

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Технологии металлов»

КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫХ РАСЧЕТОВ

*Методические рекомендации к лабораторным работам
для студентов специальности 1-40 05 01 «Информационные
системы и технологии (по направлениям)»
дневной и заочной форм обучения*

Часть 2



Могилев 2022

УДК 004:531
ББК 32.973.202:22.21
К63

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Технологии металлов» «08» декабря 2021 г.,
протокол № 5

Составители: канд. техн. наук, доц. В. А. Попковский;
ассистент А. Н. Елисеева

Рецензент Ю. С. Романович

Методические рекомендации составлены в соответствии с рабочей программой дисциплины «Компьютерные системы конечно-элементных расчетов» для студентов специальности 1-40 05 01 «Информационные системы и технологии (по направлениям)» дневной и заочной форм обучения к выполнению лабораторных работ.

Учебно-методическое издание

КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫХ РАСЧЕТОВ

Часть 2

Ответственный за выпуск	Д. И. Якубович
Корректор	А. А. Подошевка
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60 × 84 /16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 36 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.

Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2022

Содержание

1 Проведение полного цикла мероприятий по формированию твердотельной модели, построению на ее базе конечно-элементной модели и осуществлению анализа напряженно-деформированного состояния балки при статическом нагружении на изгиб.....	4
1.1 Пример численного анализа поперечного изгиба балки методом конечных элементов.....	9
2 Проведение сопоставительного анализа балки, выполненного с использованием подходов курса «Сопротивление материалов» и метода конечных элементов.....	22
3 Формирование конечно-элементной модели стойки для анализа на устойчивость.....	23
3.1 Исходные данные к расчетно-проектировочному заданию.....	23
3.2 Расчет стойки методом конечных элементов.....	24
4 Проведение сопоставительного анализа расчетов на устойчивость стойки, используя подходы курса «Сопротивление материалов» и метод конечных элементов.....	27
5 Формирование конечно-элементной модели балки, подверженной удару падающим грузом.....	28
5.1 Исходные данные к проведению расчетов.....	28
5.2 Расчет балки методом конечных элементов.....	30
6 Проведение сопоставительного анализа расчетов балки при нагружении ударом, используя подходы курса «Сопротивление материалов» и метод конечных элементов.....	40
7 Оформление отчета по проведению сопоставительного анализа ступенчатого бруса при центральном растяжении-сжатии.....	43
8 Оформление отчета по проведению сопоставительного анализа балки при статическом нагружении на изгиб.....	44
9 Оформление отчета по проведению сопоставительного анализа стойки на устойчивость.....	45
10 Оформление отчета по проведению сопоставительного анализа балки, подверженной удару падающим грузом.....	46
Список литературы.....	47

1 Проведение полного цикла мероприятий по формированию твердотельной модели, построению на ее базе конечно-элементной модели и осуществлению анализа напряженно-деформированного состояния балки при статическом нагружении на изгиб

По одной из схем нагружения и закрепления балок, приведенных в таблице 1.1, а также учитывая, что поперечное сечение имеет форму поперечного сечения, представленную в таблице 1.2, необходимо:

- 1) построить твердотельную модель данного изделия;
- 2) произвести препроцессорную подготовку конечно-элементной модели объекта анализа;
- 3) осуществить расчет созданной модели. При необходимости провести корректировку модели;
- 4) выполнить постпроцессорное обследование результатов расчета.

Таблица 1.1 – Схемы нагружения и закрепления балок

Номер схемы	Схема нагружения балки	Изгибающий момент	Прогиб в пролете
0		Максимальное значение изгибающего момента M_{\max} определить из эпюры моментов для конкретных значений нагрузки и места ее приложения	–
1		$M_{\max} = \frac{Fab}{l}$ при $z = a$	$w_{\max} = -\frac{Fa^2b^2}{3EJ_x l}$ при $z = a$
2		$M_{\max} = \frac{ql^2}{8}$ при $z = \frac{l}{2}$	$w_{\max} = -\frac{5ql^4}{384EJ_x}$ при $z = \frac{l}{2}$
3		$M_{\max} = \frac{qa^2}{8} \left(2 - \frac{a}{l}\right)^2$ при $z = \frac{a}{2} \left(2 - \frac{a}{l}\right)$	$w_{\max} = -\frac{qa^3 l}{24EJ_x} \times \left(4 - 7\frac{a}{l} + 3\frac{a^2}{l^2}\right)$ при $z = a$

Окончание таблицы 1.1

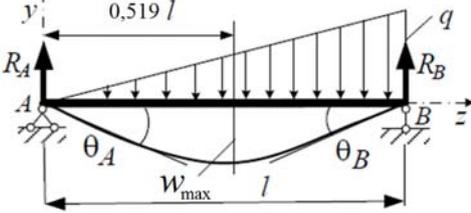
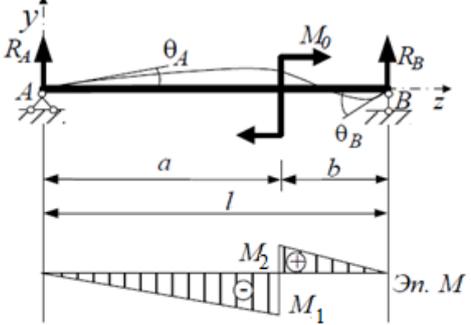
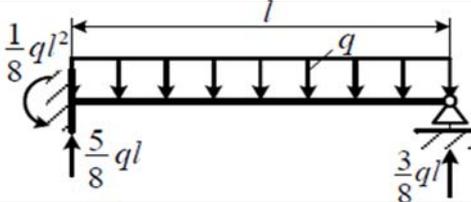
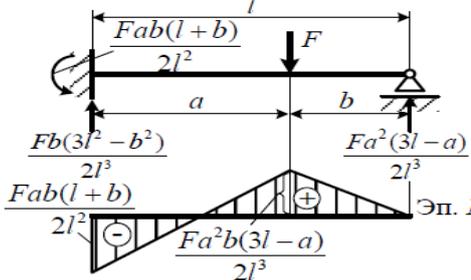
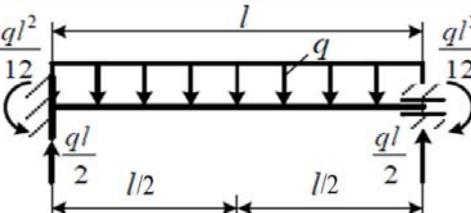
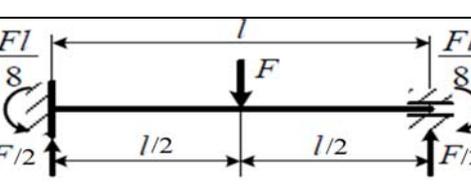
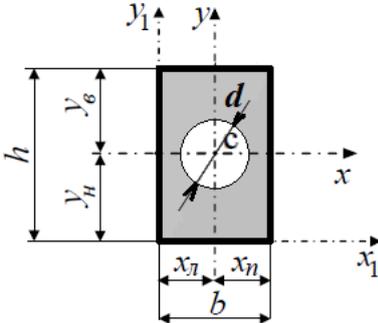
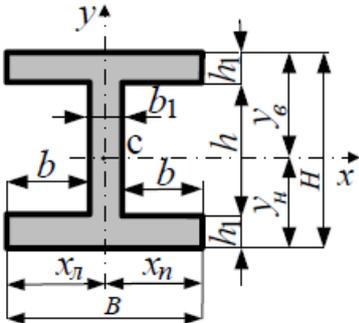
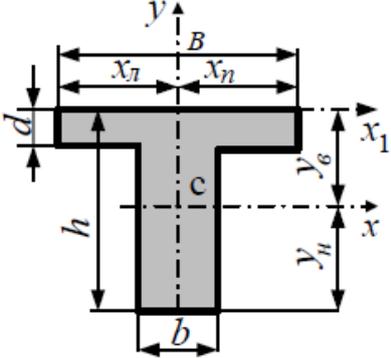
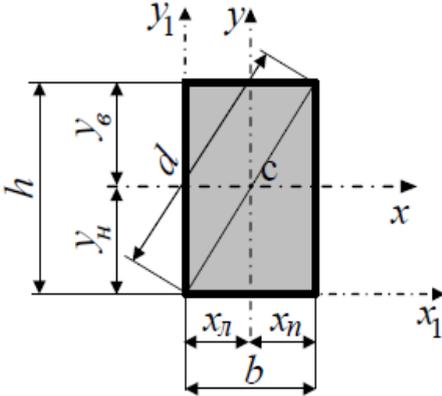
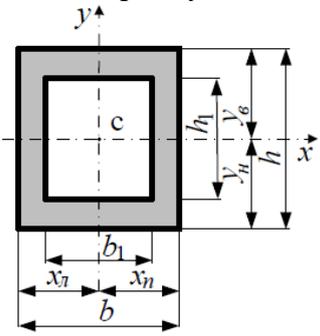
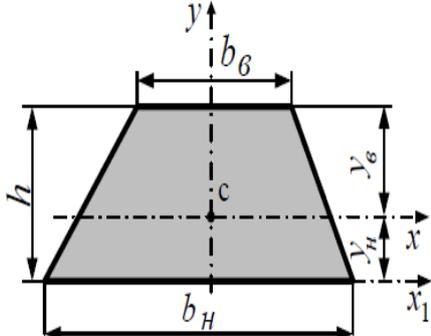
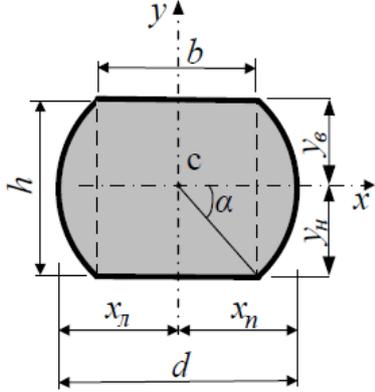
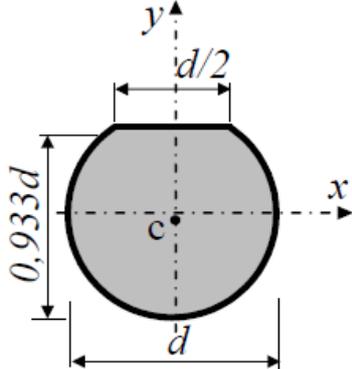
Номер схемы	Схема нагружения балки	Изгибающий момент	Прогиб в пролете
4		$M_{\max} = 0,064ql^2$ <p>при $z = 0,577l$</p>	$w_{\max} = -0,00652 \frac{ql^4}{EJ_x}$ <p>при $z = 0,519l$</p>
5		$M_1 = -\frac{M_0 a}{l};$ $M_2 = \frac{M_0 b}{l}$	$w_{\max} = \frac{M_0 ab}{3EJ_x} \times$ $\times \left(3 \frac{a^2}{l^2} - \frac{a}{l} - 2 \frac{a^3}{l^3} \right)$ <p>при $z = a$</p>
6		$M_{\max} = \frac{9}{128} ql^2$ <p>при $z = l - \frac{3}{8}l$</p>	—
7		Максимальное значение изгибающего момента M_{\max} определить из эпюры моментов для конкретных значений нагрузки и места ее приложения	—
8		$M_{\max} = \frac{ql^2}{12}$ <p>при $z = 0, z = l$</p>	—
9		$M_{\max} = \frac{Fl}{8}$ <p>при $z = 0, z = \frac{l}{2},$ $z = l$</p>	—

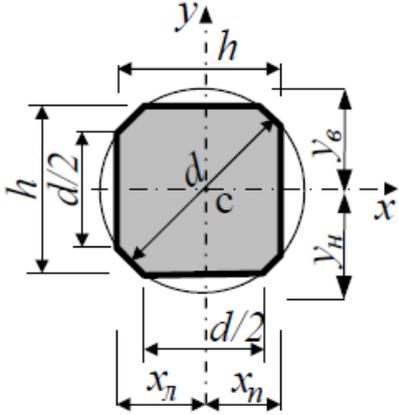
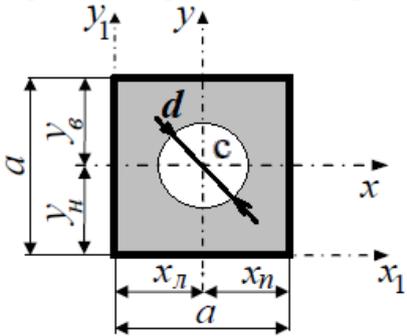
Таблица 1.2 – Формы поперечных сечений и их геометрические характеристики

Номер схемы	Форма поперечного сечения	Геометрические характеристики поперечного сечения
0	Прямоугольник с центральным отверстием 	Моменты сопротивления W_x и W_y $J_x = \frac{bh^3}{12} - \frac{\pi d^4}{64};$ $W_x = \left(\frac{bh^3}{12} - \frac{\pi d^4}{64} \right) \frac{2}{h};$ $W_y = \left(\frac{hb^3}{12} - \frac{\pi d^4}{64} \right) \frac{2}{b}$
1	Симметричный двутавр, составленный из прямоугольников 	Моменты сопротивления W_x и W_y $J_x = \frac{BH^3 - 2bh^3}{12}; \quad J_y = \frac{hb_1^3 + 2h_1B^3}{12};$ $W_x = \frac{BH^3 - 2bh^3}{6H}; \quad W_y = \frac{hb_1^3 + 2h_1B^3}{6B}$
2	Симметричный тавр, составленный из прямоугольников 	Моменты сопротивления W_x и W_y $A = (B - b) \cdot d + b \cdot h;$ $y_6 = \frac{(B - b) \frac{d^2}{2} + b \frac{h^2}{2}}{(B - b)d + bh};$ $J_x = (B - b) \frac{d^3}{3} + \frac{bh^3}{3} - Ay_6^2;$ $W_{x,H} = \frac{J_x}{h - y_6}; \quad W_{x,\epsilon} = \frac{J_x}{y_6}$
3	Прямоугольник 	Моменты сопротивления W_x и W_y $J_x = \frac{bh^3}{12}; \quad J_y = \frac{hb^3}{12};$ $W_x = \frac{bh^2}{6}; \quad W_y = \frac{hb^2}{6}$

Продолжение таблицы 1.2

Номер схемы	Форма поперечного сечения	Геометрические характеристики поперечного сечения
4	<p>Полый прямоугольник</p> 	<p>Моменты сопротивления W_x и W_y</p> $J_x = \frac{bh^3}{12} - \frac{b_1h_1^3}{12}; \quad J_y = \frac{hb^3}{12} - \frac{h_1b_1^3}{12};$ $W_x = \frac{bh^2}{6} - \frac{b_1h_1^2}{6}; \quad W_y = \frac{hb^2}{6} - \frac{h_1b_1^2}{6}$
5	<p>Равнобедренная трапеция</p> 	<p>Момент сопротивления $W_{x,H}$ и $W_{y,\epsilon}$</p> $J_x = \frac{h^3 (b_H^2 + 4b_H b_\epsilon + b_\epsilon^2)}{36(b_\epsilon + b_H)};$ $W_{x,H} = \frac{J_x}{y_H}; \quad W_{x,\epsilon} = \frac{J_x}{y_\epsilon};$ $y_\epsilon = \frac{2b_H + b_\epsilon}{3(b_H + b_\epsilon)} h$
6	<p>Круг со срезанными сегментами сверху и снизу</p> 	<p>Моменты сопротивления W_x и W_y</p> $J_x = 0,0395d^4; \quad J_y = 0,0485d^4;$ $W_x = 0,088d^3; \quad W_y = 0,097d^3$
7	<p>Круг со срезанным сегментом сверху</p> 	<p>Момент сопротивления W_x</p> $J_x \approx 0,044d^4;$ $W_x \approx 0,092d^3$

Окончание таблицы 1.2

Номер схемы	Форма поперечного сечения	Геометрические характеристики поперечного сечения
8	Круг со срезанными сегментами с четырех сторон 	Моменты сопротивления W_x и W_y $J_x = J_y = 0,038d^4$; $W_x = W_y = 0,087d^3$
9	Квадрат с центральным отверстием 	Моменты сопротивления W_x и W_y $J_x = J_y = \frac{a^4}{12} - \frac{\pi d^4}{64}$; $W_x = W_y = \left(\frac{a^4}{12} - \frac{\pi d^4}{64} \right) \frac{2}{a}$

Исходные данные к проведению численного анализа взять из таблиц 1.1–1.3 (по трем последним цифрам номера зачетной книжки).

Процесс конечно-элементного анализа балки, подверженной поперечному изгибу, полностью аналогичен тому, который был рассмотрен в случае расчета ступенчатого бруса.

Следует отметить, что приведенные в таблице 1.1 сведения о распределении эпюр изгибающих моментов и формулы для определения максимальных изгибающих моментов M_{\max} , а также значений максимальных прогибов w_{\max} приведены для проведения последующего сопоставительного анализа.

В таблице 1.2 приведены формулы для определения моментов сопротивления W_x и осевых моментов J_x , необходимых в последующем для проведения сопоставительного анализа при определении максимальных нормальных напряжений и максимальных прогибов балки (если эти сведения приведены в таблице для данного поперечного сечения). Во всех вариантах анализа предполагается, что для материала балки модуль упругости $E = 2 \cdot 10^5$ МПа.

Исходные данные к конечно-элементному анализу балки приведены в таблице 1.3 аналогично тому, как это делалось в [8, таблица 4.1].

