

ВВЕДЕНИЕ В  
COMSOL Multiphysics

# Введение в COMSOL Multiphysics

© 1998–2015 COMSOL

Защищено патентами США, перечисленными на веб-сайте [www.comsol.ru/patents](http://www.comsol.ru/patents), и патентами США 7519518, 7596474, 7623991, 8457932 и 8954302. Имеются заявки на патенты..

Настоящая Документация и Программы предоставляются по Лицензионному соглашению на программное обеспечение COMSOL ([www.comsol.ru/comsol-license-agreement](http://www.comsol.ru/comsol-license-agreement)) и могут использоваться и копироваться только в строгом соответствии с его условиями.

COMSOL, COMSOL Multiphysics, Capture the Concept, COMSOL Desktop, LiveLink и COMSOL Server являются зарегистрированными товарными знаками или товарными знаками компании COMSOL AB. Любые другие товарные знаки являются собственностью их владельцев. Компания COMSOL AB, ее дочерние компании и продукция, не связаны, не утверждались, не финансировались и не поддерживались этими владельцами. Полный список таких владельцев товарных знаков представлен на веб-сайте [www.comsol.ru/trademarks](http://www.comsol.ru/trademarks).

Версия: COMSOL 5.1

## Контактная информация

Подать запросы общего характера, обратиться в службу технической поддержки, а также найти нужный адрес и номер телефона можно на странице контактов COMSOL: [www.comsol.ru/contact](http://www.comsol.ru/contact). Дополнительные адреса и контактная информация доступны на странице глобальных центров продаж: [www.comsol.ru/contact/offices](http://www.comsol.ru/contact/offices).

Онлайн-форма запроса в службу технической поддержки находится на странице доступа на сайте COMSOL: [www.comsol.ru/support/case](http://www.comsol.ru/support/case).

Дополнительные ресурсы:

- Центр поддержки: [www.comsol.ru/support](http://www.comsol.ru/support)
- Загрузка продукта: [www.comsol.ru/product-download](http://www.comsol.ru/product-download)
- Обновления продукта: [www.comsol.ru/support/updates](http://www.comsol.ru/support/updates)
- Форум для обсуждений: [www.comsol.ru/community](http://www.comsol.ru/community)
- События: [www.comsol.ru/events](http://www.comsol.ru/events)
- Галерея видео COMSOL: [www.comsol.ru/video](http://www.comsol.ru/video)
- База знаний: [www.comsol.ru/support/knowledgebase](http://www.comsol.ru/support/knowledgebase)

Номер изделия: CM010004



# Содержание

---

Введение .....	5
COMSOL Desktop® .....	6
Пример 1. Структурный анализ гаечного ключа.....	30
Пример 2. Электрическая шина. Мультифизическая модель .....	54
Темы для углубленного изучения .....	83
Параметры, функции, переменные и взаимосвязи. ....	83
Свойства материалов и библиотеки материалов .....	88
Добавление сеток .....	90
Добавление физик .....	92
Параметрическое исследование.....	116
Параллельные вычисления .....	127
Приложение А. Построение геометрии .....	130
Приложение В. Сочетания клавиш и действия мышью ..	145
Приложение С. Элементы языка и зарезервированные имена .....	149
Приложение D. Форматы файлов. ....	162
Приложение E. Подключение модулей расширения LiveLink™ .....	169



## Введение

---

Это руководство предназначено для тех, кто начинает работу в COMSOL Multiphysics®. В нем кратко описана среда COMSOL® и даны примеры, облегчающие освоение пользовательского интерфейса COMSOL Desktop® и Построителя моделей.

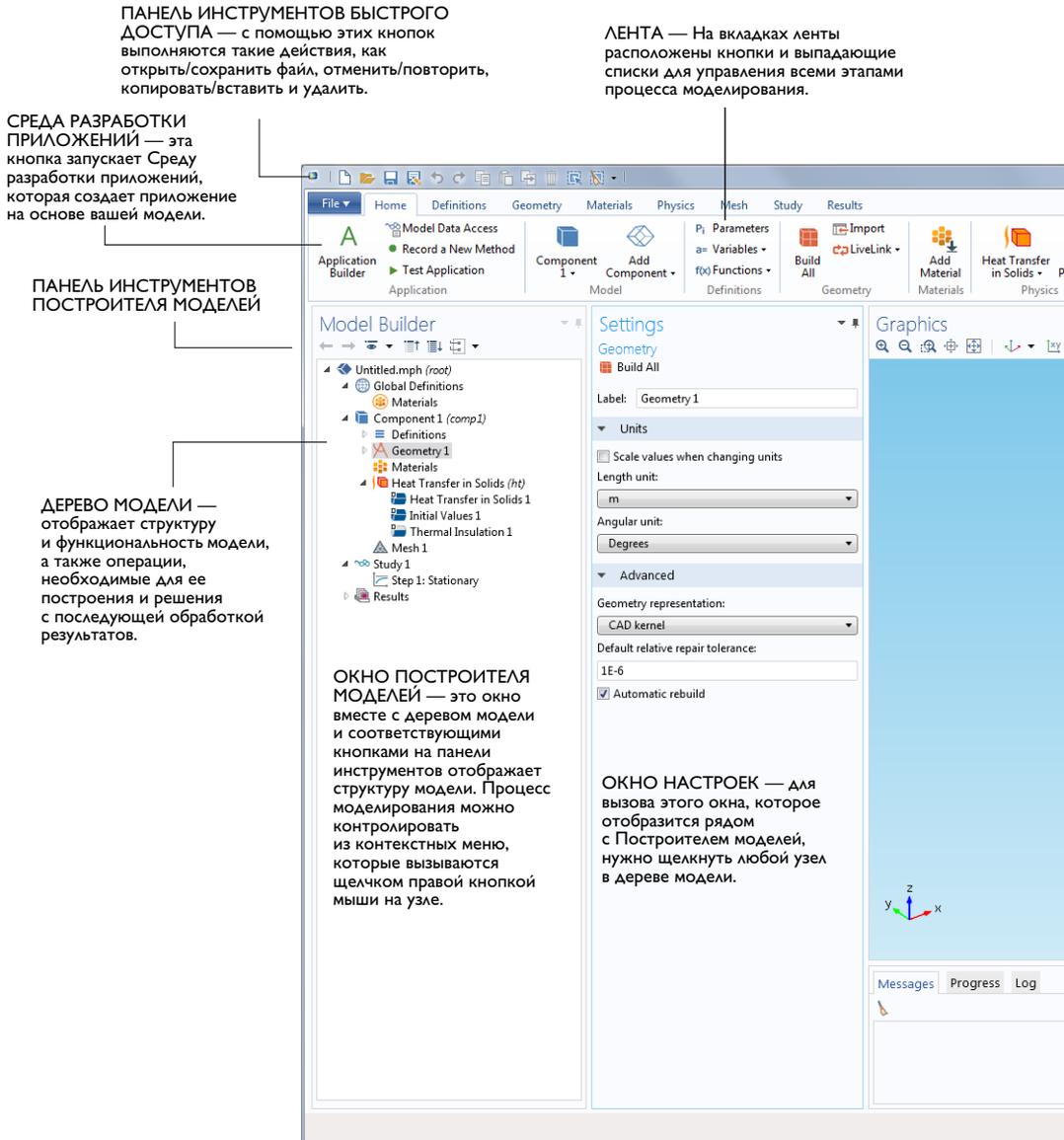
Если вы еще не установили ПО, установите его, следуя этим инструкциям:

[www.comsol.ru/product-download](http://www.comsol.ru/product-download).

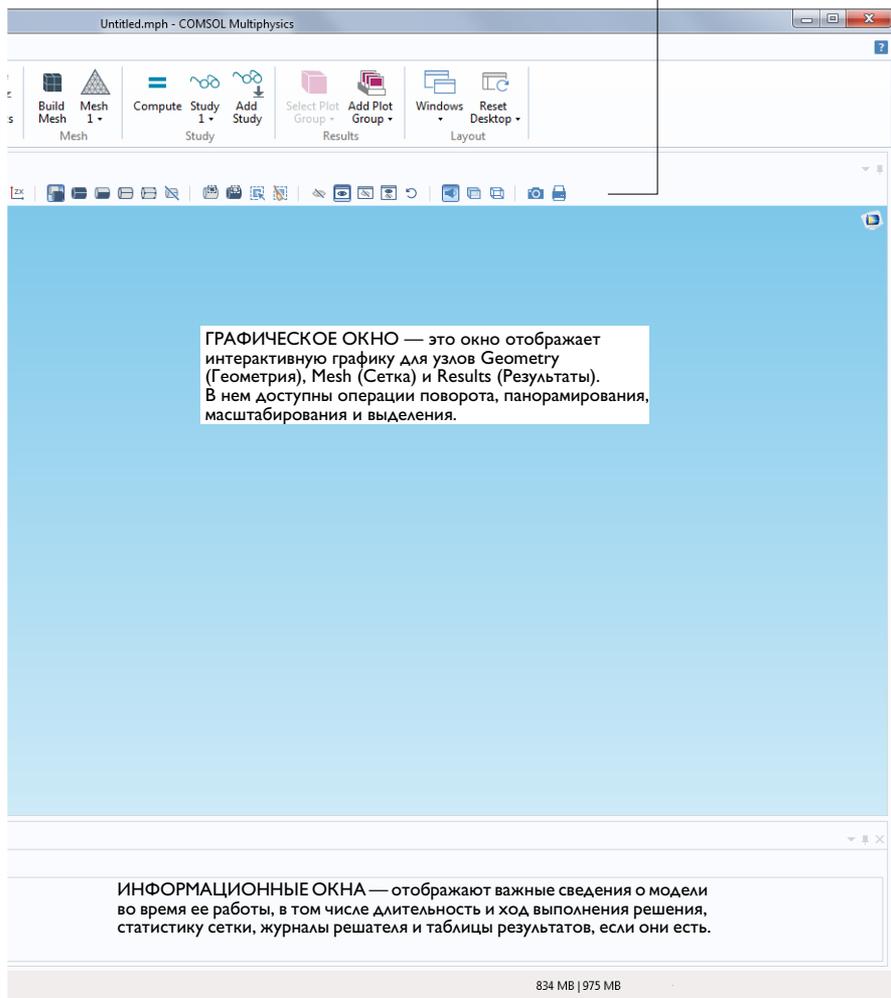
В систему встроена исчерпывающая документация, дополняющая это руководство. Также на нашем сайте есть галерея обучающих видео:

[www.comsol.ru/video/](http://www.comsol.ru/video/).

О том, как использовать Среду разработки приложений, читайте в руководстве «Введение в Среду разработки приложений».



## ПАНЕЛЬ ИНСТРУМЕНТОВ ГРАФИЧЕСКОГО ОКНА



Выше приведен снимок экрана COMSOL Multiphysics при первом запуске. COMSOL Desktop® — это комплексная интегрированная среда для моделирования физических явлений и разработки приложений, в которой есть все необходимое для создания удобного пользовательского интерфейса для ваших моделей. Рабочий стол гибко настраивается. Окна можно изменять в размерах, двигать, закреплять и разъединять. Все изменения в макете будут сохранены по завершении сеанса и снова отобразятся при следующем запуске COMSOL Multiphysics. По мере построения модели будут добавляться новые окна и виджеты. (Пример рабочего стола с большим количеством элементов см. на стр. 26.) В число доступных окон и элементов пользовательского интерфейса входят:

### **Панель инструментов быстрого доступа**

Панель инструментов быстрого доступа содержит такие функции, как Открыть, Сохранить, Отменить, Повторить, Копировать, Вставить и Удалить. Набор инструментов можно настроить в списке панели инструментов быстрого доступа.

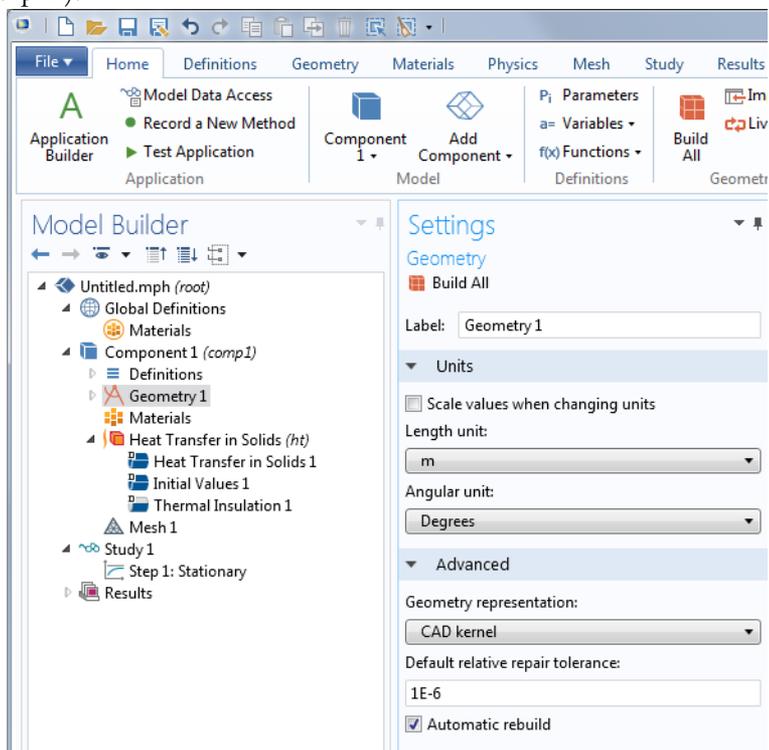
### **Лента**

Лента в верхней части рабочего стола содержит команды для выполнения большинства задач моделирования. Лента доступна только в версии среды COMSOL Desktop для Windows®, а в версиях для OS X и Linux® вместо нее используются меню и панели инструментов. Чтобы приступить к созданию приложения на основе вашей модели, просто нажмите кнопку Среда разработки приложений для перехода из Построителя моделей в Среду разработки.

### **Окно настроек**

В этом окне задаются основные характеристики модели, включая размерность геометрии, свойства материалов, граничные и начальные условия, а также любая другая информация, которая может понадобиться для решения модели.

На иллюстрации ниже показано окно Settings (Настройки) узла Geometry (Геометрия).



### Окна графиков

Окна для вывода графических данных. Как и Графическое окно, окна графиков служат для визуализации результатов. Для одновременного отображения нескольких результатов можно использовать несколько окон графиков. Особым случаем является окно Convergence Plot (График сходимости), которое автоматически создает и выводит на экран график сходимости решения в ходе выполнения модели.

### Информационные окна

Это окна для вывода неграфических данных. К ним относятся:

- Messages (Сообщения): здесь отображается различная информация о текущем сеансе COMSOL.
- Progress (Ход выполнения): здесь доступны кнопки остановки и информация о ходе решения.

