

Компьютерные технологии:
прикладные пакеты
Статический анализ

КАФЕДРА ПРИКЛАДНОЙ МЕХАНИКИ (МФТИ)

Оглавление

1. Введение в SolidWorks Simulation	2
2. Метод конечных элементов	3
3. Статический анализ.....	4
3.1 Допущения в статическом анализе SolidWorks Simulation.....	5
3.2 Изгиб балки.....	6
3.3 Растяжение балки вдоль оси X	19
3.4 Растяжение пластины с отверстием	19
3.5 Исследование запаса прочности	33
4. Самостоятельная работа	36
5. Приложение (справочные материалы).....	37
5.1 Модуль упругости материала	37
5.2 Предел текучести	37
5.3 Предел прочности	38

1. Введение в SolidWorks Simulation

SolidWorks Simulation – это система анализа конструкций, полностью интегрированная с SolidWorks. Данный модуль относится к классу CAE – систем.

Системы CAE (англ. *Computer-Aided Engineering*) - это системы автоматизации инженерах расчётов, обеспечивающие выполнение физической симуляции функционирования проектируемых изделий, проверку их работоспособности, прогнозирование длительности жизненного цикла, определение рабочих характеристик на этапе проектирования до изготовления опытных образцов и их испытаний, оптимизацию этих характеристик. Расчетная часть пакетов чаще всего основана на численных методах решения дифференциальных уравнений: методе конечных элементов, конечных объемов, конечных разностей и т. д.

Наряду с расчетом конструкций компьютерное моделирование и симуляция могут использоваться и для их оптимизации. Оптимизацию можно проводить для задач статики, устойчивости, установившихся и неуставившихся динамических переходных процессов, собственных частот и форм колебаний, акустики и др. Все это делается одновременно, путем вариации параметров формы, размеров и других свойств проектируемого изделия. Вес, напряжения, перемещения, собственные частоты и многие другие характеристики могут рассматриваться либо в качестве целевых функций проекта (в этом случае их можно минимизировать или максимизировать), либо в качестве ограничений. Кроме того, компьютерное моделирование применяется для планирования экспериментов (определение мест расположения датчиков) и оценки полноты полученных экспериментальных данных.

Таким образом, SolidWorks Simulation существенно экономит время, ресурсы на этапе проектирования изделия, позволяет сократить объемы натурных испытаний, а также более тщательно оптимизировать конструкции.

2. Метод конечных элементов

Метод конечных элементов (МКЭ, *Finite Elements Method, FEM*) – наиболее распространённый численный метод решения задач механики деформируемого тела, теплообмена, гидро- и газодинамики, электро- и магнитостатики, а также других физических задач.

МКЭ используется для приближённого решения дифференциальных и интегральных уравнений. Метод основан на аппроксимации непрерывной функции дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определённых на конечном числе подобластей, называемых *конечными элементами*.

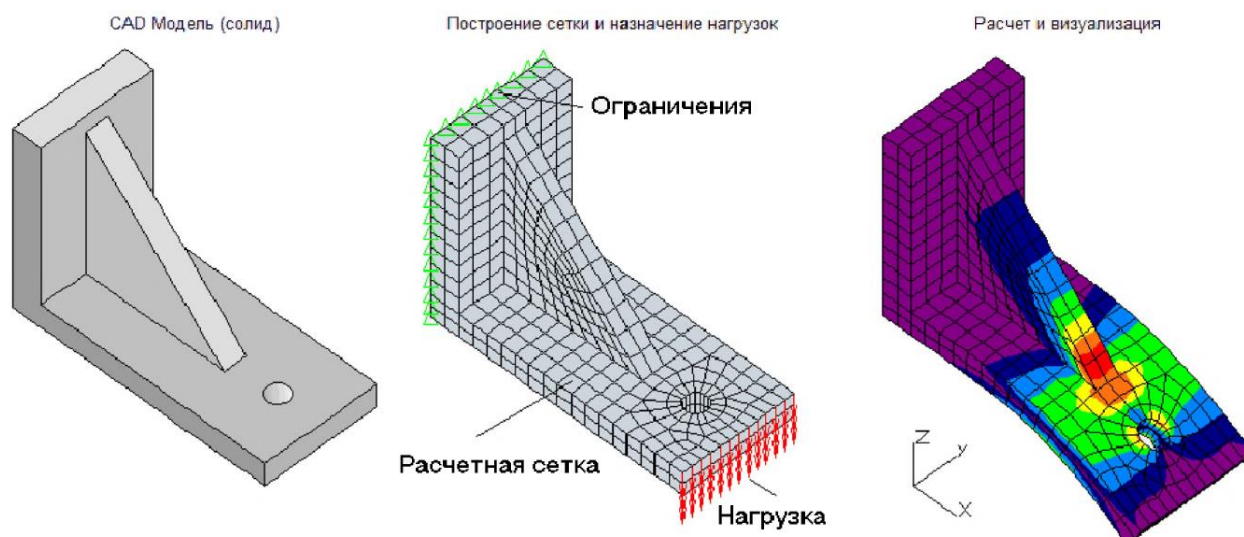


Рисунок 1. Схема перехода от твердотельной модели к расчётной сетке и результатам

Суть метода заключается в том, что исследуемая геометрическая область (CAD модель) разбивается на плоские или объёмные, в зависимости от решаемой задачи, подобласти с элементарной геометрией (Расчётная сетка), для которых записаны простейшие системы дифференциальных уравнений. Каждая такая подобласть является конечным элементом. Общие вершины конечных элементов называются узлами. Кинематические граничные условия задаются в узлах на границе. Нагрузки на границе заменяются сосредоточенными силами в узлах, связь конечных элементов между собой осуществляется также в узлах. Процесс вычисления сводится к решению полученной системы элементарных дифференциальных уравнений.

3. Статический анализ

Основная цель статического прочностного анализа конструкций заключается в оценке напряжённого состояния конструкции, находящейся под действием не изменяющихся во времени (статических) силовых воздействий. Эта оценка напряжённого состояния выполняется обычно с целью проверки принятых конструкторских решений на условие прочности. Условие прочности в общем случае формулируется следующим образом:

Напряжения σ , возникающие в конструкции под действием приложенных к ней внешних сил, должны быть меньше допускаемых напряжений $[\sigma]$ для данного конструкционного материала с учётом поправочного коэффициента запаса $K_{\text{зап}}$ по прочности.

$$\sigma \cdot K_{\text{зап}} \leq [\sigma]$$

Основными результатами статических расчётов являются:

- поля перемещений конструкции в расчётных точках конечно-элементной сетки;
- поля относительных деформаций;
- поля компонентов напряжений;
- энергия деформаций;
- узловые усилия;
- поля распределения коэффициента запаса по напряжениям по объёму конструкции;

Этих данных обычно достаточно для прогнозирования поведения конструкции и принятия решений для оптимизации геометрической формы изделия с целью обеспечения основных условий прочности изделий.

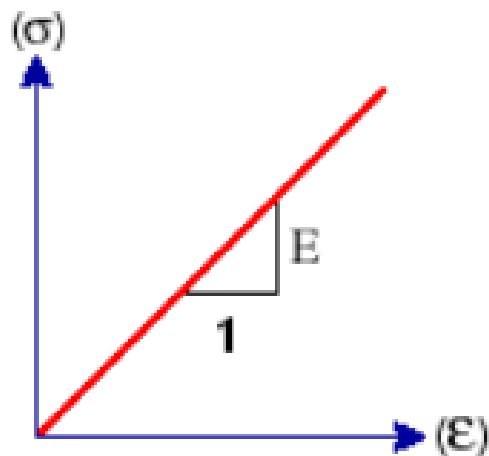
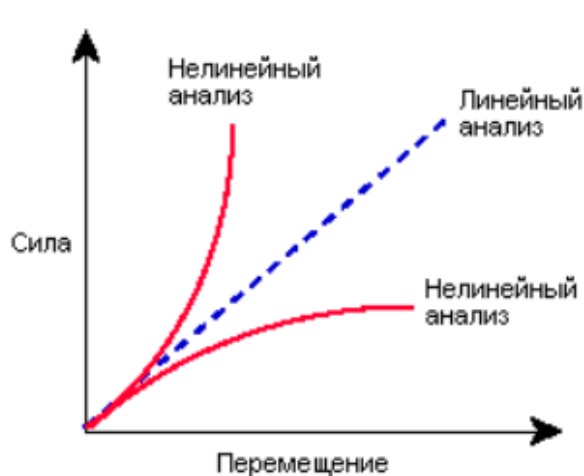
Рассмотрим допущения, используемые при статическом анализе в модуле SolidWorks Simulation.

3.1 Допущения в статическом анализе SolidWorks Simulation

Статическое допущение. Все нагрузки прилагаются медленно и постепенно, пока не достигнут своих полных величин. По достижению своих полных величин нагрузки остаются постоянными (неизменными по времени). Такое допущение позволяет пренебречь внутренними и демпфирующими силами ввиду пренебрежимо малых ускорений и скоростей. Меняющиеся по времени нагрузки, включающие существенные внутренние и/или демпфирующие силы, может обеспечить динамический анализ.

Допущение линейности. Взаимоотношения между нагрузками и вызванными реакциями предполагаются линейными. Если, например, увеличить вдвое величину нагрузок, реакция модели (перемещения, нагрузки и напряжения) также увеличится вдвое. Можно принимать допущение линейности, если:

- все материалы в модели подчиняются закону Гука, в соответствии с которым напряжение прямо пропорционально деформации;
- вызванные перемещения достаточно малы, чтобы можно было пренебречь изменениями в жесткости, вызванными нагружением;
- граничные условия не изменяются во время приложения нагрузок. Нагрузки должны быть постоянными по величине, направлению и распределению. Они не должны изменяться во время деформирования модели.




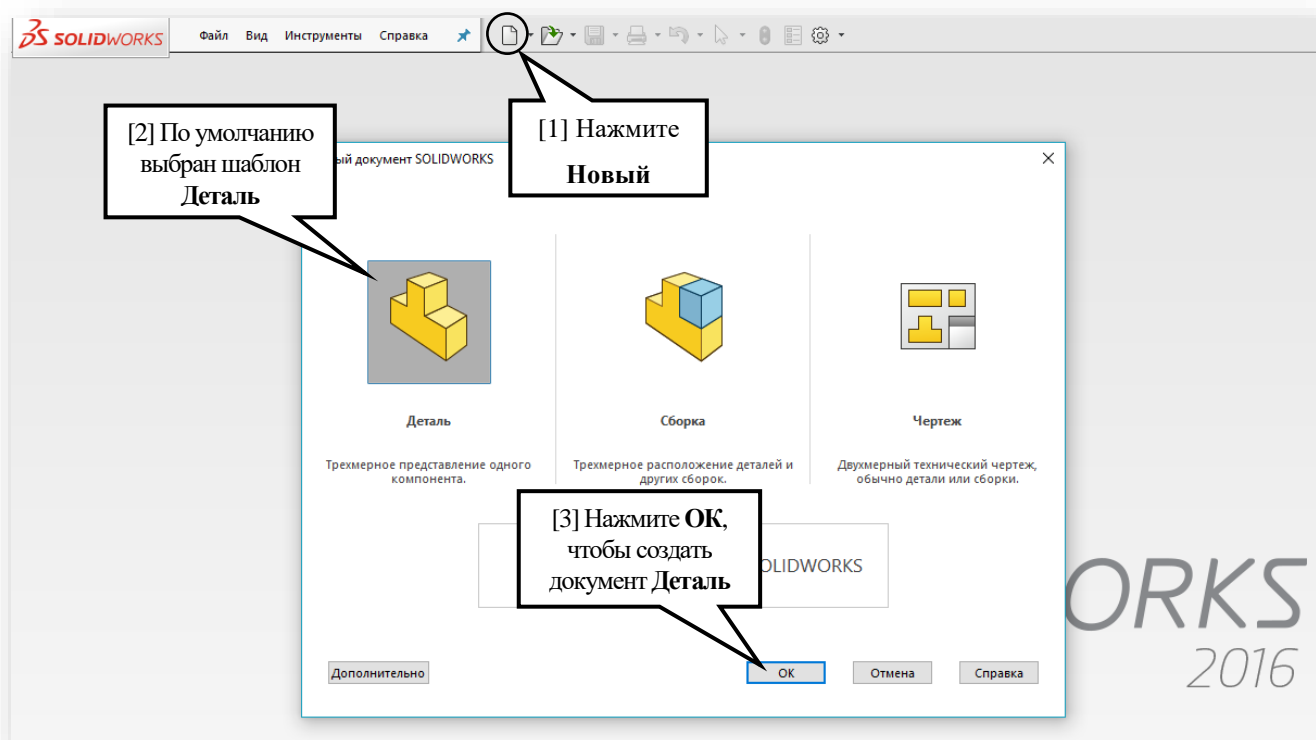
См. Приложение

3.2 Изгиб балки

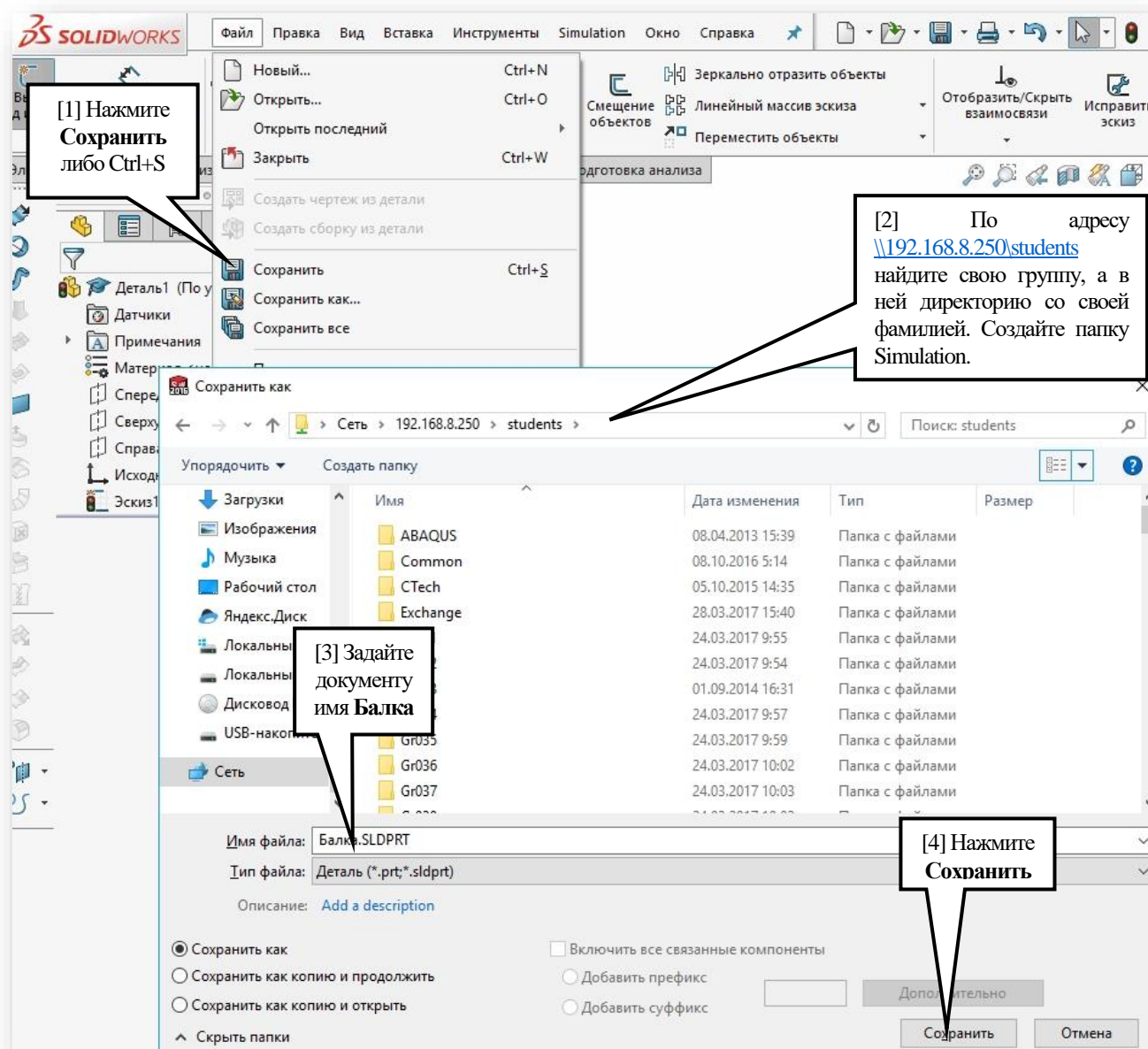
Произведём анализ изгиба балки длиной $l = 100$ мм прямоугольного сечения ($a = 10$ мм, $b = 20$ мм).

