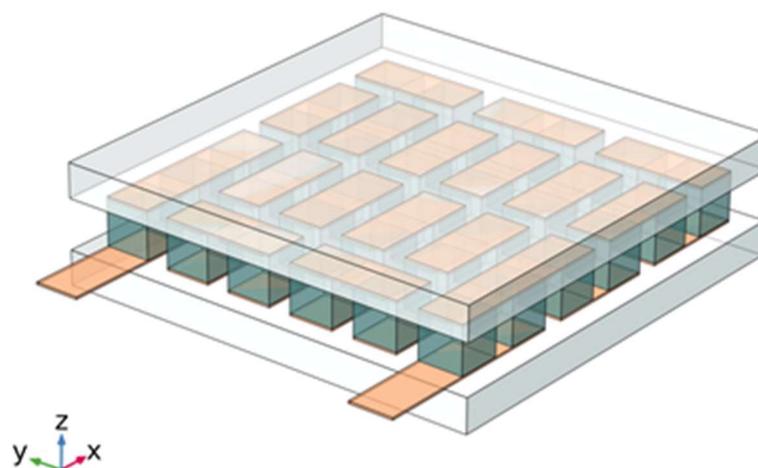


**А.В. Новотельнова, А.С. Тукмакова,  
А.В. Асач**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ**



**Санкт-Петербург  
2021**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

**А.В. Новотельнова, А.С. Тукмакова,  
А.В. Асач**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ  
ИТМО

по направлению подготовки 16.04.03 Холодильная, криогенная  
техника и системы жизнеобеспечения

в качестве Учебного пособия для реализации основных профессиональных  
образовательных программ высшего образования магистратуры

 УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург  
2021

Новотельнова А.В., Тукмакова А.С., Асач А.В. Моделирование термоэлектрических преобразователей энергии– СПб: Университет ИТМО, 2021. – 48 с.

Рецензент(ы):

Пронин Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор, профессор (квалификационная категория " ординарный профессор") факультета энергетики и экотехнологий, Университета ИТМО.

Приведено описание серии заданий, выполняемых при изучении курса «Математическое моделирование термоэлектрических приборов и устройств». Предназначено для самостоятельной работы магистрантов, обучающихся по специальности 16.04.03. «Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения», по магистерской программе «Технологии и системы преобразования энергии». Содержит исходные данные и методику построения модели термоэлектрического модуля методом конечных элементов. Пособие позволяет получить базовые навыки по работе с современным программным обеспечением, реализованным в рамках метода конечных элементов.



**Университет ИТМО** – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2021

© Новотельнова А.В., Тукмакова А.С., Асач А.В., 2021

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ .....	7
1.1 Термоэлектрические преобразователи энергии .....	7
1.2 Архитектура термоэлектрического модуля .....	8
1.3 Режим генератора .....	8
1.4 Режим охладителя.....	9
2. СОЗДАНИЕ ФАЙЛА МОДЕЛИ И РАБОТА С ГЕОМЕТРИЕЙ.....	10
Задание 1 .....	10
2.1 Предварительная настройка модели .....	10
2.2 Построение модели (Раздел " <i>Model Builder</i> ").....	12
2.3 Работа с параметрами.....	14
2.4 Построение геометрической модели .....	15
3. СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ.....	16
Задание 2.....	16
3.1 Выбор необходимых физических свойств материалов .....	18
3.2 Присвоение физических свойств определенному геометрическому объекту .....	19
3.3 Таблица свойств материала .....	19
3.4 Задание температурной зависимости свойств.....	20
4. ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ.....	22
Задание 3.....	22
4.1 Система уравнений модели .....	22
4.2 Тепловые граничные условия.....	23
4.3 Электрические граничные условия.....	24
4.4 Добавление внешней электрической цепи.....	25
5. НАСТРОЙКА ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОЙ СЕТКИ.....	28
Задание 4.....	28
5.1 Сброс настройки сетки, установленной по умолчанию .....	28

5.2 Разбиение границ доменов на конечные элементы (Опция <i>Mapped</i> )	29
5.3 Выполнение операции протяжки сетки (Опция <i>Swept</i> )	30
6. НАСТРОЙКА ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО РЕШАТЕЛЯ	32
Задание 5	32
7. ПОСТОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ	33
Задание 6	33
7.1 Определение величины тока во внешней цепи	33
7.2 Определение затраченной тепловой энергии	37
7.3 Построение графиков	38
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	39
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	40
ПРИЛОЖЕНИЕ 3	44
ПРИЛОЖЕНИЕ 4	45
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	47

## ВВЕДЕНИЕ

Современным инструментом, применяемым для расчета, конструирования и анализа эффективности термоэлектрических преобразователей энергии, может служить компьютерное моделирование с использованием метода конечных элементов.

Применение метода конечных элементов для решения задач повышения эффективности устройств, используемых для преобразования энергии, а также сопутствующих инженерных задач является одним из основных умений, необходимых для дальнейшей профессиональной деятельности. Этот навык формируется в процессе обучения по магистерской программе «Технологии и системы преобразования энергии» в ходе изучения дисциплины «Математическое моделирование термоэлектрических приборов и устройств».

Моделирование термоэлектрических устройств методом конечных элементов позволяет освоить основные инструменты при работе в программной среде Comsol Multiphysics.

Освоение навыков математического моделирования производится посредством пошагового создания модели термоэлектрического модуля (ТЭМ).

Решение мультифизической задачи состоит из следующих этапов:

1. Разработка геометрической модели. Производится в геометрическом модуле Comsol Multiphysics и включает в себя создание геометрической 3D модели устройства.

2. Задание электро- и теплофизических свойств материалов, участвующих в создании модели ТЭМ. Проводится с использованием модуля материалов. На этом этапе происходит математическое описание теплофизических, электрофизических и прочих свойств материалов всех геометрических элементов модели.

3. Создание мультифизической модели. Включает математическое описание физических процессов, протекающих в элементах модели, при помощи системы дифференциальных уравнений и граничных условий.

4. Построение сетки. Включает математическое описание разбивки геометрической модели на конечные элементы.

5. Задание параметров модуля решателя. Производится описание параметров расчета.

6. Постобработка результатов. На этом этапе анализируются полученные данные и производится расчет параметров ТЭМ.

Основной задачей магистрантов при выполнении заданий является приобретение навыков математического описания протекающих в ТЭМ физических процессов с применением программной среды Comsol Multiphysics, а также освоение основных инструментов среды и их взаимосвязи между собой.

Постобработка полученных результатов позволит магистрантам провести наглядный подробный анализ различных режимов работы ТЭМ, выявить зависимости между основными показателями работы ТЭМ, такими как разность температур горячей и холодной стороны модуля, число ветвей, электрическое сопротивление нагрузки во внешней цепи. Обучающиеся должны научиться оценивать значения токов, напряжений, мощности и коэффициента полезного действия ТЭМ.

При задании геометрических параметров модели для упрощения расчетных операций в рамках настоящей работы предлагается отказаться от введения в модель элементов, существенно не влияющих на результаты расчетов. Например, не учитывать тонкие контактные слои припоя.

Таким образом, создав модель и проделав необходимые вычисления, студент получает представление о потенциальных возможностях проведения исследований в современных мультифизических программных средах.

Навыки, полученные при выполнении расчетной работы, будут востребованы при подготовке магистерской диссертации и в дальнейшей исследовательской и практической деятельности обучающихся.

# 1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ

## 1.1 Термоэлектрические преобразователи энергии

Термоэлектрические преобразователи представляют собой устройства прямого преобразования энергии. Они находят широкое применение в промышленности, научных исследованиях, медицине, в системах автоматики и пр. Используются для преобразования тепла в электричество (термоэлектрические генераторы), термоэлектрического охлаждения (термоэлектрические охладители) и измерения температур в диапазоне от абсолютного нуля до тысяч градусов (термопары).

Схема термоэлектрического элемента представлена на рис. 1.

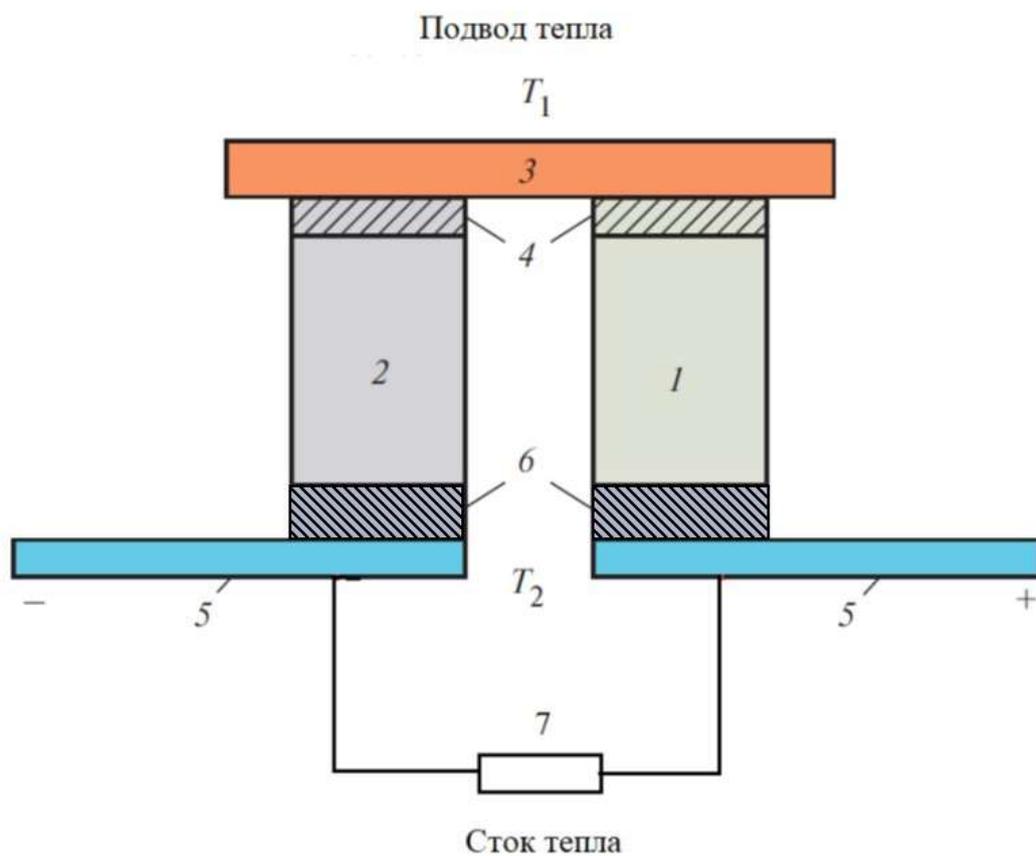


Рисунок 1 – Схема термоэлектрического элемента:

- 1 —  $p$  - ветвь термоэлемента; 2 —  $n$  - ветвь термоэлемента;
- 3 — контактная шина горячего спая; 4 — коммутационный припой горячего спая; 5 — контактные шины холодного спая;
- 6 — коммутационный припой холодного спая; 7 — внешняя нагрузка;  $T_1$  — источник подвода тепла;  $T_2$  — охладитель.

Для получения необходимых значений тока и напряжения преобразователя несколько полупроводниковых термоэлементов объединяют в батарею. Такая сборка называется термоэлектрическим модулем.

## 1.2 Архитектура термоэлектрического модуля

Самой распространенной конструкцией термоэлектрического модуля является П-образная. Пример геометрии П-образного модуля с размером 16x16 ветвей представлен на рис. 2.

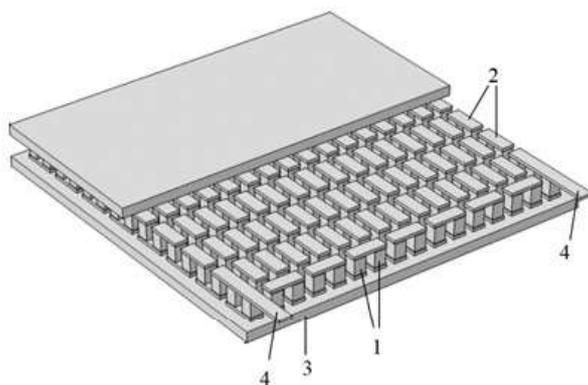


Рисунок 2 – Устройство термоэлектрического модуля:  
1 -ветви термоэлементов, 2- медные шины, 3 – теплообменные керамические пластины, 4 – контактные выводы

Модуль состоит из ветвей, выполненных из термоэлектрических материалов, коммутационных металлических пластин (шин), керамических пластин. Создание конечного устройства включает в себя добавление радиатора, прижимных пружин, подсоединение к электрической цепи и т.д. Такая конструкция является основой для создания термоэлектрических генераторов и охладителей.

Основной физический эффект преобразования энергии происходит в термоэлектрических ветвях. Остальные элементы модуля необходимы для функционирования конечного устройства, однако могут вносить вклад в снижение его эффективности.

## 1.3 Режим генератора

В режиме генератора термоэлектрический модуль может работать при приложении тепловой нагрузки к одной из керамических пластин (т.е. при нагреве) и создания теплоотвода от противоположной керамической пластины. Между горячей и холодной сторонами модуля возникает разность температур  $\Delta T$ , что приводит к возникновению разности потенциалов между контактными выводами. Появление термоЭДС обусловлено эффектом Зеебека. При подключении модуля к внешней

полезной электрической нагрузке в замкнутой цепи возникнет электрический ток.