- Log (Журнал): здесь отображаются такие сведения от решателя, как число степеней свободы, время решения и итерационные данные решателя.
- Table (Таблица): числовые данные в табличном формате, который задается в разделе Results (Результаты).
- External Process (Внешний процесс): панель управления кластерными, облачными и пакетными задачами.

### **Прочие окна**

- Add Material (Добавить материал) и Material Browser (Браузер материалов): предоставляет доступ к библиотекам свойств материалов. Браузер материалов позволяет изменять свойства материалов.
- Selection List (Список выбора): перечень объектов геометрии, областей, границ, граней и точек, которые доступны для выбора в настоящий момент.

Выпадающий список Windows (Окна) на вкладке ленты Home (Главная) позволяет переключаться между всеми окнами COMSOL Desktop. (В OS X и Linux® этот список находится в меню Windows (Окна).)

### **Шкала выполнения с кнопкой Cancel (Отмена)**

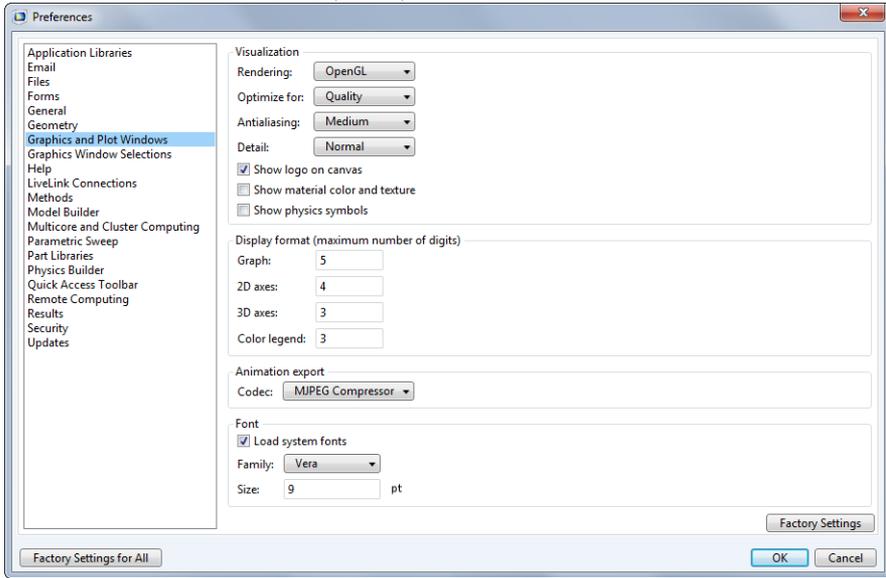
Шкала выполнения с кнопкой для отмены текущего вычисления, если оно запущено, расположена в правом нижнем углу интерфейса COMSOL Desktop.

### **Динамическая справка**

Окно Help (Справка) отображает контекстную справку об открытых окнах и выбранных узлах дерева модели. После запуска (например, клавишей F1) окно Help (Справка) отображает динамическую справку (только на английском языке) для выбранного пользователем узла или окна. В окне Help (Справка) можно также искать сведения по другим темам, таким как пункты меню.

## Preferences (Параметры)

Параметры — это пользовательские настройки среды моделирования. Большинство из них применяются ко всем сеансам моделирования, но некоторые сохраняются прямо в модели. Окно Preferences (Параметры) можно вызвать из меню File (Файл).



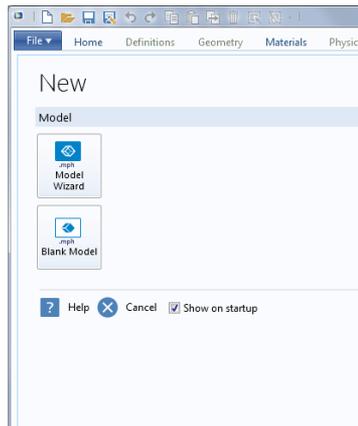
В окне Preferences (Параметры) можно изменять такие настройки, как режим построения графики, количество знаков в числовых результатах, максимальное число ядер ЦП для выполнения вычислений, а также пути к пользовательским библиотекам приложений. Просмотрите текущие настройки, чтобы изучить возможные варианты.

Доступны три режима построения графики: OpenGL<sup>®</sup>, DirectX<sup>®</sup> и Software Rendering (Программное построение). Режим DirectX<sup>®</sup> недоступен в OS X и Linux<sup>®</sup>. Для применения в Windows<sup>®</sup> необходимо, чтобы библиотеки DirectX<sup>®</sup> были установлены вместе с COMSOL. Если на компьютере нет дискретной видеокарты, может потребоваться переключение в режим Software Rendering (Программное построение), который работает медленнее, однако поддерживает все графические возможности. Список рекомендованных видеокарт приведен здесь:

[www.comsol.ru/system-requirements](http://www.comsol.ru/system-requirements)

## Создание новой модели

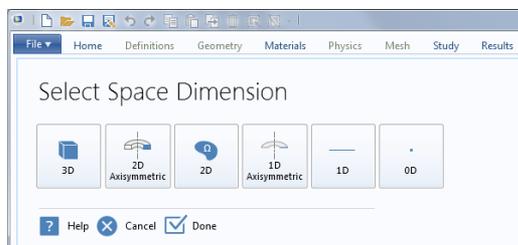
Вы можете создать модель при помощи Мастера создания моделей или на основе шаблона Пустой модели, как показано на иллюстрации ниже.



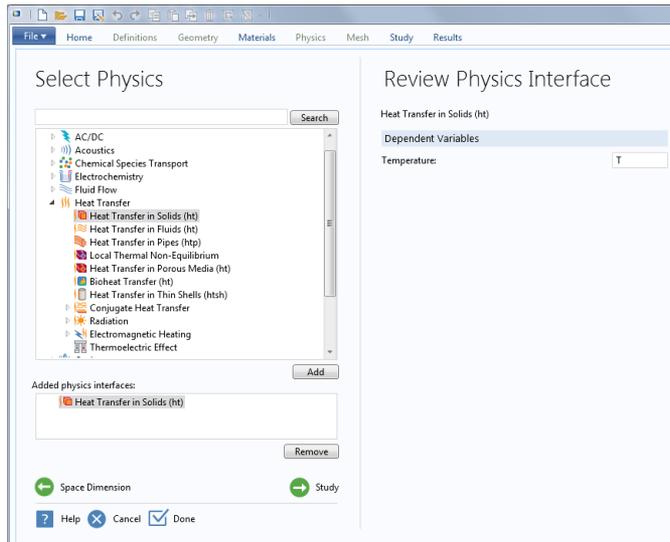
### СОЗДАНИЕ МОДЕЛИ С ПОМОЩЬЮ МАСТЕРА СОЗДАНИЯ МОДЕЛЕЙ

Мастер создания моделей поможет вам задать размерность пространства, физику и тип исследования всего за несколько шагов:

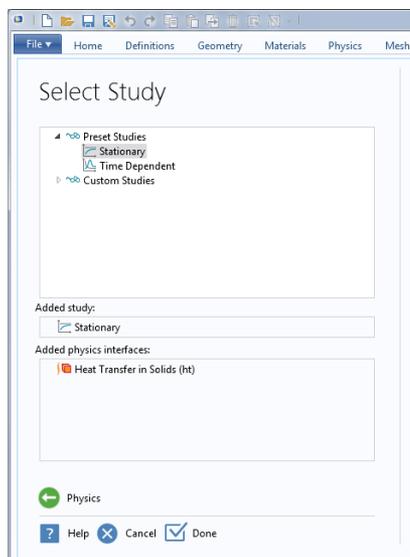
- 1 Сначала нужно выбрать размерность пространства для компонента модели: 3D (Трехмерное), 2D Axisymmetric (Двумерное аксиально-симметричное), 2D (Двумерное), 1D Axisymmetric (Одномерное аксиально-симметричное) или 0D (Нульмерное).



- 2 Далее добавьте один или несколько интерфейсов физик. Для удобства поиска они сгруппированы по нескольким разделам физики. Эти разделы не соответствуют продуктам напрямую. При добавлении продуктов в COMSOL Multiphysics дополнительные интерфейсы физик могут появиться сразу в нескольких разделах.



- 3 Выберите тип исследования, соответствующий одному или нескольким решателям, которые будут использоваться при вычислениях.



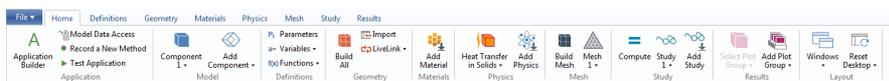
И наконец, нажмите Done (Готово). На рабочем столе появится дерево модели с учетом тех настроек, которые были заданы в Мастере создания моделей.

## СОЗДАЕМ МОДЕЛЬ НА ОСНОВЕ ШАБЛОНА

Чтобы открыть интерфейс COMSOL Desktop без компонентов и исследований, нажмите кнопку Blank Model (Пустая модель). Для добавления компонента определенной пространственной размерности, интерфейса физик или исследования достаточно щелкнуть правой кнопкой мыши в дереве модели.

## Лента и панель инструментов быстрого доступа

Вкладки ленты COMSOL Desktop отражают процесс моделирования и функциональность, доступную на каждом этапе, включая создание приложений на базе ваших собственных моделей.



На вкладке Home (Главная) расположены кнопки самых часто используемых операций для изменения моделей, запуска моделирования, а также построения и тестирования приложений. Среди этих операций — изменение параметров модели для параметризованной геометрии, анализ свойств и физики материалов, построение сетки, проведение исследования и визуализация результатов моделирования.

У всех основных этапов процесса моделирования есть стандартные вкладки. Они упорядочены слева направо с учетом порядка действий: Definitions (Определения), Geometry (Геометрия), Materials (Материалы), Physics (Физики), Mesh (Сетка), Study (Исследование) и Results (Результаты).

Контекстные вкладки отображаются, только когда это необходимо — например, вкладка 3D Plot Group (Группа 3D-графиков) доступна только при добавлении соответствующей группы графиков или при выборе узла в дереве модели.



Модальные вкладки используются для особых операций, когда прочие возможности ленты временно не требуются. Примером может служить модальная вкладка Work Plane (Рабочая плоскость). При использовании рабочих плоскостей остальные вкладки не отображаются, так как не содержат нужных операций.



## СРАВНЕНИЕ ЛЕНТЫ И ПОСТРОИТЕЛЯ МОДЕЛЕЙ

Лента предоставляет быстрый доступ к командам и дополняет дерево модели в окне Model Builder (Построитель моделей). Большинство возможностей ленты также доступны из контекстных меню по правому щелчку мышью в узлах дерева модели. Однако некоторые операции, например, выбор окна COMSOL Desktop, доступны только в ленте. В интерфейсе COMSOL Desktop для OS X и Linux<sup>®</sup> эти функции находятся на панелях инструментов, которые заменяют собой ленту на этих платформах. Также есть операции, доступные только в дереве модели, например, переупорядочение и отключение узлов.

## ПАНЕЛЬ ИНСТРУМЕНТОВ БЫСТРОГО ДОСТУПА

Панель инструментов быстрого доступа содержит набор команд, не зависящих от отображаемой вкладки ленты. Панель инструментов быстрого доступа можно настраивать: добавить на нее большинство команд из меню File (Файл), команды отмены и повтора недавних действий, а также команды копирования, вставки, дублирования и удаления узлов дерева модели. Кроме того, пользователь может разместить панель инструментов быстрого доступа над лентой или под ней.

## OS X и LINUX™

В среде COMSOL Desktop для OS X и Linux® вместо ленты используется набор меню и панелей инструментов:



Инструкции в этом руководстве основаны на версии среды COMSOL Desktop для Windows®. Однако ПО COMSOL запускается в OS X и Linux® почти так же, за исключением того, что элементы интерфейса ленты находятся в соответствующих меню и на панелях инструментов.

## Построитель моделей и дерево модели

---

Построитель моделей — это инструмент для задания параметров модели и ее компонентов: алгоритма решения, анализа результатов и отчетов. Для этого строится дерево модели.

Построение модели начинается со стандартного дерева модели, в которое вы можете добавлять узлы и менять их настройки.

Все узлы в дереве модели по умолчанию являются родительскими узлами верхнего уровня. Для добавления и просмотра списка добавленных дочерних узлов, или подузлов, щелкните правой кнопкой мыши соответствующий узел. Именно таким образом узлы добавляются в дерево.

При щелчке по дочернему узлу открываются его настройки в окне Settings (Настройки). Именно здесь можно изменить настройки узла.

Важно отметить, что когда открыто окно Help (Справка) (с помощью пункта Help (Справка) в меню File (Файл) или клавиши F1), пользователь может получить динамическую справку (только на английском языке), щелкнув какой-либо узел.

## Узлы ROOT (КОРНЕВОЙ), GLOBAL DEFINITIONS (ГЛОБАЛЬНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ) И RESULTS (РЕЗУЛЬТАТЫ)

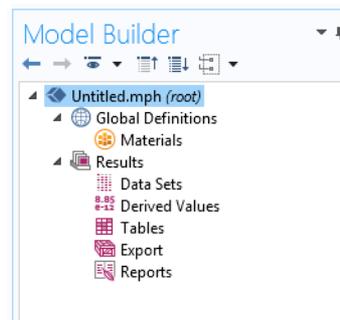
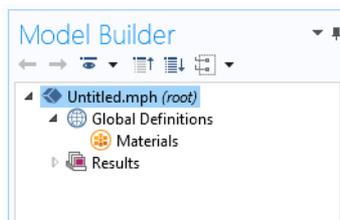
У дерева модели всегда есть корневой узел (изначально называется Untitled.mph), а также узлы Global Definitions (Глобальные определения) и Results (Результаты).

Имя корневого узла — это имя файла мультифизической модели, или MPH-файла, в котором хранится эта модель. В настройках корневого узла указаны имя автора, система единиц измерения по умолчанию и другие параметры.

По умолчанию в узле Global Definitions (Глобальные определения) есть подузел Materials (Материалы). Узел Global Definitions (Глобальные определения) служит для задания параметров, переменных, функций и связей, которые могут использоваться в дереве модели. Их можно применять, например, для определения значений и функциональных зависимостей свойств материалов, сил, геометрии и других элементов. Сам по себе узел Global Definitions (Глобальные определения) не имеет настроек, но их много у его дочерних узлов. В узле Global Definitions (Глобальные определения) > Materials (Материалы) хранятся свойства материалов, на которые можно ссылаться в узлах Component (Компонент) модели.

Узел Results (Результаты) содержит решение, полученное после моделирования, а также инструменты для обработки данных. Изначально узел Results (Результаты) состоит из пяти подузлов:

- Наборы данных (Data Sets) содержат список доступных пользователю решений.
- Производные значения (Derived Values) можно получить на основе решения, используя инструменты постобработки.
- Таблицы (Tables) удобны для отображения производных значений или результатов работы датчиков, которые в реальном времени отслеживают ход решения при моделировании.
- Функция экспорта (Export) позволяет выбрать числовые данные, изображения и анимацию для экспорта в файлы.
- Автоматически созданные или пользовательские отчеты (Reports) о модели в формате HTML или Microsoft® Word®.