Помимо изучения функций SolidWorks Simulation («обучение нажиманию кнопок») этот проект позволит исследовать влияние сетки с различной плотностью на результаты анализа (деформация и напряжение).

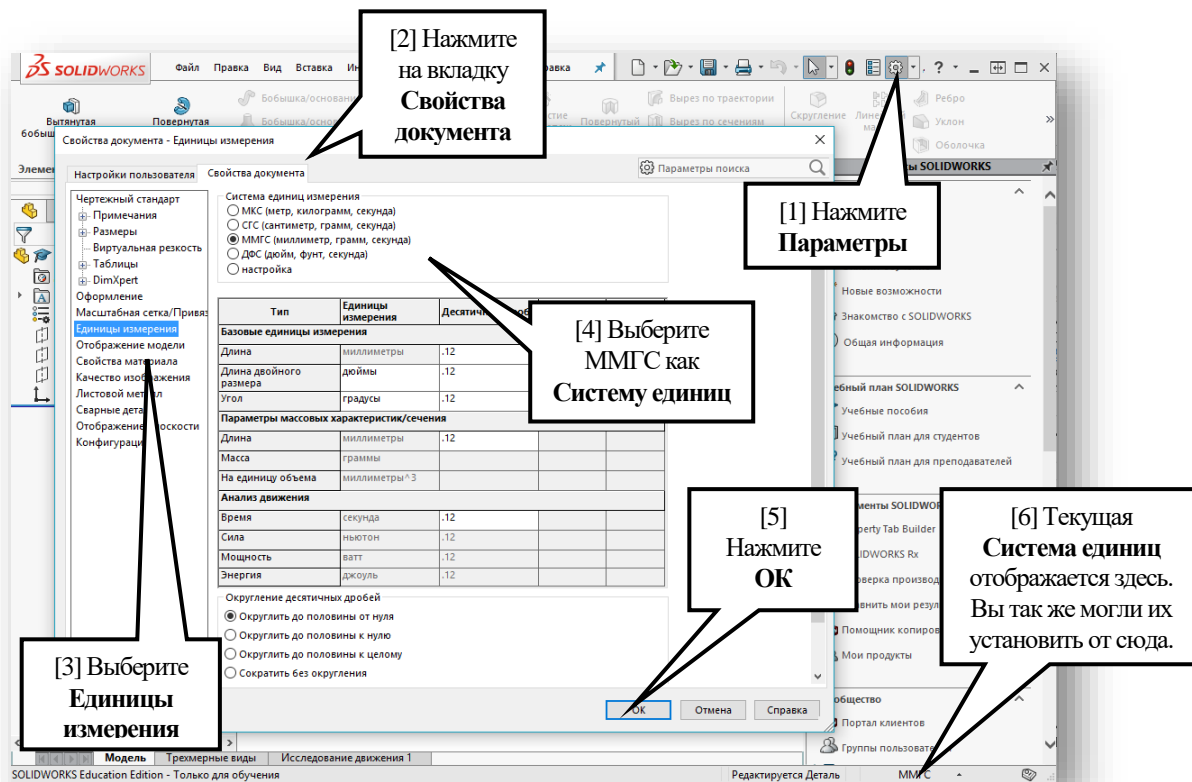
- Запустите **SolidWorks** и создайте **Новый**  документ **Деталь**.



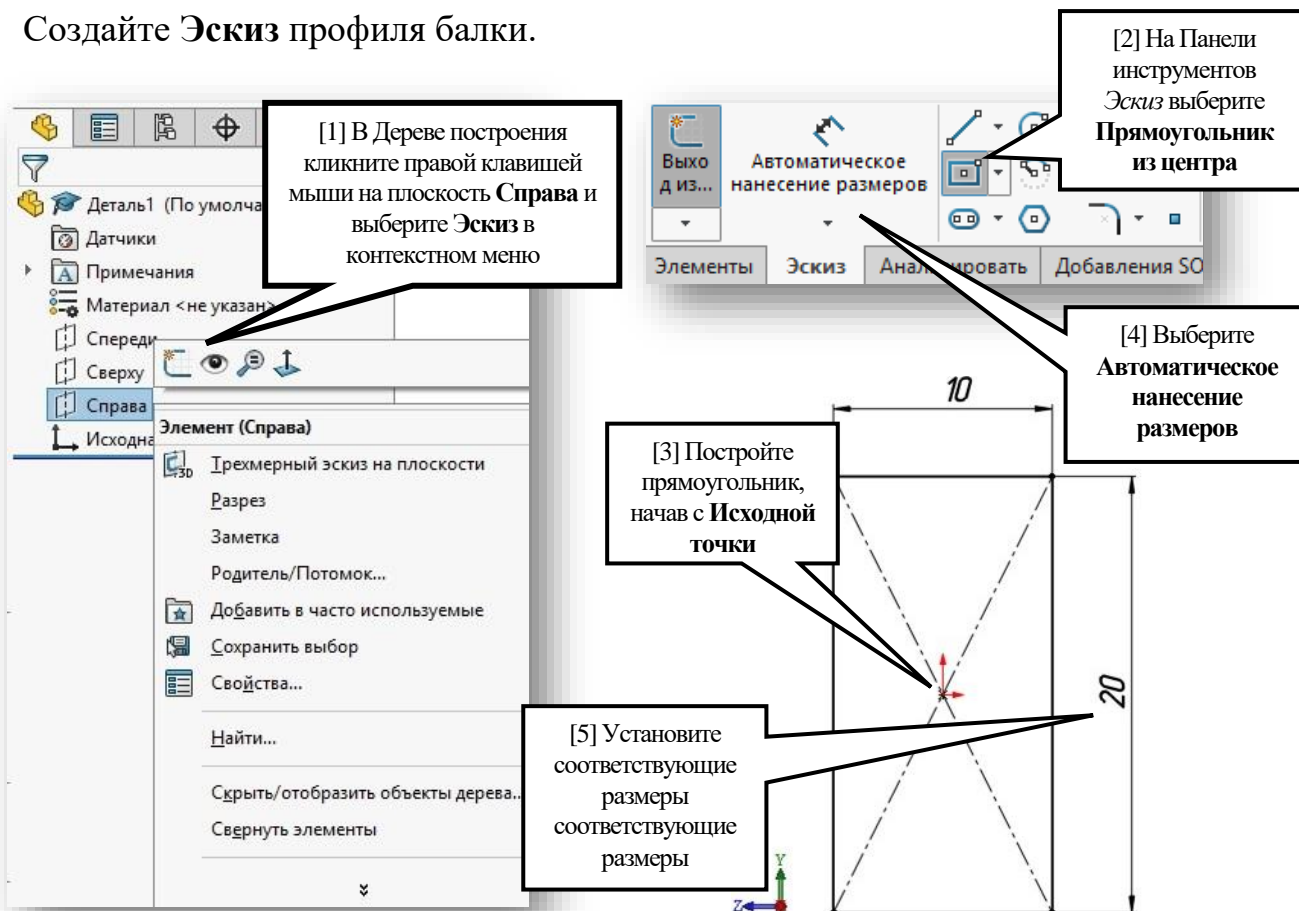
- Сохраните файл



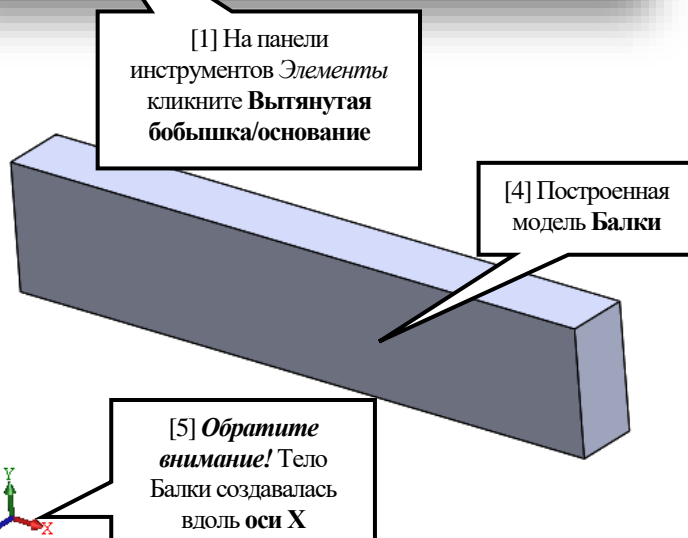
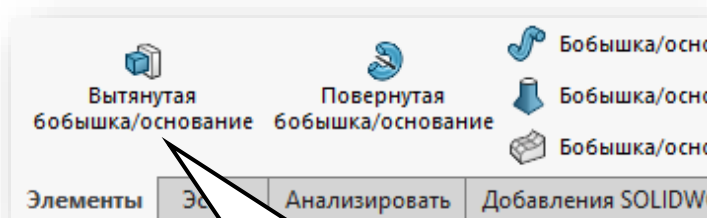
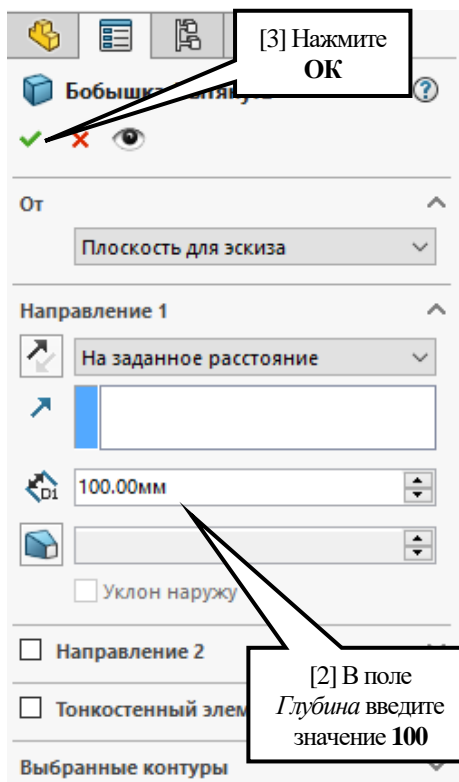
- Установите Систему единиц.



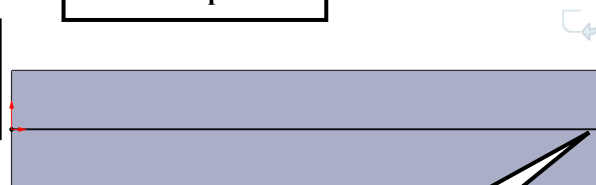
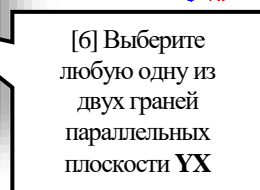
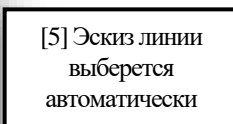
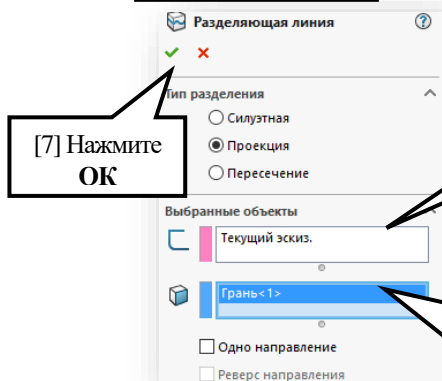
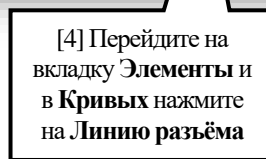
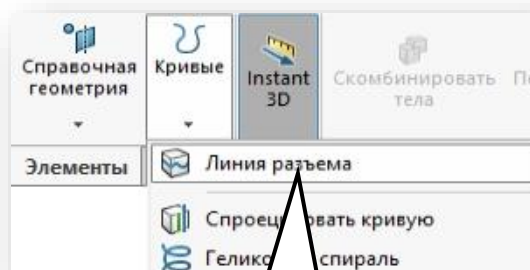
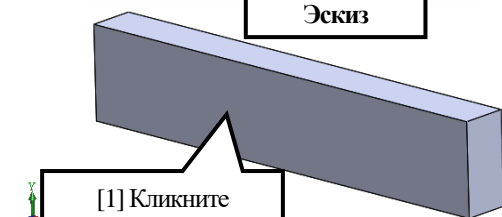
- Создайте Эскиз профиля балки.