Разность потенциалов  $V$ , возникающая в модуле, определяется следующей формулой:

$$V = S\Delta T,$$

где  $S$  – коэффициент Зеебека или коэффициент термоЭДС пары материалов.  $S$  имеет размерность [В/К]. Однако в силу малости значений термоЭДС чаще используется размерность [мкВ/К].

Схематическое изображение соединения термоэлектрического генератора представлена на рис. 3.

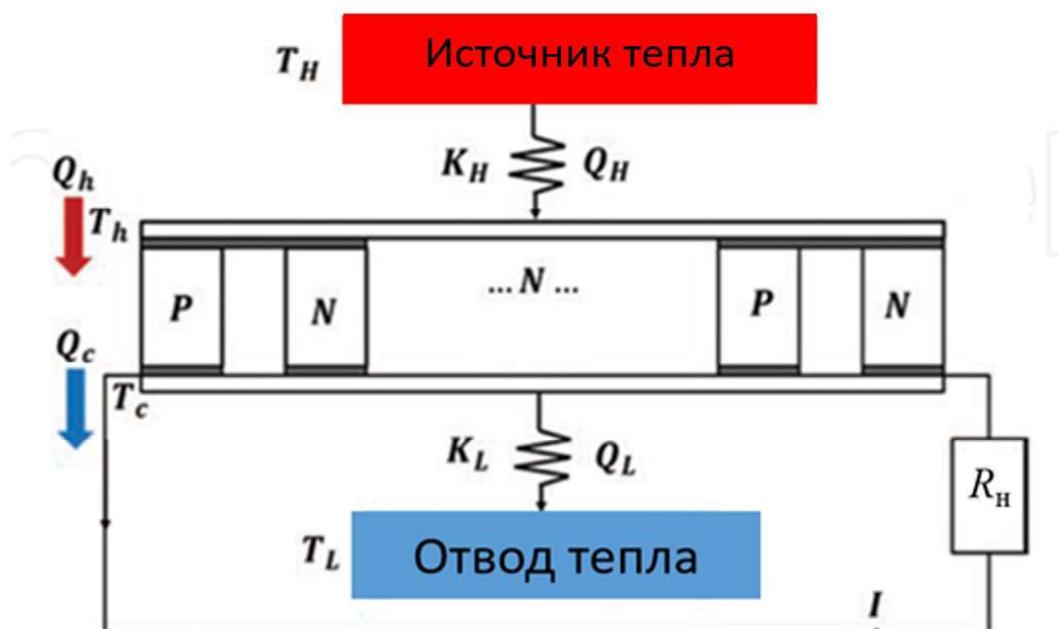


Рисунок 3 – Схематическое изображение термоэлектрического генератора

В термоэлектрических модулях термоэлементы электрически соединены последовательно, а в тепловом отношении – параллельно.

#### 1.4 Режим охладителя

Термоэлектрический преобразователь может работать в режиме охладителя (модуля Пельтье) при последовательном подключении к замкнутой электрической цепи, по которой протекает электрический ток. В этом случае между сторонами модуля возникает перепад температур.

Одна из керамических пластин начнет охлаждаться, т.е. возникнет эффект Пельтье. Противоположная (горячая) сторона будет нагреваться.

При подсоединении тепловой нагрузки к холодной стороне будет происходить отвод тепла от этой нагрузки. Для интенсификации отвода тепла в окружающую среду устанавливают теплообменник (радиатор, водяной охлаждающий контур).

Термоэлектрический эффект обратим, модуль Пельтье может работать в двух режимах: генератора и охладителя. Однако размеры модулей, предназначенных для работы в качестве генераторов и охладителей, отличаются.

## 2. СОЗДАНИЕ ФАЙЛА МОДЕЛИ И РАБОТА С ГЕОМЕТРИЕЙ

### Задание 1

*Построить геометрическую модель П-образного термоэлектрического модуля. При выборе геометрических размеров элементов следует использовать значения, приведённые в Приложении 1 таблице 1.*

*Настройки геометрии термоэлектрического модуля следует задавать таким образом, чтобы вся геометрия модуля целиком перестраивалась при изменении одного параметра – числа ветвей в ряду. Используйте для этой цели параметры как для описания размеров элементов, так и для описания их положения в пространстве и друг относительно друга. После этого проверьте перестраиваемость геометрии модуля:*

- для трех значений числа ветвей в ряду «*num\_leg*»: 2, 4 и 6.
- при изменяющейся высоте ветви для значений 2 мм и 4 мм.
- при изменяющемся сечении ветви: 2х2мм<sup>2</sup> и 4х4 мм<sup>2</sup>.

### 2.1 Предварительная настройка модели

Процесс создания модели рассмотрим на примере модели термоэлектрического преобразователя П-образной конфигурации 6х6 (рис. 4).

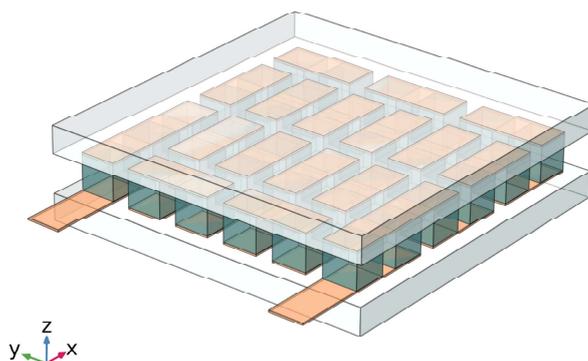


Рисунок 4 – Внешний вид модели П-образного модуля 6x6

Для начала работы необходимо запустить программу и в появившемся окне во вкладке "File" выбрать опцию "Save", сохранив новый файл в необходимом месте под выбранным именем.

Затем для построения модели следует выбрать опцию "Model Wizard".

Выбрать размерность пространства построения – "3D".

В верхнем окне меню "Physics" выбрать из основного списка раздел "Heat Transfer", в выпадающем меню выбрать "Thermoelectric Effect" (рис. 5).

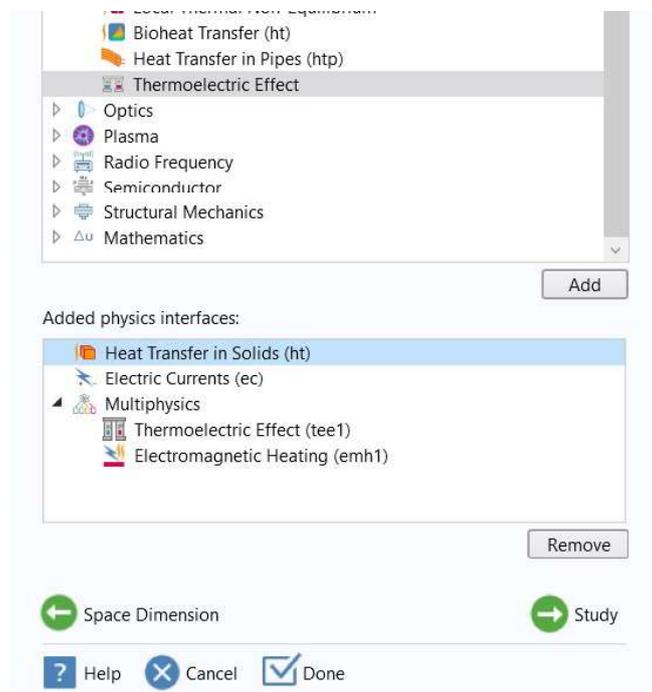


Рисунок 5 – Выбор физической модели

Список физических модулей, составляющих мультифизический модуль "Thermoelectric Effect", отображающийся

в нижнем окне, следует оставить без изменений. Это позволит задействовать в модели все термоэлектрические эффекты.

Перейти в окно начальной настройки решателя "*Study*", выбрать из меню "*General Studies*" стационарный режим "*Stationary*" (рис. 6).

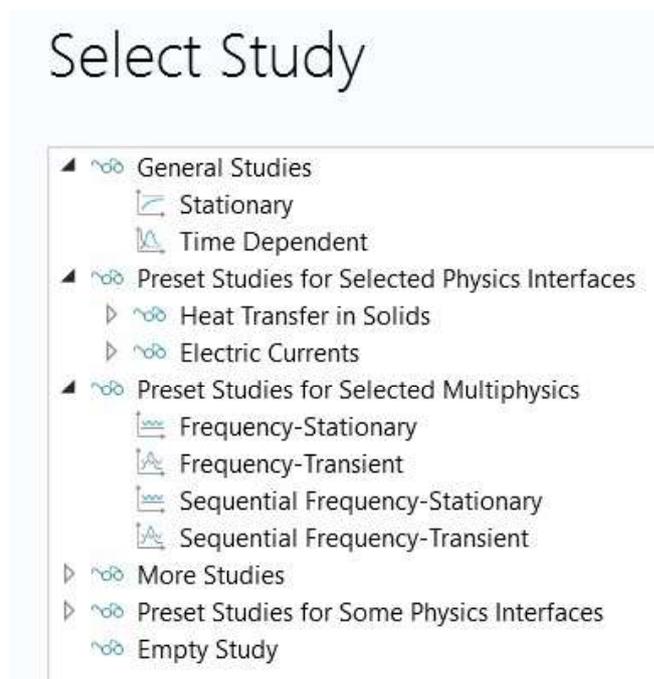


Рисунок 6 – Выбор решателя модели

Сохранить предварительные настройки, выбрав опцию "*Done*". После проведения вышеуказанной последовательности действий на экране отобразится окно проекта.

## 2.2 Построение модели (Раздел "*Model Builder*")

Рабочее окно (рис. 7) состоит из меню (ленты инструментов) и четырех основных элементов:

- *Model Builder*, в котором находится доступ к геометрии, физике, сетке, решателю и постобработке результатов;
- *Settings*, где можно производить настройки каждого элемента модели;
- *Graphics* – графическое окно;
- окно, содержащее сообщения системы, *log*, данные таблиц и расчетов при обработке результатов.

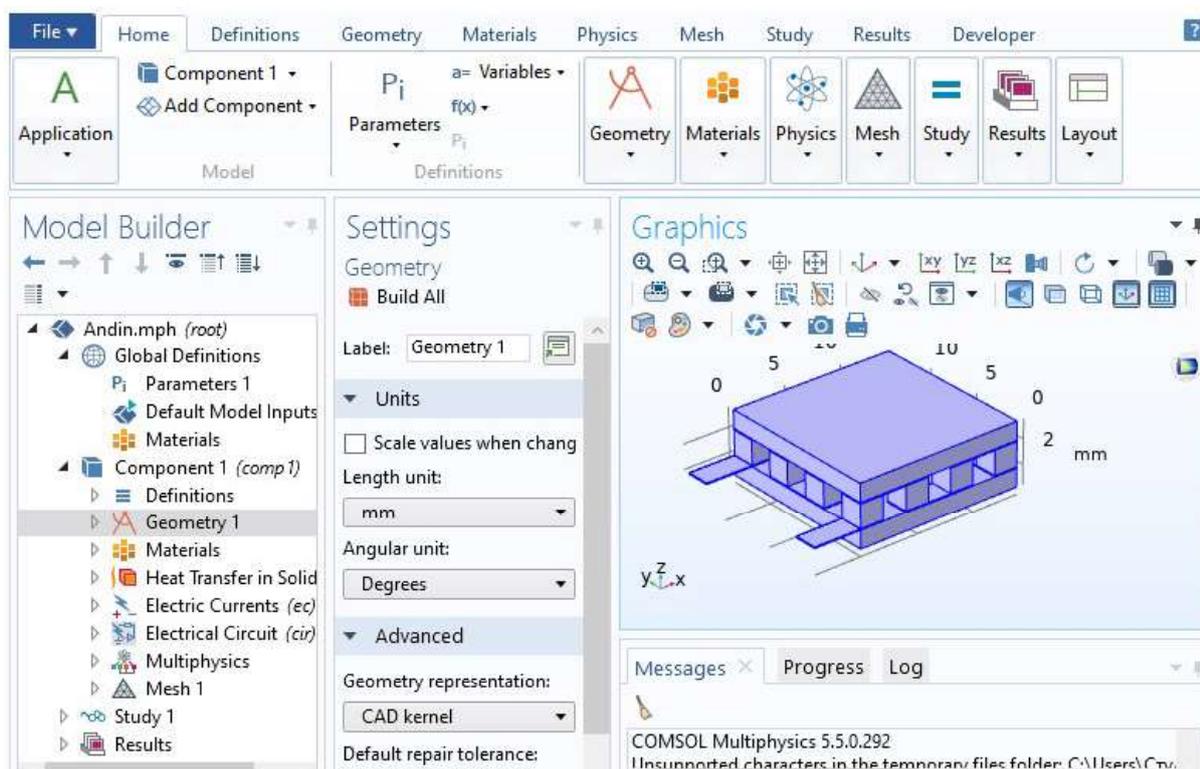


Рисунок 7 – Рабочее окно программы

Содержание ленты инструментов почти полностью повторяет *Model Builder*.

Дерево модели находится в окне *Model Builder* и состоит из нескольких ключевых блоков: *Global Definitions* – блок, в котором записываются глобальные (применимые ко всем разделам модели) параметры, функции и переменные для работы с моделью; *Component* – блок с основными настройками модели; *Study* – блок с настройками решателя, его типом, шагом расчета и отображения результатов и т.д.; *Results* – блок, в который записываются результаты расчета, в нем возможна работа с таблицами, графиками, создание анимации и т.д.

