3,6	1,1 2,8	0,8 2,7
	Бедренная	1 2	2,4 3,2	2,1 3,1	2,0 2,9
	Подколенная	1 2	2,0 3,1	1,7 2,9	1,5 2,0
$\varepsilon_р$, %	Нижняя полая	1 2	98 58	77 47	70 44
	Бедренная	1 2	97 79	72 67	72 56
	Подколенная	1 2	112 77	97 77	81 77

3. Соотношения некоторых внесистемных единиц с единицами СИ

Внесистемные единицы физических величин традиционно используются в практике медицинских измерений. В табл. П.3.1 приведены соотношения внесистемных единиц, наиболее часто используемых в медицине, с единицами СИ.

Таблица П.3.1

Соотношения внесистемных единиц с единицами СИ

Наименование	Единица		Соотношение с единицей СИ
	Наименование	Обозначение	
Давление	Миллиметр водного столба	мм вод. ст.	9,80665 Па
	Миллиметр ртутного столба	мм рт. ст.	133,322 Па
Динамическая вязкость	Пуаз	П	0,1 Па·с
Кинематическая вязкость	Стокс	Ст	10^{-4} м^2/с
Длина	Микрон	мк	10^{-6} м

4. Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименований

Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименования содержит табл. П.4.1. Они широко применяются в практике представления результатов измерений, экспериментов и расчетов. В соответствии с международным стандартом ИСО 31/0–74, десятичные кратные и дольные единицы не являются единицами СИ.

Приставки «гекто», «дека» и «санти» допускается применять только в наименованиях кратных и дольных единиц, уже получивших широкое распространение (гектар, декалитр, дециметр, сантиметр и др.).

Выбор десятичной кратной или дольной единицы от единицы СИ, определяется, прежде всего, удобством ее применения. Ее выбирают таким образом, чтобы числовые значения величин находились в диапазоне от 0,1 до 1000.

Таблица П.4.1

Образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименования

Множитель	Приставка (обозначение)		Множитель	Приставка (обозначение)	
10^{9}	гига	Г	10^{-1}	деци	д
10^{6}	мега	М	10^{-2}	санти	с
10^{3}	кило	к	10^{-3}	милли	м
10^{2}	гекто	г	10^{-6}	микро	мк
10^{1}	дека	да	10^{-9}	нано	н

В табл. П.4.2 приведены рекомендуемые для применения кратные и дольные единицы от единиц СИ. Кроме десятичных кратных и дольных единиц, допущены к использованию кратные и дольные единицы времени, плоского угла и относительных единиц, не являющиеся десятичными. Например, единицы времени (мин, ч, сут), единицы плоского угла (град, мин, с).

Таблица П.4.2

Обозначения рекомендуемых кратных физических величин

Физическая величина	Обозначения рекомендуемых кратных и дольных единиц
Длина	км, см, мм, мкм, нм
Площадь	$км^2$, $дм^2$, $см^2$, $мм^2$

Окончание табл. П.4.2

Физическая величина	Обозначения рекомендуемых кратных и дольных единиц
Объем, вместимость	$дм^3$, $см^3$, $мм^3$, гл, дл, ел, мл
Время	кс, мс, мкс, нс
Скорость	км/ч, м/с
Частота периодического процесса	ГГц, МГц, кГц
Масса	Мг, г, мг, мкг
Плотность	$Мг/м^3$, $кг/дм^3$, $г/см^3$, г/мл, г/л
Сила, вес	МН, кН, мН, мкН
Момент силы	МН·м, кН·м, мН·м, мкН·м
Давление	ГПа, МПа, кПа, гПа, даПа, мПа, мкПа
Напряжение	ГПа, МПа, кПа
Динамическая вязкость	МПа·с
Кинематическая вязкость	$мм^2/с$
Энергия	ГДж, кДж, МДж, мДж

Содержание

Введение 3
Глава 1. Построение геометрических моделей элементов конструкций и биологических объектов в конечно-элементном пакете SolidWorks …… 5
1.1. Построение двумерных эскизов объектов …….. 5
1.1.1. Простые эскизы …… 11
1.1.2. Сложные эскизы ……... 14
1.2. Построение моделей твердых тел на основе двумерных эскизов объектов …… 20
1.3. Построение трехмерных эскизов объектов и моделей твердых тел на их основе …….. 29
1.3.1. Трехмерные эскизы …….. 29
1.3.2. Модели твердых тел на основе трехмерных эскизов …..... 30
1.4. Построение моделей биологических объектов и изделий……..... 38
1.4.1. Сборка «снизу вверх» ……... 39
1.4.2. Сборка «сверху вниз» …….. 47
Глава 2. Построение геометрических моделей биологических объектов по томограммам в пакете MIMICS …… 53
Глава 3. Реализация статических моделей в SolidWorks Simulation ……. 71
3.1. Общие сведения о SolidWorks Simulation ……. 71
3.2. Интерфейс SolidWorks Simulation …….. 81
Глава 4. Алгоритмы исследования элементов конструкций и биологических объектов в динамике …….. 86
4.1. Основные сведения …….. 86
4.2. Алгоритм расчета потери устойчивости ……... 88
4.3. Алгоритм исследования усталости элемента конструкции……. 92
4.4. Алгоритм выполнения нелинейного динамического исследования элемента конструкции …… 97
Глава 5. Моделирование и реализация моделей потока в SolidWorks Flow Simulation ……... 106
Глава 6. Задания для самостоятельной работы …….. 120
Приложения……. 147
1. Свойства материалов протезов и имплантатов ……..…….. 147
2. Геометрические параметры и механические свойства кровеносных сосудов …….. 150
3. Соотношения внесистемных единиц с единицами СИ …… 155
4. Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименований ……. 156

Бегун Петр Иосифович
Лебедева Елена Александровна
Лобачева Дарья Александровна
Щепилина Олеся Валерьевна

Компьютерное моделирование
в прикладной и биомеханике

Учебное пособие

Редактор О. Р. Крумина

Подписано в печать 29.12.15. Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Печать цифровая. Печ. л. 10,0
Гарнитура «Times New Roman». Тираж 72 экз. Заказ

Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
197376, С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5