Таблица 1.3 – Исходные данные для анализа поперечного изгиба балки

Номер строки	Расчетная схема балки (см. таблицу 1.1)	l , м	a , м	b , м	F , кН	M , кН·м	q , кН/м	Номер схемы поперечного сечения по таблице 1.2 и его размеры
0	0	3,0	2,0	1	3,9	5,9	1,1	№ 0 ($h = 0,13$ м; $b = 0,08$ м; $d = 0,06$ м)
1	1	2,1	1,1	1	3	5,0	2	№ 1 ($H = 0,1$ м; $B = 0,05$ м; $h = 0,09$ м; $b = 0,02$ м)
2	2	2,2	1,2	1	3,1	5,1	1,9	№ 2 ($h = 0,12$ м; $B = 0,06$ м; $d = 0,006$ м; $b = 0,01$ м)
3	3	2,3	1,3	1	3,2	5,2	1,8	№ 3 ($h = 0,11$ м; $b = 0,055$ м)
4	4	2,4	1,4	1	3,3	5,3	1,7	№ 4 ($h = 0,12$ м; $b = 0,06$ м; $h_1 = 0,11$ м; $b_1 = 0,05$ м)
5	5	2,5	1,5	1	3,4	5,4	1,6	№ 5 ($h = 0,13$ м; $b_n = 0,2$ м; $b_e = 0,1$ м)
6	6	2,6	1,6	1	3,5	5,5	1,5	№ 6 ($h = 0,12$ м; $d = 0,15$ м; $b = d/2$)
7	7	2,7	1,7	1	3,6	5,6	1,4	№ 7 ($d = 0,12$ м)
8	8	2,8	1,8	1	3,7	5,7	1,3	№ 8 ($d = 0,12$ м; $h = 0,1$ м)
9	9	2,9	1,9	1	3,8	5,8	1,2	№ 9 ($a = 0,11$ м; $d = 0,08$ м)
	a	a	a	a	в	в	в	б

1.1 Пример численного анализа поперечного изгиба балки методом конечных элементов

На первом этапе в оболочке SolidWorks создается твердотельная модель исследуемого объекта. При этом, как правило, выполняются операции создания эскиза (например, прямоугольного поперечного сечения рассматриваемого стержня) (рисунок 1.1), а затем создается непосредственно твердотельная модель изделия (в данном случае посредством операции «вытянутая бобышка / основание») (рисунок 1.2). На основании использования средств SolidWorks могут быть также заданы механические свойства материала, из которого изготовлен исследуемый объект. В базе данных этого программного продукта имеется обширная библиотека механических свойств различных материалов. В рассматриваемом примере в качестве материала детали выбрана «простая углеродистая сталь» (см. рисунок 1.2).

Следует иметь в виду, что в оболочке COSMOSWorks (Simulation) также присутствует возможность задания механических свойств материала, в том числе и уникальных, зависящих от различных параметров, например, температуры.

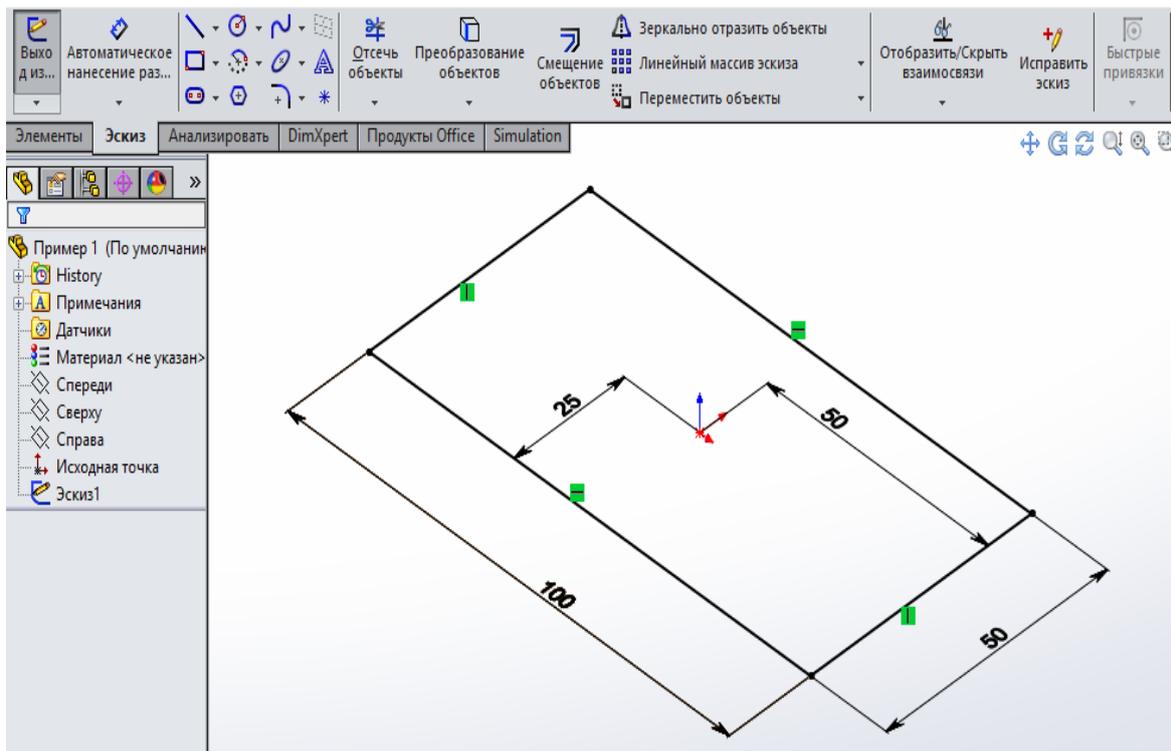


Рисунок 1.1 – Эскиз прямоугольного поперечного сечения стержня размером 100 × 50 мм

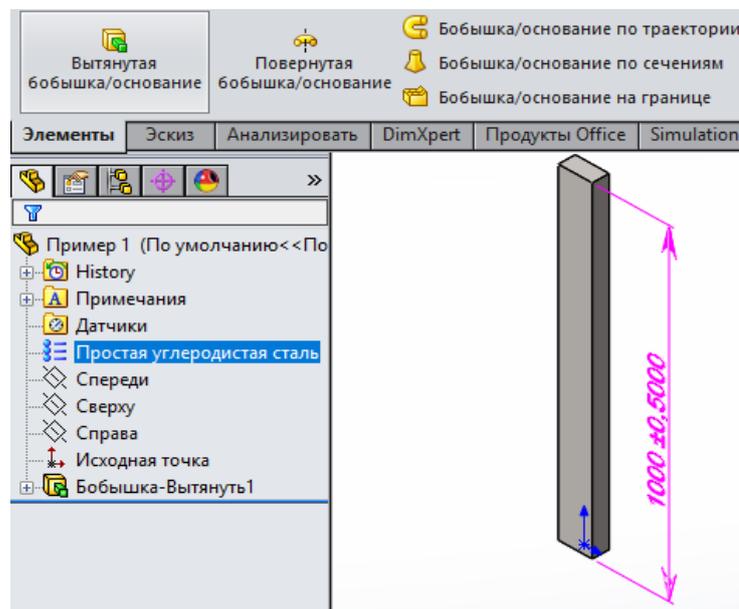


Рисунок 1.2 – Твердотельная модель стержня, длина которого составляет 1000 мм, состоящего из материала «простая углеродистая сталь»

После создания твердотельной модели объекта активизируется оболочка Simulation, при этом в контекстном меню предлагается выбрать тип проводимого исследования (в приведенном примере (рисунок 1.3) выбран «статический анализ»).

Вслед за выполнением этой операции слева на экране под менеджером оболочки SolidWorks появляется менеджер проекта Simulation (рисунок 1.4).

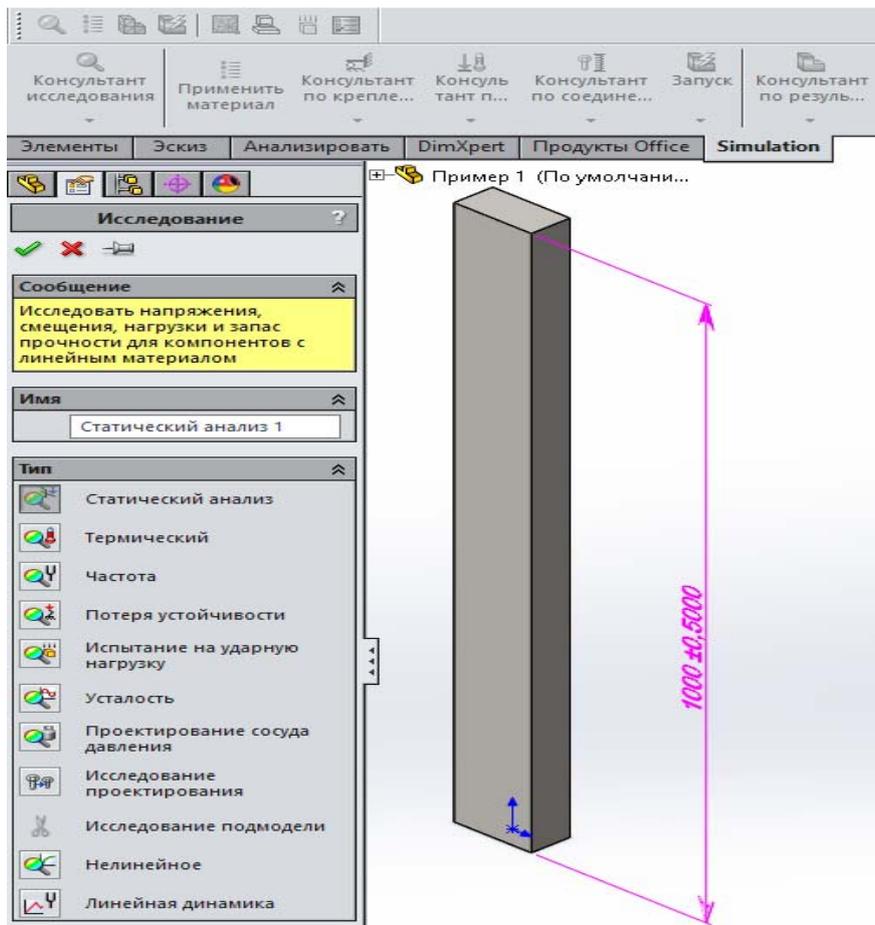


Рисунок 1.3 – Выбор типа анализа для проведения исследования изделия

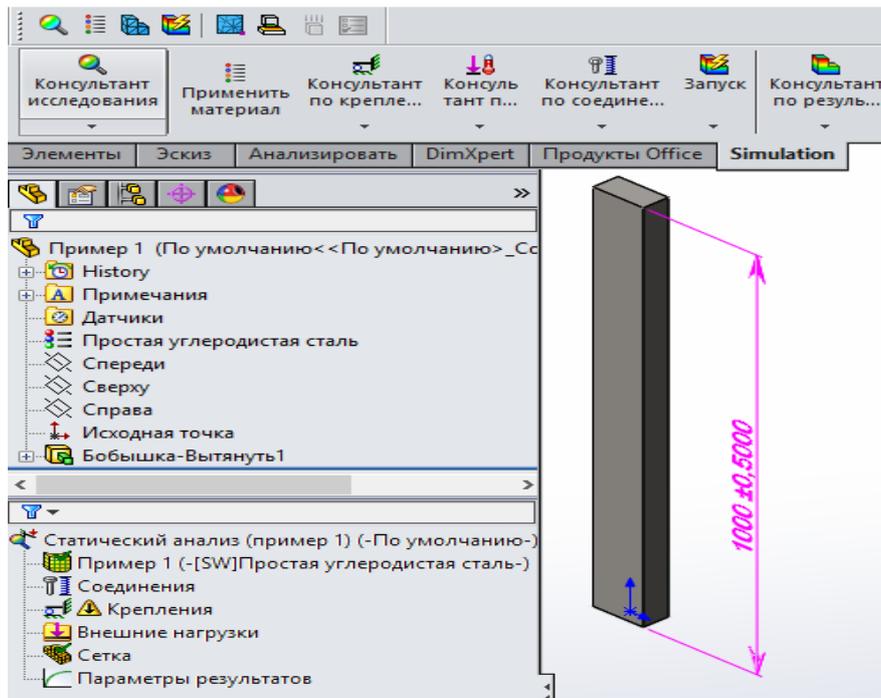


Рисунок 1.4 – Расположение менеджеров оболочки SolidWorks и Simulation

Менеджер Simulation представляет собой типичное для современных программных продуктов дерево, корень которого – это тип проводимого анализа, а ветви первого уровня – это блоки, обеспечивающие выполнение определенного типа действий (рисунок 1.5). При щелчке правой кнопкой мыши по какому-либо элементу появляется контекстное меню, содержащее функции, доступные для работы с данным объектом.

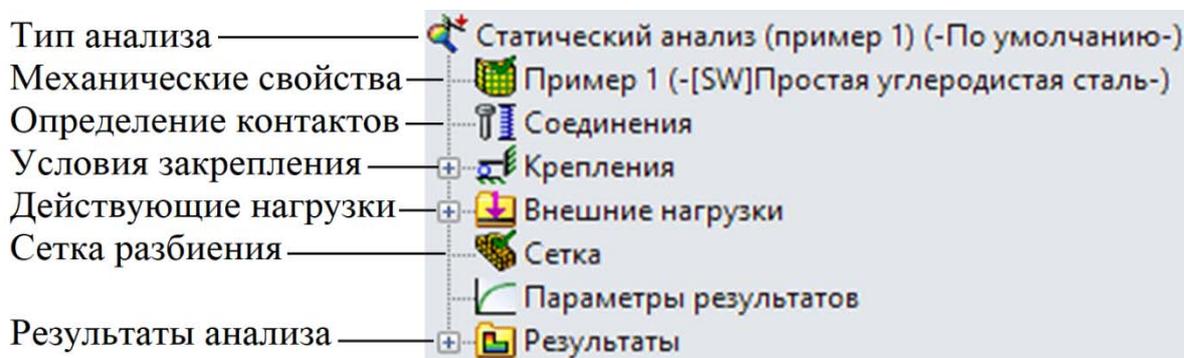


Рисунок 1.5 – Внешний вид менеджера Simulation для статического анализа

Ветви второго уровня растут, соответственно, из «корней» ветвей первого уровня (рисунок 1.6).

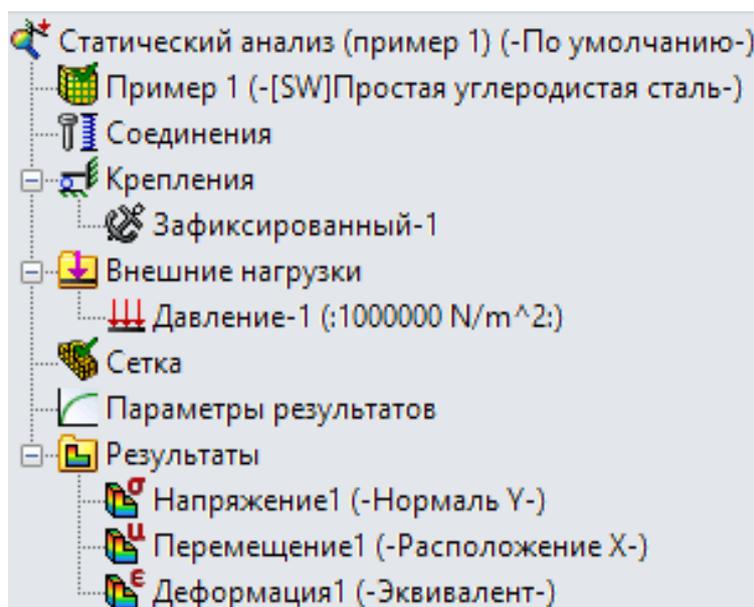


Рисунок 1.6 – Информация, содержащаяся в ветвях второго уровня

Как видно из рисунка 1.6, на ветвях второго уровня представлены сведения о характере закрепления обследуемого изделия, приложенной к нему нагрузке, результатах проводимых исследований (напряжения, перемещения, деформации). Посредством щелчка правой кнопкой мыши по какому-либо элементу появляется контекстное меню, содержащее, например, функции, представленные на рисунке 1.7, позволяющие выполнять определенные операции над объектом коррекции.

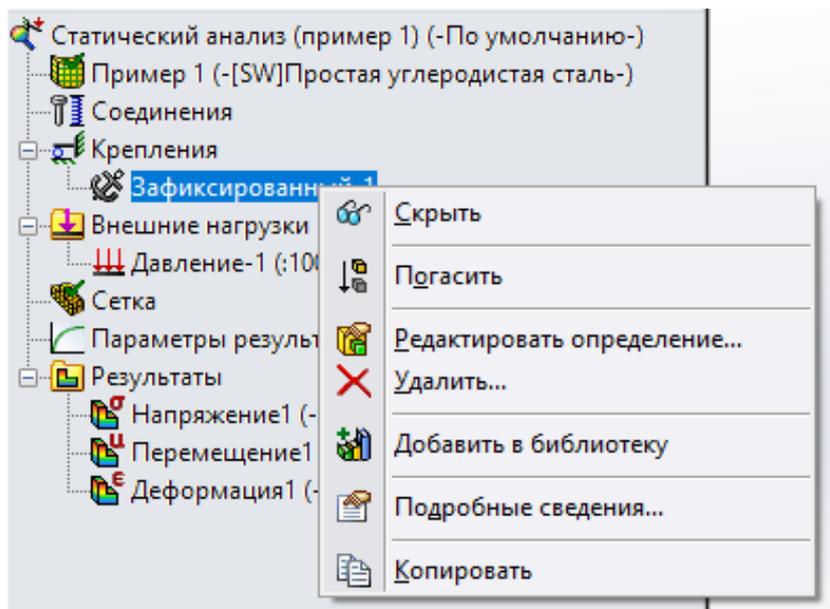


Рисунок 1.7 – Контекстное меню по корректировке введенных ранее исходных данных

Приведенные в контекстном меню термины (см. рисунок 1.7) означают следующие действия:

- «Скрыть» – не отображать данную информацию на графическом представлении модели (в данном примере это место и характер закрепления);
- «Погасить» – не использовать эту информацию при расчете, но в памяти она сохраняется;
- «Редактировать определение» – осуществлять корректировку введенной ранее информации;
- «Удалить» – стереть представленную ранее информацию;
- «Добавить в библиотеку» – сохранить эту информацию в библиотеке примера;
- «Подробные сведения» – приводится подробная информация об используемых в примере условиях;
- «Копировать» – осуществляется копирование данной информации в буферную память с целью последующего использования в другом исследовании данного объекта.

Функция «Редактировать определение» позволяет произвести корректировку вводимой ранее информации об объекте исследования, щелкнув на этом элементе левой кнопкой мыши. В результате предоставляется возможность увидеть существующую информацию и возможные варианты изменений (рисунок 1.8).

После введения всей необходимой информации о предлагаемой модели исследования на графической части экрана высвечивается модель исследуемого объекта с изображением действующей нагрузки и условиями закрепления (рисунок 1.9).

Важным этапом решения задачи механики твердого деформируемого тела методом конечных элементов является «сетка» разбиения изделия на конечные

элементы. Пример контекстного меню по созданию сетки разбиения модели на конечные элементы и сопутствующие операции представлен на рисунке 1.10.