Настройка каждого из блоков осуществляется в окне *Settings*, визуальное отображение доступно в окне *Graphics*.

Детальное построение модели для решения задачи осуществляется в разделе “*Component 1*” при помощи модулей “*Geometry*”, “*Materials*”, “*Heat Transfer In Solids*”, “*Electric Current*”, “*Mesh*”, “*Results*”.

## 2.3 Работа с параметрами

При работе с моделями удобно задавать входные данные как параметры. При этом значение переменной записывается не напрямую, а при помощи присвоения ей значения параметра. В этом случае настройка модели осуществляется при помощи ссылки на параметры (через имена параметров). Преимуществом такого подхода является возможность изменять настройки модели в одном месте – в таблице параметров, без необходимости изменять настройки в каждом модуле отдельно. Это снижает вероятность ошибок при моделировании. А при большом количестве переменных это позволяет оптимизировать настройку модели и сократить время работы.

Имя параметра прописывается в таблице параметров, которая находится в дереве модели (*Model Builder – Global Definitions – Parameters*). Параметру присваивается значение и размерность. Далее при работе с конструктором модели можно оперировать именем параметра, значение которого хранится в таблице параметров.

Параметры можно изменять и связывать между собой при помощи аналитических выражений. Например, при ширине ветви «*d*» высота может быть задана через ширину – например, «*d\*4*». При высоте медной пластины «*h\_c*» общая высота медной пластины и ветви может быть записана как «*d\*4+ h\_c*». Таким образом можно оптимизировать процесс работы с геометрией.

При работе с моделью можно убирать или добавлять необходимые параметры. Полезно добавлять описания к переменным, чтобы другие пользователи понимали их назначение.

Для описания геометрии модуля необходимо задать следующие параметры:

- ширину, длину и высоту термоэлектрической ветви,
- толщину и длину металлической коммутационной пластины,
- толщину керамической пластины.

В узле *Global Definitions* выберите раздел *Parameters* (Параметры). В таблице *Parameters* щелкните по первой строке в блоке *Name* (Имя) и введите имя первого параметра «*a\_1*».

Щелкните по первой строке в блоке *Expression* (Выражение) и введите его значение для «*a\_1*» «*2[mm]*». Единица измерения указывается в квадратных скобках. В графе *Description* оставляем описание параметра *leg width* (ширина ветви, ось *x*).

По описанному алгоритму следует добавить остальные параметры.

Параметры, необходимые для построения геометрической модели термоэлектрического модуля, представлены в Приложении 1 таблице I.

## 2.4 Построение геометрической модели

В COMSOL Multiphysics доступно несколько вариантов создания объектов для построения геометрии. При построении модели возможны выбор объекта из набора встроенных типовых фигур и добавление фигур (примитивов) в геометрическую последовательность.

При построении геометрии модуля следует использовать типовые фигуры элементов типа “*Block*”.

Редактирование геометрии производится в окне *Settings* (настройки). Для настройки объекта необходимо указать точное положение и размеры объекта или внести изменения в эти параметры (при необходимости). Объекты можно комбинировать и преобразовывать для создания окончательной геометрии модели.

Последовательность действий при редактировании геометрии объекта состоит в следующем.

В окне “*Settings*” настроить размерность объекта, выбрав миллиметры (mm) в разделе “*Length unit*”.

Вызвать меню раздела “*Geometry*” нажатием правой кнопки мыши. Выбрать инструмент “*Block*”. Построение геометрии целесообразно начинать с термоэлектрической ветви.

Выставить размеры в разделе “*Size and Shape*”.

Задать координаты базовой точки в разделе “*Position*”.

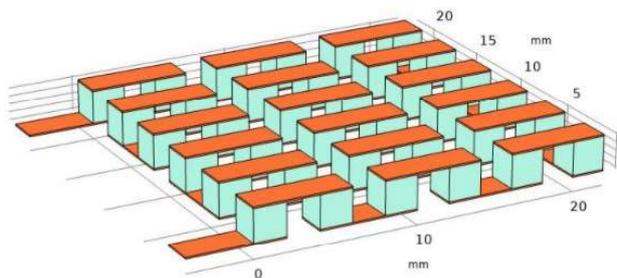
Для графического отображения доменов выбрать опцию “*Build all objects*”.

Для создания термоэлектрических ветвей и медных пластин. применить инструмент “*Array*” (“*Geometry*” → “*Transforms*” → “*Array*”), позволяющий строить массив элементов. Для этого добавьте *Array*, в окне “*Settings*” → “*Input*” выделите домен, который необходимо размножить (например, термоэлектрическую ветвь). При выделении домена левым кликом мыши объект изменит окраску с серого цвета на сиреневый.

В окне “*Size*” обозначить число размножений (число элементов будущего массива) по осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . В окне “*Displacement*” обозначить смещение элементов массива друг относительно друга.

На рис. 8 показан вид геометрии ТЭМ без отображения керамических пластин.

а



б

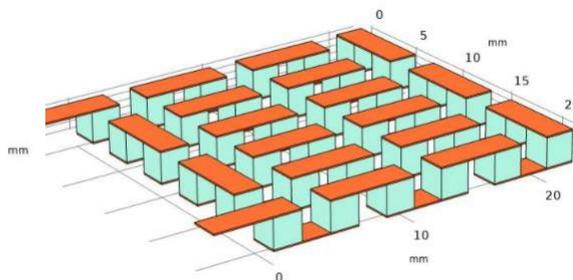


Рисунок 8 – Расположение металлических пластин:  
вид сверху (а) и снизу (б).

### 3. СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

#### Задание 2

*Построить модель модуля 2x2 и задать свойства материалов для всех доменов модели, используя данные, приведенные в Приложении 1.*

Для решения термоэлектрической задачи необходимо задать свойства всех материалов: термоэлектриков двух типов проводимости (*p*- и *n*-типа), меди, керамики ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Термоэлектрические материалы являются полупроводниками, их тепло- и электропроводность может сильно изменяться с изменением температуры и имеет широкий диапазон значений.

Керамика является диэлектрическим материалом с крайне низкой электропроводностью и относительно высокой теплопроводностью.

Медь - типичный проводник. Она обладает как высокой теплопроводностью, так и высокой электропроводностью.

Свойства термоэлектрических материалов будут соответствовать  $\text{Zn}_{0.03}\text{Cu}_{0.97}\text{FeS}_2$  для *n*-типа проводимости и  $\text{CuCr}_{2-x}\text{Sb}_x\text{S}_4$  для *p*-типа проводимости. В проводнике *n*-типа основными носителями заряда являются электроны, в проводнике *p*-типа – дырки. Материал *n*-типа обладает коэффициентом Зеебека со знаком «-», материал *p*-типа со знаком «+».

Термоэлектрические свойства – значения коэффициентов Зеебека (*Seebeck Coefficient*), теплопроводности (*Thermal Conductivity*) и электропроводности (*Electrical Conductivity*) – зададим в виде

зависимости от температуры. Зависимости этих коэффициентов для термоэлектриков представлены в Приложении II в таблицах II-IV.

Термоэлектрические свойства меди и керамических пластин можно представить в виде констант. Все свойства, которые приняты независимыми от температуры в рассматриваемом температурном диапазоне, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Свойства материалов термоэлектрического модуля

Свойство материала	Единица измерения	Материал			
		Термоэлектрик <i>n</i> -типа	Термоэлектрик <i>p</i> -типа	Керамика, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Медь, Cu
Плотность, $\rho$ ( <i>Density</i> )	кг/м <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>	5200	5200	3950	8960
Относительная диэлектрическая проницаемость, $\epsilon$ ( <i>Relative Permittivity</i> )	безразмерная величина	1	1	1	1
Теплоемкость, $c_p$	J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> J/(kg·K)	154	154	730	384
Коэффициент Зеебека ( <i>Seebeck Coefficient</i> )	мкВ/К V/K	см. Приложение II Табл II-1	см. Приложение II Табл II-1	1e-10	3e-6
Коэффициент теплопроводности ( <i>Thermal Conductivity</i> )	Вт/(м·К) W/(m·K)	см. Приложение II Табл II-2	см. Приложение II Табл II-2	35	401
Коэффициент электропроводности ( <i>Electrical Conductivity</i> )	См/м S/m	см. Приложение II Табл II-3	см. Приложение II Табл II-3	1e-10	58e6

### 3.1 Выбор необходимых физических свойств материалов

Если при создании модели был выбран мультифизический модуль, “*Thermoelectric Effect*”, то программа по умолчанию распространяет действие физических законов выбранного модуля (термоэлектрических эффектов) на все элементы и геометрические объекты модели. Перечень всех необходимых для решения задачи свойств материалов элементов модели формируется программой автоматически.

Для керамических и металлических пластин можно воспользоваться библиотекой встроенных материалов. Следует задействовать опцию «*Add Material*» на верхней панели) и в каталоге *Built-In Materials* (Встроенные материалы) найти нужный материал и добавить его к домену двойным щелчком левой кнопкой мыши. Для удобства можно воспользоваться материалами из блока *MEMS* (*Micro electro-mechanical systems*) (рис. 9).

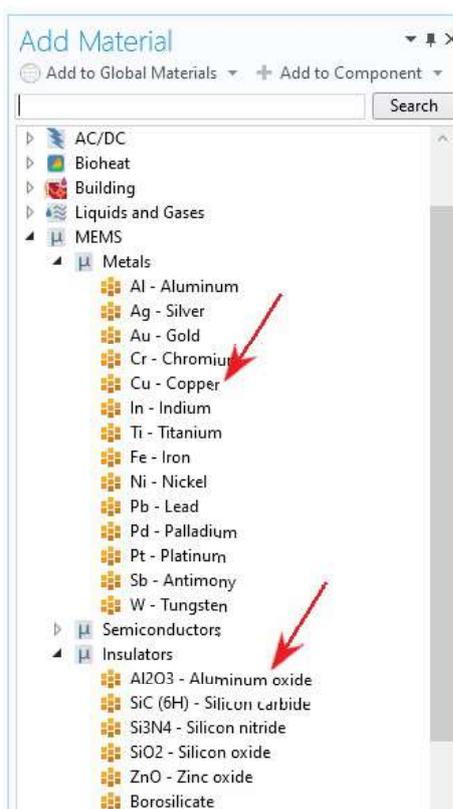


Рисунок 9 – Библиотека материалов с отмеченными материалами, используемыми в модели

Если необходимый для создания модели материал отсутствует в библиотеке материалов, его образ необходимо создать. Для этого надо

создать пустой материал (*Materials* -> *Blank Materials*). Свойства этого материала нужно будет записать вручную.

Данные о свойствах материалов для всех физических интерфейсов и геометрических областей узла *Component* будут сохраняться в узле *Materials* (Материалы).

### 3.2 Присвоение физических свойств определенному геометрическому объекту

По умолчанию, материал, задаваемый для первого домена, назначается материалом для всех доменов модели. Далее необходимо перезаписать материал для остальных доменов.

Для задания материала конкретного объекта нажмите на нужный материал и выделите щелчком мыши нужный геометрический объект в окне “*Graphics*” (рис. 10). Номера выделенных объектов отобразятся в окне *Settings* во вкладке *Geometric Entity Selection*.

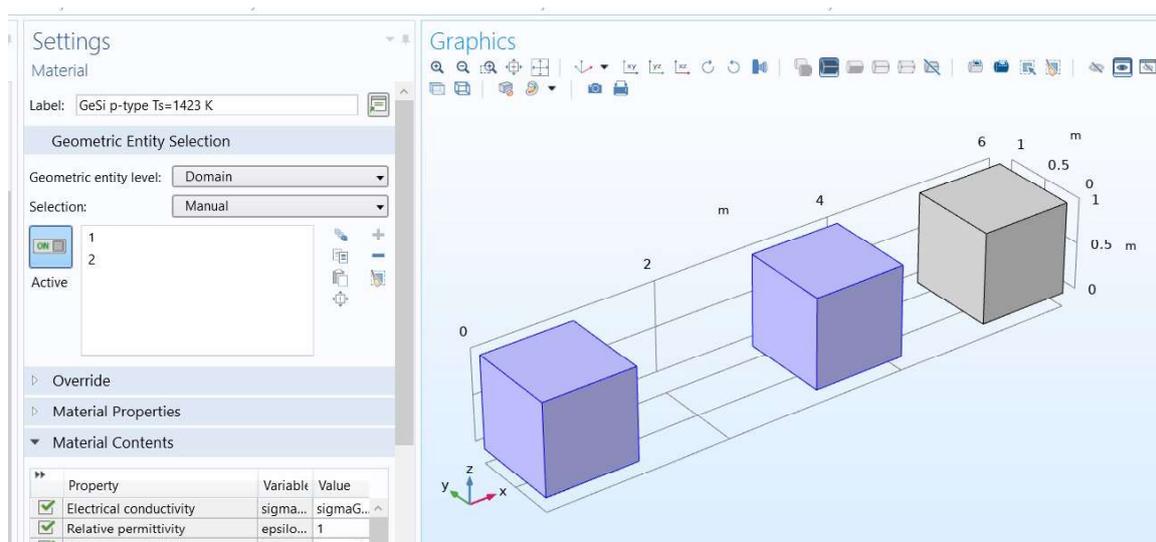


Рисунок 10 – Работа с *Geometric Entity Selection*

### 3.3 Таблица свойств материала

В разделе *Material Contents* (Свойства материала) сохраняется информации о свойствах используемых в модели материалов (рис. 11).