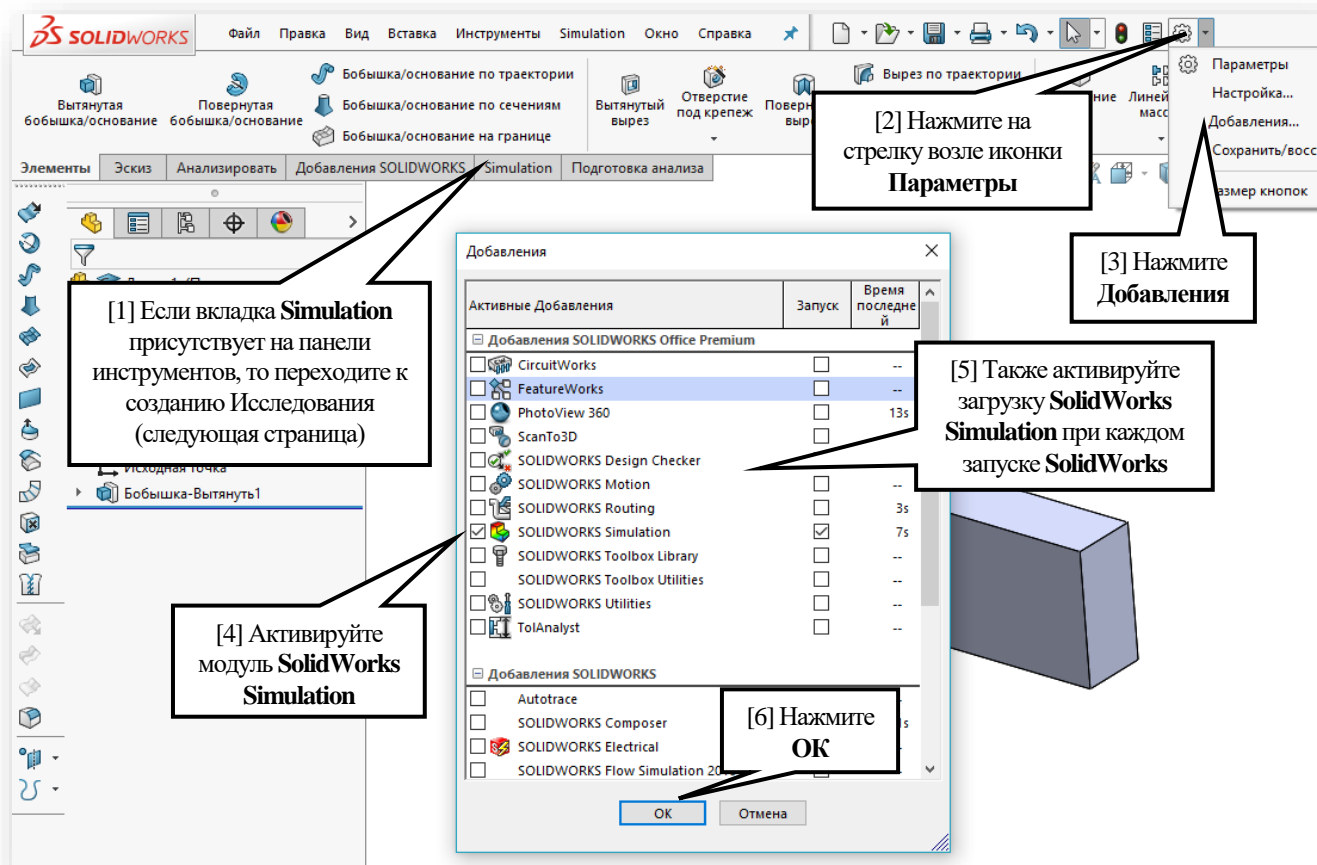
- Создайте твёрдое тело Балки



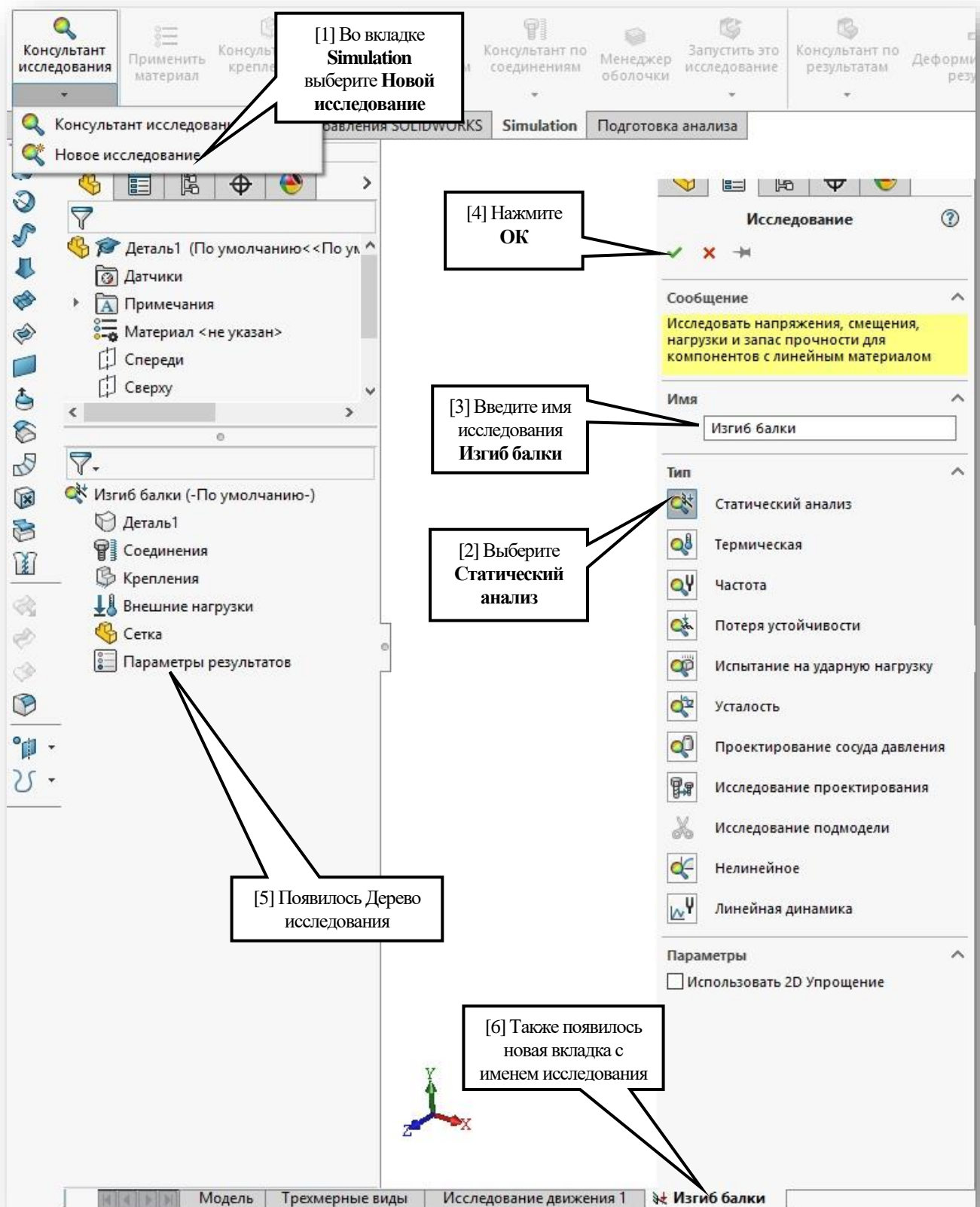
- Создание Линии разреза



- Подключение модуля **SolidWorks Simulation**



- Создание статического исследования



- Установка материала

[1] В дереве исследования кликните правой клавишей мыши и выберите **Применить/редактировать материал...**

[2] Выберите материал **Легированная сталь**

[3] Основные физико-механические параметры материала заданы по умолчанию

[4] Нажмите **Применить**

[5] Нажмите **Закрыть**

Материал

solidworks materials

- Сталь
 - 1023 Листовая углеродистая сталь
 - 201 Отожженная нержавеющая сталь
 - A286 Суперсплав на основе железа
 - AISI 1010 Сталь, горячекатанная
 - AISI 1015 Сталь, холоднотянутая (S)
 - AISI 1020
 - AISI 1020 Сталь, холоднотянутая
 - AISI 1035 Сталь (SS)
 - AISI 1045 Сталь, холоднотянутая
- Легированная сталь

Свойства | **Таблицы и кривые** | **Внешний вид** | **Штриховка** | **Настройка** | **Данные программ**

Свойства материала

Материалы в библиотеке по умолчанию не могут редактироваться. Необходимо скопировать материал в настроенную пользователем библиотеку и затем его отредактировать.

Тип модели: **Линейный упругий изотр**

Единицы измерения: **СИ - Н/м^2 (Па)**

Категория: **Сталь**

Имя: **Легированная**

Критерий разрушения по умолчанию: **Максимальный**

Описание: **Легированная сталь**

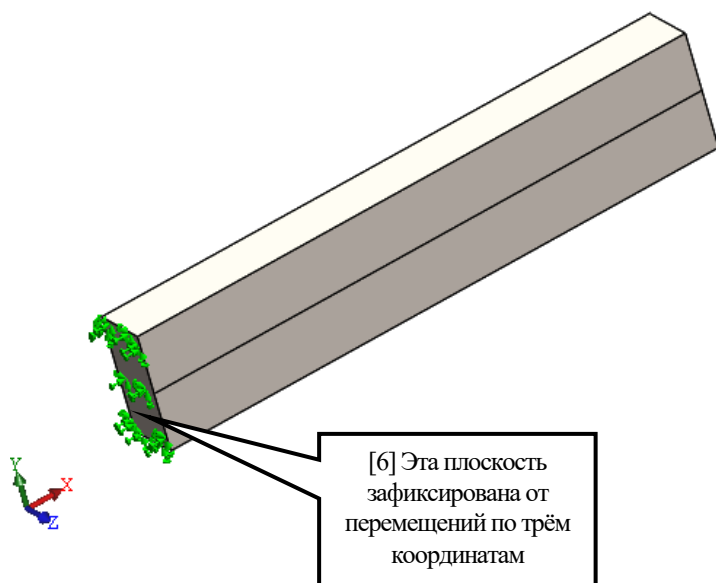
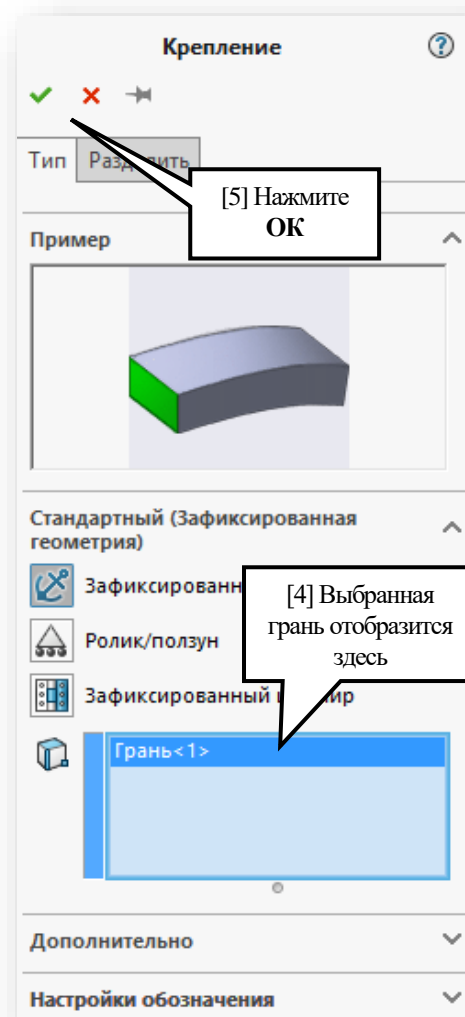
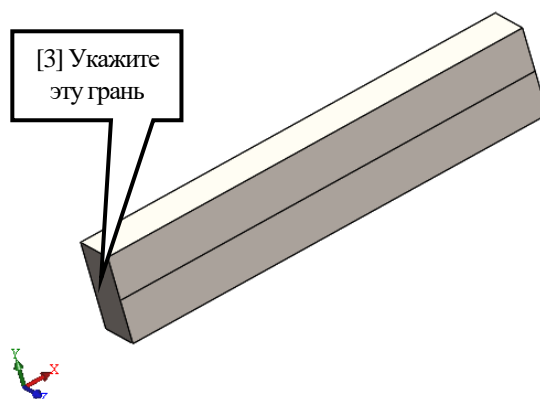
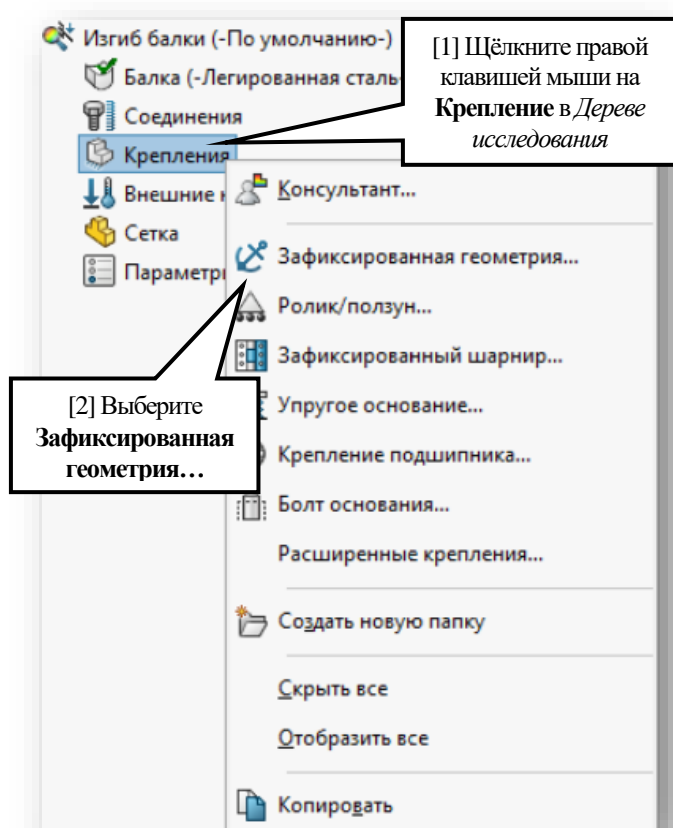
Источник: **Определено**

Sustainability: **Определено**

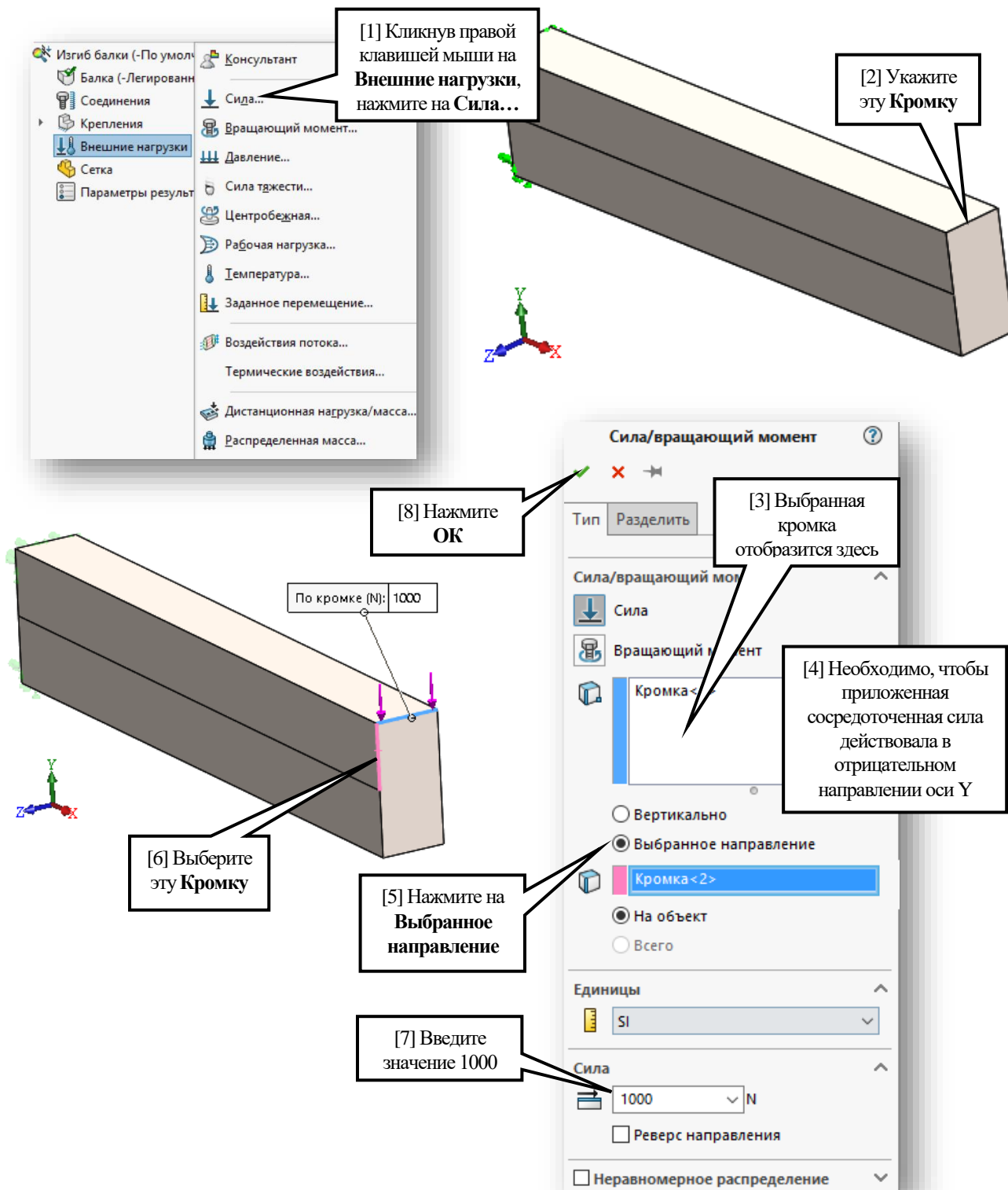
Свойство	Значение	Единицы измерения
Модуль упругости	2.1e+011	Н/м^2
Коэффициент Пуассона	0.28	Не применимо
Модуль сдвига	7.9e+010	Н/м^2
Массовая плотность	7700	кг/м^3
Предел прочности при растяжении	723825600	Н/м^2
Предел прочности при сжатии		Н/м^2
Предел текучести		Н/м^2
Коэффициент теплового расширения		1/°C
Теплопроводность		Вт/м·K

