

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ**  
Федеральное государственное  
бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
**«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ  
им. проф. М. А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»**

---

**Сотенко С.М., Матюхина Т.В., Капралов Д.Д.**

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ  
ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ К ВНЕШНИМ  
ВОЗДЕЙСТВИЯМ.  
ЧАСТЬ 1.**

**Учебно-методическое пособие  
по выполнению самостоятельной работы студентов**

**СПб ГУТ)))**

УДК 621.3.049.75

ББК 32.844.1

К71

Рецензент

*Рекомендовано к печати  
редакционно-издательским советом СПбГУТ*

К71 Сотенок С.М., Матюхина Т.В., Капралов Д.Д.  
Обеспечение устойчивости электронных средств к внешним воздействиям. Часть 1: учебно-методическое пособие по выполнению самостоятельной работы студентов / Сотенко С.М., Матюхина Т.В., Капралов Д.Д.; СПбГУТ. – СПб., 2020. – 74 с.

Даны методические рекомендации к самостоятельной работе студентов. Написано в соответствии с программой дисциплины «Обеспечение устойчивости электронных средств к внешним воздействиям».

Предназначено для бакалавров четвёртого курса по направлению подготовки очной формы обучения: 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств».

**УДК 621.3.049.75  
ББК 32.844.1**

© .., 2020

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича», 2020

## ВВЕДЕНИЕ

Выполнение лабораторных работ дает базовые знания по проведению математических расчетов и эксплуатации САПР Solidworks при проведении инженерного анализа в рамках дисциплины ОУЭСкВВ. В ходе выполнения лабораторных работ студенты получают возможность ознакомиться с последовательностью этапов инженерного анализа, приобрести навыки по созданию и проведению экспериментов, с соблюдением некоторых правил произвести математические расчеты собственного устройства, проверить их правильность при помощи симуляции в САПР Solidworks и подготовить отчеты для наглядности результатов.

Инженерный анализ электронных средств проходит в несколько этапов:

1. Получение от заказчика исходных данных: требования к устройству, условия в которых оно должно работать.
2. Предварительная обработка – определение характеристик модели и факторов внешней среды, которые будут на нее воздействовать;
3. Анализ и принятие решения;
4. Обработка результатов.
5. Оформление и передача конструкторской документации (КД) в соответствии с требованиями заказчика.

Лабораторные работы подразумевают, что студент уже ранее работал с используемым программным продуктом и интерфейс будет ему знаком.

## **1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ**

Проводите эксперименты и расчеты над своими ранее сделанными устройствами по предмету ИТПЭС или ОКЭС.

## **2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1. СТАТИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ АМОРТИЗАТОРОВ**

**Цель работы:** определение статических нагрузок на амортизаторы, выбор типоразмера амортизаторов и проверка правильности выбора при помощи моделирования в SolidWorks.

### **Задание на лабораторную работу:**

1. Ознакомиться с порядком выполнения математического расчета на вибрации.
2. Произвести в MathCad расчет типоразмеров амортизаторов для своего устройства.
3. Проверка правильности теоретических расчетов при помощи SolidWorks Simulation.
4. Сохранить отчет из SolidWorks в MS Word.

При выполнении анализа программное обеспечение использует метод конечных элементов (МКЭ). МКЭ — это численный метод анализа технических конструкций. Суть метода заключается в том, что модель разделяется на множество малых частей простых форм, называемых элементами, эффективно заменяющими сложную задачу несколькими простыми, которые необходимо решить совместно. Реакция в любой точке элемента интерполируется из реакции узлов элементов. Каждый узел полностью описывается рядом параметров, зависящих от типа анализа и используемого элемента. Такой метод позволяет быстро и с высокой точностью провести необходимое исследование.

### **Указания к выполнению лабораторной работы:**

#### **2.1. Математические расчеты**

1. Расчет начинают с нахождения положения центра масс блока. Для каждого функционального узла и крупных деталей, входящих в блок находят

положение центра масс. Обычно считают, что для таких изделий положение центра масс функционального узла или детали совпадает с центром симметрии (рис. 1.1). Используя моменты первого рода, находят координаты центра масс блока.

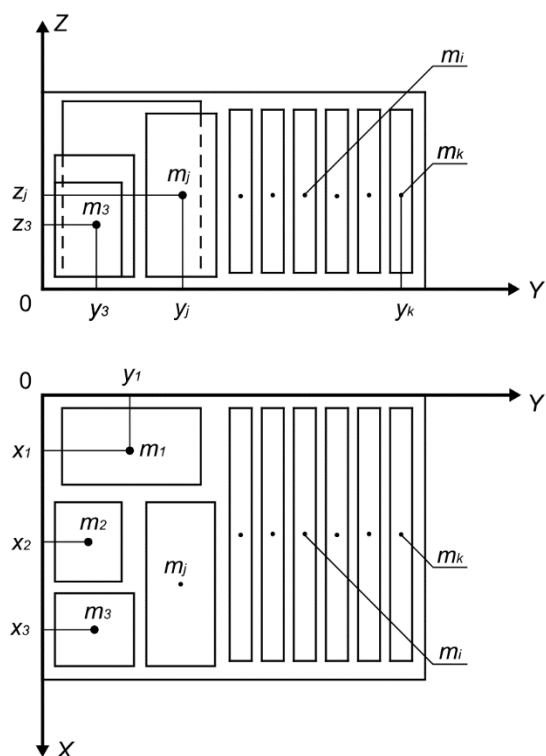


Рис.1.1. К определению положения центра масс блока.

$$X_M = \frac{\sum x_i \cdot m_i}{\sum m_i}; \quad Y_M = \frac{\sum y_i \cdot m_i}{\sum m_i}; \quad Z_M = \frac{\sum z_i \cdot m_i}{\sum m_i}.$$

где  $x_i, y_i, z_i$  - координаты центров масс функциональных узлов и деталей, входящих в блок;

$m_i$  - массы этих изделий.

2. Наиболее часто используют вариант симметричного расположения амортизаторов на блоке РЭС. (рис. 1.2). Амортизаторы располагают на блоке таким образом, чтобы проекция амортизаторов на плоскость  $XU$  не выходила за контур проекции блока.

Определяют координаты центра жесткости амортизаторов, используя моменты первого рода.

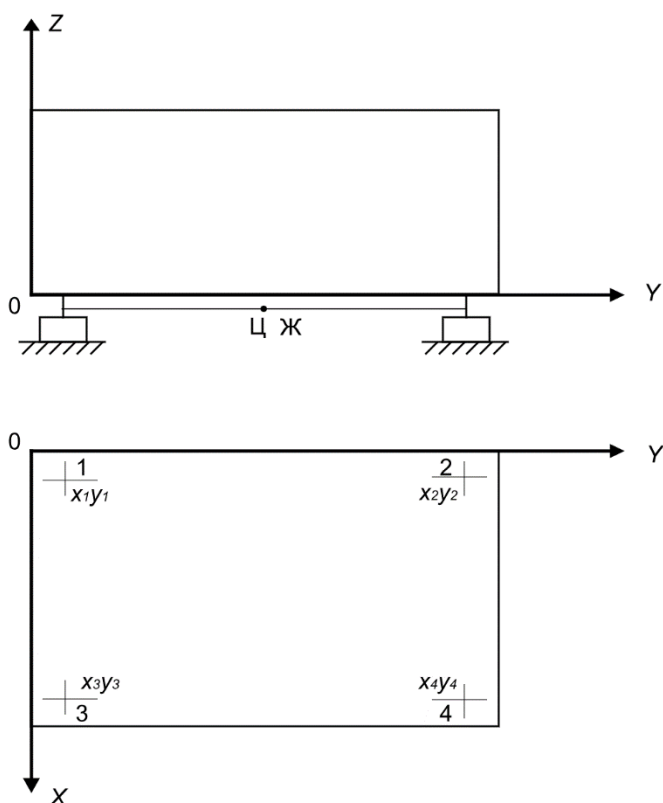


Рис.1.2. Схема расположения амортизаторов на блоке РЭС.

$$X_c = \frac{\sum c_{xi} \cdot x_i}{\sum c_{xi}}; \quad Y_c = \frac{\sum c_{yi} \cdot y_i}{\sum c_{yi}}; \quad Z_c = \frac{\sum c_{zi} \cdot z_i}{\sum c_{zi}}$$

Где  $x_i, y_i, z_i$  - координаты размещения амортизаторов;

$\sum c_{xi}, \sum c_{yi}, \sum c_{zi}$  - суммарная статическая жесткость амортизаторов в направлении соответствующих координат;

$\sum c_{xi} \cdot x_i, \sum c_{yi} \cdot y_i, \sum c_{zi} \cdot z_i$  - статические моменты жесткости амортизаторов относительно координатных плоскостей.

3. Условиями статического равновесия системы амортизации будут

$$\sum p_i = G$$

$$\sum p_i \cdot x_i = G; \sum p_i \cdot y_i = 0; \sum p_i \cdot z_i = 0;$$

$$\sum p_i \cdot x_i \cdot y_i = 0; \sum p_i \cdot x_i \cdot z_i = 0; \sum p_i \cdot y_i \cdot z_i = 0;$$

где  $p_i$  - весовая нагрузка, приходящаяся на  $i$  – й амортизатор.

$G$  - вес блока.

Блок устанавливается на носители без перекосов, поэтому  $Z=0$  тогда получаем:

$$\sum P_i = G; \sum p_i \cdot x_i = 0; \sum p_i \cdot y_i = 0;$$

4. Задаются координатами размещения амортизаторов. Получают систему из четырёх линейных уравнений:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ y_1 & y_2 & y_3 & y_4 \\ x_1 \cdot y_1 & x_2 \cdot y_2 & x_3 \cdot y_3 & x_4 \cdot y_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

5. Решая эту систему (например, с помощью программы MathCAD) относительно нагрузок на амортизаторы, находят статические нагрузки на амортизаторы:  $p_1; p_2; p_3; p_4$ .

6. По полученным статическим нагрузкам и условиям эксплуатации выбирают типоразмер амортизатора.

При несовпадении центра масс блока с центром симметрии, статическая нагрузка на амортизаторы будет разная и, следовательно, осадка однотипных амортизаторов будет различна. Чтобы устранить перекося блока вводят выравнивающие прокладки между амортизатором и корпусом блока.

7. Определяют осадку амортизаторов:

$$\delta_{z_1} = p_1 \cdot c_{z_1}; \delta_{z_2} = p_2 \cdot c_{z_2}; \delta_{z_3} = p_3 \cdot c_{z_3}; \delta_{z_4} = p_4 \cdot c_{z_4}$$



Из полученных значений  $\delta_{z_i}$  выбирают наименьшее и относительно

$\delta_{z_{i \min}}$  определяют толщину выравнивающих прокладок под остальные три амортизатора.

$$\Delta_{\text{пр}} = \delta_{z_i} - \delta_{z_{i \min}},$$

где  $\Delta_{\text{пр}}$  - толщина выравнивающей прокладки под соответствующий амортизатор.

Таким образом, в результате расчёта получают координаты размещения амортизаторов, типоразмер амортизаторов и толщину выравнивающих прокладок.

Следующим шагом является проверка правильности теоретических расчетов и их наглядная визуализация.

## **2.2. Solidworks Simulation**

Для проверки теоретических расчетов было принято решение подвергнуть анализу конструкцию устройства в САПР SolidWorks, а именно воспользоваться встроенным пакетом SolidWorks Simulation. С помощью этого пакета реализуются анализ напряжения, потери устойчивости, оптимизации, а также частотный и термический анализ. Благодаря мощным решающим программам SolidWorks Simulation решение больших задач не займет много времени.

В данной работе нас интересует статический анализ и линейная гармоническая динамика. Т.к. модель обычно подвергается воздействию различных технических сред и условий эксплуатации во время ее срока службы, очень важно учитывать все возможные сценарии нагрузок и граничные условия.

Исследование моделирования определяется следующими факторами:

- Размеры модели;
- Тип исследования и связанные параметры, чтобы определить назначение анализа;
- Свойства материала;
- Нагрузки и граничные условия.

Проведем статический анализ блока по средствам программы SolidWorks Simulation (рис. 1.3).

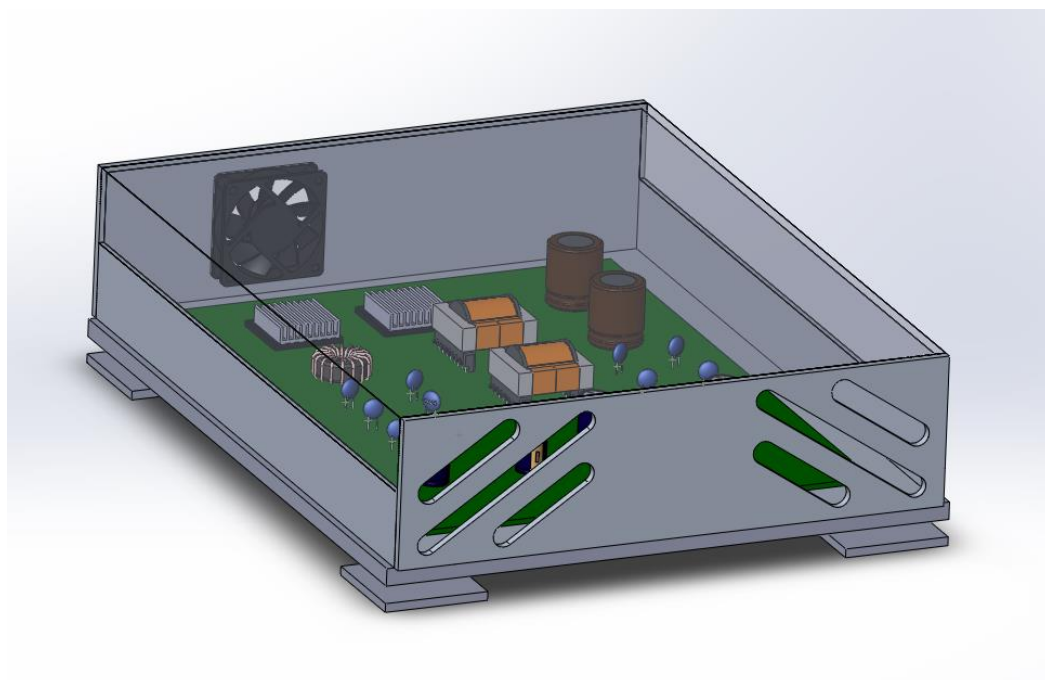


Рис.1.3. Устройство для расчета

1. Создадим статическое исследование, нажав на значок «новое исследование» и выбрав тип «статический» как показано на рисунке 1.4.

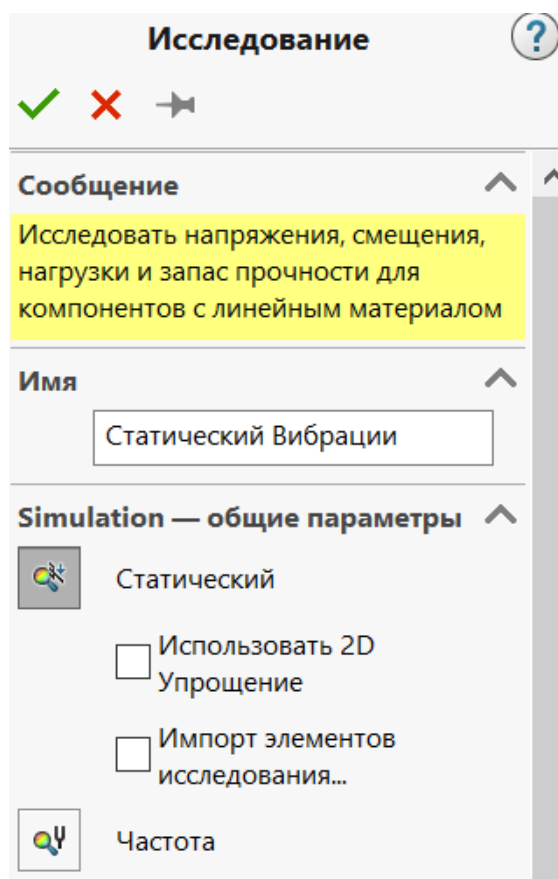


Рис.1.4. Вид окна Property Manager при выборе типа исследования.

2. Следующим шагом является указание материала составных частей устройства и определение его свойств. Этот шаг не обязателен, если свойства материала были определены в системе САПР. В данной лабораторной работе будут использованы стандартные материалы из программной библиотеки (рис. 1.5).

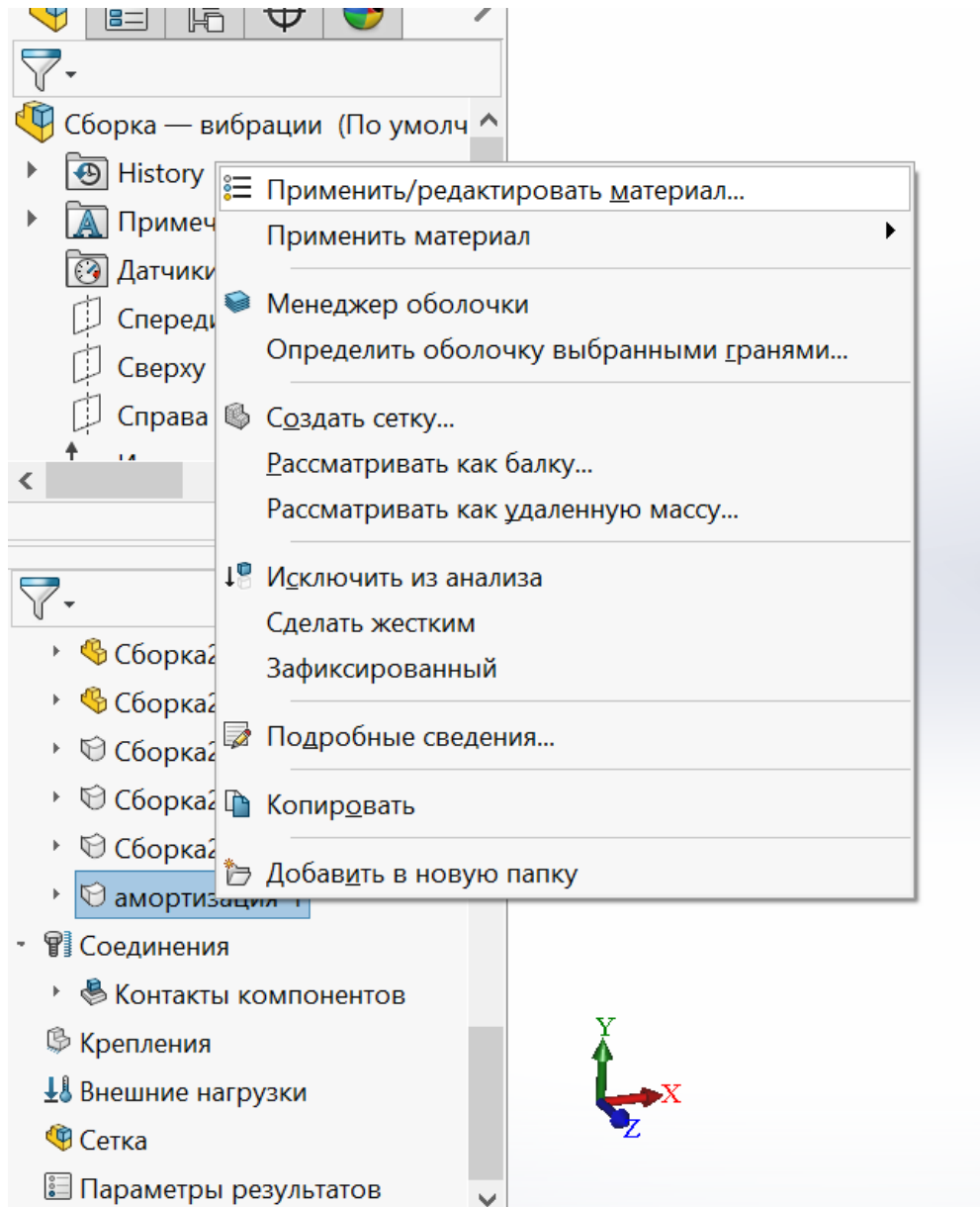


Рис.1.5. Выбор материала для составных частей устройства.

3. Модель разрабатываемого устройства будет состоять из разных материалов (рис. 1.6). Для амортизаторов и соединяющих шпилек зададим материал сталь из библиотеки SolidWorks со следующими свойствами (табл. 1.1):

Таблица 1.1. Свойства материала — сталь

Коэффициент	Значение
Модуль упругости	$2.049999984e+011 \text{ Н/м}^2$

Модуль сдвига	7.999999987e+010 Н/м <sup>2</sup>
Массовая плотность	7850 кг/м <sup>3</sup>
Предел прочности при растяжении	585000002.9 Н/м <sup>2</sup>
Предел текучести	282685049 Н/м <sup>2</sup>
Коэффициент теплового расширения	1.1e-005 К
Теплопроводность	52 W/(м·К)
Удельная теплоемкость	486 J/(кг·К)

Материал

solidworks materials

Сталь

1023 Листовая углеродистая сталь

201 Отожженная нержавеющая сталь

A286 Суперсплав на основе железа

AISI 1010 Сталь, горячекатанная по

AISI 1015 Сталь, холоднотянутая (SS)

AISI 1020

AISI 1020 Сталь, холоднокатаная

AISI 1035 Сталь (SS)

AISI 1045 Сталь, холоднотянутая

AISI 304

AISI 316 Отожженная нержавеющая с

AISI 316 Нержавеющая сталь, лист (SS)

AISI 321 Отожженная нержавеющая с

AISI 347 Отожженная нержавеющая с

AISI 4130 Сталь, отожженная при 865

AISI 4130 Сталь, нормализованная при

AISI 4340 Сталь, отожженная

AISI 4340 Сталь, нормализованная

AISI Тип 316L нержавеющая сталь

AISI Тип A2 Инструментальная сталь

Легированная сталь

Легированная сталь (SS)

ASTM A36 Сталь

Литая легированная сталь

Свойства Таблицы и кривые Внешний вид Штриховка Настройка Данные программного обеспечени

Свойства материала

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

Тип модели:

Единицы измерения:

Категория:

Имя:

Критерий разрушения по умолчанию:

Описание:

Источник:

Sustainability:

Свойство	Значение	Единицы измерения
Модуль упругости	2.049999984e+11	Н/м <sup>2</sup>
Коэффициент Пуассона	0.29	Не применимо
Модуль сдвига	7.999999987e+10	Н/м <sup>2</sup>
Массовая плотность	7858	кг/м <sup>3</sup>
Предел прочности при растяжении	425000003.2	Н/м <sup>2</sup>
Предел прочности при сжатии		Н/м <sup>2</sup>
Предел текучести	282685049	Н/м <sup>2</sup>
Коэффициент теплового расширения	1.2e-05	/К
Теплопроводность	52	W/(м·К)
Удельная теплоемкость	486	J/(кг·К)

Нажмите [здесь](#) для использования SOLIDWORKS Materials Web Portal.

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

Рис.1.6. Свойства материала — сталь.

