

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет»

О.Е. Носкова

**Решение задач сопротивления материалов
с помощью программного комплекса SolidWorks**

Методические указания по выполнению самостоятельных работ

Электронное издание

Красноярск 2016

Рецензент

И.О. Богульский, доктор физ.-мат. наук, профессор

Носкова, О.Е.

Решение задач сопротивления материалов с помощью программного комплекса SolidWorks: методические указания по выполнению самостоятельных работ / О.Е. Носкова; Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2016. – 71 с.

Представлены темы самостоятельных работ по дисциплине «Сопротивление материалов» с применением программного комплекса SolidWorks.

Предназначено для бакалавров дневного и заочного отделения, обучающихся по направлениям подготовки 110800.62 «Агроинженерия» и 280700.62 «Техносферная безопасность», а также для техников-механиков по направлению подготовки 110809.65 «Механизация сельского хозяйства».

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Красноярского государственного аграрного университета

© Носкова О.Е., 2016

© ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет», 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
Справочная информация по интерфейсу программы SolidWorks ...	6
Самостоятельная работа №1. Исследование напряжённо-деформированного состояния ступенчатого бруса при растяжении (сжатии).....	11
Порядок выполнения самостоятельной работы №1	12
Самостоятельная работа №2. Исследование напряжённо-деформированного состояния прямой балки при плоском изгибе...	27
Порядок выполнения самостоятельной работы №2.....	28
Самостоятельная работа №3. Построение эпюр внутренних усилий для ломаного стержня (плоская задача).....	38
Порядок выполнения самостоятельной работы №3.....	39
Самостоятельная работа №4. Определение перемещений и углов поворота сечений в балках при плоском изгибе и подбор рационального сечения балки.....	48
Порядок выполнения самостоятельной работы №4.....	49
Самостоятельная работа №5. Построение эпюр внутренних усилий вала при изгибе с кручением.....	58
Порядок выполнения самостоятельной работы №5.....	60
Литература.....	70

ВВЕДЕНИЕ

Важным фактором и направлением развития образования является формирование у студентов навыков использования современных и перспективных средств информационных технологий.

Быстрое развитие вычислительной техники и ее внедрение практически во все сферы жизни привело к тому, что сегодня грамотный специалист в любой области знаний должен хорошо ориентироваться в мире компьютеров и владеть необходимыми программными средствами. Профессиональная современная инженерная деятельность неизбежно связана с применением систем автоматического проектирования, автоматического производства и автоматического инженерного анализа. Такие системы, как AutoCAD, DUCT, Pro/Engineer, Unigraphics и SolidsWorks, широко используются для компьютерного моделирования изделий сложной формы с последующим выпуском чертежей и генерацией управляющих программ для станков с ЧПУ.

SolidWorks – программный комплекс, предназначенный для автоматизации работ промышленного предприятия на этапах конструкторской и технологической подготовки производства. Обеспечивает разработку изделий любой степени сложности и назначения. В SolidWorks используется принцип трехмерного твердотельного и поверхностного параметрического проектирования, что позволяет конструктору создавать объемные детали и компоновать сборки в виде трехмерных моделей, по которым создаются двухмерные чертежи и спецификации в соответствии с требованиями ЕСКД.

SolidWorks включает в себя ряд прикладных модулей, из которых наибольший интерес для нас представляет SolidWorks Simulation. Данный модуль, основанный на методе конечных элементов, позволяет производить расчёт на прочность конструкций в упругой зоне, решать задачи механики деформированного твёрдого тела. Данный модуль позволяет проводить статический анализ деталей и сборок, оптимизировать конструкцию, а значит избегать ненужных затрат на лишний материал. Опираясь на результаты, можно сделать конструкцию более прочной, легкой, изящной, а значит экономически выгодной и более практичной.

Использование программного средства SolidsWorks в учебном процессе может стать важнейшим дидактическим условием формирования и развития профессиональной компетентности студентов технических направлений подготовки.

Цель выполнения самостоятельных работ по курсу «Сопротивление материалов»:

- формирование у студента основных компетенций в предметной области «Сопротивление материалов», а именно:

- владение культурой мышления, способность к обобщению, анализу, восприятию информации в области механики, постановке цели и выбору путей её достижения;

- умение логически верно, аргументированно и ясно строить техническую устную и письменную речь;

- стремление к саморазвитию, повышению своей квалификации и мастерства в сфере механики, владение навыками самостоятельной работы;

- готовность к обработке результатов экспериментальных исследований;

- способность осуществлять сбор и анализ исходных данных для расчета и проектирования;

- способность использовать информационные технологии при проектировании машин и организации их работы;

- углубление и закрепление знаний, полученных на лекционных занятиях;

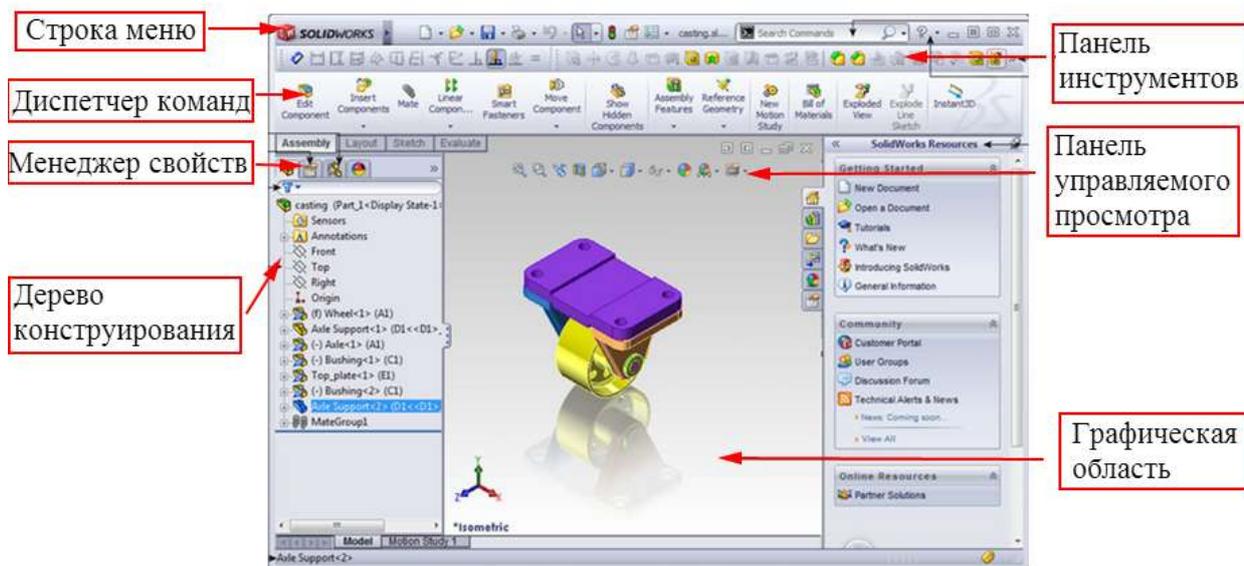
- формирование навыков по проведению математического моделирования и вычислительных экспериментов с использованием программных пакетов;

- формирование умений интерпретировать результаты компьютерного моделирования и принимать решения по оптимизации параметров и характеристик НДС;

- закрепление навыков работы на ЭВМ.

Справочная информация по интерфейсу программы *SolidWorks*

SolidWorks – это система автоматизированного проектирования (САПР), использующая привычный графический интерфейс пользователя *Microsoft Windows*. Другими словами, это легкое в освоении средство позволяет инженерам-проектировщикам быстро отображать свои идеи в эскизе, экспериментировать с элементами и размерами, а также создавать модели и подробные чертежи.



Общий вид интерфейса пользователя

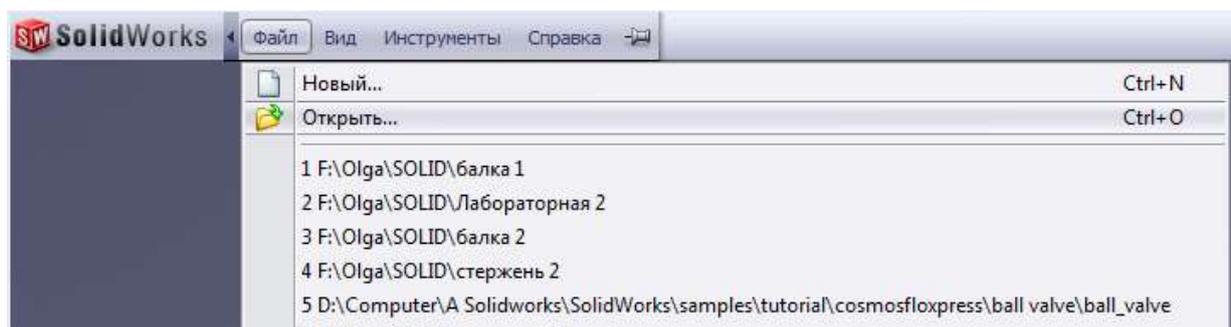
Запуск программы

Запуск программы осуществляется двумя способами

1. Через кнопку **Пуск** в нижнем левом углу браузера .
2. Через ярлык программы на рабочем столе .

Открытие существующего файла

В верхней строке меню выбираем **Файл > Открыть > Имя файла** либо нажимаем на стандартный значок **Открыть** .



Строка меню

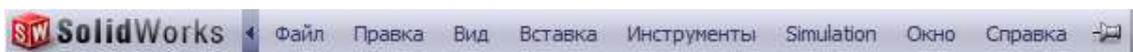
В строке меню содержатся следующие элементы:

– наиболее часто используемые кнопки инструментов панели инструментов «Стандартная»;



– меню программы *SolidWorks*.

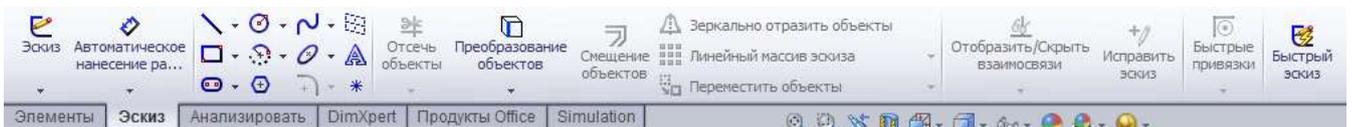
Это меню отображается при наведении курсора мыши или нажатии на логотип *SolidWorks*.



Диспетчер команд

Диспетчер команд – это контекстная панель инструментов, которая обновляется автоматически в зависимости от панели инструментов, к которой требуется доступ. По умолчанию она содержит встроенные панели инструментов в зависимости от типа документа.

При нажатии на вкладку, располагающуюся под *Диспетчером команд*, она обновляется для отображения панели инструментов. Например, при выборе вкладки *Эскиз* отображается панель инструментов эскизов.



PropertyManager (менеджер свойств)

Окно *PropertyManager*  отображается на панели слева от графической области. *PropertyManager* открывается при выборе объектов или команд, определённых в *PropertyManager*.

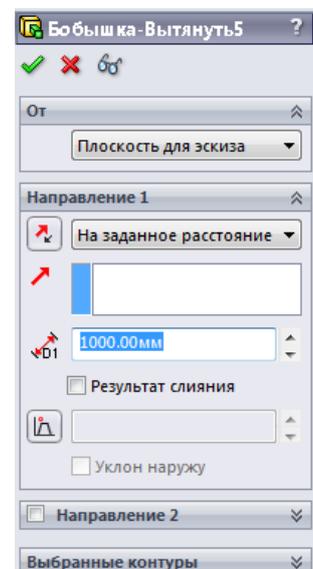
Используемые кнопки *PropertyManager*:

 – *ОК*. Принятие выбранных объектов, выполнение команд и закрытие *PropertyManager*;

 – *Отмена*. Отмена выбранных элементов и закрытие *PropertyManager*;

 – *Предварительный просмотр*;

 – *Справка*.

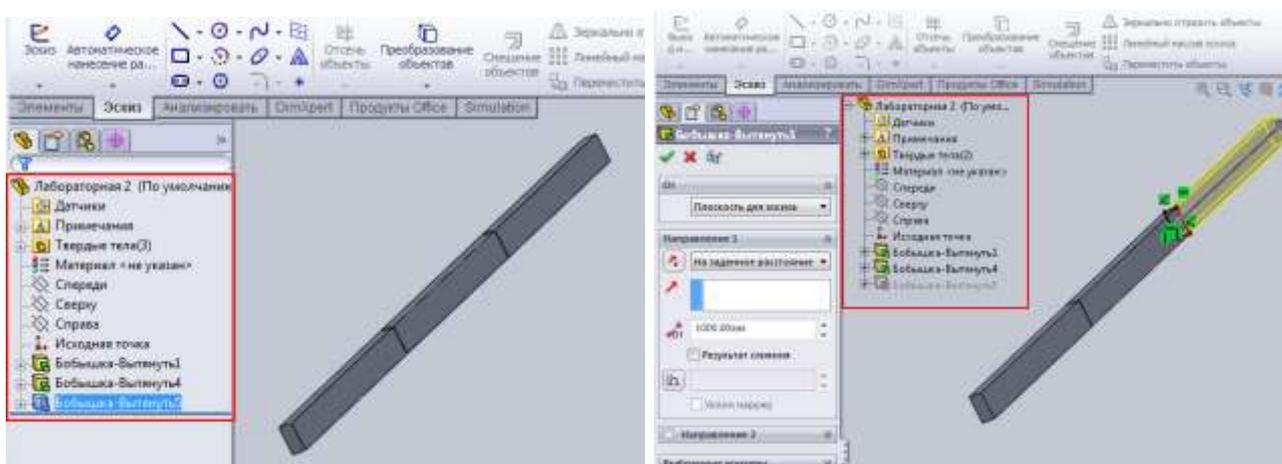


Дерево конструирования

В дереве конструирования **FeatureManager** в левой части окна *SolidWorks* отображается контурный вид активной детали, сборки или чертежа. Можно легко увидеть построение модели или сборки или просмотреть разные листы и виды чертежа.

Дерево конструирования **FeatureManager** и графическая область динамически связаны. Можно выбирать элементы, эскизы, чертежные виды и вспомогательную геометрию в любой части окна.

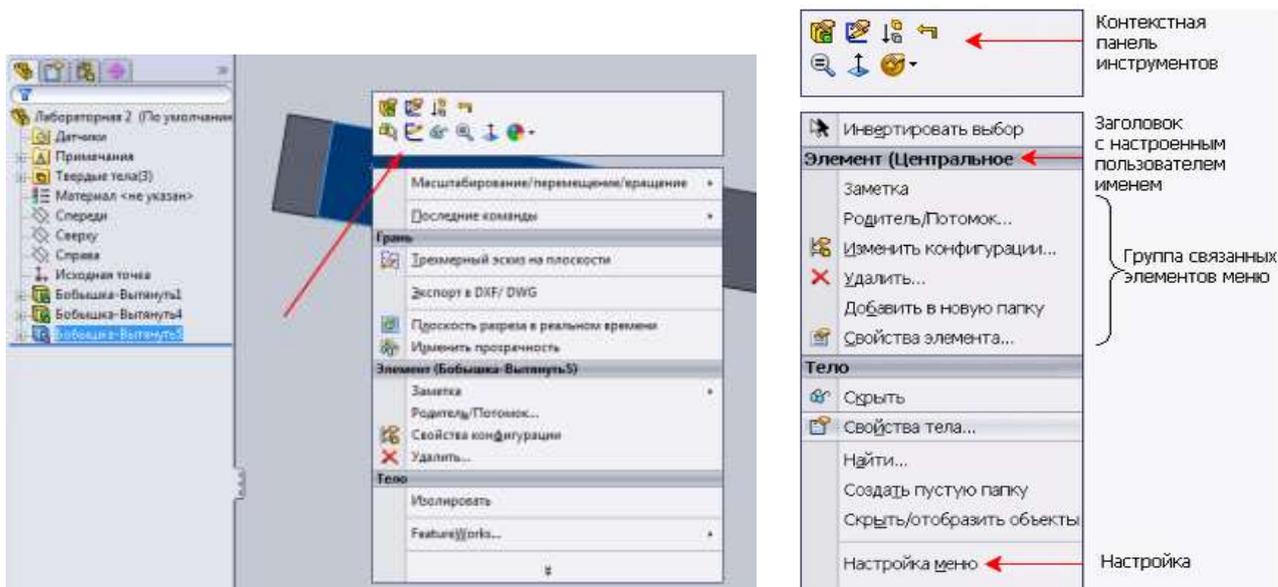
Дерево конструирования в зависимости от выполняемых операций может менять свое местоположение на экране. При неактивных операциях дерево конструирования располагается слева, а при выполнении каких-либо команд оно автоматически перемещается в графическое окно.



Контекстные панели инструментов

Контекстные меню обеспечивают удобный доступ к инструментам и командам. Контекстная панель инструментов появляется при нажатии на правую кнопку мыши.

При выборе объектов в графической области или в дереве конструирования **FeatureManager** контекстные панели инструментов отображаются и дают возможность доступа к часто выполняемым заданиям для этого контекста. Инструменты в контекстной панели инструментов являются набором объектов, ранее располагавшихся в контекстных меню.



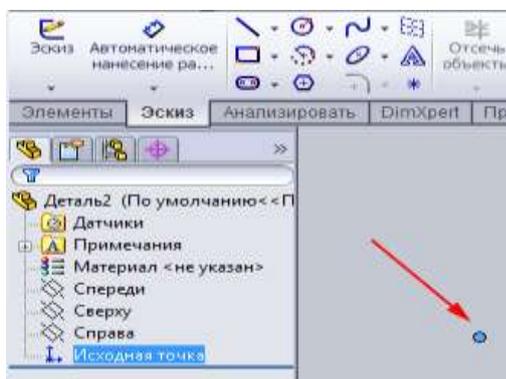
Контекстные панели инструментов доступны для деталей, сборок и эскизов.

Справочная система координат

Система координат  появляется в документах деталей и сборок, чтобы помочь ориентироваться при просмотре моделей. Также она может использоваться для изменения ориентации вида.

Исходная точка

Появившаяся исходная точка синего цвета представляет координату (0,0,0) модели. Когда эскиз становится активным, исходная точка эскиза отображается красным цветом и представляет (0,0,0) координату эскиза. Размеры и взаимосвязи могут быть добавлены к исходной точке модели, но не эскиза.



Панель инструментов управляемого просмотра

Прозрачная панель инструментов в каждом окне просмотра предоставляет все часто используемые инструменты для манипулирования видом.



Подтверждение или отклонение выполненных операций

Существуют несколько способов принятия создаваемых элементов. После создания предварительного изображения элемента можно выполнить следующее:

1) нажать правую кнопку мыши и выбрать **ОК** или **Отмена** в контекстном меню;

2) использовать **Угол для выбора**:

– нажать значок **ОК** ✓ или **Отмена** ✗, которые появляются в **Углу подтверждения** графической области системы *SolidWorks*;
– нажать значок **Выход** из эскиза в окне **Угол для выбора**, чтобы завершить эскиз , или нажать значок **Отмена** эскиза ✗, чтобы отбросить изменения, сделанные в эскизе;

3) в активном **PropertyManager** можно выполнить следующее:

– нажать кнопку **ОК** ✓ или клавишу **Enter**;

– нажать кнопку **Cancel** ✗ или клавишу **Esc**.

САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА №1

Исследование напряжённо-деформированного состояния ступенчатого бруса при растяжении (сжатии)

Цель работы:

- формирование навыков исследования напряжённо-деформированного состояния стального ступенчатого бруса при растяжении (сжатии);
- углубление и закрепление знаний, полученных на лекционных и практических занятиях;
- формирование умений интерпретировать результаты компьютерного моделирования и принимать решения по оптимизации конструкции;
- формирование навыков работы на ЭВМ.

Задачи:

1. Построение геометрической модели ступенчатого прямого бруса при помощи программного пакета SolidWorks.
2. Задание граничных условий и внешних нагрузок.
3. Генерация конечно-элементной сетки и запуск исследования напряжённо-деформированного состояния бруса.
4. Анализ полученных результатов и их сравнение с результатами аналитического расчёта.

Подготовка к работе

Прежде чем приступать к выполнению данной самостоятельной работы, студент должен выполнить аналитический расчёт ступенчатого бруса (см. методические указания [1] – Задача 2). После того как будут определены внутренние усилия, размеры поперечного сечения, напряжения и деформация стержня, построены их эпюры, студент может приступать к изучению содержания данной самостоятельной работы.

Объектом исследования является ступенчатый стержень из расчётно-графического задания [1]. Длины участков стержня, внешняя нагрузка и механические характеристики материала определены заданием, а размеры поперечных сечений назначаются по результатам аналитического расчёта.

Пример выполнения самостоятельной работы №1

Исследуемый объект: прямой ступенчатый брус (см. рис. 1.1), жёстко закреплённый с одной стороны и нагруженный продольными усилиями P_1 , P_2 и распределённой нагрузкой q .

Исходные данные: $P_1=30\text{кН}$, $P_2=20\text{кН}$, $q=20\text{кН/м}$, $a=1\text{м}$, $d_1=0,009\text{м}$, $d_2=0,0126\text{м}$, $d_3=0,0155\text{м}$. Материал: конструкционная сталь с параметрами: модуль упругости $E=2\cdot 10^5\text{ МПа}$, коэффициент Пуассона $\mu=0,3$.

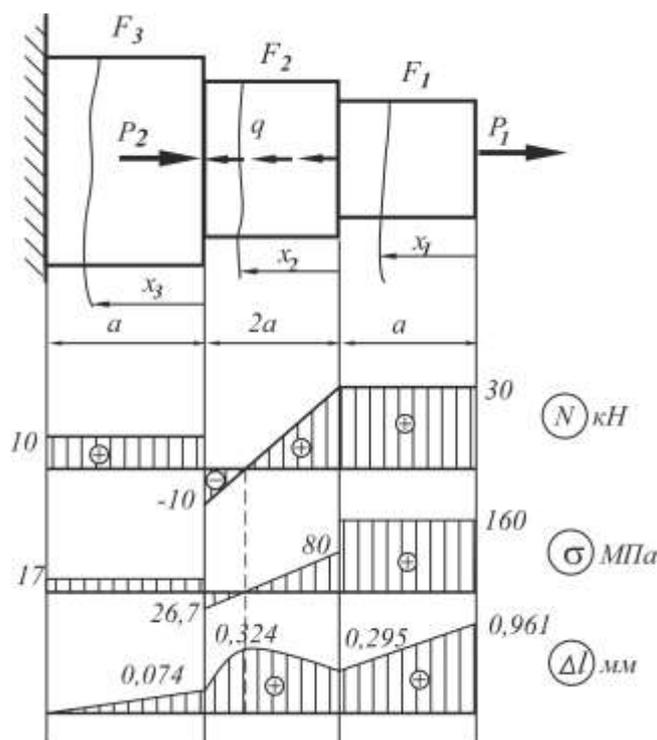


Рисунок 1.1 – Прямой ступенчатый брус

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ №1

1. Построение геометрической модели прямого ступенчатого бруса

А. Загружаем программный пакет *SolidWorks*. На панели инструментов *Стандартная* выбираем команду *Создание нового файла* . В открывшемся диалоговом окне *Новый документ SolidWorks* (рис. 1.2) выбираем команду создать *Деталь* , нажимаем **ОК**. Появится окно новой детали (рис. 1.3).

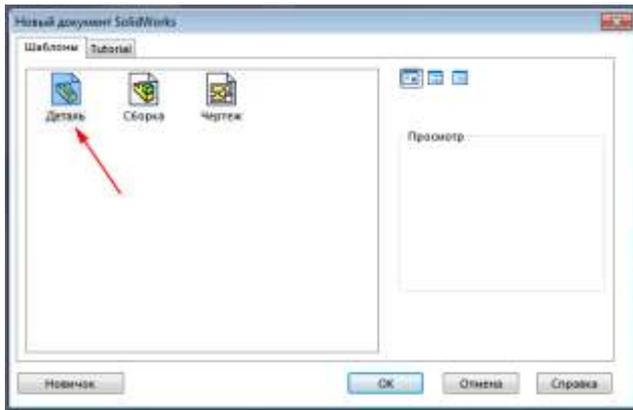


Рисунок 1.2 – Диалоговое окно Новый документ SolidWorks

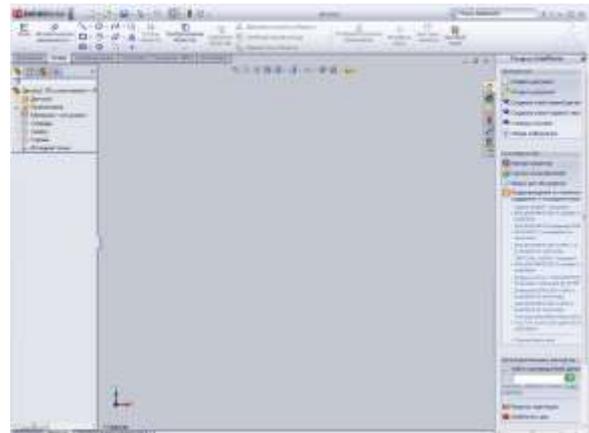


Рисунок 1.3 – Окно новой детали

Б. В области управления выбираем **Эскиз** , после чего программа предложит выбрать плоскость эскиза. Выбираем плоскость **Спереди**.