Property	Variable	Value	Unit	Property
<input checked="" type="checkbox"/> Heat capacity at constant pres...	Cp	154[J/(k...	J/(kg·K)	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Density	rho	7700[kg...	kg/m <sup>3</sup>	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Seebeck coefficient	S_iso ;...	S(T)	V/K	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Electrical conductivity	sigma...	sigma(T)	S/m	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Thermal conductivity	k_iso ;...	k(T)	W/(m...	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Relative permittivity	epsilo...	1	1	Basic

Рисунок 11 – Таблица свойств материала

Зеленой галочкой помечаются свойства, которые требуются для физических интерфейсов и при этом доступны; отсутствующие, но необходимые для корректной работы модели свойства - предупреждающим значком. Доступные, но не используемые в модели свойства меток не имеют.

В таблице свойств материала «*Property*» укажите численные значения тех свойств, которые приняты не зависящими от температуры. Для свойств, зависящих от температуры, в графе *Value* указывается ссылка на функцию.

### 3.4 Задание температурной зависимости свойств

Присвоение имени функции (с учетом ее зависимости от температуры) и запись ее размерности производится в *Materials Contents* (рис. 12). Например, для задания значения коэффициента Зеебека в виде температурной зависимости в графе меню значение коэффициента следует записать в виде функции - “ $S(T)$ ”.

Создание функции происходит при помощи опции *Function*. В выпадающем меню материала выберите: «*Basic*» -> «*Functions*» -> «*Interpolation*» и добавьте интерполяционную функцию.

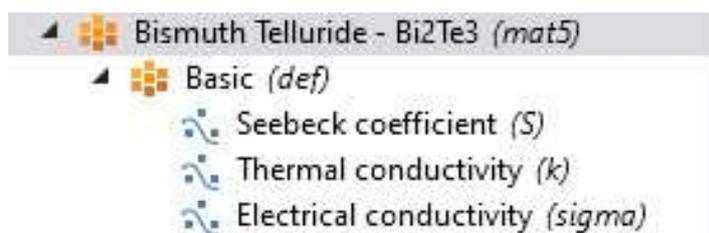


Рисунок 12 – Меню свойства материала

Далее в окне «*Settings*» (рис. 13) во вкладке «*Definition*» необходимо написать имя функции (*Function Name*), которое должно совпадать с именем в *Material Contents*. В таблицу (рис.13) следует занести значения функции в виде зависимости значений свойства от температуры.  $f(t)$  – значения функции,  $t$  – аргумент, относительно которого изменяется функция (в рассматриваемом случае, температура).

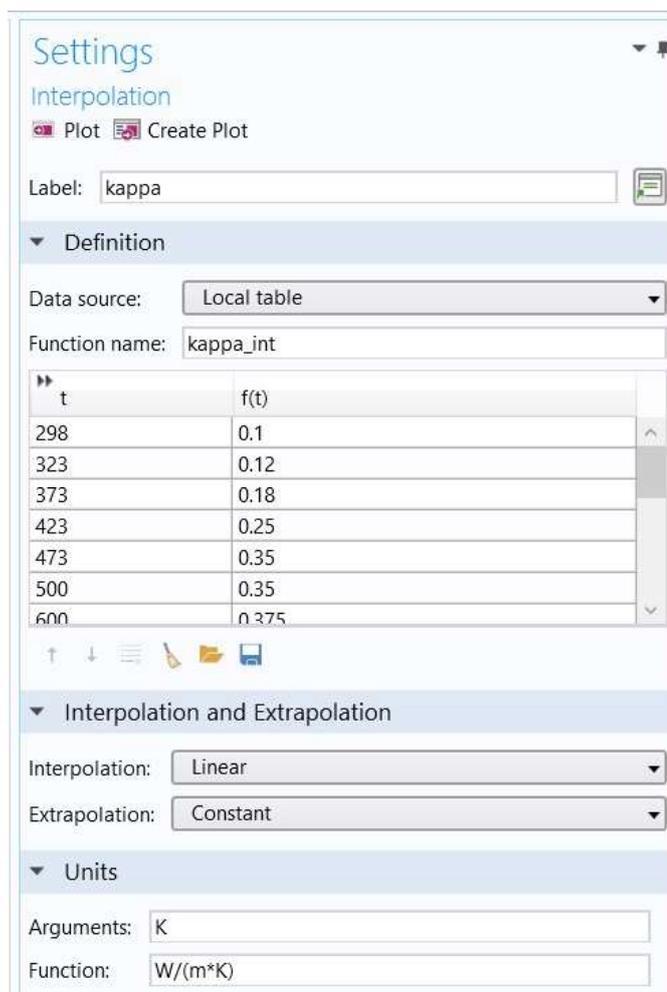


Рисунок 13 – Настройки интерполяционной функции

В нижней части окна во вкладке “*Units*” необходимо записать размерность функции и аргумента. В противном случае функция не будет распознана.

Например, аргумент – температура, размерность K; функция – коэффициент теплопроводности, размерность Вт/(м·К).

Запись математических операций производится в соответствии Приложением III.

## 4. ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ

### Задание 3

Задать граничные условия на всех внешних границах модуля.

#### 4.1 Система уравнений модели

Система уравнений модели отображается в разделе *Equation* (Уравнение) окна *Settings* соответствующих физических интерфейсов (рис. 14).

Форма и состав системы уравнений по умолчанию наследуется из физического интерфейса, добавленного в Мастере создания моделей.

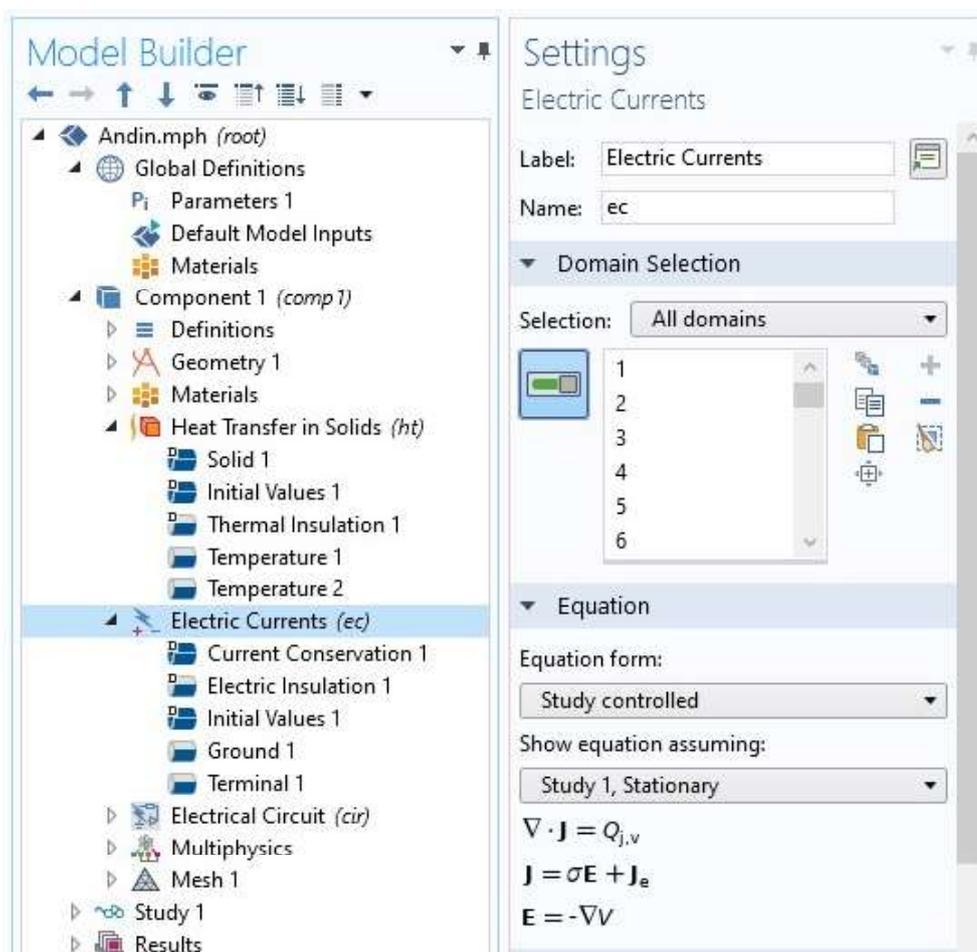


Рисунок 14 – Раздел *Equation* физического интерфейса

Термоэлектрическая модель описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных, включающей:

- закон сохранения энергии (уравнение теплового баланса) (1)
- уравнение теплопроводности (в общем виде) (2)

- уравнение электропроводности (в общем виде) (3)
- закон сохранения электрического заряда (4)

Уравнение теплового баланса:

$$\rho c_p(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} - \nabla \cdot \bar{q} = Q_{\text{дж}}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность материала,  $T$  – температура,  $c_p$  – теплоемкость при постоянном давлении,  $\tau$  – время,  $Q_{\text{дж}}$  – источник теплоты Джоуля (источник тепла);  $\bar{q}$  – плотность теплового потока:

$$\bar{q} = -\kappa(T)\nabla T + S(T)T\bar{j}, \quad (2)$$

где  $\kappa$  – коэффициент теплопроводности материала,  $\nabla T$  – градиент температуры,  $S$  – коэффициент Зеебека,  $\bar{j}$  – плотность тока:

$$\bar{j} = \sigma(T)(\nabla V + S(T)\nabla T), \quad (3)$$

где  $V$  – электрическое напряжение,  $\sigma$  – коэффициент электропроводности.

Закон сохранения заряда:

$$\nabla \cdot \bar{j} = 0. \quad (4)$$

## 4.2 Тепловые граничные условия

Для решения системы уравнений необходимо принять краевые условия (начальные и граничные условия (ГУ)). По умолчанию ко всем внешним границам применено условие электрической и тепловой изоляции.

Настройки для задания условий теплопереноса и электропроводности доступны в узлах *Heat Transfer in Solids* (Теплопередача в твердых телах) и *Electric Currents* (Электрические токи).

Для выбора тепловых граничных условий поддержания постоянной температуры на границах керамических пластин нужно использовать интерфейс *Heat Transfer in Solids*.

Правой кнопкой мыши выбрать ГУ *Temperature 1* (рис. 15), затем выбрать одну из границ ТЭМ (рис. 16). Вместо выставления численного значения температуры необходимо записать ссылку на параметр  $T_h$ . Данная сторона будет являться горячей.



Рисунок 15 – Фрагмент окна программы с открытым узлом *Heat Transfer in Solids*

Для противоположной (холодной) стороны модуля добавить ГУ *Temperature 2*. Присвоить значение температуры 273 К. Таким образом, создается разность температур по высоте модуля. На всех остальных границах останется ГУ по умолчанию «*Thermal Insulation*».

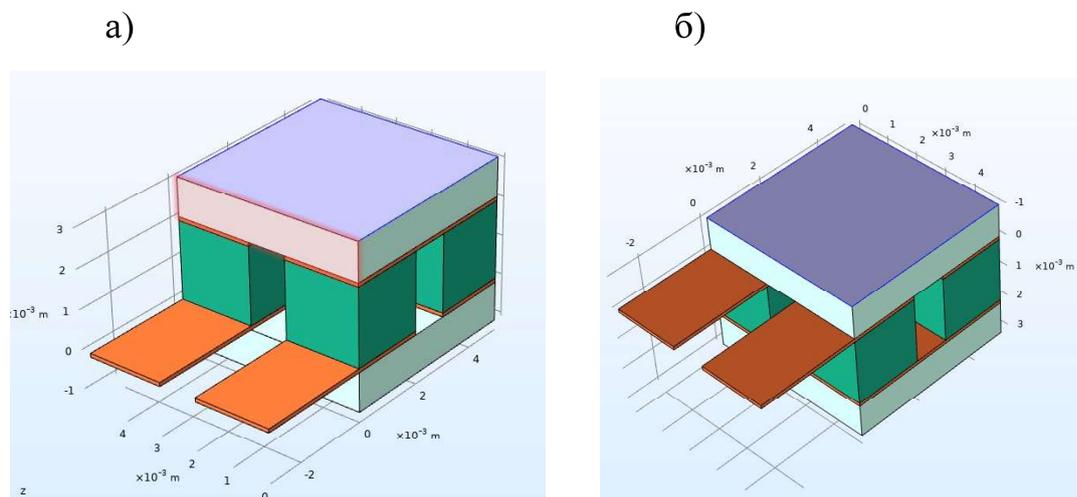


Рисунок 16 – Модель с выделенными границами, к которым применено условие *Temperature 1* (а) и *Temperature 2* (б).

### 4.3 Электрические граничные условия

Настройки для задания условий электропроводности доступны в узле *Electric Currents* (Электрические токи). Узел *Current Conservation* (закон сохранения заряда) отражает сохранение электрического тока на уровне выделенной области. Граничное условие по умолчанию для электрических токов – *Electric Insulation* (Электрическая изоляция). Применение граничного условия *Terminal* позволяет моделировать подключение к модулю виртуальной электрической цепи с внешней нагрузкой.