Все остальные части устройства будут выполнены из материала — ABS, имеющего следующие свойства (табл. 1.2):

Таблица 1.2. – Свойства материала – ABS

<b>Коэффициент</b>	<b>Значение</b>
Модуль упругости	2000000000 Н/м <sup>2</sup>
Коэффициент Пуассона	0.394
Модуль сдвига	318900000 Н/м <sup>2</sup>
Массовая плотность	1020 кг/м <sup>3</sup>
Предел прочности при растяжении	30000000 Н/м <sup>2</sup>
Теплопроводность	0.2256 W/(м·K)
Удельная теплоемкость	1386 (кг·K)

4. Следующим шагом задаются ограничения. В связи с тем, что устройство имеет сложную геометрию, и в дальнейшем будет подвергаться значительным нагрузкам, необходимо задать дополнительные контакты для граней стойки и столика. Для этого в окне настройки контактов необходимо выбрать «поверхности» и задать им тип «связанные» (рис. 1.7).

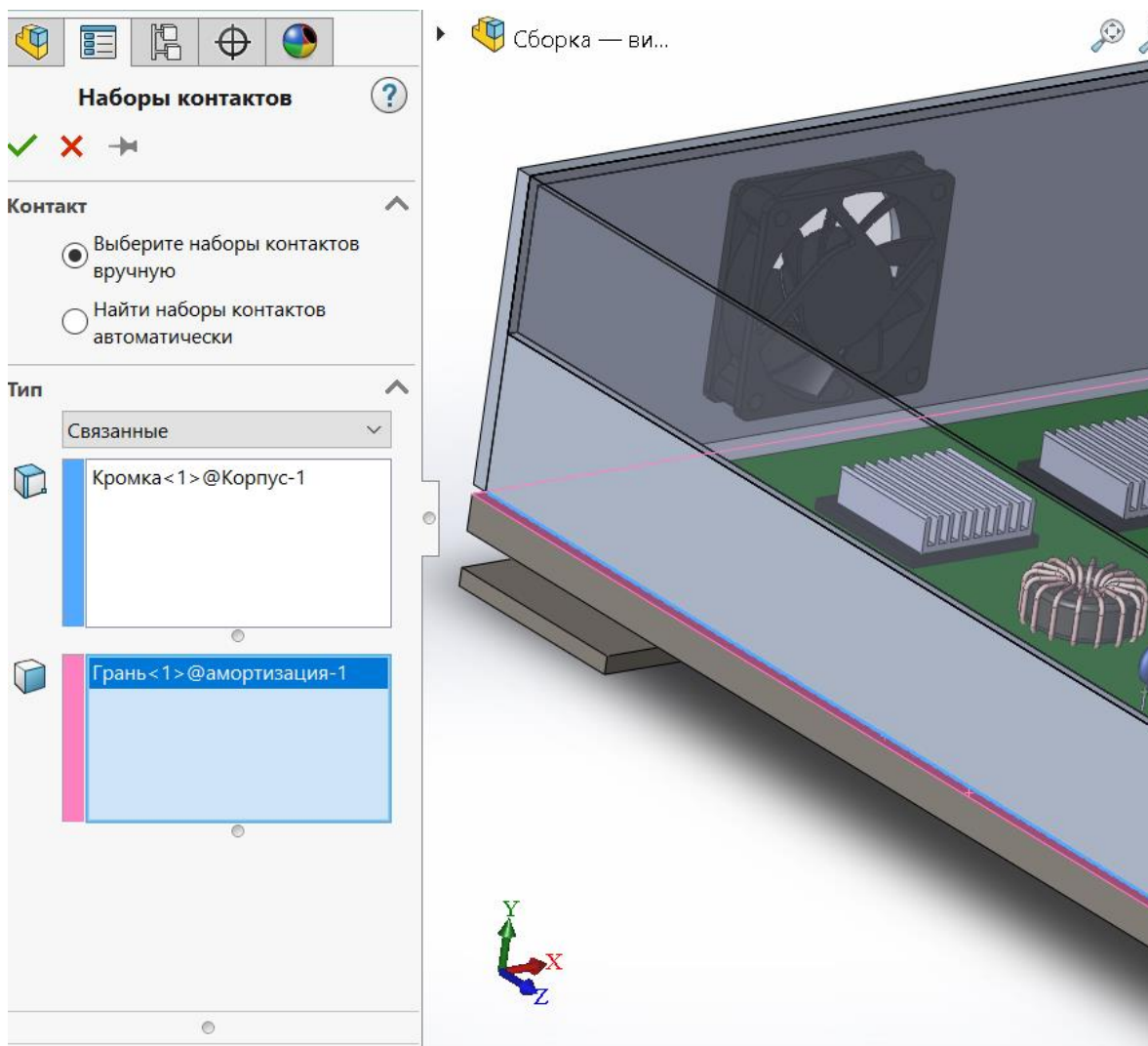


Рис.1.7. Окно настройки контактов.

4. Далее для расчетов необходимо в окне консультанта по креплениям задать расположения и величину жесткости упругого основания. Данное крепление имитирует работу амортизаторов. По результатам теоретических расчетов было принято решение выбрать амортизаторы рождкового типа AP-8 со значением жесткости в вертикальном направлении 10 Н/м. Полученные значение вводим в параметр жесткости. Т.к. горизонтальные колебания нас не интересуют, то значение параметра жесткости по горизонтали оставляем незаполненным (рис. 1.8).

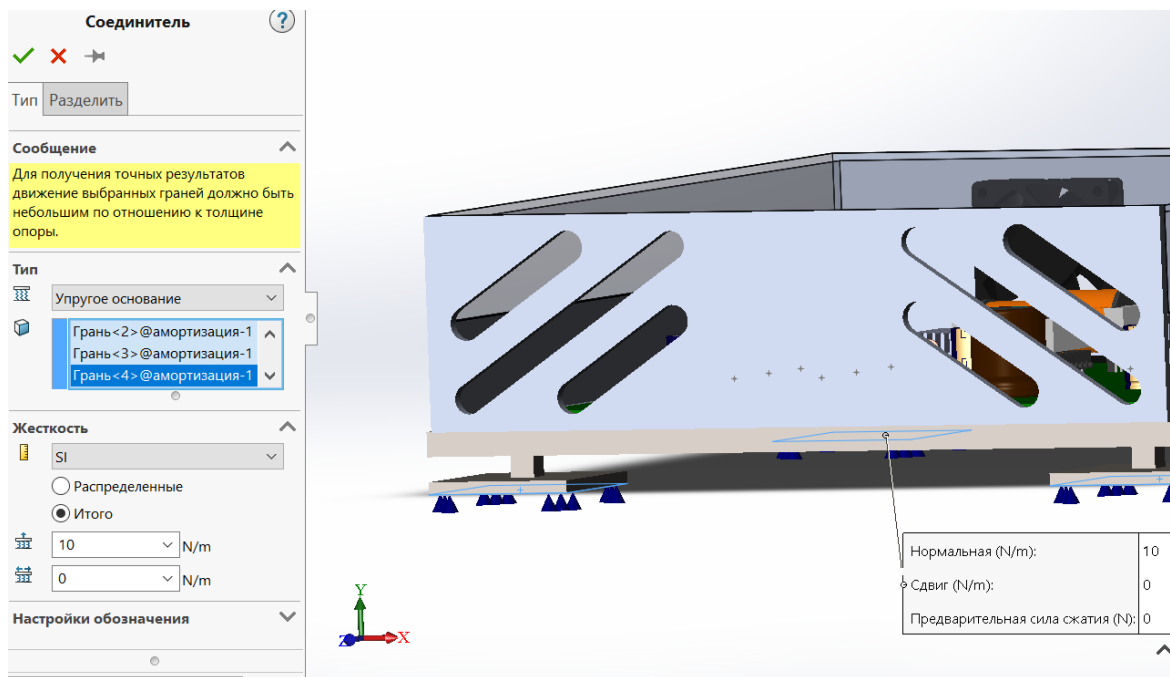


Рис.1.8. Окно настройки креплений.

5. Следующим шагом будет определение параметров нагрузки, воздействующей на устройство. В окне консультанта по внешним нагрузкам необходимо выбрать пункт «распределенная масса» и задать ее свойства. Нужно написать приблизительную массу исследуемого устройства. Эта масса и будет воздействовать на платформу с амортизаторами (рис. 1.9).



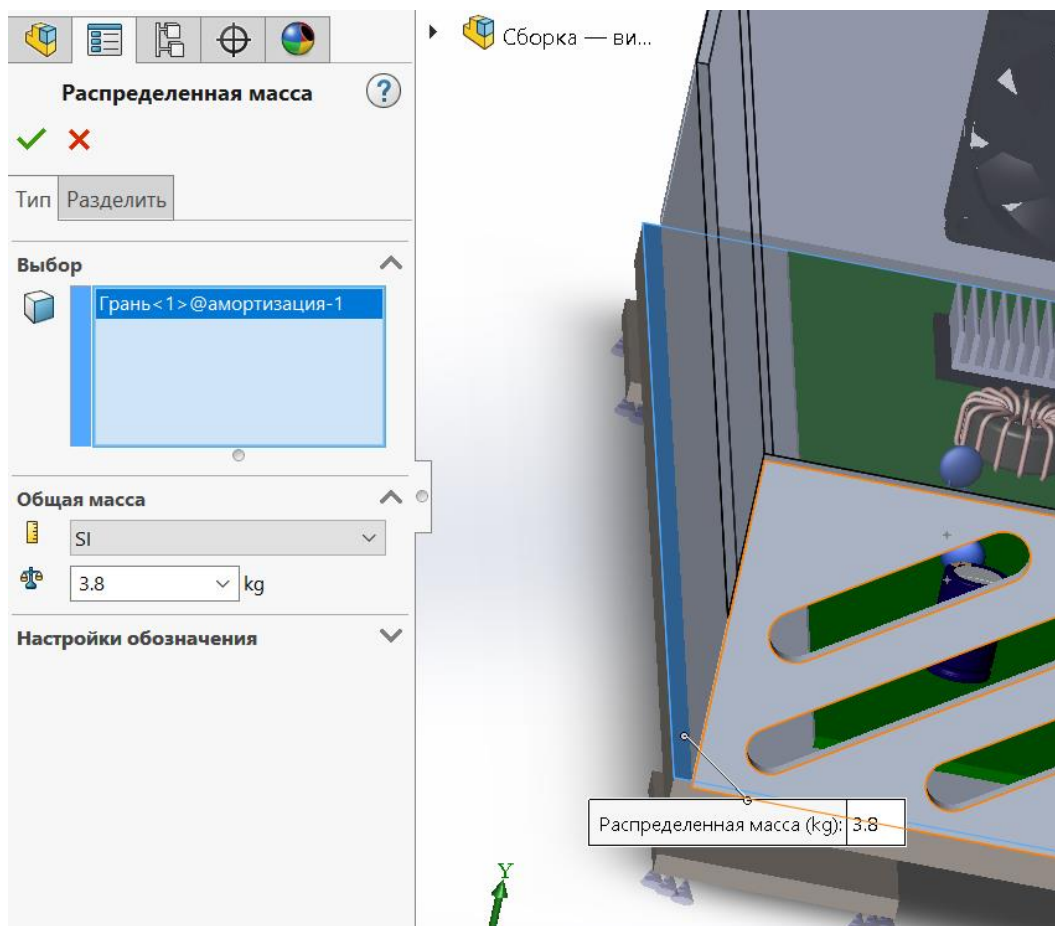


Рис.1.9. Окно настроек распределенной нагрузки.

6. Также при задании распределённой массы необходимо дополнительно задать такое воздействие как «сила тяжести». Этот параметр необходим для дальнейших расчётов и корректного распределения массы (рис. 1.10).

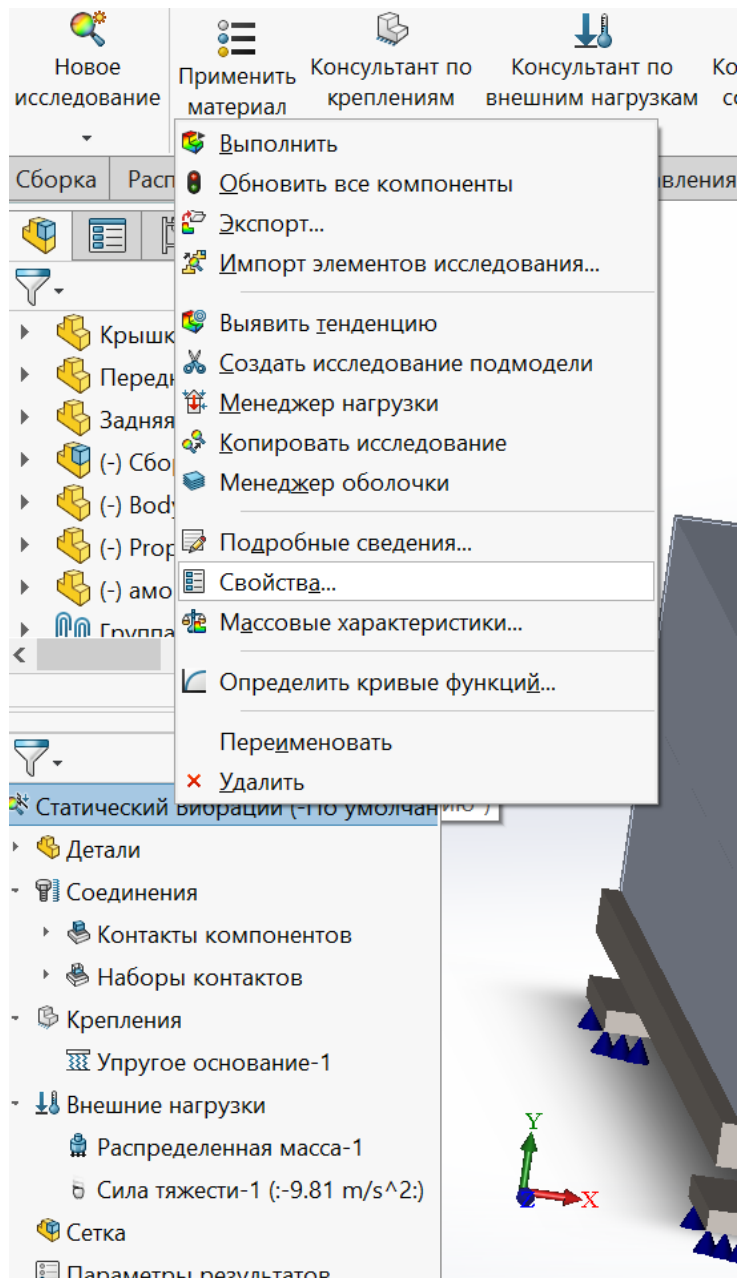


Рис.1.10. Определение свойств исследования.

7. Для максимальной корректности расчетов в нашем случае в разделе свойств необходимо выбрать расчет несовместимых параметров связи «более точно (медленнее)». В качестве решающей программы выбрать «Intel Direct Sparse», т.к. она оптимально подходит для наших расчетов. А также для расчетов нужно использовать податливую пружину для стабилизации модели (рис. 1.11).

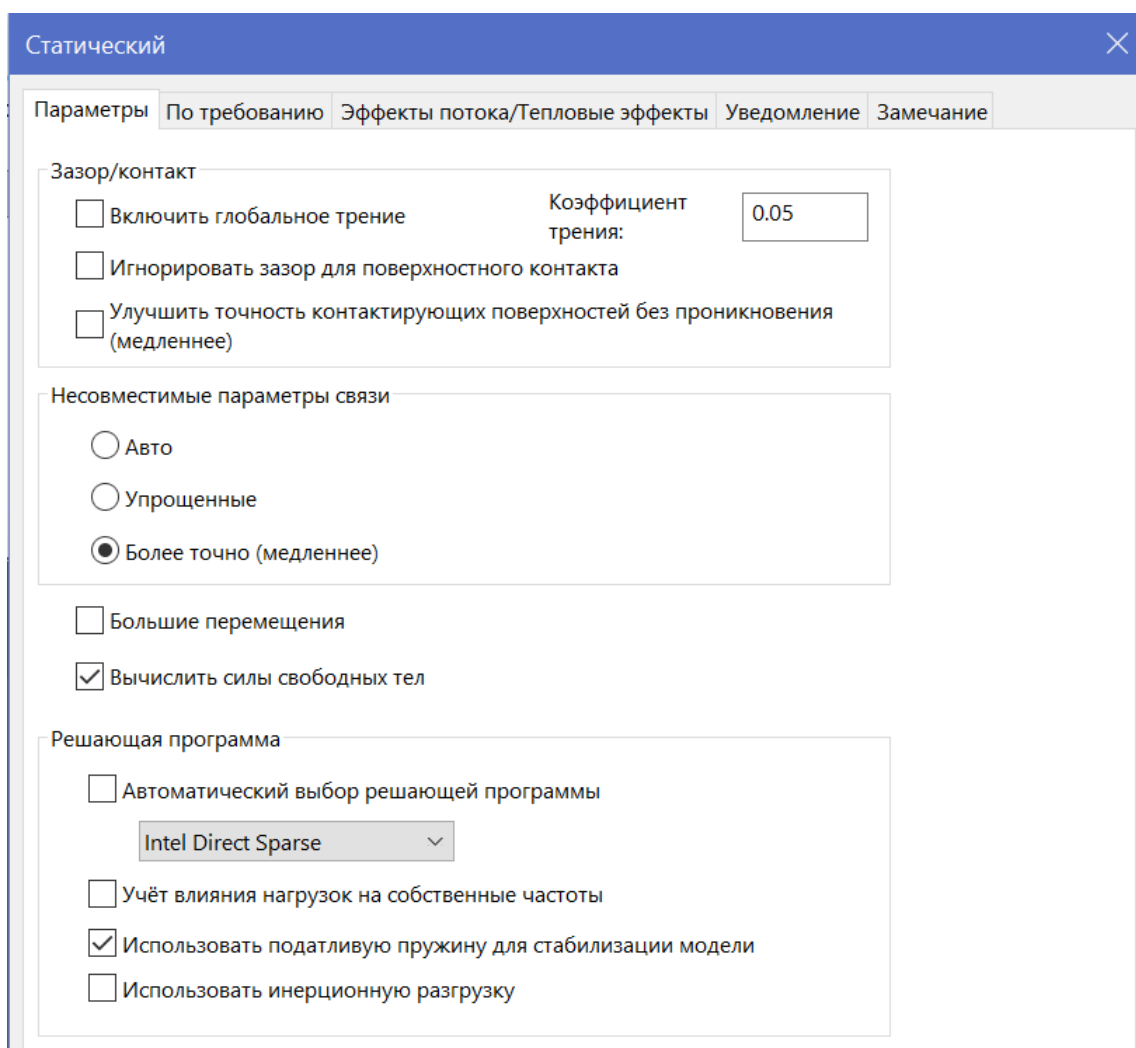


Рис.1.11. Настройки свойств расчета.

8. Программа может автоматически создать сетку для стандартных поверхностей. Однако спроектированная модель имеет сложную геометрию: скругления, фаски, винтовые отверстия. Поэтому параметры сетки необходимо задать вручную. Из представленных параметров сетки нам подходит сетка на основе смешанной кривизны (рис.1.12).

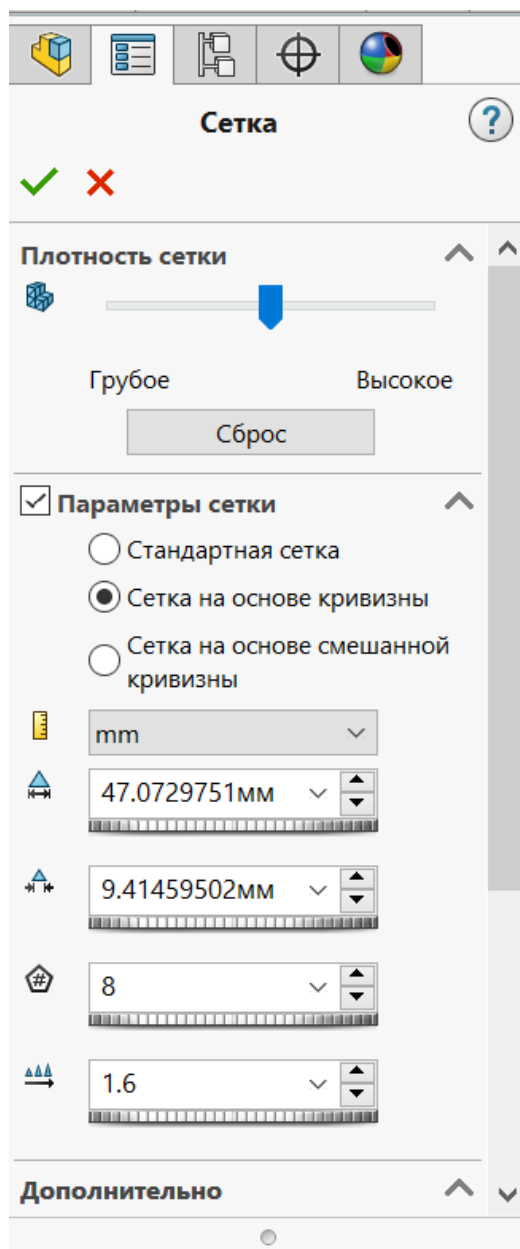


Рис.1.12. Окно настройки параметров сетки.

Создание сетки модели необходимо для ее разделения на множество малых частей, называемых элементами и облегчения последующих расчетов.

Как можем видеть из рисунка 1.13, модель разделена не на равные элементы. Использованный тип сетки учитывает кривизну деталей.

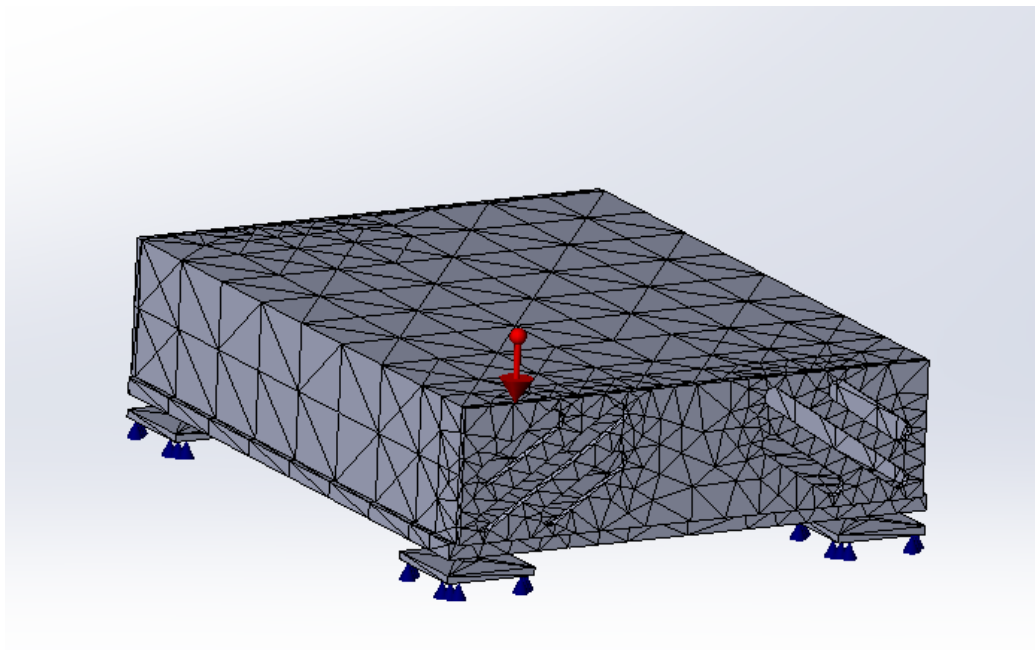


Рис.1.13. Внешний вид модели после создания сетки.

9. И последним этапом является запуск исследования. После окончания анализа можно воспользоваться функцией «отчёт» в меню Simulation. И тогда САПР опубликует документ в Microsoft Word, где подробно покажет все параметры проводимого исследования.