К этим пяти подузлам можно также добавить подузлы Plot Group (Группа графиков), задающие графики, которые отображаются в Графическом окне или в окнах графиков. Некоторые графики создаются автоматически в зависимости от вида моделирования, но вы также можете добавить дополнительные графики — для этого нужно щелкнуть правой кнопкой мыши на узле Results (Результаты) и выбрать тип графика из списка.

## Узлы COMPONENT (КОМПОНЕНТ) и STUDY (ИССЛЕДОВАНИЕ)

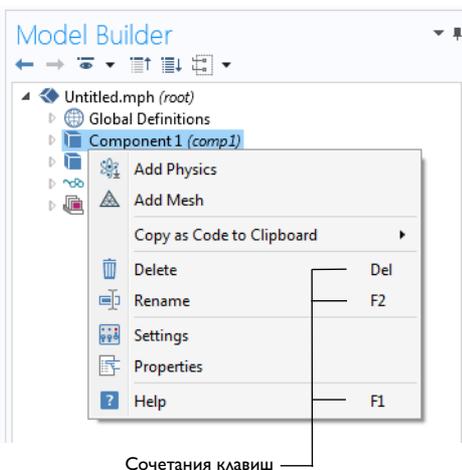
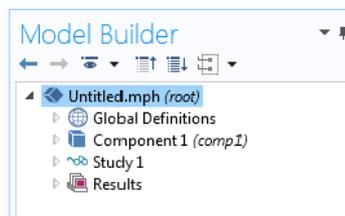
Помимо трех только что описанных узлов есть еще два дополнительных типа узлов верхнего уровня: Узлы Component (Компонент) и Study (Исследование). Обычно их создает Мастер создания моделей при добавлении новой модели.

После того, как в Мастере создания моделей выбран тип моделируемой физики и тип исследования (например, стационарное, зависящее от времени, частотный интервал или анализ собственной частоты), он автоматически создает по одному узлу каждого типа и отображает их содержимое.

При разработке модели можно добавить дополнительные узлы Component (Компонент) и Study (Исследование). Так как в модели может быть несколько узлов Component (Компонент) и Study (Исследование), у них должны быть разные имена во избежание путаницы. Поэтому эти типы узлов следует переименовать с учетом их индивидуального назначения.

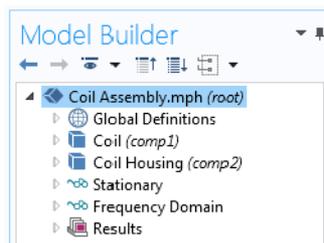
Если у модели несколько узлов Component (Компонент), их можно связать для получения более сложной последовательности моделирования.

Важно отметить, что узел Study (Исследование) может выполнять различные типы вычислений, поэтому у каждого такого узла есть своя кнопка Compute (Вычислить) = .



Для примера предположим, что требуется построить модель катушки в сборе, состоящей из двух частей — собственно катушки и ее корпуса. Создадим два узла Component (Компонент) — один для катушки и один для корпуса. Присвоим каждому узлу название с учетом имени объекта. Аналогично создадим два узла Study (Исследование): первый будет моделировать постоянное, или стационарное, поведение сборки, а второй — ее частотную характеристику. Назовем эти два узла Stationary (Стационарное) и Frequency Domain (Частотный интервал) соответственно (можно использовать названия на русском языке). Когда модель будет готова, сохраним ее в файл под названием **Coil Assembly.mph**. На иллюстрации ниже показано, как выглядит дерево модели в Построителе моделей на данном этапе.

На этой иллюстрации корневой узел называется Coil Assembly.mph — так же, как и файл, в котором хранится модель. Узлам Global Definitions (Глобальные определения) и Results (Результаты) присвоены имена по умолчанию. Кроме того, здесь есть два узла Component (Компонент) и два узла Study (Исследование), имена которых были выбраны в предыдущем подразделе.



## ПАРАМЕТРЫ, ПЕРЕМЕННЫЕ И ИХ ОБЛАСТЬ ДЕЙСТВИЯ

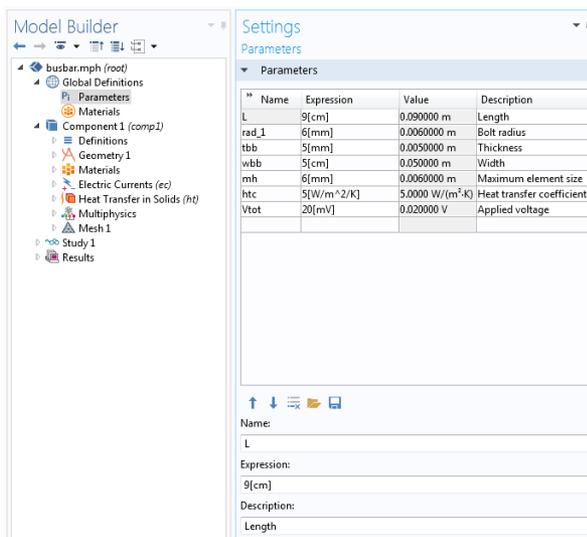
### Параметры

Параметры — это пользовательские скалярные константы, которые доступны во всех элементах модели. Другими словами, они «глобальные» по своей сути. Типичные варианты применения:

- Параметризация геометрических размерностей.
- Задание размеров элементов сетки.
- Задание параметрического исследования (т. е. моделирования, которое повторяется для большого числа значений какого-либо параметра — например, частоты или нагрузки).

Выражение параметра может содержать числа, параметры, встроенные константы, встроенные функции с параметрами в качестве аргументов, а также унарные и бинарные операторы. Список доступных операторов приведен в «Приложение С. Элементы языка и зарезервированные имена» на стр. 149. Так как эти выражения оцениваются до запуска моделирования, параметры не могут зависеть от переменной времени  $t$ , а также от пространственных координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$  и других переменных, относительно которых решаются уравнения в модели.

Важно помнить, что имена параметров чувствительны к регистру. Параметры задаются в дереве модели в узле Global Definitions (Глобальные определения).



## Переменные

Переменные задаются либо в узле Global Definitions (Глобальные определения), либо в подузле Definitions (Определения) узла Component (Компонент). Как правило, выбор места для объявления переменной зависит от того, должна ли переменная быть глобальной (т. е. доступной во всех элементах дерева модели) или локальной (т. е. доступной только в одном узле Component (Компонент)). Как и выражение параметра, выражение переменной может содержать числа, параметры, встроенные константы, а также унарные и бинарные операторы. Однако в нем уже могут быть такие переменные, как  $t$ ,  $x$ ,  $y$  или  $z$ , функции с выражениями для переменной в качестве аргумента, а также переменные, относительно которых решается уравнение, и их временные и пространственные производные.

## Переменные, используемые в приложениях

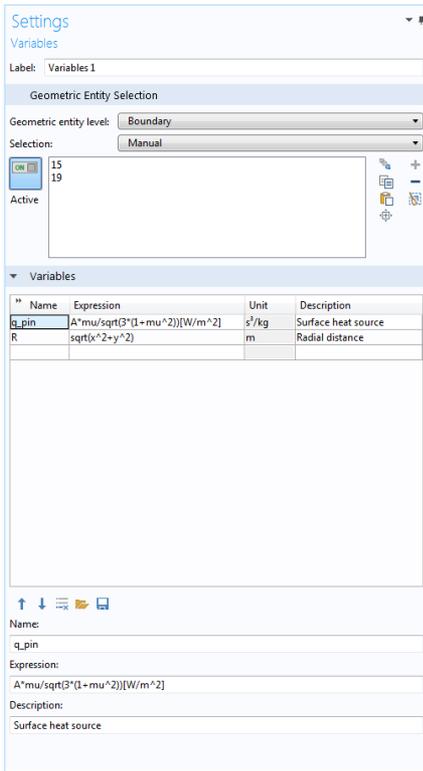
Параметры и переменные модели можно использовать в приложениях. Например, можно разрешить пользователю приложения изменять значение параметра. Кроме того, переменные для использования в приложениях задаются в Среде разработки приложений в узле Declarations (Объявления).

### *Область действия*

«Область действия» параметра или переменной указывает, где этот параметр или переменную можно использовать в выражениях. Все параметры задаются в узле **Global Definitions** (Глобальные определения) дерева модели. Это означает, что у них глобальная область действия и что их можно использовать в любом элементе дерева модели.

Переменные тоже можно объявить в узле **Global Definitions** (Глобальные определения) и назначить им глобальную область действия, но для них действуют другие ограничения. Например, переменные нельзя использовать в узлах **Geometry** (Геометрия), **Mesh** (Сетка) и **Study** (Исследование), кроме случаев, когда переменная фигурирует в выражении, которое задает условие остановки моделирования.

Переменная, объявленная в подузле **Definitions** (Определения) узла **Component** (Компонент), имеет локальную область действия и может использоваться только в этом узле **Component** (Компонент), но не в узлах **Geometry** (Геометрия) или **Mesh** (Сетка). Их можно использовать, например, для задания свойств материала в подузле **Materials** (Материалы) узла **Component** (Компонент) или для определения граничных условий и взаимодействий. Иногда имеет смысл ограничить область действия переменной до определенной части геометрии — например, до отдельных границ. Для этого в настройках переменной можно указать, определена ли она для всей геометрии узла **Component** (Компонент) либо только для отдельных областей, границ, граней или точек.



На иллюстрации слева объявлены две переменные,  $q_{pin}$  и  $R$ , область действия которых ограничена всего до двух границ с номерами 15 и 19.

Таким выборкам можно присвоить имя и затем ссылаться на них в любом месте модели — например, при задании свойств материала или граничных условий, в которых используется переменная. Чтобы присвоить имя выборке, нажмите кнопку Create Selection (Создать выборку) (🔗) справа от списка выборов.

Хотя переменные, объявленные в подузле Definitions (Определения) узла Component (Компонент) имеют локальную область действия, к ним можно обращаться и за пределами узла Component (Компонент) в дереве модели, если достаточно точно указать их имена. Для этого служит «точечная нотация», в которой перед именем переменной через точку указывается имя узла Component (Компонент), где она объявлена.

Другими словами, если в узле Component (Компонент) под названием MyModel объявлена переменная foo, то к ней можно обратиться за пределами этого узла с помощью конструкции MyModel.foo. Это удобно, когда переменная нужна для построения графиков в узле Results (Результаты). Переменные, объявленные в узле Declarations (Объявления) Среды разработки приложений, доступны во всех объектах и методах форм, но не могут использоваться в Построителе моделей.

## Встроенные константы, переменные и функции

В COMSOL Multiphysics встроено множество констант, переменных и функций. Их имена зарезервированы и поэтому недоступны для переопределения. При попытке присвоить пользовательской переменной, параметру или функции зарезервированное имя система выделит введенный текст оранжевым (предупреждение) или красным (ошибка) цветом, а при выборе этой текстовой строки отобразит всплывающую подсказку.

Типичные варианты применения:

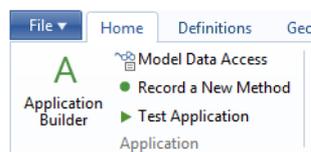
- Математические константы, такие как  $\pi$  (3,14...) и мнимая единица  $i$  или  $j$ .
- Физические константы, такие как **g\_const** (ускорение свободного падения), **c\_const** (скорость света) и **R\_const** (универсальная газовая постоянная).
- Переменная времени **t**.
- Производные первого и второго порядков от искомым переменных (решения), имена которых происходят от имен пространственных координат и других искомым переменных, заданных пользователем.
- Математические функции, такие как **cos**, **sin**, **exp**, **log**, **log10** и **sqrt**.

Дополнительную информацию см. в «Приложение С. Элементы языка и зарезервированные имена» на стр. 149.

## Разработка и построение приложений для моделирования

---

Чтобы создать приложение на основе модели, запустите Среду разработки приложений, нажав ее кнопку на вкладке ленты Home (Главная). Дополнительная информация о создании приложений в среде COMSOL приведена в руководстве «Введение в Среду разработки приложений».

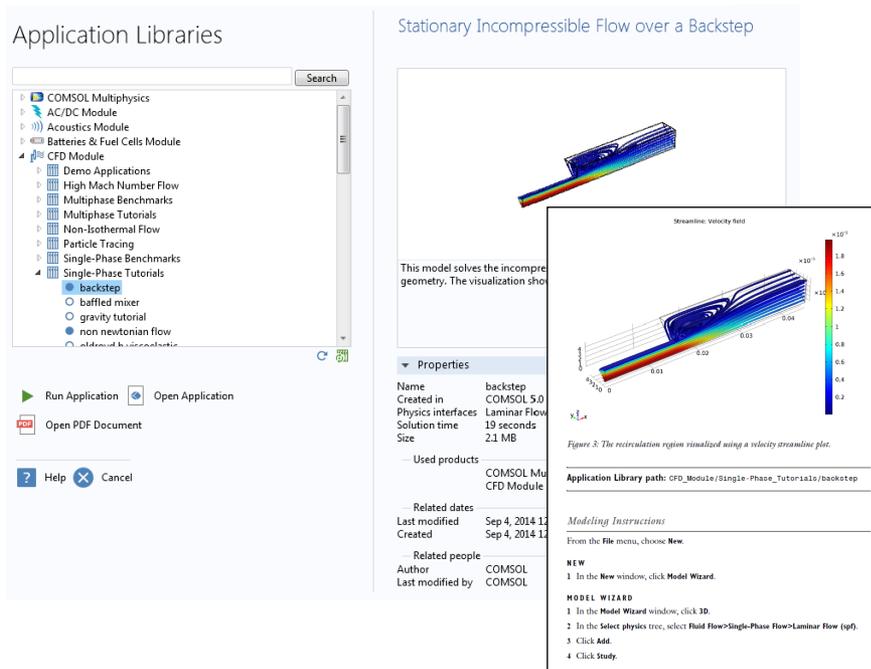


## Библиотеки приложений

---

Библиотеки приложений (Application Libraries) — это наборы МРН-файлов, содержащих учебные модели и готовые к работе приложения с сопроводительной документацией. В документацию к учебным моделям входит теоретическая часть и пошаговые инструкции. Для готовых приложений есть подробные инструкции по работе с ними. Пользователи могут изменять учебные модели и приложения с учетом собственных потребностей. У каждого модуля расширения для той или иной физики есть своя библиотека приложений с примерами из соответствующего раздела физики. Пошаговые инструкции и МРН-файлы можно применять как шаблоны для создания собственных моделей. Чтобы открыть окно

Библиотеки приложений, выберите Application Libraries (Библиотеки приложений) в меню Windows (Окна) на панели инструментов Home (Главная)  или выберите File (Файл) > Application Libraries (Библиотеки приложений)  и найдите нужное приложение в поле поиска либо укажите нужную папку под папкой модуля.