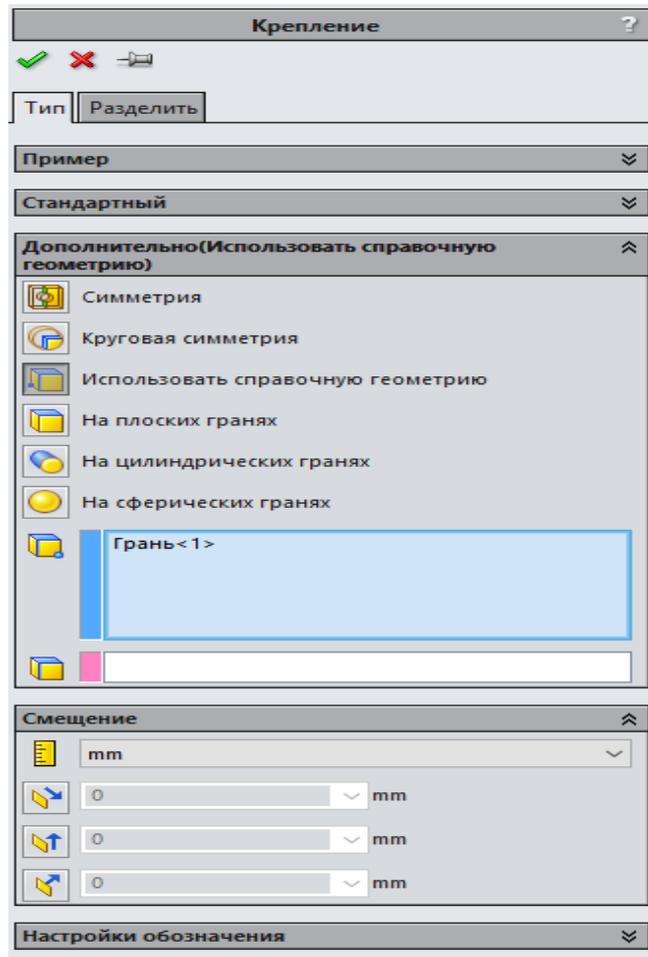


Рисунок 1.8 – «Редактирование определения» (условий закрепления) в рассматриваемом примере исследований

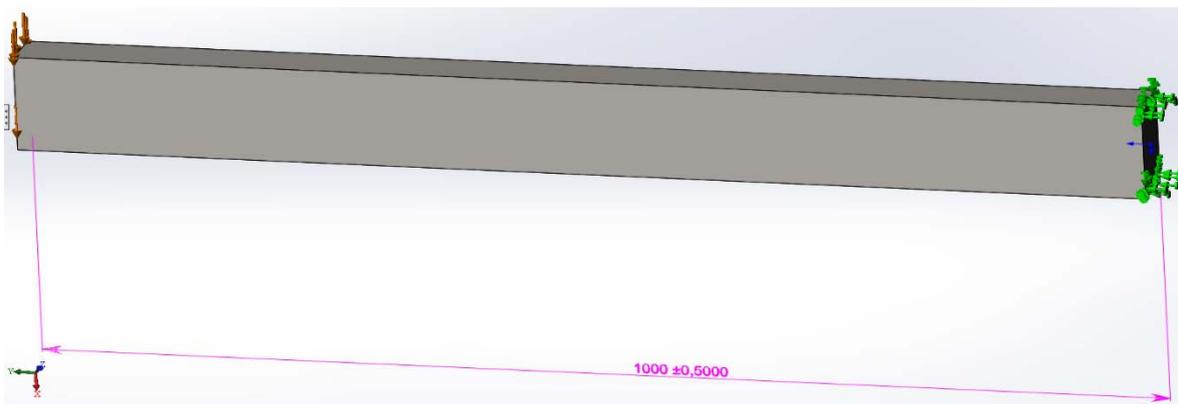


Рисунок 1.9 – Модель исследуемого объекта с изображением действующей нагрузки и условиями закрепления

Воспользоваться разбиением на элементы по умолчанию, которое предлагает программа при нажатии левой клавишей мыши на элементе «Создать сетку» (рисунок 1.11).

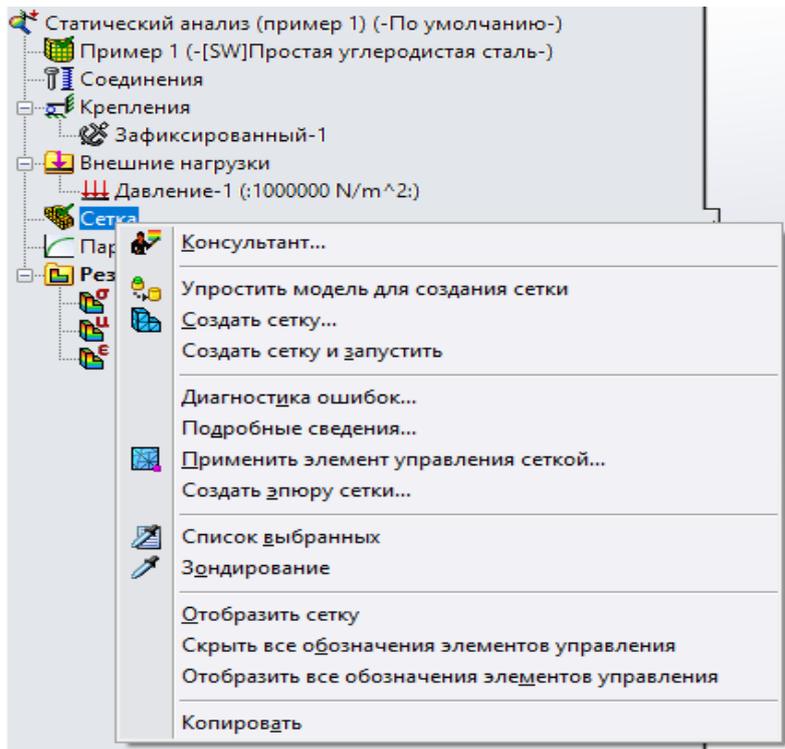


Рисунок 1.10 – Контекстное меню по созданию сетки разбиения модели на конечные элементы и сопутствующие операции

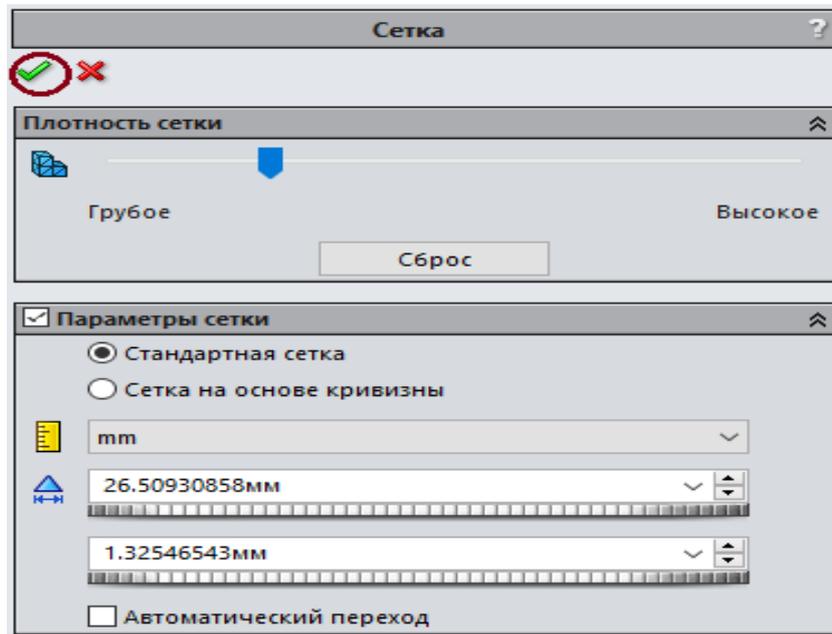


Рисунок 1.11 – Меню по определению параметров сетки разбиения модели на конечные элементы

В результате выполнения этой операции будет показано меню с предложением плотности сетки разбиения, полученной автоматически (см. рисунок 1.11).

При согласии с этим предложением посредством нажатия «зеленой галочки», выделенной на рисунке 1.11 коричневым кружком, произойдет разбиение модели на элементы. Затем, после нажатия клавиши «Отобразить сетку»

(см. рисунок 1.10), в графической части экрана высветится, конечно-элементная модель исследуемого объекта (рисунок 1.12).

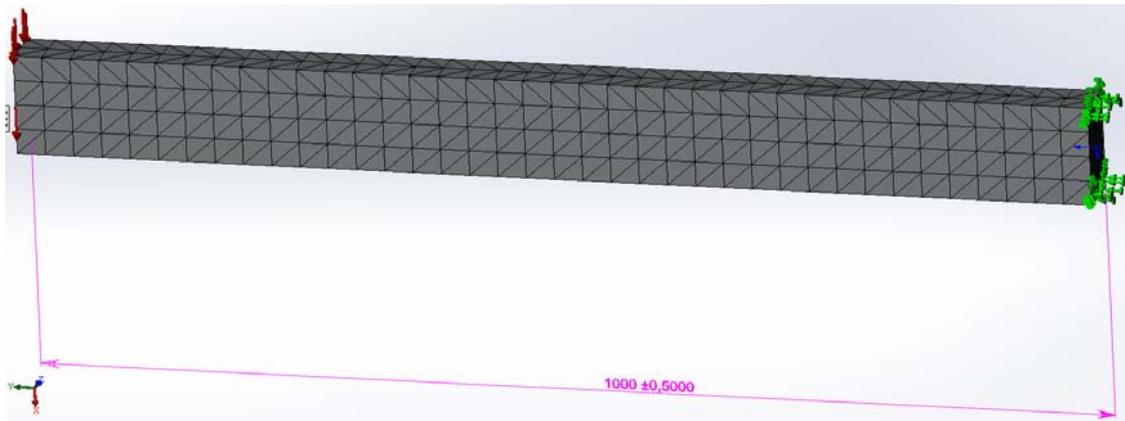


Рисунок 1.12 – Конечно-элементная модель консольно-закрепленной балки, нагруженной на свободном конце поперечной нагрузкой, равномерно распределенной по плоскости торца

После введения всей информации о конечно-элементной модели исследуемого объекта можно перейти непосредственно к расчетной части анализа, когда формируются матрицы жесткости всех конечных элементов, входящих в модель, объединенная матрица жесткости всей системы в целом и производится решение системы линейных алгебраических уравнений с определением вектор-столбца перемещений всех узловых точек модели.

Настройка параметров расчетной части исследования осуществляется посредством щелчка правой клавиши мыши по корню дерева менеджера Simulation в том месте, где обозначается тип анализа. В результате высвечивается контекстное меню, представленное на рисунке 1.13.

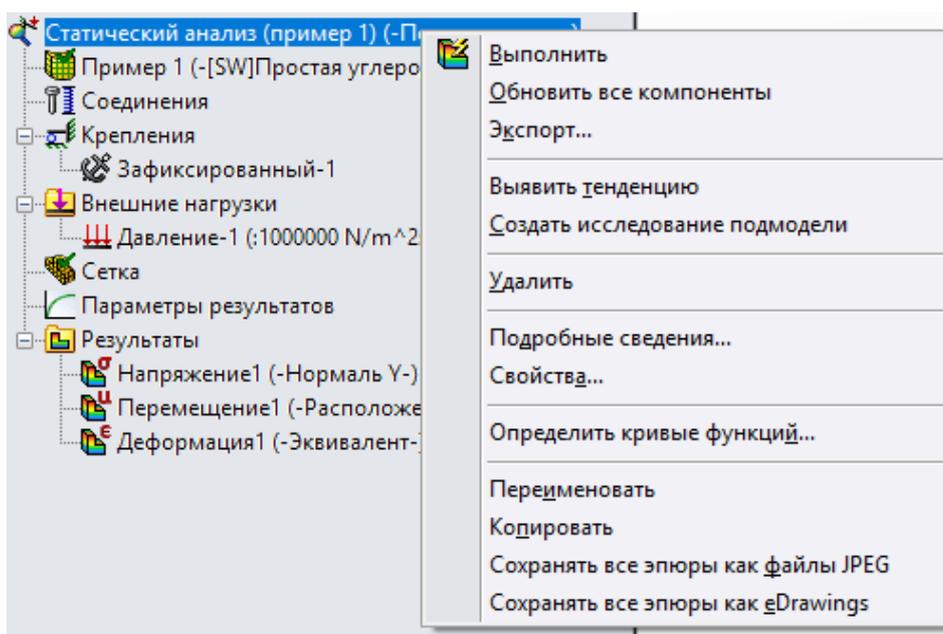


Рисунок 1.13 – Контекстное меню проводимого анализа

Посредством щелчка левой клавишей мыши по пункту контекстного меню «Выполнить» (см. рисунок 1.13) происходит запуск программы расчета задачи с параметрами «по умолчанию». Если есть необходимость произвести коррекцию параметров расчета, то в этом случае нажатие левой клавиши на разделе «Свойства» приведет к появлению нового меню, отображенного на рисунке 1.14.

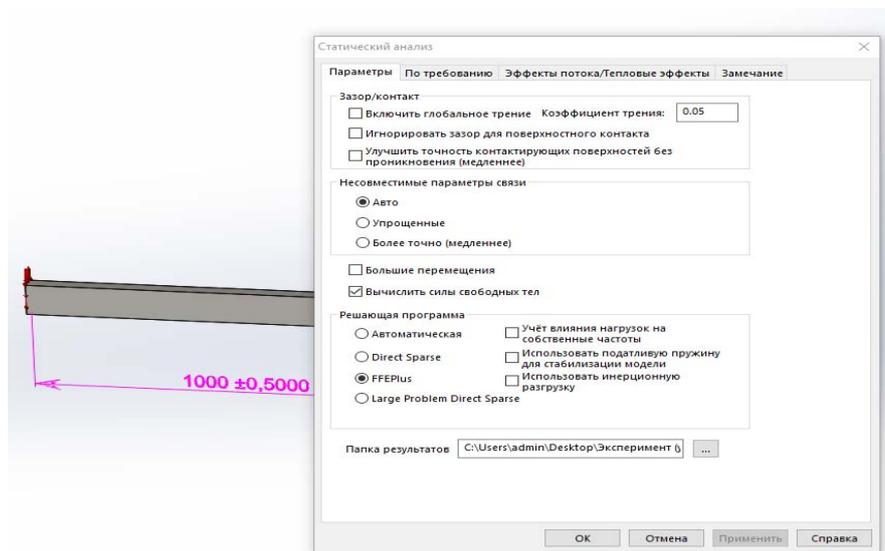


Рисунок 1.14 – Меню параметров статического анализа

В таблице 1.4 приведена справка по диалоговому окну «Статический анализ».

Таблица 1.4 – Диалоговое окно «Статический анализ»

Действие	Назначение
Зазор/контакт	
Включить глобальное трение	Позволяет включить или пренебречь влиянием трения условий глобального контакта. Настоящий флажок не управляет условиями локального контакта. Программное обеспечение рассчитывает силы статического трения путем умножения сил по нормали, образующихся на контактирующих площадях, на заданный коэффициент трения. Направление силы трения в местоположении противоположно направлению движения в этом местоположении
Кoefficient трения	Устанавливается коэффициент статического трения для условий глобального контакта. Для условий локального контакта коэффициент трения задан в PropertyManager «Набор контактов» для каждого условия. Коэффициент трения должен быть между 0 и 1,0
Игнорировать зазор для поверхностного контакта	Когда у настоящего параметра установлен флажок, программа учитывает по умолчанию условия контакта вне зависимости от начального расстояния между определенной пользователем пары поверхностей

Продолжение таблицы 1.4

Действие	Назначение
Улучшить точность контактирующих поверхностей без проникновения (медленнее)	Настоящий метод дает непрерывные и более точные напряжения в областях контактов без проникновения. Этот метод используется при определении контактов между гранями и гранями или гранями и кромками. Он также гарантирует сходимость при использовании h -адаптивного метода. Когда выбран настоящий параметр, программному обеспечению может потребоваться больше времени для решения задачи. Настоящий метод в литературе называется «строительный контакт»
Несовместимые параметры связи	
Авто	Если связанный контакт поверхности к поверхности по умолчанию значительно снижает производительность решения, решающая программа переключается на связанный контакт узла к поверхности автоматически. Автоматическое переключение доступно для статических, частотных, линейных динамических исследований и исследований потери устойчивости
Упрощенные	Программа корректирует контакт связи поверхностей по умолчанию и переходит к контакту связи узлов. Выберите этот параметр только в случаях возникновения проблем с быстродействием при решении моделей с большим количеством контактирующих поверхностей. Если для анализа 2D-упрощения выбран этот параметр, программа применяет контакт связи узлов к кромке
Более точно (медленнее)	Постановка задачи для поверхностного контакта по умолчанию занимает намного больше времени, чем постановка задачи для контакта узлов. Для анализа 2D-упрощения решающая программа применяет контакт связи кромок
Дополнительные параметры	
Большие перемещения	Когда у настоящего параметра установлен флажок, программа прикладывает нагрузки постепенно, равномерно и ступенчато до их полных значений, выполняя итерации контакта на каждом шаге. Количество шагов определяется программой внутренне. Этот параметр не доступен для исследований 2D-упрощения
Вычислить силы свободных тел	Выберите этот флажок, чтобы инструктировать прикладную программу о подготовке масштабной сетки равновесия сил в каждом узле. После запуска исследования с этим установленным флажком нажмите правой кнопкой мыши папку «Результаты» и выберите «Вывести силы реакции», чтобы вывести список сил, которые действуют на грани, кромке и вершине. Силы могут исходить от контакта, внешних нагрузок, ограничений или соединителей. Этот параметр не доступен для исследований 2D-упрощения
Решающая программа Позволяет задать решающую программу для использования при выполнении статического анализа	
Автоматический	Программное обеспечение выбирает решающую программу на основе типа исследования, параметров анализа, условий контакта и т. п. Некоторые параметры и условия применимы только либо для Direct Sparse, либо для FFEPlus
Direct Sparse	Установите флажок этого параметра для использования решающей программы Direct Sparse

Окончание таблицы 1.4

Действие	Назначение
FFEPlus	Используйте решающую программу FFEPlus, чтобы запустить исследование. Настоящая решающая программа использует усовершенствованное переупорядочение матрицы, что делает ее более эффективной для больших задач
Large Problem Direct Sparse	Использование улучшенных алгоритмов распределения памяти помогает решающей программе Large Problem Direct Sparse в обработке проблем моделирования, сложность которых превышает возможности физической памяти вашего компьютера. При первоначальном выборе решающей программы Direct Sparse и в связи с ограниченными ресурсами памяти при отыскании решения, отличного от базового, отображается предупреждение о необходимости переключения на Large Problem Direct Sparse
Учёт влияния нагрузок на собственные частоты	Включите этот параметр, чтобы учитывать влияние нагрузки в своей плоскости при расчете жесткости
Использовать незакаленную пружину для стабилизации модели	Установите флажок у этого параметра, чтобы инструктировать программу необходимо добавить мягкие пружины, прикрепленные к основанию для предотвращения неустойчивости. Если приложить нагрузки к неустойчивой конструкции, она будет перемещаться и/или вращаться как твердое тело. Вы должны применить соответствующие ограничения, чтобы предотвратить движение твердого тела
Использовать инерционную разгрузку	Когда у настоящего параметра установлен флажок, программа автоматически прикладывает инерционные силы, чтобы уравновесить несбалансированную внешнюю нагрузку. Настоящий параметр является в особенности полезным, когда вы импортируете нагрузки из пакета движения (SolidWorks Motion), где внешние нагрузки могут быть немного несбалансированы. Когда у настоящего параметра установлен флажок, можно решать структурные задачи без необходимости применять ограничения или активизировать параметр «мягкая пружина», чтобы стабилизировать модель от перемещений твердого тела

После проведения расчета, посредством щелчка левой клавишей мыши по дереву менеджера Simulation в том месте, где высвечивается пункт «Результаты» (рисунок 1.15), будет раскрыто меню, использование которого позволит просмотреть итоги численного анализа.