### 3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2. УДАРНАЯ ПРОЧНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ

**Цель работы:** сделать математические расчеты выбранного устройства на ударную прочность и провести исследования прочностных свойств конструкции.

#### **Задание на лабораторную работу:**

1. Ознакомиться с порядком выполнения математического расчета на механические нагрузки.
2. Произвести в MathCad расчет своего устройства.
3. Проверка правильности теоретических расчетов при помощи SolidWorks Simulation.
4. Сохранить отчет из SolidWorks в MS Word.

#### **Указания к выполнению лабораторной работы:**

##### **3.1. Математические расчеты**

Большинство элементов конструкций РЭС могут быть представлены пластинами или балками. К пластинам можно отнести стенки кожухов или корпусов блоков, шасси, печатные платы т.е. такие элементы, у которых размеры длины и ширины одного порядка, а размер толщины значительно меньше. К балкам можно отнести элементы каркаса стоек, блоков, рамки кассет и др. т.е. такие элементы конструкций, у которых два размера поперечного сечения много меньше протяженности этого элемента.

Исходные данные для расчета элементов типа "плата".

$a, b, h$  – геометрические размеры платы;  $a$  – большая сторона, м;

$m_{п}$  – масса платы, кг;

$E$  – модуль упругости материала платы, н/м<sup>2</sup>;

$\rho$  - плотность материала платы, кг/м<sup>3</sup>;

$n_{уд}$  – перегрузка при ударе;

$\tau$  - длительность ударного импульса, сек.

1. Определяют амплитуду ускорения при ударе

$$a_{\max} = n_{уд} \cdot g$$

где  $g$  ускорение силы тяжести.

2. Находят величину скорости в начальный момент удара

$$v_0 = a_{\max} \cdot \tau,$$

или эквивалентную высоту падения

$$H = v_0^2 / 2g$$

3. Находят частоту свободных колебаний  $f_{01}$  (первой гармоники)

$$f_{01} = \frac{c \cdot h}{a^2} \cdot K_M \cdot K_3 \cdot 10^5, \text{ Гц.}$$

$$\text{где } K_M = \sqrt{E_{\pi} \cdot p_c / E_c \cdot p_{\pi}},$$

$E_{\pi}, E_c$  – модули упругости материала платы и стали.

$$K_3 = \sqrt{1 / (1 + m_3 / m_{\pi})}$$

$m_3, m_{\pi}$  – массы элементов и масса платы.

При свободном опирании по контуру и отношении,  $a/b \approx 1$  частотная постоянная будет

$$C = \frac{\alpha_1}{2\pi} \sqrt{\frac{D}{m_{\pi} + m_3}}$$







где  $D = \frac{E \cdot h^3}{12(1-\varepsilon^2)}$  – цилиндрическая жесткость;

$\varepsilon$  – коэффициент Пуассона. Для большинства материалов его величину можно принять равной 0.3.

$\alpha_1$  – коэффициент, зависящий от краевых условий закрепления пластины.

В таблице представлены некоторые схемы закрепления плат и формулы для расчета  $\alpha_1$ .

Таблица 2.1. Схемы закрепления

Схема закрепления	Формула для расчета $\alpha_1$
	$\alpha_1 = 9,87(1 + \beta^2)$
	$\alpha_1 = 22,37\sqrt{1 + 0,48\beta^2 + 0,19\beta^4}$
	$\alpha_1 = 9,87\sqrt{1 + 2,57\beta^2 + 5,14\beta^4}$
	$\alpha_1 = 22,372\sqrt{1 + 0,549\beta^2 + 0,475\beta^4}$
	$\alpha_1 = 15,42\sqrt{1 + 1,19\beta^2 + 2,1\beta^4}$
	$\alpha_1 = 22,37\sqrt{1 + 0,61\beta^2 + \beta^4}$

4. Определяют жесткость платы

$$K = (2\pi \cdot f_{01})^2 \cdot m_{\text{п}}$$



5. Находят статический прогиб платы

$$Z_{ст} = (m_{п} + m_{э}) \cdot g / K$$

6. Максимальный прогиб платы при ударе

$$Z_{max} = \sqrt{Z_{ст}^2 + \left(\frac{V_0}{2\pi} \cdot f_{01}\right)^2}$$

7. Находят полную динамическую деформацию платы

$$Z_{д} = Z_{ст} + Z_{max}$$

8. Эквивалентная сила удара

$$P_{уд} = K \cdot Z_{д}$$

9. Определяют расчетный коэффициент запаса

$$n = n_1 \cdot n_2 \cdot n_3$$

где:  $n_1$  – запас прочности;

$n_2$  – степень ответственности детали;

$n_3$  – однородность механических свойств материала.

Рекомендуется коэффициенты выбирать в пределах:  $n_1 = 1,25 \dots 1,5$ ;  $n_2 = 1,0 \dots 1,5$ ;  $n_3 = 1,2 \dots 3,0$ . При большем коэффициенте запаса выбирают большие значения коэффициентов.

10. Находят допустимое напряжение в материале платы

$$\sigma_{доп} = \sigma_{п} / n$$

где  $\sigma_{п}$  – предельное допустимое напряжение в материале.

11. Изгибающий момент, действующий на плату

$$M_{и} = P_{уд} \cdot a / 4$$

12. Момент инерции сечения платы

$$J = b \cdot h^3 / 12$$

13. Момент сопротивления изгибу пластины

$$W=J/(0,5h)$$

14. Напряжение, возникающее в материале платы

$$\sigma_{и}=M_{и}/W$$

15. Сравнивают расчетное значение  $\sigma_{и}$  в материале платы с допустимым значением  $\sigma_{доп}$  для данного материала (с учетом коэффициента запаса). Если выполняется условие  $\sigma_{и} \leq \sigma_{доп}$ , то конструкция способна выдержать действующую ударную нагрузку. В случае  $\sigma_{и} > \sigma_{доп}$  необходимо принять меры по увеличению жесткости платы (это могут быть следующие решения: увеличить толщину платы, ввести ребра жесткости, изменить материал платы и пр.).

Расчет балочных конструкций проводится по той же схеме, только при определении частоты собственных колебаний балки следует воспользоваться выражением

$$f = \frac{\lambda_i^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{E \cdot J}{\rho \cdot F}}$$

где  $\lambda_i$  – корень частотного уравнения, характеризующий форму колебаний и способ крепления концов балки.

$\lambda_i = i \cdot \pi$  – для балки с шарнирным закреплением концов;

$\lambda_i = (2i - 1) \cdot \pi/2$  – консольное крепление балки;

$\lambda_i = (2i + 1) \cdot \pi/2$  – жесткое крепление концов балки,

$i$  – номер тона колебаний.

Если на балке имеются сосредоточенные массы  $m_i$ , то расчетная масса  $m$  находится

$$m = m_0 + \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n x_i \cdot m_i$$

где  $l$  – длина балки;

$x_i$  – расстояние от начала координаты (точка крепления балки) до соответствующей массы  $m_i$ .

### 3.2. SolidWorks Simulation

Предлагается провести проверку для расчета на прочность конструкций деталей и сборок.

1. Для начала откроем деталь, которую мы хотим анализировать (рис. 2.1).

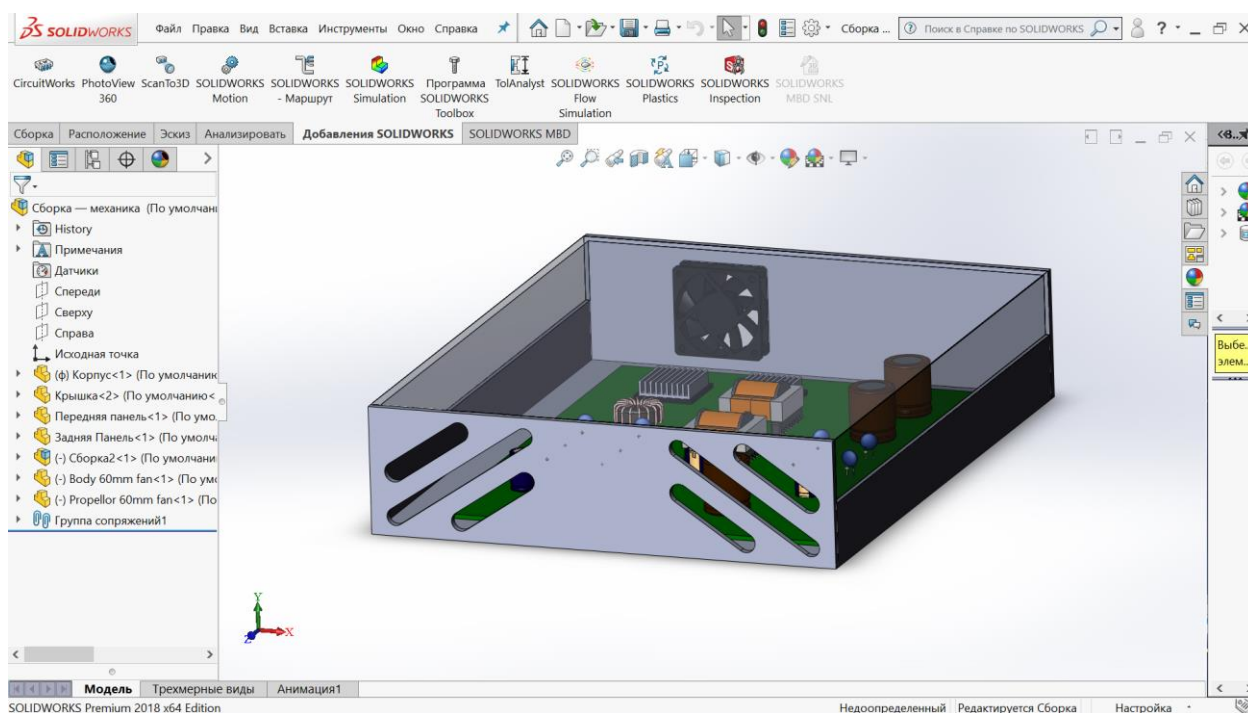


Рис.2.1. Конструкция деталей и сборок «Преобразователя напряжения».

2. Нажмём на вкладку Simulation. «Консультант исследования — новое исследование — статический анализ» (рис. 2.2).

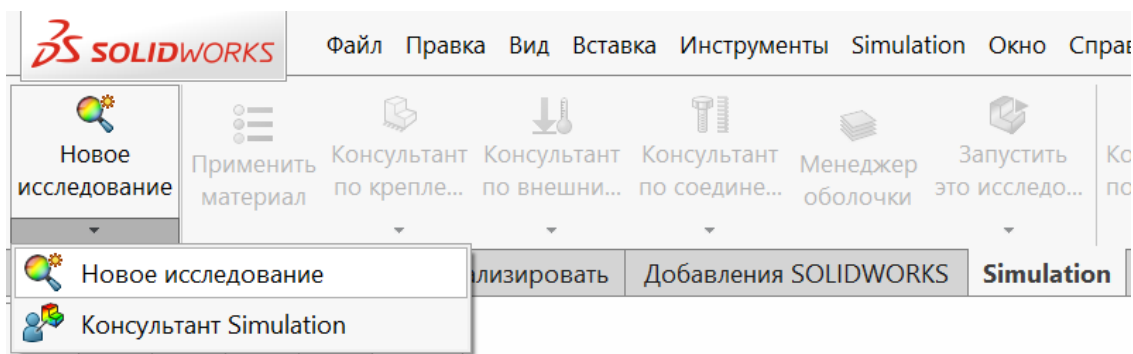


Рис.2.2. Опция главного меню для SolidWorks Simulation.

3. Открываем панель типов исследований «Simulation – Исследование». Выбираем для первого приближения «Статическое» и подтверждаем создание исследования (рис.2.3).

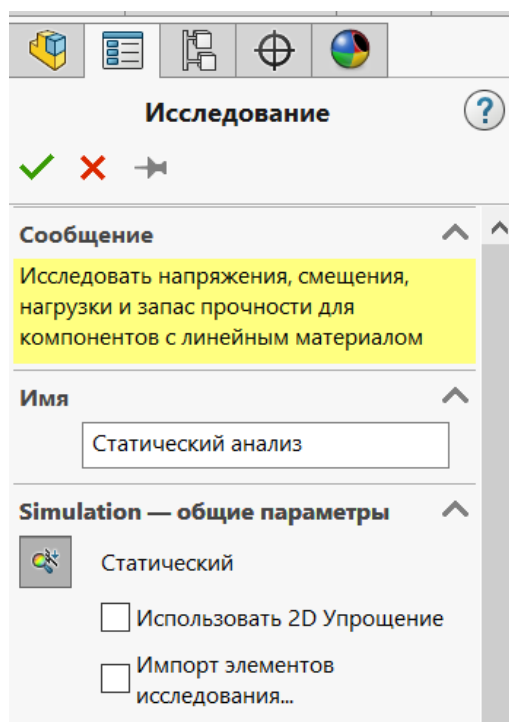


Рис.2.3. Панель типов исследований.

4. Слева под браузером появится меню исследования, содержащее в себе несколько пунктов, о каждом из которых стоит поговорить отдельно. Для начала нужно выбрать материал, из которого изготовлена деталь (рис. 2.4).

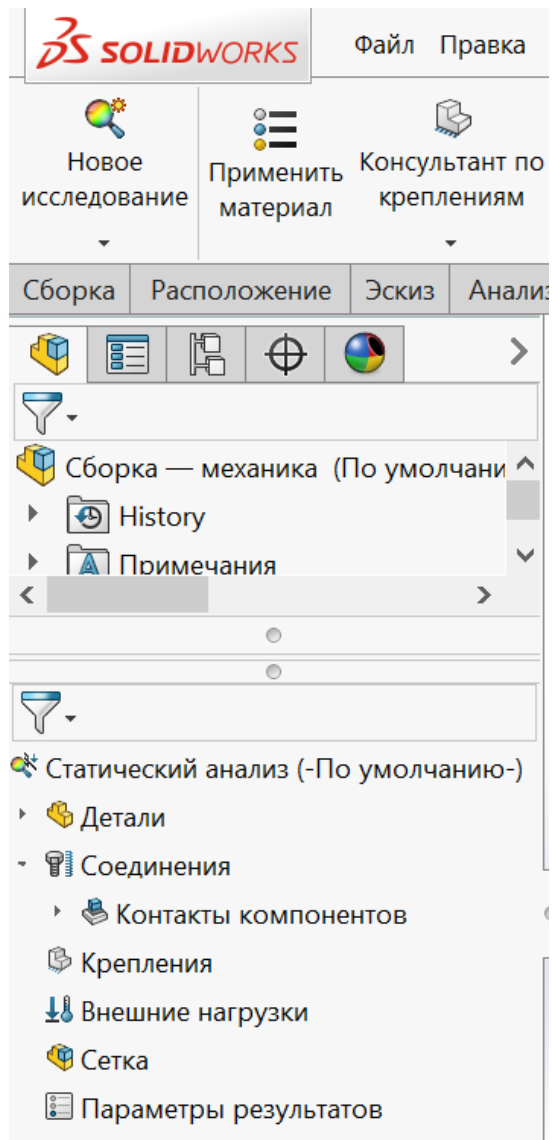


Рис.2.4. Меню исследования.

5. Чтобы применить материал к детали, выберите необходимую деталь в меню исследования и нажатием правой клавиши вызовите дополнительное меню. Применить/редактировать материал – применить (рис. 2.5).

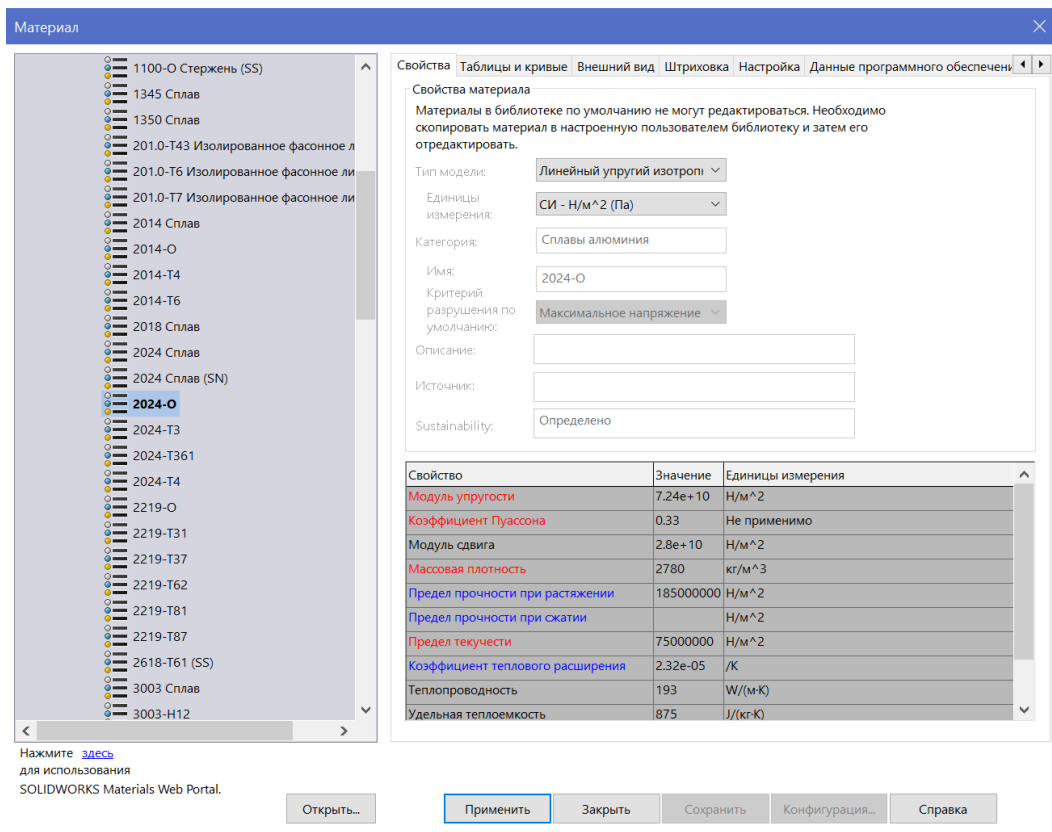


Рис.2.5. Применение материала.

6. Произведем выбор креплений, соединений, нагрузок. На панели установок данного типа исследования указываем тип контактов компонентов, условия крепления элементов сборки, схему внешней нагрузки. Выбор этих пунктов зависит в первую очередь от наших целей (рис. 2.6). Рассмотрим нагрузки при силе. Зафиксируем место контакта с входным и выходным отверстием.

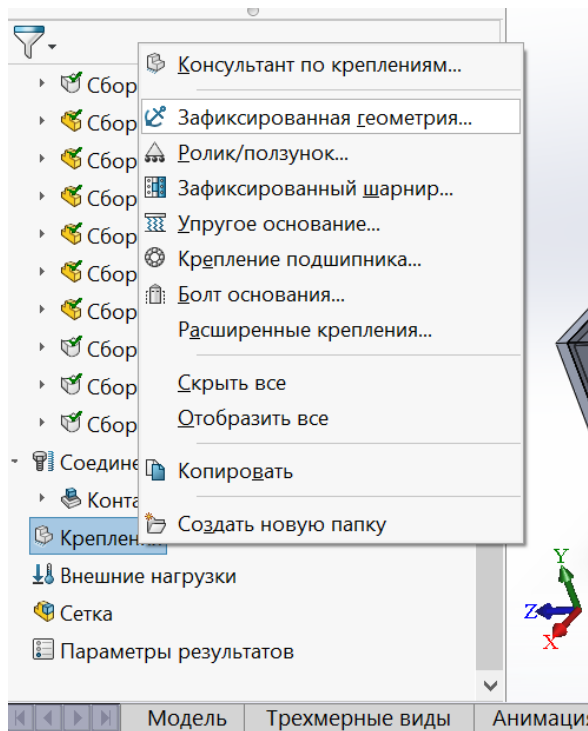


Рис.2.6. Тип крепления.

7. Зафиксируем одну из сторон исходя из конструкции сборки (рис. 2.7).

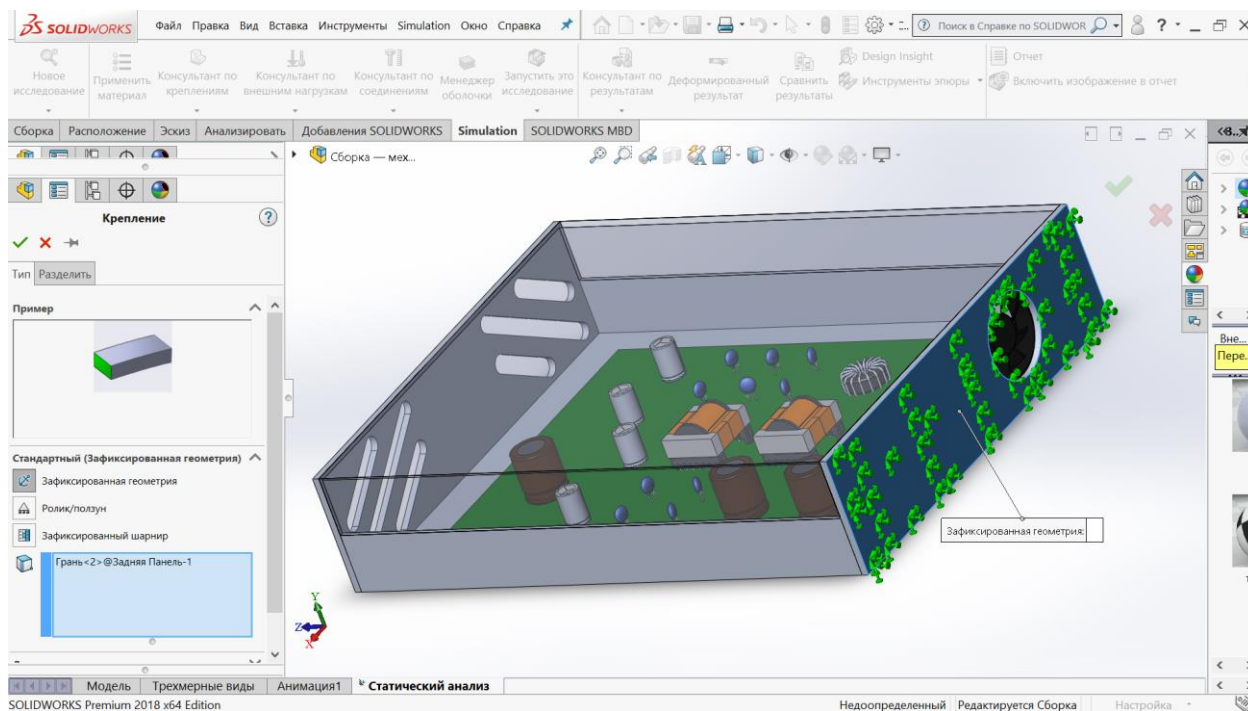


Рис.2.7. Условия крепления.

8. Затем приложим нагрузку на конструкцию, силой равной сто килограммов ( $F=100 H$ ) (рис. 2.8). Для этого в меню исследования выберите «Внешние нагрузки – сила». /Выберем все внешние грани, и любую кромку,

расположенную в нужном нам направлении. Подтвердите операцию, как показано на рисунке 2.9.