Открыть... **Применить** Закрыть Сохранить Конфигурация... Справка

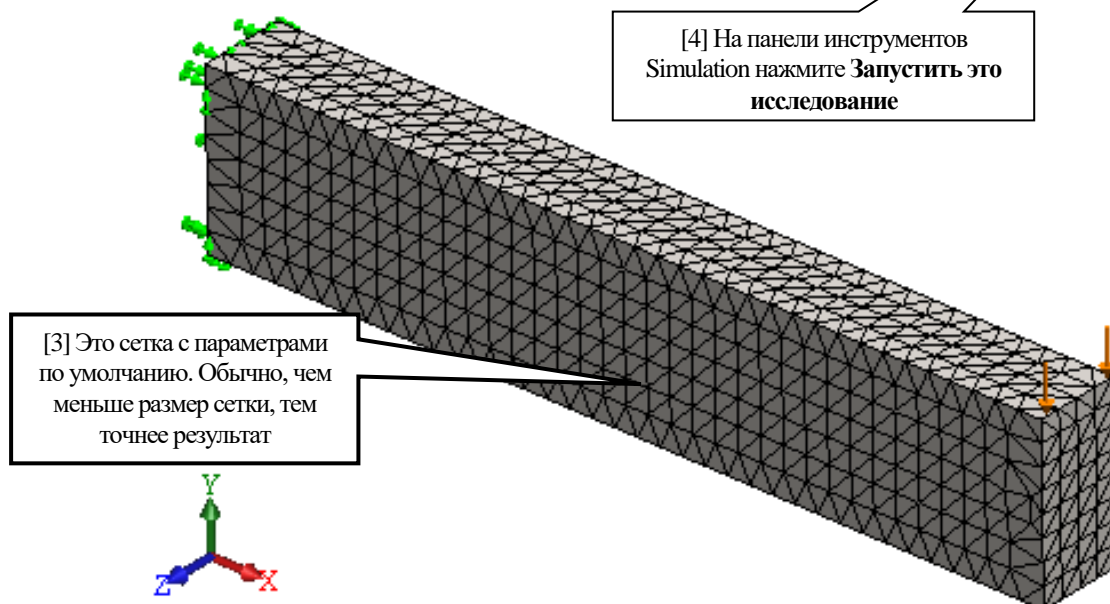
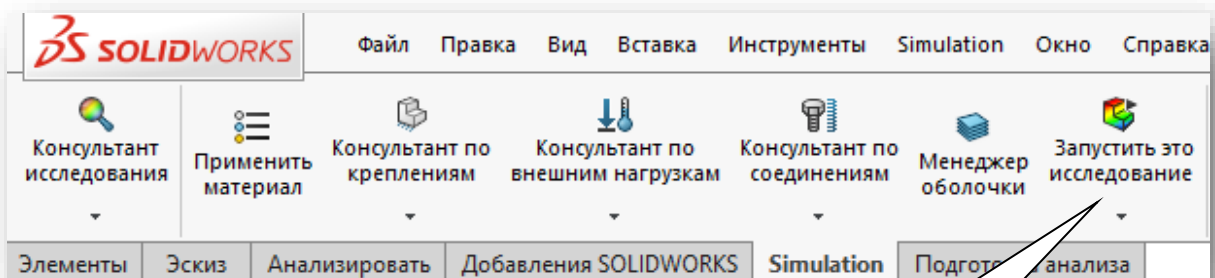
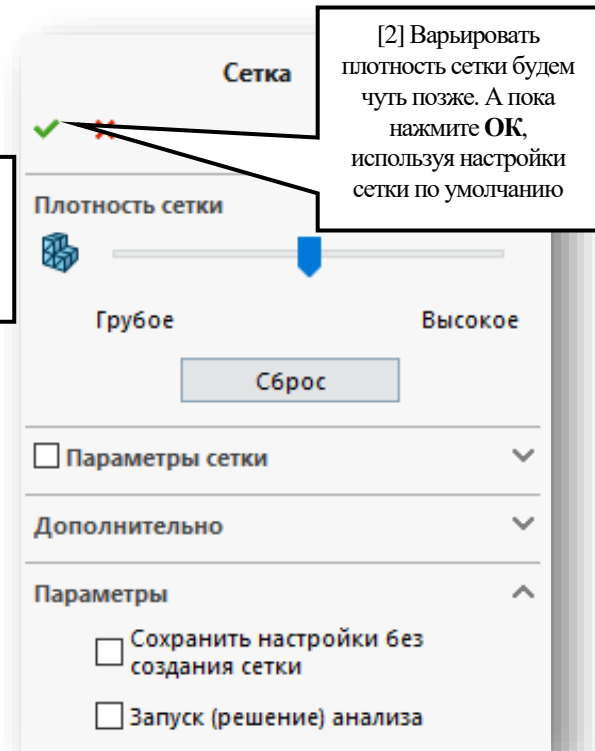
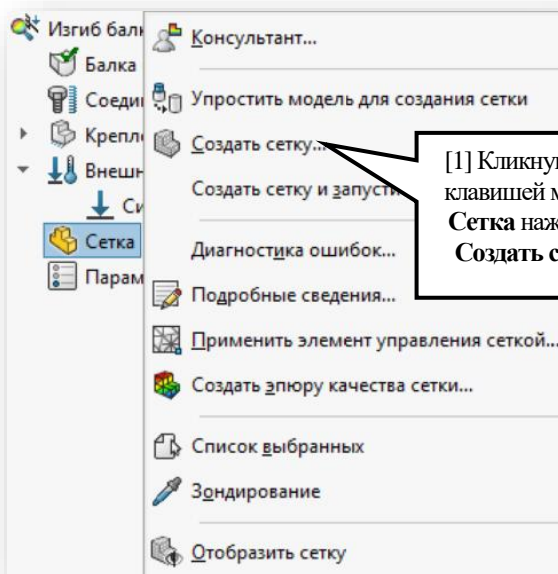
- Установка крепления



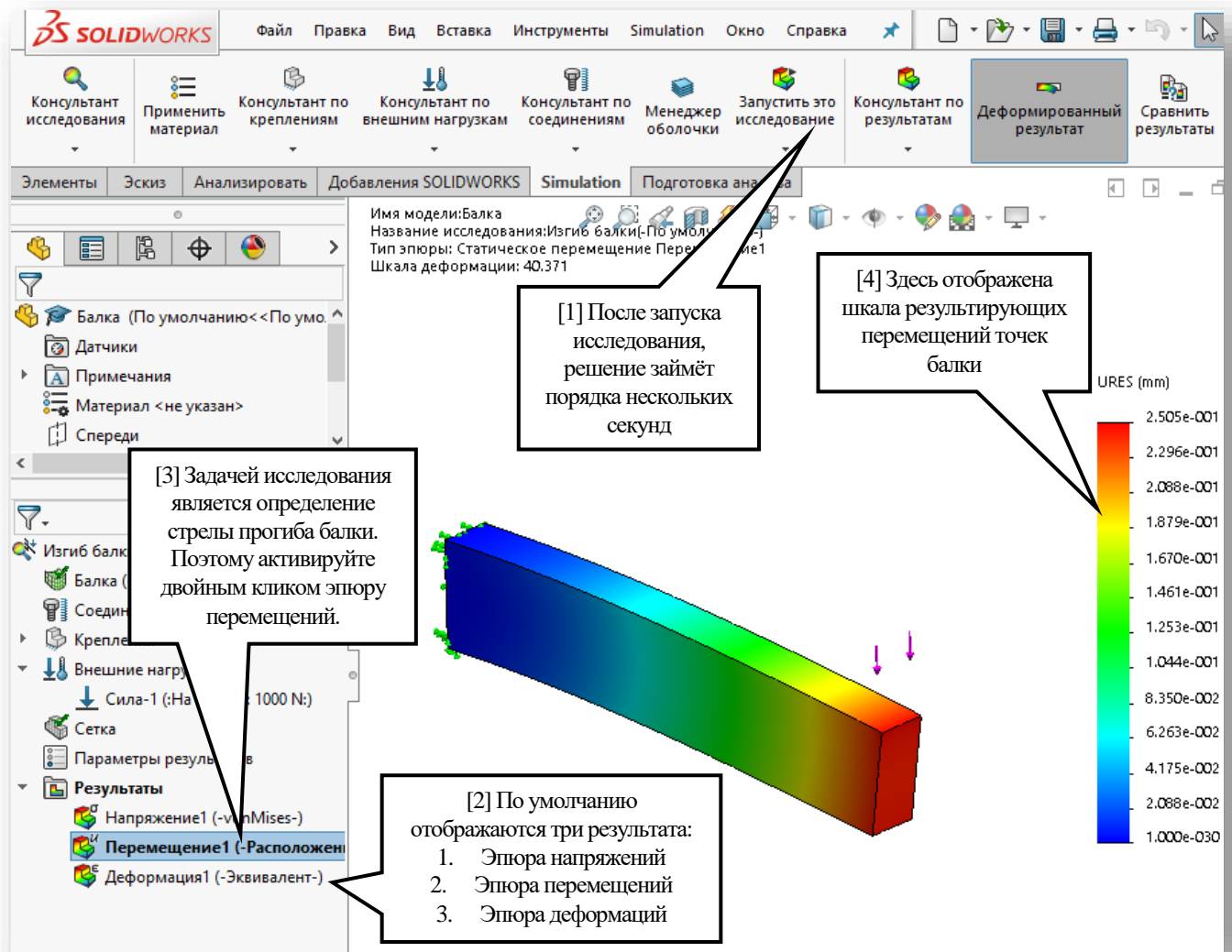
- Установка нагрузки



- Создание Сетки и запуск решения



- Решение модели



- Просмотр эпюры перемещений вдоль оси Y

The image shows the software interface for setting up a displacement plot and the resulting 3D model. The interface includes a tree view on the left, a properties panel on the right, and a 3D model at the bottom.

Tree View (Left):

- Крепления (Fixtures)
- Внешние нагрузки (External loads)
- Сетка (Mesh)
- Параметры результатов (Result parameters)
- Результаты (Results)
 - Напряжение1 (-vonMises-) (Stress1 (-vonMises-))
 - Перемещение1 (-Расположение результата- (Displacement1 (-Result location-))
 - Деф (Def)
 - Скрыть (Hide)
 - Редактировать определение... (Edit definition...)
 - Анимировать... (Animate...)
 - Ограничение сечения (Section constraint)

Properties Panel (Right):

- Эпюра перемещения (Displacement plot)
 - Определение (Definition)
 - Отображение (Display)
 - UY: Перемещение Y (UY: Displacement Y)
 - mm
 - Дополнительные параметры (Additional parameters)
 - Деформированная форма (Deformed shape)
 - Авто (Auto)
 - 40.37448883
 - Точная шкала (Exact scale)
 - Настроенный пользователем (User-defined)
 - 1
 - Отобразить цвета (Show colors)

3D Model (Bottom):

The 3D model shows a rectangular block with a color gradient representing displacement. A color bar on the right indicates the scale from 0.000e+000 to 2.505e-001.

Annotations:

- [1] Скройте **Крепление**, вызвав контекстное меню (Hide the **Fixture**, call the context menu)
- [2] Скройте **Внешние нагрузки**, вызвав контекстное меню (Hide the **External loads**, call the context menu)
- [3] Кликните правой кнопкой мыши на эпюру перемещений в папке **Результаты** и выберите **Редактировать определение...** (Click the right mouse button on the displacement plot in the **Results** folder and select **Edit definition...**)
- [4] Выберите **UY: Перемещение Y** (Select **UY: Displacement Y**)
- [5] Коэффициент масштабирования деформации (Deformation scaling coefficient)
- [6] Вкл/выкл **Деформированного результата**. Находится на панели инструментов **Simulation** (On/Off **Deformed result**. Located on the **Simulation** toolbar)
- [7] Нажмите **ОК** (Click **OK**)

- Анимирование деформации

The image shows the software interface for setting up animation. The interface includes a tree view on the left, a properties panel on the right, and a 3D model at the bottom.

Tree View (Left):

- Результаты (Results)
 - Напряжение1 (-vonMises-) (Stress1 (-vonMises-))
 - Перемещение1 (-Расположение результата- (Displacement1 (-Result location-))
 - Деф (Def)
 - Скрыть (Hide)
 - Редактировать определение... (Edit definition...)
 - Анимировать... (Animate...)
 - Ограничение сечения... (Section constraint...)