В. Для построения круглого ступенчатого стержня сначала необходимо определить радиусы поперечных сечений стержня на каждом из участков, площади которых были определены в ходе решения расчётно-графического задания. Зная площади бруса на участках, определяем радиусы поперечных сечений:

$$r_1 = \sqrt{\frac{F_1}{\pi}} = \sqrt{\frac{250 \cdot 10^{-6}}{\pi}} = 0,00892 \text{ м},$$

$$r_2 = \sqrt{\frac{F_2}{\pi}} = \sqrt{\frac{500 \cdot 10^{-6}}{\pi}} = 0,00126 \text{ м},$$

$$r_3 = \sqrt{\frac{F_3}{\pi}} = \sqrt{\frac{750 \cdot 10^{-6}}{\pi}} = 0,001545 \text{ м}.$$

Г. В области управления в разделе **Эскиз** выбираем команду **Окружность** . Из исходной точки рисуем окружность радиуса $r_1=0,00892 \text{ м}$. Точный размер окружности задаём в открывшемся окне, в параметрах настроек моделирования (рис. 1.4). Чтобы завершить построение окружности, выбираем в меню настроек кнопку **Готово** . В результате этой операции получаем окружность заданного радиуса (рис. 1.5).

Обращаем внимание на то, что в программе по умолчанию размеры задаются в миллиметрах.

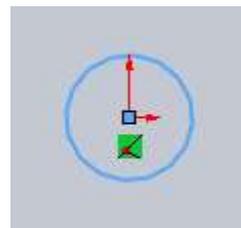
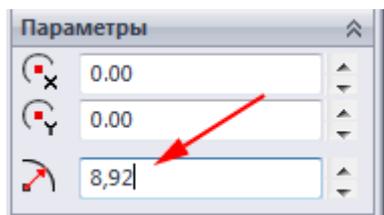


Рисунок 1.4 – Параметры окружности

Рисунок 1.5 – Окружность

Д. Следующим шагом является вытягивание эскиза окружности на длину, соответствующей длине первого участка. В области управления переходим в раздел **Элементы**. Выбираем команду **Вытянутая бобышка/основание**. На экране появится трёхмерная модель стержня (рис. 1.6). В менеджере свойств задаём параметр вытяжки, равный длине первого участка, согласно заданию. Завершаем операцию командой **Готово** . В результате получим цилиндр длиной a и в дереве конструирования появится соответствующая запись (рис. 1.7).

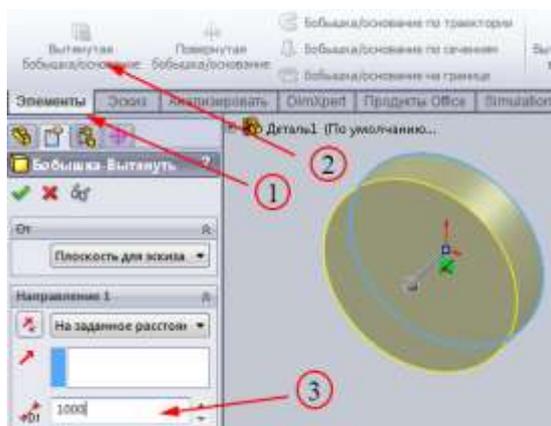


Рисунок 1.6 – Этапы вытяжки

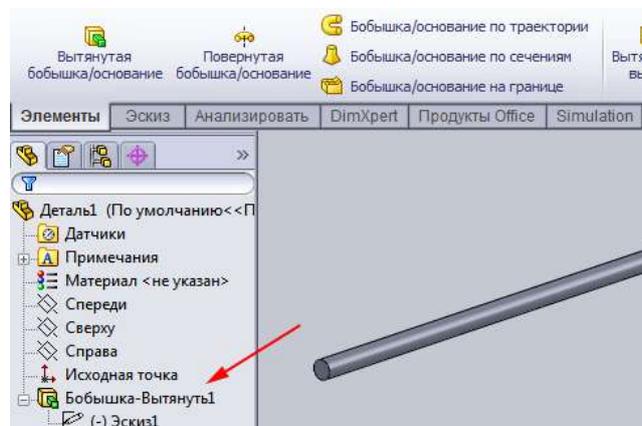


Рисунок 1.7 – Результат операции вытяжки

Е. Чтобы построить второй участок стержня, надо создать новый эскиз окружности радиусом $r_2=0,00126м$. Для этого мышкой выделяем торцевую сторону стержня (при этом он выделяется другим цветом), затем в диспетчере команд переходим в раздел **Эскиз**. Для удобства построения разворачиваем чертёж в ориентацию вида **Спереди** (рис. 1.8).

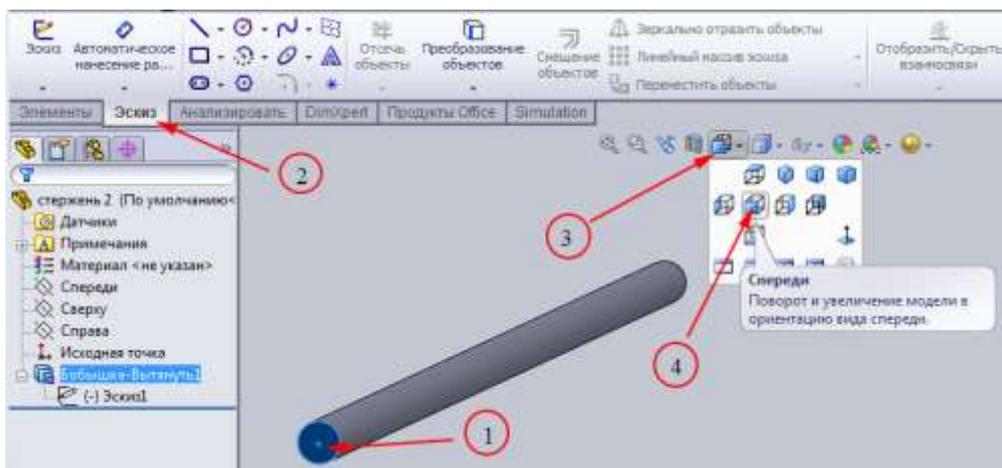


Рисунок 1.8 – Построение второго эскиза

Аналогично пункту Г рисуем в этой плоскости вторую окружность. В настройках моделирования указываем нужную величину радиуса и завершаем команду кнопкой **Готово** (рис. 1.9).

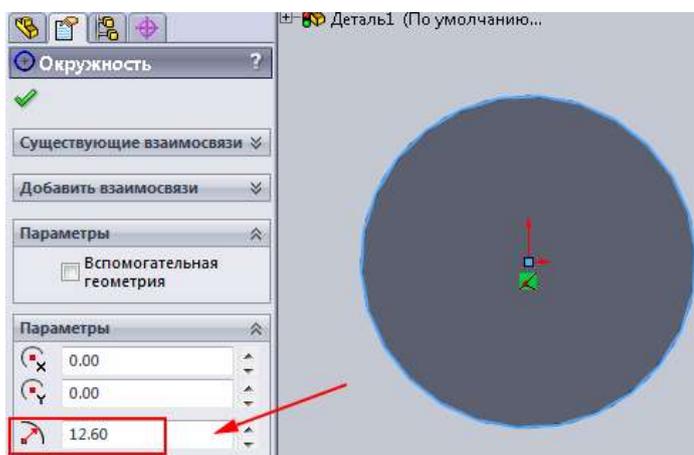


Рисунок 1.9 – Построение окружности

Ж. Аналогично пункту Д совершаем вытяжку второго эскиза на заданное расстояние, соответствующее длине второго участка *a*. Чтобы не произошло слияния этих двух участков в один, необходимо убрать метку в графе **Результат слияния**. Не забываем завершать построение командой **Готово** (рис. 1.10).

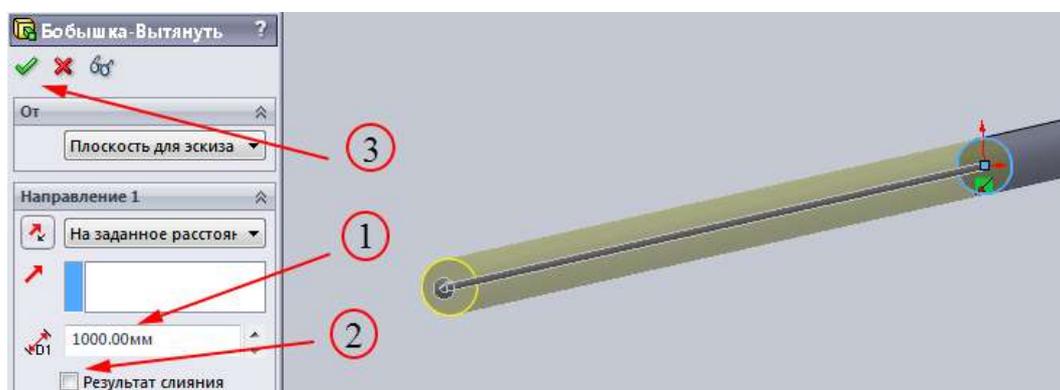


Рисунок 1.10 – Вытяжка второго участка

3. Чтобы построить третий участок стержня, необходимо повторить пункты Е и Ж. В результате мы получаем готовую модель в виде прямого ступенчатого стержня, состоящего из трёх участков (рис. 1.11).

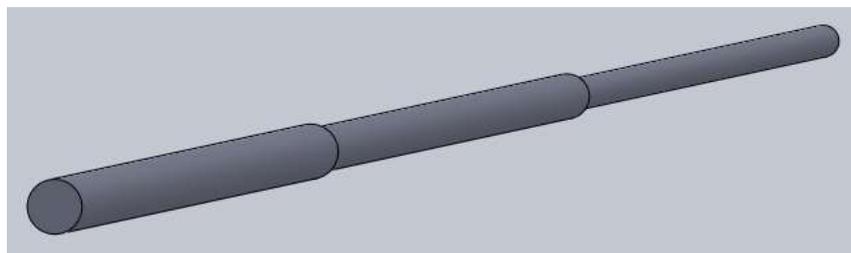


Рисунок 1.11 – Готовая модель

И. Завершающим шагом моделирования является сохранение файла. Выбираем команду **Сохранить** на панели инструментов **Стандартная** и присваиваем имя файлу (рис. 1.12). Желательно сохранять файл, с которым идет работа, после каждого изменения в нем.

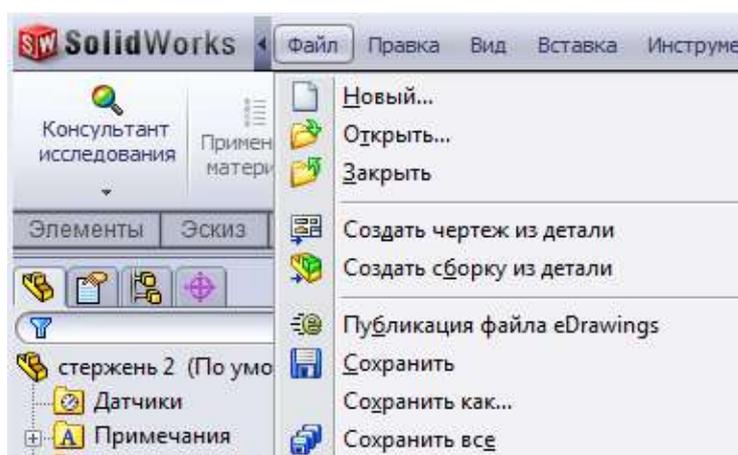


Рисунок 1.12 – Сохранение файла

2. Прочностной расчёт конструкции

А. Модуль, предназначенный для выполнения прочностных расчётов, называется **Simulation**. В области управления запускаем данный модуль. На панели инструментов появится активная команда **Консультант исследования**, в которой необходимо выбрать команду **Новое исследование** (рис. 1.13). В окне **Тип исследования** необходимо выбрать **Статическое** и подтвердить свой выбор кнопкой .

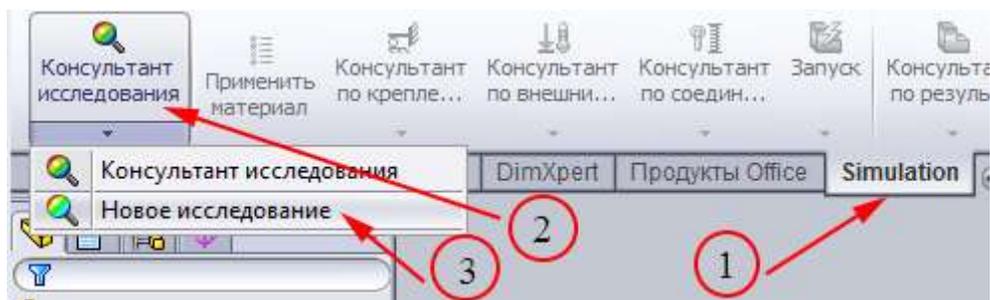


Рисунок 1.13 – Запуск модуля прочностного расчёта

Б. В дереве исследования раскрываем построенную модель и, удерживая на клавиатуре кнопку *Ctrl*, выделяем все элементы модели. Затем при помощи правой кнопки мыши вызываем контекстное меню, в котором выбираем пункт **Рассматривать все тела как балки** (рис. 1.14). В результате в дереве исследования напротив геометрических объектов появится соответствующий значок балки. В этом же разделе назначаем материал исследуемого стержня. Выбираем пункт **Применить/редактировать материал** и в библиотеке материалов выбираем материал стержня **Простая углеродистая сталь** (рис. 1.15).

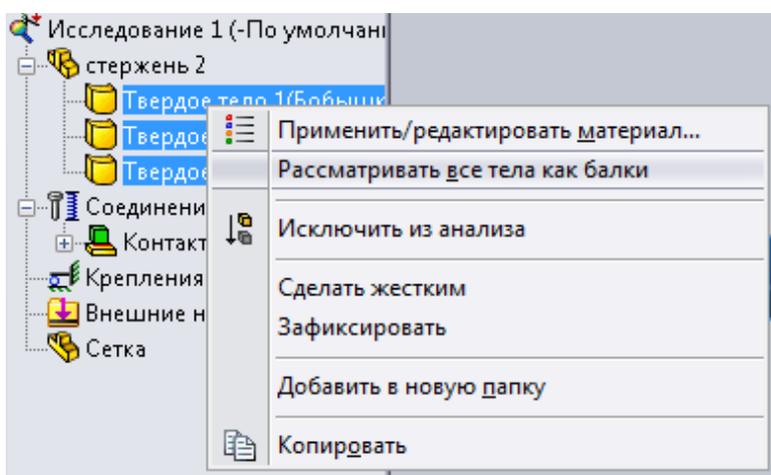


Рисунок 1.14 – Назначение типа исследуемого объекта

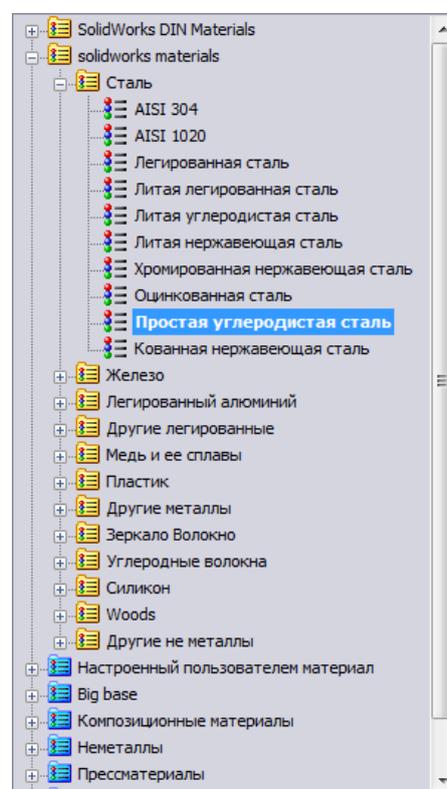


Рисунок 1.15 – Выбор материала

В. Следующим подготовительным шагом будет редактирование соединений участков стержня. Нажимаем правой кнопкой мыши на параметр **Группа соединений**  и выбираем **Редактировать**. В окне редактирования отмечаем пункт **Выбрать**. На чертеже выбираем все три участка стержня и нажимаем кнопку **Вычислить** (рис. 1.16). На стержне появятся четыре узла на границах участков.

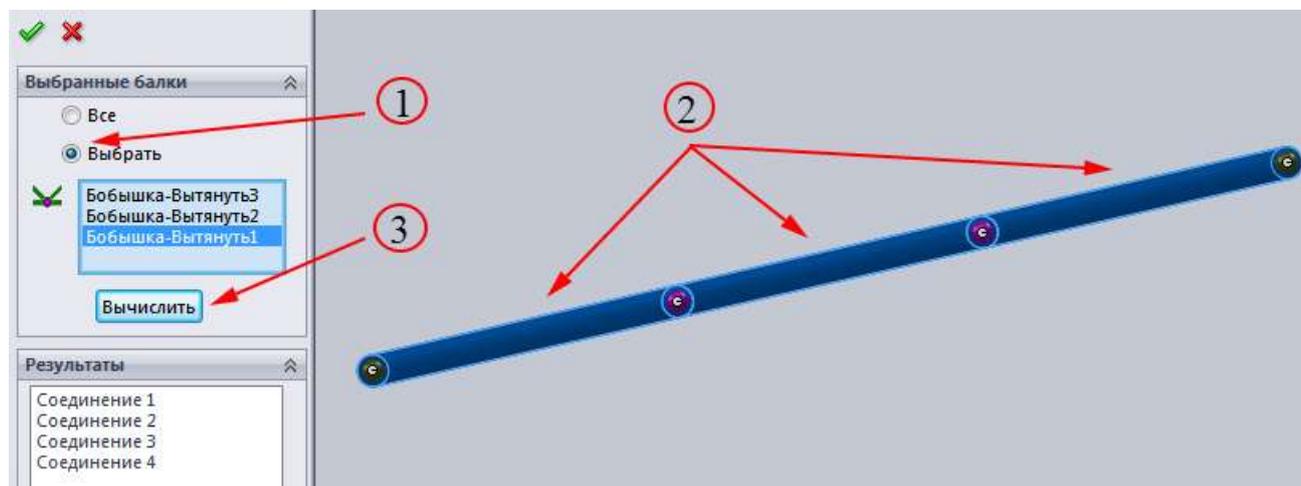


Рисунок 1.16 – Редактирование соединений

Г. Согласно чертежу задания необходимо жёстко закрепить стержень с одного торца. Данная операция выполняется при помощи команды **Крепления** . Нажимая правую клавишу мыши, выбираем пункт **Зафиксированная геометрия**. Применительно к нашей задаче необходимо жёстко закрепить торец стержня с большим радиусом поперечного сечения. Для этого в окне редактирования нужно выбрать пункт **Зафиксированная геометрия** , перейти в пункт **Соединения**  и на чертеже выбрать узел, соответствующий жёсткой заделке стержня. В разделе **Соединения** появится запись «Соединение 1,1», а на чертеже изобразится крепление по осям (рис. 1.17).

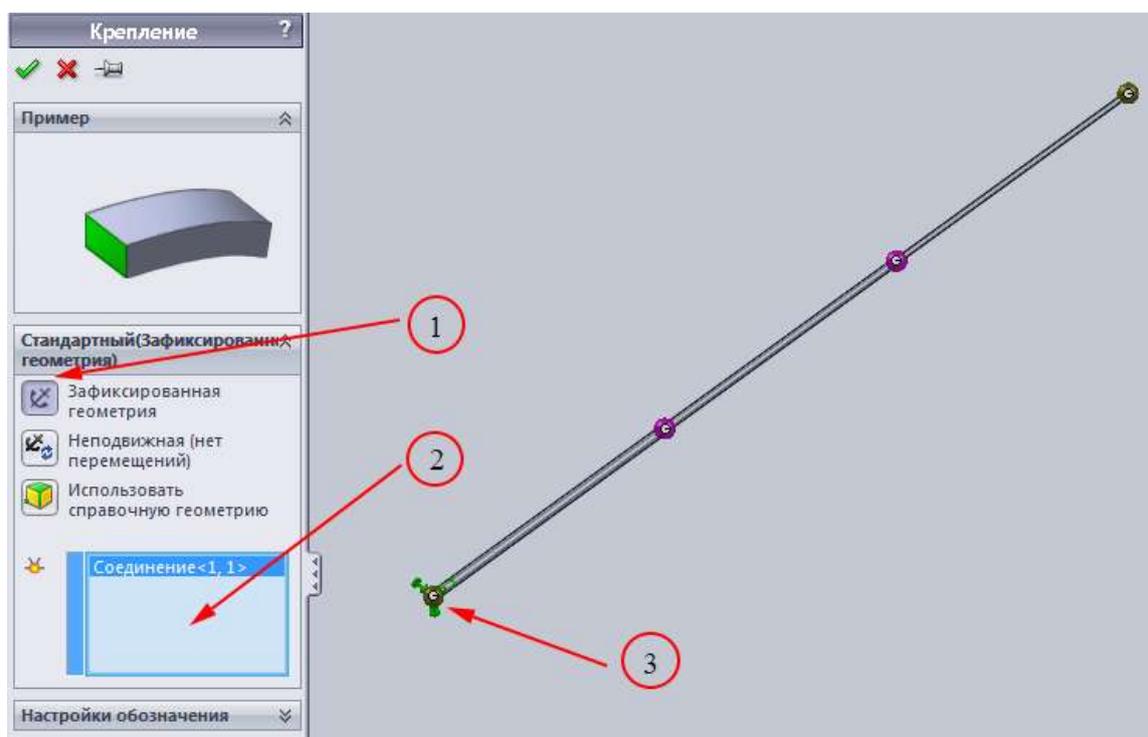


Рисунок 1.17 – Задание граничных условий

Д. Внешняя нагрузка задаётся в разделе **Внешние нагрузки** . Правой кнопкой мыши вызываем данную команду и выбираем пункт **Сила** . В дереве редактирования в разделе **Выбор** выбираем пункт **Соединения** . В разделе **Грани, Кромки, Вершины, Справочные точки для силы** (голубая область) выбираем узел, в котором будет приложено усилие $P_1=30000\text{Н}$. В разделе **Грани, Кромки, Плоскость, Оси для направления** (розовая область) необходимо указать грань для направления. Для удобства выбора нужной грани необходимо приблизить рассматриваемый узел и выбрать грань с торца стержня (рис. 1.18). Выбранная зона подсветится другим цветом. В разделе **Сила** выбираем направление приложения сосредоточенной силы **Перпендикулярно плоскости** , вводим величину усилия в Ньютонах и корректируем направление действия силы в графе **Реверс направления** (рис. 1.18).

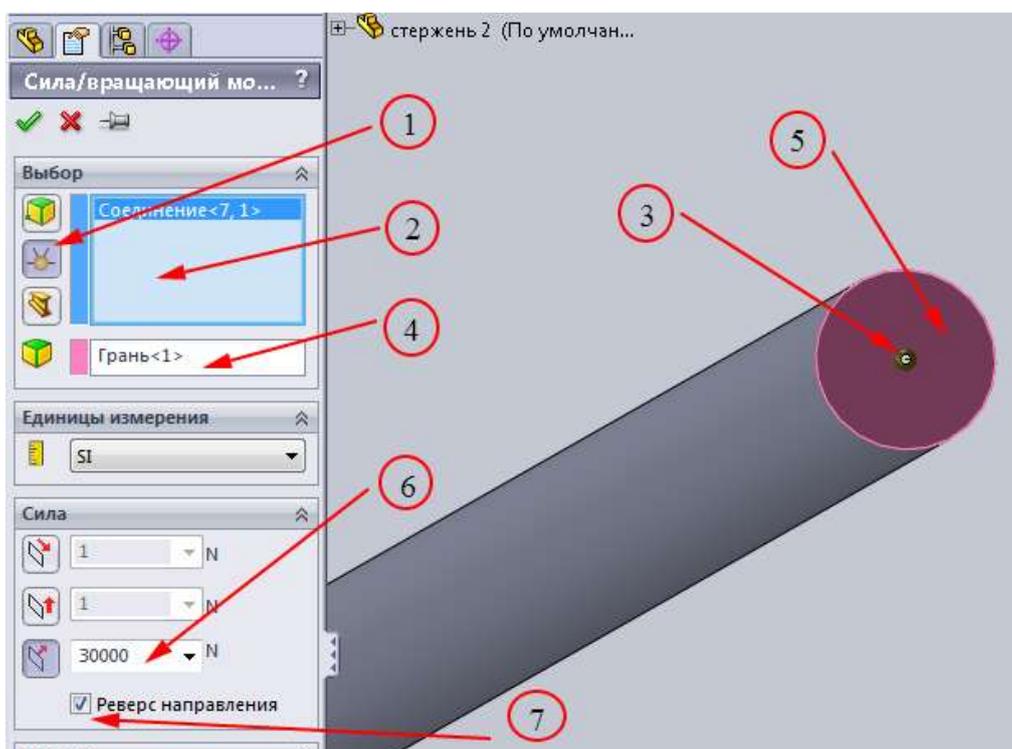


Рисунок 1.18 – Приложение сосредоточенной силы

Е. Аналогично задаём сосредоточенную силу $P_2=20000H$.