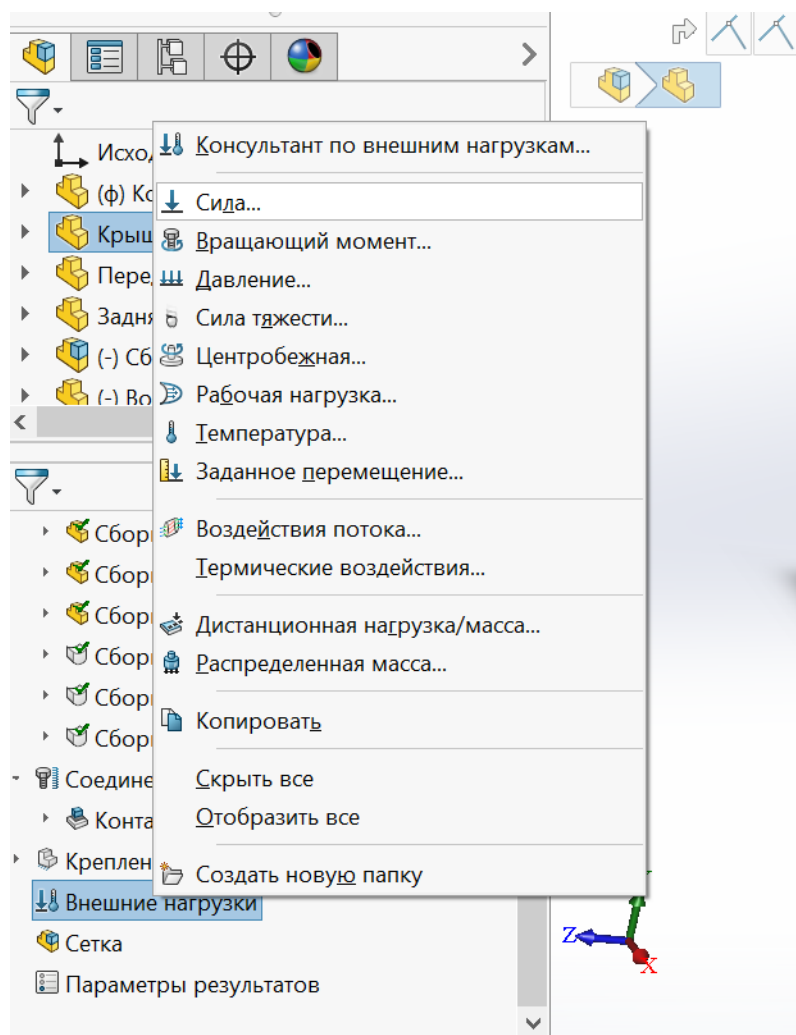


Рис. 2.8. Меню исследования.



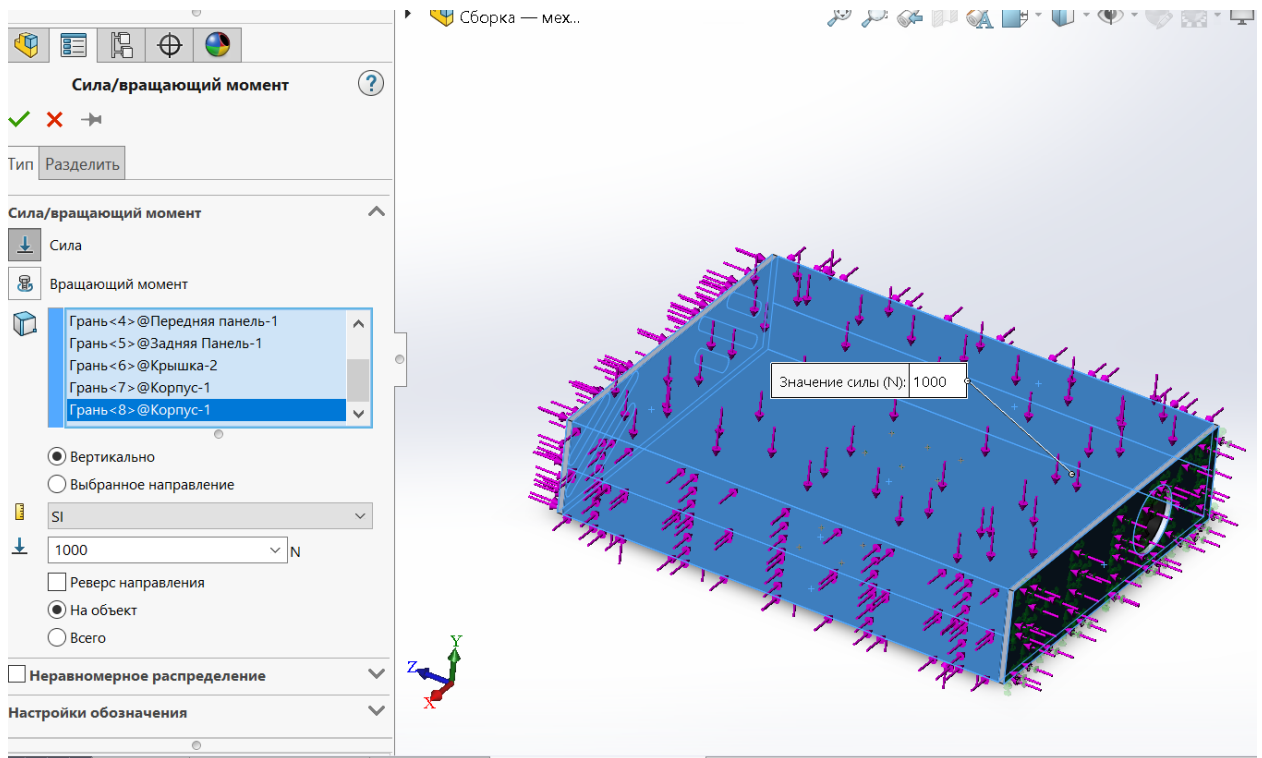


Рис.2.9. Схема внешней нагрузки.

9. Для построения сетки следует оценить однородность геометрических размеров конструкции. Программа позволяет упростить исходную модель, указать элементы для особого управления размерами конечных элементов и условия невязки (рис. 2.10).

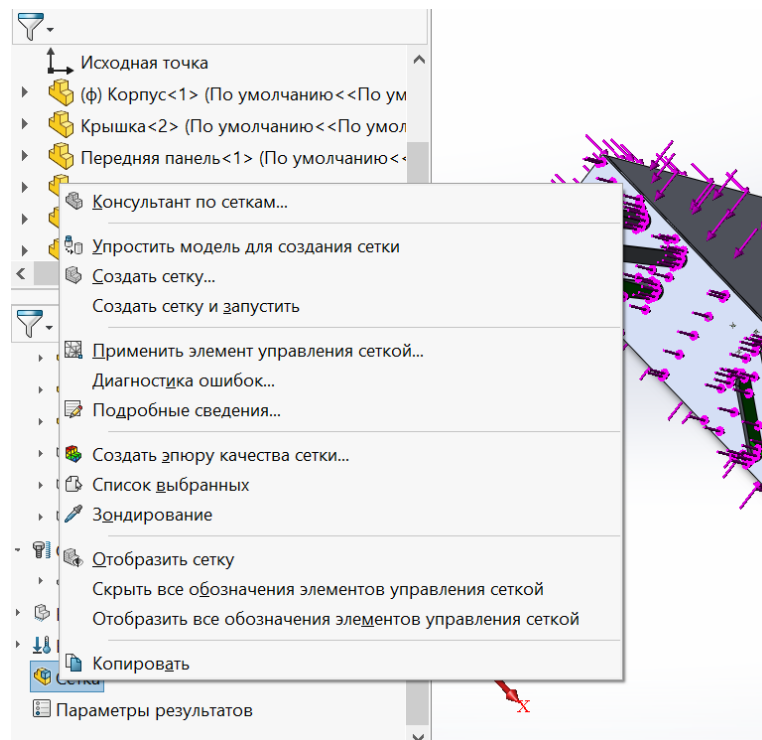


Рис.2.10. Инструменты работы сеткой.

С панели инструментов работы с сеткой переходим к формированию сетки. Подтверждаем операцию без изменения параметров (см. на рис. 2.11 и 2.12).

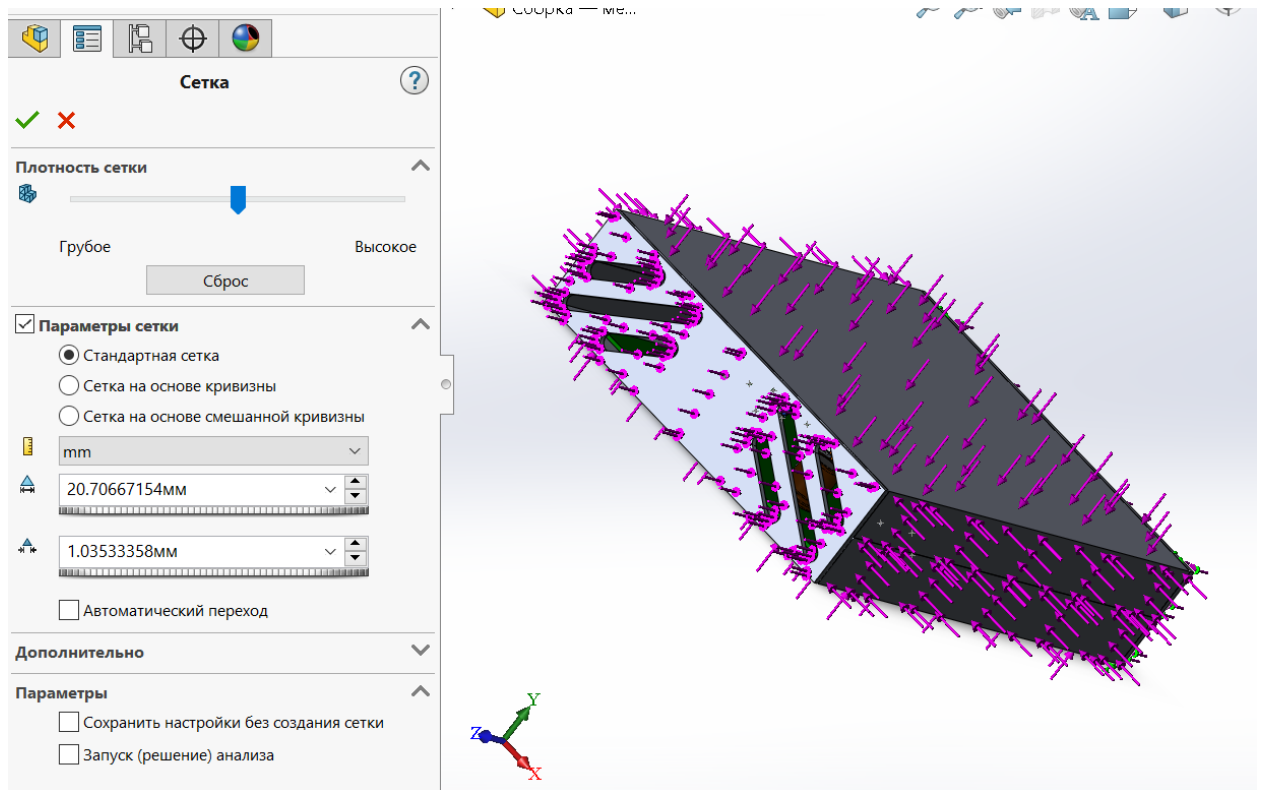


Рис.2.11. Процедура создания сетки

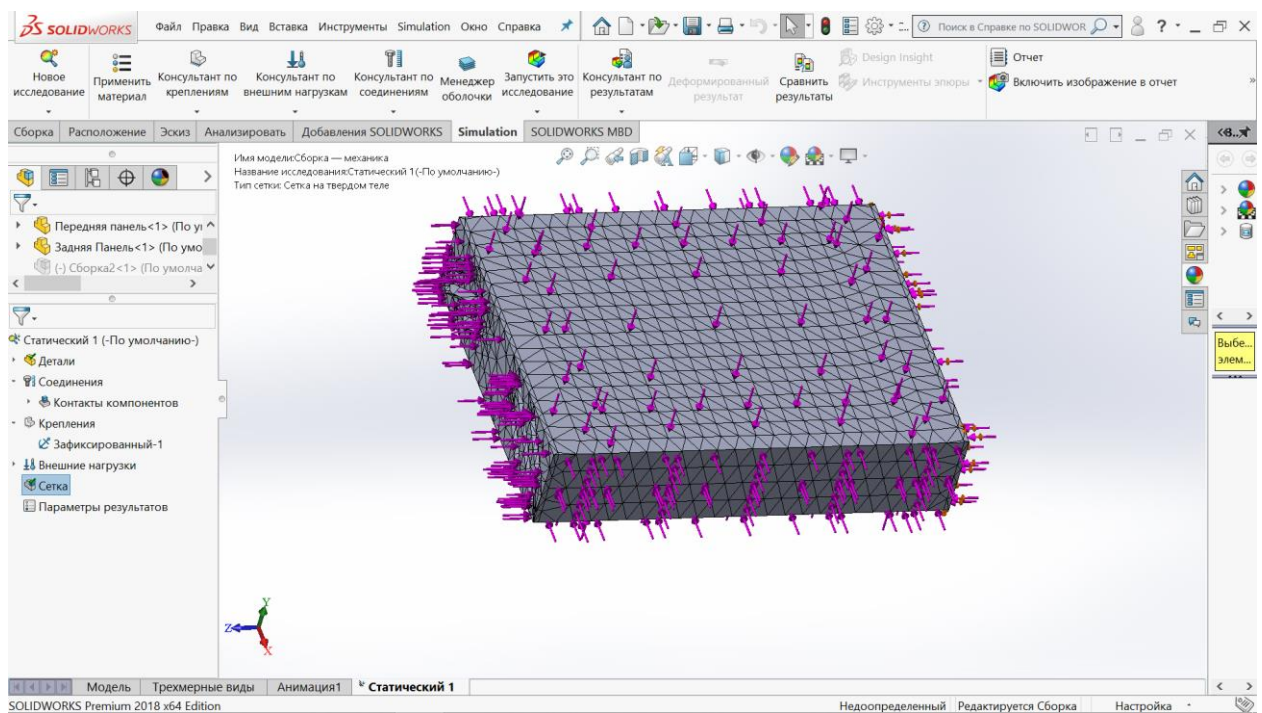


Рис.2.12. Результат создания сетки.

10. Производим запуск решения сформированной задачи на рисунке 2.13 и 2.14.

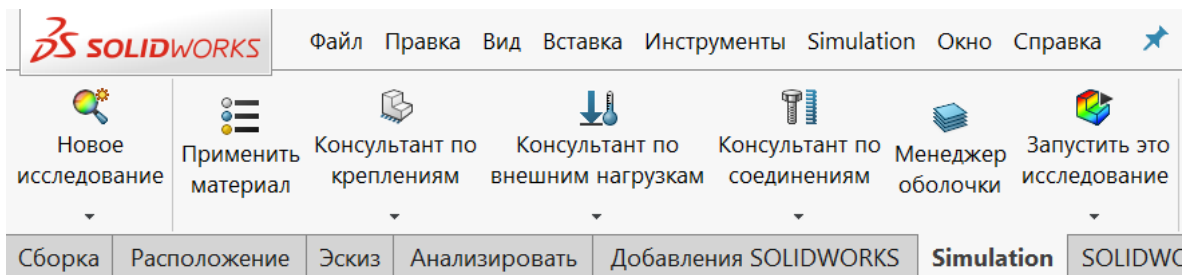


Рис.2.13. Запуск решения задачи.

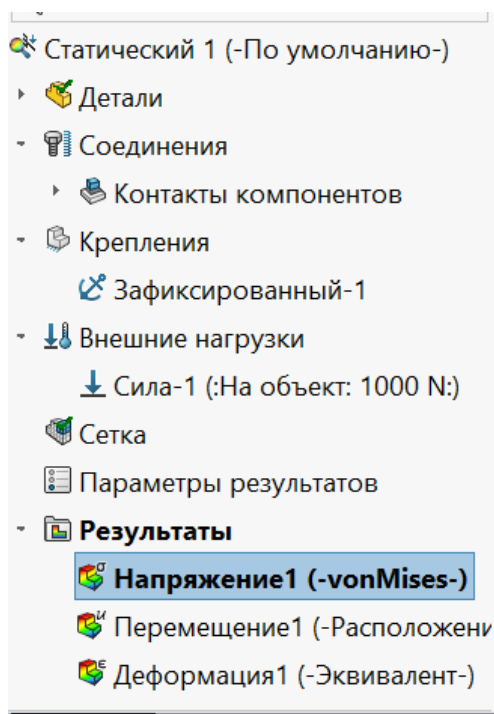


Рис.2.14. Результат анализа.

11. Результаты решения показаны на рисунках ниже. Во вкладке результаты мы можем посмотреть разные параметры анализа: напряжение, перемещение, деформация. Для каждого вида анализа набор результатов будет разный (см. на рис. 2.15-2.17).

Тип эпюры: Статический узловое напряжение Напряжение1  
Шкала деформации: 52.5852

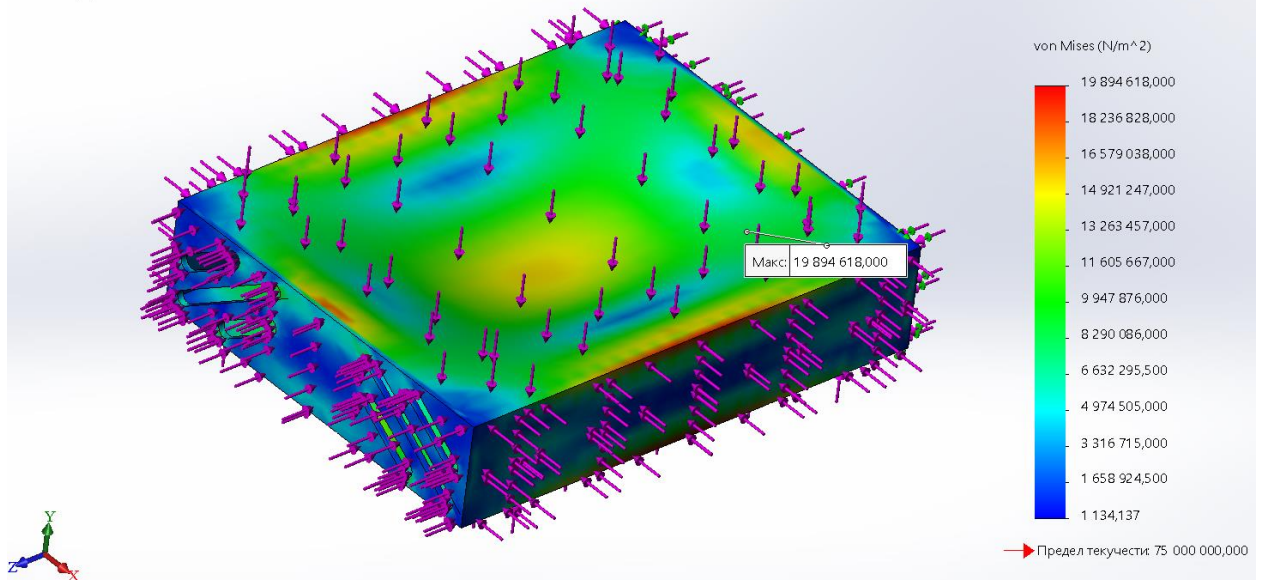


Рис.2.15. Эпюра напряжений.

Максимальное напряжение составляет 19 МПа.

Тип эпюры: Статическое перемещение Перемещение1  
Шкала деформации: 52.5852

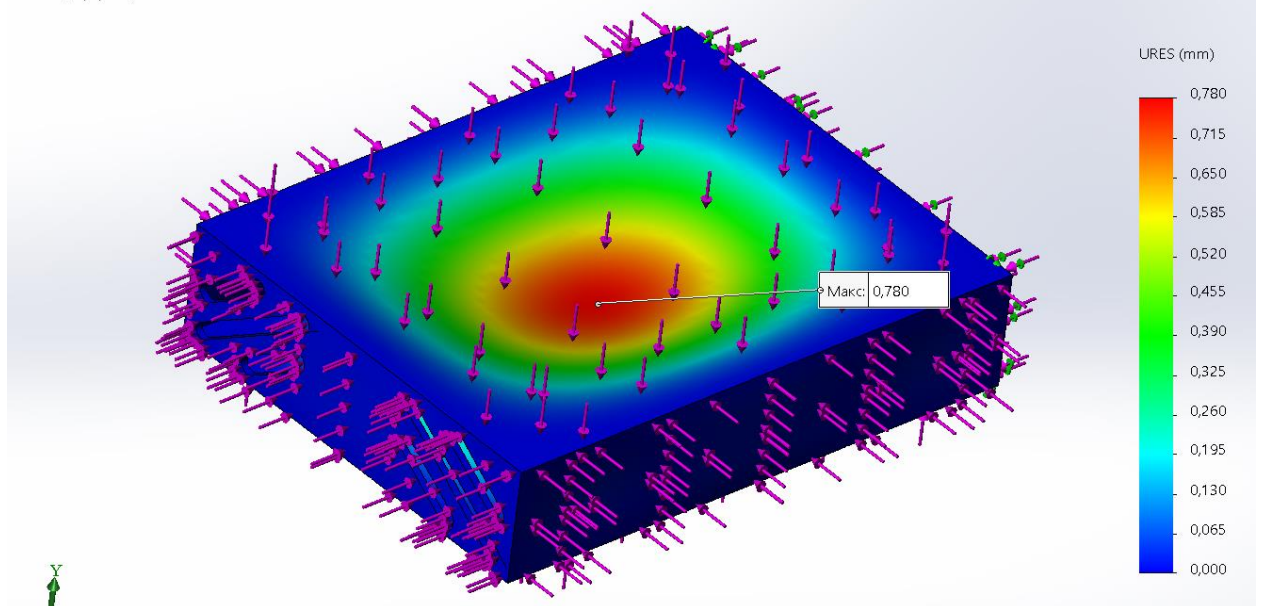


Рис.2.16. Эпюра перемещений.

Максимальное перемещение составляет 0,78 мм.



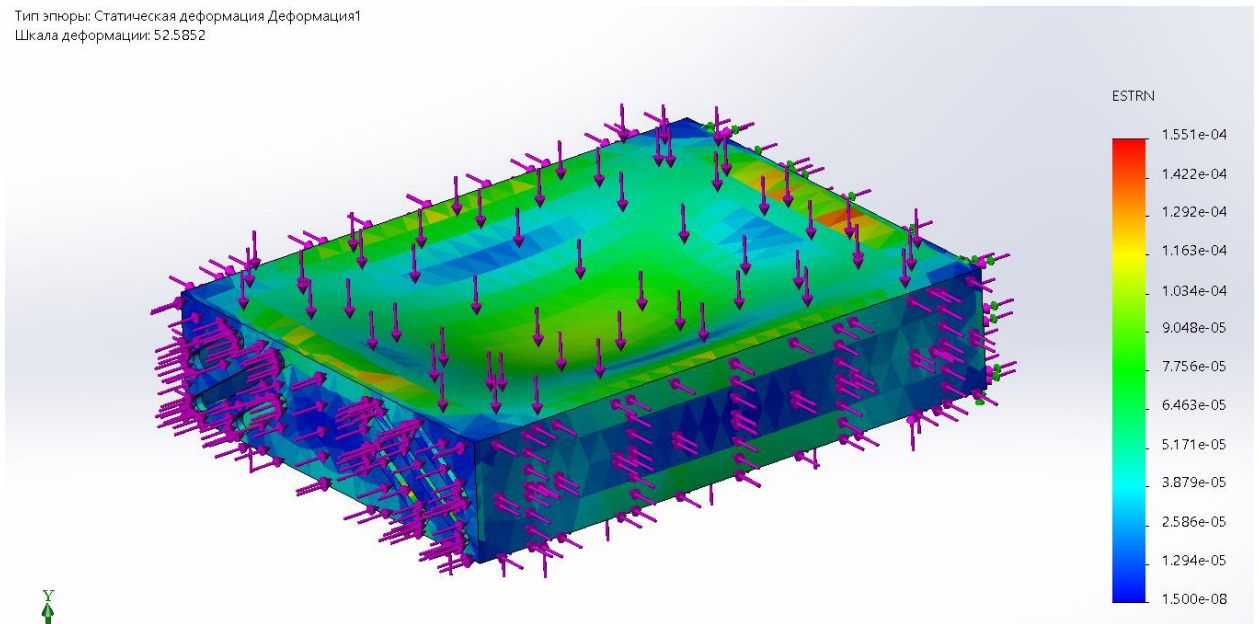


Рис.2.17. Эпюра деформаций.