Переназначение граничного условия производится щелчком правой кнопкой мыши по узлу *Electric Currents* (Электрические токи) и выбором нужного условия из контекстного меню. Необходимо выбрать два условия: *Ground* и *Terminal* (рис. 17).



Рисунок 17 – Фрагмент экрана с контекстным меню узла *Electric Currents*

Граничные условия *Terminal* и *Ground* необходимо применить к торцам контактных выводов, а не ко всей их поверхности (рис. 18).

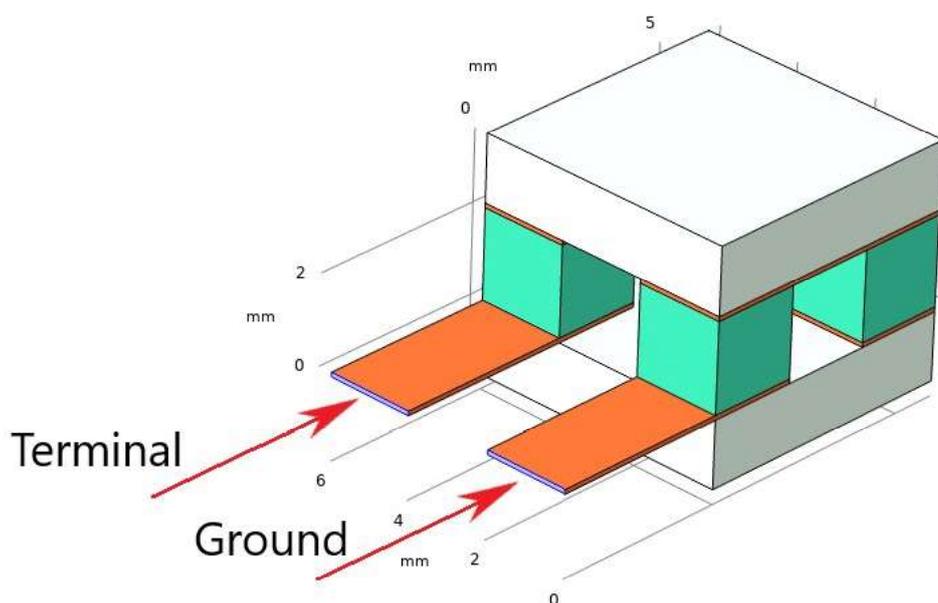


Рисунок 18 – Применение электрических граничных условий к торцам контактных выводов

В настройках условия *Terminal* (*Terminal Type*) следует выставить тип терминала – “*Circuit*” (цепь). Таким образом, будет осуществляться подключение модуля к внешней электрической цепи. Модуль в данном случае будет выступать источником ЭДС в цепи.

#### 4.4 Добавление внешней электрической цепи

Для добавления внешних элементов виртуальной электрической цепи нужно выбрать на верхней панели интерфейса программы

дополнительный физический интерфейс: *Add Physics > AC/DC -> Electrical Circuit*.

В интерфейсе *Electrical Circuit* (рис.19) добавляем следующие элементы: элемент заземления, резистор, амперметр и внешний терминал.

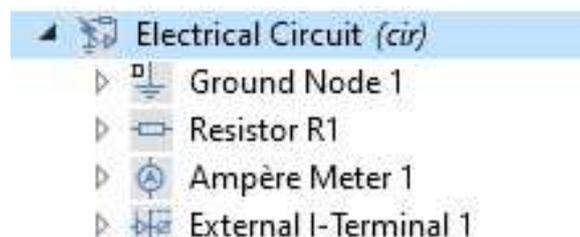


Рисунок 19 – Фрагмент окна с выбранными элементами внешней цепи

Для каждого элемента необходимо прописать узлы в внешней электрической цепи, чтобы программа могла распознать порядок их соединения. Узлы нумеруются, начальный номер 0, затем 1 и т.д. Это позволяет программе определить топологию электрической цепи (способ соединения элементов внешней цепи). Нумерация узлов в рассматриваемом случае схемы с последовательным соединением элементов приведена в табл.2.

Таблица 2. Настройки топологии внешней цепи

Элемент внешней электрической цепи	Имя элемента ( <i>Label</i> )	Номер узла	
		Метка узла ( <i>Node Name</i> ) p	Метка узла ( <i>Node Name</i> ) n
Заземление	<i>Ground</i>	0	
Резистор	<i>Resistor 1</i>	0	1
Амперметр	<i>Ampere Meter</i>	1	2
Внешний терминал	<i>External terminal</i>	2	

Если величина параметра сопротивления внешней нагрузки оценивается фиксированным численным значением, то необходимо занести его численное значение. Если предполагается возможность изменения этой величины, то значение следует задавать в виде параметра.

В нашем случае, для получения зависимостей мощности модуля и его КПД от нагрузки, сопротивление внешней нагрузки необходимо задавать параметрическим образом (рис. 20). Для этого вместо численного значения в графе *Device Parameters* следует записать его имя (например, имя параметра сопротивления резистора - *resistor*).

В таблицу параметров (*Global Definitions -> Parameters*) занести имя параметра и присвоить параметру значение (например, 1 Ом (1[ohm])).

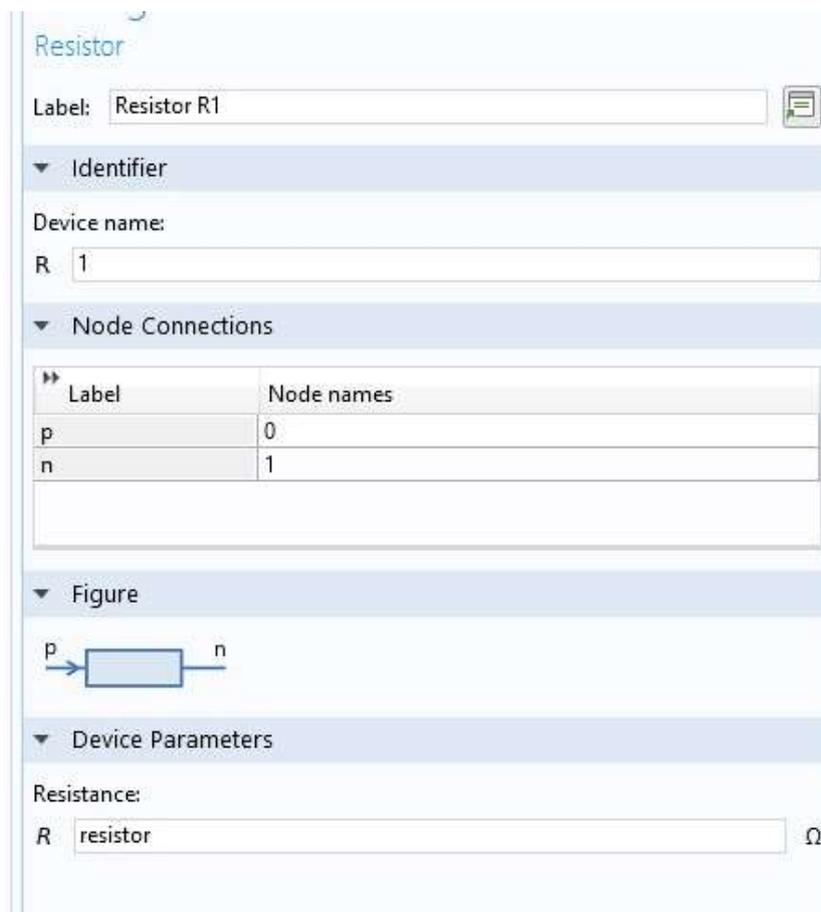


Рисунок 20 – Окно настройки элементов внешней цепи

В настройках терминала указать, что электрический потенциал берется из интерфейса *Electric Currents/Terminal (ec/term)* (рис. 21). Таким образом, напряжение во внешней цепи будет равно разности потенциалов между контактными выводами модуля.

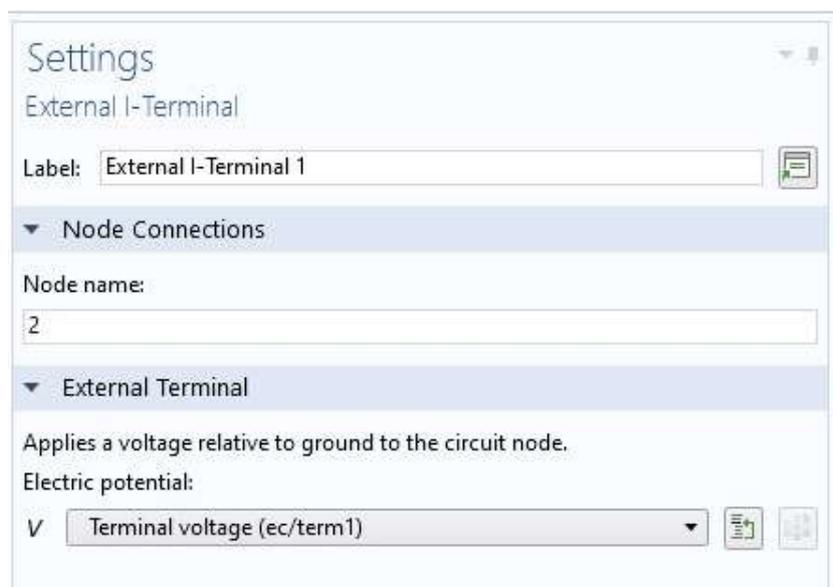


Рисунок 21 – Окно настройки условия *Terminal*

## 5. НАСТРОЙКА ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОЙ СЕТКИ

### Задание 4

*Произвести настройку пользовательской сетки модели модуля 2x2 с разбиением объёма модели на конечные элементы в форме параллелепипедов.*

По умолчанию операция *Mesh* производит разбиение объема на конечные элементы в форме тетраэдра. В нашем случае использование сетки, предлагаемой по умолчанию, не рационально, так как это существенно увеличивает длительность расчетов.

Для ускорения расчетов необходимо использовать сетку с конечными элементами в форме прямоугольных параллелепипедов. Эта конфигурация сетки позволит существенно сократить количество конечных элементов и повысить скорость выполнения и качество расчетов.

#### 5.1 Сброс настройки сетки, установленной по умолчанию

Для настройки сетки в интерфейсе *Mesh* в окне «*Settings*» в «*Sequence type*» выставить значение *User-controlled mesh* (Сетка, настраиваемая пользователем) (рис. 22). В раскрывающемся меню под «*Mesh*» удаляем значение «*Free Tetrahedral*».

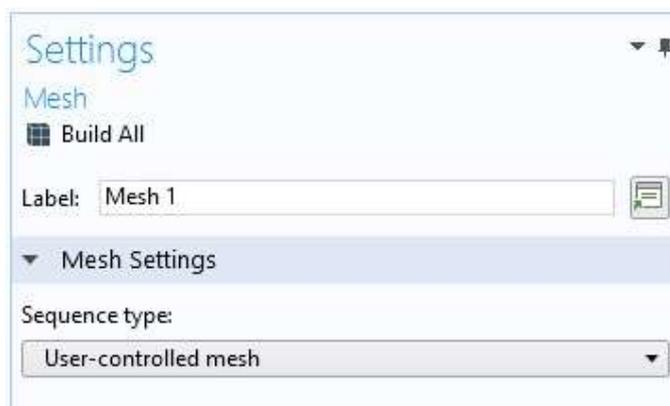


Рисунок 22 – Фрагмент окна с открытым интерфейсом *Mesh*

## 5.2 Разбиение границ доменов на конечные элементы (Опция *Mapped*)

Разбиение объема на конечные элементы следует начинать с разбиения на квадратные двумерные элементы поверхности торцов ветвей термоэлементов.

Перед проведением этой операции следует убрать из визуального отображения керамические пластины и медные шины с одной стороны модуля. Для этого необходимо перейти в режим *Click and Hide*, позволяющий убирать домены из отображения в графическом окне. Для перехода в этот режим нажмите «*Click and hide*» в графическом окне (позиция 1 на рис. 23). Для выхода из режима *Click and hide* нажмите на значок 1 еще раз. Опция *Reset Hiding* возвращает исходный вид геометрии модели (позиция 2, рис. 23).

В Comsol Multiphysics можно скрывать границы, поверхности и объекты других размерностей. Для работы с сеткой выберите опцию *Select domains* (рис. 23), позволяющую скрывать 3D объекты.



Рисунок 23 – Работа с отображением геометрических объектов:  
 1 – включение/выключения режима *Click and Hide*; 2 – *Reset Hiding*, сброс настроек и возвращение к исходному отображению; 3 – выбор режима отображения

На тулбаре есть возможность выделения нескольких доменов при помощи функции «*Select box*» (выделить рамкой) (рис. 23).

В узле Mesh кликом правой правой клавиши мыши вызовите: *More operations* → *Mapped*.

Примените опцию “*Mapped*” к торцам ветвей, лежащих в одной горизонтальной плоскости. Это приведет к разбиению их поверхности на квадратные элементы (рис. 24).

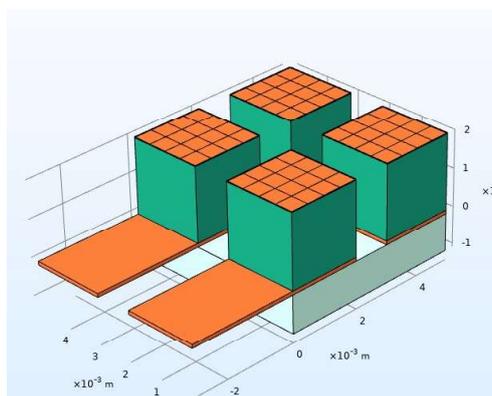


Рисунок 24 – Вид модели после разбиения поверхности торцов на квадратные элементы

После этого нужно снова нажать на значок «*Click and Hide*», чтобы вернуться в обычный режим. Для возвращения геометрии в исходное состояние используйте значок *Reset Hiding*.