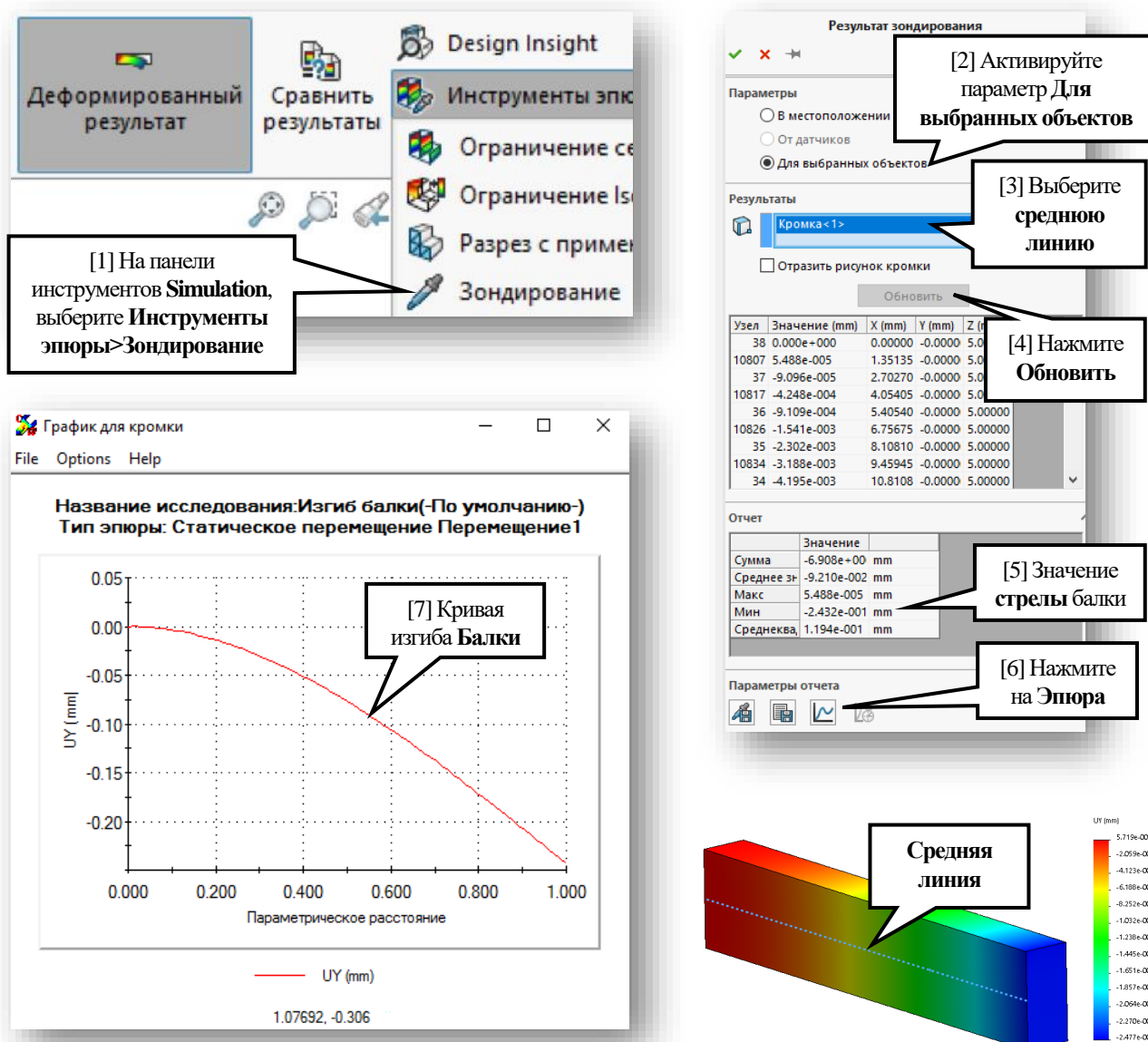
Properties Panel (Right):

- Анимация (Animation)
 - Сообщение (Message)
 - Создание кадров завершено (Frame creation completed)
 - Воспроизведение анимации... (Animation playback...)
 - Основы (Basics)
 - Воспроизвести (Play)
 - Пауза (Pause)
 - Стоп (Stop)
 - Скорость (Speed)
 - 150
 - Сохранить как файл AVI (Save as AVI file)

Annotations:

- [1] Нажмите **Анимировать...** (Click **Animate...**)
- [2] Кнопки управления: **Воспроизвести**, **Пауза** и **Стоп** (Control buttons: **Play**, **Pause** and **Stop**)
- [3] Настройка скорости **Воспроизведения** (Playback speed setting)
- [4] Возможно сохранение анимации в формате AVI (Animation can be saved in AVI format)
- [5] Нажмите **ОК** (Click **OK**)

- Построение графика изгиба балки



Далее, рассчитаем относительную погрешность результатов расчётным методом и аналитическим:

$$y_{max}^a = \frac{FL^3}{3EJ_y} = 2,38 \cdot 10^{-4} \text{ м, где } J_y = \frac{ab^3}{12}$$

$$\delta = \left| \frac{y_{max}^p - y_{max}^a}{y_{max}^a} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{2,432 - 2,380}{2,380} \right| \cdot 100\% = 2,18\% \quad (3.1)$$

На основе проведённого статического исследование вы познакомились с процедурой самого инженерного анализа. Она включает одни и те же основные этапы, независимо от типа анализа или модели.

Таким образом, ключевыми этапами инженерного анализа являются:

- Создание CAD-модели и применение материала
- Выбор исследования (Статический, Термический, Частота и т.д.)
- Определение граничных условий (крепления и нагрузки)
- Создание сетки модели
- Запуск исследования
- Анализ результатов


3.3 Растяжение балки вдоль оси X

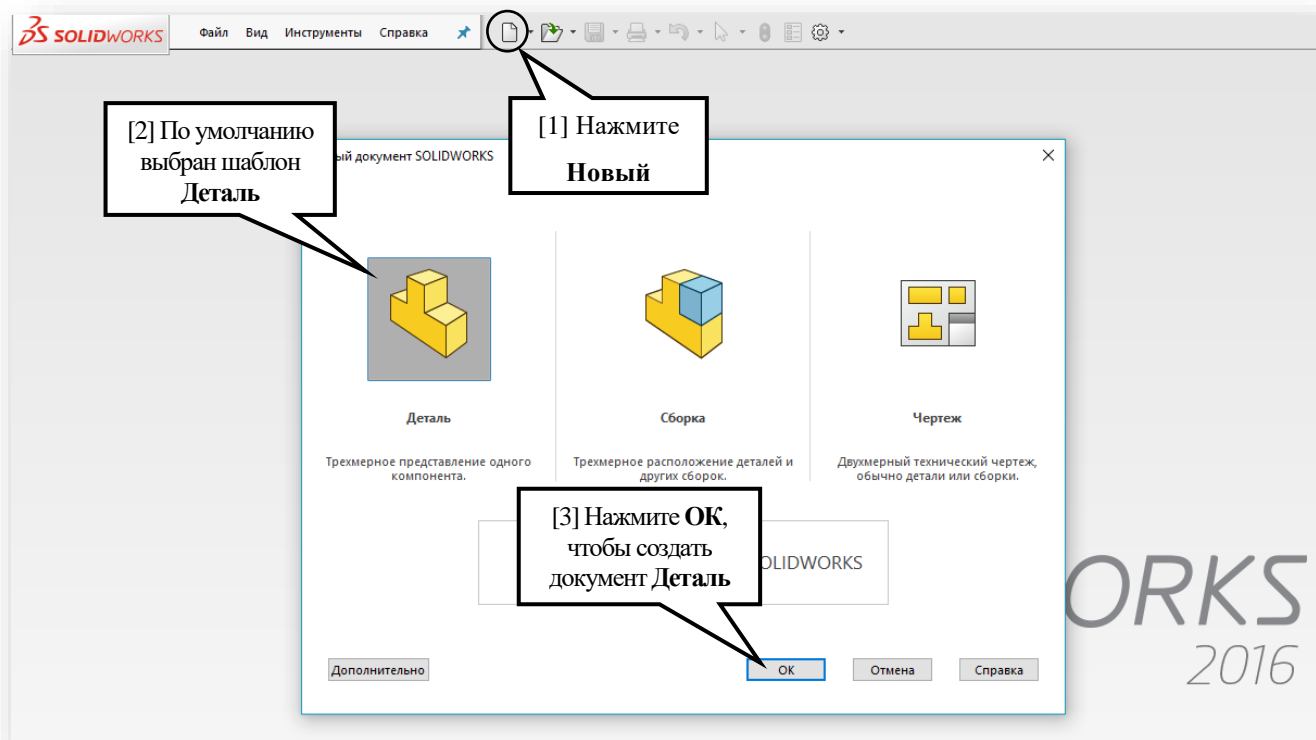
Используя модель предыдущей задачи, сравнить теоретическое и расчётное изменение длины балки при $\Delta T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Вычислите относительную погрешность.





$$\Delta L = \alpha L \Delta T$$

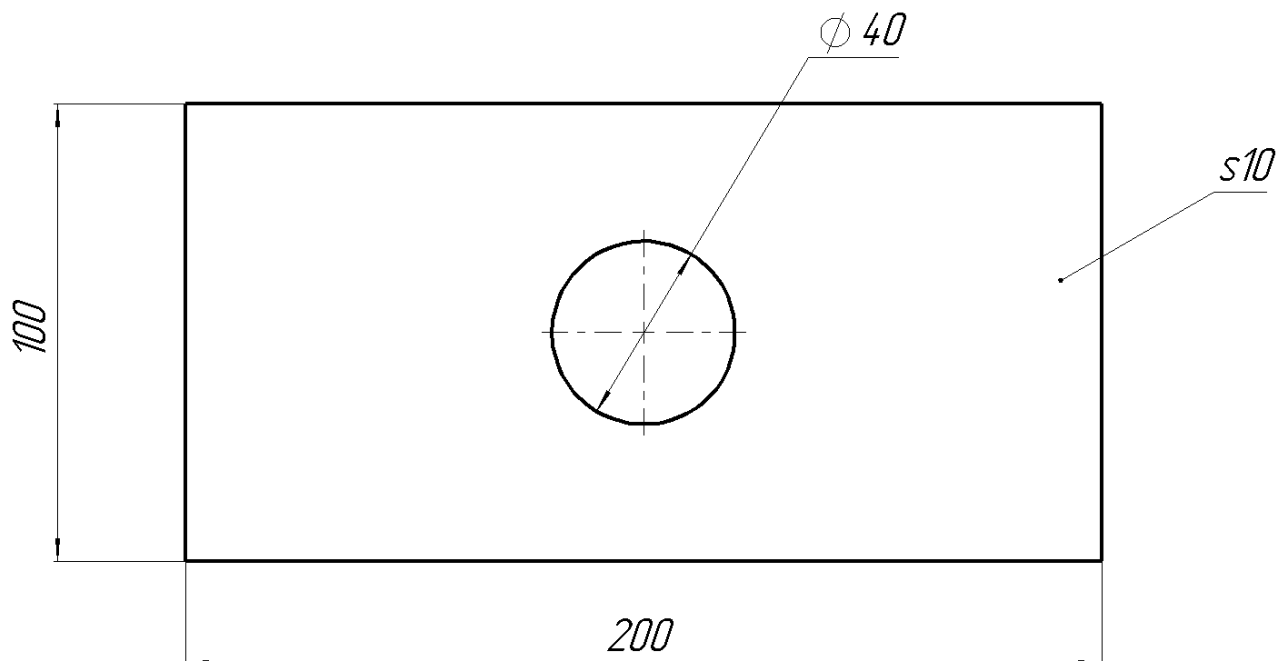
3.4 Растяжение пластины с отверстием

Цель этого учебного примера – определение напряжения прямоугольной пластины с отверстием, подвергающейся нагрузке растяжения (задача Кирша). На примере этой простой модели будет исследована зависимость итогового результата от плотности сетки.

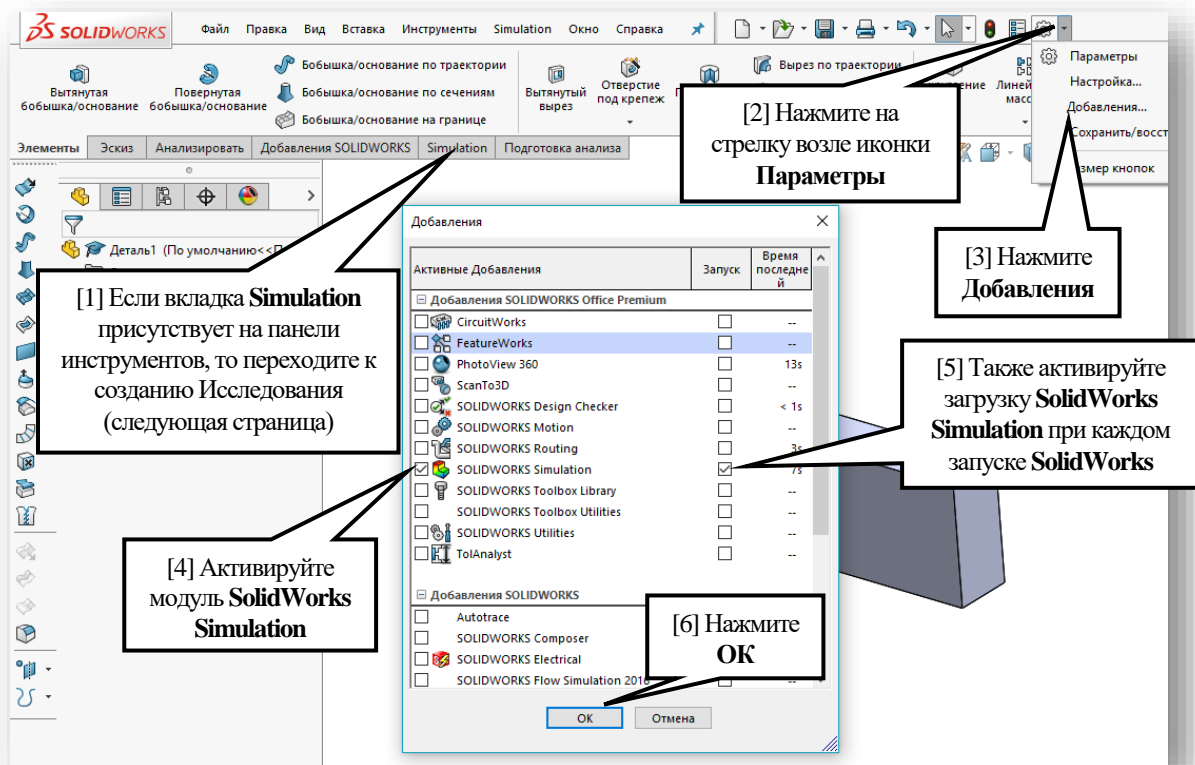
- Запустите **SolidWorks** и создайте **Новый**  документ **Деталь**.



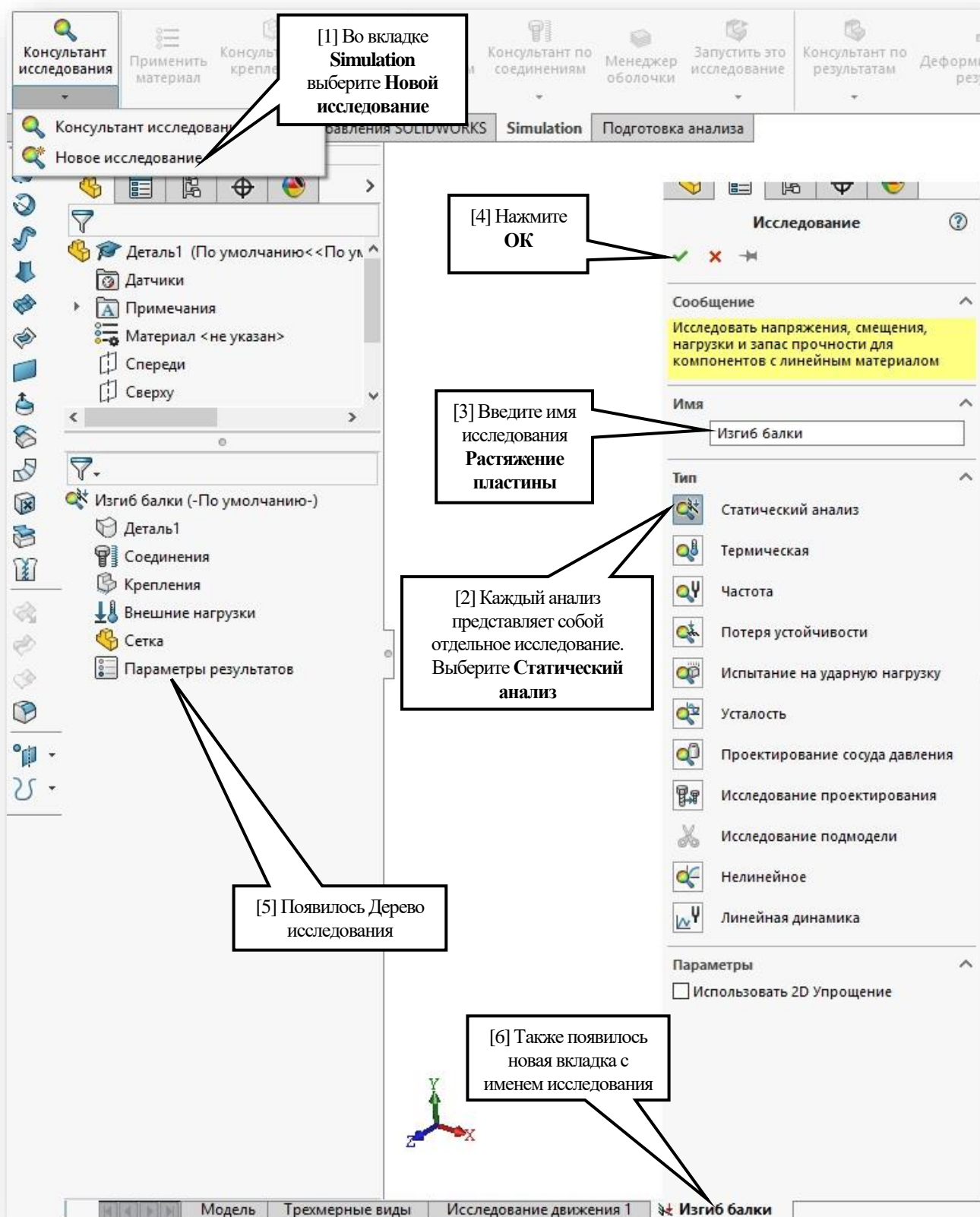
- Выберите плоскость **Спереди**  и создайте на нем **Эскиз** .
- Начните рисовать **Прямоугольник из центра**  из исходной точки.
- Добавьте размеры на эскиз и **Вытяните**  тело на расстояние **10 мм**.