Справа располагается шкала, на которой цветом обозначены значения действующих в детали напряжения. Красным цветом обозначено более напряженное состояние материала, а синим менее напряженное состояние материала. Исходя из изображений результата и шкале напряжений, мы видим, что наша деталь выдержит заданные нагрузки.

12. После окончания анализа следует воспользоваться функцией «отчёт» в меню Simulation. Тогда SolidWorks сгенерирует Microsoft Word документ, где подробно покажет все исследования, которые проводили поэтапно (рис. 2.18).

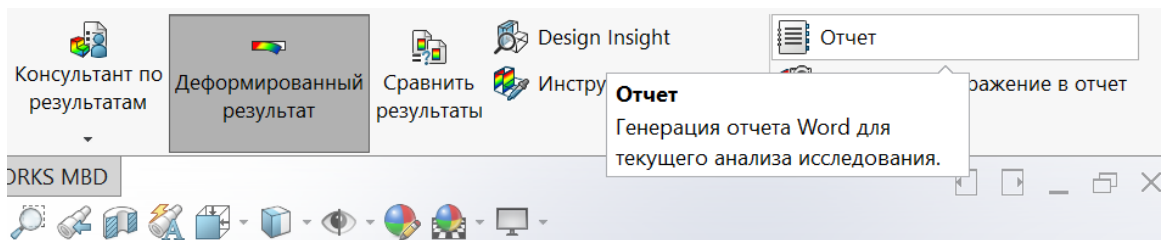


Рис.2.18. Переход к формированию отчета.

После нескольких минут ожидания программа SolidWorks сформирует отчет о проведенном статистическом анализе.

## **4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3. ТЕПЛОВЫЕ РАСЧЁТЫ**

**Цель работы:** сделать математические расчеты на тепловыделение выбранного устройства и проверить результаты при помощи исследования, а также подобрать подходящую систему охлаждения.

### **Задание на лабораторную работу:**

1. Ознакомиться с порядком выполнения математического расчета на нагрев устройства.
2. Произвести в MathCad расчет своего устройства.
3. Проверка правильности теоретических расчетов при помощи SolidWorks Simulation.
4. Подбор подходящей системы охлаждения.
5. Сохранить отчет из SolidWorks в MS Word.

### **Указания к выполнению лабораторной работы:**

#### **4.1. Математические расчеты**

Приведенный расчет справедлив для одиночных блоков в РЭС, имеющих геометрические размеры в пределах 600 мм по трем измерениям. Предполагается, что блок имеет форму прямоугольного параллелепипеда или цилиндра, ось которого может быть расположена горизонтально или вертикально. Внутренняя архитектура блока может представлять собой различные конструктивные варианты. Это может быть шасси с расположенными на нем крупными электрорадиоэлементами, это могут быть кассеты или ячейки с микросхемами и отдельными дискретными элементами, имеющими геометрические размеры, соизмеримые с размерами микросхем.

Кассеты или ячейки могут располагаться горизонтально или вертикально. При вертикальном расположении кассет или ячеек расчет будет справедлив при условии, что расстояние между кассетами не превышает трех

миллиметров. Для горизонтального расположения кассет и ячеек такого ограничения нет.

Исходные данные для расчета

$P$  – суммарная мощность тепловыделения в блоке. Вт;

$L_1, L_2, L_3, - (D, H)$  – геометрические размеры блока прямоугольной формы (в виде цилиндра), м;

$l_1, l_2, l_3 - (d, h)$  – размеры нагретой зоны, м;

$t_c$  – температура окружающей среды, °С.

1. Определяют размеры нагретой зоны.

Для кассет или ячеек, объединенных в единый блок, размеры нагретой зоны определяются максимальными размерами этого блока. Если в качестве несущего элемента используется шасси с расположенными на нем крупногабаритными элементами, то размеры нагретой зоны будут: два измерения совпадают с размерами шасси, а третье будет определяться суммой высот шасси ( $h$ ) и высотой средних размеров элементов, расположенных с одной и другой стороны шасси ( $h_1$  и  $h_2$ ). Средняя высота элементов определяется:

$$h_{1,2} = \frac{\sum_{i=1}^n K_i}{l_1 \cdot l_2}$$

где:  $K_i$  – высота  $i$ -го элемента на поверхности шасси;

$l_1$  и  $l_2$  – размеры шасси;

$n$  – количество элементов с одной стороны шасси.

Высота нагретой зоны будет

$$l_3 = h + h_1 + h_2$$

На рисунке 3.1 представлены расчетные модели блока прямоугольной (а) и цилиндрической формы (б).

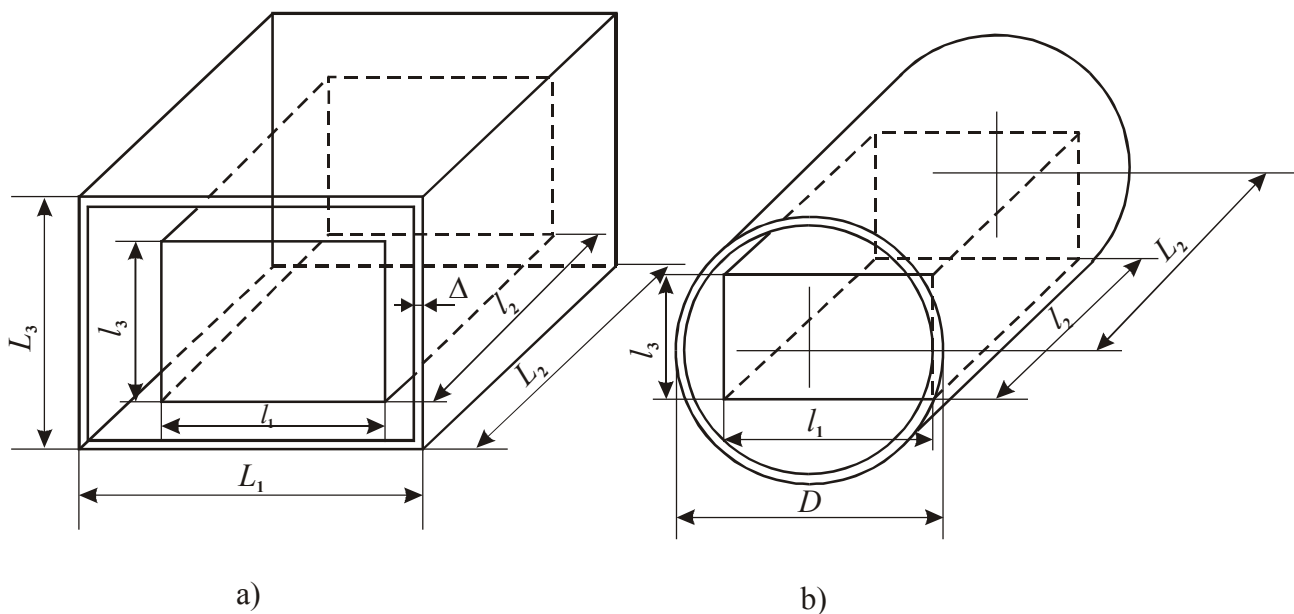


Рис.3.1. Модели блоков.

2. Находят площади боковой (\$S\_6\$), верхней (\$S\_в\$) и нижней (\$S\_н\$) стенок блока

$$S_6=2L_3(L_1+L_2), \quad S_в=S_н=L_1L_2.$$

Область 1 расположена над нагретой зоной, область 2 под нагретой зоной, а область 4 между боковой поверхностью нагретой зоны и кожухом.

3. Определяют площади нагретой зоны, обращенные в области 1, 2 и 4.

$$S_{31}=S_{32}=l_1l_2, \quad S_{34}=2l_3(l_1+l_2).$$

4. Определяют приведенную степень черноты нагретой зоны в областях 1 и 2.

$$\epsilon_{п} = \left[ \frac{1}{\epsilon_3} + \left( \frac{1}{\epsilon_к} - 1 \right) \frac{S_3}{S_к} \right]^{-1},$$

где \$\epsilon\_3\$ и \$\epsilon\_к\$ - степени черноты зоны и кожуха в областях 1 и 2.

Приведенную степень черноты нагретой зоны в области 4 определяют ориентировочно по выражению

$$\epsilon_{п4} = \epsilon_3 \epsilon_к$$



Так поступают в силу того, что размеры нагретой зоны, обращенной в область 4, могут значительно отличаться от размеров шасси. Для блоков с заполнением в виде кассет или ячеек рекомендуется степень черноты боковой поверхность нагретой зоны определять по выражению для  $\varepsilon_n$ .

5. Используют выражение для ориентировочного нахождения тепловой проводимости участка от нагретой зоны к кожуху

$$\sigma_p^1 = 23(L_1 - 2L_4) \cdot (L_2 - 2L_4)$$

где  $L_4$  - толщина корпуса блока. Если блок имеет тонкостенный кожух, то можно толщину  $L_4$  не учитывать.

6. Задаются температурой перегрева кожуха ( $\Delta t_k$ ). Для блоков, имеющих мощность тепловыделения 100...200 Вт при размерах 300...400 мм температура перегрева кожуха лежит в пределах 10...15 °С. Температура кожуха  $t_k = t_c + \Delta t_k$ . Определяющая температура  $t_m = (t_k + t_c)/2$ .

7. Для большинства одиночных блоков РЭС, имеющих небольшую мощность тепловыделения, конвективный теплообмен подчиняется закону  $1/4$  степени. Исходя из этого предположения находят коэффициент теплоотдачи  $\alpha_k$  для всех наружных поверхностей кожуха.

$$\alpha_k = 0,54(\beta \cdot g \cdot P_r)_m^{1/4} \frac{\lambda_m}{\nu_m^{1/2}} \cdot \left(\frac{t_i - t_c}{L}\right)^{1/4} \cdot N,$$

где:  $\beta$  - коэффициент объемного расширения,  $K^{-1}$ ;

$g$  - ускорение силы тяжести,  $m/c^2$ ;

$P_r = \frac{\nu}{a}$  - критерий Прандтля;

$\nu$  - кинематическая вязкость,  $m^2/c$ ;

$a$  - коэффициент температуропроводности,  $m^2/c$ ;

$\lambda$  - теплопроводность,  $Вт/(м*К)$  ;

$t_i$  - температура  $i$  -ой грани кожуха;

$L$  - определяющий размер, м.

Для вертикально ориентированной поверхности – высота, для горизонтально ориентированной поверхности – меньшая сторона.

$N$  – коэффициент ориентации нагретой поверхности.

$N=1$  – для вертикальной стенки;  $N=0,7$  – для нагретой поверхности обращенной вниз;  $N=1,3$  тоже обращенной вверх.

Выражение для  $\alpha_k$  воздуха можно представить в виде

$$\alpha_k = A_1 \cdot \left( \frac{t_i - t_c}{L} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot N$$

Значения  $A_1$  находят из следующих данных для воздуха:

$t_m$ , °C	10	20	30	40	60	80	100
$A_1$	1,4	1,38	1,36	1,34	1,31	1,29	1,27

Для большинства блоков РЭС кожух выполнен из материала с хорошей теплопроводностью, поэтому его можно считать изотермической поверхностью и, следовательно, температура кожуха в любой точке будет одинакова.

7. Определяют коэффициент лучеиспускания

$$\alpha_l = \varepsilon_n \cdot \varphi_{12} \cdot f(t_1, t_2)$$

$$f(t_1, t_2) = 5,67 \frac{\left( \frac{t_1 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_2 + 273}{100} \right)^4}{t_1 - t_2};$$

где:  $t_1$  – температура кожуха,

$t_2$  – температура среды,

$\varphi_{12}$  – коэффициент взаимного облучения. Для одиночного блока  $\varphi_{12}=1$ .

8. Находят полные коэффициенты теплоотдачи с поверхности кожуха.

$$\alpha_B = \alpha_{KB} + \alpha_l$$

$$\alpha_H = \alpha_{KH} + \alpha_l$$

$$\alpha_6 = \alpha_{K6} + \alpha_l$$

9. Тепловая проводимость кожуха в окружающую среду будет

$$\sigma_K = \alpha_B S_B + \alpha_H S_H + \alpha_6 S_6$$

10. Определяют температуру нагретой зоны в первом приближении.

$$t_3^1 = t_c + (t_k - t_c) \left(1 + \frac{\sigma_k}{\sigma_3}\right)$$

11. Находят расчетную мощность нагретой зоны в предположении, что кожух имеет перегрев  $\Delta t_k$  (выбранный).

$$P^1 = \sigma_k (t_k - t_c)$$

На этом заканчивается расчет в первом приближении.

Расчет во втором приближении предполагает определение тепловой проводимости от нагретой зоны к кожуху более точно.

12. Находят коэффициент теплоотдачи в верхней области 1. Поскольку область 1 замкнутая используют конвективно-кондуктивный коэффициент

$$k_i = N \cdot f\left(\frac{h_i}{l}\right) \cdot A_2 \cdot \sqrt[4]{\frac{t_3^1 - t_k}{h_i}}$$

где  $k_i$  – конвективно-кондуктивные коэффициенты верхней и боковой воздушной прослойки между нагретой зоной и внутренней поверхностью кожуха;

$h_i$  – толщина воздушной прослойки между нагретой зоной и кожухом в соответствующей области;

$$l = \sqrt{l_1 \cdot l_2} \quad \text{- для верхней области;}$$

$$l = \sqrt{l_3 \cdot l_2} \quad \text{и} \quad l = \sqrt{l_3 \cdot l_1} \quad \text{- для боковых областей нагретой зоны и кожуха.}$$

Если расстояние между нагретой зоной и кожухом меньше трех миллиметров, то конвекция отсутствует и в этой области передача тепла будет  $k = \lambda_b / h$ .

В области, расположенной под нагретой зоной и кожухом, конвекция всегда отсутствует, и теплопередача определяется теплопроводностью воздуха (среды).

Значения  $A_2$  для воздуха:

$T_m$ °C	0	50	100	200
----------	---	----	-----	-----

$A_2$                       0,63              0,58              0,56              0,44

Величину  $f(h_i/l)$  находят из графика (рис. 3.2).

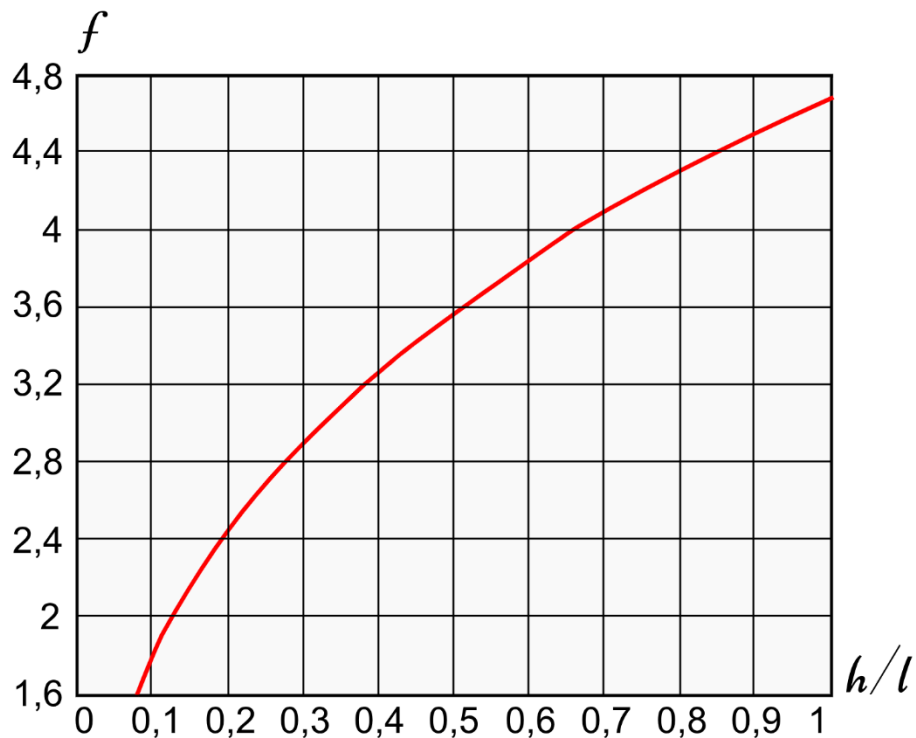


Рис.3.2. К расчёту конвективно-кондуктивного коэффициента.

13. Определяют лучистую составляющую коэффициента теплопередачи областей 1, 2 и 4 для воздушного зазора между боковой поверхностью нагретой зоны и кожухом, при этом величина приведенной степени черноты, полученная при расчете в первом приближении, сохраняется, а коэффициент взаимной облученности принимается равным единице, температура нагретой зоны принимается равной температуре, полученной при расчете в первом приближении.

Получают величины  $\alpha_{л1}$  ;  $\alpha_{л2}$  ;  $\alpha_{к4}$  .

14. Вычисляют полные коэффициенты теплопередачи всех областей

$$K_1 = k_1 + \alpha_{л1} \qquad K_4 = k_4 + \alpha_{л4} \qquad K_2 = \lambda_2 / h_{н} + \alpha_{л2}$$

Для нагретой зоны, расположенной горизонтально.

Для нагретой зоны, ориентированной вертикально, коэффициенты теплопередачи будут:

$$K_1 = k_1 + \alpha_{л1}; \qquad K_2 = k_2 + \alpha_{л2}; \qquad K_4 = (k_1 + k_2) / 2 + \alpha_{л4} .$$

15. Находят температуру нагретой зоны во втором приближении используя выражение:

$$t_3^{\text{II}} = t_c + P \left( \frac{1}{\sigma_3} + \frac{1}{\sigma_k} \right)$$

где:  $P$  – мощность, полученная при расчете в первом приближении;

$\sigma_3$  – тепловая проводимость от нагретой зоны к кожуху, рассчитанная во втором приближении;

$\sigma_k$  – тепловая проводимость от кожуха в окружающую среду полученная при расчете в первом приближении.

16. Сравнивают температуры нагретой зоны, полученные при расчетах в первом и во втором приближениях. Если разница составляет более 10%, то проводят расчет в третьем приближении, при этом значение температуры нагретой зоны вычисляют по выражению:

$$t_p^{111} = (t_3^1 + t_3^{11})/2$$

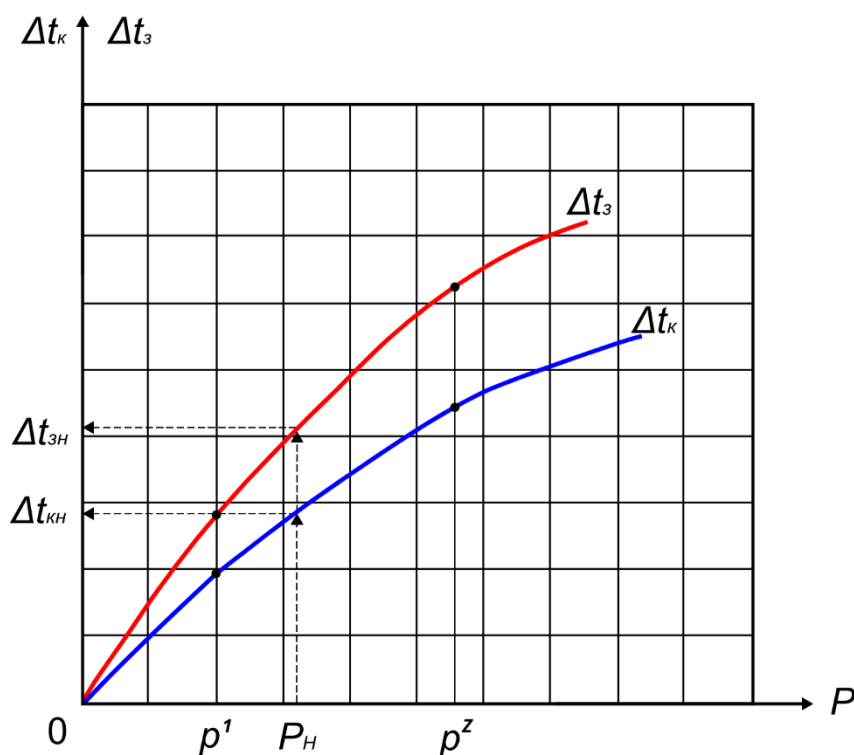


Рис.3.3. Тепловые характеристики

Получают одну точку тепловой характеристики блока  $\Delta t_3=f(P)$  и  $\Delta t_k=f(P)$  (рисунок 3.3). Вторая точка будет начало координат. Для получения

третьей точки задаются другим значением температуры перегрева кожуха и проводят расчет заново. По трем полученным точкам строят характеристики  $t_3=f(P)$  и  $\Delta t_k=f(P)$ . Искомые температуры кожуха и зоны находят по этим характеристикам при мощности, фактически рассеиваемой в блоке ( $P_n$ ). Если температура оказывается выше допустимой для элементов блока, то решают вопрос о применении другого вида охлаждения блока, например, введение жалюзи или перфораций.

#### Температура перегрева перфорированного блока

Для увеличения интенсивности теплоотвода кожух блока перфорируют либо в нем делают жалюзи. При равной площади перфорационных отверстий и жалюзи, последние пропускают несколько меньший поток воздуха. Необходимо иметь в виду, что при перфорированном кожухе внутренний объем блока скорее запылится по сравнению с блоком, имеющим жалюзи. В зависимости от конструктивных особенностей внутреннего строения блока нагретую зону можно представить в нескольких вариантах.

- Основной конструктив блока – горизонтальное шасси с расположенными на нем крупногабаритными теплоизлучающими элементами. Предполагается, что шасси имеет отверстия для прохода воздуха.

- Блок состоит из ряда кассет или ячеек, расположенных горизонтально или вертикально.

Для шасси с крупногабаритными элементами, кассет, расположенных вертикально или горизонтально, размеры нагретой зоны определяются также, как и в случае "герметичного" блока.

На рисунке 3.4 представлена расчетная модель блока с перфорацией и ее эквивалентная схема тепловых проводимостей.