Выберите Open Application (Открыть приложение) , Run Application (Запустить приложение)  или Open PDF Document (Открыть PDF-документ) . Чтобы найти приложение по имени или указать модуль, можно также выбрать File (Файл) > Help (Справка) > Documentation (Документация) в интерфейсе COMSOL Multiphysics.

MPH-файлы в Библиотеке приложений COMSOL бывают двух форматов — полные и компактные MPH-файлы:

- Полные MPH-файлы, содержащие все сетки и решения. Такие файлы отображаются в окне Библиотек приложений со значком , а для готовых к запуску приложений — со значком . Если размер MPH-файла превышает 25 МБ, при выборе узла модели в дереве Библиотек приложений отображается подсказка с текстом Large file («Большой файл») и размером файла.

- Компактные MPH-файлы, содержащие все настройки модели, но без сеток и данных решения, что позволяет сэкономить место на DVD (в нескольких MPH-файлах решений нет по другим причинам). С их помощью можно изучать настройки, а также строить сетки и пересчитывать приложения. Кроме того, при обновлении Библиотеки приложений можно загрузить полные версии большинства этих файлов со всеми сетками и решениями. Такие файлы отображаются в окне Библиотек приложений со значком , а для готовых к запуску приложений — со значком . При наведении курсора на компактный файл в окне Библиотек приложений появляется сообщение No solutions stored («Не содержит решений»). Если доступен для загрузки полный MPH-файл, в контекстном меню соответствующего узла отображается пункт Download File with Solutions  (Загрузить файл с решениями).

COMSOL регулярно обновляет Библиотеки приложений. Чтобы проверить все доступные обновления, выберите пункт Update COMSOL Application Library (Обновить Библиотеку приложений COMSOL)  в меню File (Файл) > Help (Справка) (для пользователей Windows®) или в меню Help (Справка) (для пользователей OS X и Linux®). Далее откроется веб-сайт COMSOL, на котором можно выбрать новые приложения и последние обновления для загрузки.

На снимке экрана ниже показан пример настроенного рабочего стола с дополнительными окнами.

ПАНЕЛЬ ИНСТРУМЕНТОВ БЫСТРОГО ДОСТУПА

ЛЕНТА

ОКНО ПОСТРОИТЕЛЯ МОДЕЛЕЙ

ДЕРЕВО МОДЕЛИ

Model Builder

Settings

Global Evaluation

Label: Heat Transfer Coefficient

Data

Data set: Study 1/Solution 1

Expression

Expression:  $\text{aveop1}(\text{nitf1.qwf\_u})/(\text{T\_water-T\_air})$

Unit:  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

Description: Heat Transfer Coefficient

Data Series Operation

Operation: None

OKNO НАСТРОЕК

Plot 1

Pressure (Pa)

x-coordinate (m)

Messages Progress Log Table 1

Heat Transfer Coefficient ( $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ )	Inlet Pressure, $\text{W}_z$
5.37312	33.3497

ОКНО ГРАФИКА — Окно графика служит для визуализации величин, датчиков и графиков сходимости. Для одновременного отображения нескольких результатов можно использовать несколько окон графиков.

ДИНАМИЧЕСКАЯ СПРАВКА — постоянно обновляется посредством доступа к базе знаний (Knowledge Base) и галерее моделей (Model Gallery). В окне Help (Справка) можно легко просматривать структуру папок и пользоваться расширенным поиском.

ГРАФИЧЕСКОЕ ОКНО

The screenshot shows the COMSOL Multiphysics interface. The main window displays a 3D model of a heat exchanger with streamlines representing flow velocity. A color scale at the bottom left indicates velocity values from 47 to 351.68 m/s. The Help window on the right is open to the 'Derived Value Types' section, which includes a table of evaluation types.

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ОКНА**

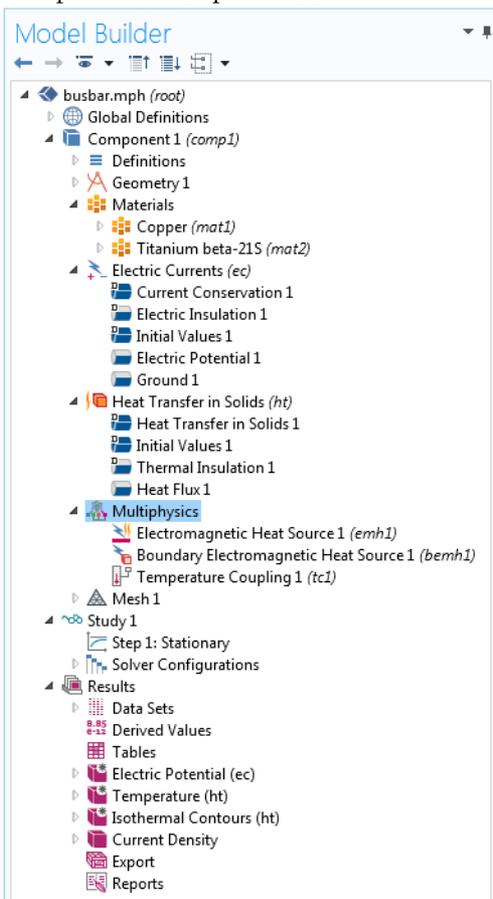
ICON	LINK TO SECTION	DESCRIPTION
	<a href="#">Point Evaluation</a>	To evaluate expressions or variables defined in a point.
	<a href="#">Global Evaluation</a>	To evaluate the numerical value of a global variable.
	<a href="#">Global Matrix Evaluation</a>	To define the evaluation of the numerical values for a global matrix variable such as S-parameters in a model with several ports activated as a parametric sweep and a frequency-domain study.
	<a href="#">Particle Evaluation</a>	To evaluate an expression for all, or a subset of, the particles in a particle tracing model.
	<a href="#">System Matrix</a>	To evaluate an Assemble or Modal node to a table.
<b>AVERAGE SUBMENU</b>		<a href="#">Volume Average, Surface Average, and Line Average</a>
	Volume Average	To evaluate an average over a set of domains in 3D models.
	Surface Average	To evaluate an average over a set of domains in 2D, 2D axisymmetric, or boundaries in 3D.
	Line Average	To evaluate an average over a set of domains in 1D, boundaries in 2D, or edges in 3D.
<b>INTEGRATION SUBMENU</b>		<a href="#">Volume Integration, Surface Integration, and Line Integration</a>
	Volume Integration	To evaluate an integral over a set of domains in 3D models.
	Surface Integration	To evaluate an integral over a set of domains in 2D, 2D axisymmetric, or boundaries in 3D.
	Line Integration	To evaluate an integral over a set of domains in 1D, boundaries in 2D, or edges in 3D.
<b>MAXIMUM SUBMENU</b>		<a href="#">Volume Maximum, Volume Minimum, Surface Maximum, Surface Minimum, Line Maximum, Line Minimum</a>

2.39 GB | 2.45 GB

ШКАЛА ВЫПОЛНЕНИЯ С КНОПКОЙ ОТМЕМЫ

## Рабочий процесс и последовательность операций

В окне Построителя моделей каждый этап процесса моделирования — от объявления глобальных переменных до создания отчета с результатами — отображается в дереве модели.



Все операции в дереве модели выполняются по порядку — сверху вниз.

В следующих разделах дерева модели учитывается порядковый номер узла, поэтому для изменения последовательности операций можно перемещать подузлы вверх или вниз:

- Геометрия.
- Материалы.
- Физика.
- Сетка.
- Исследование.
- Группы графиков.

В разделе Component Definitions (Определения компонента) дерева модели также учитывается порядок узлов следующих типов:

- Идеально подобранный слой.
- Бесконечные элементы.

Переупорядочить узлы можно следующими способами:

- Перетащить их мышью (Drag-and-drop).
- Щелкнуть правой кнопкой мыши узел и выбрать Move Up (Сдвинуть вверх) или Move Down (Сдвинуть вниз).
- Нажать Ctrl + стрелка вверх или Ctrl + стрелка вниз.

В других разделах при выполнении операций порядок узлов не учитывается, однако для удобства некоторые узлы можно перемещать. Одним из примеров являются дочерние узлы в узле Global Definitions (Глобальные определения)

Чтобы просмотреть последовательность операций в виде программного кода, сохраните модель как файл модели для MATLAB® или как файл модели для Java®, предварительно выбрав Compact History (Компактный журнал) в меню File (Файл). Обратите внимание, что в журнале модели ведется учет всех изменений, внесенных в модель при ее построении. Соответственно, в журнале указаны и все исправления, в том числе изменения параметров, граничных условий и методов решателя. При включении компактного режима из журнала удаляются все переопределенные изменения и остаются только те недавние, которые действительно для модели.

При работе с интерфейсом COMSOL Desktop и Построителем моделей вы непременно оцените их простую и строгую организацию. Однако никакое описание пользовательского интерфейса не заменит реальной работы с ним. Поэтому в следующих разделах рекомендуем вам тщательно изучить два примера, чтобы получить общее представление о системе.

## Пример 1. Структурный анализ гаечного ключа

---

Для запуска этого простого примера не нужны модули расширения COMSOL Multiphysics®. Более сложные модели механики конструкций доступны в библиотеке приложений модуля Structural Mechanics (Механика конструкций).

Хотя бы раз в жизни вам, наверняка, приходилось закручивать болты гаечным ключом. В этом примере рассматривается модель механики конструкций для подобной задачи и анализируется целостность структуры гаечного ключа при максимально возможной нагрузке.

Сам гаечный ключ сделан, разумеется, из стали, являющейся пластичным материалом. Если к гаечному ключу приложить слишком большой крутящий момент, то инструмент навсегда деформируется из-за упругоэластичных свойств стали в случае превышения предельного напряжения текучести. Чтобы проверить, правильно ли выбраны линейные размеры ручки, нужно убедиться, что уровень механического напряжения ниже уровня предельного напряжения текучести.

Эта учебная модель поможет вам быстро познакомиться с работой в COMSOL. Сначала открывается Мастер создания моделей и добавляется опция физики для механики твердого тела. Затем импортируется геометрия, а в качестве материала выбирается сталь. После этого вы можете изучить остальные этапы создания модели — определить параметр и граничное условие для нагрузки, выбрать геометрические объекты в Графическом окне, задать сетку и тип исследования, а затем изучить результаты как в числовом виде, так и с помощью визуализации.

Если вы хотите поработать с более сложной моделью, прочитайте этот раздел, чтобы усвоить некоторые ключевые функции, а затем перейдите к учебной модели «Пример 2. Электрическая шина. Мультифизическая модель» на стр. 54.

### Мастер создания моделей

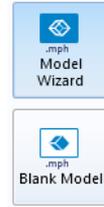
---

- 1 Для запуска приложения дважды щелкните значок COMSOL на рабочем столе, после чего откроется новое окно с двумя вариантами создания модели: Model Wizard (Мастер создания моделей) или Blank Model (Пустая модель).



Если вы выбрали Blank Model (Пустая модель), щелкните правой кнопкой мыши корневой узел в дереве модели, чтобы вручную добавить узлы Component (Компонент) и Study (Исследование). В этом учебном примере следует нажать кнопку Model Wizard (Мастер создания моделей).

1



Если ПО COMSOL уже запущено, то для запуска Мастера создания моделей можно выбрать New (Новая) в меню File (Файл). Выберите Model Wizard (Мастер создания моделей).

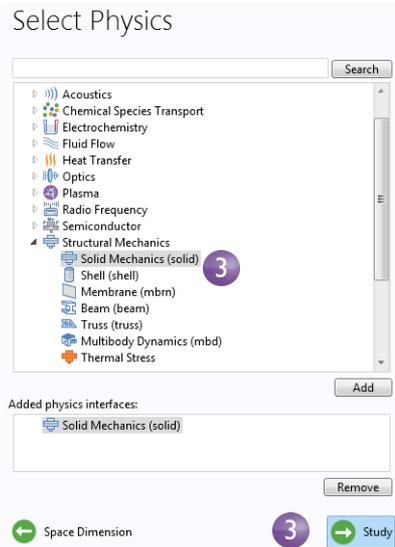
Мастер создания моделей поможет вам выполнить первичную настройку модели. В следующем окне можно выбрать размерность пространства моделирования.

- 2 В окне Select Space Dimension (Выбор размерности пространства) выберите 3D (Трехмерное).



- 3 В Select Physics (Выберите физику), выберите Structural Mechanics > Solid Mechanics (solid) (Механика конструкций > Механика твердого тела (твердое)  $\oplus$ ). Нажмите Add (Добавить).

Если в системе не установлены модули расширения, то единственным интерфейсом физик в папке Structural Mechanics (Механика конструкций) будет Solid Mechanics (Механика твердого тела). На иллюстрации справа показан внешний вид папки Structural Mechanics (Механика конструкций) со всеми модулями расширения.

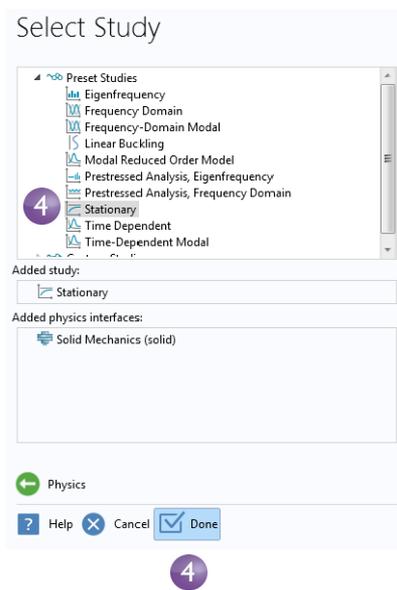


Для продолжения нажмите Study  $\rightarrow$  (Исследование).

- 4 Нажмите Stationary (Стационарное) в разделе Preset Studies (Предустановленные типы исследований). По завершении нажмите Done  (Готово).

Решатель и настройки уравнений для предустановленных типов исследования адаптируются к выбранным физикам — в данном примере, к механике твердого тела. Так как здесь нет зависящих от времени нагрузок и свойств материалов, используется стационарный тип исследования.

Все элементы в разделе Custom Studies (Пользовательские типы исследований)  настраиваются вручную.



## Геометрия

---

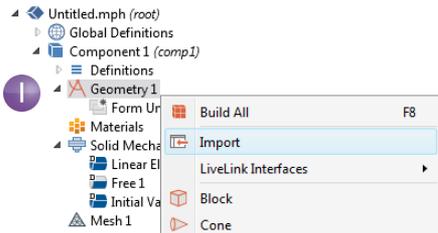
В этой учебной модели используется геометрия, созданная и сохраненная в собственном формате COMSOL для САПР, — **.mphbin**. О том, как построить собственную геометрию, см. в разделе «Приложение А. Построение геометрии» на стр. 130.