### 5.3 Выполнение операции протяжки сетки (Опция *Swept*)

Для протягивания сетки через объем объекта необходимо добавить в меню Mesh кликом по правой кнопке мыши опцию *Swept* (протяжка). В графе *Domain Selection* следует выставить значение *Remaining* (оставшиеся объекты) (рис. 25).



Рисунок 25 – Фрагмент экрана.

Далее из выпадающего меню *Swept* выбрать опцию *Distribution* (распределение). Опция *Distribution* определяет количество элементов, на

которые будет разбит домен в вертикальном направлении. Количество элементов в каждом направлении должно быть не менее трех.

Можно использовать опцию *Distribution* несколько раз, выделяя разные домены, и выбрать разное число элементов для каждого выделения (рис. 26).

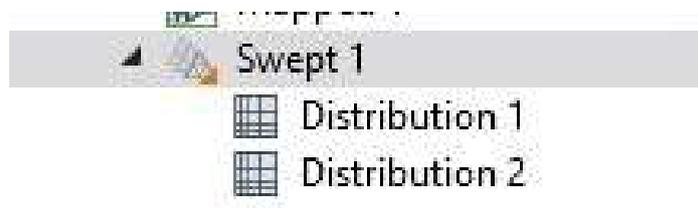


Рисунок 26 – Опция *Distribution*

Конечный вид сетки должен быть похож на сетку, представленную на рис. 27.

Количество элементов по высоте для керамических и медных пластин может быть равно 3, для термоэлектрической ветви оно может составлять от 5 до 15.

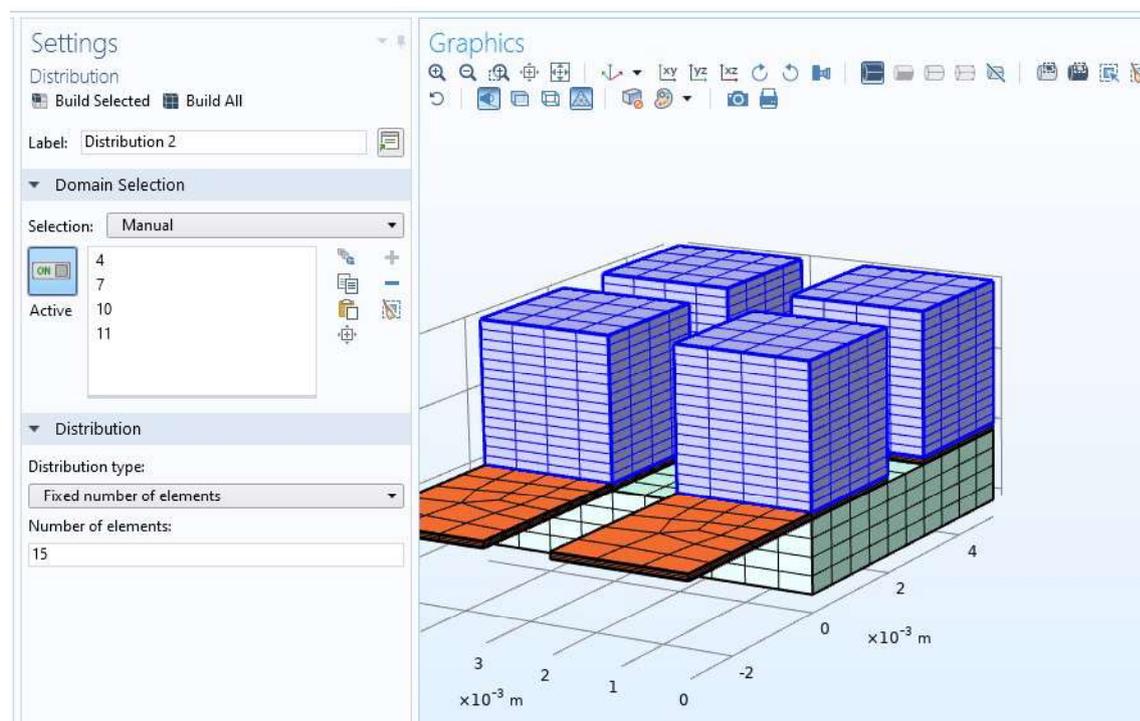


Рисунок 27 – Фрагмент модели с разбиением на конечные элементы

## 6. НАСТРОЙКА ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО РЕШАТЕЛЯ

### Задание 5

Произвести настройку параметрического решателя модели модуля 2x2, работающего в генераторном режиме. Решатель должен позволять изменять значения сопротивления внешней нагрузки и температуры горячей стороны модуля.

Параметрами можно описывать элементы геометрии и граничные условия. Параметры можно использовать вместо численных значений, а также можно записывать целые выражения с использованием параметров. Это позволяет создать настройки параметрического решателя, который будет решать задачу для ряда граничных условий, разных размеров модуля, или разных свойств материалов. То есть, если необходимо оценить работу модуля при разных температурах или с разным числом ветвей, это можно сделать одновременно в одной модели.

Для того, чтобы создать параметрический решатель, следует зайти во вкладку *Study* (Исследование/анализ). Правым кликом на *Study* вызывать меню, выбрать *Parametric Sweep* и перейти в окно *Settings* (рис.28).

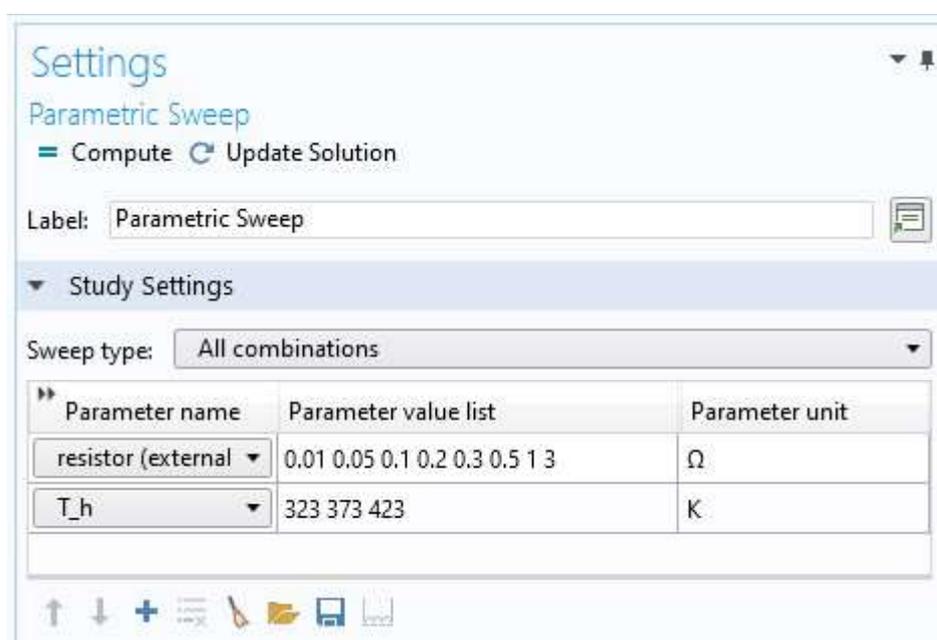


Рисунок 28 – Настройка параметрического решателя

В этом окне можно выбирать параметры, которые ранее были занесены в таблицу параметров *Global Definitions* -> *Parameters 1*. Выбор параметров осуществляется из выпадающего меню (знак «+» в окне настроек).

Выбираем параметр *resistor*. В графе значений параметра записываем через пробел или запятую список численных значений. Для сопротивления внешней нагрузки следует выбрать значения параметра *resistor* 0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1 и 5 Ом.

Добавляем параметр температуры горячей стороны модуля *T\_h* и задаем значения температуры: 323, 373, 423 К.

**Примечание.** Обратите внимание, что при задании сразу нескольких параметров *Sweep type* должен быть «*All combinations*». В противном случае это вызовет ошибку решателя. И обязательно проверять правильность задания размерности изменяющегося параметра (*Parameter unit*).

## 7. ПОСТОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

### Задание 6.

*Произвести расчет полезной мощности и КПД модуля 2x2, работающего в генераторном режиме, при разных значениях сопротивления внешней цепи и температуры горячей стороны. По результатам расчета построить графики основных характеристик ТЭМ в соответствии с Приложением 4. На осях графика следует указать размерности и название осей.*

#### 7.1 Определение величины тока во внешней цепи

По окончании расчета по умолчанию на экран выводится графическое изображение распределения поля температуры в объеме модуля (рис. 29).

resistor=10  $\Omega$ , T\_h=323 K

Surface: Temperature (K)

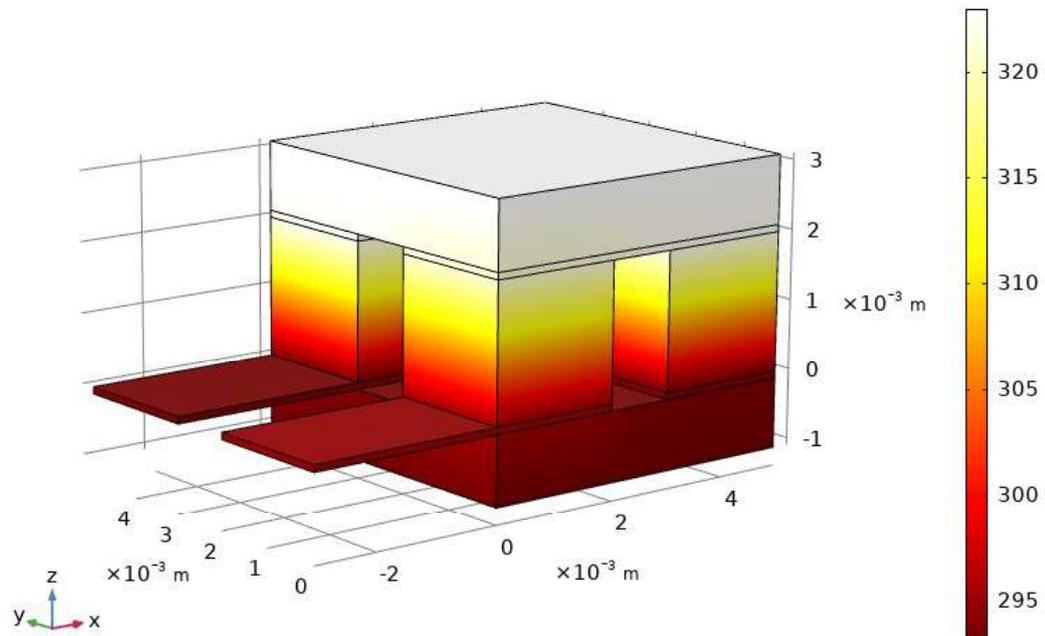


Рисунок 29 – Распределение поля температуры в ТЭМ

Во вкладке *Results* необходимо открыть *Derived Values*. В *Derived Values* автоматически должен быть сформирован результат расчета значения тока, протекающего во внешней электрической цепи *Current through Ampere meter 1* – это показания амперметра (рис. 30).

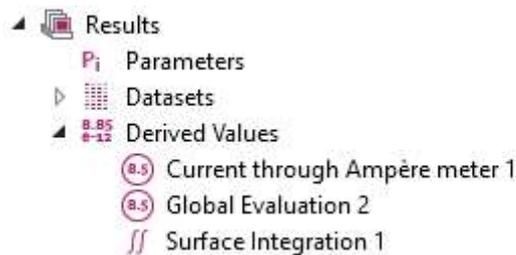


Рисунок 30 – Работа с *Derived Values*

Нажмите на эту вкладку. В окне настройки (рис. 31) в графе *Parametric Selection* выберите «All», это означает, что мы будем определять ток при всех значениях сопротивления внешней цепи и температуры на горячей стороне модуля. Нажимаем *Evaluate* (определить). Справа, под графическим окном нажмите на вкладку *Probe Table*, в которой отобразится таблица значений силы тока при всех выбранных

параметрах. Далее скопируйте таблицу при помощи опции *Copy Table and Headers to Clipboard*, доступную в меню *Probe Table*.