Для проведенного анализа программа исследования представила три типа результирующих параметров – напряжения, перемещения и деформации. Дважды щелкнув левой клавишей мыши по соответствующему параметру, представленному в данном меню, можно получить картину распределения данной физической величины по поверхности расчетной модели. При этом распределение параметра изображается в цвете с одновременным представлением шкалы значений. На рисунках 1.16–1.18 приведено распределение нормальных напряжений в направлении, перпендикулярном поперечному сечению балки σ_y , перемещений балки в вертикальном направлении UX

и относительных линейных деформаций ϵ_y в направлении, перпендикулярном поперечному сечению.

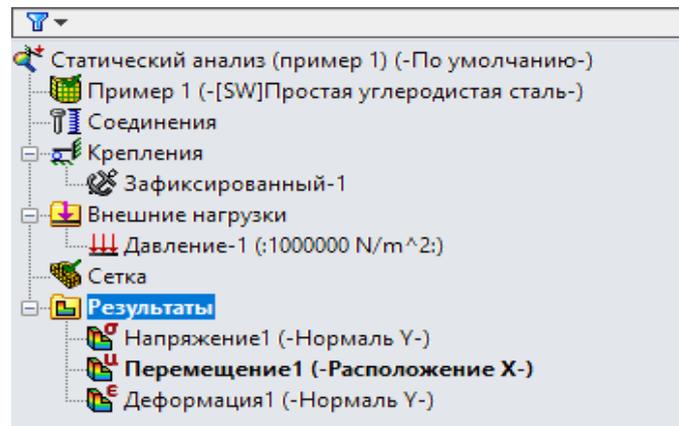


Рисунок 1.15 – Меню пункта «Результаты» после проведения расчета

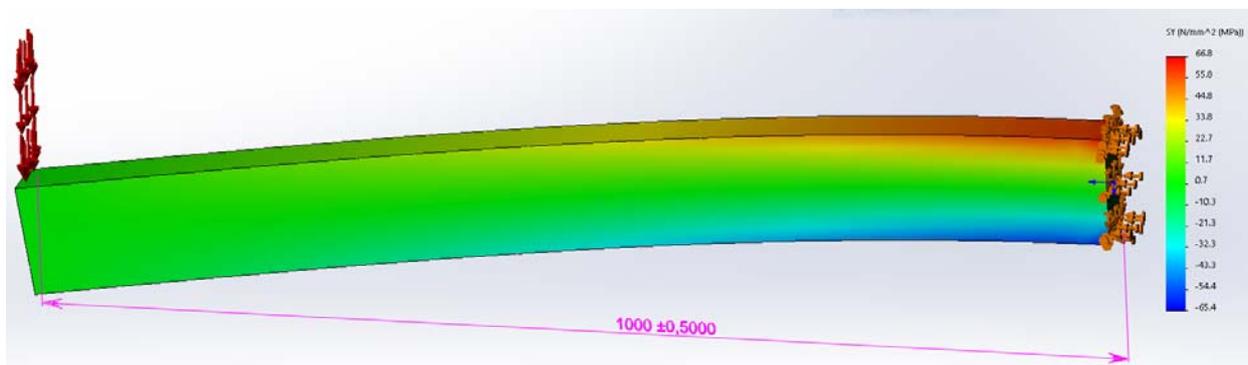


Рисунок 1.16 – Распределение нормальных напряжений в направлении, перпендикулярном поперечному сечению балки

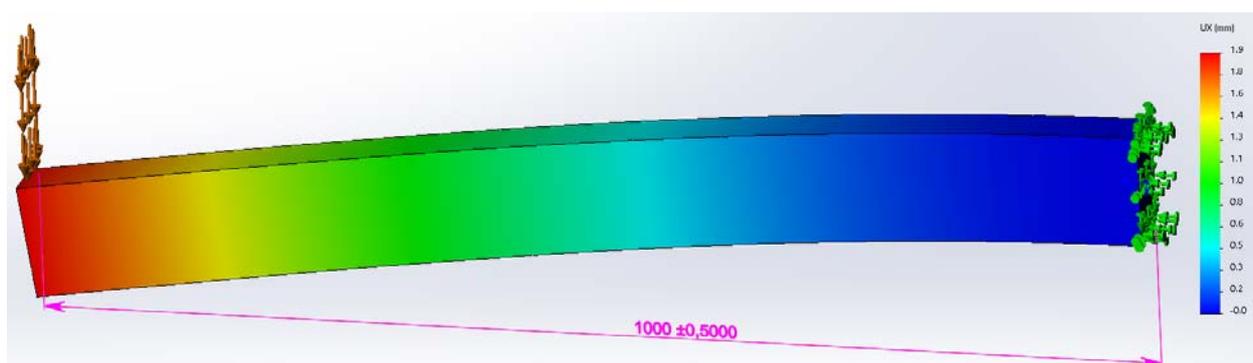


Рисунок 1.17 – Перемещения точек поверхности балки в вертикальном направлении

Следует отметить, что при подготовке картины распределения соответствующего параметра по поверхности разработанной модели SolidWorks Simulation предоставляет большие возможности в формировании и виде выводимой информации. Для этого необходимо правой клавишей мыши щелкнуть по пункту меню, в котором указан физический параметр, выводимый в качестве

рисунка, в результате высветится еще одно меню, разделами которого являются пункты предлагаемого редактирования (рисунок 1.19).

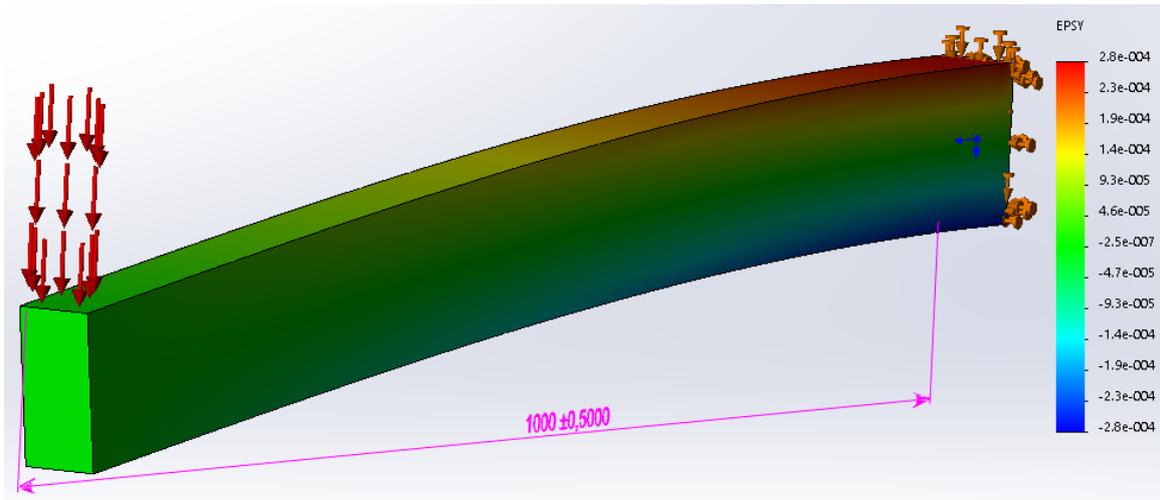


Рисунок 1.18 – Распределение относительных линейных деформаций ϵ_y в направлении, перпендикулярном поперечному сечению балки

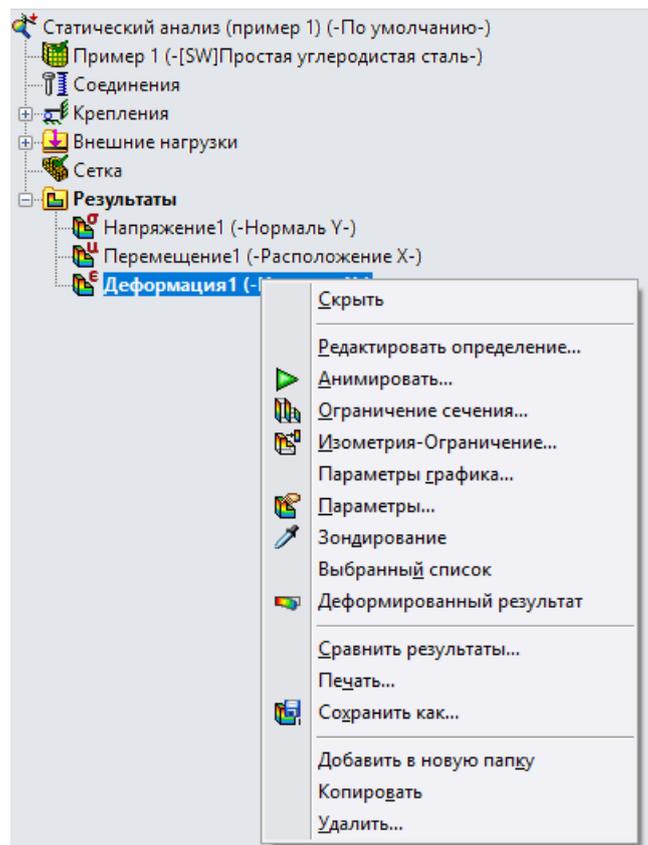


Рисунок 1.19 – Пункты возможного редактирования выводимой графической информации о результатах анализа

2 Проведение сопоставительного анализа балки, выполненного с использованием подходов курса «Соппротивление материалов» и метода конечных элементов

В данной лабораторной работе необходимо определить максимальные напряжения σ_{\max} , возникающие в балке, используя подходы курса «Соппротивление материалов»:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_x}$$

Значения M_{\max} и W_x следует вычислить по формулам, приведенным в таблицах 1.1–1.3.

Кроме того, для расчетных схем балки 1–5 (см. таблицу 1.1) вычислить максимальные прогибы балки w_{\max} . Затем полученные данные сопоставить с результатами численного анализа, проведенного в разделе 1.

Для рассматриваемой схемы нагружения балки и ее габаритных размеров (см. рисунки 1.1, 1.2 и 1.9) значения максимального изгибающего момента M_{\max} , осевого момента J_x и момента сопротивления W_x будут соответственно равны

$$M_{\max} = F \cdot l = P \cdot A \cdot L = P \cdot h \cdot b \cdot l = 1000000 \cdot 100 \cdot 50 \cdot 1000 \cdot 10^{-9} = 5000 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$J_x = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{50 \cdot 100^3 \cdot 10^{-12}}{12} = 4,17 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4;$$

$$W_x = \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{50 \cdot 100^2 \cdot 10^{-9}}{6} = 0,83 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3,$$

где F – сосредоточенная нагрузка, прикладываемая к свободному краю балки;

P – распределенная по торцу свободного края балки нагрузка;

A , h и b – площадь и габаритные размеры поперечного сечения балки соответственно.

Тогда максимальные нормальные напряжения, возникающие в консольной балке, под действием поперечной нагрузки, приложенной к свободному концу будут равны

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_x} = \frac{5000}{0,83 \cdot 10^{-4}} = 60,24 \text{ МПа.}$$

Вместе с тем, как видно из рисунка 1.16, максимальные нормальные

напряжения, полученные посредством использования метода конечных элементов, $\sigma_{\max} = 66,8$ МПа, что отличается от значений, полученных подходом курса «Сопротивление материалов» на 9,8 %. Такое расхождение обусловлено тем, что максимальные напряжения по данной схеме нагружения возникают в заделке, где сказывается краевой эффект, который в курсе «Сопротивление материалов» не учитывается.

Максимальный прогиб в консольной балке определяется следующим выражением:

$$w_{\max} = \frac{F \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot J_x} = \frac{P \cdot A \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot J_x} = \frac{10^6 \cdot 50 \cdot 100 \cdot 10^{-6} \cdot 1000^3 \cdot 10^{-9}}{3 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 10^6 \cdot 4,17 \cdot 10^{-6}} = 1,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 1,9 \text{ мм.}$$

Этот результат практически полностью совпадает с данными, приведенными на рисунке 1.17, что подтверждает верность разработанной конечно-элементной модели.

3 Формирование конечно-элементной модели стойки для анализа на устойчивость

3.1 Исходные данные к расчетно-проектировочному заданию

Требуется определить критическую силу и коэффициент запаса устойчивости n_y для стойки, закрепленной и нагруженной, как показано на рисунке 3.1.

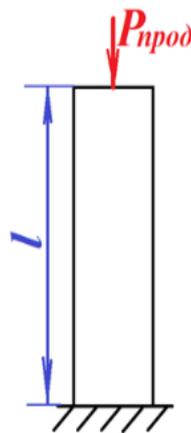


Рисунок 3.1 – Расчетная схема для определения критической силы центрально-сжатой стойки

Коэффициент запаса устойчивости определяется по формуле

$$n_y = \frac{P_{кр}}{P_{зАд}},$$

где $P_{кр}$ и $P_{зад}$ – критическая и заданная силы соответственно.

Длина стойки l , величина заданной нагрузки $P_{зад}$, схема поперечного сечения и его размеры необходимо выбрать из таблиц 3.1 и 1.2 (по трем последним цифрам номера зачетки).

Таблица 3.1 – Исходные данные для анализа устойчивости стойки

Номер строки	Сжимающая нагрузка $P_{зад}$, Н	l , м	Номер схемы поперечного сечения по таблице 1.2 и его размеры
0	190000	3,0	№ 0 ($h = 0,13$ м; $b = 0,08$ м; $d = 0,06$ м)
1	100000	2,1	№ 1 ($H = 0,1$ м; $B = 0,05$ м; $h = 0,09$ м; $b = 0,02$ м)
2	110000	2,2	№ 2 ($h = 0,12$ м; $B = 0,06$ м; $d = 0,006$ м; $b = 0,01$ м)
3	120000	2,3	№ 3 ($h = 0,11$ м; $b = 0,055$ м)
4	130000	2,4	№ 4 ($h = 0,12$ м; $b = 0,06$ м; $h_1 = 0,11$ м; $b_1 = 0,05$ м)
5	140000	2,5	№ 5 ($h = 0,13$ м; $b_n = 0,2$ м; $b_s = 0,1$ м)
6	150000	2,6	№ 6 ($h = 0,12$ м; $d = 0,15$ м; $b = d/2$)
7	160000	2,7	№ 7 ($d = 0,12$ м)
8	170000	2,8	№ 8 ($d = 0,12$ м; $h = 0,1$ м)
9	180000	2,9	№ 9 ($a = 0,11$ м; $d = 0,08$ м)
	б	в	а
Примечание – В данной таблице, в отличие от таблицы 1.3, изменены формы поперечных сечений			

3.2 Расчет стойки методом конечных элементов

На рисунке 1.3 были приведены различные типы проводимого в Simulation анализа. Среди них имеется анализ по проверке «Потери устойчивости». Этот анализ позволяет определить величину критической нагрузки, при которой изделие теряет устойчивость, а также соответствующую ей форму потери устойчивости. Далее предлагается пример расчета центрально-сжатого продольной силой стержня на предмет потери устойчивости. Твёрдотельная модель анализируемого в этом примере объекта была идентична той, что рассматривалась в статическом анализе расчета балки на изгиб. Это лишний раз подчеркивает возможности программного обеспечения Simulation по всестороннему анализу изделия без дополнительных трудозатрат по подготовке геометрической модели в каждом конкретном случае.

На рисунке 3.2 приведена предлагаемая для расчета модель продольно

сжатого стержня усилием 100000 Н, прямоугольного поперечного сечения 50×100 мм, длиной 1000 мм, нижний край которого жестко заземлен. Кроме того, на рисунке 3.2 представлено дерево менеджера Simulation применительно к расчетам по проверке потери устойчивости. Сетка разбиения данной модели на конечные элементы осталась прежней, поэтому она не приводится в предлагаемом графическом материале.