### Местоположения файлов

Местоположение библиотеки приложений, содержащей файл из данного упражнения, зависит от того, как установлено приложение и в какой операционной системе. В Windows® файл обычно находится в следующей директории:

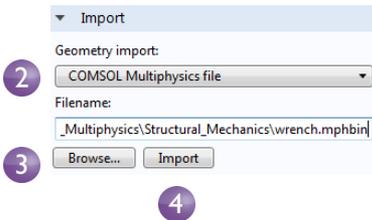
**C:\Program Files\COMSOL\COMSOL\Multiphysics\applications51.**

- 1 В окне Построителя моделей в разделе Component 1 (Компонент 1) щелкните правой кнопкой мыши Geometry 1 (Геометрия 1) и выберите Import (Импорт) .



В качестве альтернативы можно нажать кнопку Import (Импорт)  на вкладке ленты Geometry (Геометрия).

- 2 В окне настроек функции Import (Импорт) выберите в списке Geometry import (Импорт геометрии) файл COMSOL Multiphysics.

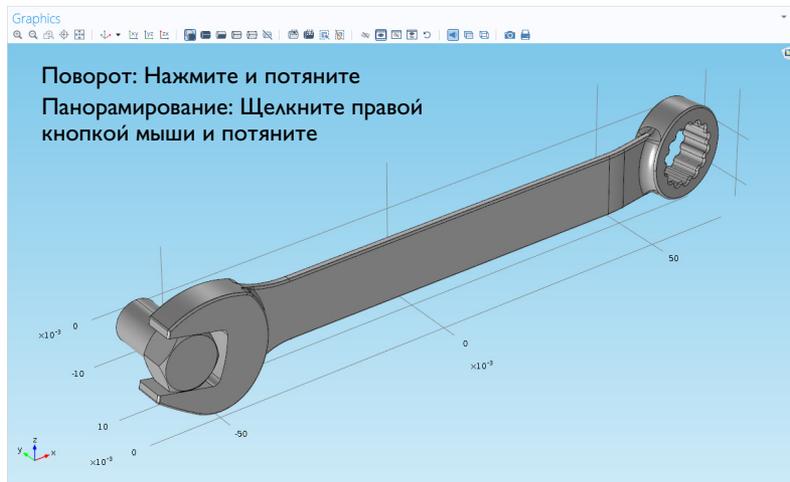


- 3 Нажмите Browse (Просмотр) и найдите файл **wrench.mphbin** в папке библиотеки приложений в каталоге, где установлено ПО COMSOL. Директория по умолчанию в Windows®:

`C:\Program Files\COMSOL\COMSOL51\Multiphysics\applications\COMSOL_Multiphysics\ Structural_Mechanics\wrench.mphbin`

Для добавления файла дважды щелкните его или нажмите Open (Открыть).

4 Нажмите Import (Импорт), чтобы открыть геометрию в Графическом окне.



5 Щелкните геометрию гаечного ключа в Графическом окне и попробуйте подвигать ее или изменить размеры. Если навести указатель мыши на геометрию или щелкнуть ее, она изменит цвет. Нажмите кнопки Zoom In (Приблизить) , Zoom Out (Отдалить) , Go to Default 3D View (Перейти к трехмерному виду по умолчанию) , Zoom Extents (Масштаб сцены)  и Transparency (Прозрачность)  на панели инструментов Графического окна и посмотрите, что произойдет с геометрией:

- Чтобы повернуть геометрию, щелкните ее и потяните в нужную сторону в Графическом окне.
- Чтобы сдвинуть геометрию, щелкните ее правой кнопкой мыши и потяните.
- Чтобы приблизить или отдалить геометрию, нажмите колесико мыши и потяните, не отпуская его.
- Чтобы вернуться в исходную позицию, нажмите кнопку Go to Default 3D View  (Перейти к трехмерному виду по умолчанию) на панели инструментов.

Дополнительную информацию см. также в разделе «Приложение В. Сочетания клавиш и действия мышью» на стр. 145.

Импортированная модель состоит из двух частей, или областей, — одна для болта и одна для гаечного ключа. В этом упражнении мы будем анализировать напряжение деформации в гаечном ключе.

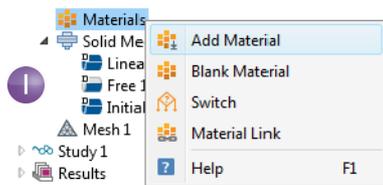
## Материалы

В узле Materials (Материалы) ✨ хранятся свойства материалов для всех физик и всех областей узла Component (Компонент). Для болта и инструмента будем использовать одну и ту же универсальную сталь. Вот как выбрать ее в COMSOL.

### 1 Откройте окно Add Materials (Добавление материалов).

Окно Add Materials (Добавление материалов) можно открыть двумя способами:

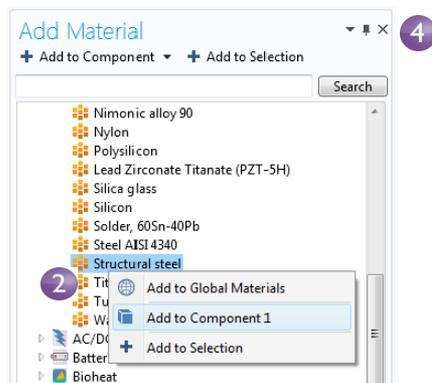
- Щелкните правой кнопкой мыши Component 1 > Materials (Компонент 1 > Материалы) ✨ в Построителе моделей и выберите Add Material (Добавить материал) ✨
- Перейдите на вкладку Home (Главная) на ленте и нажмите Add Material (Добавить материал).



- ### 2 В окне Add Material (Добавление материала) раскройте узел Built-In directory (Встроенная директория). Прокрутите вниз до элемента Structural steel (Конструкционная сталь), щелкните его правой кнопкой мыши и выберите Add to Component 1 (Добавить в Компонент 1).

- ### 3 Изучите свойства материала, доступные в разделе Material Contents (Содержимое материала) в окне Settings (Настройки).

Свойства, помеченные зелеными флажками, используются физикой при моделировании.



#### 4 Закройте окно Add Materials (Добавление материалов).

3

Material Contents				
Property	Name	Value	Unit	Property group
<input checked="" type="checkbox"/> Density	rho	7850[kg/m^3]	kg/m^3	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Young's modulus	E	200e9[Pa]	Pa	Young's modulus and Poisson's ratio
<input checked="" type="checkbox"/> Poisson's ratio	nu	0.33	1	Young's modulus and Poisson's ratio
Relative permeability	mur	1	1	Basic
Heat capacity at constant pressure	Cp	475[J/(kg*K)]	J/(kg*K)	Basic
Thermal conductivity	k	44.5[W/(m*K)]	W/(m*K)	Basic
Electrical conductivity	sigma	4.032e6[S/m]	S/m	Basic
Relative permittivity	epsilon_r	1	1	Basic
Coefficient of thermal expansion	alpha	12.3e-6[1/K]	1/K	Basic
Murnaghan third-order elastic moduli	l	-3.0e11[Pa]	N/m^2	Murnaghan
Murnaghan third-order elastic moduli	m	-6.2e11[Pa]	N/m^2	Murnaghan
Murnaghan third-order elastic moduli	n	-7.2e11[Pa]	N/m^2	Murnaghan

!

Чтобы узнать больше о работе с материалами, изучите также разделы об учебной модели электрической шины: «Материалы» на стр. 62 и «Настройка материалов» на стр. 88.

## Глобальные определения

Теперь задайте глобальный параметр нагрузки, приложенной к гаечному ключу.

### Параметры

- 1 В Построителе моделей щелкните правой кнопкой мыши Global Definitions (Глобальные определения)  и выберите Parameters (Параметры) .
- 2 Перейдите в окно настройки параметров Settings (Настройки). В разделе Parameters (Параметры) в таблице Parameters (Параметры) или в полях под этой таблицей укажите следующие настройки:
  - В столбце или поле Name (Имя) введите **F**.
  - В столбце или поле Expression (Выражение) введите **150 [N]**. Запись в квадратных скобках привязывает размерность физической величины к числовому значению — в данном случае ньютон к значению силы. Столбец Value (Значение) обновится автоматически на основе введенного выражения, как только вы уберет курсор из поля или нажмете Enter.
  - В столбце или поле Description (Описание) введите **Applied force** (Приложенная сила).

Parameters			
Name	Expression	Value	Description
F	150[N]	150.00 N	Applied force

2

- ❗ Если в таблице Parameters (Параметры) несколько записей, ее можно отсортировать по любому столбцу, нажав на его заголовок.

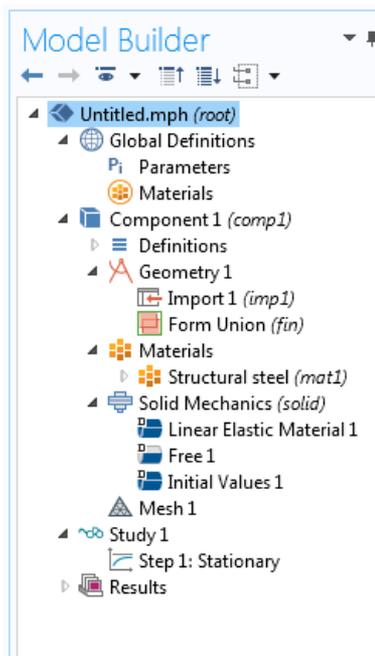
Дополнительная информация о работе с параметрами приведена в разделах «Глобальные определения» на стр. 58 и «Параметры, функции, переменные и взаимосвязи» на стр. 83.

Итак, вы добавили физику и тип исследования, импортировали геометрию, добавили материал, а также задали один параметр. Теперь последовательность узлов в Построителе моделей должна выглядеть как на иллюстрации справа. Узлы, содержащие настройки по умолчанию для описания задачи в разделе Solid Mechanics (Механика твердого тела) помечены буквой D (Default) в левом верхнем углу значка узла .

Узлами по умолчанию для механики твердого тела являются: модель Linear Elastic Material (Линейно-упругий материал), свободные граничные условия, позволяющие свободно перемещать все границы без ограничений или нагрузки, а также узел Initial Values (Начальные значения) для задания начального смещения и скорости для анализа нелинейного или переходного процесса (неприменимо в данном случае).

В любой момент вы можете сохранить модель, чтобы позднее открыть ее именно в том состоянии, в котором она была сохранена.

- 3 Для этого в меню File (Файл) выберите File > Save As (Файл > Сохранить как). Укажите путь к папке, где у вас есть право на запись, и сохраните в ней файл **wrench.mph**.



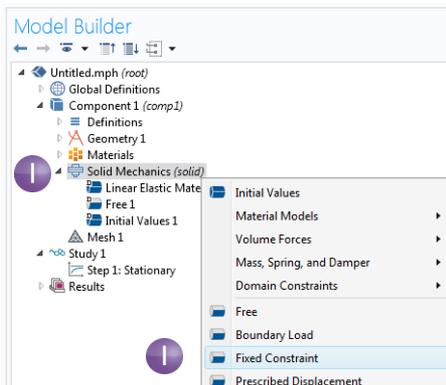
## Физика областей и граничные условия

Теперь, когда заданы геометрия и материалы, вы можете установить граничные условия.

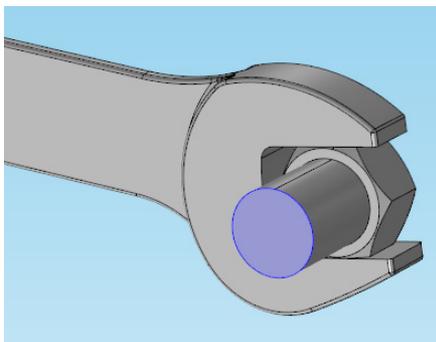
- 1 В Построителе моделей щелкните правой кнопкой мыши Solid Mechanics (solid) (Механика твердого тела (твердое)) и выберите (Фиксированное ограничение).

Граничное условие обнуляет смещение в каждой точке граничной поверхности по всем направлениям.

Можно также использовать ленту и выбрать Boundaries > Fixed Constraint (Границы > Фиксированное ограничение) на вкладке Physics (Физика).



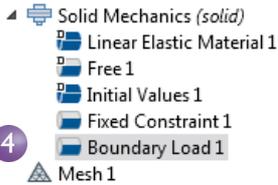
- 2 В Графическом окне поверните геометрию, щелкнув в любом месте окна и перетащив гаечный ключ, как показано на иллюстрации. Щелкните выступающую переднюю поверхность частичной модели болта. Выделенная граница будет отмечена синим цветом. Номер границы в списке выбора должен равняться 35.



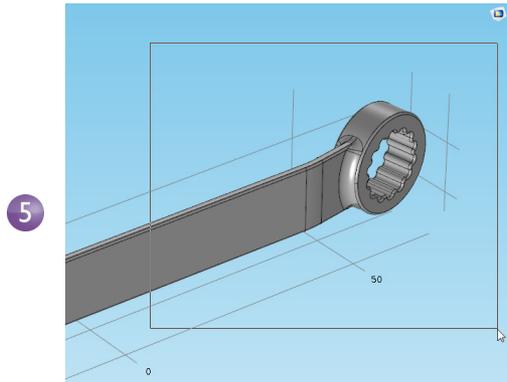
- 3 Нажмите кнопку Go to Default 3D View (Перейти к трехмерному виду по умолчанию) на панели инструментов Graphics (Графика), чтобы вернуть геометрию в исходный вид.



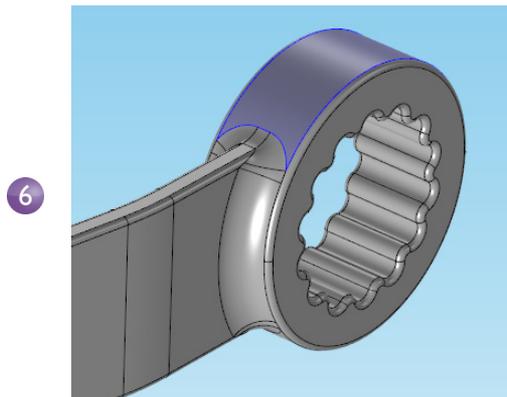
- 4 В Построителе моделей щелкните правой кнопкой мыши Solid Mechanics (solid) (Механика твердого тела (твердое)) и выберите Boundary Load (Граничная нагрузка). Узел Boundary Load (Граничная нагрузка) Построителя моделей.



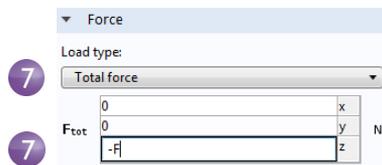
- 5 В Графическом окне нажмите кнопку Zoom Box (Панель масштабирования) на панели инструментов и потяните указатель мыши, чтобы выбрать квадратную область, как показано на иллюстрации справа. Отпустите кнопку мыши, чтобы приблизить эту область.