Ж. Чтобы задать равномерно распределённую нагрузку q , необходимо в разделе **Выбор** выбрать пункт **Балки**  и в разделе редактирования **Грани, кромки, вершины, справочные точки для силы** выбрать на модели средний участок стержня. Выбираем раздел редактирования **Грань, кромка, плоскость, оси для направления** и выделяем на модели торцевую поверхность. В разделе **Единицы измерения** ставим галочку **На единицу длины**. В разделе **Сила** выбираем направление приложения распределённой нагрузки **Перпендикулярно плоскости** , вводим величину усилия $q=20000н/м$ и корректируем направление действия силы в графе **Реверс** (рис. 1.19).

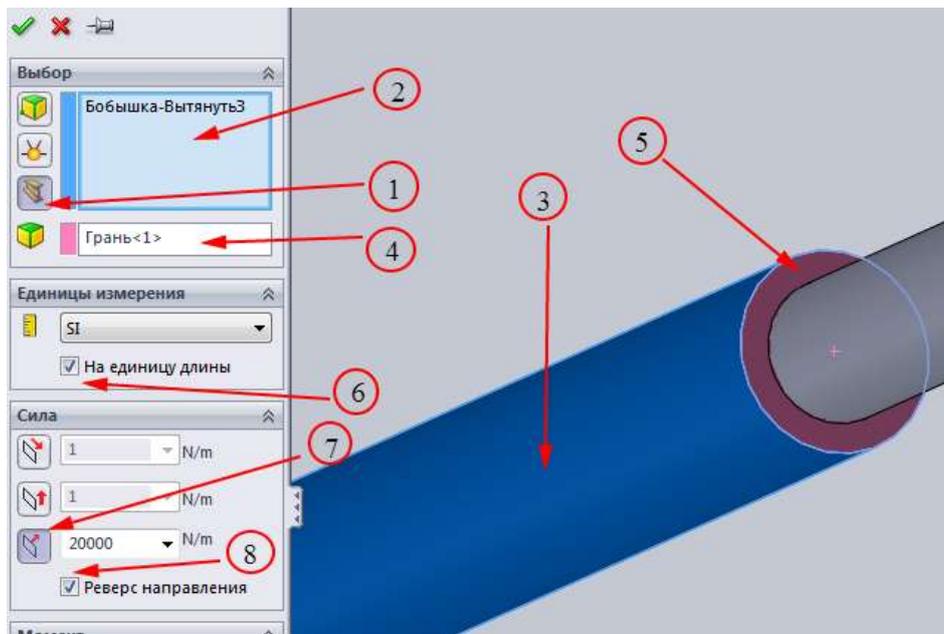


Рисунок 1.19 – Приложение равномерно распределённой нагрузки

3. После того как все этапы успешно завершены, производим запуск исследования. На панели инструментов выбираем команду **Запуск** . В результате данной операции мы получаем в графическом окне распределение напряжений и перемещений в виде цветовой диаграммы, а в дереве исследования появляются соответствующие пункты, выбирая которые можно просматривать диаграммы (рис. 1.20).

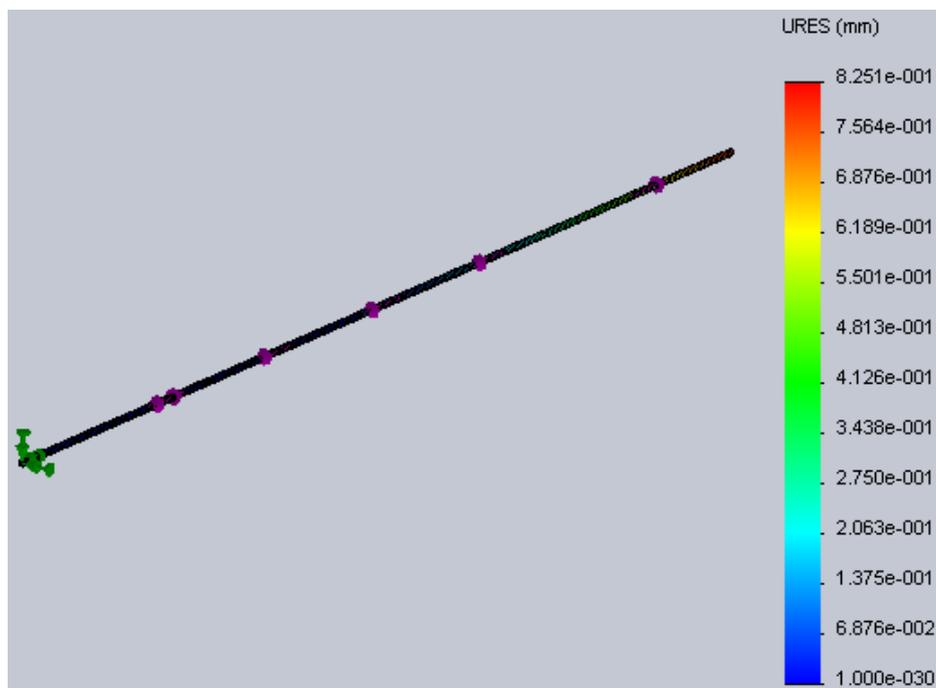


Рисунок 1.20 – Результаты расчёта

3. Обработка и анализ полученных результатов

А. В результате статического расчёта программа по умолчанию выдаёт диаграмму напряжений при наихудшем сценарии. В нашем случае нас интересует нормальное напряжение, возникающее в сечениях, перпендикулярных оси стержня. Чтобы посмотреть результат расчёта нормальных напряжений, в графе **Напряжение** правой кнопкой мыши вызываем меню редактирования и выбираем **Редактировать определение** (рис 1.21). В открывшемся окне **Этюра напряжений** выбираем определение напряжений **По оси** (рис. 1.22)

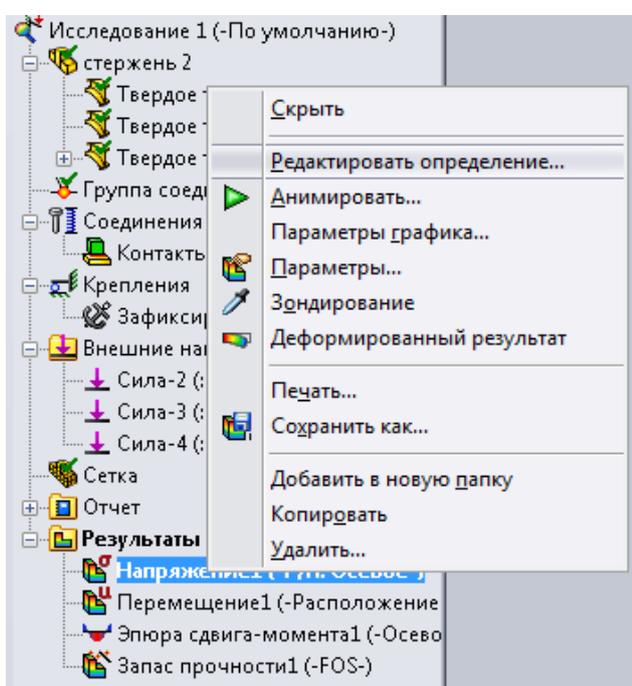


Рисунок 1.21 – Редактирование результатов расчёта

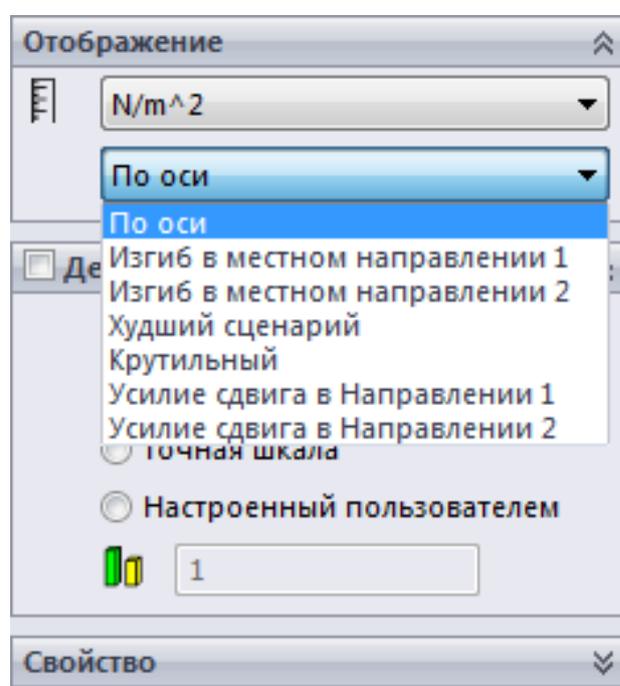


Рисунок 1.22 – Определение нормальных напряжений

Чтобы определить точные величины напряжений в интересующих точках, используем команду **Зондирование**. В графе **Напряжение** правой кнопкой мыши вызываем меню редактирования и выбираем **Зондирование**. В графическом окне указываем сечения, в которых необходимо узнать точные величины напряжения. При этом на чертеже появятся датчики с параметрами. Чтобы сохранить данные результаты, в окне редактирования в **Параметрах отчёта** нажимаем кнопку **Сохранить как датчик**  (рис. 1.23).

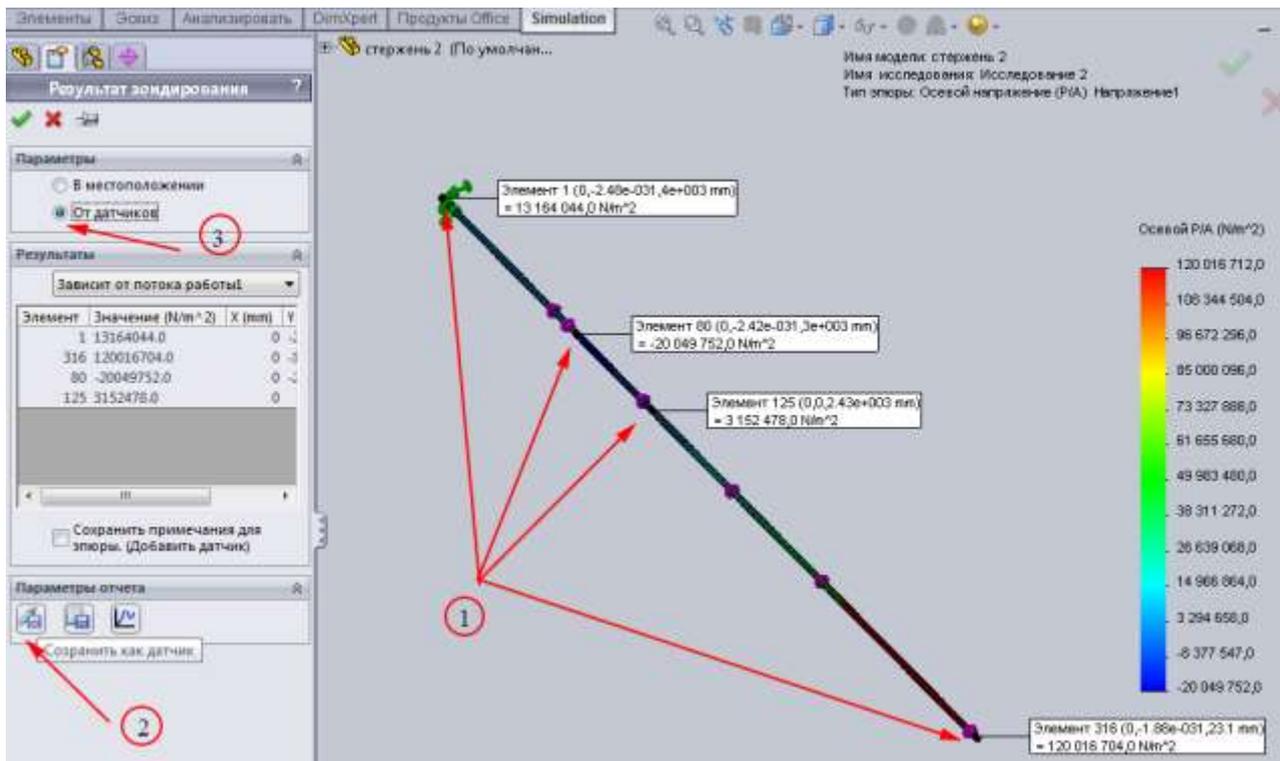


Рисунок 1.23 – Простановка датчиков на эпюре напряжения

Б. Чтобы посмотреть эпюру распределения внутренних усилий в дереве исследования, в графе **Результаты** правой кнопкой мыши вызываем параметры исследования и выбираем **Определить диаграмму балки** (рис. 1.24). В появившемся окне **Диаграмма балки** в разделе **Отображение Компонент** выбираем **Осевое усилие**. В разделе **Выбранные балки** ставим отметку напротив **Выбрать** и в графическом окне выбираем все участки стержня (рис. 1.25).

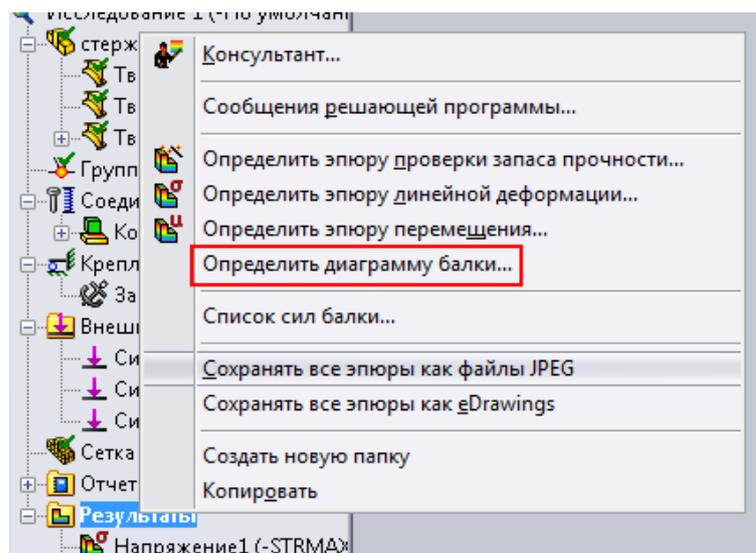


Рисунок 1.24 – Построение эпюры внутренних усилий

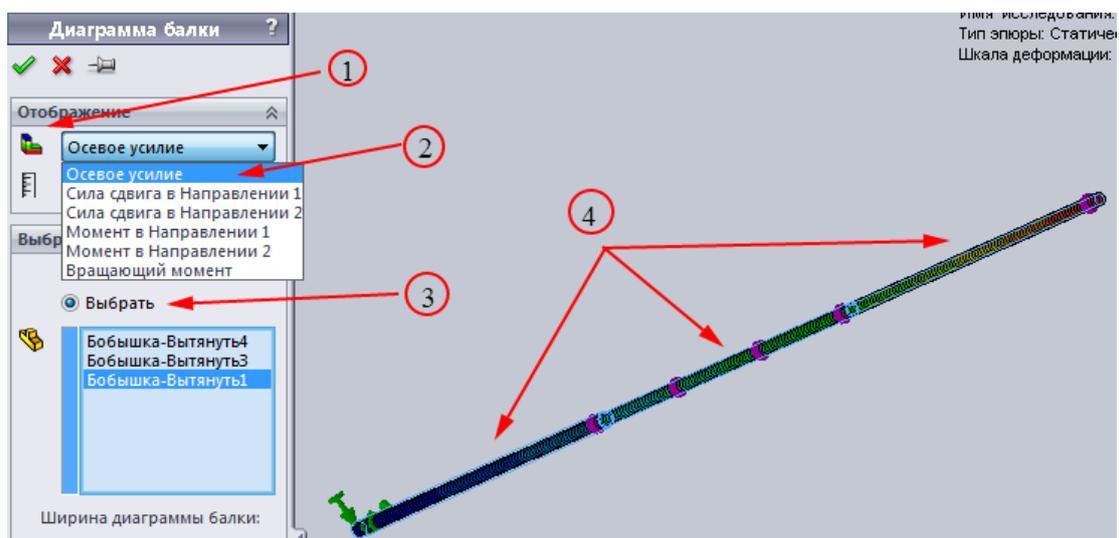


Рисунок 1.25 – Настройка диаграммы

В дереве исследования добавится строчка *Эюра сдвига – момента (осевое усилие)* , а в графическом окне появится эюра продольных сил (рис. 1.26).

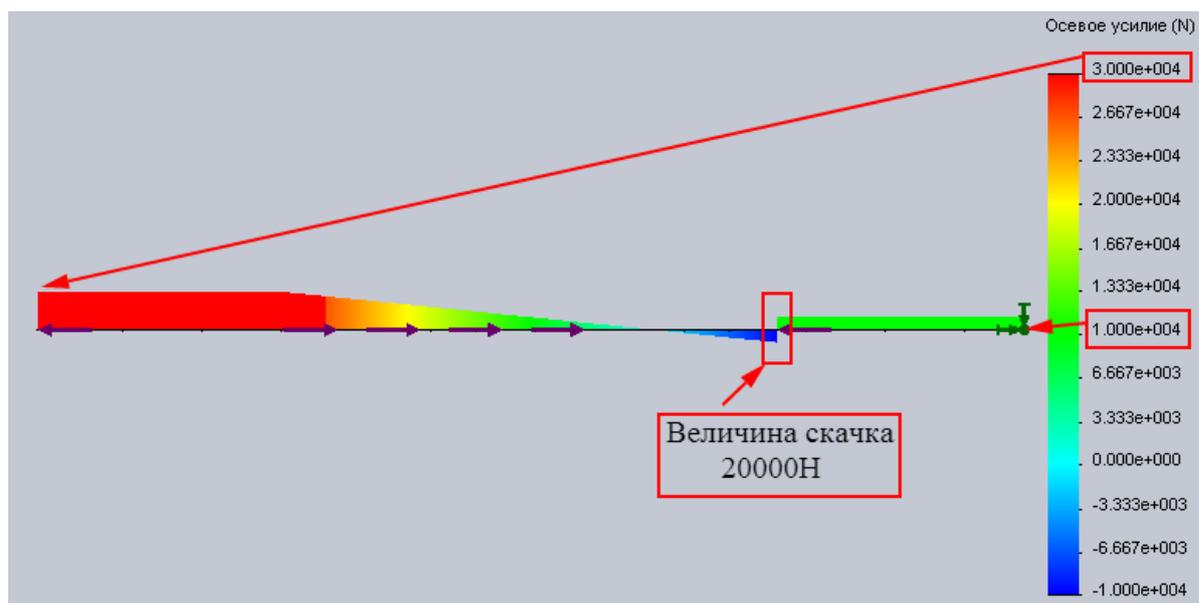


Рисунок 1.26 – Эюра продольных сил

4. Содержание отчёта

Отчёт по самостоятельной работе должен содержать:

- лист задания;
- результаты аналитического расчёта ступенчатого стержня;

- описание этапов построения и скриншот геометрической модели стержня;
- описание основных подготовительных этапов исследования напряжённно-деформированного состояния модели;
- скриншоты эпюр напряжения, перемещения и внутреннего усилия с датчиками величин в опасных сечениях и на границах участков;
- выводы по сравнительному анализу аналитического и программного расчётов.

Результаты сравнительного анализа свести в таблицу 1.

Таблица 1 – Сравнительный анализ результатов исследования к самостоятельной работе №1

Вид эпюры	Опасные сечения	Результаты аналитического расчёта	Результаты, полученные в ходе самостоятельной работы
Напряжение, <i>МПа</i>	А		
	В		
	С		
Продольная сила, <i>Н</i>	А		
	В		
	С		
Перемещение, <i>м</i>	А		
	В		
	С		

Контрольные вопросы

1. Что такое прочность, жесткость, устойчивость конструкции?
2. Что называется бруском?
3. Какая ось называется продольной осью бруса?
4. Что представляет собой расчетная схема конструкции и чем она отличается от реальной конструкции?
5. Какие основные допущения в отношении свойств материала принимаются в сопротивлении материалов?
6. В чем состоит принцип независимости действия сил?
7. В чем заключается гипотеза плоских сечений?
8. По каким признакам и как классифицируются нагрузки?
9. Какая нагрузка называется статической?
10. Что представляет собой интенсивность распределенной нагрузки?
11. Что такое внутренние силы (внутренние силовые факторы)?
12. Какие внутренние усилия (внутренние силовые факторы) могут возникать в поперечных сечениях брусков, и какие виды деформаций с ними связаны?
13. В чем суть метода сечений?
14. Какие напряжения называются нормальными? Какова размерность напряжений? Каково правило знаков для напряжений?
15. Какова связь между напряжениями и внутренними силовыми факторами?
16. Сформулируйте закон Гука.
17. Какие деформации называются линейными?
18. Какое напряженное состояние называется пространственным (трехосным), плоским (двухосным) и линейным (одноосным)?
19. Изобразите диаграмму растяжения (сжатия)? Назовите основные механические характеристики материалов.
20. В чём отличие диаграммы растяжения (сжатия) хрупкого и пластичного материала?
21. Что называется допускаемым напряжением?

САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА №2

Исследование напряжённо-деформированного состояния прямой балки при плоском изгибе

Цель работы:

- формирование навыков исследования напряжённо-деформированного состояния балки при плоском изгибе;
- углубление и закрепление знаний, полученных на лекционных и практических занятиях;
- проверка результатов аналитического расчёта.

Задачи:

1. Построение геометрических моделей прямой балки прямоугольного и двутаврового поперечного сечения при помощи программного пакета SolidWorks.
2. Задание граничных условий и внешних нагрузок.
3. Генерация конечно-элементной сетки и запуск исследования напряжённо-деформированного состояния бруса.
4. Анализ полученных результатов и их сравнение с результатами аналитического расчёта.

Подготовка к работе

Прежде чем приступить к выполнению самостоятельной работы №2, студент должен выполнить *Задачу 4 – Плоский изгиб балки* (см. методические указания [1] – Задача 4). После того как будут определены внутренние усилия, размеры поперечного сечения, построены их эпюры, студент может приступить к изучению содержания данной самостоятельной работы.

Объектом исследования является балка консольная или шарнирно опёртая [1]. Длины участков балки, внешняя нагрузка и механические характеристики материала определены заданием, а размеры поперечных сечений назначаются по результатам аналитического расчёта.

Пример выполнения самостоятельной работы №2

Исследуемый объект: шарнирно опёртая балка (рис. 2.1), нагруженная поперечной сосредоточенной силой P , равномерно-распределённой нагрузкой q и сосредоточенным моментом M .

Исходные данные: $P=10\text{кН}$, $q=50\text{кН/м}$, $M=10\text{кНм}$, $a=v=c=1\text{м}$.
Материал: конструкционная сталь с параметрами: модуль упругости $E=2\cdot 10^5\text{ МПа}$, коэффициент Пуассона $\mu=0,3$. Размеры поперечного сечения берём из прочностного расчёта в индивидуальном расчётно-графическом задании: для прямоугольного сечения $h=0,01216\text{м}$, $b=0,00608$.