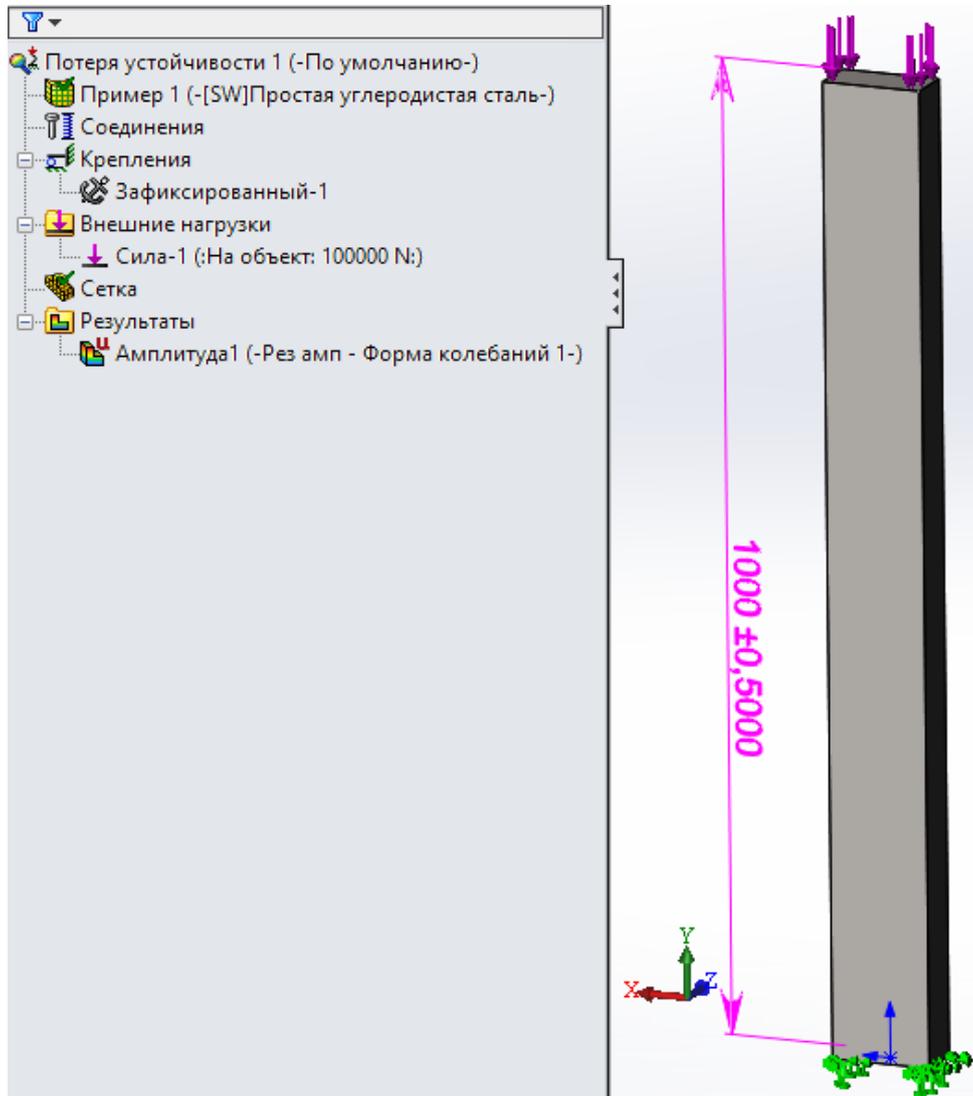


Рисунок 3.2 – Модель расчета продольно сжатого стержня усилием 100000 Н, прямоугольного поперечного сечения 50×100 мм, длиной 1000 мм, нижний край которого жестко заземлен и дерево менеджера Simulation применительно к расчетам по проверке потери устойчивости

Для проведения расчета на устойчивость в разделе контекстного меню «Свойства» (рисунок 3.3) необходимо указать количество используемых форм потери устойчивости. Как правило, первая форма потери устойчивости является наиболее информативной с точки зрения определения наименьшей критической нагрузки, приводящей к потере устойчивости. Остальные параметры можно оставить «по умолчанию».

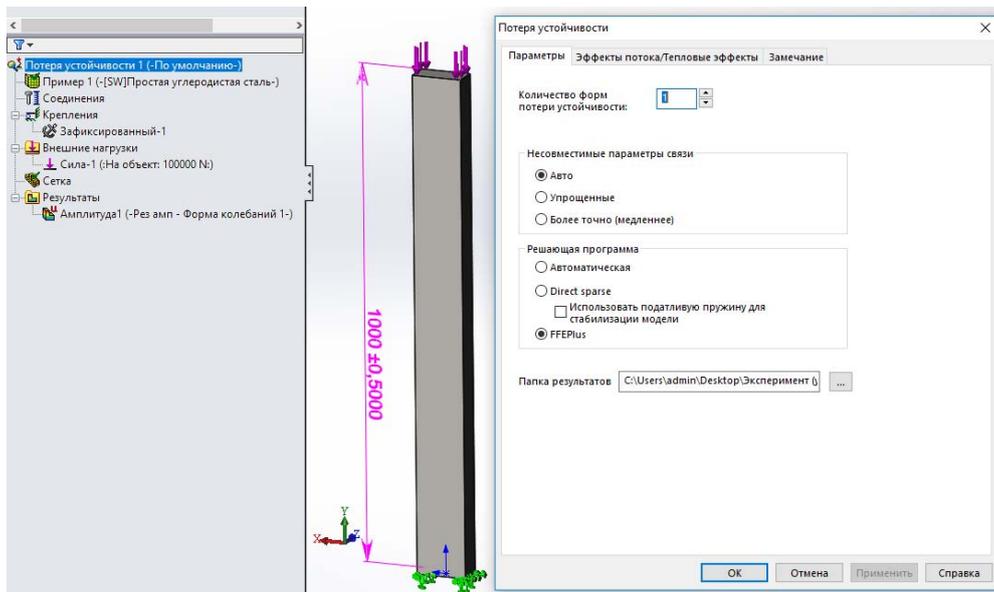


Рисунок 3.3 – Параметры контекстного меню «Свойства» при проведении расчетов на устойчивость

После проведения завершающего расчета посредством щелчка левой клавишей мыши по дереву менеджера Simulation в том месте, где высвечивается пункт «Результаты» (см. рисунок 3.3), будет раскрыто меню, использование которого позволит просмотреть итоги численного анализа на возможную потерю устойчивости объекта. Дважды щелкнув левой клавишей мыши по разделу меню (в данном примере это «Амплитуда 1») на мониторе появится картинка (рисунок 3.4) с информацией о форме потери устойчивости и значении коэффициента запаса устойчивости n_y . Как видно, в рассматриваемом примере (см. рисунок 3.4) коэффициент запаса устойчивости $n_y = 5,41$.

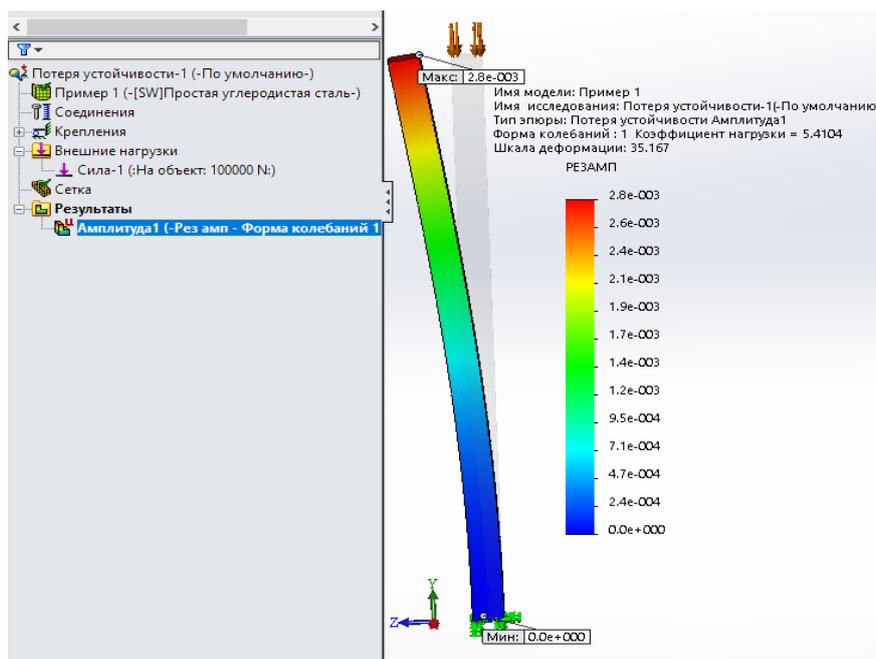


Рисунок 3.4 – Форма потери устойчивости, наложенная на недеформированное состояние и числовые значения эпюры формы (колебаний/амплитуд «РЕЗАМП»)

Числовые значения эпюры формы (колебаний/амплитуд «РЕЗАМП») показывают относительные (безразмерные) значения амплитуд для рассматриваемой формы. Здесь параметр «РЕЗАМП» представляет собой результирующую амплитуду без привязки, к какой-либо координатной оси.

4 Проведение сопоставительного анализа расчетов на устойчивость стойки, используя подходы курса «Сопротивление материалов» и метод конечных элементов

Определим теперь величину критического усилия $P_{кр}$ и запас устойчивости n_y , полученные на основании использования подходов «Сопротивления материалов». Для приведенного поперечного сечения стойки минимальный осевой момент инерции

$$I_{\min} = \frac{b^3 h}{12} = \frac{50^3 \cdot 100}{12} 10^{-12} = 10,42 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4.$$

Заданному характеру закрепления колонны соответствует коэффициент, учитывающий условия закрепления, равный $\mu = 2$.

Минимальный радиус инерции принимает следующее значение:

$$i_{\min} = \sqrt{\frac{I_{\min}}{F}} = \sqrt{\frac{10,42 \cdot 10^{-7}}{100 \cdot 50 \cdot 10^{-6}}} = 1,69 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

Тогда максимальная гибкость колонны

$$\lambda_{\max} = \frac{\mu \cdot \ell}{i_{\min}} = \frac{2 \cdot 1}{1,69 \cdot 10^{-2}} = 118.$$

Для полученного значения гибкости стальной колонны критическая величина сжимающей нагрузки может быть определена с помощью формулы Эйлера:

$$P_{кр} = \frac{\pi^2 E \cdot I_{\min}}{(\mu \cdot \ell)^2} = \frac{3,14^2 \cdot 2,1 \cdot 10^{11} \cdot 10,42 \cdot 10^{-7}}{(2 \cdot 1)^2} = 539370 \text{ Н.}$$

Тогда запас устойчивости

$$n_y = \frac{P_{кр}}{P_{Зад}} = \frac{539370}{100000} = 5,393.$$

Данные, полученные с использованием методов, предлагаемых в курсе «Сопротивление материалов», достаточно хорошо согласуются с результатами конечно-элементного анализа, проведенного в оболочке COSMOSWorks (Simulation), что лишней раз подтверждает право на существование обоих подходов.

5 Формирование конечно-элементной модели балки, подверженной удару падающим грузом

5.1 Исходные данные к проведению расчетов

Для расчетных схем, приведенных на рисунке 5.1, а также данных представленных в таблице 5.1, необходимо провести анализ напряженно-деформированного состояния балки, подверженной поперечному удару грузом массой m .

Таблица 5.1 – Исходные данные для анализа поперечного удара по балке

Номер строки	Схема по рисунку 5.1	l , м	m , кг	h_m , м	Номер схемы поперечного сечения по таблице 1.2 и его размеры
0	0	3,0	3,0	0,50	№ 0 ($h = 0,13$ м; $b = 0,08$ м; $d = 0,06$ м)
1	1	2,1	2,1	0,41	№ 1 ($H = 0,1$ м; $B = 0,05$ м; $h = 0,09$ м; $b = 0,02$ м)
2	2	2,2	2,2	0,42	№ 2 ($h = 0,12$ м; $B = 0,06$ м; $d = 0,006$ м; $b = 0,01$ м)
3	3	2,3	2,3	0,43	№ 3 ($h = 0,11$ м; $b = 0,055$ м)
4	4	2,4	2,4	0,44	№ 4 ($h = 0,12$ м; $b = 0,06$ м; $h_l = 0,11$ м; $b_l = 0,05$ м)
5	5	2,5	2,5	0,45	№ 5 ($h = 0,13$ м; $b_n = 0,2$ м; $b_в = 0,1$ м)
6	6	2,6	2,6	0,46	№ 6 ($h = 0,12$ м; $d = 0,15$ м; $b = d/2$)
7	7	2,7	2,7	0,47	№ 7 ($d = 0,12$ м)
8	8	2,8	2,8	0,48	№ 8 ($d = 0,12$ м; $h = 0,1$ м)
9	9	2,9	2,9	0,49	№ 9 ($a = 0,11$ м; $d = 0,08$ м)
	а	б	в	а	в

Следует отметить, что в приведенных исходных данных форма поперечного сечения также стала другой.

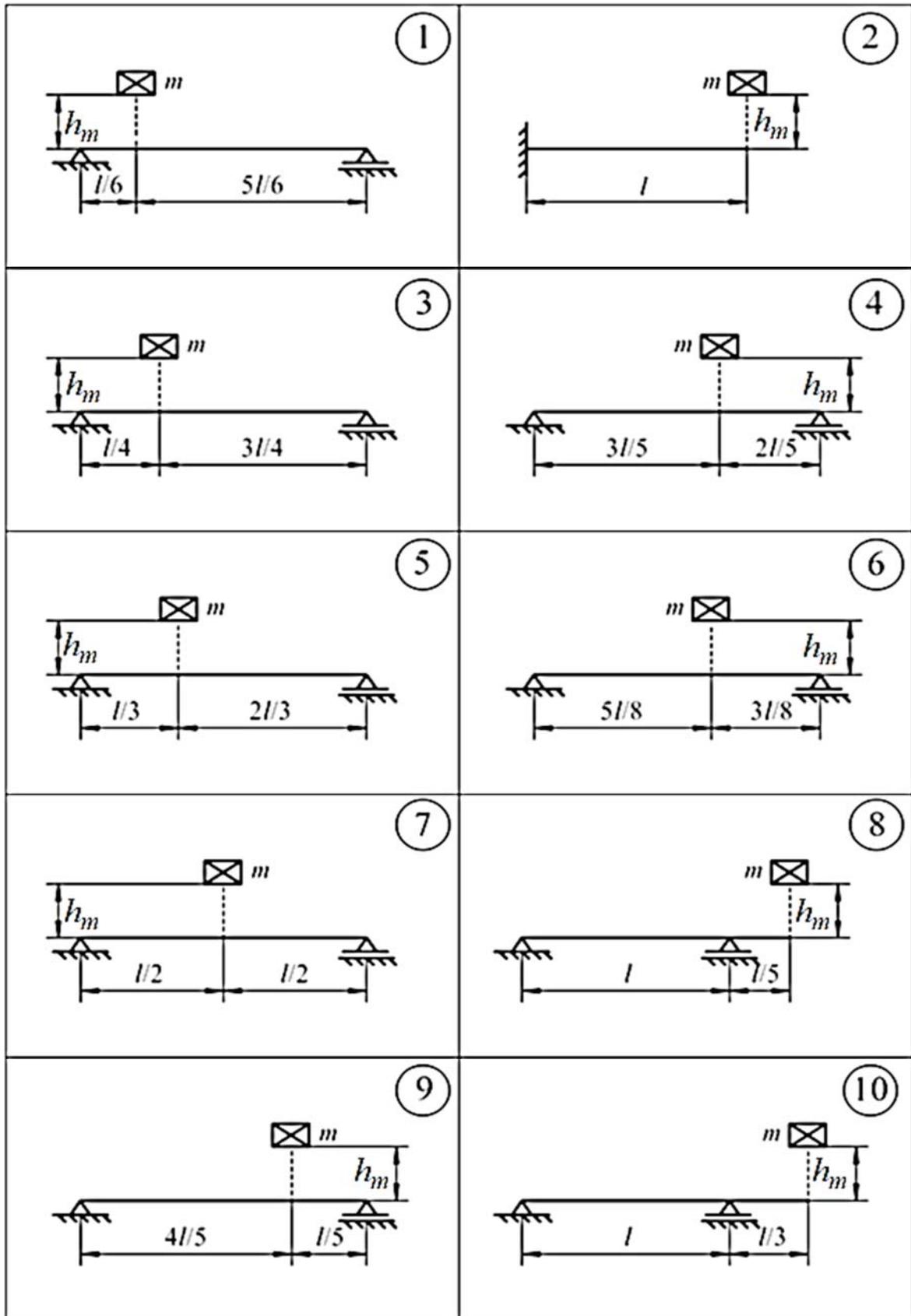


Рисунок 5.1 – Расчетные схемы для анализа поперечного удара по балке

На рисунке 5.2 приведено обозначение габаритных размеров падающего груза в форме параллелепипеда.

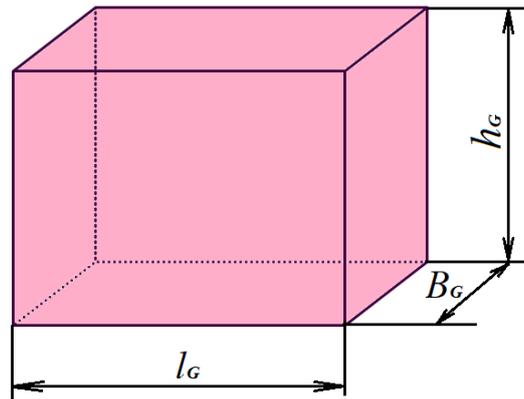


Рисунок 5.2 – Габаритные размеры падающего на балку в поперечном направлении груза

Габаритный размер падающего груза B_G принимается равным ширине верхней поверхности балки (данные взять из таблицы 5.1, а также данных соответствующего поперечного сечения балки). Габаритный размер падающего груза, совпадающий по направлению (рисунок 5.2) с осью балки l_G , принимается равным $l_G = 60$ мм.

Размер груза h_G , м, определяется с помощью выражения

$$h_G = 2,14 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{m}{B_G},$$

где m – вес падающего груза (данные взять из таблицы 1.1).

Материал, из которого изготовлена балка, – сталь Ст3, модуль упругости $E = 2 \cdot 10^5$ МПа.

5.2 Расчет балки методом конечных элементов

Схема нагружения балки ударом представлена на рисунке 5.3.

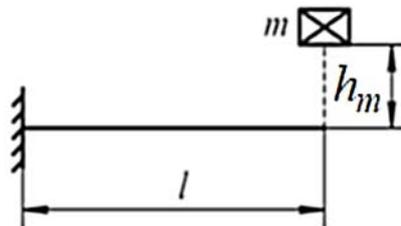


Рисунок 5.3 – Схема нагружения балки ударом

При этом характерные параметры этой схемы имеют следующие значения: $l = 3$ м; $m = 2$ кг; $h_m = 0,5$ м.

Поперечное сечение балки представляет собой симметричный тавр, состоящий из прямоугольников (рисунок 5.4).

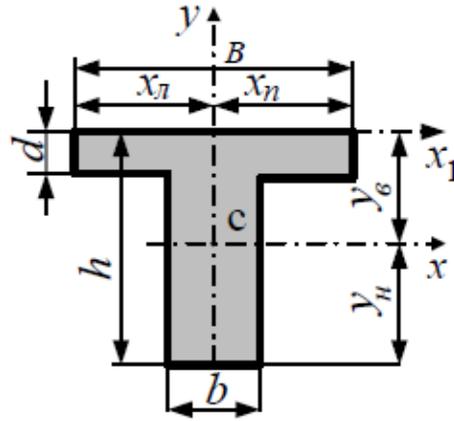


Рисунок 5.4 – Форма поперечного сечения рассматриваемой балки

Габаритные размеры данного поперечного сечения имеют следующие значения: $h = 0,12$ м; $B = 0,06$ м; $d = 0,006$ м; $b = 0,01$ м.