- Подключение модуля **SolidWorks Simulation**



- Создание статического исследования



- Установка материала

[1] В Дереве исследования кликните правой клавишей мыши и выберите **Применить/редактировать материал...**

[2] Выберите материал **AISI 304 (Сталь)**




[3] Основные физико-механические параметры заданы по умолчанию. Обязательные параметры для этого исследования выделены красным цветом. Синим цветом выделены параметры, которые могут быть использованы для других типов исследований

Свойство	Значение	Единицы измерения
Модуль упругости	1.9e+011	Н/м ²
Коэффициент Пуассона	0.29	Не применимо
Модуль сдвига	7.5e+010	Н/м ²
Массовая плотность	8000	кг/м ³
Предел прочности при растяжении	517017000	Н/м ²
Предел прочности при сжатии		Н/м ²
Предел текучести	206807000	Н/м ²
Коэффициент теплового расширения	1.8e-005	/К
Теплопроводность	16	Вт/(м·К)

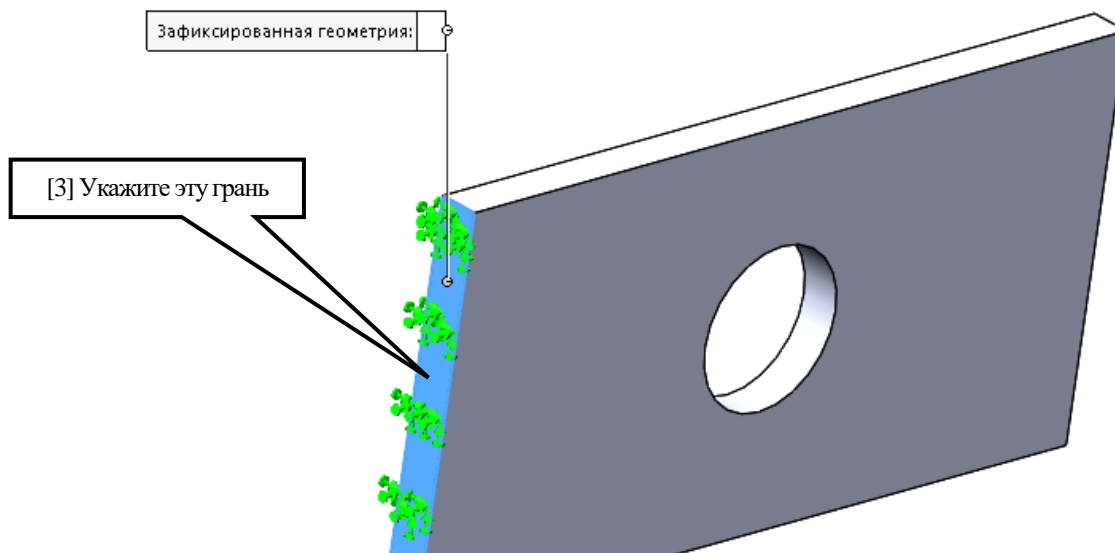
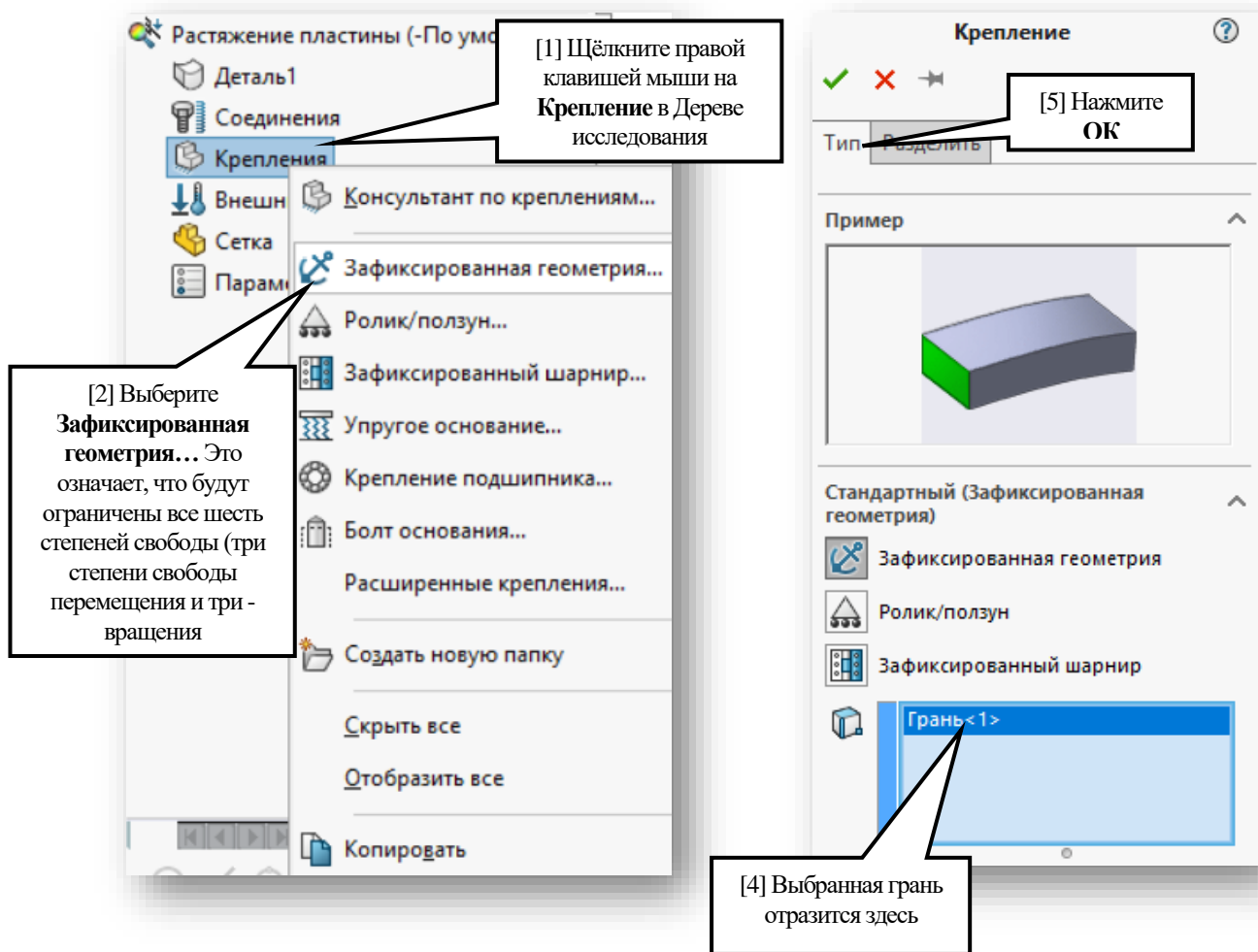
[4] Нажмите **Применить**

[5] Нажмите **Закрыть**

Для выполнения статического анализа необходимо применить граничные условия. Одним из них являются **Крепления**, обеспечивающие определение модели в пространстве. SolidWorks Simulation предоставляет различные крепления, которые можно применять для ограничения модели. Как правило, крепления применяются к граням, кромкам и вершинам с использованием различных методов. Крепления делятся на две группы: *Стандартные* и *Расширенные*. Ниже перечислены свойства *Стандартных*:









<u>Тип крепления</u>	<u>Определение</u>
Зафиксированная геометрия 	Так называемое жесткая опора, ограничивающая все степени свободы перемещения и вращения. Зафиксированная геометрия не требует данных о направлении применения ограничений
Ролик/ползун 	Ограничение Ролик/ползун указывает, плоская грань может свободно перемещаться в своей плоскости, но не может перемещаться в направлении, перпендикулярном этой плоскости. Под действием нагрузки грань может сжиматься или растягиваться
Зафиксированный шарнир 	Ограничение Шарнир указывает, что цилиндрическая грань может перемещаться вокруг своей оси. Под действием нагрузки радиус и длина цилиндрической грани остаются постоянными

- Установка креплений

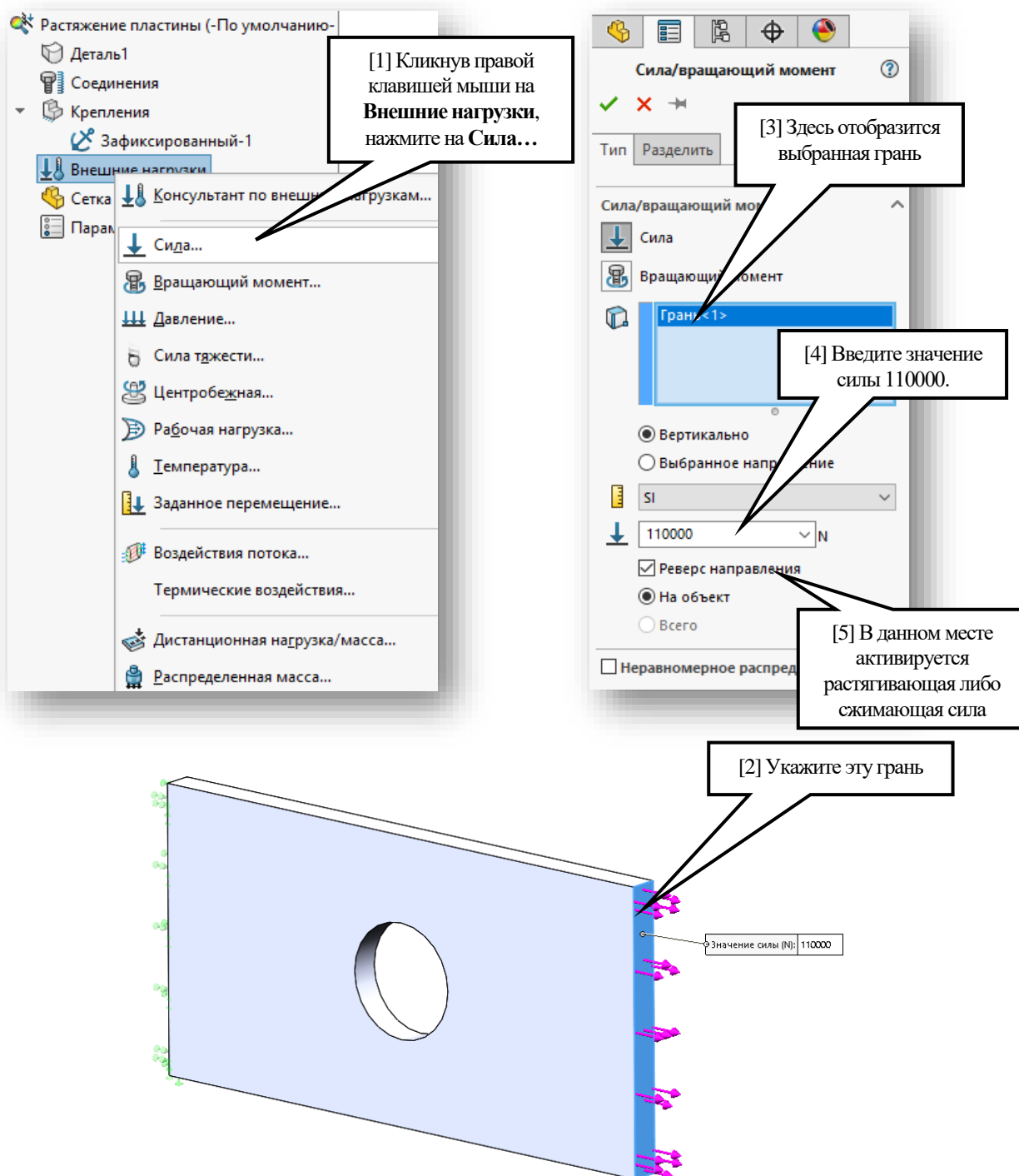


После применения ограничений модель полностью фиксирована в пространстве. Следовательно, модель не может перемещаться без упругой деформации. С точки зрения анализа конечных элементов это означает, что в модели отсутствуют режимы жесткого тела.

После применения ограничений к модели необходимо применить внешние нагрузки или силы, которые, как правило, прикладываются к граням, кромкам и вершинам с использованием различных методов. Ниже перечислены свойства сил и нагрузок:

<u>Тип силы</u>	<u>Определение</u>
Сила 	Этот параметр позволяет применить силу или момент к грани, кромке или вершине в направлении, заданном выбранной справочной геометрией (плоскость, кромка, грань или ось).
Вращающий момент 	Этот параметр позволяет применить вращающий момент вокруг справочной оси.
Давление 	Позволяет применить давление к грани. Давление может быть двунаправленным и переменным (например, гидростатическое давление).
Притяжение 	Позволяет применить линейное ускорение к деталям или сборкам
Центробежная сила 	Позволяет применить угловую скорость и ускорение к детали или сборке
Рабочая нагрузка 	Рабочие нагрузки определяются между контактирующими цилиндрическими гранями
Дистанционная нагрузка/масса 	Позволяют применить нагрузки, которые обычно передаются соединительными конструкциями
Распределённая масса 	Распределённая масса применяется к выбранным граням для моделирования массы компонентов, которые погашены или не включены в модель
Температура 	Температура применяется к компонентам для моделирования эффектов теплового расширения.