- 6 Выберите верхнюю грань гнезда (Boundary 111), щелкнув границу (которая при этом будет отмечена синим) и добавив ее в список Selection (Выборка).



7 В окне Settings (Настройки) раздела Boundary Load (Граничная нагрузка) в блоке Force (Сила), выберите Total force (Результирующая сила) в поле Load type (Тип нагрузки) и введите **-F** в текстовом поле для составляющей по оси z. Знак минуса обозначает отрицательное направление по оси z (вниз). При таких настройках нагрузка в 150 Н равномерно распределится по выбранной поверхности.



Обратите внимание, что для упрощения моделирования механический контакт между болтом и гаечным ключом рассчитывается приблизительно по граничному условию для контактирующей поверхности материала. Это внутреннее граничное условие автоматически создается ПО COMSOL и обеспечивает непрерывность стандартного давления и смещения по всей контактирующей поверхности материала. Более подробный анализ конструкций и механического контакта выполняется в модуле Structural Mechanics (Механика конструкций).

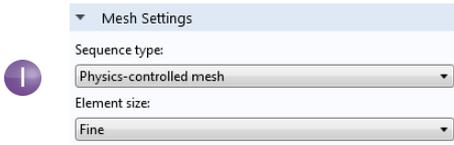
## Сетка

---

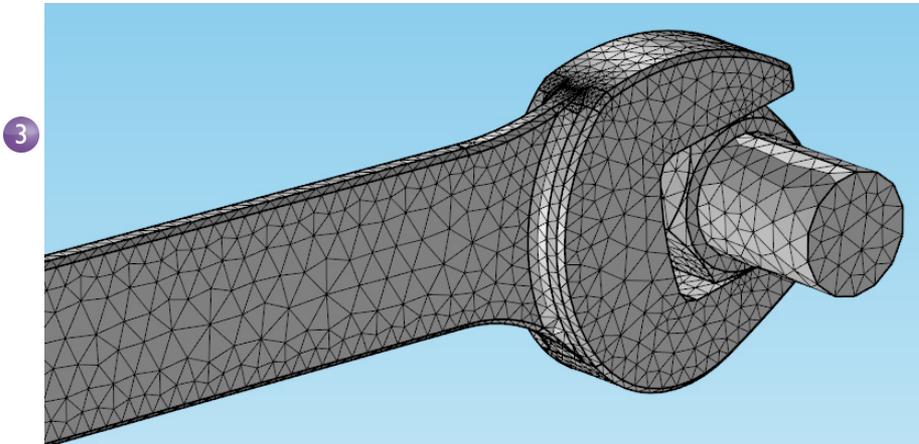
Настройки сетки задают разрешение сетки конечных элементов, которая используется для дискретизации модели. Согласно методу конечных элементов модель разбивается на малые геометрические примитивы — в данном случае на тетраэдры. Далее в каждом тетраэдре с помощью набора полиномиальных функций выполняется приближенный расчет поля структурного смещения, которое показывает деформацию объекта по каждой из трех координатных осей.

Сетка в этом примере немного мельче, чем стандартная, так как геометрия содержит малые грани и поверхности. Это позволяет эффективнее решать различные вариации поля давления и дает более точный результат. Детализация сетки для повышения точности расчетов всегда в той или иной степени замедляет работу и увеличивает потребление памяти.

- 1 В Построителе моделей в разделе Component 1 (Компонент 1) выберите Mesh 1 (Сетка 1) . В окне настроек сетки в разделе Mesh Settings (Настройки сетки), выберите Fine (Точная) из списка Element size (Размер элементов).



- 2 Нажмите кнопку Build All (Построить все)  в окне настроек или на панели инструментов Mesh (Сетка).
- 3 Через несколько секунд сетка отобразится в Графическом окне. Поверните гаечный ключ и посмотрите, как распределены размеры элементов.

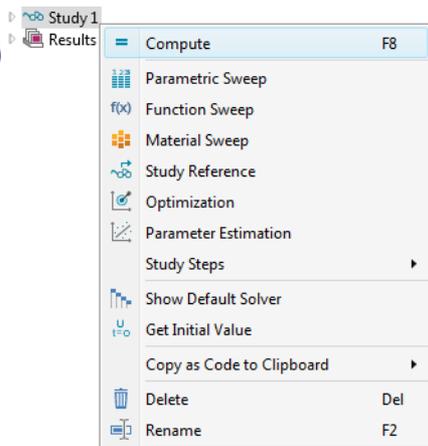


## Исследование

---

На первом этапе настройки модели вы выбрали стационарное исследование, для которого COMSOL использует стационарный решатель. В этом случае предполагается, что нагрузка, сдвиг и давление не изменяются во времени. Настройки решателя по умолчанию подходят для этой модели, если на компьютере установлено более 2 Гб оперативной памяти (RAM). Если памяти недостаточно, ниже описано, как изменить настройки решателя, чтобы он работал немного медленнее, но экономнее. Для запуска решателя:

- Щелкните правой кнопкой мыши Study 1 (Исследование 1)  и выберите Compute (Вычислить) = (или нажмите F8).



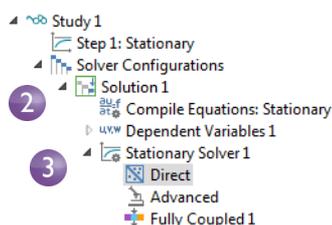
 Если на компьютере установлено меньше 2 ГБ памяти, на данном этапе может возникнуть ошибка Out of Memory During LU Factorization (Недостаточно памяти для LU-факторизации). LU-факторизация — это один из численных методов, с помощью которых COMSOL решает большие разреженные системы матричных уравнений, полученные методом конечных элементов.

Модель из этого примера можно легко решить даже на компьютере с меньшим объемом памяти, если позволить решателю записывать часть расчетных данных на жесткий диск, а не в оперативную память. Ниже описано, как это сделать. Если на компьютере установлено больше 2 ГБ оперативной памяти, перейдите в конец этого раздела (после шага 5).

- Если вычисления еще не начаты, настройки решателя можно изменить в узле Study (Исследование). В Построителе моделей щелкните правой кнопкой мыши Study 1 (Исследование 1)  и выберите Show Default Solver (Показать решатель по умолчанию) .

- В разделе Study 1 > Solver Configurations (Исследование 1 > Конфигурации решателя) раскройте узел Solution 1  (Решение 1).

- Раскройте узел Stationary Solver 1 (Стационарный решатель 1)  и щелкните Direct (Прямой) .

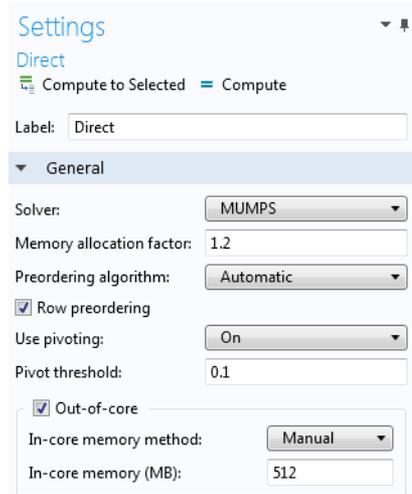


Прямой решатель — это быстрый и очень надежный тип решателей, который практически не требует ручной настройки и подходит для широкого круга физических задач. Однако его недостатком является то, что он потребляет много оперативной памяти.

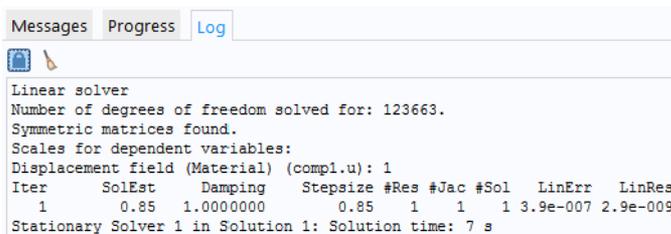
- 4 В окне Settings (Настройки) прямого решателя в разделе General (Общие) установите флажок в поле Out-of-core (Использовать внешнее запоминающее устройство). В поле In-core memory method (Управление расходом оперативной памяти) выберите Manual (Вручную). В поле In-core memory (MB) (Размер оперативной памяти, Мб) оставьте значение по умолчанию — 512 Мб.

Эта настройка гарантирует, что если во время вычислений закончится оперативная память, решатель выгрузит часть данных на жесткий диск. Однако использование жесткого диска вместо одной лишь оперативной памяти несколько замедлит работу решателя.

- 5 Щелкните правой кнопкой мыши Study 1 (Исследование 1)  и выберите Compute (Вычислить)  (или нажмите F8).



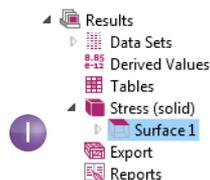
Через несколько секунд вычислений в Графическом окне отобразится график по умолчанию. Дополнительная информация о вычислениях находится в окнах Messages (Сообщения) и Log (Журнал); перейдите на вкладки Messages (Сообщения) и Log (Журнал) в окне Graphics (Графическом окне), чтобы просмотреть ее. Окно Messages (Сообщения) можно также открыть из выпадающего списка Windows (Окна) на вкладке ленты Home (Главная) .



## Отображение результатов

Напряжение по Мизесу отображается в Графическом окне в виде графика скалярного поля (Surface plot) по умолчанию, а для визуализации смещения используется подузел Deformation (Деформация). Измените единицу измерения по умолчанию ( $\text{Н/м}^2$ ) на более удобные МПа, как описано ниже.

- 1 В Построителе моделей раскройте узел Results > Stress (solid) (Результаты > Напряжение (твердое тело)) и щелкните Surface 1 (Поверхность 1).



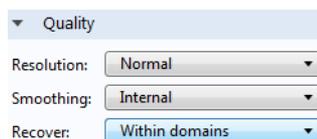
- 2 В окне Settings (Настройки) раздела Expression (Выражение) в списке Unit (Единица измерения) выберите МПа (МПа) (или введите **МПа** в этом поле).

2



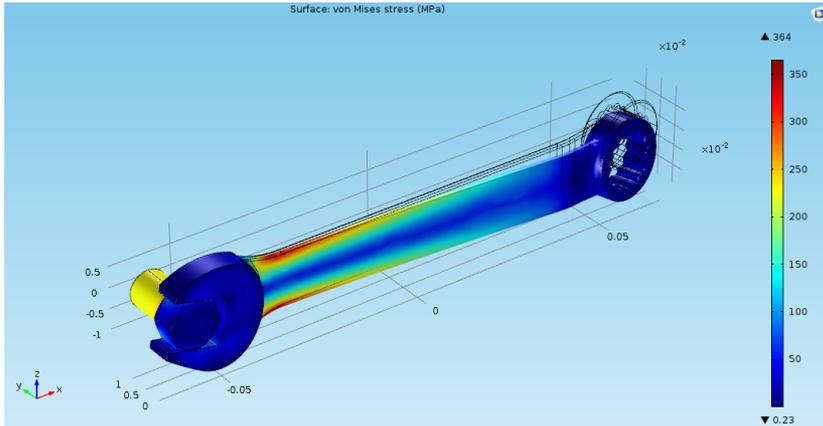
Чтобы более точно проанализировать давление, раскройте раздел Quality (Качество). В списке Recover (Восстановление) выберите Within domains (Внутри областей). Эта настройка восстановит информацию

об уровне давления на основе множества элементов, а не из каждого элемента в отдельности. По умолчанию она отключена, так как замедляет визуализацию. При включенном параметре Within domain (Внутри области) каждая область анализируется отдельно, а восстановление давления не затрагивает контактные поверхности материала.



- 3 Нажмите кнопку Plot (Построить график) на панели инструментов окна Settings (Настройки), чтобы построить график поверхности, а затем нажмите кнопку Go to Default 3D View (Перейти к трехмерному виду по умолчанию) на панели инструментов Графического окна.

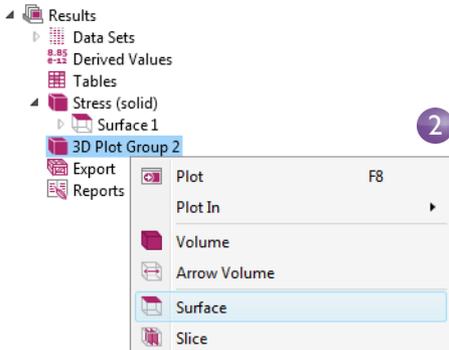
График перестроен с новой единицей измерения и настройкой восстановления Within domains (Внутри областей). Показано распределение напряжения по Мизесу в болте и гаечном ключе при вертикально приложенной нагрузке.



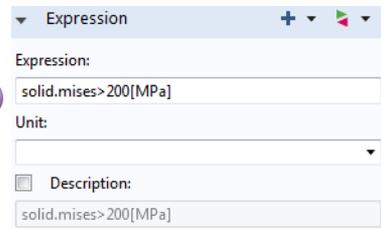
Стандартная сталь, из которой делают такие инструменты, как гаечный ключ, имеет предельное напряжение текучести около 600 МПа, поэтому наша нагрузка в 150 Н лежит довольно близко к пластической деформации (которая происходит при нагрузке примерно 15,4 кгс). Допустим, нужно определить предельно допустимый уровень с трехкратным запасом прочности. Чтобы быстро оценить, какие элементы гаечного ключа подвержены пластической деформации, постройте график по неравенству, например `solid.mises>200 [MPa]`.

- 1 Щелкните правой кнопкой мыши узел Results (Результаты) и  добавьте 3D Plot Group (Группа 3D-графиков) .

- Щелкните правой кнопкой мыши узел 3D Plot Group 2 (Группа 3D-графиков 2)  и выберите Surface (Поверхность) .