Поскольку в методе конечных элементов предполагается, что все детали сборки находятся в контакте, то взаимодействие соударяющейся массы с балкой рассматривается только с момента соприкосновения их. В этот момент груз, падающий с высоты h_m , приобретает скорость v_m , величину которой можно определить из равенства потенциальной энергии груза, находящегося на высоте h_m , и приобретаемой кинетической энергии этого груза в момент соприкосновения с балкой:

$$m \cdot g \cdot h_m = \frac{m \cdot v_m^2}{2}.$$

В результате элементарных преобразований может быть получено следующее выражение:

$$v_m = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}.$$

Таким образом, скорость груза v_m , падающего с высоты $h_m = 0,5$ м, будет равна

$$v_m = \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 0,5} = 3,13 \text{ м/с}.$$

Кроме этих данных, для построения твердотельной модели исследуемого объекта необходимо также определить габаритные размеры падающего груза (см. рисунок 5.2) в соответствии с тем, что масса этого груза составляет $m = 2$ кг.

Как уже отмечалось в подразделе 5.1, габаритный размер груза, совпадающий по направлению с осью балки, принимаем равным $l_G = 60$ мм. Поперечный размер B_G принимается равным ширине верхней поверхности балки, т. е. в нашем случае

$$B_G = B = 0,06 \text{ м.}$$

Размер груза h_G определяется исходя из соображений равенства этого объема металла, в нашем случае массе $m = 2$ кг. Для определения данного параметра используется выражение

$$h_G = 2,14 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{m}{B_G} = 2,14 \cdot 10^{-3} \frac{2}{0,06} = 0,0713 \text{ м.}$$

Используя данные габаритные размеры балки и груза, была создана твердотельная модель этой сборки (рисунок 5.5).

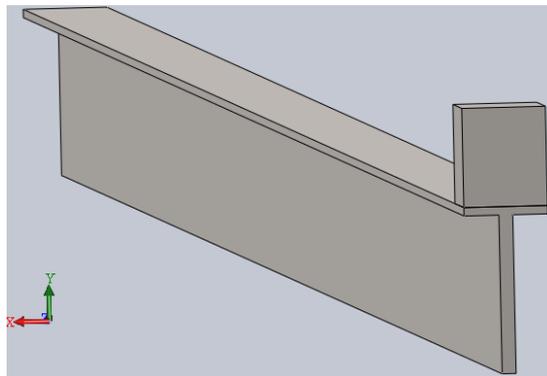


Рисунок 5.5 – Твердотельная модель сборки балки и груза

Для проведения такого рода исследования – нагружения балки посредством удара падающим грузом – был выбран из предлагаемых COSMOSWorks (Simulation) типов анализов (таблица 5.2) нелинейный динамический анализ.

Таблица 5.2 – Типы проводимых в Simulation анализов и их обозначения

Тип исследования	Значок исследования	Тип исследования	Значок исследования
Статический		Модальная временная диаграмма	
Частотный анализ		Гармонический анализ	
Потеря устойчивости		Случайные колебания	
Термический анализ		Спектр реакции	
Исследование проектирования		Анализ на ударную нагрузку	
Нелинейный статический анализ		Усталость	
Нелинейный динамический анализ		Конструкция сосуда, работающего под давлением	

Использование такого типа анализа обусловлено тем, что взаимодействие двух соударяемых тел происходит на протяжении определенного промежутка времени, хоть и весьма малого, и это взаимодействие явно не носит линейный характер.

Настройка параметров расчетной части исследования осуществляется посредством щелчка правой клавиши мыши по корню дерева менеджера Simulation в том месте, где обозначается тип анализа. В результате высвечивается контекстное меню, представленное на рисунке 5.6.

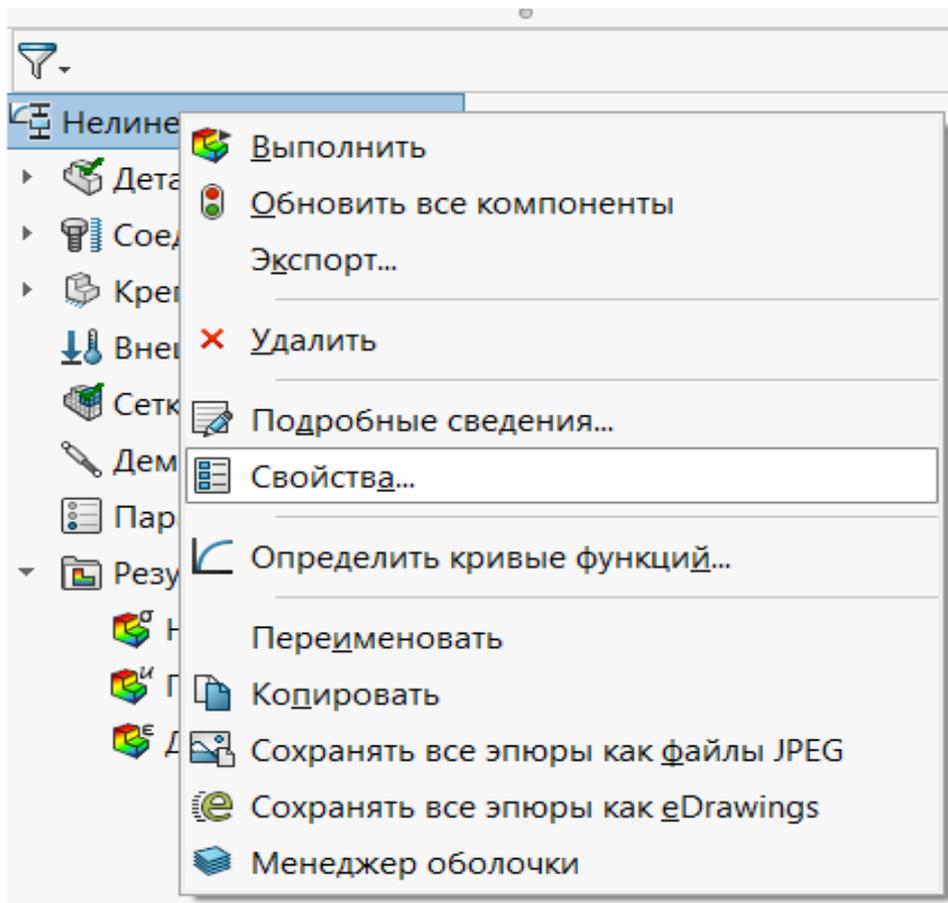


Рисунок 5.6 – Настройка параметров расчетной части нелинейного динамического анализа

После нажатия левой клавишей мыши на позиции *Свойства* появится новое диалоговое окно (рисунок 5.7).

В этом диалоговом окне необходимо обязательно указать время начала и окончания динамического взаимодействия исследуемого процесса. В данном примере (см. рисунок 5.7) началу соответствовала нулевая отметка, а концу – значение 0,01 с. Временной интервал при проведении такого анализа первоначально назначается интуитивно, на основании умозрительного представления об инерционных свойствах соударяемых тел. После проведения первого расчета и отладки конечно-элементной модели более подробно анализируется характер деформирования соударяемых тел за весь рассматриваемый период времени.

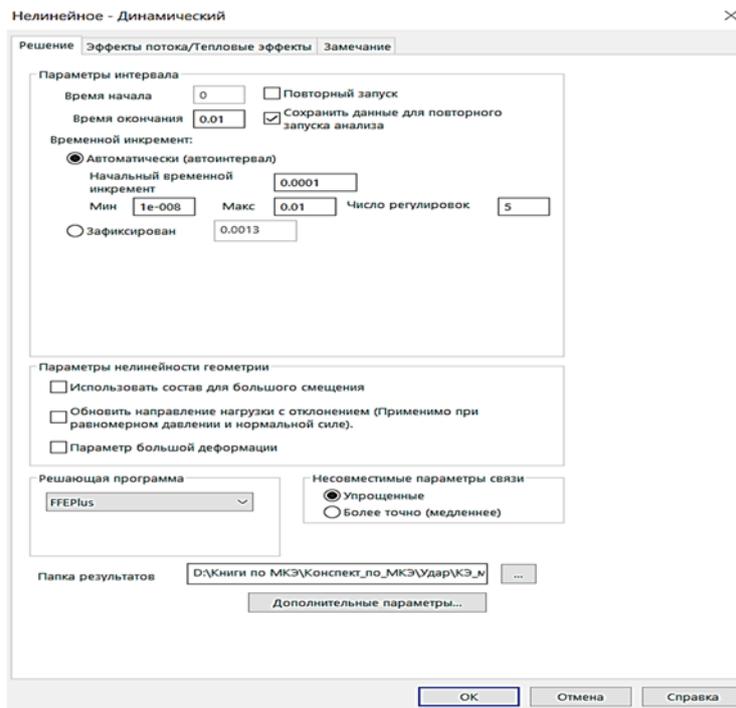


Рисунок 5.7 – Диалоговое окно настройки расчетной части

Процесс соударения тел принято разделять на две фазы, в первой фазе тела после соприкосновения продолжают сближаться, деформации растут, также растут и усилия взаимодействия между телами. Во второй фазе за счет наличия сил упругости деформации уменьшаются, становятся меньше и силы взаимодействия между телами. Наибольший интерес с точки зрения напряженно-деформированного состояния анализируемых изделий представляет момент времени, когда силы взаимодействия принимают наибольшие значения. Для рассматриваемого типа примеров такой момент настает при переходе от первой фазы удара ко второй.

Момент перехода от первой фазы ко второй устанавливается посредством рассмотрения результатов расчета, включая операцию *Зондирование*.

Все остальные опции диалогового окна настройки расчетной части (см. рисунок 5.7) можно принять по умолчанию.

Поскольку в данном примере рассматривается сборка, состоящая из двух деталей – балки и падающего на нее груза, то необходимо при построении конечно-элементной модели указать условия *Соединения* этих двух деталей по плоскости контакта (рисунок 5.8). Как видно из данного рисунка, детали по плоскости соприкосновения назначены *Связанными*.

Кроме того, из рисунка 5.8 видно, что левый торец балки жестко закреплен.

Необходимо также задать силовое воздействие одной детали на другую, что можно сделать, используя опцию *Внешние нагрузки*, щелкнув на ней правой клавишей мыши. В результате появится еще одно всплывающее меню (рисунок 5.9). Одна из опций данного меню – *Исходные условия*. С помощью этой опции можно задать скорость падающего груза в начальный момент соприкосновения с балкой. При падении с высоты $h = 0,5$ м груз приобретет скорость

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} = \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 0,5} = 3,13 \text{ м/с.}$$

Это значение и указано в опции *Исходные условия* (рисунок 5.10).

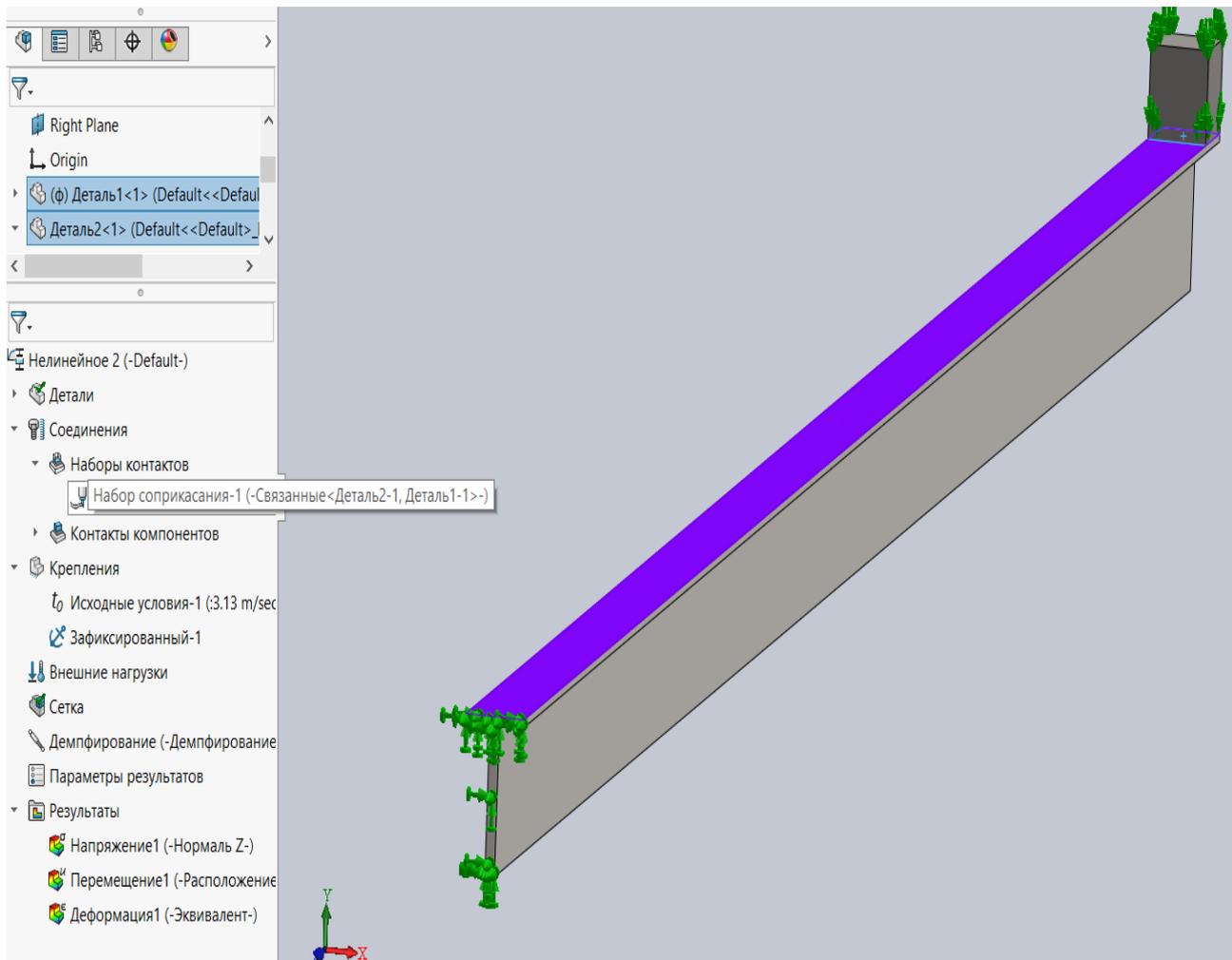


Рисунок 5.8 – Условия соединения в зоне контакта верхней поверхности балки и груза

Далее процедура конечно-элементного анализа рассматриваемой задачи близка к тем, которые проводились в предыдущих задачах – построение сетки разбиения конечно-элементной модели (рисунок 5.11) и проведение заключительного расчета.

На рисунках 5.12 и 5.13 приведены эпюры распределения прогибов в вертикальном направлении и нормальных напряжений в направлении, перпендикулярном поперечному сечению балки в момент пиковых значений этих параметров, т. е. при $t = 0,01$ с.

Как видно из рисунка 5.13, наибольшие значения напряжений имеют место в области, прилегающей к заделке. В связи с этим напряженное состояние данной зоны было более подробно исследовано с помощью применения операции *Зондирование* (рисунок 5.14).

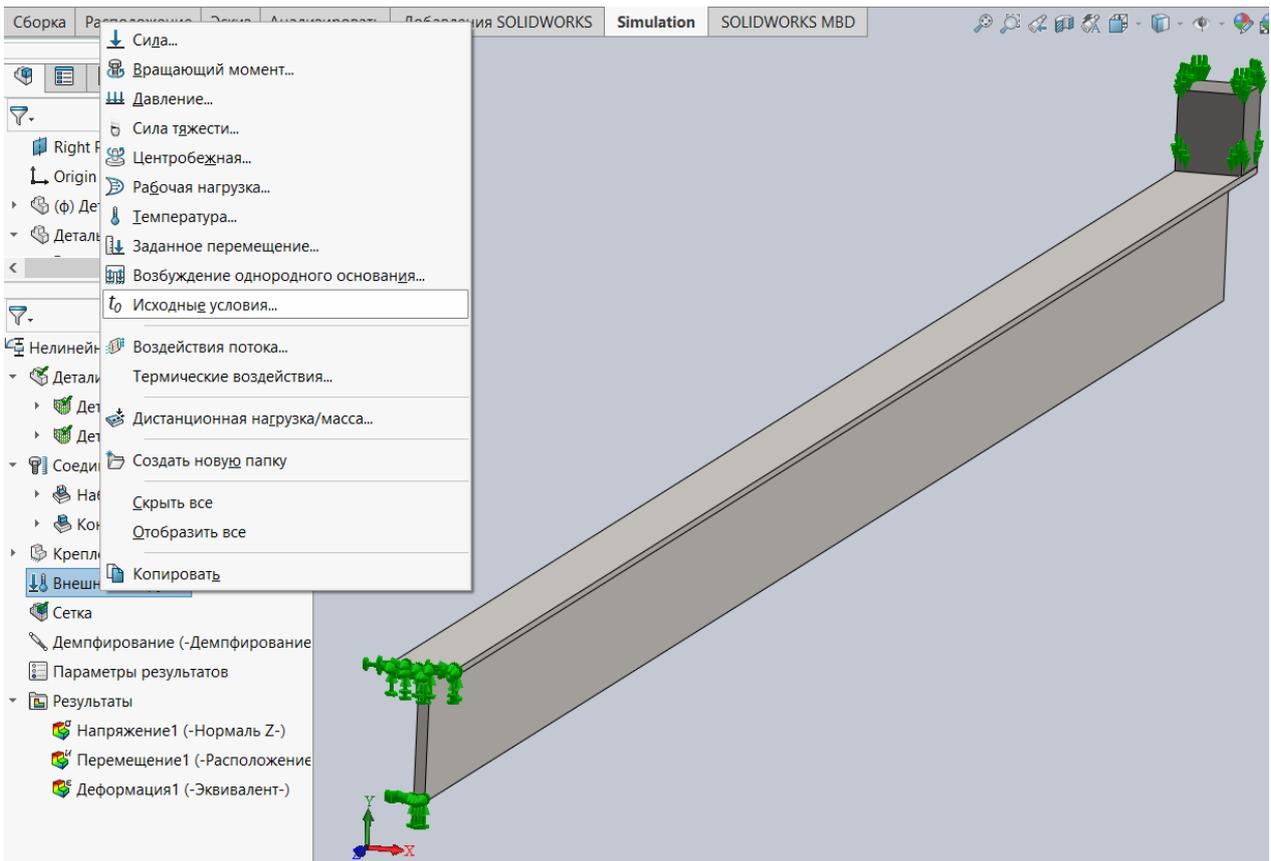


Рисунок 5.9 – Задание опции *Исходные условия* в момент соприкосновения груза с балкой