- Установка внешних нагрузок



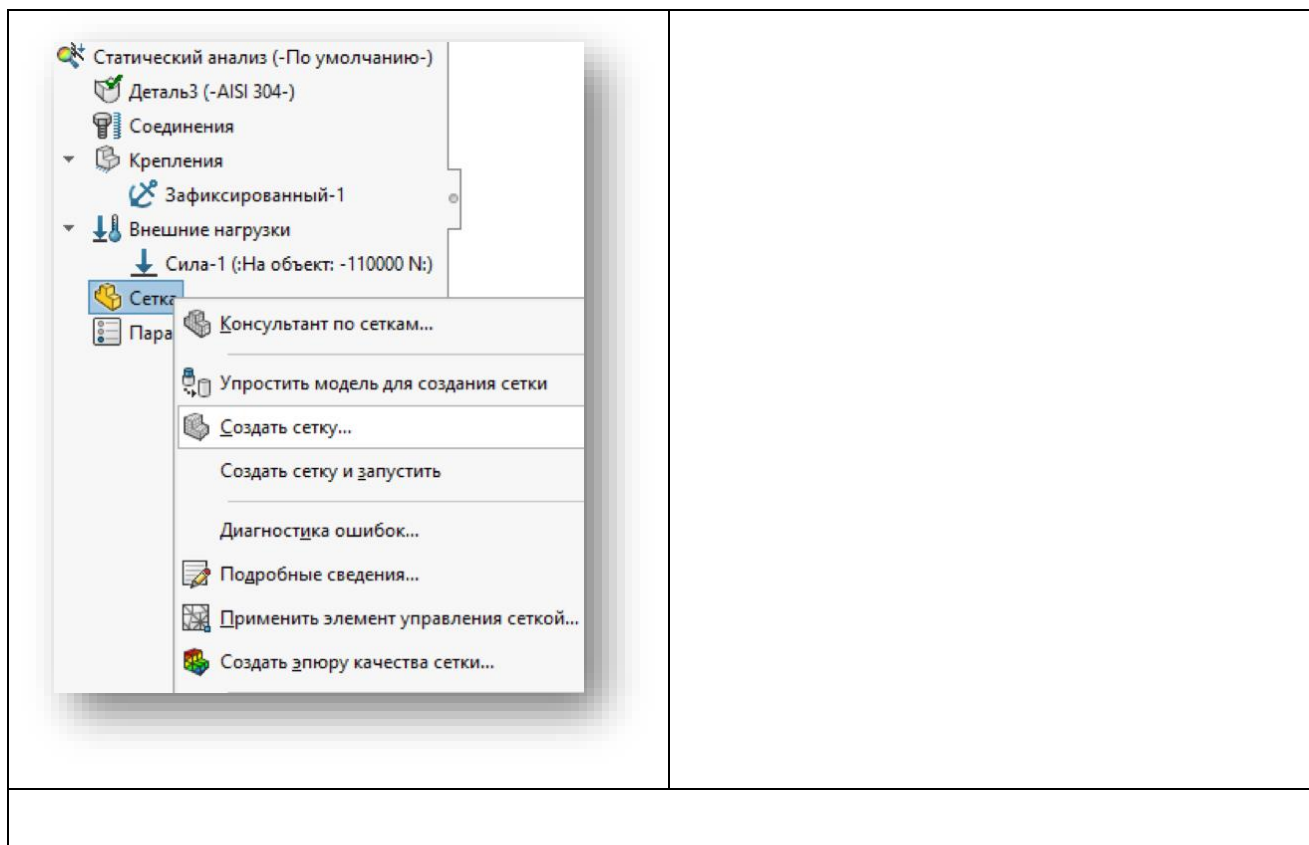
После определение свойств материала, креплений и внешних нагрузок получилась полностью определенная математическая модель, которая станет предметом анализа конечных элементов.

Эту математическую модель необходимо дискретизировать для преобразования в модель конечных элементов. Прежде чем приступить к созданию модели конечных элементов, необходимо пояснить следующие аспекты:

Подготовка геометрии	Подготовка геометрии подразумевает получение четко определенной геометрии, где допускаются небольшие неточности. Геометрию, упрощённую в целях анализа, можно визуально сверить с исходной моделью САПР.
Свойства материала	Свойства материала чаще всего выбираются из библиотеки материалов. При этом не учитываются локальные дефекты, состояние поверхности и т.д. Также можно создать и добавить свой материал в библиотеку материалов.
Определение внешних нагрузок	Для определения внешних нагрузок достаточно выбрать нужные параметры в меню, однако необходимо представлять себе физику процесса.
Определение креплений	На этом этапе часто совершаются наиболее серьёзные ошибки. Самая распространённая ошибка – чрезмерное ограничение модели, которое приводит к созданию слишком жесткой конструкции и получению заниженных значений деформации и напряжения.

Фактически подготовка геометрии САПР к анализу конечных элементов может занять несколько часов, а определение материала и применение нагрузок и креплений всего несколько минут. Также необходимо подчеркнуть, что ответственность за принятие идеализированных допущений, сделанных в процессе создания математической модели, лежит на Вас! Самые эффективные инструменты автоматического создания сетки и самые высокопроизводительные решающие программы не помогут, если подвергаемая анализу модель основана на ошибочных допущениях.

Последним этапом, перед запуском анализа, является создания конечных элементов модели. По умолчанию, SolidWorks Simulation строит сетку со средней плотностью. Плотность сетки оказывает непосредственное влияние на точность результатов. Чем меньше размер элементов, тем ниже вероятность ошибок дискретизации, но процесс создания сетки и решения при этом занимает больше времени.



Обратите внимание, что все результаты в этой таблице получены при исследовании одной и той же задачи. Единственное различие заключается в плотности сетки. При её улучшении удаётся более точно аппроксимировать фактические поля перемещения и напряжения. Стоит также упомянуть, что перемещения всегда являются основными неизвестными в анализе конечных элементов, а напряжения вычисляются на основе результатов перемещения. Следовательно, напряжение также увеличивается по мере улучшения сетки. Если продолжить улучшение сетки, можно увидеть, что результаты перемещения и напряжения сходятся в конечном значении. Это предел решения математической модели. Различия между решением, полученным в результате

анализа конечных элементов, и решением математической модели объясняются ошибкой дискретизации. Вероятность ошибок дискретизации сводится к минимуму по мере улучшения сетки. Процесс последовательного улучшения сетки называется процессом достижения сходимости. Цель этого процесса – определить влияние параметров дискретизации (размера элементов) на интересующие перемещения и максимальное напряжение Мизеса).

Рассчитать теоретическое значение $\sigma_{max}^{теор}$

$P = 11 \cdot 10^3$ Н – растягивающая нагрузка

$W = 100$ мм – ширина пластины

$D = 40$ мм – диаметр отверстия

$S = 10$ мм – толщина пластины

$$\sigma_n = \frac{P}{(W - D) \cdot S} = 183,33 \text{ МПа}$$

$$K_n = 3 - 3,13 \cdot \left(\frac{D}{W}\right) + 3,66 \cdot \left(\frac{D}{W}\right)^2 - 1,53 \cdot \left(\frac{D}{W}\right)^3 = 2,23568$$

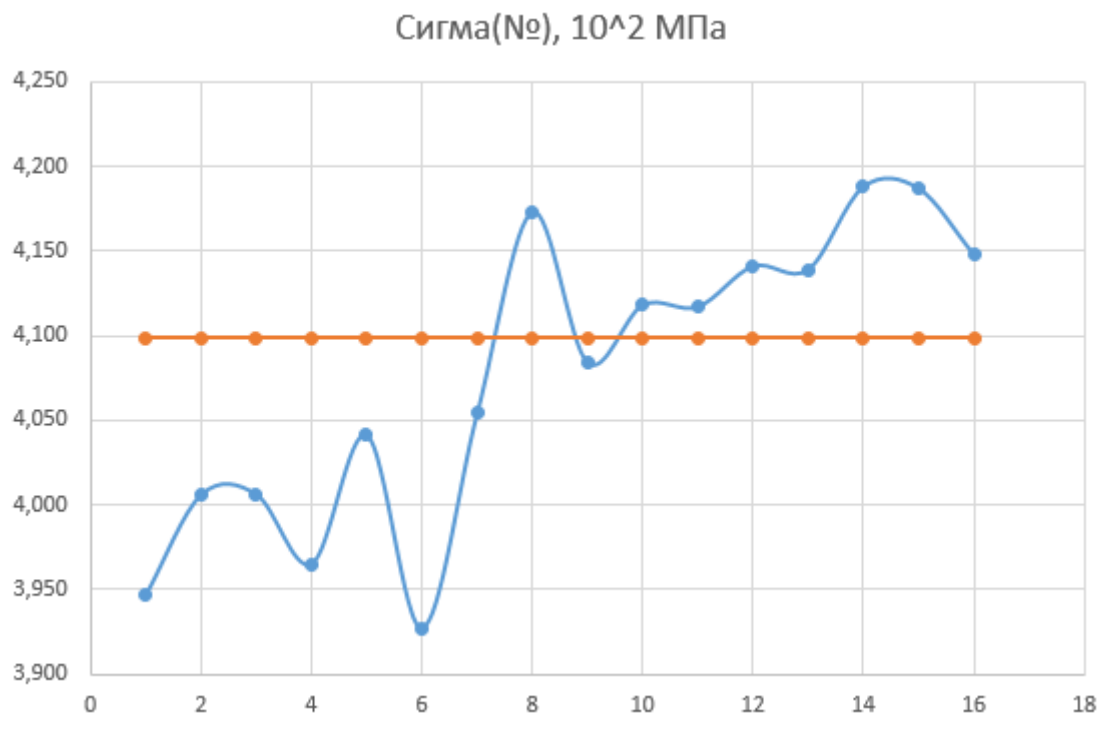
= –коэффициент концентрации напряжения

$$\sigma_{max}^{теор} = K_n \cdot \sigma_n = 40,87 \text{ МПа}$$

Создать таблицу

№	$\sigma_{max},$ 10^2 МПа	$X_{max},$ мм	Количество узлов, N	$G_{теор},$ 10^2 МПа
1	3,947	0,1432	1110	4,0987
2	4,006	0,1432	1407	4,0987
3	4,006	0,1433	1850	4,0987
4	3,965	0,1434	2647	4,0987
5	4,041	0,1434	4131	4,0987
6	3,927	0,1434	5257	4,0987
7	4,054	0,1435	6683	4,0987
8	4,173	0,1435	8904	4,0987
9	4,084	0,1435	10460	4,0987
10	4,118	0,1435	12573	4,0987
11	4,117	0,1435	16522	4,0987
12	4,141	0,1435	22978	4,0987
13	4,139	0,1435	36960	4,0987
14	4,188	0,1435	43697	4,0987
15	4,187	0,1435	55533	4,0987
16	4,148	0,1435	68506	4,0987

Построить зависимости $\sigma_{\max}(N_{\circ})$ 10^2 МПа, $X_{\max}(N_{\circ})$ мм, Количество узлов сетки (N_{\circ}).



Следовательно, разница равна

$$\delta = \left| \frac{\sigma_{\max}(N_{\circ}16) - \sigma_{\max}^{\text{теор}}}{\sigma_{\max}(N_{\circ}16)} \right| \cdot 100\% = 1,19\%$$

При сравнении результатов нужно быть предельно внимательным. В действительности, аналитическое решение справедливо для очень тонкой бесконечной пластины. SolidWorks Simulation вычисляет решения для 3D-модели со значительной толщиной и конечными размерами самой пластины, и демонстрирует реалистичное распределение напряжений по всей толщине пластины. Кроме того, при детальном рассмотрении результатов напряжения можно увидеть градиент напряжения в толще пластины, который не учитывается в аналитической модели. Таким образом, можно сделать вывод, что SolidWorks Simulation представляет более подробные сведения о напряжении, чем аналитическое решение.