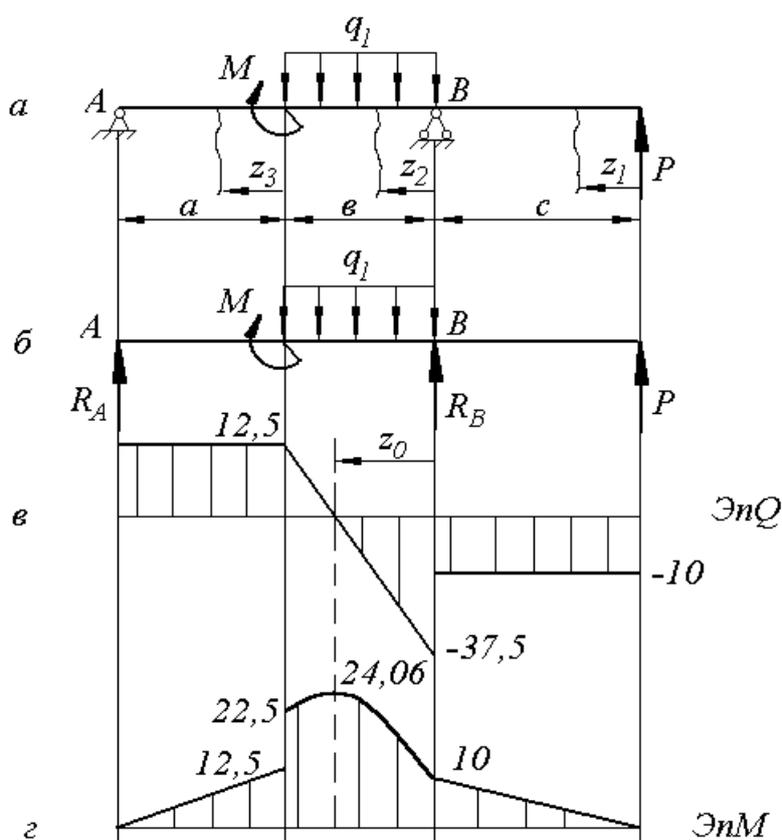


Рисунок 2.1 – Результаты аналитического расчёта прямой шарнирно-опёртой балки

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ №2

1. Построение геометрической модели балки прямоугольного поперечного сечения

А. Загружаем программный пакет *SolidWorks* и создаём **Новый документ** (см.: самостоятельная работа №1, пункты 1,А, 1,Б).

Б. Рассматриваемая балка (см. рис. 2.1) состоит из трёх участков одинакового поперечного сечения, поэтому необходимо построить три отдельных твёрдотельных участка балки.

Для построения первого участка балки в области управления переходим в раздел *Эскиз* и из исходной точки строим прямоугольник (рис. 2.2) со сторонами, которые были получены из условия прочности по нормальным напряжениям в опасном сечении балки в индивидуальном расчётно-графическом задании. В нашем случае $h=0,01216\text{м}$, $b=0,00608\text{м}$. Точные размеры сторон прямоугольника назначаем в окне настроек моделирования в разделе *Параметры*, переводя величины в миллиметры.

В. Чтобы построить объёмную модель первого участка балки, в области управления переходим в раздел *Элементы* и выбираем *Вытянутая бобышка* . В графическом окне появится объёмная модель прямоугольной балки, для которой в окне настроек назначаем длину первого участка $a=1\text{м}$ (рис. 2.3).

Г. Для построения второго и третьего участков балки выделяем мышкой торцевую сторону балки, переходим в раздел *Эскиз*, строим новый прямоугольник и повторяем пункт 1,В. Чтобы не произошло слияния участков балки, необходимо убрать метку в графе *Результат слия-*

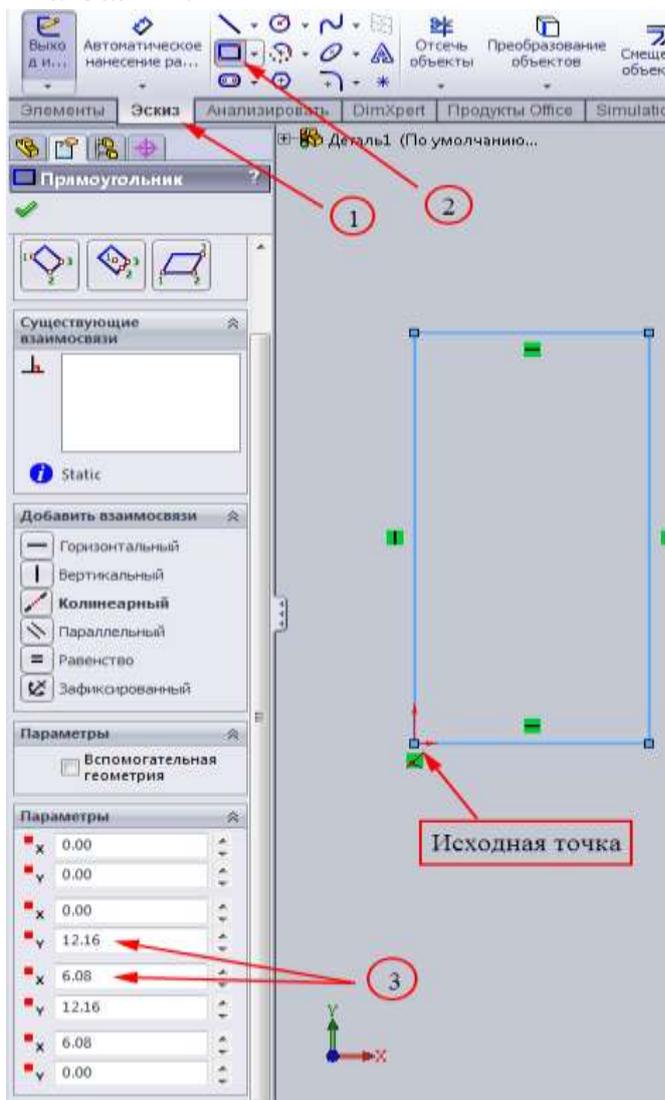


Рисунок 2.2 – Построение сечения

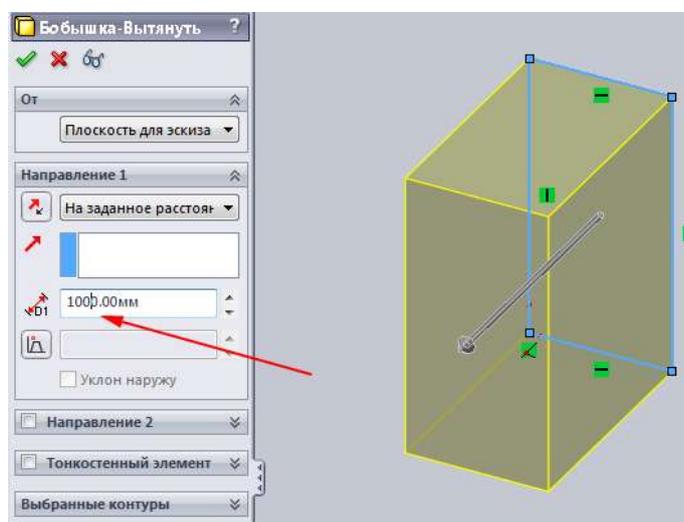


Рисунок 2.3 – Вытягивание эскиза

ния. В результате должны получить прямую балку прямоугольного поперечного сечения, состоящую из трёх твёрдотельных элементов, а в дереве конструирования появятся соответствующие записи этапов построения (рис. 2.4).

Д. После построения модели не забываем сохранить документ.

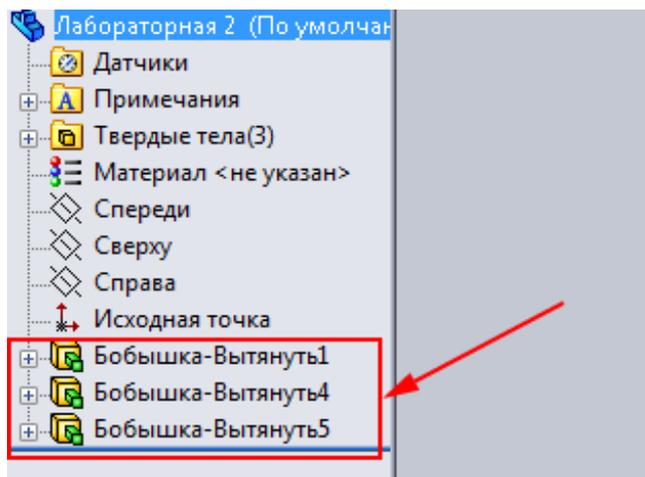


Рисунок 2.4 – Этапы конструирования

2. Прочностной расчёт конструкции

А. Запускаем модуль, предназначенный для статического расчёта конструкции и создаём **Новое исследование** (см.: самостоятельная работа №1, пункт 2,А);

Б. Присваиваем всем трём элементам конструкции **Рассматривать все тела как балки**, назначаем материал и редактируем соединение участков балки (см.: самостоятельная работа №1, пункт 2,Б, 2,В);

В. В дереве исследования выбираем пункт **Крепления**  и задаём ограничения на перемещения балки. Согласно чертежу задания балку надо закрепить двумя шарнирами: неподвижным в точке А и подвижным в точке В. Для этого на панели инструментов переходим в ориентацию вида **Изометрия** (рис. 2.5), чтобы безошибочно выбрать правильные соединения. В окне **Редактирование крепления** выбираем в разделе **Стандартный – Неподвижная**  и на модели указываем узел, соответствующий неподвижному шарниру (рис. 2.6). В дереве исследования появится соответствующая запись **Неподвижный-1** , а на модели изобразится ограничение перемещения по трём направлениям осей.

Чтобы смоделировать подвижный шарнир В, запускаем повторно раздел **Крепления** и выбираем пункт **Использовать справочную геометрию** . Выбираем пункт **Соединения**  и указываем на модели узел, соответствующий подвижному шарниру В. В разделе **Грань, Кромка, Плоскость для направления**  задаём вид **Спереди**, используя для этого плавающее дерево конструирования (рис. 2.7).

В окне *Смещение* выбираем *Вдоль плоскости – направление1*  и *Вдоль плоскости – направление2*  для ограничения перемещений в этих направлениях.

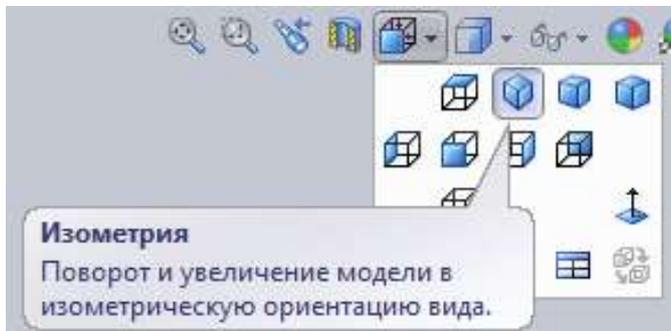


Рисунок 2.5 – Настройка вида изображения

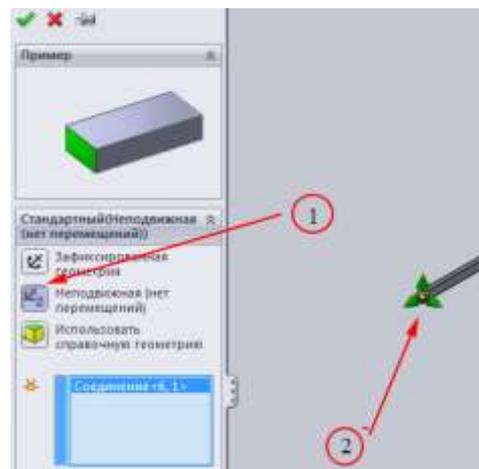


Рисунок 2.6 – Моделирование неподвижного шарнира

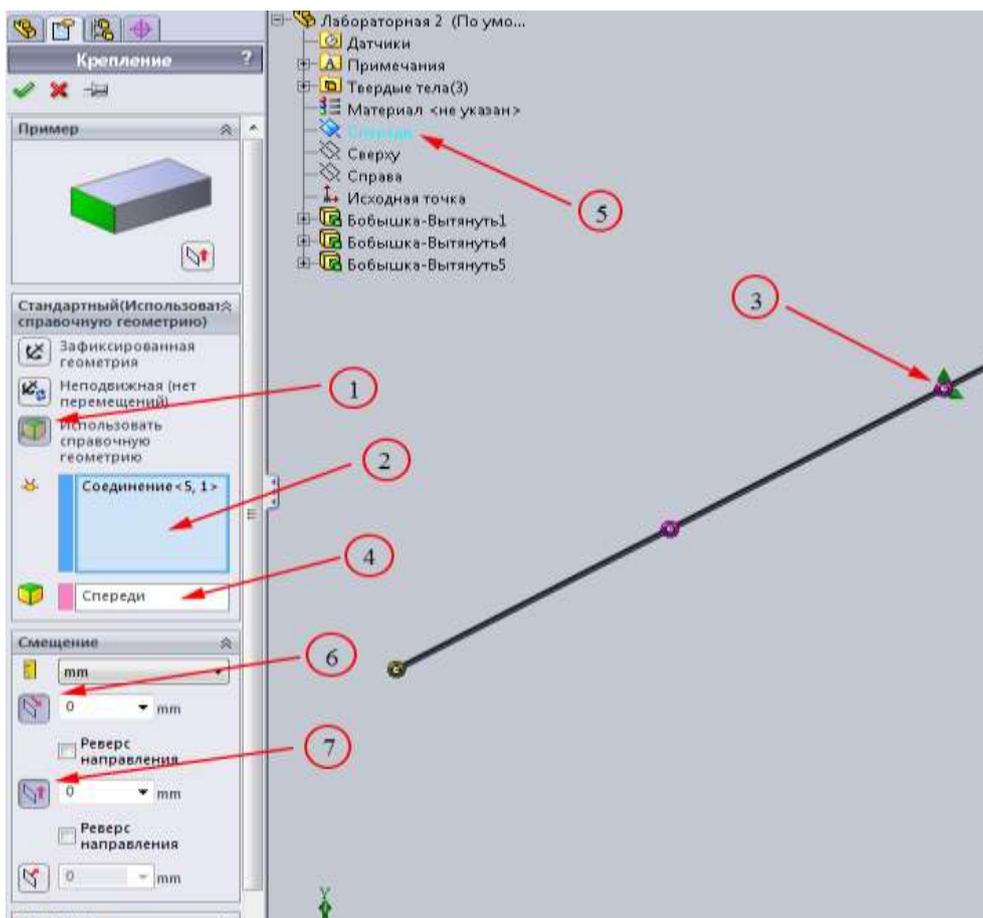


Рисунок 2.7 – Моделирование подвижного шарнира

В дереве *Исследование-1* в разделе *Крепления* появятся соответствующие подразделы *Неподвижный-1* и *Справочная геометрия-*, соответствующие подвижному и неподвижному шарниру.

Г. В разделе *Внешние нагрузки* согласно заданию (см. рис. 2.1) правой кнопкой мыши открываем меню и выбираем команду *Сила*. В разделе *Выбор* нажимаем кнопку *Соединения*, мышкой указываем на синюю область, а затем выбираем на модели узел, в котором будет приложено усилие $P=10000\text{Н}$. В окне *Грань, Кромка, Плоскость, Оси для направления*, помеченном розовым цветом, необходимо указать плоскость действия силы. Для этого в дереве построения выбираем вид *Спереди* (рис. 2.8). В разделе *Сила* выбираем направление приложения сосредоточенной силы *Вдоль плоскости – направление 2*, вводим величину усилия в Ньютонах и корректируем направление действия силы в графе *Реверс направления*.



Рисунок 2.8 – Задание поперечной силы

Для задания сосредоточенного момента $M=10000\text{Нм}$ выбираем опять команду *Сила*. В разделе *Выбор* указываем узел, в котором приложен момент; в окне *Грань, Кромка, Плоскость, Оси для направления*, помеченном розовым цветом, указываем плоскость действия силы. Для этого в дереве построения выбираем вид *Спереди* (рис. 2.9). В разделе *Сила* выбираем направление приложения сосредоточенной силы *Вдоль плоскости – направление 1*, вводим величину момента и корректируем направление действия силы в графе *Реверс направления*.

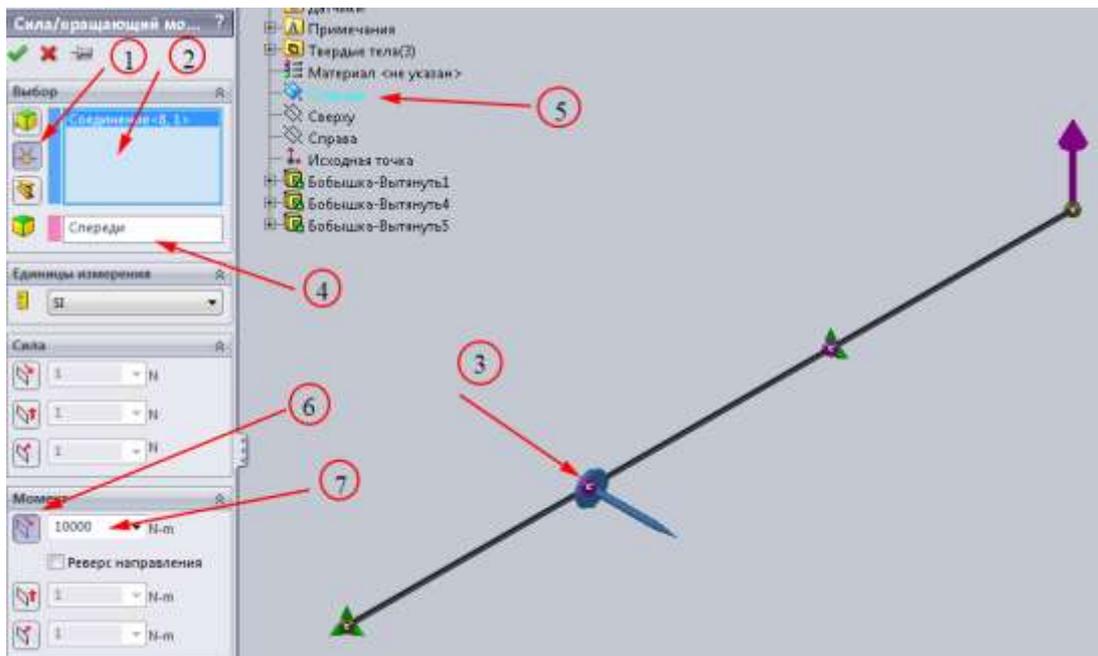


Рисунок 2.9 – Задание сосредоточенного изгибающего момента

Чтобы задать равномерно распределённую нагрузку q , необходимо воспользоваться всё той же командой **Сила** . Так как данная нагрузка приложена не в точке, как сосредоточенная сила, а действует на определённой длине балки, в разделе **Выбор** нажимаем кнопку **Балки** и указываем в графическом окне на модели нужный участок балки (рис. 2.10). Для задания плоскости действия силы в дереве построения выбираем вид **Спереди**. В разделе **Единицы измерения** ставим галочку **На единицу длины**, после чего в разделе **Сила** единицы измерения поменяются на N/m . В этом же разделе выбираем направление приложения распределённой нагрузки **Вдоль плоскости – направление2** , вводим величину усилия и корректируем направление действия силы в графе **Реверс направления**.

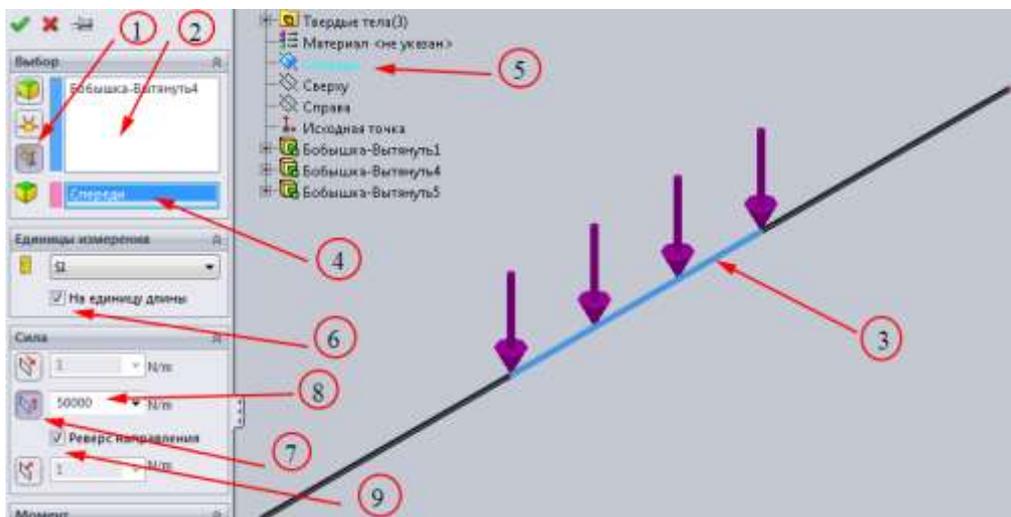


Рисунок 2.10 – Задание равномерно-распределённой нагрузки

Д. После того как все этапы успешно завершены, производим запуск исследования. На панели инструментов выбираем **Запуск** . В дереве исследования появляются соответствующие результаты расчёта напряжений и перемещений (рис. 2.11).

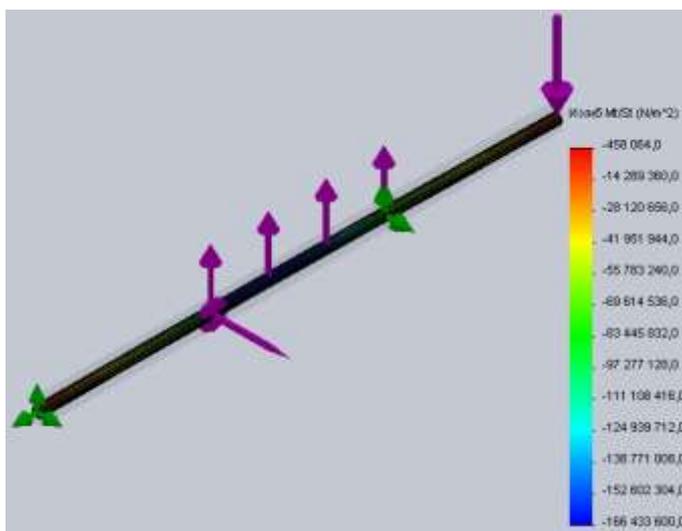


Рисунок 2.11 – Результаты расчёта программы

3. Обработка и анализ полученных результатов

А. В результате статического расчёта программа по умолчанию выдаёт диаграмму напряжений при наихудшем сценарии. В нашем случае нас интересует изгибающее напряжение в направлении 2. Чтобы посмотреть результат расчёта изгибающих напряжений, в графе **Напряжение** правой кнопкой мыши вызываем меню редактирования и выбираем **Редактировать определение** (см.: самостоятельная работа №1, рис. 1.21). В открывшемся окне **Эпюра напряжений** выбираем **Изгиб в местном направлении 2** (см.: самостоятельная работа №1, рис. 1.22).

Чтобы получить графики распределения внутренних усилий, необходимо выполнить пункт 3,Б (см.: самостоятельная работа №1). В разделе **Отображение** выбираем **Момент в направлении 2**.

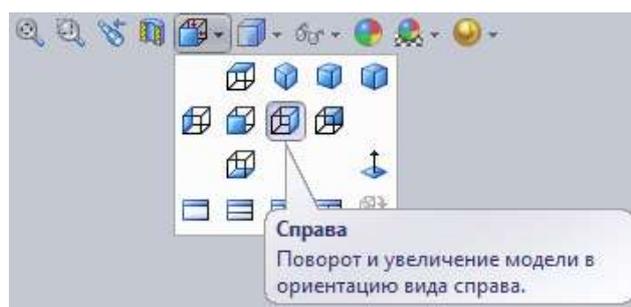


Рисунок 2.12 – Настройка изображения

Для удобства просмотра в настройках вида изображения выбираем вид **Сверху** и поворачиваем график на 90° (рис. 2.12).

В результате получаем эпюру изгибающего момента (рис. 2.13).