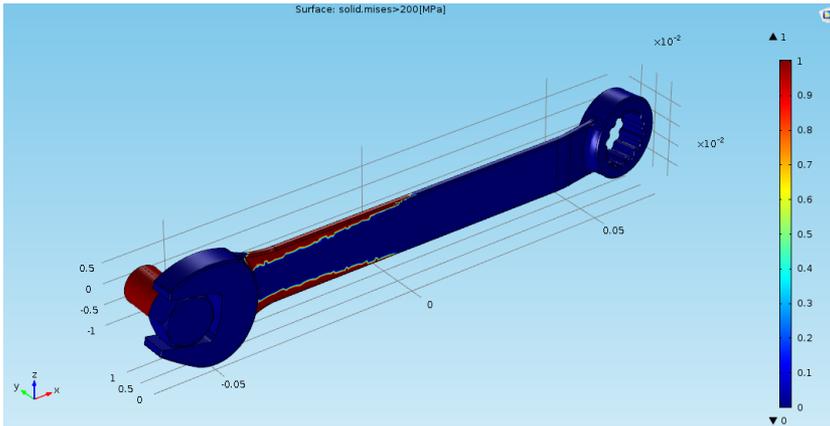


- В окне Settings (Настройки) раздела Surface (Поверхность), нажмите кнопку Replace Expression (Замена выражения) и двойным щелчком  выберите Model > Component 1 > Solid Mechanics > Stress > solid.mises-von Mises stress (Модель > Компонент 1 > Механика твердого тела >



- Напряжения > solid.mises-напряжение по Мизесу). Если имя переменной заранее известно, можно напрямую ввести **solid.mises** в поле Expression (Выражение). Теперь измените это выражение на: **solid.mises>200 [MPa]**. Это логическое выражение, которое может принимать значения 1 (истина) или 0 (ложь). В тех областях, где его значение равно 1, безопасный уровень превышен. Здесь также используется функция Recover (Восстановление), которая описана выше.
- Нажмите кнопку Plot (Построить график) .
- В Построителе моделей щелкните 3D Plot Group 2 (Группа 3D-графиков 2). Нажмите клавишу F2 и в диалоговом окне Rename 3D Plot Group (Переименование группы 3D-графиков) введите **Safety Margin (Безопасный уровень)**. Нажмите ОК.

Как видно из графика, напряжение в болте достаточно велико, но нас больше интересует гаечный ключ. Чтобы гаечный ключ гарантированно выдерживал нагрузку 150 Н с трехкратным запасом прочности, нужно изменить конструкцию его ручки — например, сделать ее шире.



Вы, вероятно, заметили, что производитель гаечного ключа по ряду причин выбрал для него асимметричную конструкцию. Из-за этого при повороте гаечного ключа поле давления может изменяться. Теперь попробуйте самостоятельно приложить такую же силу в другом направлении, визуализируйте максимальное напряжение по Мизесу и проверьте, изменится ли что-нибудь.

## Анализ сходимости

Чтобы проверить точность расчета максимального напряжения по Мизесу в гаечном ключе, нужно провести анализ сходимости сетки. Для этого воспользуемся более мелкой сеткой и, соответственно, увеличим число степеней свободы (degrees of freedom, DOF).

⚠ В этом разделе описывается расширенная функциональность, поэтому при первом чтении его можно пропустить. Для выполнения анализа сходимости рекомендуется использовать компьютер с не менее чем 4 ГБ оперативной памяти (RAM).

## ОЦЕНКА МАКСИМАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПО МИЗЕСУ

- 1 Чтобы проанализировать напряжение по Мизесу в гаечном ключе, в разделе Results (Результаты) дерева модели щелкните правой кнопкой мыши узел Derived Values (Производные значения)  и выберите Maximum > Volume Maximum (Максимум > Максимальный объем) .
- 2 В окне Settings (Настройки) блока Volume Maximum (Максимальный объем) в разделе Selection (Выборка) выберите Manual (Вручную) и укажите wrench, domain 1, щелкнув гаечный ключ в Графическом окне. Мы будем рассматривать только значения в области гаечного ключа без учета значений в болте.
- 3 В текстовом поле Expression (Выражение) введите функцию **ppr(solid.mises)**. Функция **ppr()** соответствует настройке Recover (Восстановление), которая описана выше стр. 44 для графиков поверхности. Настройка Recover (Восстановление) с функцией **ppr** повышает качество результатов анализа поля давления. В ней используется алгоритм восстановления с сохранением полинома (ppr), который выполняет интерполяцию более высокого уровня для фрагмента сетки вокруг каждой ее вершины. По умолчанию она отключена, так как замедляет вычисление.
- 4 В блоке Expression (Выражение) выберите или введите **МПа** в поле Unit (Единица измерения).

- 5 Для анализа максимального напряжения нажмите Evaluate (Оценить) в окне Settings (Настройки) блока Volume Maximum (Максимальный объем). Результат расчета — примерно 364 МПа — отобразится в окне Table (Таблица).

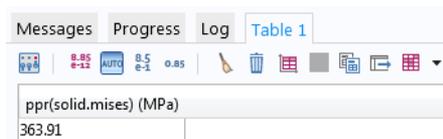
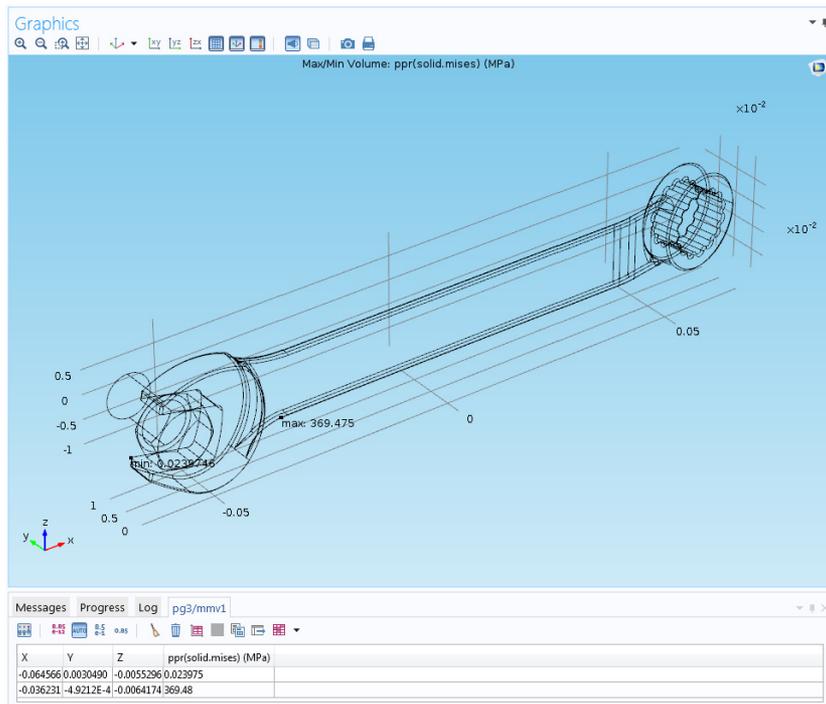


Table 1	
ppr(solid.mises) (MPa)	
363.91	

- 6 Чтобы проверить, достигнуто ли максимальное значение, постройте график Max/Min Volume (Макс./мин. объем). Щелкните правой кнопкой мыши узел Results (Результаты)  и добавьте 3D Plot Group (Группа 3D-графиков) .
- 7 Щелкните правой кнопкой мыши узел 3D Plot Group 3 (Группа 3D-графиков 2)  и выберите More Plots > Max/Min Volume (Другие графики > Макс./мин. объем) .
- 8 В окне Settings (Настройки) блока Max/Min Volume (Макс./мин. объем) в текстовом поле Expression (Выражение) введите функцию **ppr(solid.mises)**.
- 9 В окне Settings (Настройки) раздела Expression (Выражение) в списке Unit (Единица измерения) выберите МПа (МПа) (или введите **МПа** в этом поле).

- 10 Нажмите кнопку Plot (Построить график) . График этого типа одновременно отображает местоположение максимального и минимального значений, а также показывает их координаты в таблице ниже.



## ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ СЕТКИ

Теперь зададим параметрическое исследование, чтобы последовательно уточнять сетку в ходе решения и в конечном счете получить график зависимости максимального напряжения по Мизесу от размера сетки. Сначала зададим параметры, которые будут контролировать плотность сетки.

- 1 В Построителе моделей щелкните Parameters  (Параметры) в разделе Global Definitions (Глобальные определения) .
- 2 Перейдите в окно настройки параметров Settings (Настройки). В таблице Parameters (Параметры) или в полях под этой таблицей укажите следующие настройки:
  - В столбце или поле Name (Имя) введите **hd**. Этот параметр будет контролировать размер элемента при параметрическом исследовании.
  - В столбце или поле Expression (Выражение) введите **1**.
  - В столбце или поле Description (Описание) введите **Element size divider** (Разделитель размера элемента).

3 Теперь введите еще один параметр со значениями Name **h0**, Expression **0.01** и Description **Starting element size** (Исходный размер элемента). Этот параметр будет определять размер элемента в начале параметрического исследования.

Name	Expression	Value	Description
F	150[N]	150.00 N	Applied force
hd	1	1.0000	Element size divider
h0	0.01	0.010000	Starting element size

4 В Построителе моделей в разделе Component 1 (Компонент 1) выберите Mesh 1 (Сетка 1) . В окне Settings (Настройки) раздела Mesh (Сетка) выберите сетку User-controlled (Под управлением пользователя) из списка Sequence type (Тип последовательности).

5 В разделе Mesh 1 (Сетка 1) щелкните узел Size (Размер) .

6 В окне Settings (Настройки) узла Size (Размер) в разделе Element Size (Размер элемента) нажмите кнопку Custom (Пользовательский).

Element Size Parameters

Maximum element size:  m

Minimum element size:  m

Maximum element growth rate:

Curvature factor:

Resolution of narrow regions:

В блоке Element Size Parameters (Параметры размера элемента) введите:

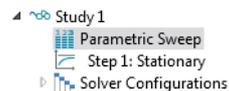
- **h0/hd** в поле Maximum element size (Максимальный размер элемента).
- **h0/(4\*hd)** в поле Minimum element size (Минимальный размер элемента).
- **1.3** в поле Maximum element growth rate (Максимальная скорость увеличения элемента).
- **0.1** в поле Curvature factor (Коэффициент кривизны).
- **0.2** в поле Resolution of narrow regions (Разрешение узких участков).

Дополнительную информацию о параметрах размера элементов см. в разделе стр. 74.

## ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И НАСТРОЙКИ РЕШАТЕЛЯ

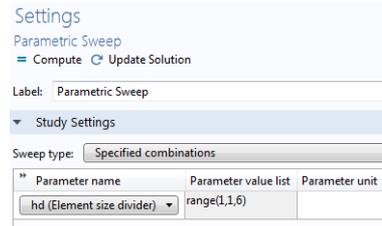
Теперь добавим параметрическое исследование для параметра **hd**.

1 В Построителе моделей щелкните правой кнопкой мыши Study 1 (Исследование 1) и выберите Parametric Sweep (Параметрическое исследование) . Узел Parametric Sweep (Параметрическое исследование) добавлен в последовательность Построителя моделей.



2 В окне Settings (Настройки) блока Parametric Sweep (Параметрическое исследование) под таблицей в разделе Study Settings (Настройки исследования) нажмите кнопку Add (Добавить) **+**. В списке Parameter names (Имена параметров) таблицы выберите **hd**.

3 Задайте диапазон Parameter values (Значения параметров) для анализа. Нажмите кнопку Range (Диапазон)  и введите значения в диалоговом окне Range (Диапазон). В поле Start (Начальное) введите **1**. В поле Step (Шаг) введите **1**, а в поле Stop (Конечное) укажите **6**. Нажмите Replace (Заменить). Список Parameter value (Значения параметров) отобразит диапазон **range (1, 1, 6)**.



Описанные выше настройки гарантируют, что в ходе параметрического анализа значение параметра **hd** будет расти, а максимальный и минимальный размеры элемента будут уменьшаться.

Дополнительную информацию о задании параметрического исследования см. в разделе стр. 116.

У наибольшего значения параметра **hd** более миллиона степеней свободы. Соответственно, мы переключимся на менее затратный с точки зрения памяти итеративный решатель.

4 В разделе Study 1 > Solver Configurations > Solution 1 (Исследование 1 > Конфигурации решателя > Решение 1) раскройте узел Stationary Solver 1 (Стационарный решатель 1), щелкните правой кнопкой мыши Stationary Solver 1  (Стационарный решатель 1) и выберите Iterative (Итеративный) . Итеративный решатель обычно расходует меньше памяти, но для эффективной работы иногда требует настройки под конкретную физику.

5 В разделе General (Общие) окна Settings (Настройки) итеративного решателя присвойте параметру Preconditioning (Предобусловливание) значение Right (Справа). (Это низкоуровневый параметр решателя, который в данном случае позволяет избежать системных предупреждений. Данная настройка не влияет на результат вычислений. Предобусловливание — это математическое преобразование, которое адаптирует систему уравнений конечных элементов к требованиям итеративного решателя.)

6 Щелкните правой кнопкой мыши узел Iterative 1 (Итеративный 1)  и выберите Multigrid (Мультисетка) . Мультисеточный итеративный решатель использует иерархию сеток с разными плотностями и функциями формы конечного элемента разных порядков.

- Щелкните узел Study 1 (Исследование 1) и выберите Compute = (Вычислить) либо в окне Settings (Настройки), либо щелчком правой кнопкой мыши по узлу. Также можно нажать Compute (Вычислить) на вкладке ленты Home (Главная) или Study (Исследование). Расчет займет несколько минут в зависимости от мощности компьютера и потребует около 4 ГБ оперативной памяти.

## РЕЗУЛЬТАТЫ. АНАЛИЗ

И наконец, чтобы проверить результаты параметрического исследования, сведем значения максимального напряжения по Мизесу в таблицу.

- В разделе Results > Derived values (Результаты > Производные значения) Построителя моделей выберите узел Volume Maximum 1 (Максимальный объем 1) **МАК.**

Результаты параметрического исследования хранятся в новом Наборе данных (Data Set) под названием Study 1/Parametric Solutions 1 (Исследование 1/Параметрические решения 1). Теперь скорректируем настройки максимального объема:

- В окне Settings (Настройки) блока Volume Maximum (Максимальный объем) измените Набор данных (Data Set) на Study 1/Parametric Solutions 1 (Исследование 1/Параметрические решения 1).

- Щелкните стрелку рядом с кнопкой Evaluate (Оценить) в верхней части окна Settings (Настройки) блока Volume Maximum (Максимальный объем) и укажите, что оценку нужно выполнить в New Table (Новая таблица). Оценка может занять около минуты.

hd	ppr(solid.mises) (MPa)
1.0000	354.81
2.0000	364.32
3.0000	368.45
4.0000	368.99
5.0000	369.61
6.0000	369.78

- Чтобы построить график по результатам в таблице, нажмите кнопку Table Graph  (Табличный график) в верхней части окна Table (Таблица).

Однако интереснее построить график зависимости максимального значения от числа степеней свободы. Для этого следует воспользоваться встроенной переменной **numberofdots**.

- Щелкните правой кнопкой мыши узел Derived Values (Производные значения)  и выберите Global Evaluation (Глобальная оценка) .
- В окне Settings (Настройки) блока Global Evaluation (Глобальная оценка) измените Набор данных (Data Set) на Study 1/Parametric Solutions 1 (Исследование 1/Параметрические решения 1).
- В поле Expressions (Выражения) введите **numberofdots**.

- 8 Щелкните стрелку рядом с кнопкой Evaluate (Оценить) в окне Settings (Настройки) блока Global Evaluation (Глобальная оценка) и укажите, что оценку нужно выполнить в таблице 2. Рядом с ранее вычисленными значениями каждого параметра отобразятся значения степеней свободы.