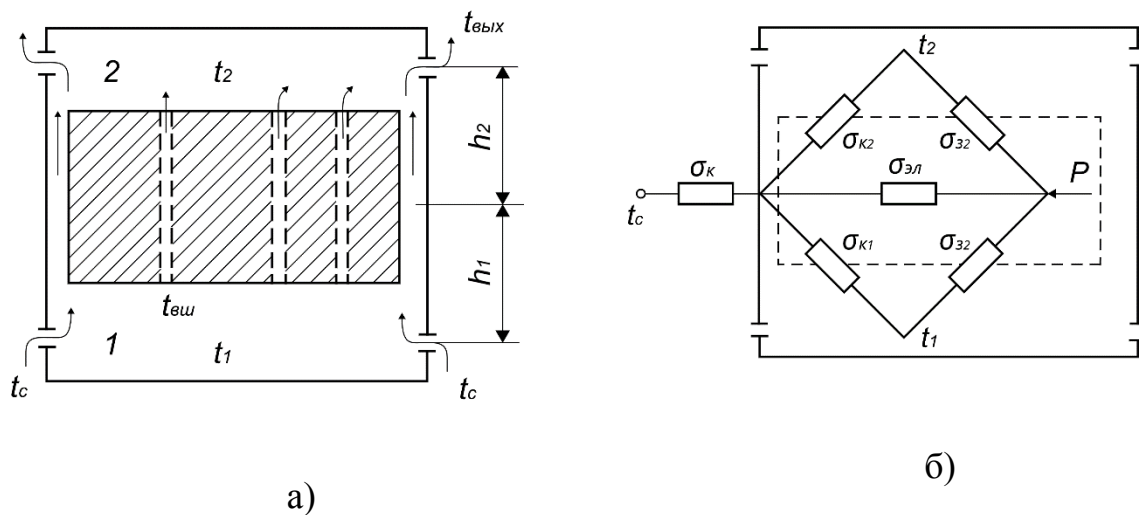


Рис.3.4. Расчётная модель блока (а) и эквивалентная схема тепловых проводимостей (б)

Исходные данные для расчета:

$P$  – суммарная мощность тепловыделения в блоке, Вт;

$L_1, L_2, L_3$  – геометрические размеры блока, м;

$l_1, l_2, l_3$  – размеры нагретой зоны, м;

$S_1, S_2, S_{ш}$  - площади отверстий кожуха в области 1 и 2 а также шасси;  
м<sup>2</sup>;

$t_c$  – температура окружающей среды.

1. Расчет начинают с предположения, что кожух не имеет вентиляционных отверстий, т.е. блок "герметичный". Строят тепловые характеристики по методике расчета температуры нагретой зоны одиночного блока. На рисунке 3.5. представлены эти характеристики.

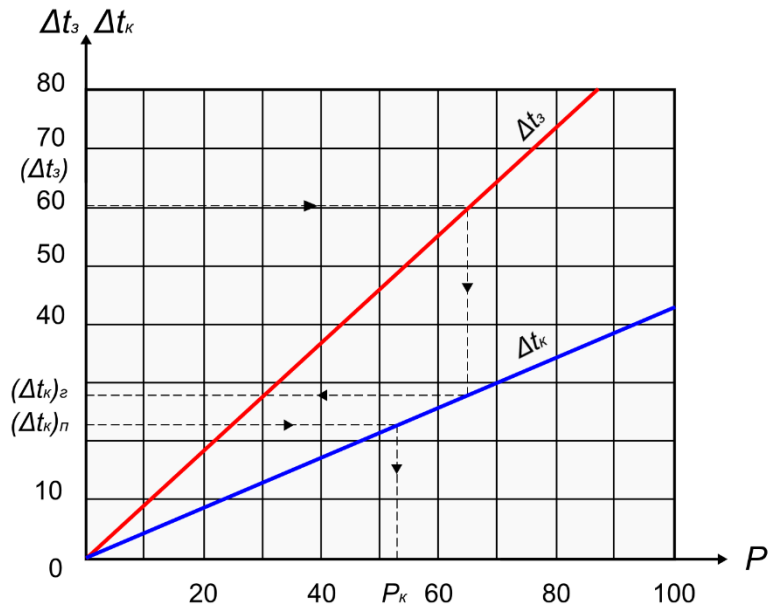


Рис.3.5. К определению температуры перегрева.

2. Задаются перегревом нагретой зоны  $\Delta t_3$  и находят перегрев кожуха герметичного блока для этой температуры. Определяют перегрев кожуха перфорированного блока, используя выражение

$$(\Delta t_k)_п = 0,75(\Delta t_k)_г$$

По графику рис. 3.5 находят мощность  $P_k$  соответствующую этому перегреву.

3. Задаются коэффициентом  $\alpha_{зк}^1$  от зоны к кожуху. Рекомендуется величину  $\alpha_{зк}^1$  в первом приближении выбирать равной  $(5 \pm 1)$ . Вт/м<sup>2</sup>·К.

4. Рассчитывают мощность теплоотвода от зоны к кожуху за счет лучеиспускания

$$P_{зл} = \varepsilon_{п} f(t_3, t_k) \cdot (t_3 - t_k) \cdot \phi_{зк} \cdot S_3,$$

где:  $\varepsilon_{п}$  – приведенная степень черноты нагретой зоны и внутренней поверхности кожуха. Если  $\varepsilon_3$  и  $\varepsilon_k$  имеют значения больше 0,75, то можно



воспользоваться выражением  $\varepsilon_{\text{п}} = \varepsilon_3 \cdot \varepsilon_{\text{к}}$ . Величину  $\varepsilon_{\text{п}}$  можно взять из расчета блока при условии герметичности кожуха;

$\varphi_{\text{зк}} = 1$  – кожух «обтягивает» нагретую зону;

$S_3$  – поверхность нагретой зоны (была определена ранее при расчете "герметичного" блока).

5. Находят температуру  $t_1^1$  воздуха в первой (нижней) области

$$a \cdot t_1^2 - б \cdot t_1 + в = 0$$

$$\text{где } a = 2(S_{31} + S_{\text{к1}}) - \frac{S_{\text{к1}}}{S_{\text{к2}}}(S_{32} + S_{\text{к2}} - S_{31} - S_{\text{к1}});$$

$S_{31}$ ;  $S_{32}$ ;  $S_{\text{к1}}$ ;  $S_{\text{к2}}$  – поверхности нагретой зоны и кожуха в соответствующих областях.

$$б = \left(2 + \frac{S_{\text{к1}}}{S_{\text{к2}}}\right) \cdot A_1 + A_2 - D(S_{32} + S_{\text{к2}} - S_{31} - S_{\text{к1}}) + (S_{31} - S_{\text{к1}} \cdot \frac{S_{32}}{S_{\text{к2}}})t_c$$

$$A_1 = S_{31} \cdot t_3 + S_{\text{к1}} \cdot t_{\text{к}}; \quad A_2 = S_{32} \cdot t_3 + S_{\text{к2}} \cdot t_{\text{к}}; \quad A = A_1 + A_2.$$

$$D = S_{\text{к}} \cdot \frac{t_{\text{к}}}{S_{\text{к2}}} - \frac{P_{3\text{л}} - P_{\text{к}}}{\alpha_{3\text{к}}^1 \cdot S_{\text{к2}}}$$

$$в = D \cdot A_1 + [A - (S_{32} - S_{\text{к2}}) \cdot D] \cdot t_c$$

Из двух значений температур выбирают наименьшее, чтобы выполнялось условие,  $t_1^1 < t_2^1$  т.е. температура воздуха в первой области (нижней) всегда ниже, чем во второй (верхней).

6. Находят температуру воздуха во второй области в первом приближении

$$t_2^1 = D - \frac{S_{\text{к1}} \cdot t_1}{S_{\text{к2}}}$$

7. Определяют температуру воздуха вблизи отверстий шасси или вблизи каналов между вертикальными кассетами

$$t_{\text{вш}}^1 = 2t_1^1 - t_c$$

8. Находят температуру воздуха на выходе из кожуха (из области 2)

$$t_{\text{вых}}^1 = 2t_1^1 - t_{\text{вш}}^1$$

9. Определяют количество протекающего воздуха через блок

$$G^1 = s_1 \cdot \mu_1 \cdot T_c \cdot p_c \cdot \sqrt{2g} \cdot \sqrt{\frac{\frac{h_1 + h_2}{T_c} - \frac{h_1}{T_1} - \frac{h_2}{T_2}}{T_c + \left(\frac{S_1 \cdot \mu_1}{S_2 \cdot \mu_2}\right)^2 \cdot T_2 + \left(\frac{S_1 \cdot \mu_1}{S_{\text{ш}} \cdot \mu_{\text{ш}}}\right)^2 \cdot T_1}}$$

где  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_{\text{ш}}$  – площади перфораций в областях один, два и шасси (нагретой зоне);

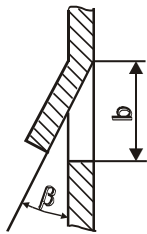
$h_1$  и  $h_2$  – средневзвешенные расстояния от середины нагретой зоны в областях 1 и 2 до центра группирования отверстий;

$\mu_1$ ,  $\mu_2$ ,  $\mu_{\text{ш}}$  – коэффициенты расхода воздуха через жалюзи в соответствующих областях. Если имеются перфорации, то  $\mu=0,65$ . Величина  $\mu$  для жалюзи зависит от их формы и угла раскрыва (см. таблицу 3.1).

$T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_c$  – абсолютные температуры соответствующих областей.

Зависимость коэффициента  $\mu$  от  $b/l$  и  $\beta$  представлена в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Жалюзи

$\beta$	Значение $\mu$ при $b/l$ равно			Эскиз жалюзи
	1:4	1:3	1:2	
15	0,30	0,27	0,23	
30	0,39	0,43	0,39	
45	0,52	0,54	0,50	
60	0,62	0,60	0,56	
90	0,65	0,64	0,62	

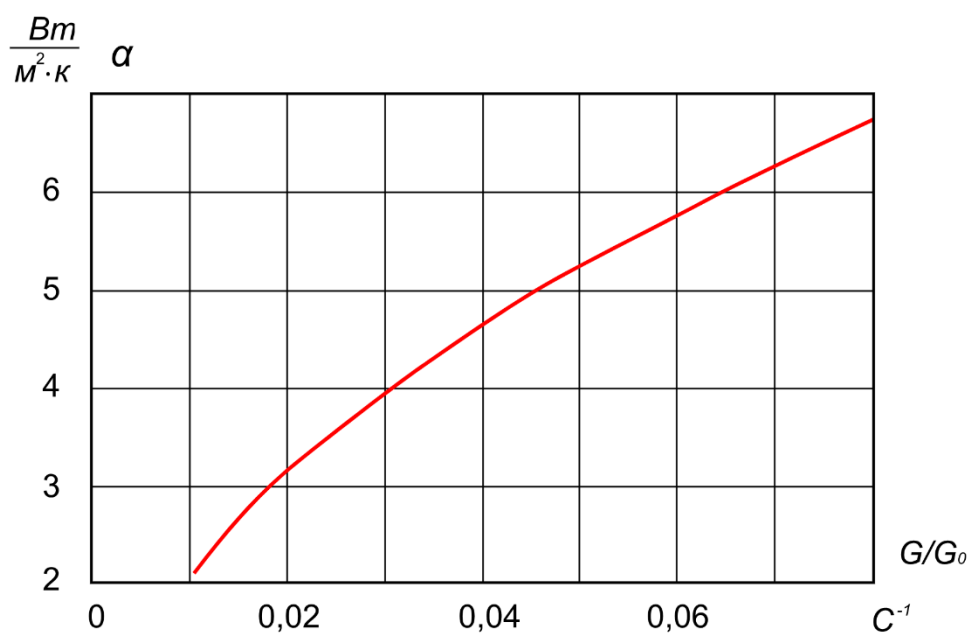


Рис.3.6. Коэффициент теплопередачи.

10. По графику (рис. 3.6) уточняют коэффициент теплоотдачи  $\alpha^{11}$ .

Масса воздуха, заполняющего блок при температуре 20<sup>0</sup> С будет

$$G_0 = V_{\text{бл}} \cdot K_3 \cdot \rho_{\text{в}}$$

где  $V_{\text{бл}}$  – внутренний объем блока;

$K_3$  - коэффициент заполнения блока,  $K_3 = V_{\text{деталей}}/V_{\text{блока}}$ ;

$\rho_{\text{в}}$  – плотность воздуха при температуре 20°C.

11. По уточненному значению  $\alpha^{11}$  повторяют расчет во втором приближении, при этом принимают температуру зоны ( $t_3$ ), температуру кожуха ( $t_{\text{к}}$ ), мощность  $P_{\text{зл}}$  (полученная по п. 4) и  $P_{\text{к}}$  (получена из графика рис.1 при перегреве кожуха на  $\Delta t_{\text{к}}$ ) оставляют неизменными

12. В результате расчета во втором приближении находят температуры  $t_1^{11}; t_2^{11}; t_{\text{вык}}^{11}$  и  $G^{11}$ . Находят величину отношения  $G^{11}/G_0$  и по графику (рисунок 3.3) уточняют значение  $\alpha^{111}$ .

13. Находят мощность, рассеиваемую блоком во втором приближении

$$P^{11} = P_{\text{к}} + 2 \cdot G^{11} \cdot C_p \cdot (t_2^{11} - t_1^{11})$$

14. Используя выражение (1) находят температуру  $t_{\text{к}}^{11*}$  во втором приближении

$$t_{\text{к}}^{11*} = \frac{1}{S_{\text{к1}}} \cdot \left[ \frac{2C_p \cdot G^{11}}{\alpha^{11}} \cdot (t_1 - t_{\text{с}}) + (S_{\text{з1}} + S_{\text{к1}}) \cdot t_1^{11} - S_{\text{з1}} \cdot t_3^{11} \right] \quad (1)$$

15. Определяют разность между температурой  $t_{\text{к}}$  и  $t_{\text{к}}^{11}$ . Если величина разности этих температур составляет более 5%, то проводят расчет в третьем приближении. Используют выражение

$$t_{\text{к}}^{111} = t_{\text{к}}^{11} - 0,1(t_{\text{к}} - t_{\text{к}}^{11})$$

По найденной температуре  $t_{\text{к}}^{111}$  по графику (рис. 3.5) находят мощность, рассеиваемую кожухом блока в третьем приближении  $P_{\text{к}}^{111}$ .

16. Находят значение функции температур  $f(t_3; t_{\text{к}}^{111})$  и определяют  $P_{\text{зл}}^{111}$ .

Уточняют величину  $D^{111}$  с учетом  $(P_{зп}^{11} - P_{к}^{111}) \cdot P_{к}^{111}$  получена из графика при температуре  $t_{к}^{111}$ . Рассчитывают  $t_1^{111}, t_2^{111}, t_{вых}^{111}$  и находят  $G^{111}$ .

17. По полученным данным из графика рисунок 3.6 находят  $\alpha^{111}$ . Мощность, рассеиваемая блоком в третьем приближении, будет

$$P^{111} = P_{к}^{111} + 2G^{111} \cdot C_p \cdot (t_2^{111} - t_1^{111}).$$

18. Находят температуру кожуха в третьем приближении

$$t_{к}^{111*} = \frac{1}{S_{к1}} \cdot \left[ \frac{2G^{111} \cdot C_p}{\alpha^{111}} \cdot (t_1^{111} - t_2) + (S_{зп} + S_{к1}) \cdot t_1^{111} - S_{зп} \cdot t_3 \right]$$

19. Окончательное значение температуры кожуха ( $t_{к}$ ) и рассеиваемой мощности ( $P$ ) в блоке находят по выражениям

$$\frac{t_{к} - t_{к}^{111}}{t_{к} - t_{к}^{111*}} = \frac{t_{к}^{11} - t_{к}^{111}}{t_{к}^{11*} - t_{к}^{111*}} \quad P = P^{111} + \frac{t_{к} - t_{к}^{111}}{t_{к}^{11} - t_{к}^{111}} \cdot (P^{11} - P^{111})$$

Полученная в результате расчета мощность  $P$  и соответствующая ей температура  $t_{к}$  наносятся на график рисунок 3.4. По двум точкам строят характеристику  $\Delta t_{к} = f(P)$ , (начало координат и  $t_{к}$ ). Зная фактическую мощность, рассеиваемую в блоке, по этим двум характеристикам окончательно находят температуры перегрева зоны и кожуха. В случае если они оказываются больше допустимых, необходимо увеличить площадь перфорационных отверстий, либо перейти на принудительное охлаждение блока (принудительную вентиляцию).

## 4.2 Solidworks Flow Simulation

В примере у нас есть электронное устройство, в котором можно установить принудительное охлаждение вентилятором, открытые отверстия для свободного допуска воздуха и два процессора, у которых в спецификации указано, что максимально разрешенная температура для них не должна превышать 100 градусов Цельсия.

Для начала сделаем тепловой анализ устройства.

1. Открываем готовую сборку, переходим в добавление Flow Simulation и нажимаем «мастер проекта» (рис. 3.7).

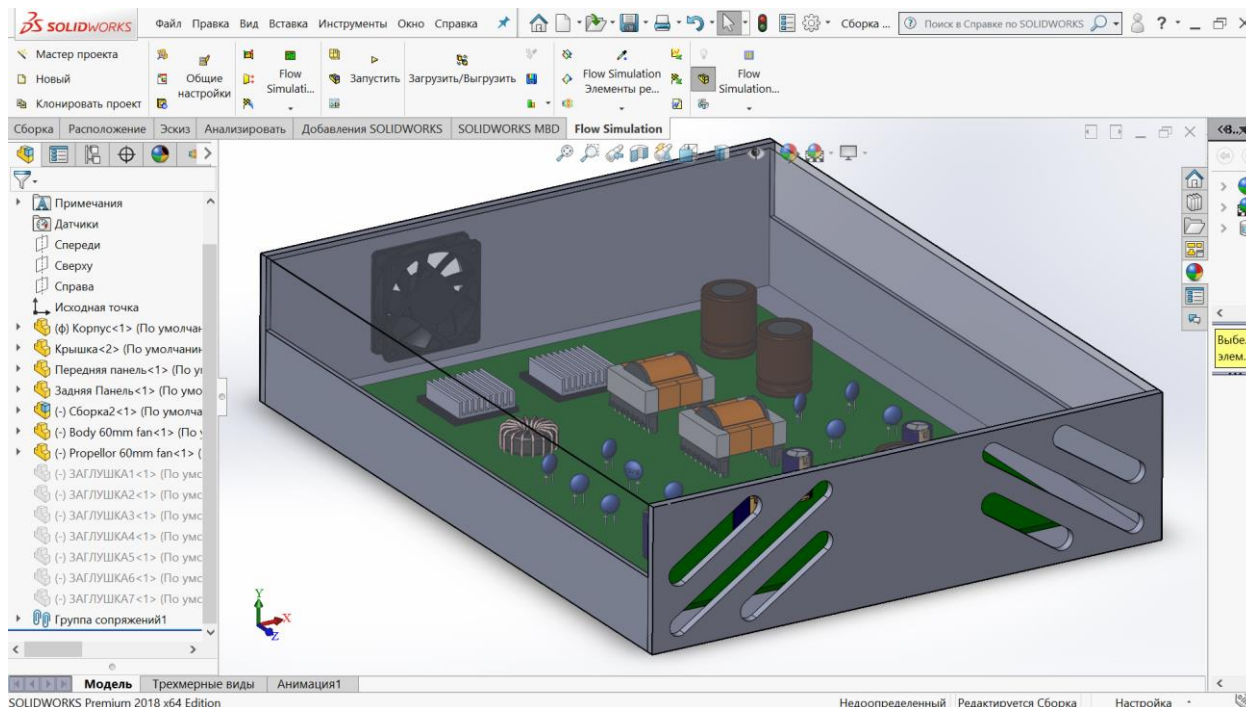


Рис.3.7. Сборка для теплового расчета.

2. В диалоговом окне помощника выберите «Конфигурация – Создать новую», и назовите ее (рис. 3.8).

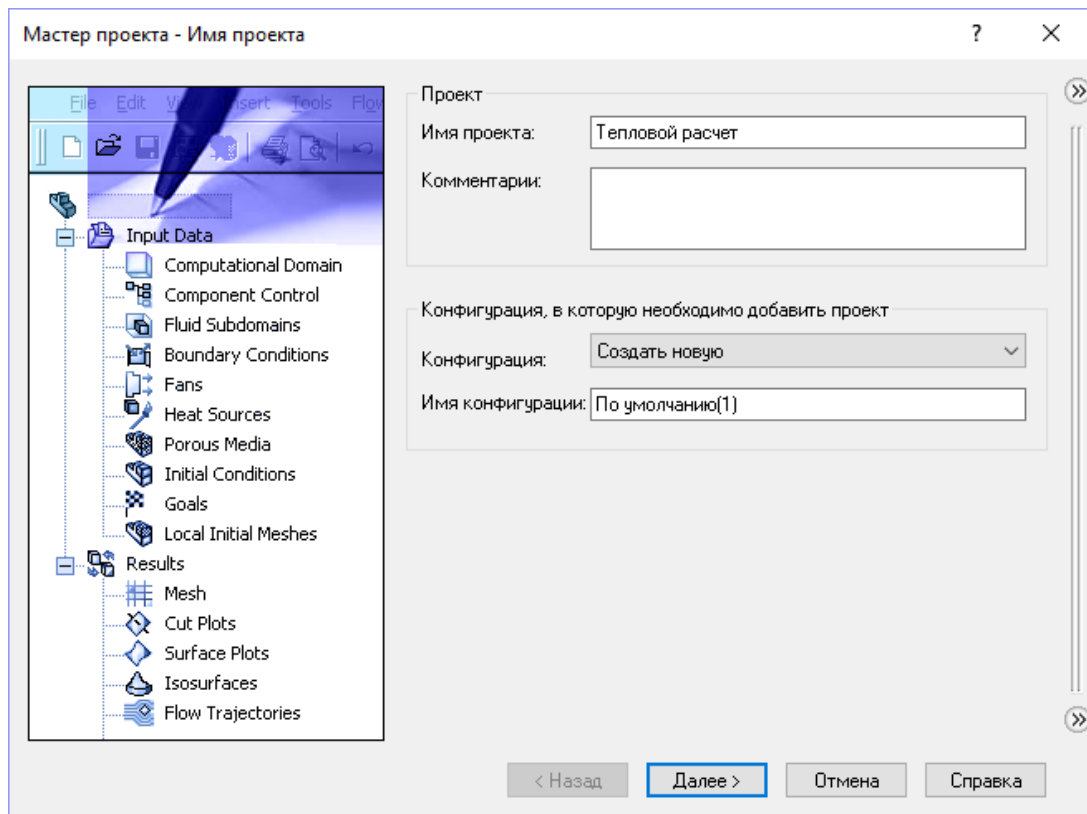


Рис.3.8. Мастер проекта.

3. Нажмите «Далее». Теперь выберите систему единиц измерения СИ, а затем измените единицу измерения температуры с Кельвинов на Цельсии (рис. 3.9).