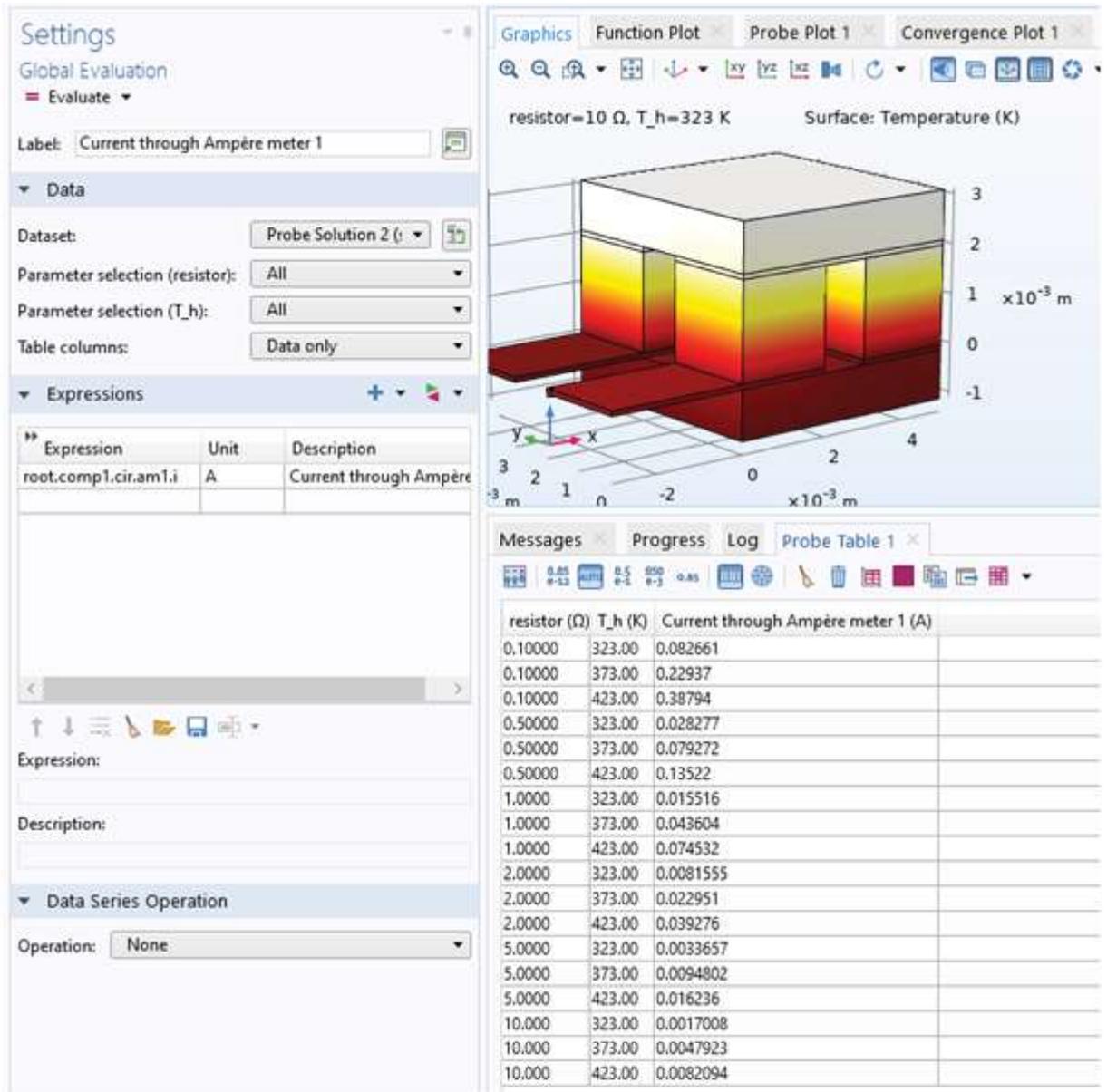


Рисунок 31 – Определение величины тока во внешней электрической цепи

Скопированные данные перенесите в Excel или другую программу для обработки данных. Далее, пользуясь полученными данными, необходимо найти полезную электрическую мощность при помощи выражения

$$P_{el} = I^2 R.$$

Данные расчетов полезной мощности занести в третий столбец таблицы 3.

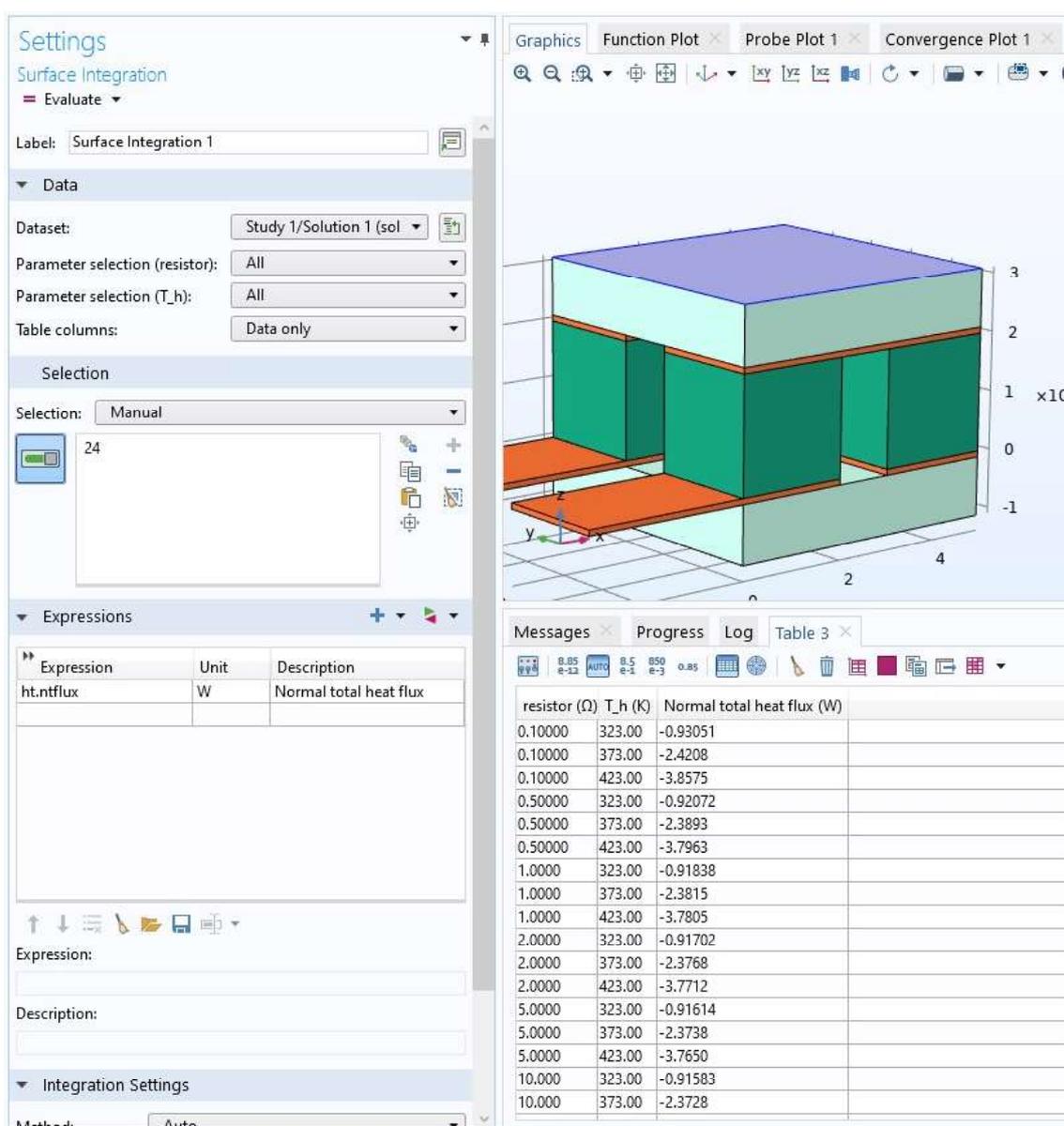
Таблица 3. Результаты расчета

Температура горячей стороны ТЭМ, К	Сопротивление внешней нагрузки, Ом	Электрическая мощность ТЭМ, Вт	Затраченная тепловая мощность, Q, Вт	Коэффициент полезного действия, %
1	2	3	4	5
323	0,01			
	0,05			
	0,1			
	0,2			
	0,5			
	1			
	3			
373	0,01			
	0,05			
	0,1			
	0,2			
	0,5			
	1			
	3			
423	0,01			
	0,05			
	0,1			
	0,2			
	0,5			
	1			
	3			

## 7.2 Определение затраченной тепловой энергии

Во вкладке *Derived Values* вызываем меню правым кликом мыши. Выбираем *Integration* -> *Surface Integration* (рисунок). В окне *Settings* выбираем поверхность модуля, соответствующую горячей стороне (рис. 32). Ее номер должен отобразиться в окне *Selection*. Для определения плотности теплового потока в графе *Expression* записываем следующее выражение: *ht.ntflux*, единица измерения - Вт.

Нажмите *Evaluate* и выведите на экран значения плотности теплового потока в окне *Table*, расположенном под графическим окном.



The screenshot displays the COMSOL Multiphysics interface. On the left, the 'Settings' window for 'Surface Integration' is open, showing the 'Selection' field with the value '24'. The 'Expressions' table is also visible, with the expression 'ht.ntflux' and unit 'W'. On the right, a 3D model of a component is shown with a green surface highlighted. Below the model, a 'Table 3' window displays the following data:

resistor ( $\Omega$ )	T_h (K)	Normal total heat flux (W)
0.10000	323.00	-0.93051
0.10000	373.00	-2.4208
0.10000	423.00	-3.8575
0.50000	323.00	-0.92072
0.50000	373.00	-2.3893
0.50000	423.00	-3.7963
1.0000	323.00	-0.91838
1.0000	373.00	-2.3815
1.0000	423.00	-3.7805
2.0000	323.00	-0.91702
2.0000	373.00	-2.3768
2.0000	423.00	-3.7712
5.0000	323.00	-0.91614
5.0000	373.00	-2.3738
5.0000	423.00	-3.7650
10.000	323.00	-0.91583
10.000	373.00	-2.3728

Рисунок 32 – Определение затраченной тепловой энергии на горячей стороне модуля

В окне программы (рис.32) в графе *Normal total heat flux* [W] выводится значения теплового потока. Модуль значения теплового потока соответствует затраченной тепловой мощности  $Q$ . Полученные данные затраченной тепловой мощности  $Q$  в ваттах внести в четвертый столбец таблицы 3

Зная затраченную тепловую мощность и полученную электрическую мощность (полезную мощность), можно рассчитать КПД ТЭМ при работе в генераторном режиме:

$$\eta = P_{el} / Q.$$

Данные расчетов коэффициента полезного действия занести в пятый столбец таблицы 3.

### 7.3 Построение графиков

Построить по результатам расчетов графики следующих зависимостей:

- 1) зависимости тока во внешней цепи от величины сопротивления нагрузки при заданных преподавателем значениях температуры горячей стороны модуля;
- 2) зависимости полезной электрической мощности ТЭМ от сопротивления нагрузки при заданных преподавателем значениях температуры горячей стороны модуля;
- 3) зависимости коэффициента полезного действия ТЭМ от величины тока во внешней цепи при заданных преподавателем значениях температуры горячей стороны модуля;
- 4) зависимости полезной электрической мощности ТЭМ от величины тока во внешней цепи при заданных преподавателем значениях температуры горячей стороны модуля.

Примеры построенных графиков приведены в Приложении 4.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

### Параметры модели

Таблица I. Параметры, используемые при работе с моделью термоэлектрического модуля

<i>Name</i> Имя параметра	<i>Expression</i> Выражение	<i>Value</i> Значение параметра	<i>Description</i> Пояснение
a_l	2[mm]	0.002 m	<i>leg width</i> (ширина ветви, ось x)
b_l	2[mm]	0.002 m	<i>leg depth</i> (длина ветви, ось y)
h_l	2[mm]	0.002 m	<i>leg height</i> (высота ветви, ось z)
num_leg	6	6	<i>number of legs in a line</i> (число ветвей в ряду)
h_cer	1.5[mm]	0.0015 m	<i>the height of ceramic plate</i> (высота керамической пластины)
gap	0.5*a_l	0.001 m	<i>the gap between the legs</i> (расстояние между ветвями)
h_p	100[um]	1E-4 m	<i>copper plate height</i> (высота медной пластины)
resistor	10[ohm]	10 Ω	<i>external resistance</i> (электрическое сопротивление внешней нагрузки)
T_h	323[K]	323 K	<i>TEM hot side temperature</i> (температура горячей стороны ТЭМ)

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

### Свойства термоэлектрических материалов, применяемых при моделировании

Таблица П-1- Температурная зависимость коэффициента Зеебека

Температура, К	Коэффициент Зеебека $S$ , мкВ·К <sup>-1</sup>
Полупроводник <i>n</i> -типа	
0	1,07E-14
4,81	-11,25
9,62	-23,437
15,62	-36,562
26,38	-47,813
38,33	-58,125
51,46	-68,438
63,41	-79,688
81,31	-90
98,03	-104,063
109,99	-117,188
125,51	-127,5
144,62	-143,438
162,54	-161,25
181,66	-179,063
203,14	-192,188
228,21	-209,063
249,69	-222,188
266,41	-234,375
284,3	-242,813
299,81	-251,25
318,9	-261,563
345,13	-272,813
361,82	-279,375
376,15	-289,688
400	-299,063
Полупроводник <i>p</i> -типа	
314,605	65,128
364,312	75,463
412,633	84,426
464,395	92,02
514,092	100,298
565,154	105,835
614,154	112,741
666,599	118,964
717,662	124,5

Температура, К	Коэффициент Зеебека $S$ , мкВ·К <sup>-1</sup>
765,976	132,091
818,427	139,686
871,576	148,654
916,441	156,241

Таблица II-2 Температурная зависимость коэффициента теплопроводности

Температура, К	$\kappa$ , Вт*м <sup>-1</sup> К <sup>-1</sup>
<i>n</i> -тип	
6.96	5.98
17.39	11.296
26.67	15.017
39.42	17.276
49.86	17.807
66.09	17.143
80	16.08
99.71	14.485
113.62	13.289
133.33	11.96
154.2	10.764
177.39	10.1
191.3	9.701
205.22	9.169
226.09	8.638
246.96	8.239
272.46	7.708
292.17	7.176
308.41	7.043
345.51	6.512
371.01	6.246
396.52	5.98
<i>p</i> -тип	
316,47	1,5306
364,604	1,57761
413,425	1,64701
463,622	1,7097
514,506	1,7791
566,077	1,83284
616,274	1,87313
666,47	1,90672
717,354	1,93806
766,176	1,95149
815,684	1,97164
868,631	1,98284
914,702	1,97388
915,39	1,97612

Таблица II-3 Температурная зависимость коэффициента электропроводности  $\text{Vi}_2\text{Te}_3$

Температура, К	Коэффициент электропроводности $\sigma$ [ $\text{См}\cdot\text{м}^{-1}$ ]
<i>n</i> -тип	
4.76	24442.7063
21.43	26258.43552
40.48	27055.54503
53.57	27258.35469
71.43	27461.96518
84.52	27242.01809
111.9	26019.98335
141.67	24554.33875
167.86	23094.15487
184.52	22354.86106
207.14	21266.64115
230.95	20162.91636
253.57	18759.96623
279.76	17280.4092
309.52	16016.40079
330.95	14989.80693
348.81	14143.87146
371.43	13286.56463
394.05	12351.47353
<i>p</i> -тип	
317,201	22652
366,07	25199
413,563	27852
465,185	30188
516,12	31677
565,677	33060
615,923	33914
668,234	34769
715,726	35728
765,972	36371
816,218	37225
870,593	38186
915,333	38616

## ПРИЛОЖЕНИЕ 3

### Синтаксис, применяемый при записи выражений

1. Умножение записывается знаком «\*».
2. Деление записывается знаком «/».
3. Возведение в степень записывается латинской буквой «e».