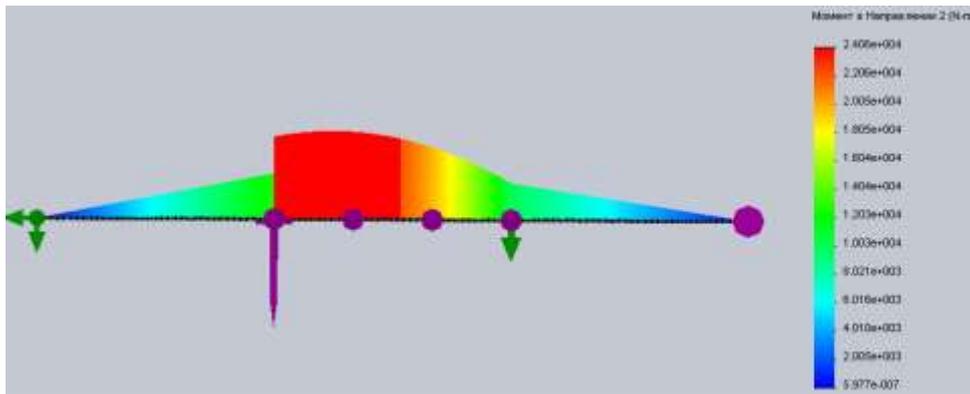


Рисунок 2.13 – Эюра изгибающего момента

Чтобы получить эюру поперечных сил, необходимо повторить пункт 3,Б (см.: самостоятельная работа №1). В разделе **Отображение** выбираем **Сила сдвига в направлении 1**. Для удобства просмотра в настройках вида изображения выбираем вид **Справа**. Для определения величин внутренних усилий в определённых сечениях необходимо воспользоваться командой **Зондирование** (см.: самостоятельная работа №1, пункт 3,А).

В результате получаем эюру поперечных сил (рис. 2.14).

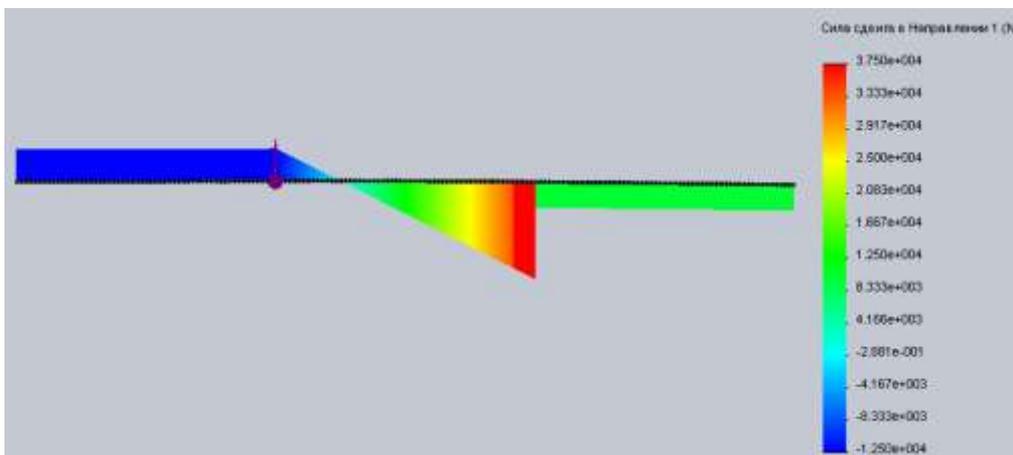


Рисунок 2.14 – Эюра поперечных сил

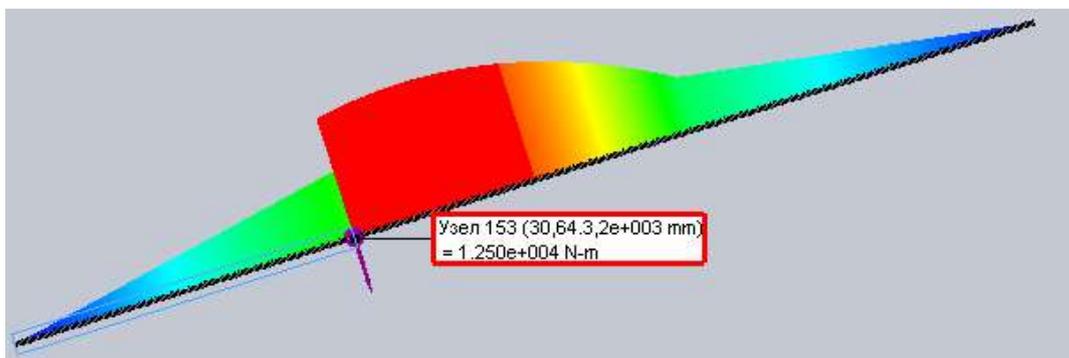


Рисунок 2.15 – Результат зондирования

4. Содержание отчёта

Отчёт по самостоятельной работе должен содержать:

- лист задания;
- результаты аналитического расчёта прямой балки;
- описание этапов построения и скриншот геометрической модели балки;
- описание основных подготовительных этапов исследования напряжённо-деформированного состояния модели;
- скриншоты эпюр напряжения и внутренних усилий с датчиками величин в опасных сечениях и на границах участков;
- выводы по сравнительному анализу аналитического и программного расчётов.

Результаты сравнительного анализа свести в таблицу 2.

Таблица 2 – Сравнительный анализ результатов исследования к самостоятельной работе №2

Вид эпюры	Опасные сечения	Результаты аналитического расчёта	Результаты, полученные в ходе самостоятельной работы
Поперечная сила, H	A		
	B		
	C		
Изгибающий момент, Hm	A		
	B		
	C		

Контрольные вопросы

1. Что называется балкой?
2. Какой вид нагружения называется изгибом?
3. Что такое чистый изгиб?
4. Какой метод применяется для определения внутренних усилий? Какие внутренние усилия возникают в сечении балки в случае плоского изгиба?
5. Как проверить правильность определения опорных реакций?
6. Как формулируется гипотеза плоских сечений?
7. Что представляют собой нейтральный слой и нейтральная линия и как они расположены?
8. По какой формуле определяются нормальные напряжения в поперечном сечении балки при чистом изгибе и как они изменяются по высоте балки?
9. Что называется моментом сопротивления при изгибе и какова его размерность?
10. По какой формуле определяются нормальные напряжения в поперечных сечениях балки при поперечном изгибе?
11. Запишите формулу для определения касательных напряжений в поперечных сечениях балки при прямом поперечном изгибе.
12. Какой вид имеют эпюры касательных напряжений в поперечных сечениях прямоугольной и двутавровой формы?
13. Как находятся главные напряжения при изгибе?
14. Как направлены главные площадки на уровне нейтрального слоя и в точках, наиболее удаленных от этого слоя?
15. Какие формы поперечных сечений являются рациональными для балок из пластичных материалов?

САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА №3

Построение эпюр внутренних усилий для ломаного стержня (плоская задача)

Цель работы:

- формирование навыков определения внутренних усилий для ломаного стержня;
- углубление и закрепление знаний, полученных на лекционных и практических занятиях;
- проверка результатов аналитического расчёта.

Задачи:

1. Построение геометрической модели ломаной балки прямоугольного при помощи программного пакета SolidWorks.
2. Задание граничных условий и внешних нагрузок.
3. Генерация конечно-элементной сетки и запуск исследования напряжённо-деформированного состояния бруса.
4. Анализ полученных результатов и их сравнение с результатами аналитического расчёта.

Подготовка к работе

Прежде чем приступать к выполнению самостоятельной работы №2, студент должен выполнить аналитический расчёт ломаной балки. После того как будут определены внутренние усилия, построены их эпюры, студент может приступать к изучению содержания данной самостоятельной работы.

Объектом исследования является ломаная балка консольного или шарнирного закрепления. Длины участков балки, внешняя нагрузка и механические характеристики материала выписываются из задания, а размеры прямоугольного поперечного сечения назначаются согласно результатам расчёта на прочность.

Пример выполнения самостоятельной работы №3

Исследуемый объект: консольная ломаная балка (рис. 3.1), нагруженная сосредоточенной силой P , равномерно-распределённой нагрузкой q и сосредоточенным моментом M .

Исходные данные: $P=50\text{кН}$, $q=20\text{кН/м}$, $M=55\text{кНм}$. Материал: конструкционная сталь с параметрами модуль упругости $E=2\cdot 10^5\text{МПа}$, коэффициент Пуассона $\mu=0,3$. Соотношение сторон прямоугольного поперечного сечения $h/b=2$.

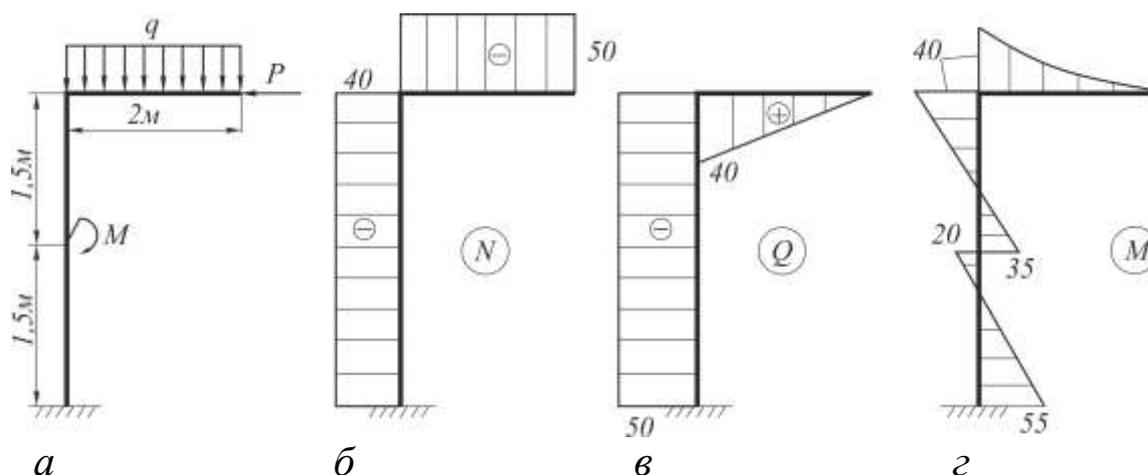


Рисунок 3.1 – Результаты аналитического расчёта ломаной балки

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ №3

1. Построение геометрической модели ломанной балки прямоугольного поперечного сечения

А. Загружаем программный пакет *SolidWorks* и создаём **Новый документ** (см.: самостоятельная работа №1, пункты 1,А, 1,Б).

Б. Данная ломаная балка (см. рис. 3.1,а) состоит из трёх участков постоянного поперечного сечения, поэтому необходимо построить три отдельных твёрдотельных участка балки. Для построения первого участка балки в области управления переходим в раздел **Эскиз** и из исходной точки строим прямоугольник со сторонами, которые были получены из условия прочности по нормальным напряжениям в опасном сечении балки. В нашем случае $h=0,160\text{м}$, $b=0,08\text{м}$. Точные размеры сторон прямоугольника назначаем в окне настроек моделирования в разделе **Параметры** (см.: самостоятельная работа №2, пункт 1,Б).

В. В разделе *Элементы* выбираем *Вытянутая бобышка* . В графическом окне появится объёмная модель прямоугольной балки, для которой в окне настроек назначаем длину первого участка 1,5м.

Г. Для построения второго участка балки выделяем мышкой торцевую сторону балки, переходим в раздел *Эскиз*, строим новый прямоугольник с теми же размерами и повторяем пункт 1,В. Чтобы не произошло слияния участков балки, необходимо убрать метку в графе *Результат слияния*.

Д. Чтобы построить третий участок балки, располагающийся под углом 90° , строим эскиз в плоскости *Справа*. В дереве построения нажимаем *Справа* и переходим в раздел *Эскиз*, где строим прямоугольник с теми же размерами (рис. 3.2).

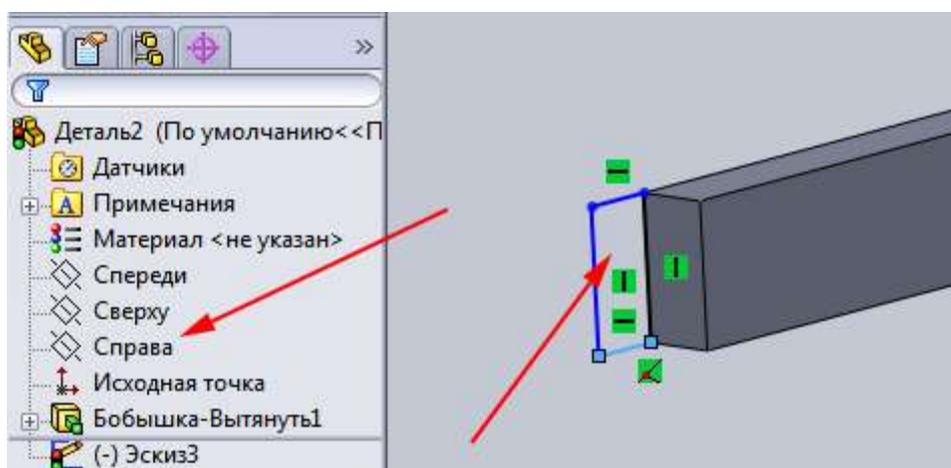


Рисунок 3.2 – Эскиз для третьего участка балки

Е. Выходим из эскиза и строим трёхмерную модель третьего участка при помощи команды *Вытянутая бобышка*  длиной 2м, убирая метку в графе *Результат слияния*. В результате получаем трёхмерную модель ломанной балки (рис. 3.3).

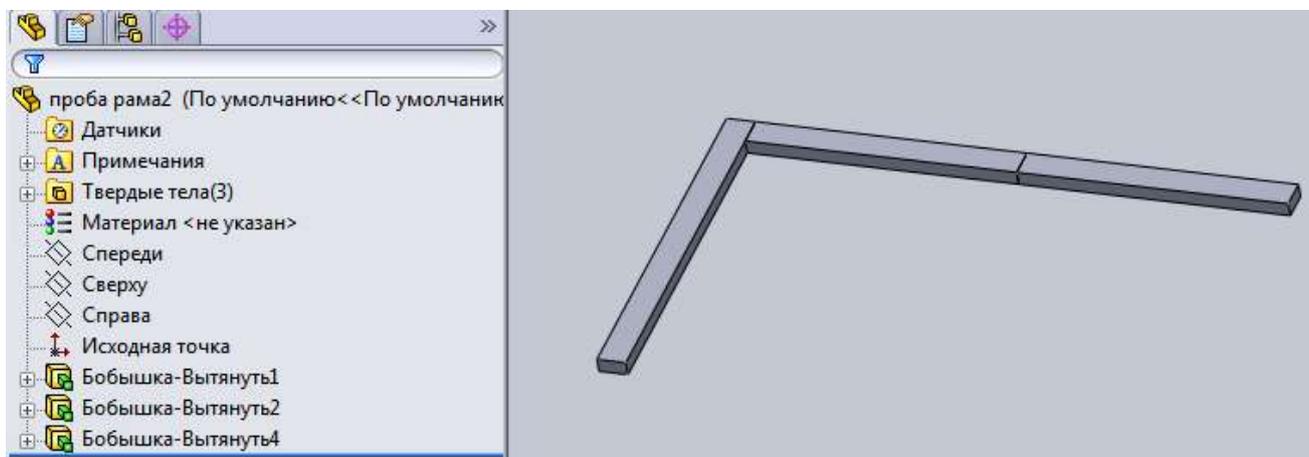


Рисунок 3.3 – Трёхмерная модель ломаной балки

Ж. После построения модели не забываем сохранить документ.

2. Статический расчёт конструкции

А. Запускаем модуль, предназначенный для статического расчёта конструкции и создаём *Новое исследование* (см.: самостоятельная работа №1, пункт 2,А).

Б. Присваиваем всем трём элементам конструкции *Рассматривать все тела как балки*, назначаем материал и редактируем соединение участков балки (см.: самостоятельная работа №1, пункты 2,Б, 2,В).

В. В дереве исследования активируем пункт *Крепления*  и задаём ограничения на перемещения балки. Согласно чертежу задания, балку надо жестко закрепить с одного торца. В окне *Редактирование крепления* выбираем в разделе *Стандартный* крепление *Зафиксированная геометрия*  и на модели указываем узел, соответствующий консольной заделке (рис. 3.4).

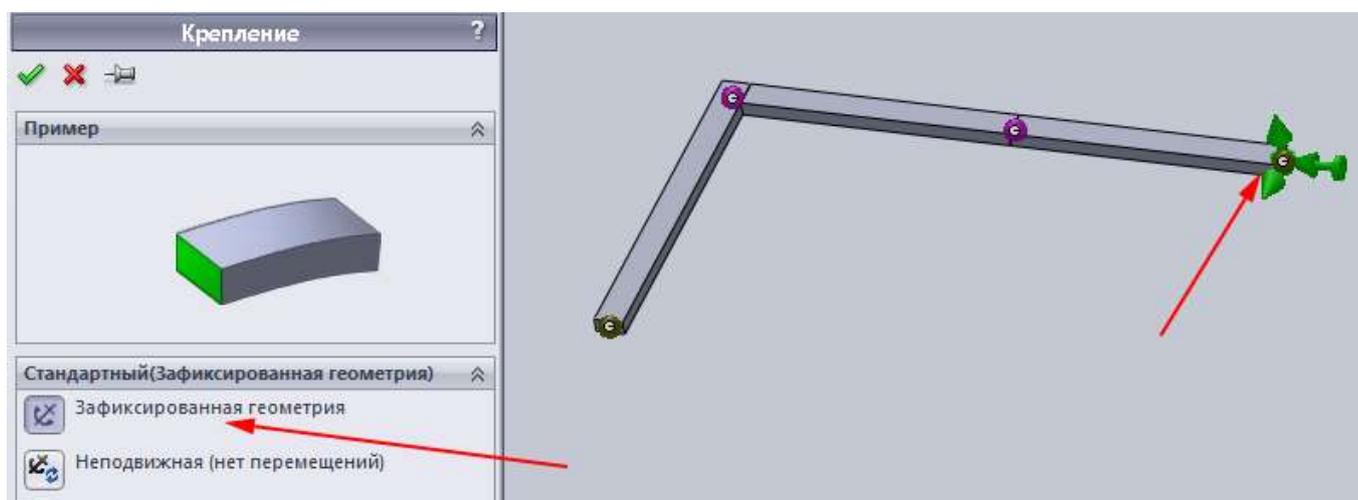


Рисунок 3.4 – Моделирование консольной заделки

В дереве исследования появится соответствующая запись  *Неподвижный-1*, а на модели изобразится ограничение перемещения по трём направлениям осей.

Г. В разделе *Внешние нагрузки*  согласно заданию (см. рис. 3.1) выбираем команду *Сила* . В разделе *Выбор* выбираем *Соединения* , а затем указываем на модели узел, в котором будет приложено усилие $P=50000H$. В разделе *Грань, Кромка, Плоскость,*

Оси для направления, указываем плоскость действия силы. Для этого в дереве построения выбираем вид **Справа** (рис. 3.5).

В разделе **Сила** выбираем направление приложения сосредоточенной силы **Перпендикулярно плоскости**, вводим величину усилия в Ньютонах и корректируем направление действия силы в графе **Реверс направления**.

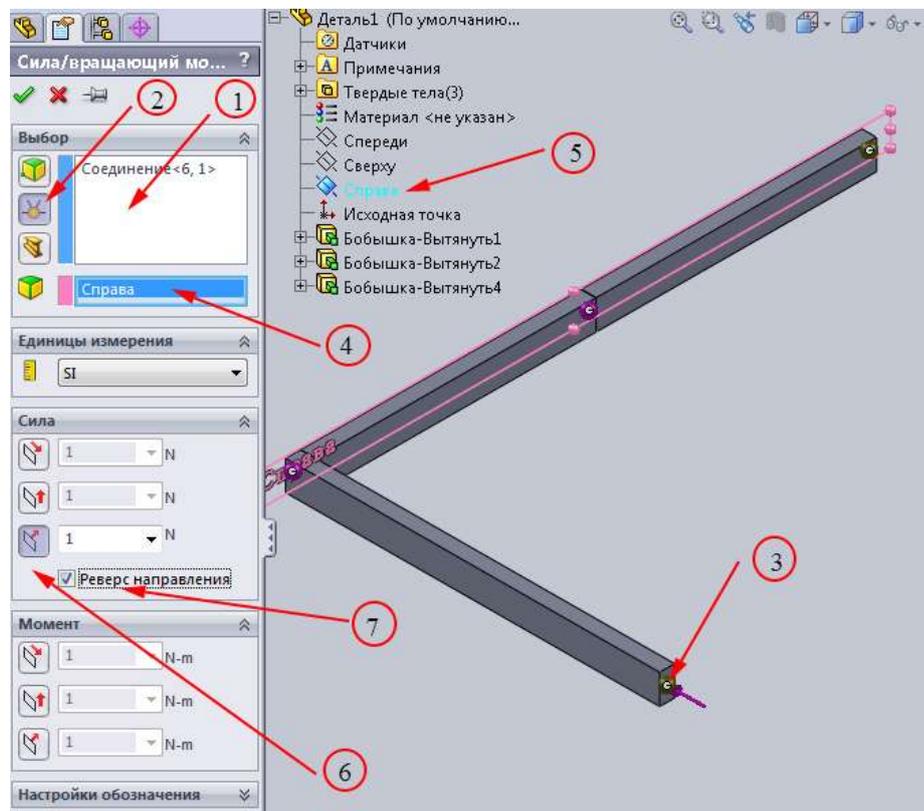


Рисунок 3.5 – Приложение сосредоточенной силы

Д. Для задания равномерно-распределённой нагрузки ещё раз заходим в раздел **Внешние нагрузки**. В разделе **Выбор** выбираем **Балки** и в графическом окне указываем третий участок балки. В разделе **Грань, Кромка, Плоскость, Оси для направления**, помеченном розовым цветом, указываем плоскость, которой перпендикулярна действующая распределённая нагрузка; в данном случае распределённая нагрузка перпендикулярна плоскости **Спереди**. В разделе **Единицы измерения** выбираем **На единицу длины**, ставим галочку. В разделе **Сила** выбираем пункт **Перпендикулярно плоскости**. Задаём численное значение нагрузки $q=20000\text{Н/м}$ и регулируем направление действия нагрузки **Реверсом направления** (рис. 3.6).

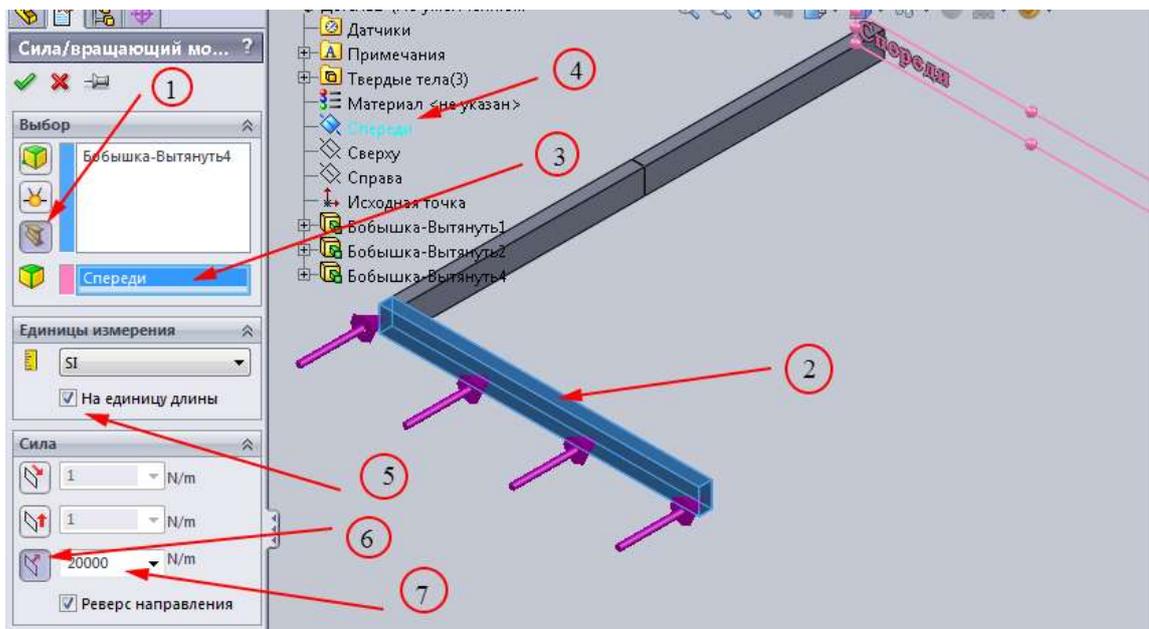


Рисунок 3.6 – Приложение равномерно-распределённой нагрузки

Е. Сосредоточенный момент задаем в этом же разделе **Внешние нагрузки** . В разделе **Выбор** выбираем **Соединения** и при помощи мыши выбираем на модели узел, в котором будет приложен момент $M=55000\text{Нм}$. В разделе **Грань, Кромка, Плоскость, Оси для направления**, помеченном розовым цветом, указываем плоскость действия сосредоточенного момента. В данном случае момент действует в плоскости **Сверху**. Так как программа изображает момент в виде вектора, в разделе **Момент** выбираем направление приложения момента **Перпендикулярно плоскости** , вводим величину усилия и корректируем направление действия в графе **Реверс направления** (рис. 3.7).