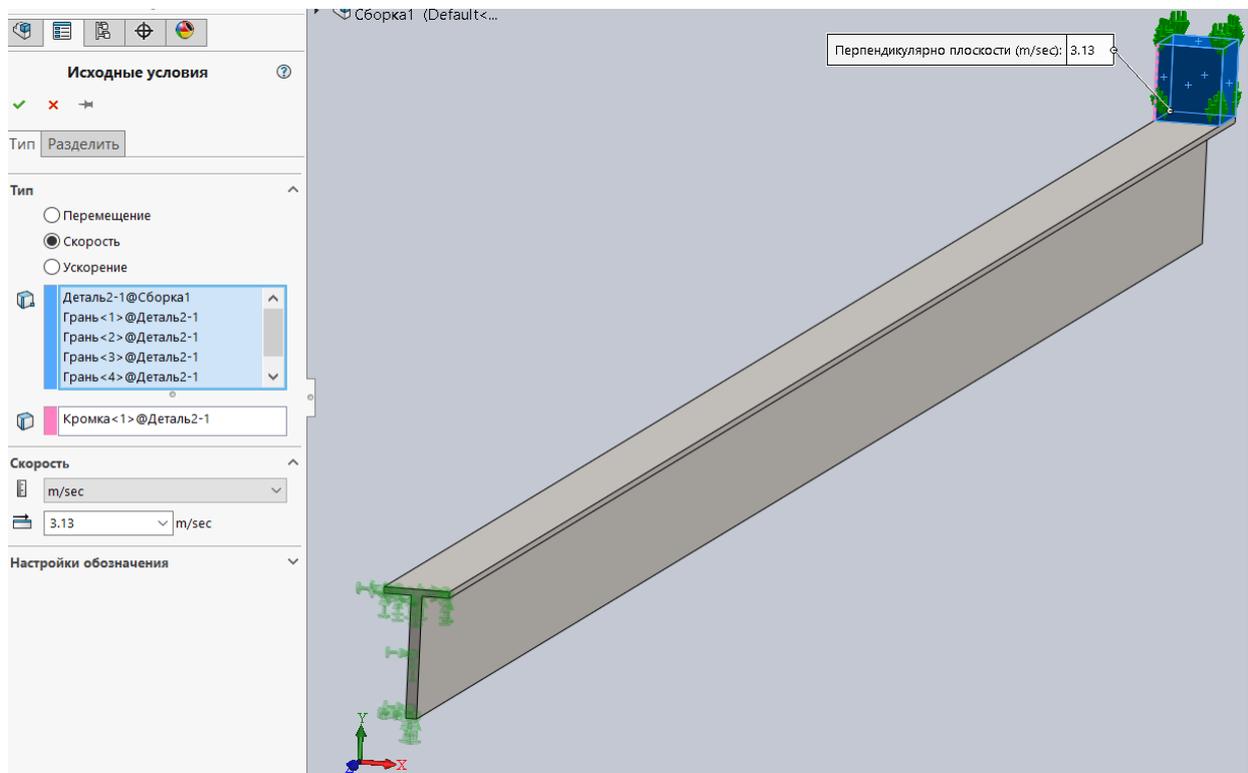


Рисунок 5.10 – Опция *Исходные условия* для разработанной конечно-элементной модели

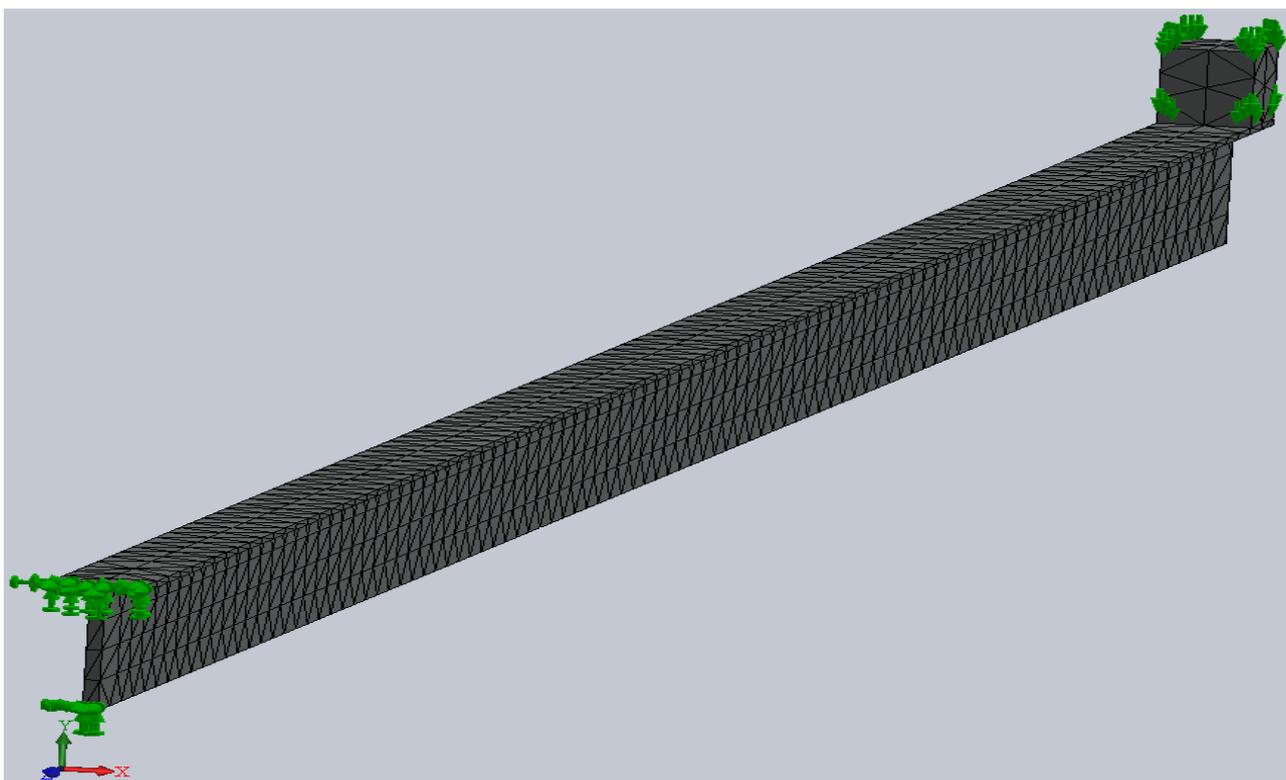


Рисунок 5.11 – Сетка разбиения модели на конечные элементы, условия закрепления и начальные условия в момент соприкосновения груза с балкой

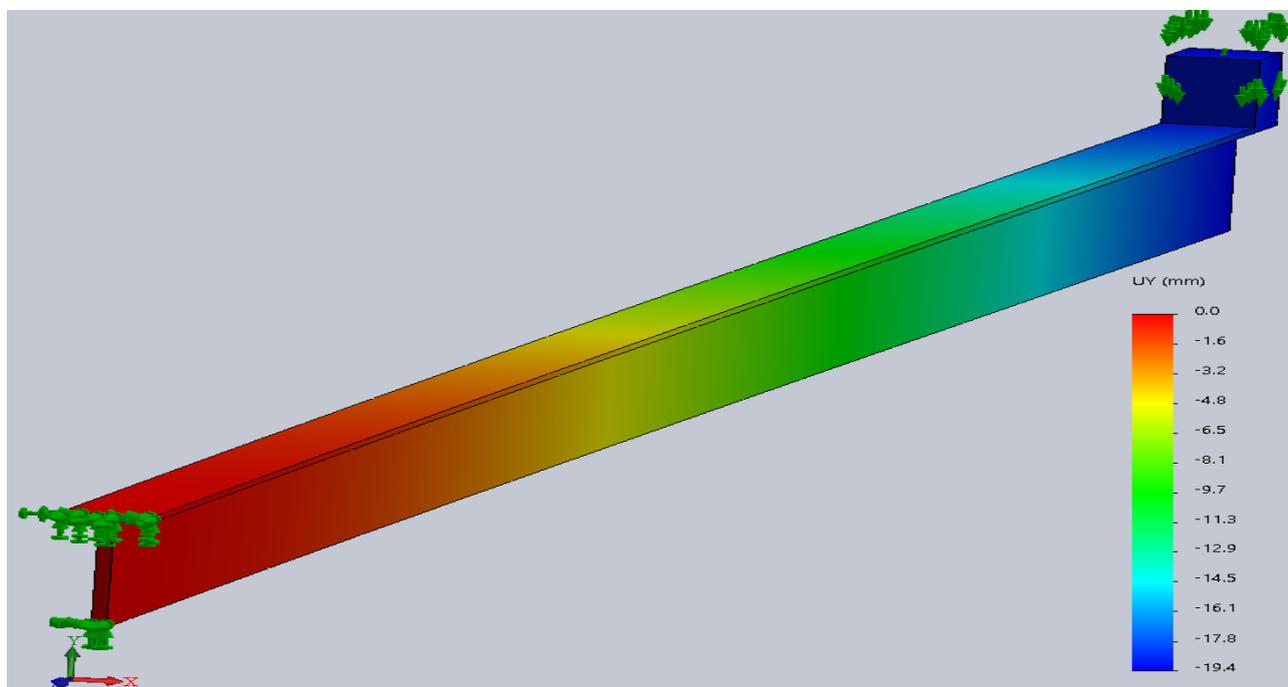


Рисунок 5.12 – Максимальный прогиб балки в процессе поперечного удара

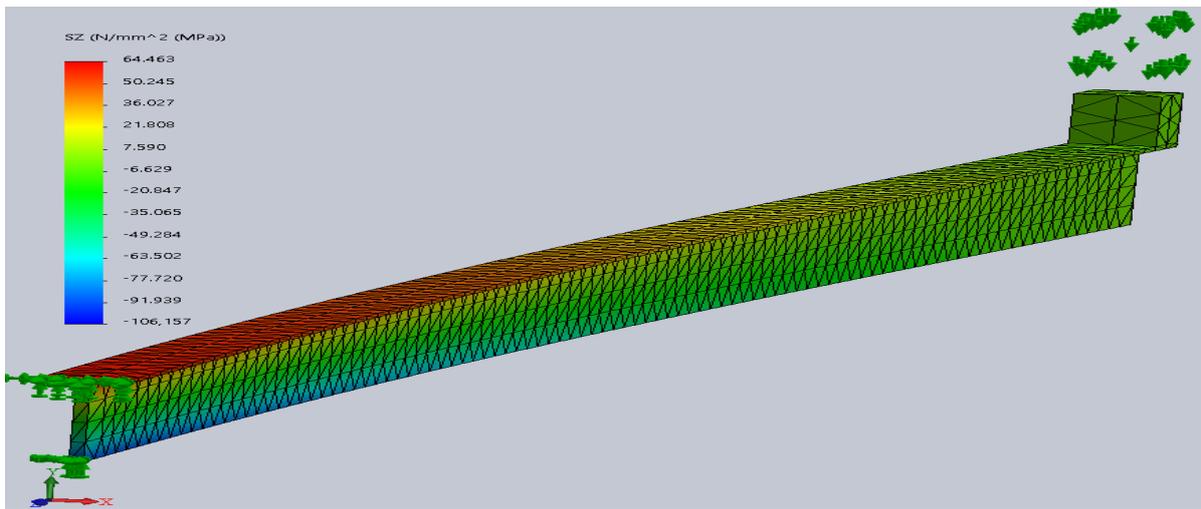


Рисунок 5.13 – Распределение нормальных напряжений по наружной поверхности балки в момент наибольшего деформирования ее

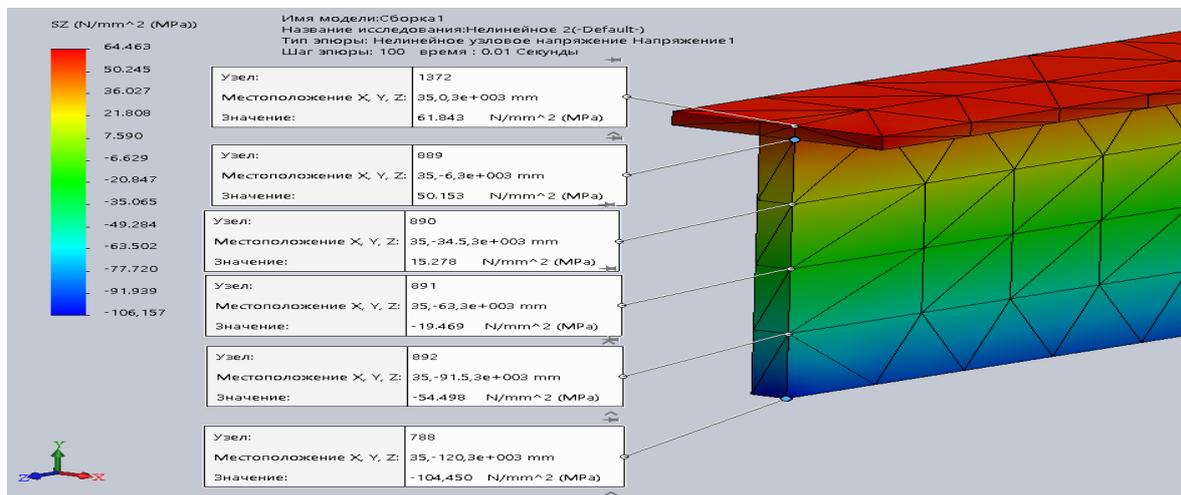


Рисунок 5.14 – Значения нормальных напряжений в узловых точках конечно-элементной модели в поперечном сечении балки, непосредственно прилегающем к заделке

Посредством использования этой опции на экран выводится информация о значении анализируемого параметра (напряжения, перемещения или деформации) в узловой точке конечно-элементной модели (см. рисунок 5.14). При этом предварительно должна быть активизирована соответствующая эпюра, которая построена с сеткой разбиения модели на конечные элементы (см. рисунок 5.14). В результате выполнения данных действий на экране появится белый прямоугольник, в пределах которого будет представлена следующая информация: номер узловой точки, три координаты в пространстве данной узловой точки и значение анализируемого параметра в месте ее расположения. На рисунке 5.14 приведена подобная информация о шести узловых точках сечения балки, непосредственно прилегающего к заделке.

Операция *Зондирование* выполняется следующим образом. После того как

была построена эпюра соответствующего параметра совместно с сеткой разбиения, необходимо щелкнуть правой клавишей мыши на Дереве конструирования в том месте, где указаны результаты. В результате появится новое контекстное меню (рисунок 5.15), одним из разделов которого будет *Зондирование*.

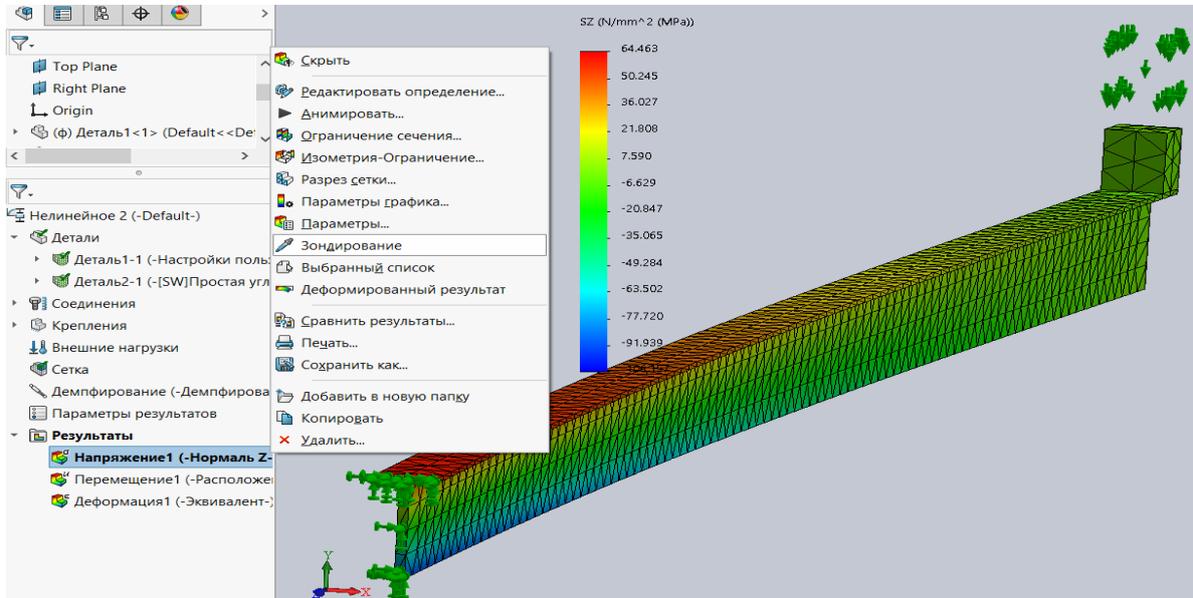


Рисунок 5.15 – Контекстное меню с операцией *Зондирование*

Далее, щелкнув левой клавишей мыши на операции *Зондирование*, появится новое окно, представляющее собой таблицу (рисунок 5.16), в которую будет заноситься информация об узловой точке, указанной посредством использования мыши, и значение анализируемого параметра в ней. Одновременно на экране в белом прямоугольнике появится аналогичная информация. Белый прямоугольник с информацией легко «перетаскивается» в любое удобное для пользователя место на экране.