Например,  $10^2$  следует записывать как 10e2;  $10^{-2}$  следует записывать как 10e-2.

4. В качестве разделителя между целой и дробной частью числа использовать знак точки «.».

5. Размерность физических величин записывается в квадратных скобках «[ ]», в качестве внутренних скобок используются круглые скобки «( )». Например, [W/(m\*K)].

6. Все выражения записываются без пробелов.

7. В именах параметров и функций вместо знака пробела используется нижнее подчеркивание. Например, «a\_l» или «el\_cond».

## ПРИЛОЖЕНИЕ 4

### Пример оформления графиков основных характеристик ТЭМ

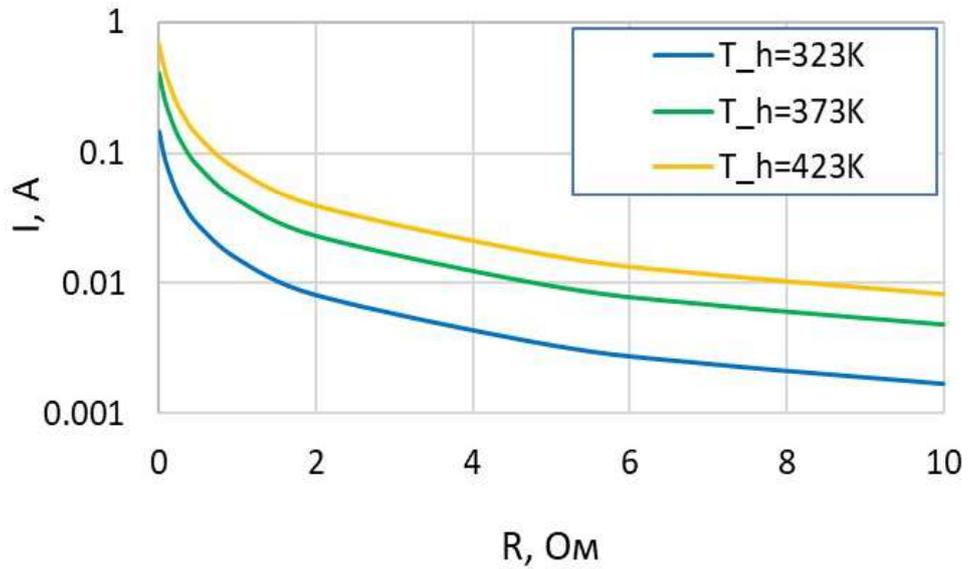


Рисунок 33 – График зависимости тока во внешней цепи от величины сопротивления нагрузки при различных значениях температуры горячей стороны модуля

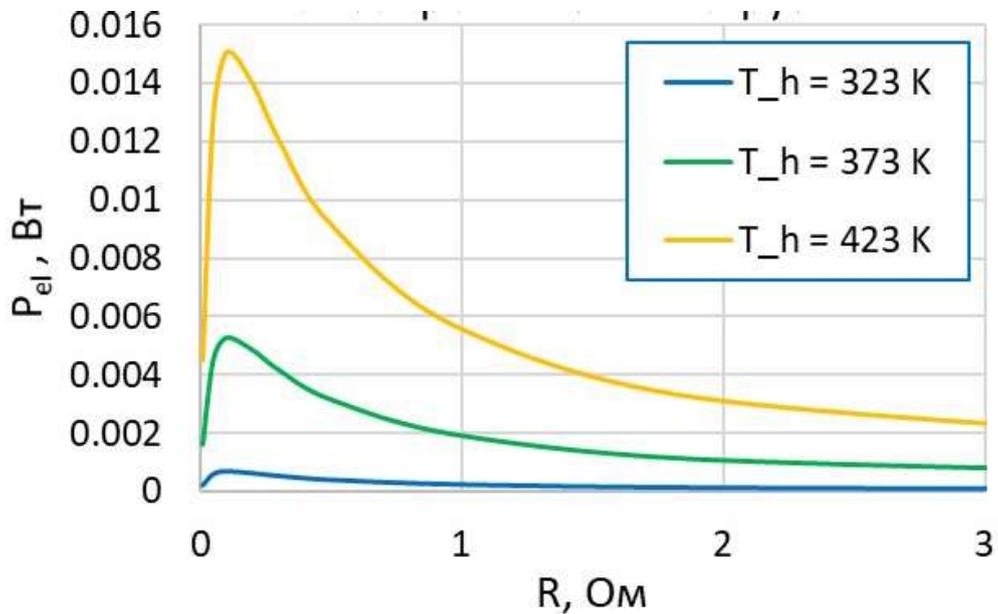


Рисунок 34 – График зависимости полезной электрической мощности ТЭМ от сопротивления нагрузки при различных значениях температуры горячей стороны модуля

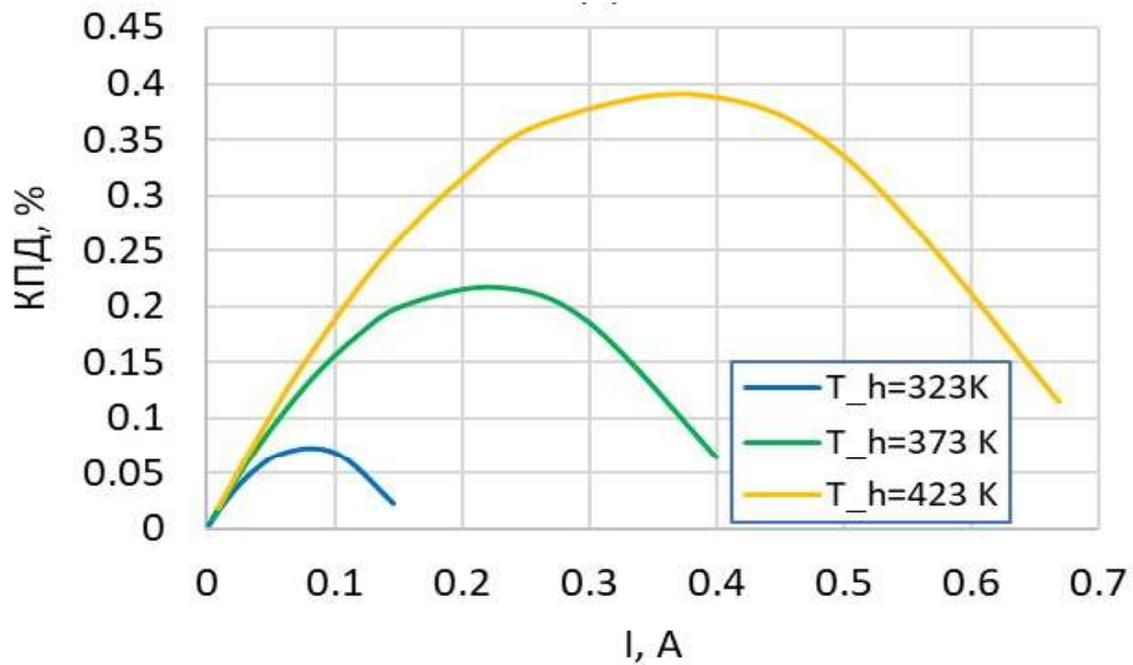


Рисунок 35 – График зависимости коэффициента полезного действия ТЭМ от величины тока во внешней цепи при различных значениях температуры горячей стороны модуля

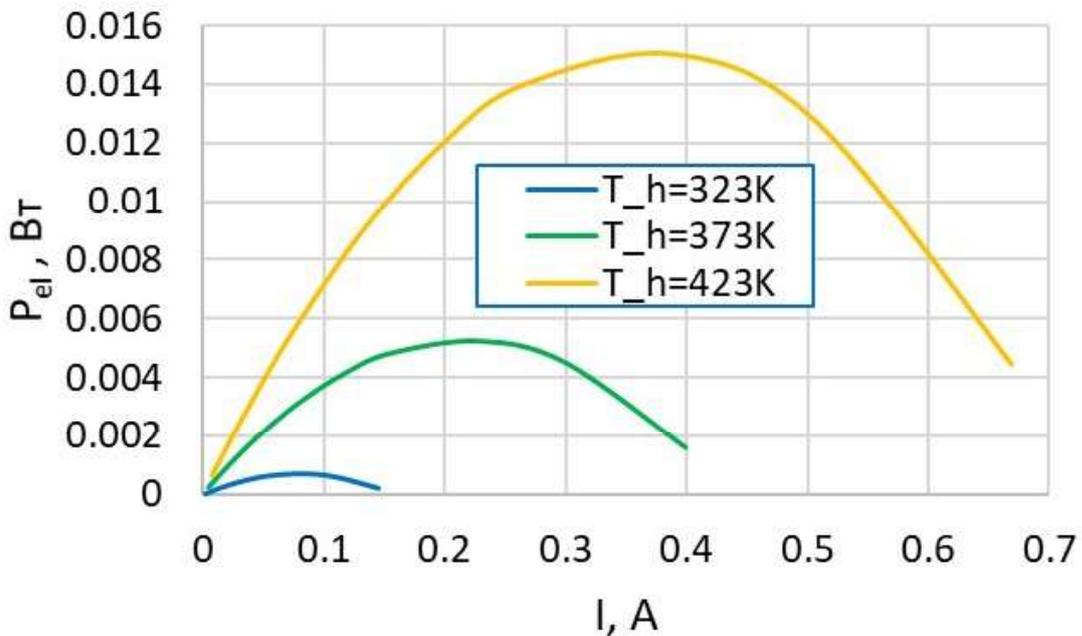


Рисунок 36 – График зависимости полезной электрической мощности ТЭМ от величины тока во внешней цепи при различных значениях температуры горячей стороны модуля

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов Н.Н. Нетрадиционные источники и методы преобразования их энергии: учебное пос. - М.: Издательский дом МЭИ, 2012. – 383 с.
2. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства. Справочник. Киев: Наукова думка, 1979. – 763 с.
3. Eurydice Kanimba and Zhiting Tian. Modeling of a Thermoelectric Generator Device. Chapter in Thermoelectrics for Power Generation - A Look at Trends in the Technology. InTech Open. 2016. pp. 461 – 479. Режим доступа: <https://www.intechopen.com/books/thermoelectrics-for-power-generation-a-look-at-trends-in-the-technology/modeling-of-a-thermoelectric-generator-device>
4. Математическое моделирование физико-химических процессов в среде Comsol Multiphysics 5.2 [Электронный ресурс]: учеб. пособие / А.В. Коваленко [и др.]. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург: Лань, 2017. — 228 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/93695> — Загл. с экрана.
5. Enescu D. A review on thermoelectric cooling parameters and performance / Enescu D., Virjoghe E. // Renew Sustain Energy Reviews. 2014. V.33. P.903–16.
6. Sharma S. Exergy analysis of single-stage and multistage thermoelectric cooler/ Sharma S., Dwivedi V., Pandit S. // International Journal of Energy Research. 2014.V.38. P.213–22.
7. Comsol Multiphysics User's guide [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://cdn.comsol.com/doc/5.4/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.ru\\_RU.pdf](https://cdn.comsol.com/doc/5.4/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.ru_RU.pdf)
8. Блог поддержки пользователей Comsol Multiphysics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.comsol.ru/blogs>

Новотельнова Анна Владимировна  
Тукмакова Анастасия Сергеевна  
Асач Алексей Владимирович

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

Учебное пособие

В авторской редакции  
Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО  
Зав. РИО Н. Ф. Гусарова  
Подписано к печати  
Заказ №  
Отпечатано на ризографе

**Редакционно-издательский отдел**  
**Университета ИТМО**  
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49