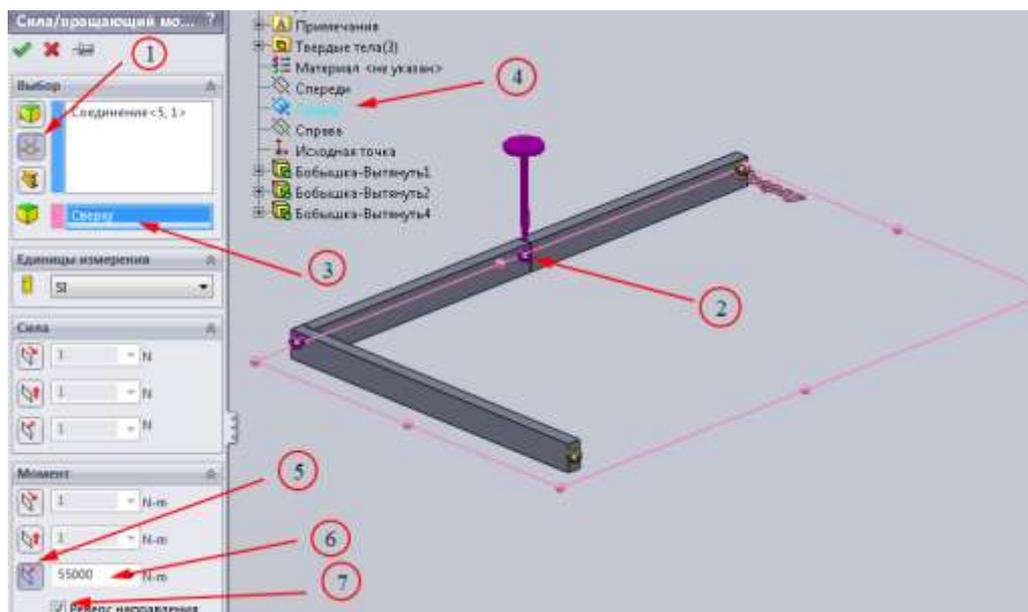


Рисунок 3.7 – Приложение сосредоточенного момента

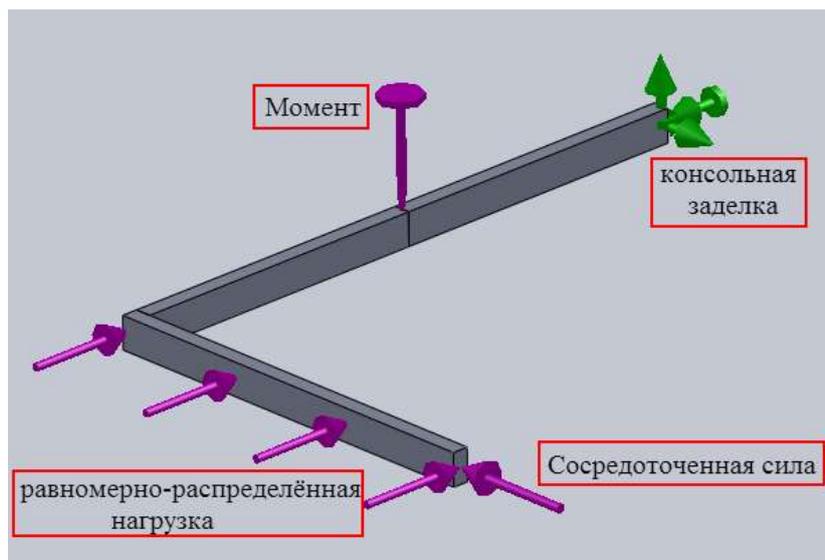


Рисунок 3.8 – Результат приложения всех усилий

Ж. Отправляем программу на счёт командой **Запуск** .

3. Обработка и анализ полученных результатов

А. При нагружении ломаной балки усилиями, лежащими в одной плоскости, в поперечных сечениях возникают три компонента внутренних усилий: продольная сила N , поперечная сила Q и изгибающий момент M . Для получения эпюр внутренних усилий необходимо выполнить пункт 3,Б (см.: самостоятельная работа №1).

В появившемся окне в разделе **Отображение** выбираем пункт **Осевое усилие**. В графическом окне отобразится эпюра продольных сил и цветовая диаграмма численных значений (рис. 3.9).

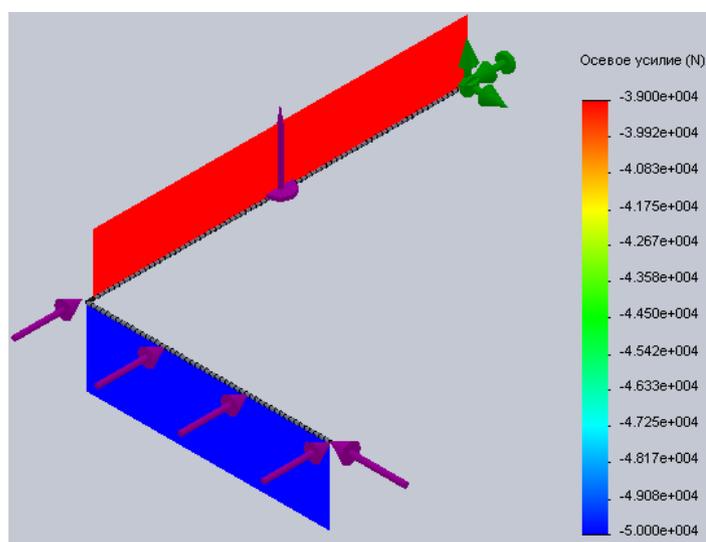


Рисунок 3.9 – Эпюра продольных сил

В этом же разделе **Определить диаграмму балки** выбираем сначала **Сила сдвига в направлении 2**, затем **Момент в направлении 1**. В дереве исследования появятся соответствующие строки, выбирая которые можно просматривать соответствующие эпюры внутренних усилий (рис. 3.10).

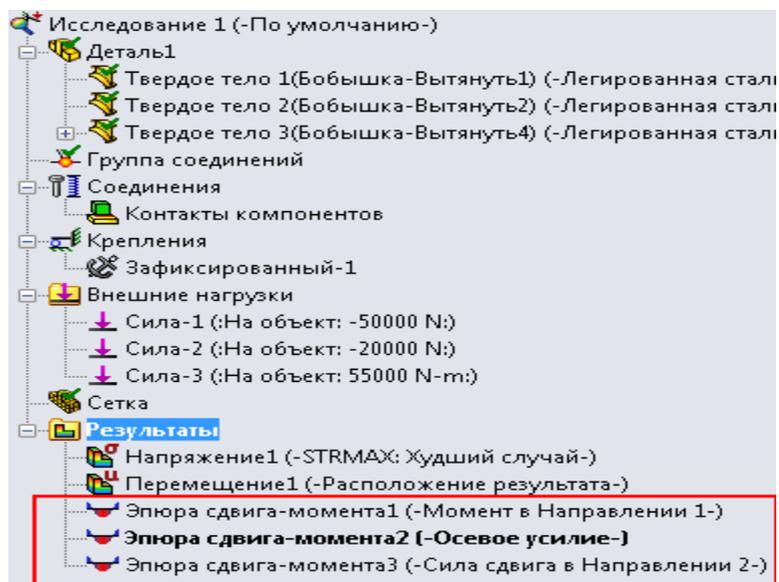


Рисунок 3.10 – Выбор исследуемых эпюр

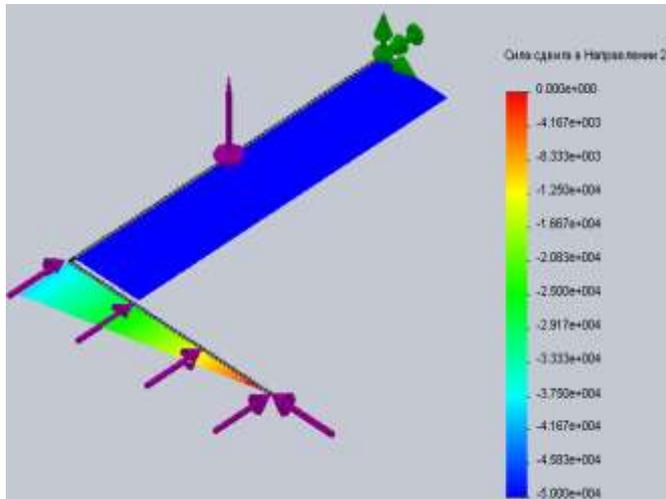


Рисунок 3.11 – Эпюра поперечных сил

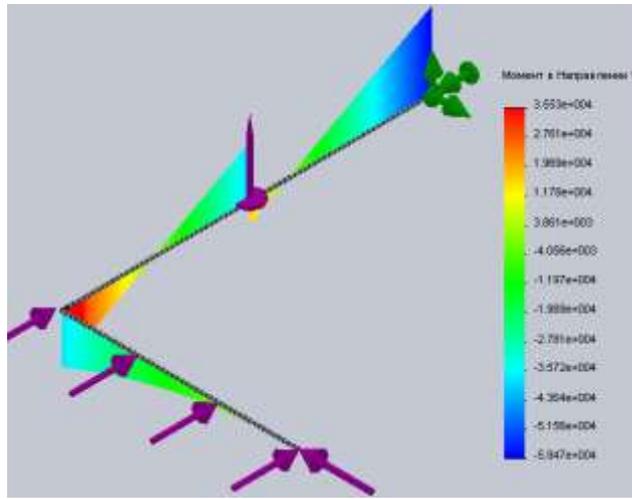


Рисунок 3.12 – Эпюра изгибающего момента

Для определения величин внутренних усилий в опасных сечениях необходимо воспользоваться командой **Зондирование** (см.: самостоятельная работа №1, пункт 3,А).

4. Содержание отчёта

Отчёт по самостоятельной работе должен содержать:

- лист задания;
- результаты аналитического расчёта ломаной балки в виде эпюр внутренних усилий;
- описание этапов построения и скриншот геометрической модели балки;
- описание основных подготовительных этапов исследования напряжённо-деформированного состояния модели;
- скриншоты эпюр внутренних усилий с датчиками величин в опасных сечениях и на границах участков;
- выводы по сравнительному анализу аналитического и программного расчётов.

Результаты сравнительного анализа свести в таблицу 3.

Таблица 3 – Сравнительный анализ результатов исследования к самостоятельной работе №3

Вид эпюры	Опасные сечения	Результаты аналитического расчёта	Результаты, полученные в ходе самостоятельной работы
Поперечная сила, H	А		
	В		
	С		
Изгибающий момент, $Hм$	А		
	В		
	С		
Продольная сила, H	А		
	В		
	С		

Контрольные вопросы

1. Что такое рама?
2. В чём отличие статически определимой рамы от статически неопределимой?
3. В чём преимущество статически определимых рам?
4. Какие возникают внутренние усилия в плоской раме?
5. Сформулируйте правило знаков для внутренних усилий в случае плоской рамы.
6. Как определяются реакции в случае статически неопределимой рамы?
7. Перечислите основные этапы расчёта рамы.
8. Что такое основная и эквивалентная система?
9. Сформулируйте канонические уравнения для определения перемещений.

САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА №4

Определение перемещений и углов поворота сечений в балках при плоском изгибе и подбор рационального сечения балки

Цель работы:

- формирование навыков определения деформаций при плоском изгибе;
- углубление и закрепление знаний, полученных на лекционных и практических занятиях;
- проверка результатов аналитического расчёта деформаций методами непосредственного интегрирования и начальных параметров;
- закрепление понятия рационального сечения балки.

Задачи:

1. Построение геометрических моделей балок прямоугольного, двутаврового и трубчатого сечений при помощи программного пакета SolidWorks.
2. Задание граничных условий и внешних нагрузок.
3. Определение перемещений и углов поворота для трёх различных видов поперечных сечений балки.
4. Анализ полученных результатов и их сравнение с результатами аналитического расчёта.
5. Вывод о рациональном сечении балки при плоском изгибе.

Подготовка к работе

Прежде чем приступать к выполнению самостоятельной работы №4, студент должен выполнить индивидуальное расчётно-графическое задание на тему «Определение деформаций при плоском изгибе». После того как будут определены перемещения и углы поворота балки в опасных сечениях, построена изогнутая ось балки, студент может приступать к изучению содержания данной самостоятельной работы.

Объектом исследования является балка консольного или шарнирного закрепления. Длины участков балки, внешняя нагрузка и механические характеристики материала определены заданием, а размеры поперечных сечений определяются из условия прочности индивидуального расчётно-графического задания.

Пример выполнения самостоятельной работы №4

Исследуемый объект: шарнирно опёртая балка, нагруженная сосредоточенной силой P (рис. 4.1).

Исходные данные: $P = 20\text{кН}$ и $a = 1,6\text{ м}$. Материал: конструкционная сталь с параметрами модуль упругости $E = 2 \cdot 10^5\text{ МПа}$, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$.

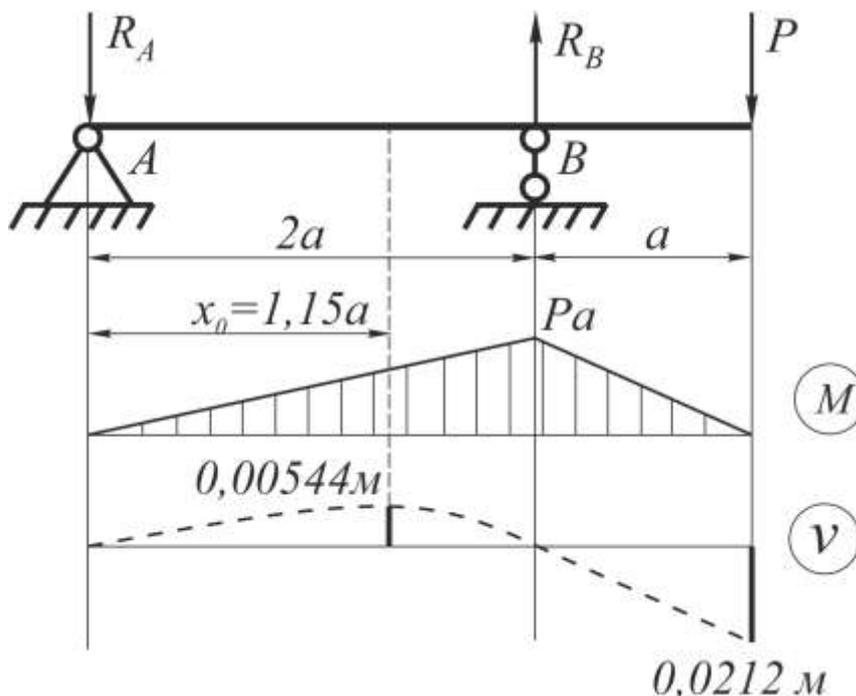
Результаты аналитического расчёта индивидуального расчётно-графического задания. Из условия прочности размеры поперечных сечений для двутаврового, прямоугольного и трубчатого профиля:

– балка прямоугольного поперечного сечения $h = 0,13\text{ м}$, $b = 0,065\text{ м}$;

– балка двутавровая №20 с размерами $h = 0,2\text{ м}$, $b = 0,1\text{ м}$, $d = 0,0052\text{ м}$, $t = 0,0084\text{ м}$;

– балка трубчатого сечения $D = 0,164\text{ м}$, $d = 0,136\text{ м}$.

Максимальные значения прогиба и угла поворота балки двутаврового поперечного сечения в плоскости действия силы $V_{\max} = 0,0212\text{ м}$, $\varphi_{\max} = 0,0155\text{ рад}$.



ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ №4

1. Построение геометрической модели балки прямоугольного поперечного сечения, задание граничных условий и расчёт деформаций

Основные этапы построения геометрической модели балки прямоугольного поперечного сечения, задание граничных условий и прочностной расчёт подробно рассмотрены в самостоятельной работе №2 в пунктах 1 и 2. Следуя вышеперечисленным указаниям, получаем модель шарнирно опёртой балки (рис. 4.1).

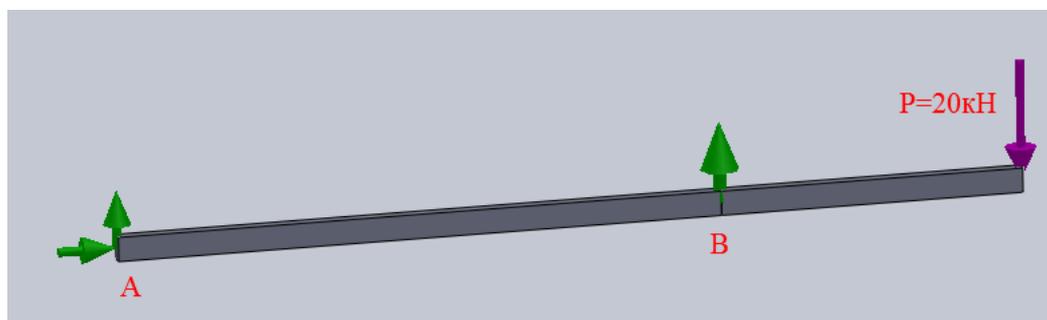


Рисунок 4.1 – Шарнирно опёртая балка прямоугольного поперечного сечения

Запускаем программу на счёт и в автоматическом режиме получаем графики распределения напряжений и перемещений. При анализе графика распределения перемещений балки видно, что максимальный прогиб будет на свободном краю балки ($V_{max}=0,032м$), что соответствует аналитическим расчётам (рис. 4.2). Величина максимального прогиба не совпадает с аналитическим расчётом, так как в аналитическом расчёте деформации определялись для балки двутаврового поперечного сечения.



Рисунок 4.2 – Результаты расчёта перемещений для балки прямоугольного поперечного сечения

Чтобы посмотреть результаты расчёта углов поворота балки, в разделе **Результаты** при помощи правой кнопки мыши в пункте **Перемещение 1** выбираем **Редактировать определение**. В открывшемся слева окне редактирования в разделе **Компонент**  выбираем **Вращение в направлении X**, а в разделе **Единицы**  радианы. В результате получаем график распределения углов поворота балки в плоскости действия силы (рис. 4.3).

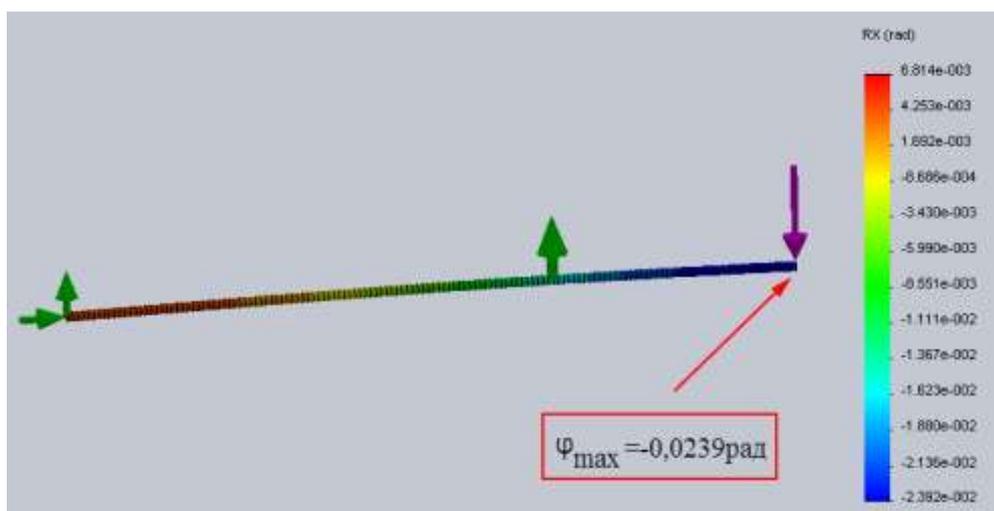


Рисунок 4.3 – Результаты расчёта угла поворота для балки прямоугольного поперечного сечения

2. Определение деформаций для балки двутаврового поперечного сечения

Эскиз двутаврового поперечного сечения строим при помощи инструмента **Линия**  в соответствии с размерами выбранного из таблицы двутавра. В результате получается замкнутый контур в виде двутавра (рис. 4.4).

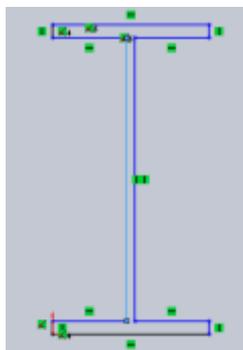


Рисунок 4.4 – Эскиз двутаврового поперечного сечения

Последующие этапы построения геометрической модели балки, задание граничных, силовых условий и запуск статического расчёта выполняются аналогично расчёту балки прямоугольного сечения.

В результате статического расчёта балки двутаврового поперечного сечения получим графики распределения деформаций (рис. 4.5, 4.6). Из графиков перемещения и угла поворота определим их максимальные значения.

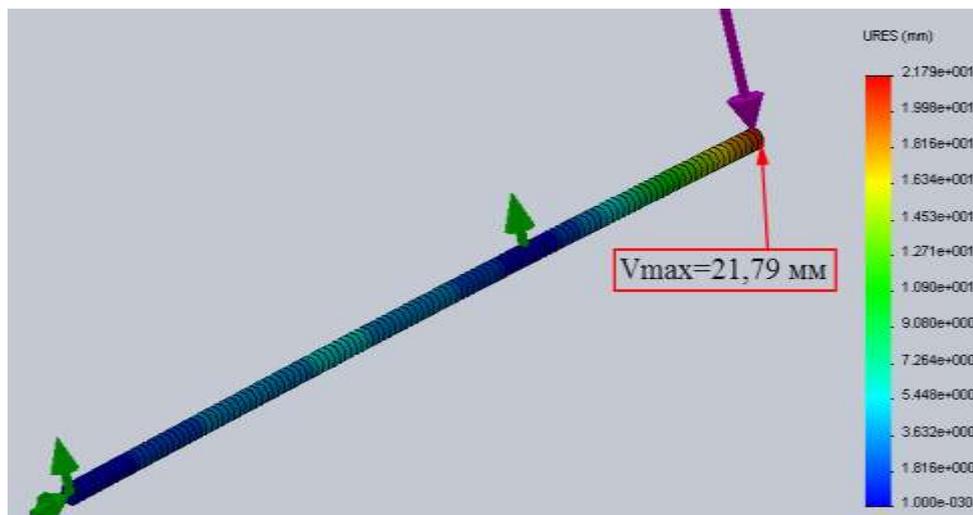


Рисунок 4.5 – Результаты расчёта перемещений для балки двутаврового поперечного сечения



Рисунок 4.6 – Результаты расчёта угла поворота для балки двутаврового поперечного сечения

3. Определение деформаций для балки трубчатого поперечного сечения

Чтобы построить геометрическую модель балки трубчатого сечения, сначала строим эскиз внешней окружности $R=0,082\text{м}$ при помощи команды **Окружность**.

Затем производим операцию вытяжки, используя команду **Вытянутая бобышка** . В результате чего в графическом окне появится объёмная модель балки круглого поперечного сечения, для которой в окне настроек назначаем длину первого участка $a=1,6\text{ м}$.

Для построения второго участка балки выделяем мышкой торцевую сторону балки, переходим в раздел **Эскиз** (рис. 4.7) и строим новую внешнюю окружность радиусом $R=0,082\text{ м}$. Не выходя из эскиза, переходим в раздел **Элементы**, выбираем команду **Вытянутая бобышка** (рис. 4.8) и в пункте **Глубина**  задаём длину второго участка балки, не забывая при этом убрать отметку в пункте **Результат слияния**.