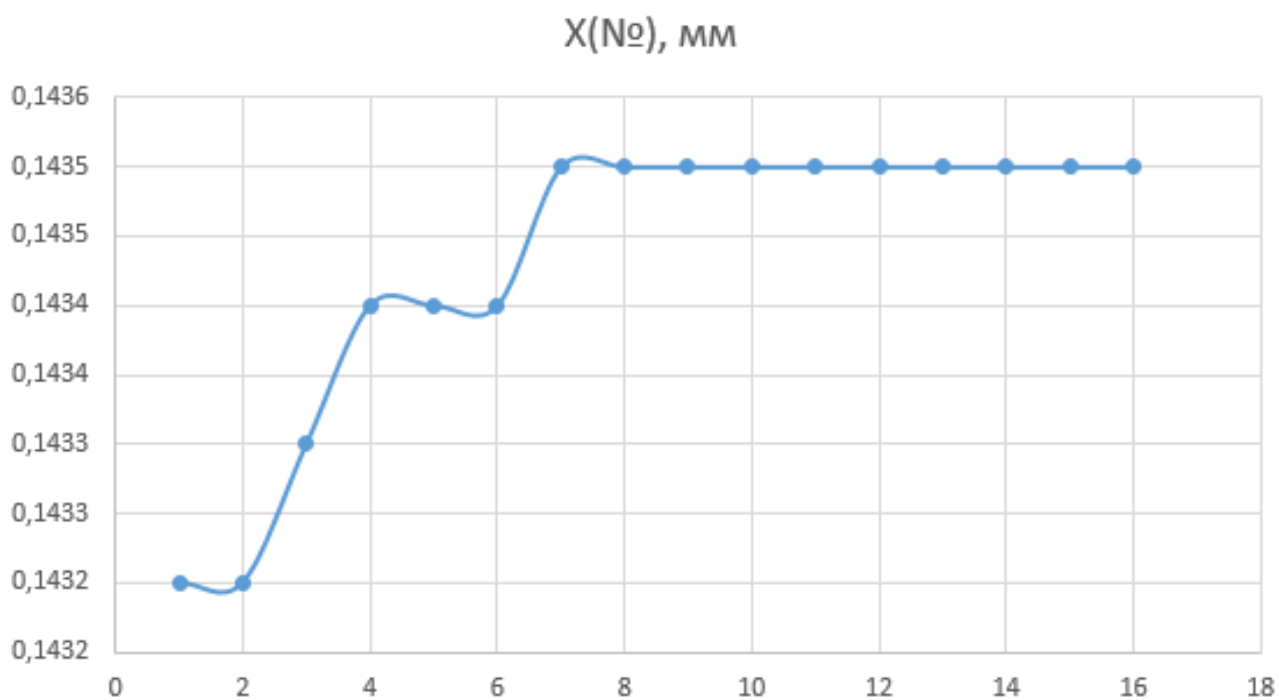


График зависимости максимального перемещения от шага уплотнения сетки

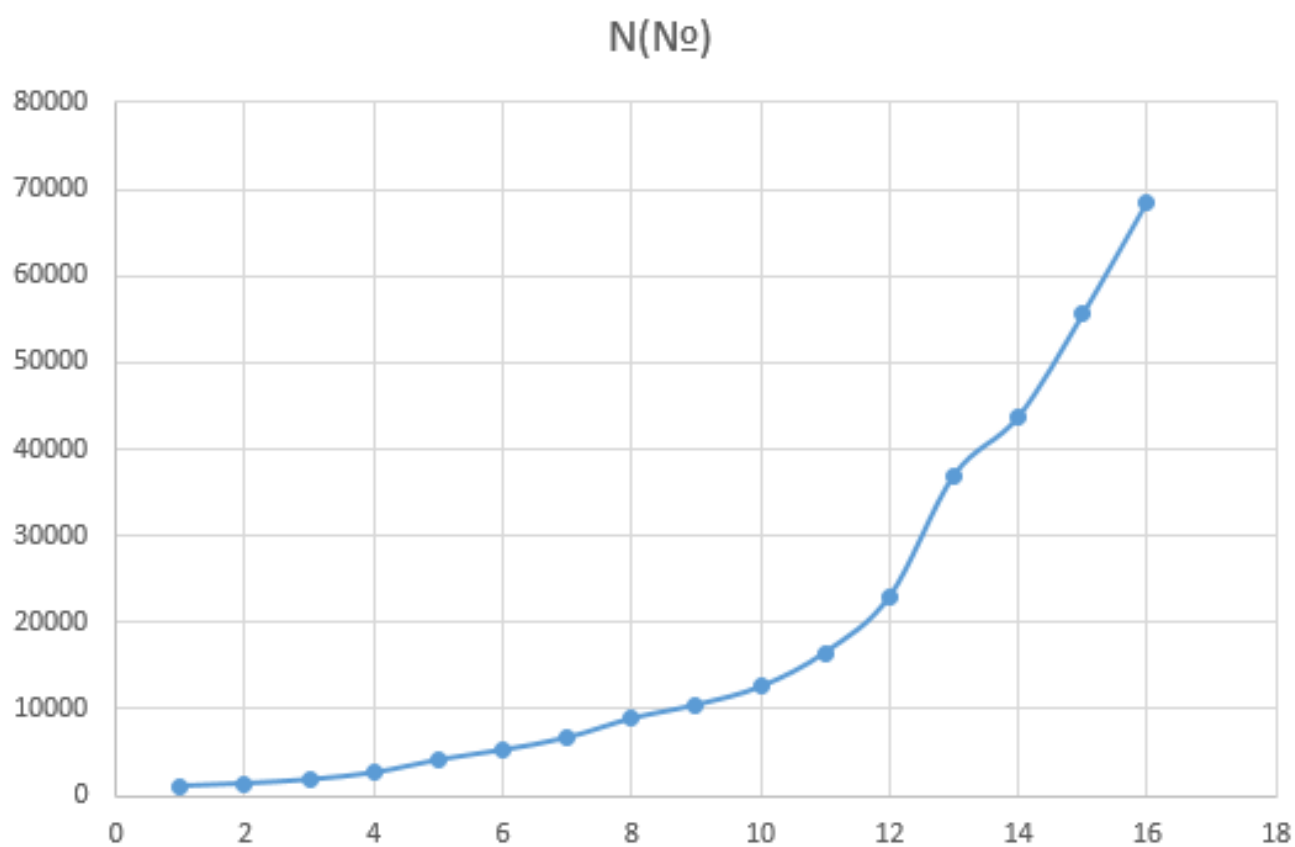
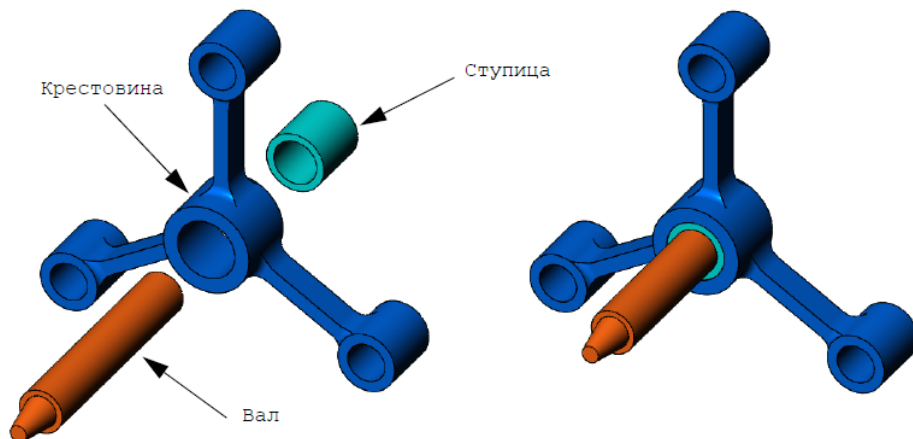


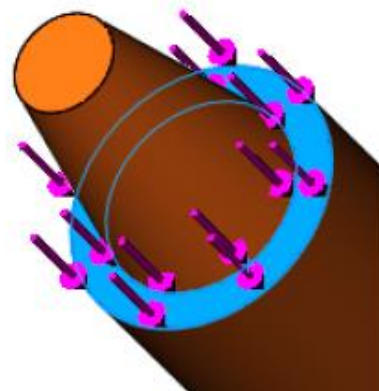
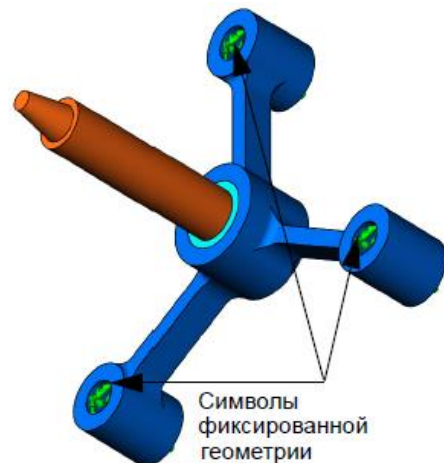
График зависимости количества узлов сетки от шага уплотнения сетки

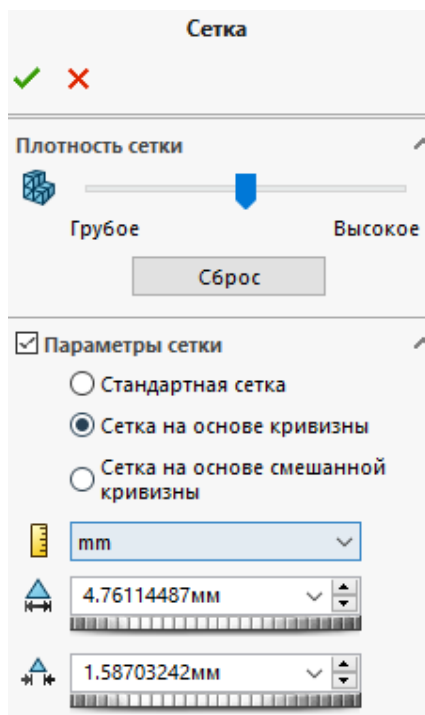
3.5 Исследование запаса прочности

- На основе готовых деталей создать сборку Опора



- Выполним статический анализ
- В Дереве исследования задайте материал Легированная сталь всем деталям.
- Зафиксируйте три отверстия
- Приложите нагрузку в 2250N на указанную грань
- Создайте Сетку на основе кривизны. Плотность оставьте по умолчанию





- Запустите исследование.
- Просмотрите анимацию сборки по эпюре **Напряжения**.
Оценим запас прочности в каждой точке модели.
- В Дереве исследования щёлкните правой клавише по папке **Результаты** и выберите **Определить эпюру проверки запаса прочности**.
- В качестве критерия выберите **Максимальное напряжение по Мизесу**.

Для главных напряжений σ_1 , σ_2 , σ_3 напряжение по Мизесу выражается как:

$$\sigma_{\text{vonMises}} = \{[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2] / 2\}^{1/2}$$

Теория утверждает, что пластичный материал начинает повреждаться в местах, где напряжение по Мизесу становится равным предельному напряжению. В большинстве случаев, предел текучести используется в качестве предельного напряжения.

Строгих методов для выбора допустимых коэффициентов запаса не существует, поскольку коэффициент является мерой незнания всех факторов, влияющих на работу конструкции. Выбор производится на основе опыта эксплуатации аналогичных конструкций. В каждой отрасли промышленности существуют собственные нормативы, определяющие допустимые коэффициенты запаса. Наименьшие коэффициенты используются в аэрокосмической отрасли, в силу жестких требований к весу конструкции. Очень большие запасы (порядка 4...6) используются для грузоподъемного оборудования, в особенности для перевозящего людей (для троса пассажирского лифта коэффициент достигает 10).

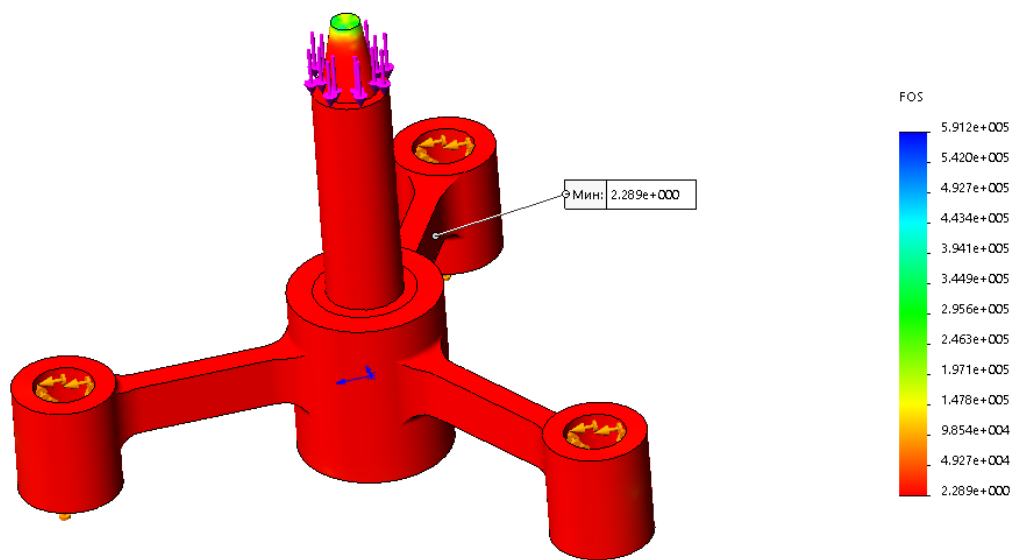
$$\text{Запас прочности (FOS)} = \sigma_{\text{limit}} / \sigma_{\text{vonMises}}$$

- Перейдите во вторую страницу
- В поле Единицы измерения выберите значение Н/мм² (МПа).
- Установите предел напряжений: **Предел текучести**

Предел прочности — механическое напряжение σ , выше которого происходит разрушение материала.

- Перейдите на страницу 3 и выберите **Распределение запаса прочности** и нажмите ОК

Будет создана эпюра, на которой показано распределение запаса прочности. Наименьшее значение запаса прочности приблизительно равно 2,3.



Если бы в какой-либо точке запас прочности равен 1, это означает, что материал в ней начинает переходить в состояние текучести. К примеру, запас прочности 2 означает, что в этой точке конструкция обладает достаточной безопасностью, и материал перейдет в состояние текучести при удвоении нагрузки.

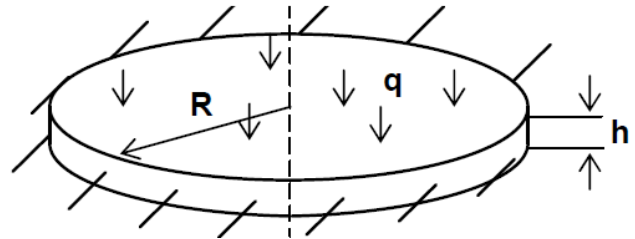
Поскольку на некоторые участки модели подается очень малое напряжение, максимальное значение запаса прочности весьма велико (10^5). Чтобы получить больше информации из эпюры, уменьшим максимальное напряжение на эпюре до 10. Рекомендуется цвет для мест выше максимального значения, сделать нейтральным.

Задание внести изменение в конструкцию деталей опоры, для того чтобы добиться значения КЗП 4, без значительного изменения массы.

4. Самостоятельная работа

Статический расчёт круглой пластины, защемлённой по контуру

Необходимо определить максимальные прогибы круглой пластины радиуса R и толщины h , которая защемлена по контуру и



нагружена равномерным давлением q , распределенным по верхней грани пластины.

Радиус пластины равен $R = 0.2$ м, толщина $h = 0.003$ м, давление $q = 10$ кН/м².

Материал Легированная сталь ($E = 2.1E+011$ Па, $\nu = 0.28$)

Для данной задачи известно аналитическое решение. Прогиб в центре пластины вычисляется по формуле:

$$w = \frac{qR^4}{64D}$$

где $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$ – изгибная жесткость, q – величина давления, R – радиус пластины.

Напряжения на контуре пластины вычисляются по формуле:

$$\sigma = 0.75q\left(\frac{R}{h}\right)^2$$

Сравните полученные результаты.

5. Приложение (справочные материалы)

Характеристики конструкционных материалов

Правильное назначение характеристик материалов, из которых изготавливается конструкция, является важным условием корректности конечно-элементных расчётов. Основные характеристики конструкционных материалов, используемые для прочностных расчётов в SolidWorks Simulation:

5.1 Модуль упругости материала

Модуль упругости материала E , [Н/м²] – коэффициент пропорциональности между напряжениями и относительными деформациями $\sigma = E\varepsilon$, возникающими в испытуемом на растяжение призматическом образце центрально приложенной силой. При этом в средней части образца реализуется однородное напряженное состояние, направленное по продольной оси. Значение модуля упругости E на кривой деформирования $\sigma = f(\varepsilon)$ численно равно тангенсу угла наклона линейного участка: $E = tg\beta$ на диаграмме напряжений при испытаниях образца. Физический смысл коэффициента E определяется как напряжение, необходимое для увеличения длины образца в два раза. Однако величина упругого удлинения у большинства твёрдых тел редко достигает даже 1%.

На диаграмме напряжений испытуемого образца есть несколько характерных точек, соответствующих изменению физических свойств материала и используемые при оценке степени надёжности материалов, находящихся под действием нагрузок.

5.2 Предел текучести

Дальнейшее удлинение образца (например, для малоуглеродистых сталей) происходит практически без увеличения нагрузки. Это явление носит название **текучести**, а горизонтальный участок диаграммы, расположенный непосредственно правее точки сгиба, называется **площадкой текучести**. У многих конструкционных материалов площадка текучести не выражена столь

явно, как у малоуглеродистых сталей. Для таких материалов вводится понятие **условного предела текучести** σ_s ; это напряжение, которому соответствует остаточная (пластическая) деформация, равная s %. Обычно принимается $s = 0,2\%$. Предел текучести для пластичных материалов выбирается в качестве критерия прочности – **максимального допускаемого напряжения** $[\sigma]$. Достижение напряжений, соответствующих пределу текучести, приводит к необратимым пластическим деформациям конструкции, т.е. к нарушению её работоспособности и является, таким образом, недопустимым явлением с точки зрения обеспечения надёжности.

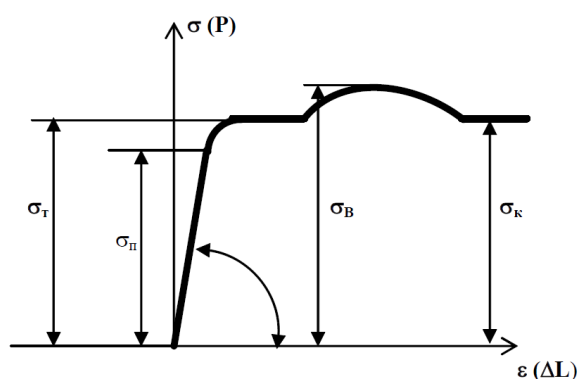


Диаграмма напряжений (растяжения) для пластичных материалов (например, малоуглеродистая сталь)

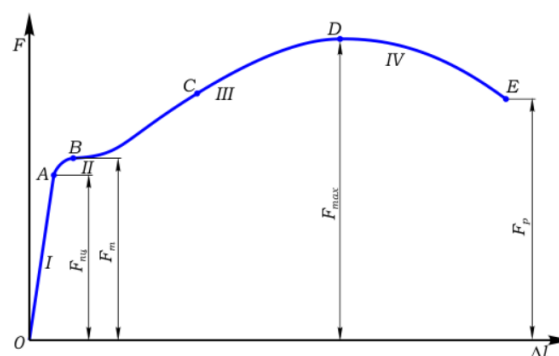


Рис. 1 Диаграмма растяжения стального образца

Как видно из рисунка, диаграмма имеет четыре характерных участка:

- I* - участок пропорциональности;
- II* - участок текучести;
- III* - участок самоупрочнения;
- IV* - участок разрушения.

5.3 Предел прочности

Предел прочности σ_B (временное сопротивление) – напряжение, при превышении которого, происходит разрушение образца. При увеличении нагрузки наступает момент, при котором дальнейшая деформация образца происходит без увеличения или даже с уменьшением нагрузки вплоть до разрушения.