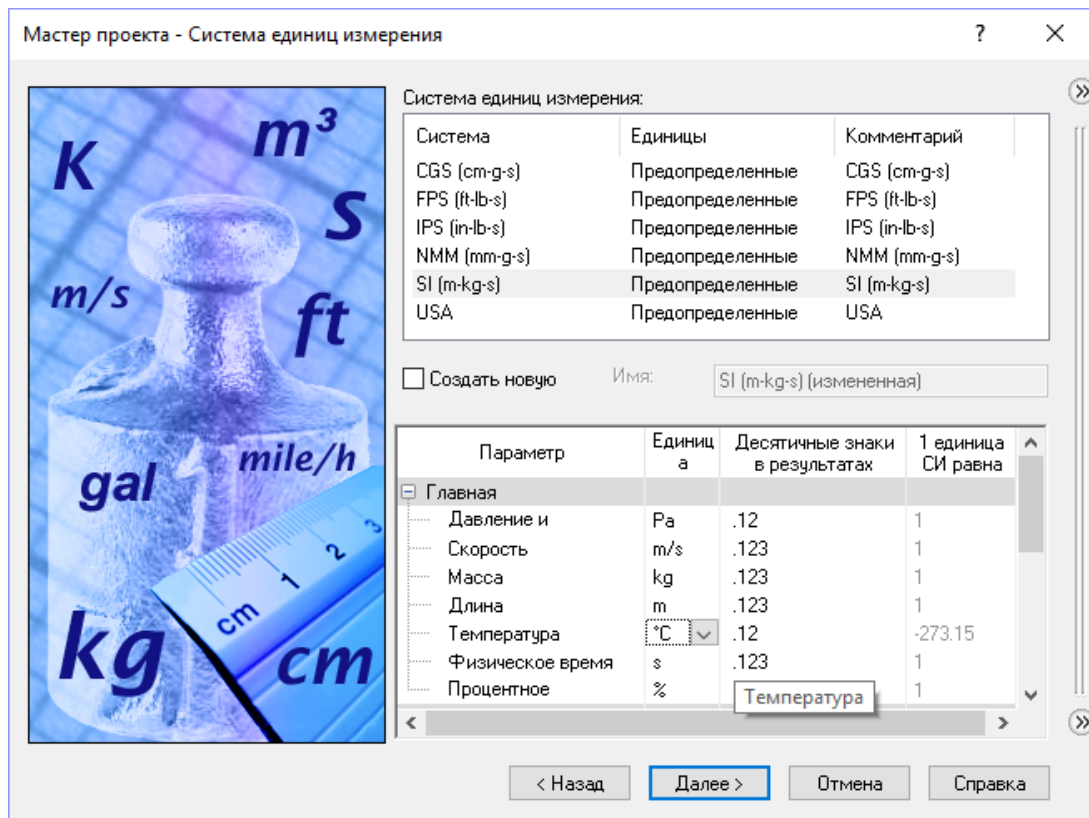


Рис.3.9. Мастер проекта.

4. Нажмите «Далее». Установите тип задачи «Внутренняя». В графе «Физические модели» активируйте опции «Теплопроводность в твердых телах» и «Гравитация».

Тепло генерируется несколькими электронными компонентами, так как мы хотим пронаблюдать, как тепло распределяется по радиатору и другим твердым телам, а затем переходит в текучую среду, была включена опция «Теплопроводность в твердых телах» (рис. 3.10).



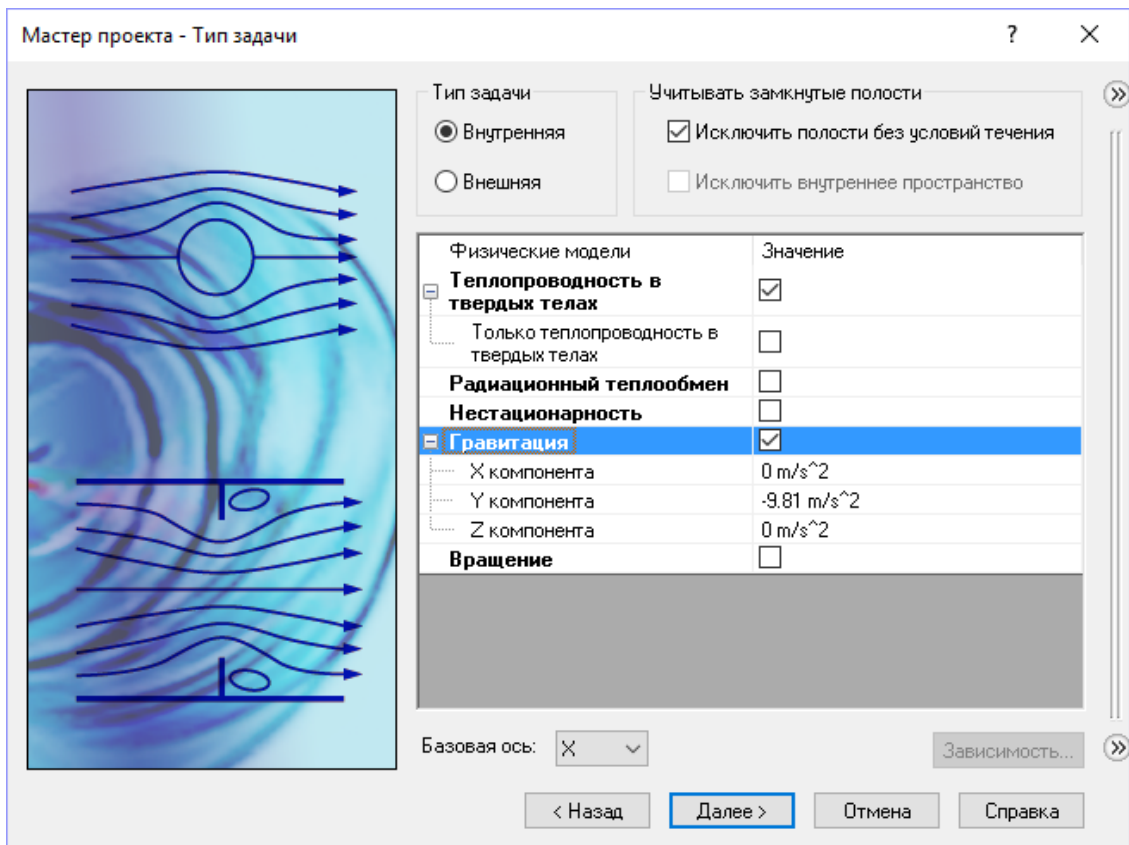


Рис.3.10. Мастер проекта.

5. Нажмите «Далее». Раскройте раздел «Газы» и дважды кликните по строке «Air». Оставьте остальные параметры по умолчанию (рис. 3.11).

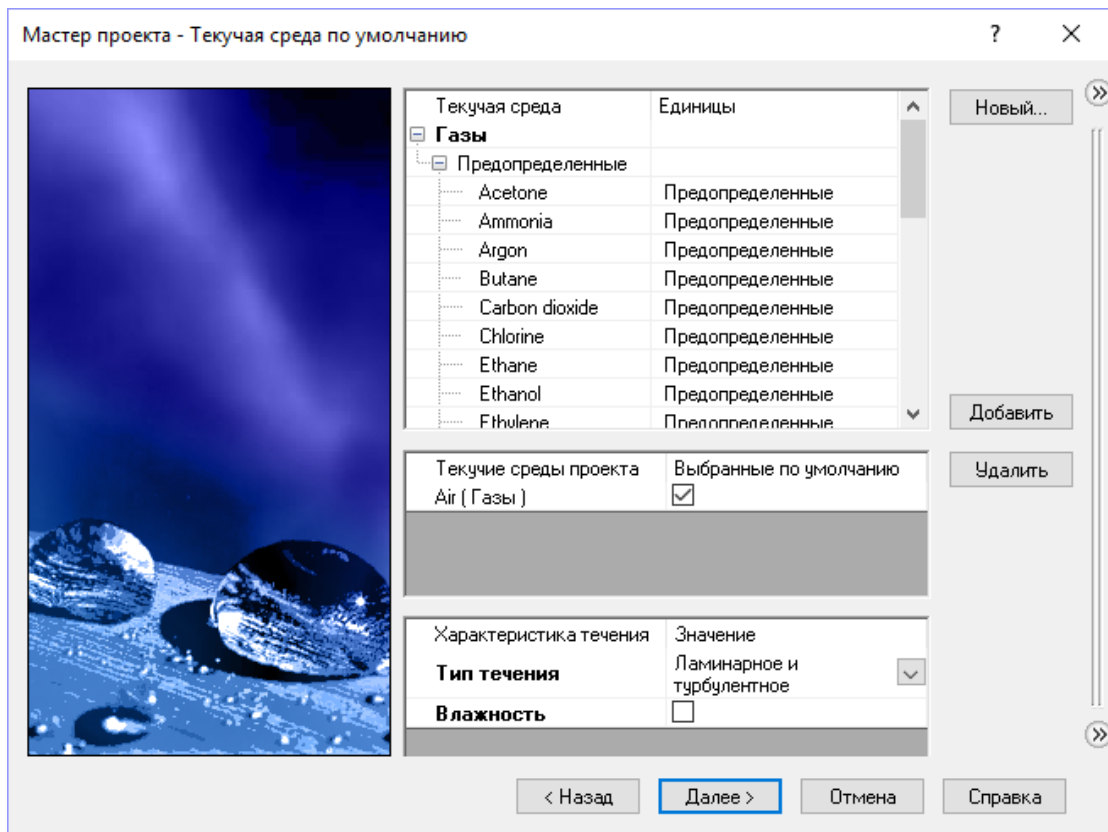


Рис.3.11. Мастер проекта.

6. Нажмите «Далее». Раскройте раздел «Glasses and Minerals» и кликните по «Insulator», чтобы задать материал по умолчанию.

В помощнике вы задаёте материал по умолчанию для всех твердых тел в проекте Flow Simulation. Чтобы установить другой материал для одного или более компонентов, вы можете задать условие «Solid Material» для этих компонентов после завершения работы помощника (рис. 3.12).

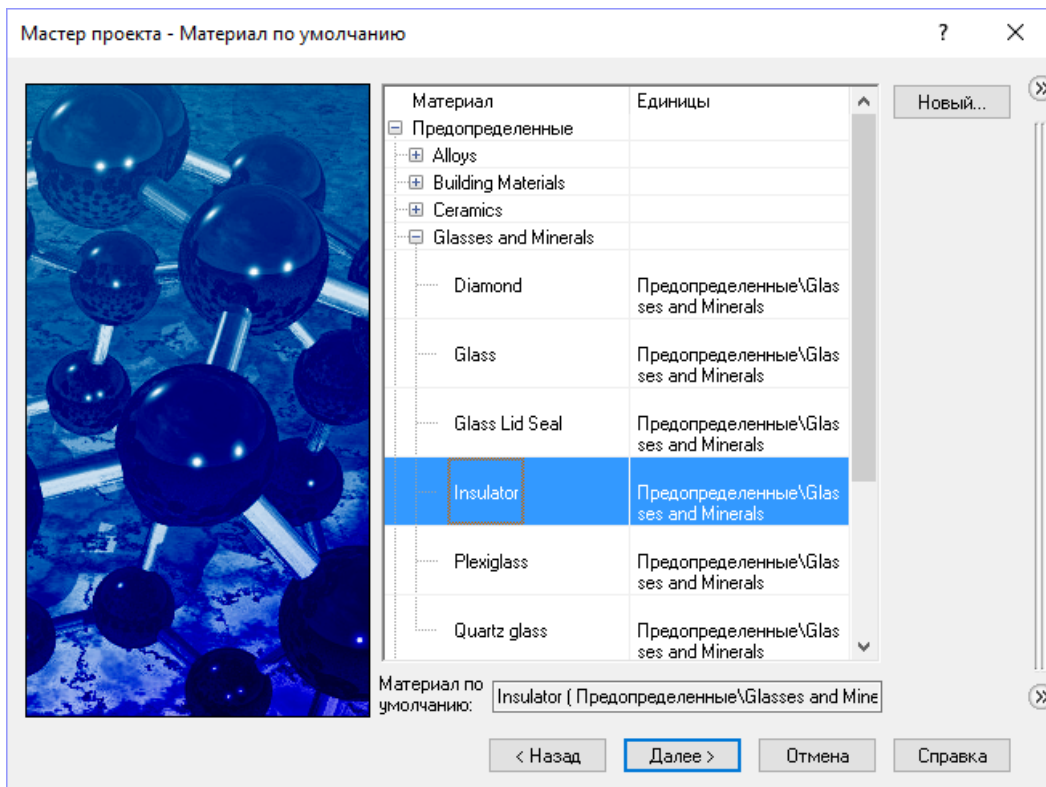


Рис.3.12. Мастер проекта.

7. Нажмите Далее. Тепловой условие на внешней стенке оставляем – Адиабатическая стенка (рис. 3.13).

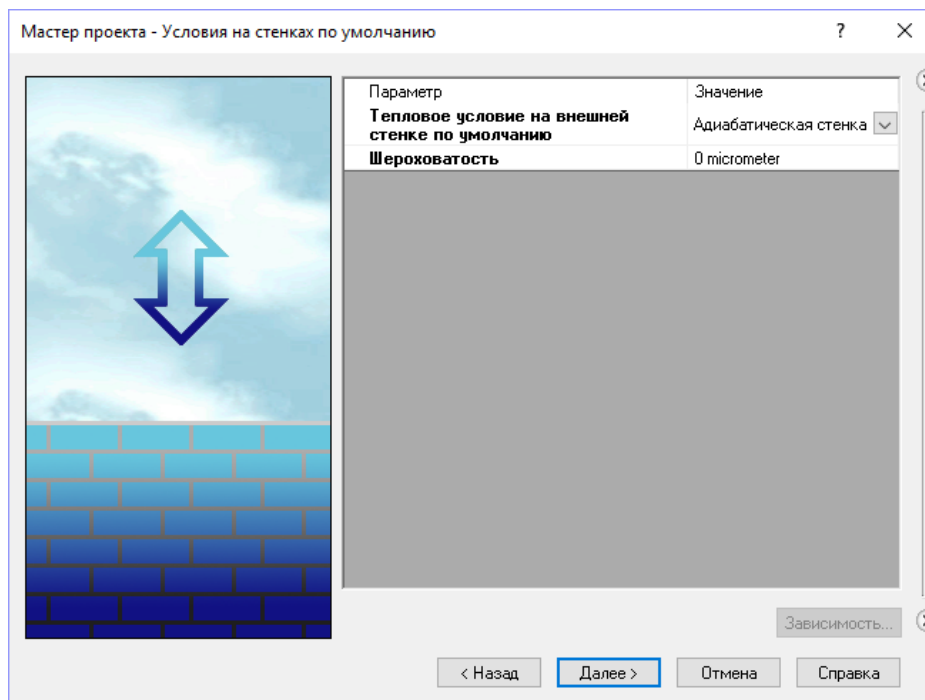


Рис.3.13. Мастер проекта.

8. Нажмите Далее. Задаем Термодинамические параметры: для давления выбираем одну атмосферу, для температуры оставляем 20.05 °С. Остальные параметры оставляем без изменений (рис. 3.14).

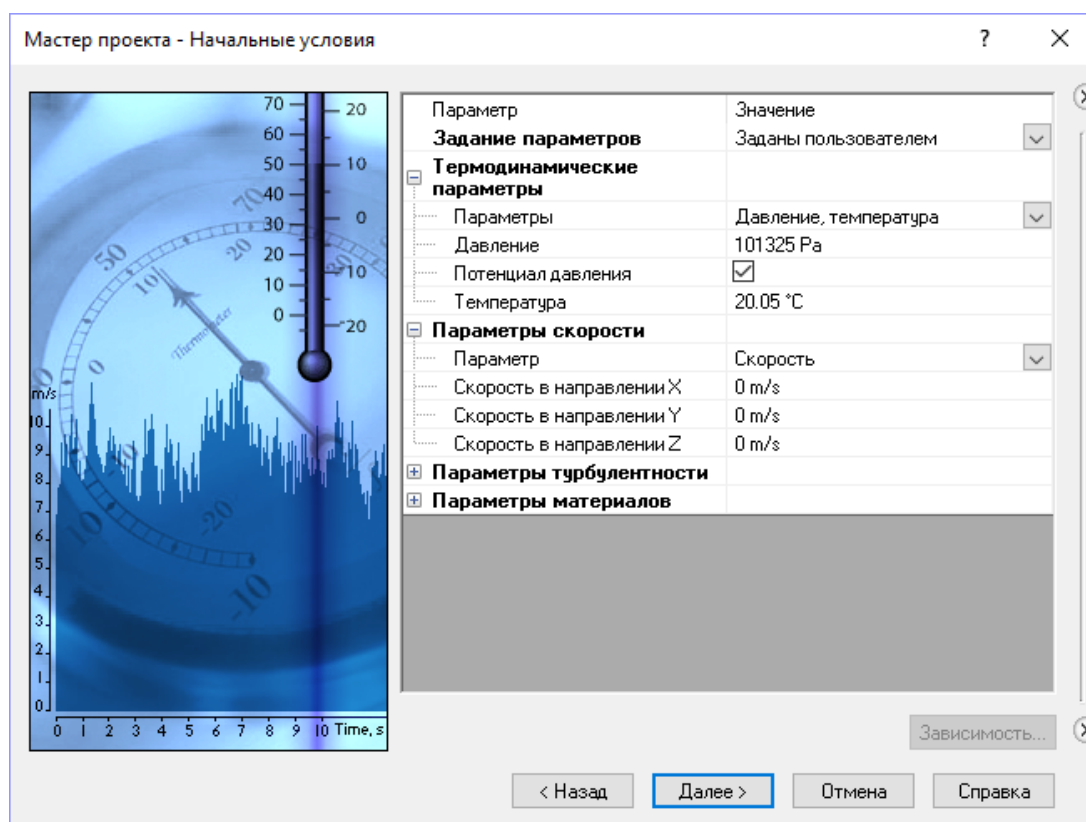


Рис.3.14. Мастер проекта.

После произведения всех настроек у нас создается новое дерево проекта.

Далее можно приступить к установке твердых материалов.

9. Нажмите «ПКМ» на иконке «Материалы» и выберите «Добавить материал».

10. Во всплывающем древе деталей выберите печатную плату.

11. В графе «Материалы» раскройте пункт «Заданы пользователем» и выберите «PCB 4» (рис. 3.15).

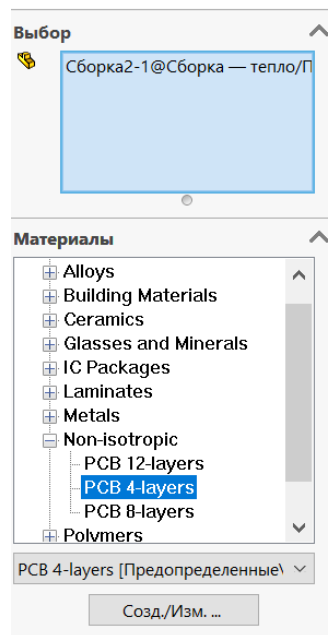


Рис.3.15. Материалы.

12. Нажмите «ОК».
13. Действуя по тому же алгоритму, укажите твёрдые материалы для других компонентов:
  - для электролитических конденсаторов задайте Алюминий (Aluminum), (находится в разделе Предопределенные – Metals)
  - для дросселей и трансформатора задайте Медь (Copper) (находится в разделе Предопределенные – Metals)
  - для плоских конденсаторов задайте Кремний (Silicon) (находится в разделе Предопределенные – Semiconductors)
  - для остальных конденсаторов, диодного моста и микросхем задайте Кремний (Silicon) (находится в разделе Предопределенные – Semiconductors)

Чтобы выделить деталь, кликните по ней в древе деталей или в графической области SolidWorks.

Следующим шагом будет установка граничных условий.

Граничные условия должны устанавливаться там, где поток входит в модель или покидает её. Граничные условия могут устанавливаться как давление (Pressure), объёмный расход (Volume Flow), массовый расход (Mass Flow) или скорость (Velocity). Вы также можете использовать граничные условия для указания условия идеальной стены (Ideal Wall) – адиабатическая, абсолютно гладкая стенка, или реальной стены (Real Wall), позволяющего устанавливать шероховатость стен и/или температуру и/или коэффициент теплообмена на поверхностях модели. Для внутреннего анализа с включённой опцией Heat conduction in solids вы также можете поставить условие термической стены на внешние грани модели, установкой условия внешней стены (Outer Wall).

14. В древе Flow Simulation, нажмите ПКМ на иконке Граничные условия и выберите «Добавить граничное условие» (рис.3.16).

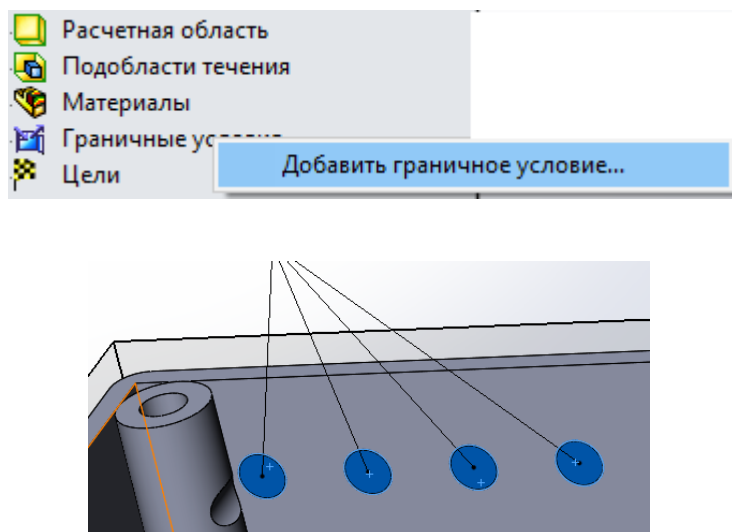


Рис.3.16. Добавление граничного условия.

15. Выберите внутренние грани крышек выходного отверстия, как показано на рисунках. Для этого можно воспользоваться инструментом «Создание заглушек» (рис. 3.17).

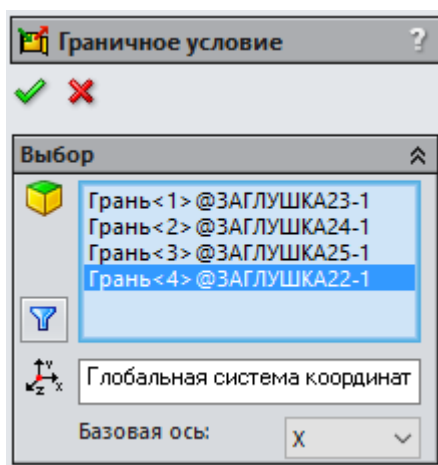



Рис.3.17. Граничные условия.

16. Выберите Давление  и затем Давление окружающей среды (рис. 3.18).

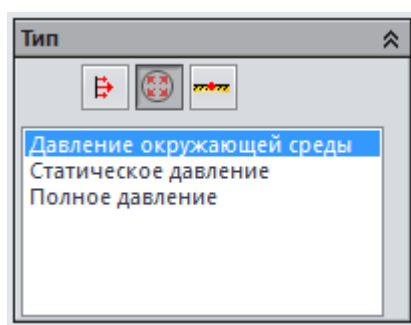


Рис.3.18. Давление окружающей среды.

17. Нажмите ОК. В древе Flow Simulation появился новый элемент Давление окружающей среды 1.

Условие «Давление окружающей среды» интерпретируется как статическое давление для исходящего потока и как полное давление для входящего потока.

18. Далее создадим вентилятор (рис. 3.19).

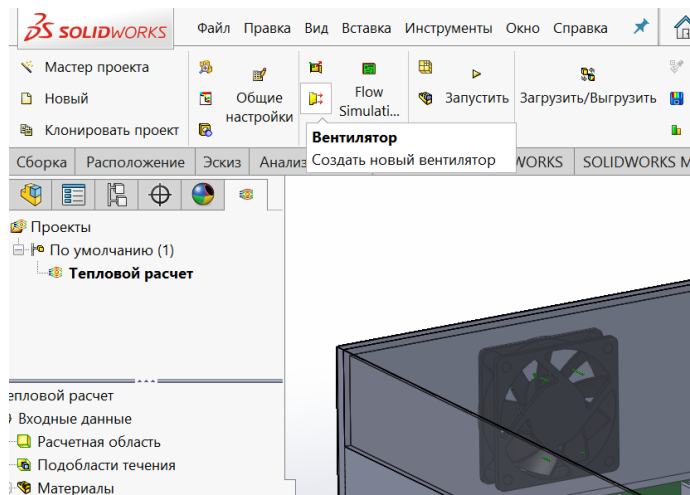


Рис.3.19. Создание нового материала.