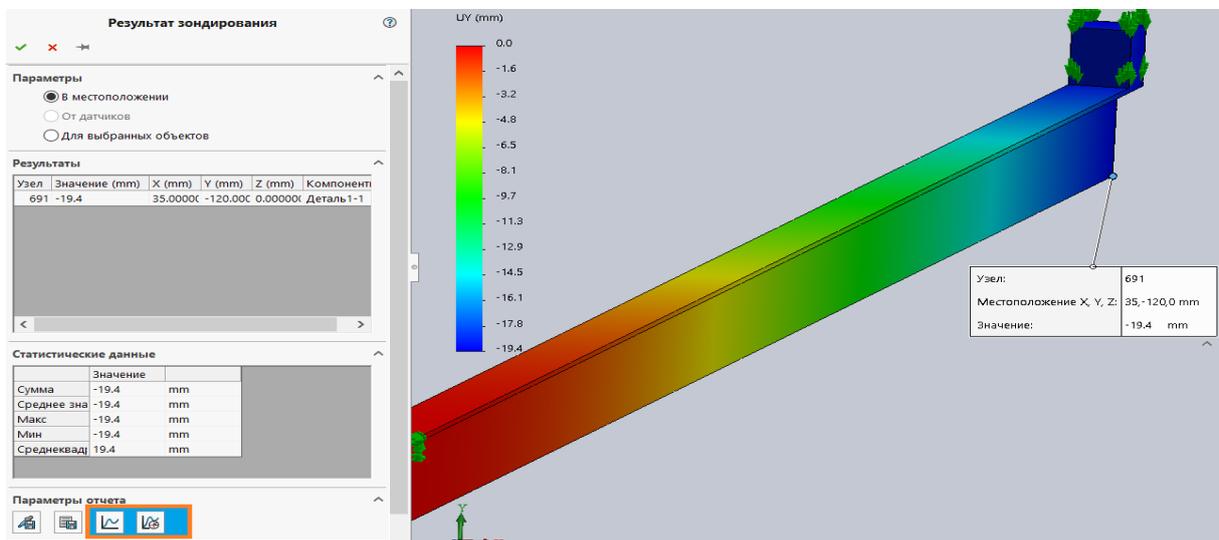


Рисунок 5.16 – Таблица результатов Зондирования

В нижней части таблицы будут приведены параметры отчета, среди них синей заливкой выделены два графика. Левый из них позволяет в виде графика изобразить изменение параметра эпюры при переходе от одной узловой точки к другим. Правая иконка выводит информацию об изменении параметра эпюры в рассматриваемой узловой точке за весь интервал силового воздействия на объекты, т. е. в нашем случае за весь период $t = 0,01$ с (рисунок 5.17).

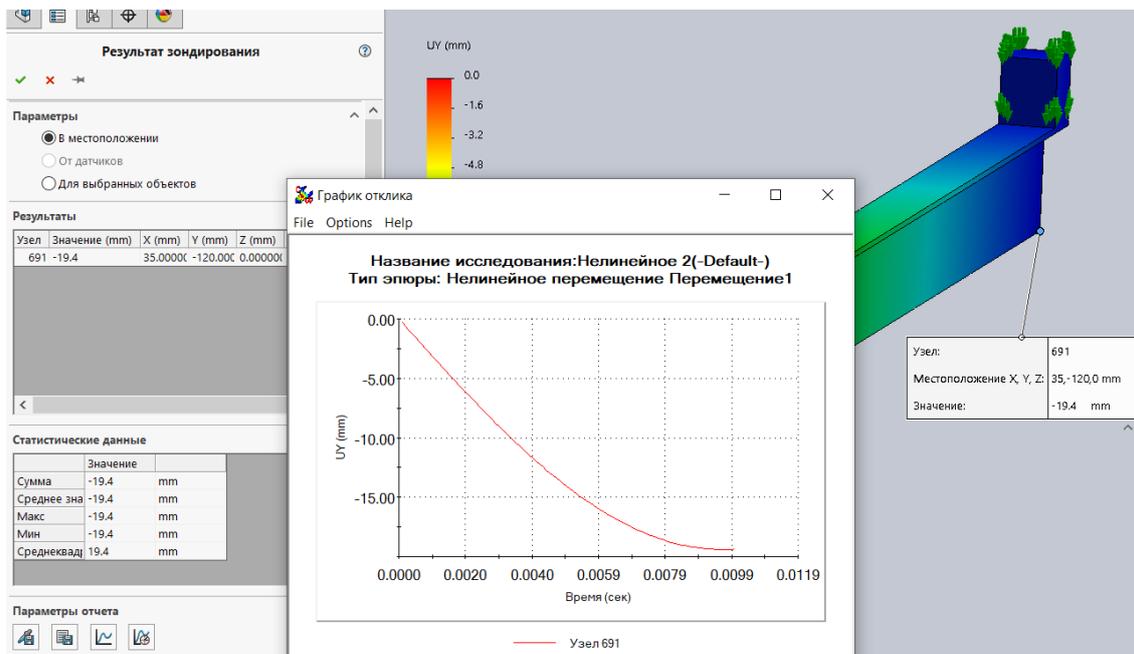


Рисунок 5.17 – График прогиба балки в зоне падения груза за активную фазу удара

На рисунке 5.17 приведен график изменения прогиба за активную фазу удара в узловой точке балки, находящейся непосредственно под падающим грузом. Как видно из приведенного графика, активная фаза взаимодействия падающего груза и балки пройдена и, следовательно, интервала времени $t = 0,01$ с вполне достаточно для анализа напряженно-деформированного состояния балки с позиций прочности.

6 Проведение сопоставительного анализа расчетов балки при нагружении ударом, используя подходы курса «Сопротивление материалов» и метод конечных элементов

При проведении сопоставительного анализа балки, подверженной нагружению ударом, используя подходы курса «Сопротивление материалов», прежде всего необходимо определить следующие геометрические характеристики:

- площадь поперечного сечения

$$A = (B - b) \cdot d + bh;$$

– координату центра тяжести поперечного сечения

$$y_g = \frac{(B - b) \frac{d^2}{2} + b \frac{h^2}{2}}{(B - b)d + bh};$$

– осевой момент инерции сечения

$$J_x = (B - b) \frac{d^3}{3} + \frac{bh^3}{3} - Ay_g^2;$$

– момент сопротивления нижнего края поперечного сечения

$$W_{x,H} = \frac{J_x}{h - y_g};$$

– момент сопротивления верхнего края поперечного сечения

$$W_{x,g} = \frac{J_x}{y_g}.$$

Учитывая, что габаритные размеры рассматриваемого поперечного сечения имеют значения $h = 0,12$ м; $B = 0,06$ м; $d = 0,006$ м; $b = 0,01$ м, то в результате получим следующие значения геометрических характеристик:

$$A = (0,06 - 0,01)0,006 + 0,01 \cdot 0,12 = 0,0015 \text{ м}^2;$$

$$y_B = \frac{(0,06 - 0,01) \frac{0,006^2}{2} + 0,01 \frac{0,12^2}{2}}{(0,06 - 0,01)0,006 + 0,01 \cdot 0,12} = 0,0486 \text{ м};$$

$$J_x = (0,06 - 0,01) \frac{0,006^3}{3} + \frac{0,01 \cdot 0,12^3}{3} - 0,0015 \cdot 0,0486^2 = 2221 \cdot 10^9 \text{ м}^4;$$

$$W_{xH} = \frac{2221 \cdot 10^{-9}}{0,12 - 0,0486} = 31,09 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3;$$

$$W_{xg} = \frac{2221 \cdot 10^{-9}}{0,0486} = 45,68 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

Максимальный изгибающий момент при заданной схеме закрепления балки (см. рисунок 5.3) в случае, когда груз неподвижно расположен на свободном краю балки, будет равен

$$M_{cm}^{\max} = G \cdot l = 20 \cdot 3 = 60 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Тогда максимальные напряжения, возникающие в заделке при статическом нагружении грузом G :

$$\sigma_{cm.n}^{\max} = \frac{M_{cm}^{\max}}{W_{x.n}} = \frac{60}{31,09 \cdot 10^{-6}} = -1,93 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{cm.в}^{\max} = \frac{M_{cm}^{\max}}{W_{x.в}} = \frac{60}{45,68 \cdot 10^{-6}} = 1,31 \text{ МПа}.$$

Для консольно-закрепленной балки, нагруженной сосредоточенной силой на свободном краю статический прогиб может быть определен с помощью выражения

$$\Delta_{cm} = \frac{G \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot J_x} = \frac{20 \cdot 3^3}{3 \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot 2,221 \cdot 10^{-6}} = 40,522 \cdot 10^{-5} \text{ м} \approx 0,405 \text{ мм}.$$

Следует отметить, что только для данной схемы нагружения (см. рисунок 5.3) можно использовать формулу для определения Δ_{cm} , во всех остальных вариантах схем нагружения необходимо строить единичные и грузовые эпюры моментов при статическом нагружении, а затем, используя правило Верещагина, определять статический прогиб.

В дальнейшем, зная величину статического перемещения Δ_{cm} , определяется динамический коэффициент

$$K_{\delta} = 1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot h}{\Delta_{cm}}} = 1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot 0,5}{40,522 \cdot 10^{-5}}} = 50,69.$$

Используя значение динамического коэффициента, в последующем могут быть определены величины максимальных напряжений и динамического прогиба, применяя следующие соотношения:

$$\sigma_{\delta.n}^{\max} = \sigma_{cm.n}^{\max} \cdot K_{\delta} = -1,93 \cdot 50,69 = -97,83 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{\delta.в}^{\max} = \sigma_{cm.в}^{\max} \cdot K_{\delta} = 1,31 \cdot 50,69 = 66,4 \text{ МПа};$$

$$\Delta_{\delta} = \Delta_{cm} \cdot K_{\delta} = 0,405 \cdot 50,69 = 20,53 \text{ мм}.$$

Сопоставление результатов расчета, выполненного с помощью компьютерной системы SolidWorks, с данными, полученными в результате использования курса «Сопротивление материалов», сведено в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 – Сопоставление результатов расчетов, полученных с помощью SolidWorks, и расчетных методов, представленных в курсе «Сопротивление материалов»

Метод анализа напряженно-деформированного состояния балки	Максимальное напряжение на верхних волокнах балки сечения, прилегающего к заделке, $\sigma_{\text{д.в}}^{\text{max}}$, МПа	Максимальное напряжение на нижних волокнах балки сечения, прилегающего к заделке, $\sigma_{\text{д.н}}^{\text{max}}$, МПа	Максимальный прогиб балки в зоне падения груза Δ_0 , мм
SolidWorks	61,8	– 104,4	19,4
Сопротивление материалов	66,4	– 97,83	20,53
Процент расхождения	6,9	6,3	5,5

Такой процент расхождения результатов расчета может объясняться рядом причин:

- использовалась достаточно грубая сетка разбиения модели на конечные элементы;
- в основу теории удара в курсе «Сопротивление материалов» положен ряд допущений, которые в SolidWorks Simulation не применяются;
- в месте заделки балки, а также зоне падения груза, может оказывать большое влияние краевой эффект, который в курсе «Сопротивление материалов» не учитывается.

7 Оформление отчета по проведению сопоставительного анализа ступенчатого бруса при центральном растяжении-сжатии

Целью данной лабораторной работы является составление отчета о проведенных расчетах ступенчатого бруса при центральном растяжении-сжатии [8, разделы 4–15].

Отчет должен включать соответствующий разделу графический материал и необходимые текстовые пояснения. В методических рекомендациях подробно рассмотрены соответствующие примеры проведения расчетов.

Ниже приводятся разделы, которые должны быть включены в отчет, в скобках указаны ссылки на подобный графический материал, представленный в [8].

В отчет необходимо включить следующее:

- исходные данные к проведению расчета с указанием последних трех цифр номера зачетной книжки [8, подраздел 4.1, рисунок 4.1];
- проведение расчета ступенчатого бруса, используя подходы курса «Сопротивление материалов» [8, подраздел 7.1, рисунок 7.2];
- построение твердотельной модели исследуемого объекта с проведением соответствующих расчетов [8, раздел 8, рисунок 8.1];

– создание конечно-элементной модели рассматриваемого ступенчатого бруса с изображением на ней условий закрепления и условий нагружения [8, раздел 11, рисунок 11.3];

– постпроцессорное рассмотрение проводимого исследования, построение эпюр нормальных напряжений и продольных перемещений [8, разделы 14 и 15, рисунки 14.6 и 15.1];

– сопоставление результатов анализа ступенчатого бруса, выполненных с использованием подходов курса «Сопротивление материалов» и метода конечных элементов [8, раздел 15, таблицы 15.1 и 15.2].

В конце отчета лабораторной работы необходимо указать ФИО студента, выполнившего работу, дату и подпись, а также ФИО преподавателя, проверившего отчет (см. образец ниже).

ФИО студента	подпись, дата
ФИО преподавателя	подпись

8 Оформление отчета по проведению сопоставительного анализа балки при статическом нагружении на изгиб

Целью данной лабораторной работы является составление отчета о проведенных расчетах (см. разделы 1 и 2).

Отчет должен включать графический материал, соответствующий разделу, и необходимые текстовые пояснения. В методических рекомендациях подробно рассмотрены соответствующие примеры проведения расчетов.

Ниже приводятся разделы, которые должны быть включены в отчет, в скобках указаны ссылки на подобный графический материал, представленный в данных методических рекомендациях.

В отчет необходимо включить следующее:

– исходные данные к проведению расчета с указанием последних трех цифр номера зачетной книжки (см. раздел 1, таблицы 1.1–1.3);

– построение твердотельной модели исследуемого объекта (см. подраздел 1.1, рисунки 1.1 и 1.2);

– создание конечно-элементной модели рассматриваемой балки с изображением на ней условий закрепления и условий нагружения (см. подраздел 1.1, рисунок 1.12);

– постпроцессорное рассмотрение проводимого исследования, построение эпюр нормальных напряжений и перемещений точек поверхности балки в вертикальном направлении (см. подраздел 1.1, рисунки 1.16 и 1.17);

– проведение расчета балки, используя подходы курса «Сопротивление материалов» (см. раздел 2 с данными соответствующих расчетов);

– сопоставление результатов анализа, выполненных с использованием подхода курса «Сопротивление материалов» и метода конечных элементов (см. раздел 2).

В конце отчета лабораторной работы необходимо указать ФИО студента, выполнившего работу, дату и подпись, а также ФИО преподавателя, проверившего отчет (см. образец ниже).

_____ ФИО студента	_____ подпись, дата
_____ ФИО преподавателя	_____ подпись

9 Оформление отчета по проведению сопоставительного анализа стойки на устойчивость

Целью данной лабораторной работы является составление отчета о проведенных расчетах стойки на устойчивость (см. разделы 2 и 3).

Отчет должен включать графический материал, соответствующий разделу, и необходимые текстовые пояснения. В методических рекомендациях подробно рассмотрены соответствующие примеры проведения расчетов.

Ниже приводятся разделы, которые должны быть включены в отчет, в скобках указаны ссылки на подобный графический материал.

В отчет необходимо включить следующее:

– исходные данные к проведению расчета с указанием последних трех цифр номера зачетной книжки (см. подраздел 3.1, таблицу 3.1). Показать форму поперечного сечения стойки, его габаритные размеры и расчетную схему (см. рисунок 3.1);

– построение твердотельной модели исследуемого объекта (см. подраздел 3.1, рисунок 3.2);

– создание конечно-элементной модели рассматриваемой стойки с изображением на ней условий закрепления и условий нагружения (см. подраздел 3.2, рисунок 3.3);

– постпроцессорное рассмотрение проводимого исследования (см. подраздел 3.2, рисунок 3.4);

– проведение расчета стойки, используя подходы курса «Сопротивление материалов» (см. раздел 4 с данными соответствующих расчетов);

– сопоставление результатов анализа, выполненных с использованием подходов курса «Сопротивление материалов» и метода конечных элементов (см. раздел 4).

В конце отчета лабораторной работы необходимо указать ФИО студента, выполнившего работу, дату и подпись, а также ФИО преподавателя, проверившего отчет (см. образец ниже).

ФИО студента	подпись, дата
ФИО преподавателя	подпись

10 Оформление отчета по проведению сопоставительного анализа балки, подверженной удару падающим грузом

Целью данной лабораторной работы является составление отчета о проведенных расчетах балки, подверженной удару падающим грузом (см. разделы 5 и 6).

Отчет должен включать графический материал, соответствующий разделу, и необходимые текстовые пояснения. В представленных методических рекомендациях подробно рассмотрены соответствующие примеры проведения расчетов.

Ниже приводятся разделы, которые должны быть включены в отчет, в скобках указаны ссылки на подобный графический материал.

В отчет необходимо включить следующее:

- исходные данные к проведению расчета с указанием последних трех цифр номера зачетной книжки (см. раздел 5, таблицу 5.1, рисунок 5.1). Отдельно показать расчетную схему с характерными данными, форму поперечного сечения с габаритными размерами и произвести соответствующие расчеты (см. подраздел 5.2, рисунки 5.2–5.4);

- построение твердотельной модели исследуемого объекта с проведением соответствующих расчетов (см. подраздел 5.2, рисунок 5.5);

- создание конечно-элементной модели рассматриваемой балки с изображением на ней условий закрепления и условий нагружения (см. подраздел 5.2, рисунок 5.11);

- постпроцессорное рассмотрение проводимого исследования, построение эпюр нормальных напряжений и перемещений точек поверхности балки в вертикальном направлении (см. подраздел 5.2, рисунки 5.12 и 5.13);

- проведение расчета балки, используя подходы курса «Сопроотивление материалов» (см. раздел 6 с данными соответствующих расчетов). Сопоставление результатов анализа выполненных с использованием подходов курса «Сопроотивление материалов» и метода конечных элементов (см. раздел 6, таблицу 6.1).

В конце отчета лабораторной работы необходимо указать ФИО студента, выполнившего работу, дату и подпись, а также ФИО преподавателя, проверившего отчет (см. образец ниже).

ФИО студента	подпись, дата
ФИО преподавателя	подпись

Список литературы

1 **Алямовский, А. А.** SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации / А. А. Алямовский. – Москва: ДМК Пресс, 2015. – 562 с.: ил.

2 NX Advanced Simulation. Инженерный анализ / П. С. Гончаров [и др.]. – Москва: ДМК Пресс, 2012. – 504 с.: ил.

3 **Кузменко, И. М.** Механика материалов: учебное пособие: в 2 ч. / И. М. Кузменко. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2020. – Ч. 1. – 289 с.: ил.

4 **Кузменко, И. М.** Механика материалов: учебное пособие: в 2 ч. / И. М. Кузменко. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2020. – Ч. 2. – 281 с.: ил.

5 **Кривошапко, С. Н.** Сопротивление материалов: учебник и практикум для прикладного бакалавриата / С. Н. Кривошапко. – Москва: Юрайт, 2016. – 413 с.

6 Сопротивление материалов с основами теории упругости и пластичности: учебник / Г. С. Варданян [и др.]; под ред. Г. С. Варданяна. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: ИНФРА-М, 2011. – 638 с.

7 **Миронов, Л. П.** Краткий курс сопротивления материалов: учебное пособие / Л. П. Миронов. – Хабаровск: ДВГУПС, 2011. – 117 с.

8 Компьютерные системы конечно-элементных расчетов: методические рекомендации к лабораторным работам для студентов специальности 1-40 05 01 «Информационные системы и технологии (по направлениям)» дневной и заочной форм обучения: в 2 ч. / Сост. В. А. Попковский, А. Н. Елисеева. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2022. – Ч. 1. – 46 с.