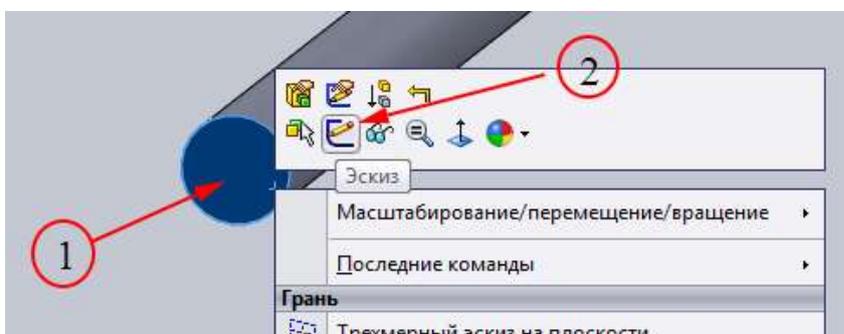


Рисунок 4.7 – Построение эскиза внешней окружности трубчатого сечения

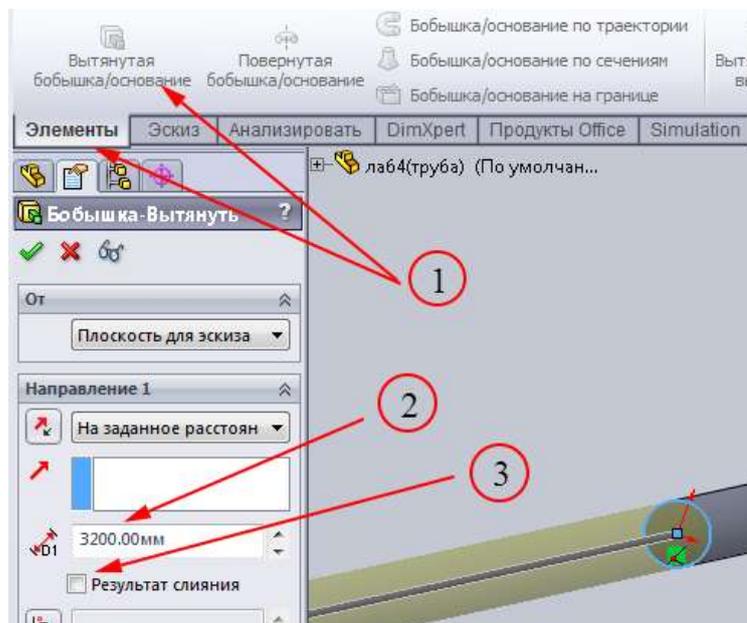


Рисунок 4.8 – Операция вытягивания второго участка

Чтобы получить балку трубчатого сечения, необходимо прорезать в ней сквозное отверстие радиусом $r=0,068\text{ м}$. Для этого выделя-

ем при помощи мыши плоскость одного из торцов балки, правой кнопкой мыши вызываем выпадающее меню и выбираем **Эскиз**.

В новом эскизе строим окружность радиусом $r=0,068м$. Не выходя из эскиза, переходим в раздел **Элементы** и выбираем команду **Вытянутый вырез** (рис. 4.9). Чтобы построить сквозное отверстие, в пункте **Реверс направления** выбираем команду **Насквозь**. И завершая построения кнопкой **ОК**, получаем балку трубчатого сечения (рис. 4.10)

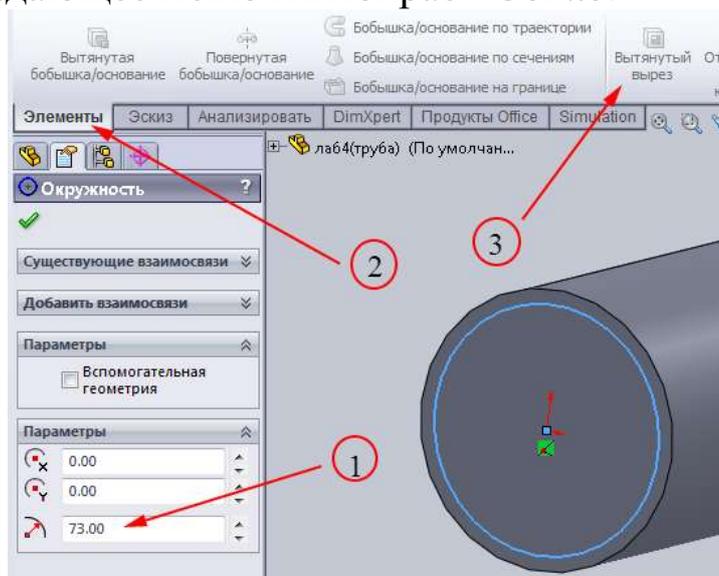


Рисунок 4.9 – Построение эскиза внутренней окружности сечения балки

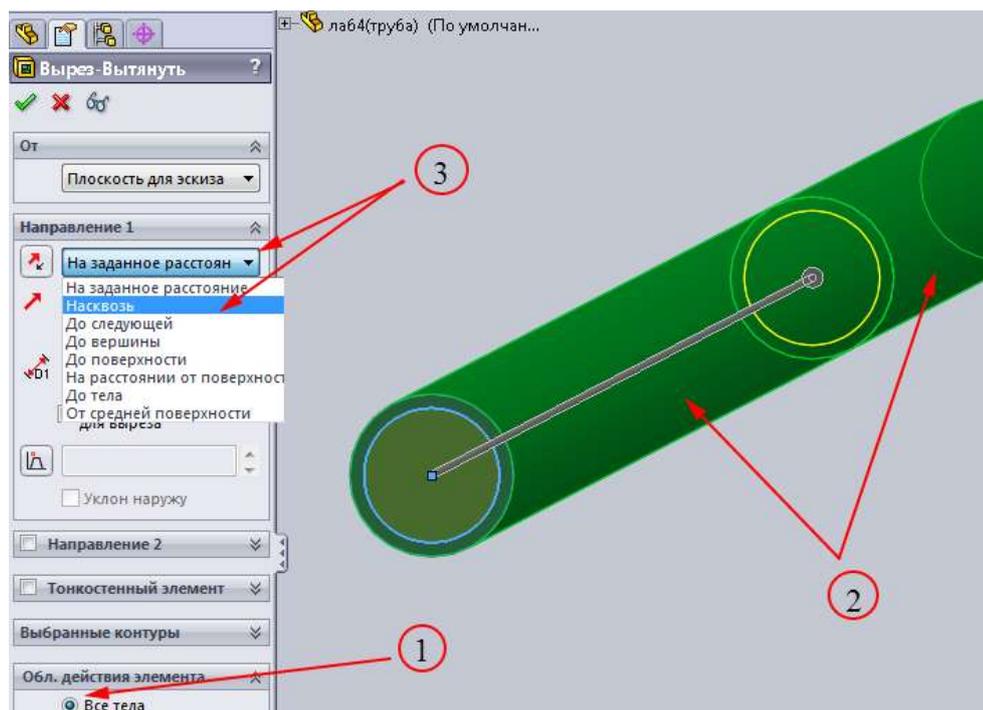


Рисунок 4.10 – Построение сквозного отверстия

В результате всех этапов построения получаем балку трубчатого сечения (рис. 4.11).

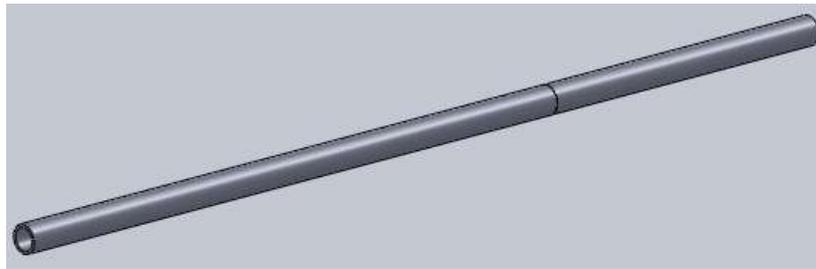


Рисунок 4.11 – Модель балки трубчатого поперечного сечения

Подготовительные этапы статического расчёта и сам расчёт деформаций и напряжений выполняется так же, как и для балки с двутавровым и прямоугольным сечениями.

Результаты статического расчёта балки трубчатого поперечного сечения представлены на рисунках 4.12, 4.13.

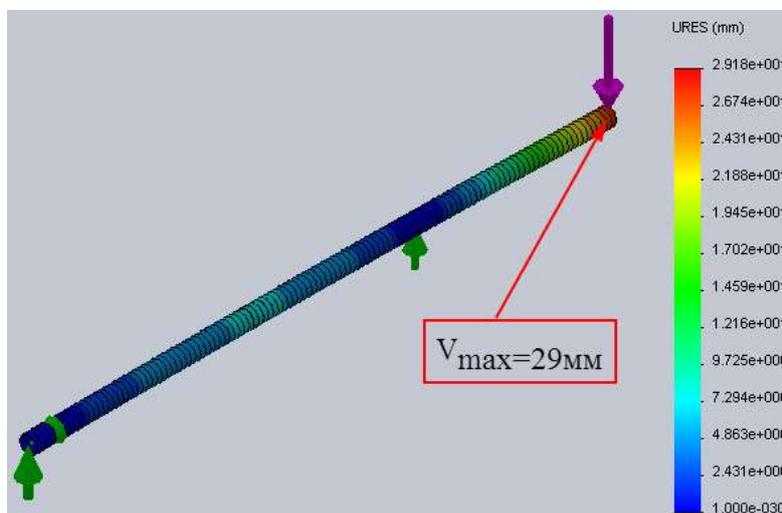


Рисунок 4.12 – Результаты расчёта перемещений для балки трубчатого поперечного сечения

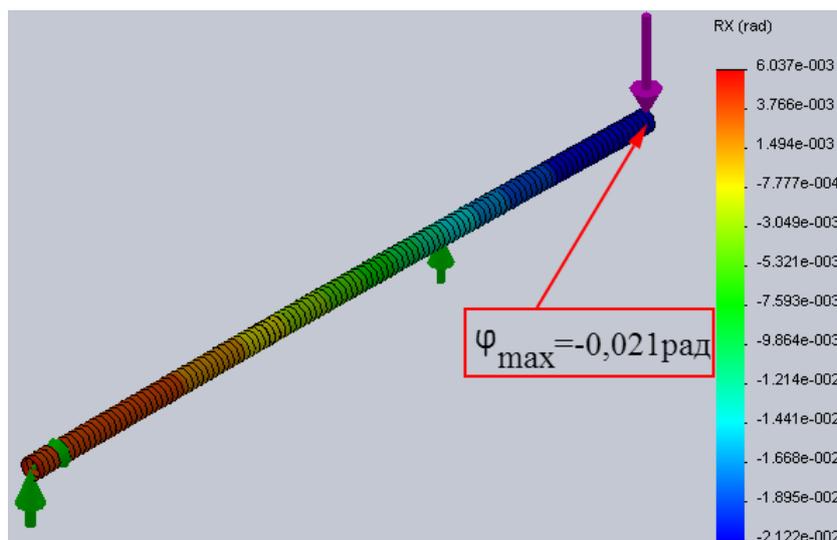


Рисунок 4.13 – Результаты расчёта угла поворота для балки трубчатого поперечного сечения

Для удобства проведения анализа сведём результаты расчёта балок различных профилей поперечного сечения в таблицу 4.

Таблица 4 – Результаты расчёта балок различных профилей

Форма профиля	Показатели расчёта	
	V_{max} , м	φ_{max} , рад
прямоугольник	0,032	-0,0239
двутавр	0,02179	-0,0157
кольцо	0,029	-0,021

4. Содержание отчёта

Отчёт по самостоятельной работе должен содержать:

- лист задания;
- результаты аналитического расчёта деформаций балки прямоугольного, двутаврового и трубчатого сечений;
- описание основных этапов построения моделей балок и скриншоты геометрических моделей балок;
- скриншоты эпюр перемещений и углов поворота с указанием их максимальных значений;
- результаты сравнительного анализа свести в таблицу 4;
- выводы о рациональном сечении балки на основе сравнительного анализа полученных результатов.

Контрольные вопросы

1. Какие формы поперечных сечений являются рациональными для балок из пластичных материалов?
2. Какие перемещения получают поперечные сечения балок при прямом изгибе?
3. Запишите основное дифференциальное уравнение изогнутой оси балки.
4. Что называется жесткостью сечения при изгибе?
5. Как из основного (приближенного) дифференциального уравнения изогнутой оси балки получаются выражения углов поворота и прогибов ее сечений?
6. Из каких условий определяются постоянные интегрирования, входящие в уравнение углов поворота и прогибов сечений балки?
7. Какие ещё способы определения деформаций при плоском изгибе вы знаете?

САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА №5

Построение эпюр внутренних усилий вала при изгибе с кручением

Цель работы:

- закрепление навыков определения и построения эпюр внутренних усилий при изгибе с кручением;
- углубление и закрепление знаний, полученных на лекционных и практических занятиях по теме «Сложное сопротивление» (изгиб с кручением);
- проверка результатов аналитического расчёта изгибающих и крутящих моментов;

Задачи:

1. Построение геометрической модели вала круглого поперечного сечения при помощи программного пакета SolidWorks.
2. Задание граничных условий и внешних нагрузок.
3. Определение изгибающих и крутящего моментов.
4. Анализ полученных результатов и их сравнение с результатами аналитического расчёта.

Подготовка к работе

Прежде чем приступать к выполнению самостоятельной работы №4, студент должен выполнить индивидуальное расчётно-графическое задание на тему «Изгиб с кручением». После того как будут определены изгибающие моменты в двух плоскостях и крутящий момент, студент может приступать к изучению содержания данной самостоятельной работы.

Объектом исследования является вал круглого поперечного сечения с приведёнными к его оси поперечными силами, лежащими в разных плоскостях, и крутящими моментами. Длины участков вала, механические характеристики материала определены заданием, а приведённая к оси вала внешняя нагрузка и размер поперечного сечения берутся из аналитического расчёта.

Пример выполнения самостоятельной работы №5

Исследуемый объект: вал, на котором установлены три зубчатых колеса. Колёса нагружены силами, расположенными во взаимно перпендикулярных плоскостях (рис. 5.1).

Исходные данные: $P_1 = 4\text{кН}$, $P_2 = 3\text{кН}$, $P_3 = 2\text{кН}$, $D_1=0,100\text{м}$, $D_2=0,300\text{м}$, $D_3=0,25\text{м}$. Материал: конструкционная сталь с параметрами модуль упругости $E=2\cdot 10^5\text{МПа}$, $[\tau]=60\text{МПа}$.

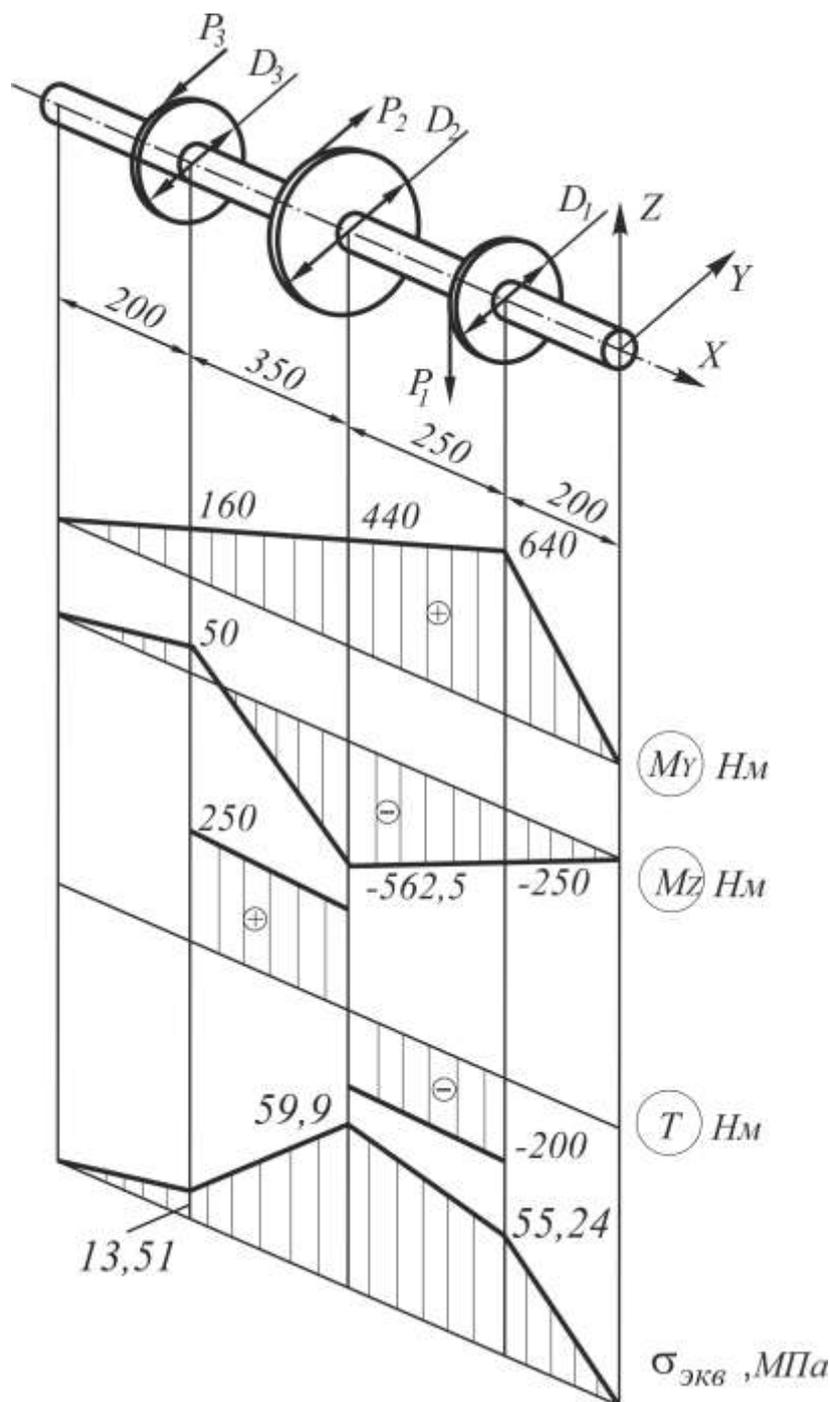


Рисунок 5.1 – Результаты аналитического расчёта вала на изгиб с кручением

Результаты аналитического расчёта индивидуального расчётно-графического задания. Из условия прочности диаметр вала: $d=50\text{мм}$.

Результаты определения изгибающих (M_Y, M_Z) и крутящего (T) моментов представлены на рисунке 5.1.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ №5

1. Построение геометрической модели вала круглого поперечного сечения и задание граничных условий.

А. В задании вал представлен в виде прямого вала постоянного поперечного сечения, на котором базируются три зубчатых колеса различного диаметра. Чтобы учесть нагрузку, действующую на зубчатые колёса, необходимо сначала привести окружные усилия к оси вала. Чтобы привести силы к оси вала, необходимо перенести каждую силу параллельно самой себе в центр колеса и добавить крутящий момент относительно центра колеса:

$$\begin{aligned}T_1 &= P_1 \cdot r_1 = 4\text{кН} \cdot 0,1\text{м} = 200\text{Нм}; \\T_2 &= P_2 \cdot r_2 = 3\text{кН} \cdot 0,3\text{м} = 450\text{Нм}; \\T_3 &= P_3 \cdot r_3 = 2\text{кН} \cdot 0,25\text{м} = 500\text{Нм}.\end{aligned}$$

Б. Геометрическая модель прямого вала постоянного круглого поперечного сечения строится согласно указаниям (см.: самостоятельная работа №1, пункты 1,А – 1,И). В результате выполнения данных пунктов получаем трёхмерную модель четырёхступенчатого вала постоянного поперечного сечения (рис. 5.2).

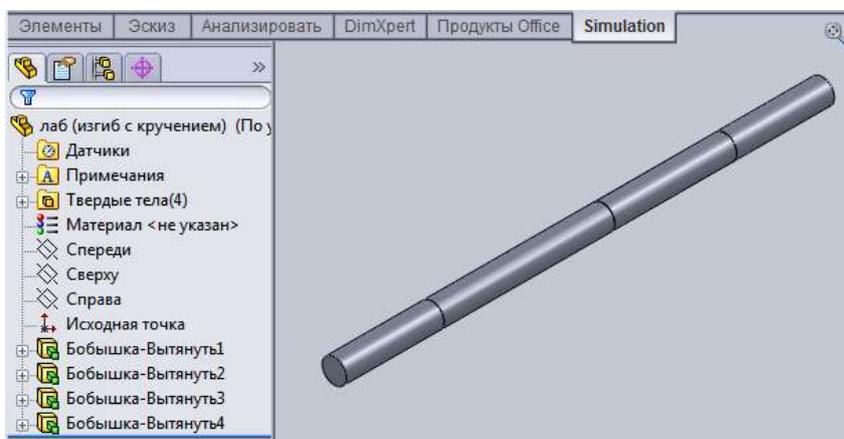


Рисунок 5.2 – Геометрическая модель вала

В. Запуск модуля для расчёта на прочность, задание материала и типа рассматриваемого объекта (рассматриваем все тела как балки) выполняется согласно самостоятельной работе №1, пункты 2,А – 2,В.

Г. Так как мы рассматриваем вал как балку, работающую на изгиб в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, необходимо его закрепить на краях по всем осям, кроме продольной оси. Для этого в дереве *Исследование* выбираем пункт *Крепления* и при помощи правой кнопки мыши вызываем выпадающее меню, где выбираем *Зафиксированная геометрия*.

В открывшемся окне редактирования креплений выбираем пункт *Использовать справочную геометрию* (рис. 5.3). В пункте *Соединения*  указываем шарнир, который необходимо закрепить, а в пункте *Грань, Кромка, Плоскость*  выбираем торцевую плоскость в качестве вспомогательного объекта для направления. В разделе *Смещение* выбираем те направления, по которым необходимо ограничить перемещение.

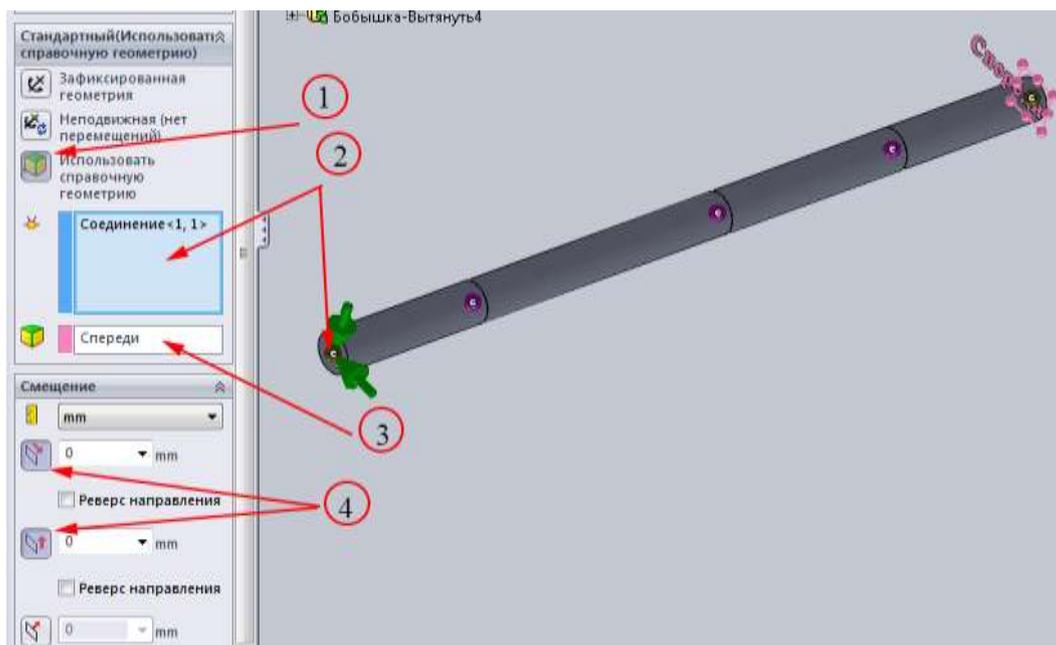


Рисунок 5.3 – Задание ограничений на перемещение вала

Д. Сосредоточенные силы, действующие на вал, задаём в разделе *Внешние нагрузки* (см.: самостоятельная работа №2, пункт 2,Г). В отличие от условий самостоятельной работы №2, в данном случае на вал действуют силы, лежащие в разных плоскостях, поэтому силу P_1 задаём лежащей в одной плоскости (рис. 5.4), а силы P_2 и P_3 – в другой плоскости (рис. 5.5).