19. Выберем Выходной внешний вентилятор, чтобы он вытягивал горячий воздух, модели 405F. Указывать надо внутреннюю грань заглушки (рис. 3.20).

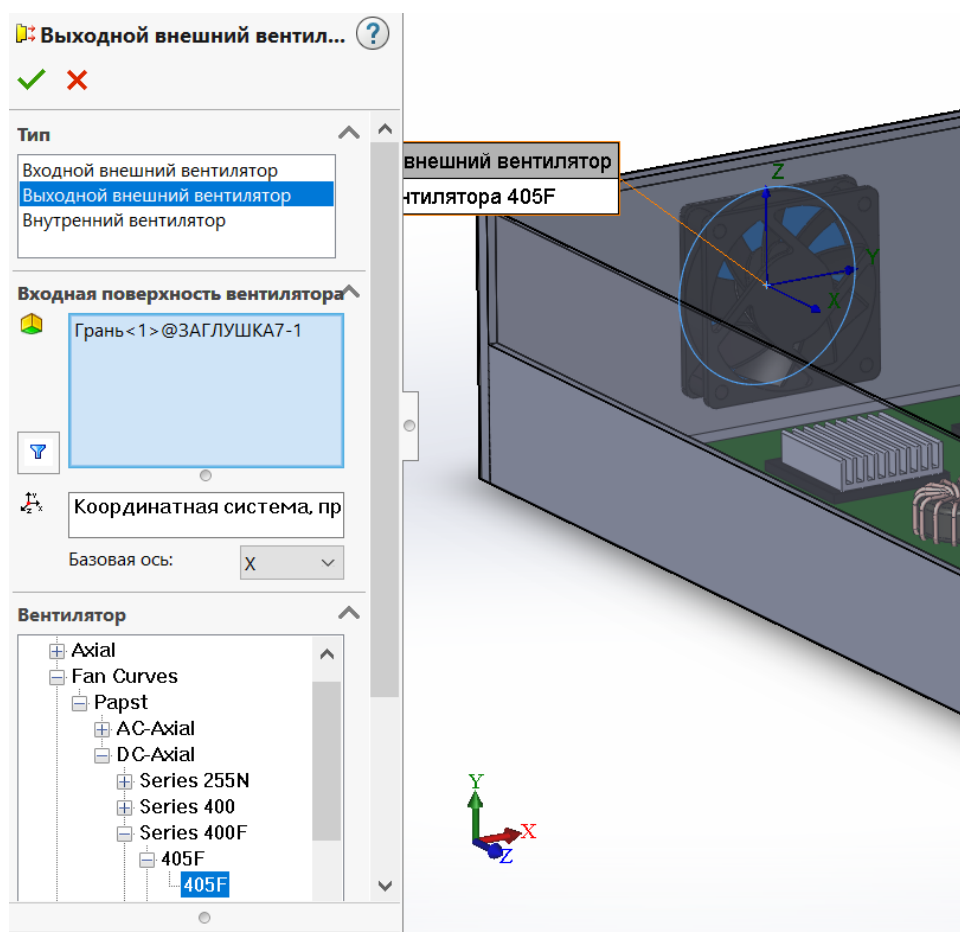


Рис.3.20. Настройки вентилятора



После этого можно перейти к установке источника тепла.

20. Нажмите Flow Simulation – «Добавить объемный тепловой источник» (рис. 3.21).

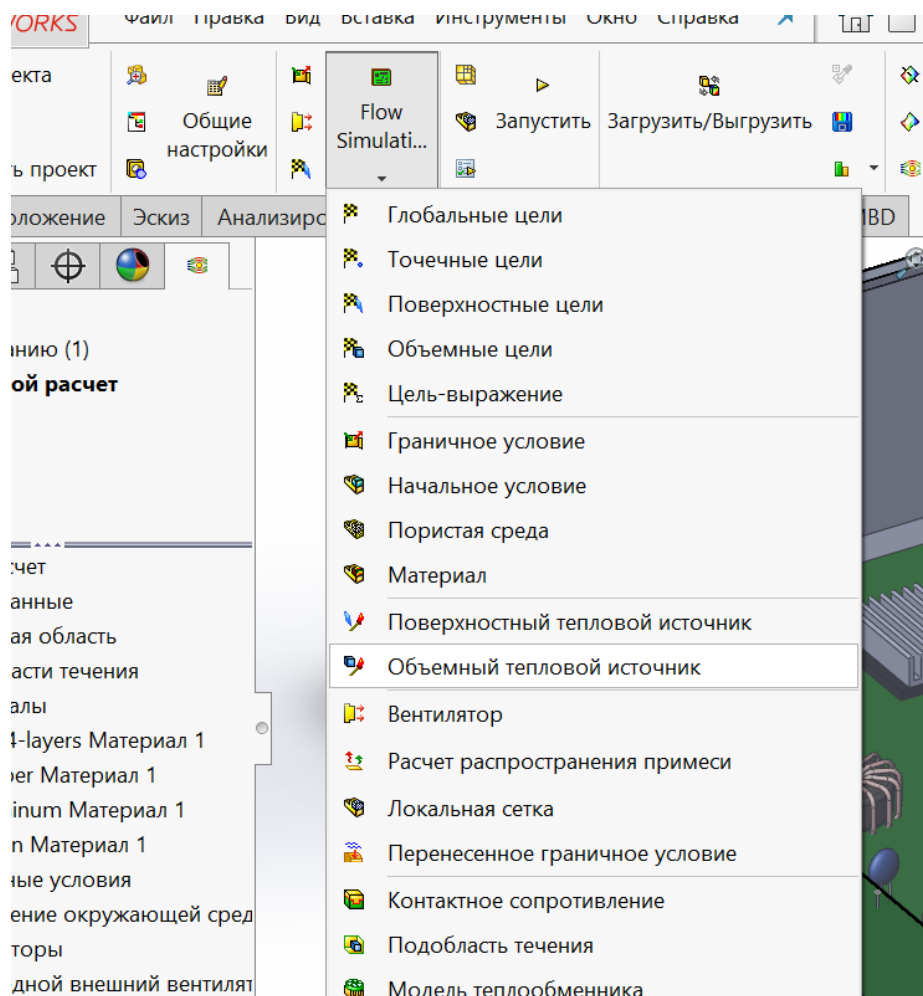


Рис.3.21. Добавление объемного теплового источника.

21. В плавающем древе компонентов выберите какую-либо деталь, как компонент для установки объёмного источника.

22. В графе «Параметр» выберите «Мощность тепловыделения» и задайте значение для этого компонента.

Чтобы узнать мощность тепловыделения нужного нам компонента, смотрим его Datasheet (Техническая документация электронных компонентов).

23. Действуя по тому же алгоритму, задайте мощность тепловыделения для других компонентов. Нажмите «ОК».

Объёмные источники тепла позволяют вам устанавливать интенсивность теплообразования (в Ваттах) или объёмную интенсивность теплообразования (в ваттах на единицу объёма), или постоянную температуру в качестве граничного условия для выбранного объёма. Так же можно установить поверхностные источники тепла, для которых устанавливается интенсивность теплообразования (в Ваттах) или тепловой поток (в Ваттах на единицу поверхности) (рис. 3.22).

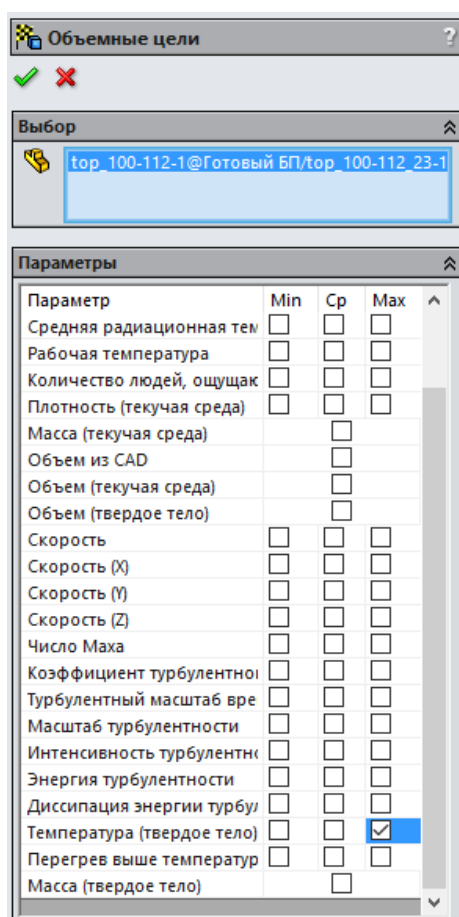


Рис.3.22. Объёмные цели.

Далее необходимо установить инженерные задачи.

24. Укажем объёмные цели.

25. Нажмите ПКМ на иконке Цели и выберите «Добавить объемные цели».

26. Во всплывающем древе компонентов выберите два наших процессора.

27. В таблице Параметр выберите столбец Max для строки Температура (твердое тело).

28. Нажмите «ОК». Новый элемент ОЦ Max Температура (твердое тело) 1 появится в древе Flow Simulation Analysis.

29. Оставьте активированной опцию «Использовать для контроля сходимости» чтобы использовать эту цель для контроля конвергенции.

30. Прделайте ту же операцию с другими элементами у которых хотите узнать максимальную температуру.

Так же надо указать поверхностные цели.

31. Нажмите ПКМ на иконке Цели и выберите «Добавить поверхностные цели».

32. Кликните по вкладке Flow Simulation Analysis Tree и выберите элемент Давление окружающей среды 1, чтобы выделить грани приложения цели (рис. 3.23).

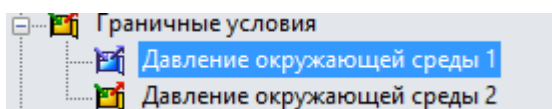


Рис.3.23. Давление окружающей среды.

33. В таблице «Параметр» установите флажок в строке «Массовый расход» (рис. 3.24).

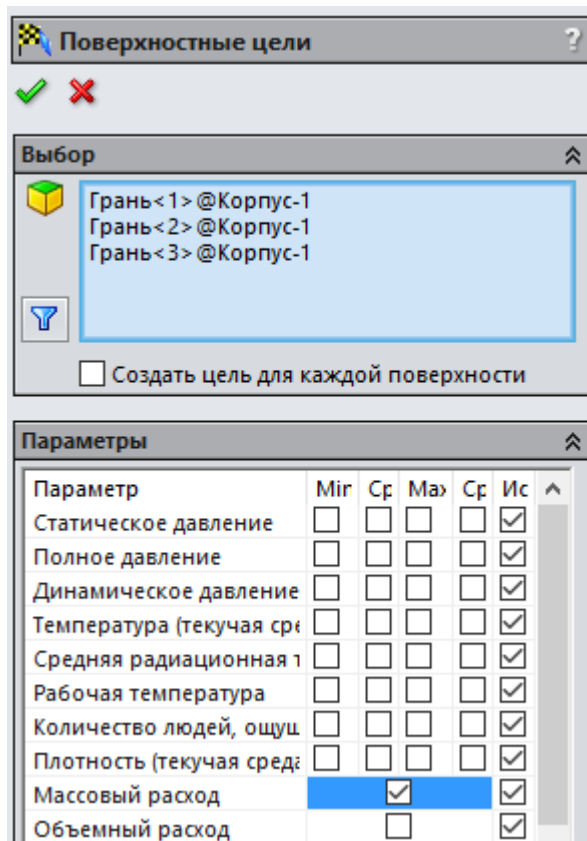


Рис.3.24. Поверхностные цели.

34. Оставьте активированной опцию «Использовать для контроля сходимости» чтобы использовать эту цель для контроля конвергенции (рис. 3.25)

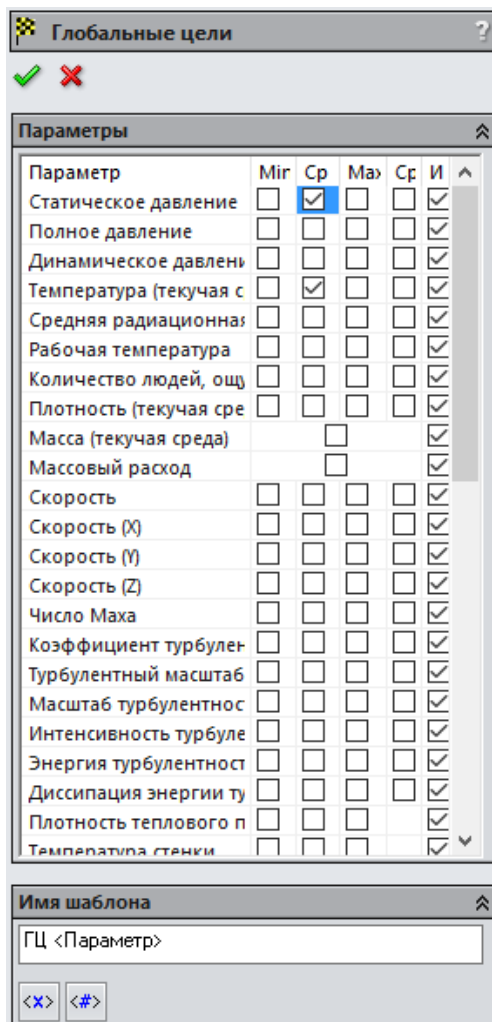



Рис.3.25. Глобальные цели.

35. В графе «Имя Шаблона» нажмите кнопку «Выход»  и затем удалите поле <Номер> в строке «Имя Шаблона» (рис. 3.26).

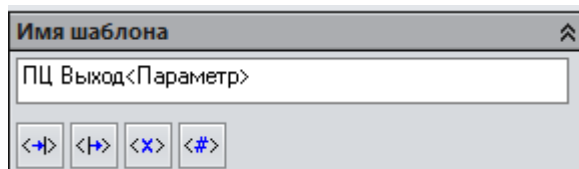


Рис.3.26. Редактирование шаблона.

36. Нажмите ОК. Появится новая цель «SG ПЦ Выход Массовый расход».

Помимо прочих, необходимо указать также глобальные цели.

37. Нажмите «ПКМ» на иконке «Цели» и выберите «Добавить глобальные цели».

38. В таблице «Параметр» выберите столбец «СР» для строки «Статическое Давление» и строки «Температура» (текучая среда), и оставьте активированной опцию «Использовать для контроля сходимости», чтобы использовать эту цель для контроля конвергенции.

39. В строке «Имя Шаблона» удалите поле <Номер> и нажмите «ОК». Появятся две цели – «ГЦ Ср Статическое давление» и «ГЦ Ср Температура» (текучая среда).

В этом примере инженерные задачи установлены для определения максимальной температуры теплогенерирующих компонентов, роста температуры воздуха, а также перепада давления и массового расхода в корпусе. Нажмите «Файл – Сохранить».

Теперь можно перейти к этапу вычисления.

40. Нажмите «Flow Simulation – Запустить».

41. Нажмите кнопку «Запустить» (рис. 3.27).

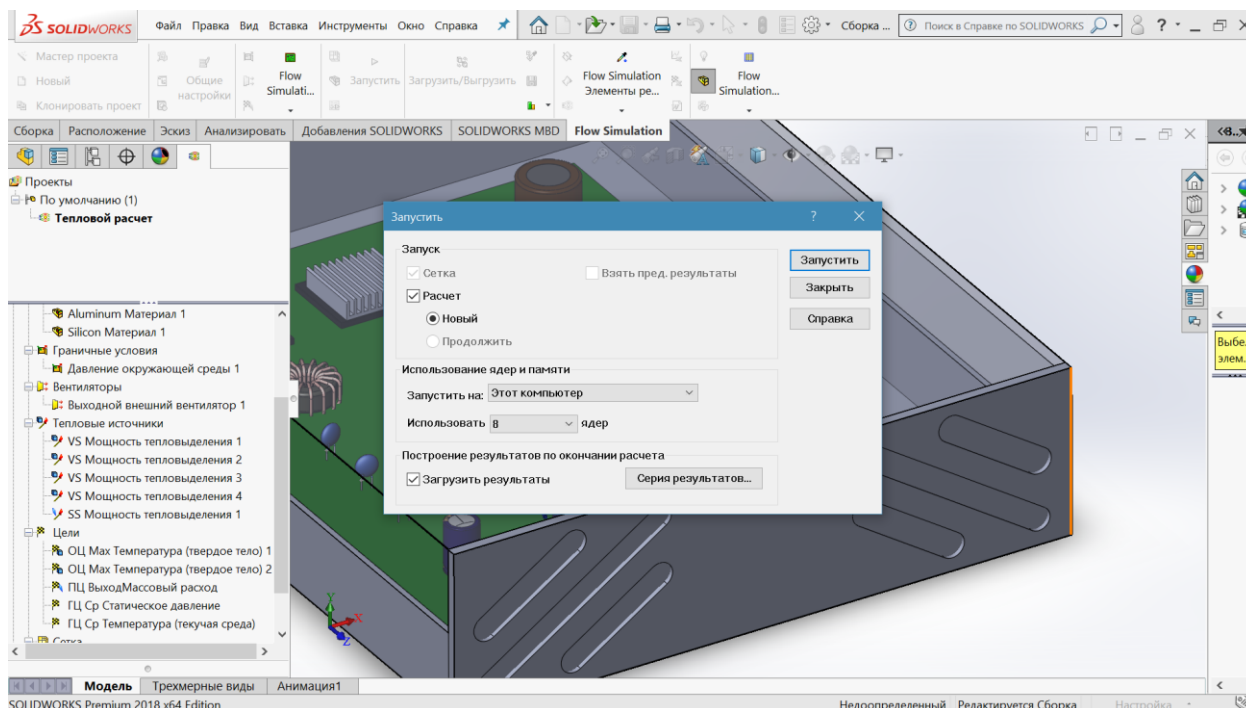


Рис.3.27. Запуск расчета.

Программе потребуется некоторое время на решение поставленных задач.

Вы можете заметить, что целям необходимо разное количество итераций для конвергенции. Целенаправленная концепция программы Flow Simulation позволяет вам получить нужные вам ответы в кратчайшие сроки. Например, если вам нужно знать только температуру текучей среды в корпусе, Flow Simulation найдёт решение быстрее, чем при конвергенции всех параметров.

Просмотреть цели можно следующим образом:

42. Нажмите ПКМ на иконке «Цели» в разделе «Результаты» и выберите «Добавить».

43. В диалоговом окне «Цель» поставьте галочку напротив «Все» (рис. 3.28).

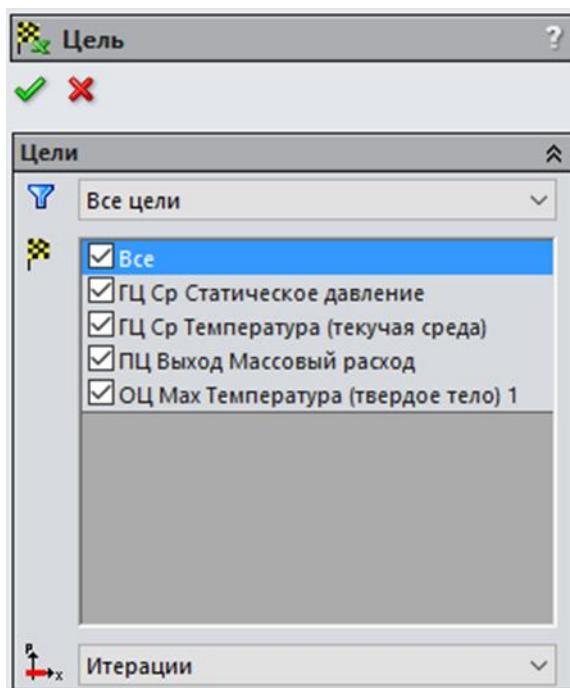


Рис.3.28. Просмотр целей.

44. Последним шагом будет выгрузка отчета в MS Word.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнение лабораторные работы дали базовый уровень знаний по проведению расчетов в САПР Solidworks при проведении инженерного анализа в рамках дисциплины ОУЭСкВВ. По завершению лабораторных работ студенты ознакомились с последовательностью этапов инженерного анализа, приобрели навыки по созданию и проведению экспериментов, с соблюдением правил математических расчетов разрабатываемо изделия, убедиться в правильность конструкторских решений с помощью САПР Solidworks.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Computer-aided engineering [Электронный ресурс] // Википедия : свободная энцикл. – Электрон. дан. – [Б. м.], 2020. – URL: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Computer-aided\\_engineering](http://ru.wikipedia.org/wiki/Computer-aided_engineering) (дата обращения: 15.04.2020).
2. *Зеленский А.В.* Основы конструирования электронных средств: учеб. пособие. 4.1 / А.В. Зеленский, Г.Ф. Краснощекова. - Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм, ун-та, 2008. - 76 с.
3. Метод конечных элементов [Электронный ресурс] // Википедия : свободная энцикл. – Электрон. дан. – [Б. м.], 2020. – URL: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Метод\\_конечных\\_элементов](http://ru.wikipedia.org/wiki/Метод_конечных_элементов) (дата обращения: 15.04.2020).
4. CADmaster [Электронный ресурс]. – URL: [https://www.cadmaster.ru/magazin/articles/cm\\_85\\_09.html](https://www.cadmaster.ru/magazin/articles/cm_85_09.html) (дата обращения: 16.04.2020).
5. ANSYS [Электронный ресурс] // Википедия : свободная энцикл. – Электрон. дан. – [Б. м.], 2020. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/ANSYS> (дата обращения: 16.04.2020).
6. Autodesk Simulation [Электронный ресурс] // Википедия : свободная энцикл. – Электрон. дан. – [Б. м.], 2020. – URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Autodesk\\_Simulation](https://ru.wikipedia.org/wiki/Autodesk_Simulation) (дата обращения: 17.04.2020).
7. SolidWorks решения для симуляций – SolidWorks Simulation [Электронный ресурс] – URL: <https://www.solidworks.com/ru/category/simulation-solutions> (дата обращения 17.04.2020).
8. SolidWorks решения для симуляций – SolidWorks Flow Simulation [Электронный ресурс] – URL: <https://www.solidworks.com/ru/product/solidworks-flow-simulation> (дата обращения 17.04.2020).
9. SOLIDWORKS Flow Simulation Help [Электронный ресурс]. – URL: [https://help.solidworks.com/2018/english/SolidWorks/flopress/c\\_flow\\_simulation\\_overview.htm](https://help.solidworks.com/2018/english/SolidWorks/flopress/c_flow_simulation_overview.htm) (дата обращения 18.04.2019).
10. *Шляпников Н.С.* Конструирование РЭС: учебное пособие/ Н.С. Шляпников -Ульяновск, 2001.-127 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ.....	4
2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1. ....	5
3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2. ....	22
4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3. ....	38
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	73
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	74

**Сотенко Сергей Михайлович**  
**Матюхина Татьяна Владимировна**  
**Капралов Дмитрий Дмитриевич**

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ  
ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ К ВНЕШНИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ.  
ЧАСТЬ 1.**

**Учебно-методическое пособие по выполнению самостоятельно работы  
студентов**

**Ответственный редактор старший преподаватель каф. КПрЭС Капралов Д.Д.**

Редактор **И. И. Щенсяк**

План издания **2020 г., доп. п. 3**

**Подписано к печати 09.01.2018**

**Объем 2,75 усл.-печ. л. Тираж 28 экз. Заказ 817**

**Редакционно-издательский отдел СПбГУТ**

**193232 СПб., пр. Большевиков, 22**

**Отпечатано в СПбГУТ**