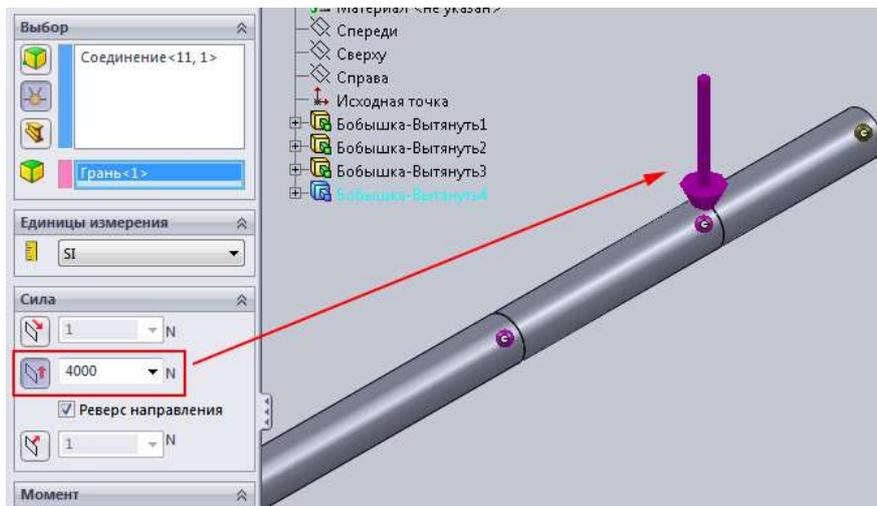


Рисунок 5.4 – Задание силы P_1

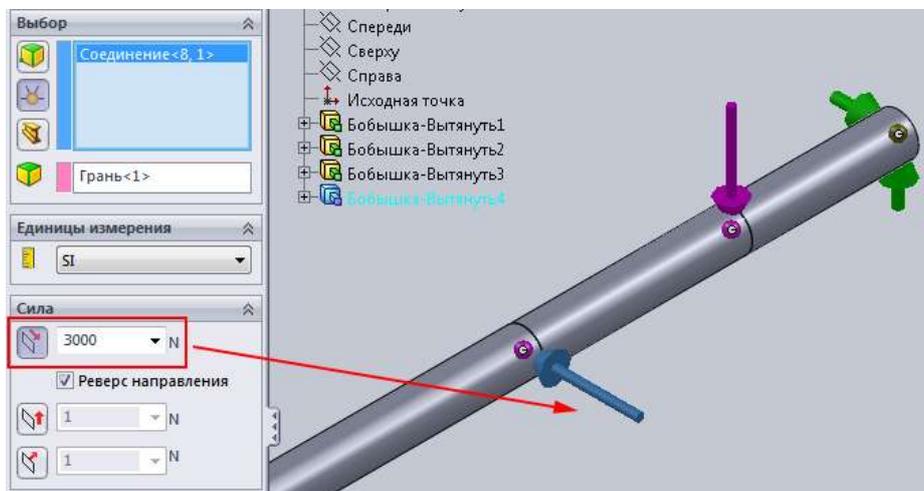


Рисунок 5.5 – Задание силы P_2

Е. Наряду с сосредоточенными силами на вал действуют крутящие моменты (T_1, T_2, T_3), направление которых определяют соответствующие им силы (P_1, P_2, P_3).

Крутящие моменты задаются в том же разделе **Внешние нагрузки**, что и сосредоточенные силы. Для этого в разделе **Выбор** выбираем пункт **Соединения**  и в графическом окне на геометрической модели вала при помощи мыши указываем шарнир, к которому приложен крутящий момент (рис. 5.6).

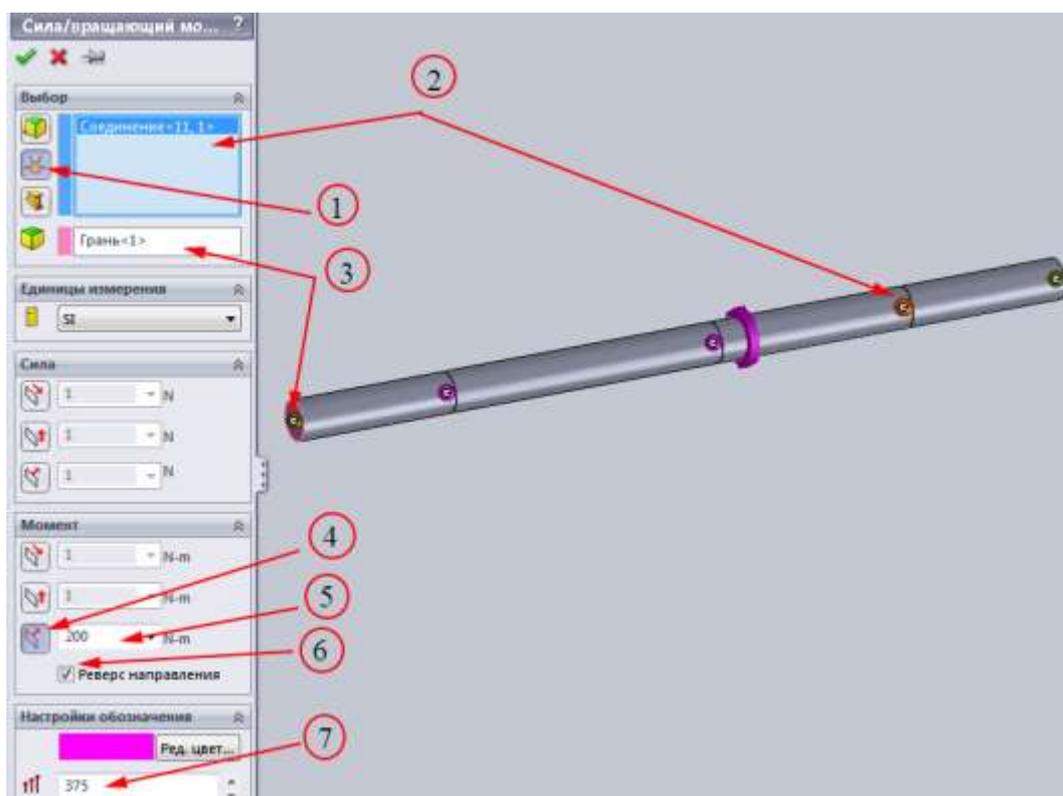


Рисунок 5.6 – Этапы приложения крутящего момента

В качестве вспомогательного объекта для задания направления момента в пункте **Грань, Кромка, Плоскость**  выбираем торцевую плоскость вала. Затем в разделе **Момент** выбираем пункт **Перпендикулярно плоскости** , вводим численное значение крутящего момента и корректируем его направление при помощи кнопки **Реверс направления**.

Визуально крутящий момент на модели представлен в виде векторного момента пары сил (рис. 5.7), который указывает направление крутящего момента, определить которое можно по правилу Буравчика.



Рисунок 5.7 – Изображение крутящего момента

В итоге расчётная модель прямого вала должна иметь три крутящих момента и три сосредоточенные силы (рис. 5.8).

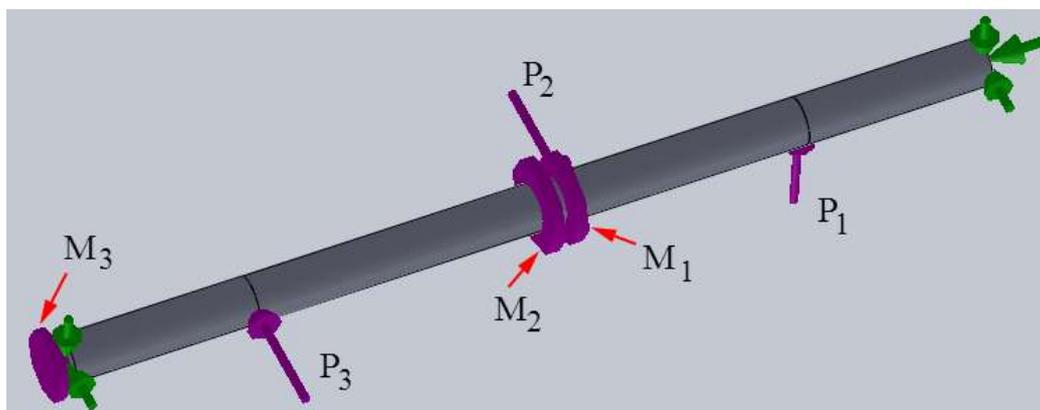


Рисунок 5.8 – Расчётная модель вала

2. Результаты вычислительного эксперимента

В результате статического расчёта программа стандартно выдаёт графики распределения суммарных напряжений и перемещений.

Напряжения представлены в виде цветовой диаграммы. Нас интересуют напряжения в опасных сечениях вала. Анализируя эпюры изгибающих моментов и эпюру эквивалентного напряжения, несложно определить, что опасными в нашем случае будут сечения, где расположены колёса 1 и 2.

Чтобы определить точные значения напряжений в опасных сечениях вала, воспользуемся функцией зондирования. В *Диспетчере команд* переходим в раздел *Инструменты эпюры* и выбираем команду *Зондирование* (рис. 5.9). Затем на модели вала указываем сечения, в которых необходимо определить напряжение (рис. 5.10).

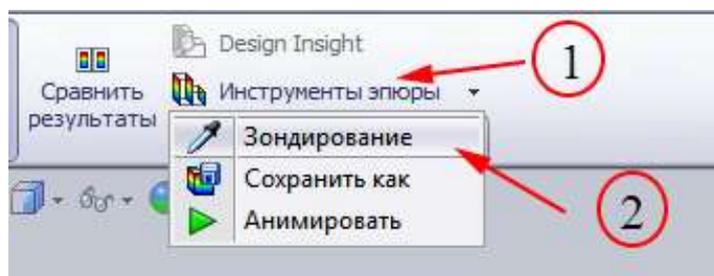


Рисунок 5.9 – Зондирование эпюры

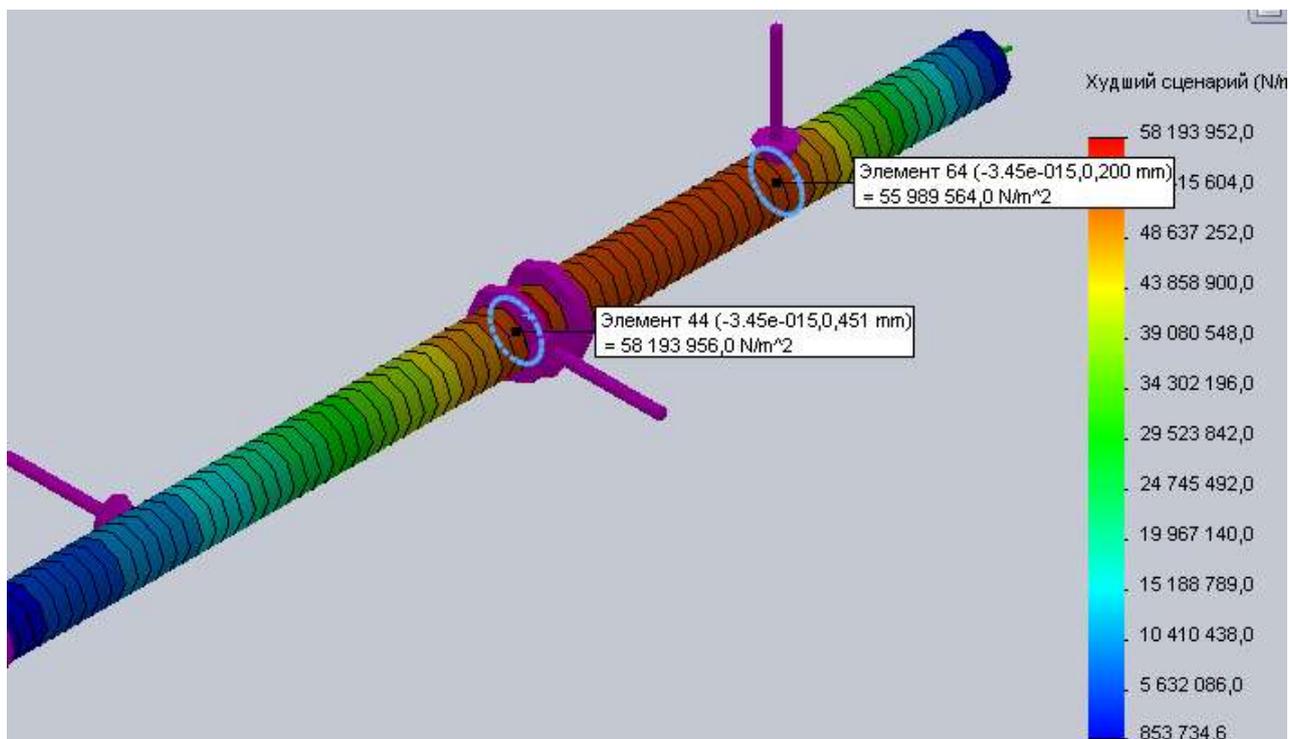


Рисунок 5.10 – Результаты зондирования эпюры напряжения

Помимо напряжений в данной задаче нас интересуют графики распределения изгибающих и крутящего моментов. Для этого в разделе **Результаты** при помощи правой кнопки мыши выбираем пункт **Определить диаграмму балки**. Для того чтобы программа отобразила эпюру крутящего момента, в меню **Диаграмма балки** выбираем в разделе **Отображение** команду **Крутящий момент**. Чтобы программа построила эпюру по всей длине вала, в разделе **Выбранные балки** указываем на позицию **Выбрать** и в графическом окне выбираем все участки вала (рис. 5.11).

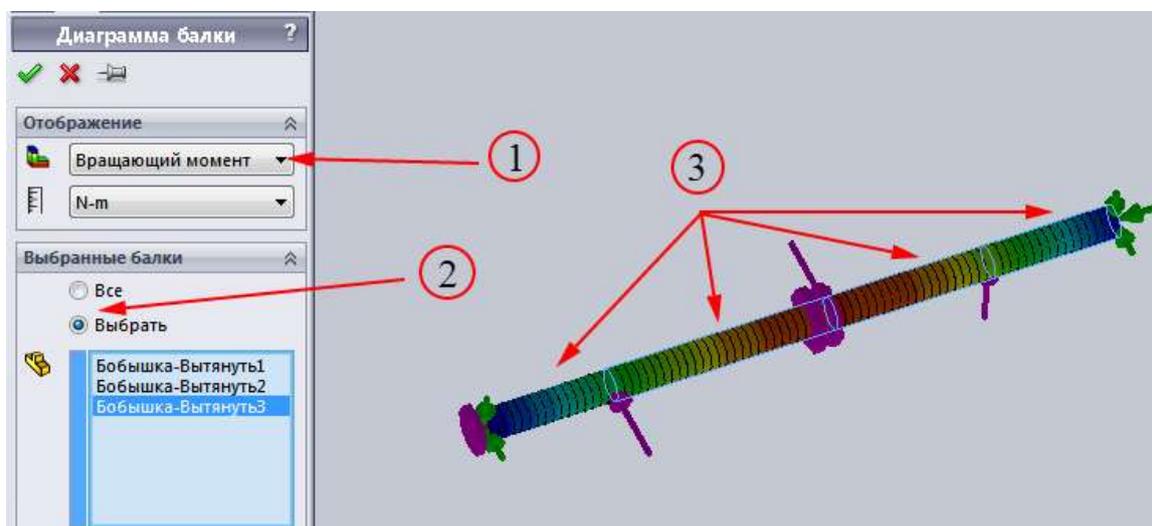


Рисунок 5.11 – Построение эпюры крутящего момента

Аналогичным образом для построения эпюр изгибающих моментов выбираем в разделе *Отображение* поочерёдно *Момент в направлении 1* и *Момент в направлении 2*. В результате в дереве исследования появятся соответствующие им позиции (рис. 5.12).

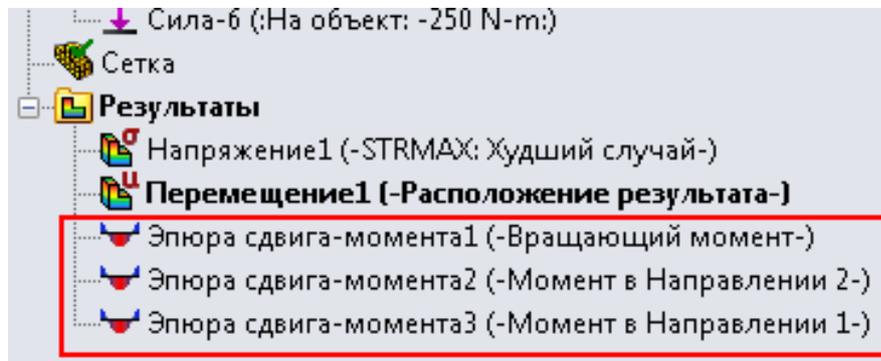


Рисунок 5.12 – Дерево исследования

Выбирая в дереве исследования нужные пункты, получаем в графическом окне графики распределения моментов (рис. 5.11–5.13), которые необходимо сравнить с результатами аналитического расчёта.

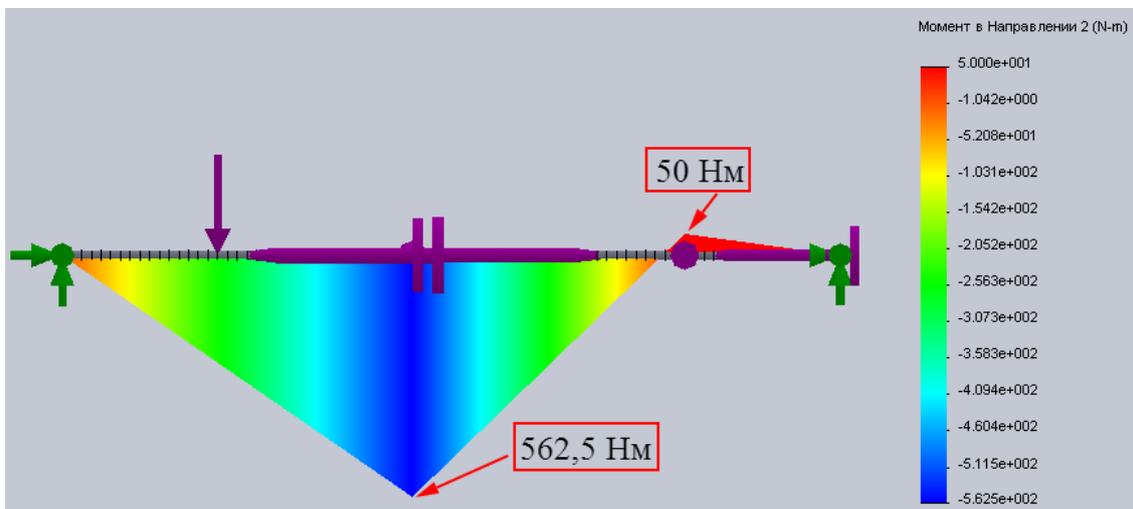


Рисунок 5.13 – Эпюра изгибающего момента в плоскости XOY

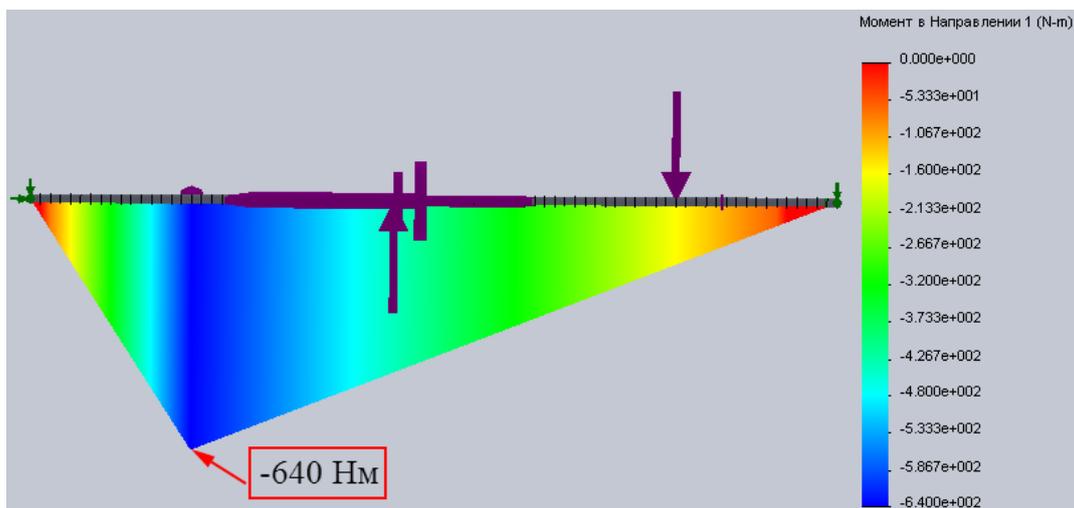


Рисунок 5.14 – Эпюра изгибающего момента в плоскости XOZ

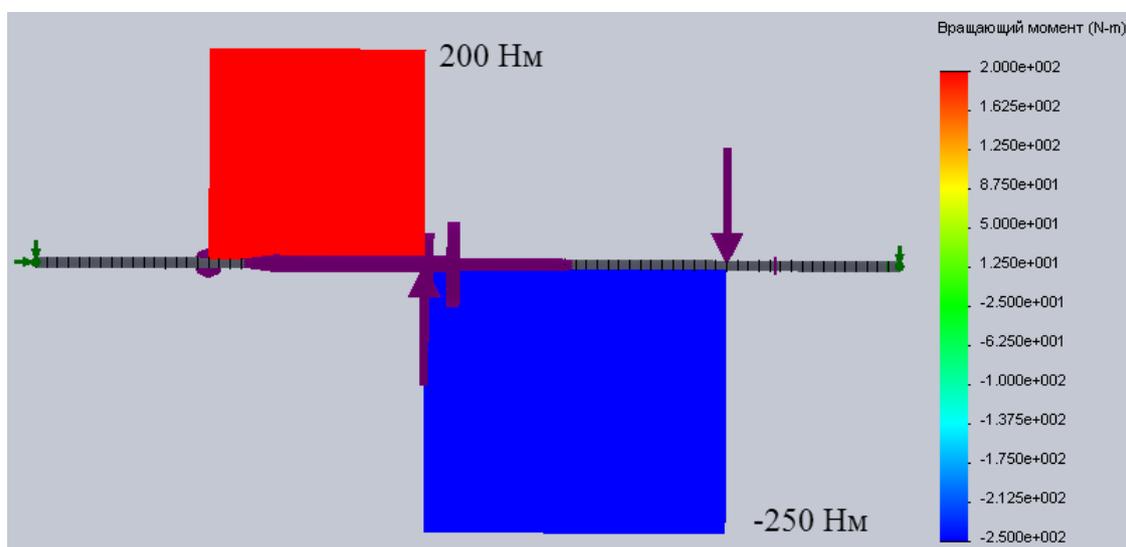


Рисунок 5.15 – Эпюра крутящего момента

4. Содержание отчёта

Отчёт по самостоятельной работе должен содержать:

- лист задания;
- результаты аналитического расчёта многоступенчатого вала, нагруженного поперечными силами и крутящими моментами;
- описание основных этапов моделирования и статического расчёта вала;
- скриншоты эпюр изгибающих и крутящего моментов;
- результаты сравнительного анализа аналитического и программного расчётов свести в таблицу 5.

Таблица 5 – Результаты расчёта вала при кручении с изгибом

Вид эпюры	Опасные сечения	Результаты аналитического расчёта	Результаты, полученные в ходе самостоятельной работы
Изгибающий момент в вертикальной плоскости, Nm	A		
	B		
Изгибающий момент в горизонтальной плоскости, Nm	A		
	B		
Крутящий момент, Nm	A		
	B		
Эквивалентное напряжение, N/m^2	A		
	B		

Контрольные вопросы

1. Что называется сложным сопротивлением?
2. Какие виды сложного сопротивления вы знаете?
3. Какие напряжения возникают в поперечном сечении бруса при изгибе с кручением?
4. Как находятся опасные сечения бруса круглого сечения при изгибе с кручением?
5. Какие точки круглого поперечного сечения являются опасными при изгибе с кручением? Какое напряженное состояние возникает в этих точках?
6. Что собой представляет напряжённое состояние в точке при изгибе с кручением?
7. Как вычисляют главные напряжения при изгибе с кручением?
8. Как определяется эквивалентное напряжение и какие теории прочности применяются для его определения?

ЛИТЕРАТУРА

1. Носкова, О.Е. Сопротивление материалов: метод. указания для самостоятельной работы студентов / О.Е. Носкова. – Красноярск: Изд-во КрасГАУ, 2011. – 46 с.

2. Александров, А.В. Сопротивление материалов: учеб. пособие для вузов / А.В. Александров, В.Д. Потапов, Б.П. Державин [и др.]. – М.: Высшая школа, 2000. – 559 с.

3. Пособие к решению задач по сопротивлению материалов / И.Н. Миролубов [и др.]. – М.: Высшая школа, 1974. – 392 с.

Электронные ресурсы

1. Интерактивная справка программы SolidWorks. – URL: http://help.solidworks.com/2012/russian/SolidWorks/SWHelp_List.html.

Решение задач сопротивления материалов с помощью программного комплекса SolidWorks

Методические указания по выполнению самостоятельных работ

Ольга Евгеньевна Носкова

Электронное издание

Редактор Е.А. Андреева

Подписано в свет 11.07.2016. Регистрационный номер 102
Редакционно-издательский центр Красноярского государственного аграрного университета
660017, Красноярск, ул. Ленина, 117
e-mail: rio@kgau.ru