Проведенный анализ сходимости показывает, что расчетное значение максимального напряжения по Мизесу в ручке гаечного ключа увеличится с исходных 355 МПа для сетки, имеющей около 60 000 степеней свободы, до 370 МПа для сетки, имеющей около 1 100 000 степеней свободы. Кроме того, как следует из таблицы ниже, 300 000 степеней свободы дают примерно такую же точность, как и 1 100 000.

СТЕПЕНИ СВОБОДЫ	РАСЧЕТНОЕ МАКСИМАЛЬНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ ПО МИЗЕСУ (МПА)
<b>58 899</b>	<b>354,8</b>
<b>177 918</b>	<b>364,3</b>
<b>314 181</b>	<b>368,5</b>
<b>585 849</b>	<b>369,0</b>
<b>862 509</b>	<b>369,6</b>
<b>1 126 380</b>	<b>369,8</b>

На этом изучение учебной модели гаечного ключа завершено.

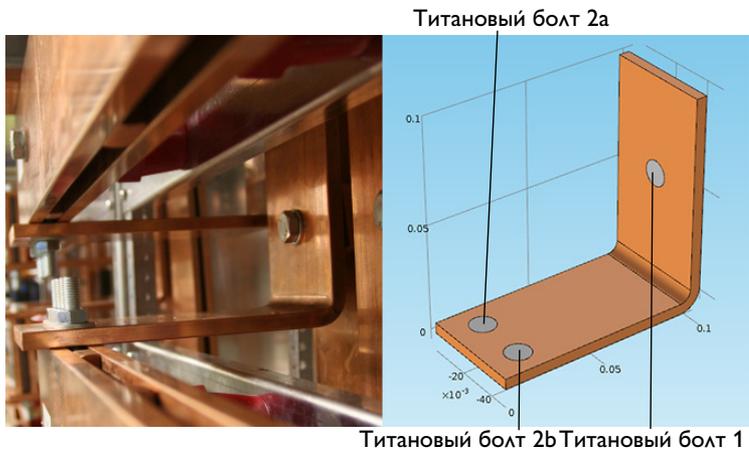
## Пример 2. Электрическая шина. Мультифизическая модель

---

### Электронагрев электрической шины

Эта учебная модель демонстрирует концепцию мультифизического моделирования в среде COMSOL. Для решения этой задачи мы последовательно зададим различные настройки физик. В итоге у вас получится полноценная мультифизическая модель.

Модель, которую вы готовитесь создать, будет анализировать электрическую шину, подводящую постоянный ток к электроприбору, как показано на иллюстрации ниже. Ток, идущий по электрической шине от болта 1 к болтам 2a и 2b, нагревает ее из-за реостатных потерь — это явление называется Джоулев нагрев. Электрическая шина сделана из меди, а болты — из титанового сплава. В обычных условиях электрический ток идет преимущественно по медному проводнику. Однако в этом примере показано влияние нежелательной электрической нагрузки от болтов на шину. Выбор материалов очень важен, так как электропроводность титана ниже, чем у меди, поэтому плотность тока на болтах будет более высокой.



Задача моделирования — точно рассчитать нагрев электрической шины. После того, как удалось прояснить мультифизическую основу явления, можно изучить структурную деформацию, напряжение и давление в электрической шине, вызванные тепловым расширением, а также охлаждающее влияние воздушного потока.

Явление Джоулева нагрева описывается законами сохранения электрического заряда и энергии. После решения уравнений по этим двум законам мы получим параметры температуры и электрического поля соответственно. Все поверхности, кроме контактных поверхностей болтов, охлаждаются естественной конвекцией воздуха вокруг электрической шины. Предположим, что выступающие части болта не влияют на охлаждение или нагрев прибора. Электрическое напряжение на вертикальной поверхности правого верхнего болта составляет 20 мВ, а напряжение на двух горизонтальных поверхностях нижних болтов равно 0. В результате получается довольно высокая и небезопасная нагрузка на электрическую шину. Более сложные граничные условия для электромагнитного анализа доступны в модуле AC/DC (Переменный/постоянный ток), в том числе возможность подавать полный ток на границу.

### **Обзор модели электрической шины**

В этой учебной модели рассматриваются более сложные и углубленные темы, демонстрирующие обширные возможности ПО COMSOL. Данные темы включают в себя следующее:

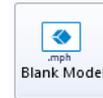
- «Параметры, функции, переменные и взаимосвязи» на стр. 83, где показано, как задаются функции и связи компонентов.
- «Свойства материалов и библиотеки материалов» на стр. 88 иллюстрирует настройку материала и его добавление в пользовательскую библиотеку материалов.
- «Добавление сеток» на стр. 90 позволяет добавить и задать две разные сетки, а затем сравнить их в Графическом окне.
- «Добавление физик» на стр. 92 позволяет изучать мультифизические свойства, дополняя модель электрической шины возможностями механики твердого тела (Solid Mechanics) и ламинарного потока (Laminar Flow).
- «Параметрическое исследование» на стр. 116 показывает, как регулировать ширину электрической шины с помощью параметра и получать решение для диапазона значений этого параметра. В результате получается график зависимости средней температуры от ширины.
- В разделе «Параллельные вычисления» на стр. 127 вы научитесь решать модели средствами кластерных вычислений.

## Мастер создания моделей

- 1 Запустить программу можно двойным щелчком по значку COMSOL на рабочем столе.

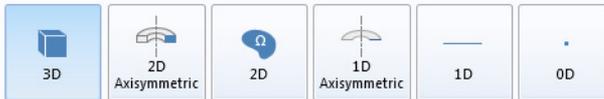


Когда ПО запустится, нажмите кнопку Построителя моделей. Кроме того, Построитель моделей всегда можно открыть, выбрав File > New (Файл > Создать). Затем выберите Построитель моделей.



- 2 В окне Select Space Dimension (Выбор размерности пространства) выберите 3D (Трехмерное).

2



- 3 В окне Select Physics (Выбор физики) раскройте папку Heat Transfer > Electromagnetic Heating (Теплопередача > Электромагнитный нагрев) а затем щелкните правой кнопкой мыши Joule Heating (Джоулев нагрев) и выберите Add Physics (Добавить физику). Нажмите кнопку Study (Исследование).

Кроме того, для добавления физики можно дважды щелкнуть или нажать кнопку Add (Добавить).

Еще один способ добавить физику — открыть окно Add Physics (Добавление физики), щелкнув правой кнопкой мыши узел Component (Компонент) в Построителе моделей и выбрав Add Physics (Добавить физику).

### Select Physics



3

Обратите внимание, что в зависимости от установленных модулей расширения в вашем списке физик может быть меньше элементов. На иллюстрации справа показан случай, когда установлены все модули расширения.

- 4 В окне Select Study (Выбор исследования) щелкните тип исследования Stationary (Стационарное), чтобы выбрать его.

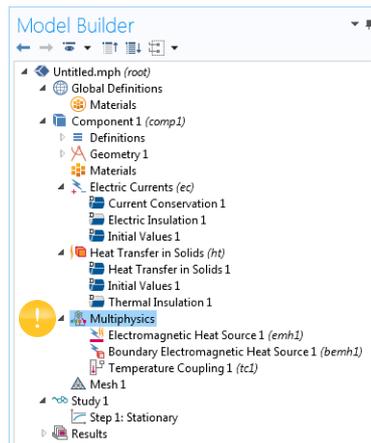
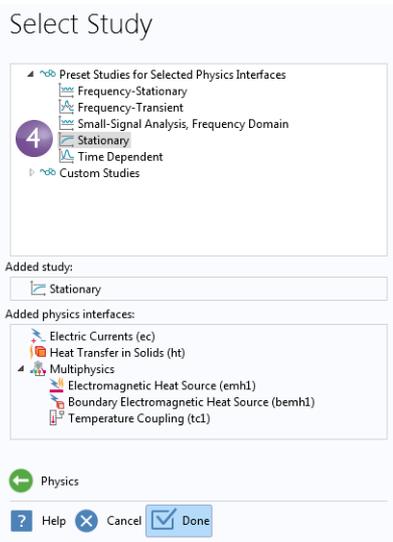
Нажмите кнопку Done (Готово).

Решатель и настройки уравнений для предустановленных типов исследования адаптируются к выбранным физикам — в данном примере, к Джоулеву нагреву.

Все элементы в разделе Custom Studies (Пользовательские типы исследования)  настраиваются вручную.

Обратите внимание, что в зависимости от установленных модулей расширения в вашем списке типов исследования может быть меньше элементов.

-  Мультифизический интерфейс Joule Heating (Джоулев нагрев) состоит из двух интерфейсов физик: Electric Currents (Электрические токи) и Heat Transfer in Solids (Теплопередача в твердых телах), а также мультифизических связей, доступных в разделе Multiphysics (Мультифизика): источники электромагнитного нагрева и температурная взаимосвязь. Это очень гибкий мультифизический подход, который позволяет использовать все возможности подключенных интерфейсов физик.



## Глобальные определения

Для экономии времени рекомендуется загружать геометрию из файла. В этом случае можете сразу перейти к «Геометрия» на стр. 59.

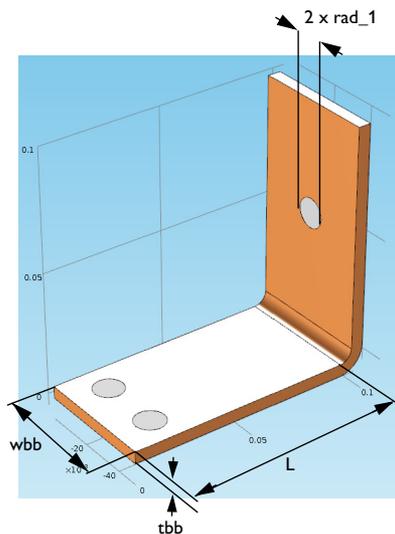
Если же вы хотите самостоятельно нарисовать геометрию, то ее параметры можно задать в узле Global Definitions (Глобальные определения). Сначала проделайте шаги с 1 по 3 ниже, чтобы задать список параметров для модели. Затем выполните шаг 4 и перейдите в раздел «Приложение А. Построение геометрии» на стр. 130.

Узел Global Definitions (Глобальные определения)  в Построителе моделей содержит параметры (Parameters), переменные (Variables) и функции (Functions), имеющие глобальную область действия. Дерево модели может содержать сразу несколько компонентов, а элементы с глобальной областью действия доступны всем компонентам. В данном примере параметры используются только в одном узле Component (Компонент), поэтому, чтобы ограничить их область действия до этого компонента, можно объявить, например, переменные и функции в подузле Definitions (Определения), который находится прямо под узлом Component (Компонент). Однако здесь нельзя задавать параметры, так как они всегда должны быть глобальными.

Так как далее в этом примере вы запустите параметрическое исследование для геометрии, начните с определения геометрии через параметры. На этом шаге введите параметры длины нижней части электрической шины: **L**, радиус титановых болтов **rad\_1**, толщину электрической шины **tbb** и ширину прибора **wbb**.

Добавьте также параметры контроля сетки: **mh**, коэффициент теплопередачи при охлаждении естественной конвекцией **htc** и величину напряжения вдоль электрической шины **Vtot**.

- Щелкните правой кнопкой мыши Global Definitions (Глобальные определения)  и выберите Parameters (Параметры) **p1**. В таблице Parameters (Параметры) щелкните первую строку в блоке Name (Имя) и введите **L**.



- Щелкните первую строку в блоке Expression (Выражение) и введите значение для **L**, **9 [cm]**. Единица измерения указывается в квадратных скобках.
- Теперь добавьте остальные параметры: **rad\_1**, **tbb**, **wbb**, **mh**, **htc** и **Vtot** из списка Parameters (Параметры) ниже. Хорошей практикой считается добавлять описания к переменным, чтобы другие пользователи и вы сами не забыли их назначение.

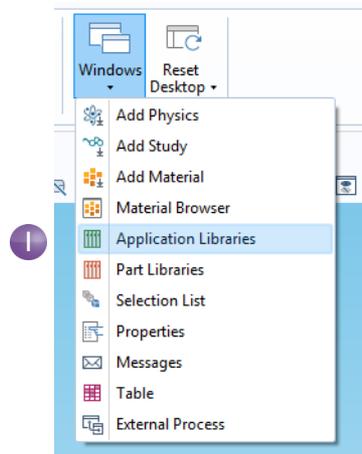
Parameters				
Name	Expression	Value	Description	
L	9[cm]	0.090000 m	Length	1
rad_1	6[mm]	0.0060000 m	Bolt radius	2
tbb	5[mm]	0.0050000 m	Thickness	
wbb	5[cm]	0.050000 m	Width	
mh	6[mm]	0.0060000 m	Maximum element size	
htc	5[W/m^2/K]	5.0000 W/(m^2·K)	Heat transfer coefficient	
Vtot	20[mV]	0.020000 V	Applied voltage	3

- Нажмите кнопку Save (Сохранить)  на панели инструментов быстрого доступа и назовите модель **busbar.mph**. Затем перейдите к «Приложение А. Построение геометрии» на стр. 130.

## Геометрия

В этом разделе описано, как открыть геометрию из Библиотек приложений. Физика, исследование, параметры и геометрия хранятся в файле модели, который вы сейчас откроете.

- Выберите Application Libraries (Библиотеки приложений)  из выпадающего списка Windows (Окна) на вкладке Home (Главная).



2 В дереве Application Libraries (Библиотеки приложений) в разделе COMSOL Multiphysics > Multiphysics (COMSOL Multiphysics > Мультифизика) выберите busbar geom.

Открыть файл, вы можете:

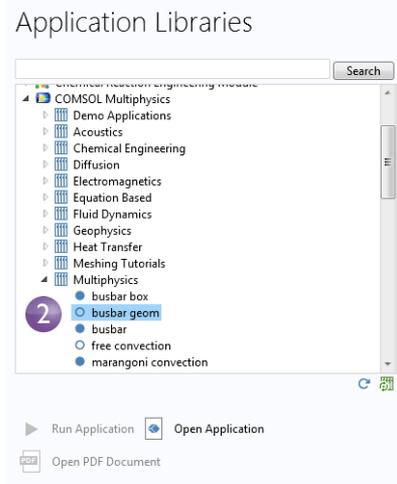
- двойным щелчком на его имени,
- щелчком правой кнопки мыши и выбором соответствующего пункта меню,
- нажатием одной из кнопок дерева.

При запросе о сохранении **untitled.mph** можно нажать No (Нет).

Геометрия в этом файле параметризована. Далее мы поэкспериментируем с различными значениями ширины — **wbb**.

3 В разделе Global Definitions (Глобальные определения) щелкните узел Parameters (Параметры) .

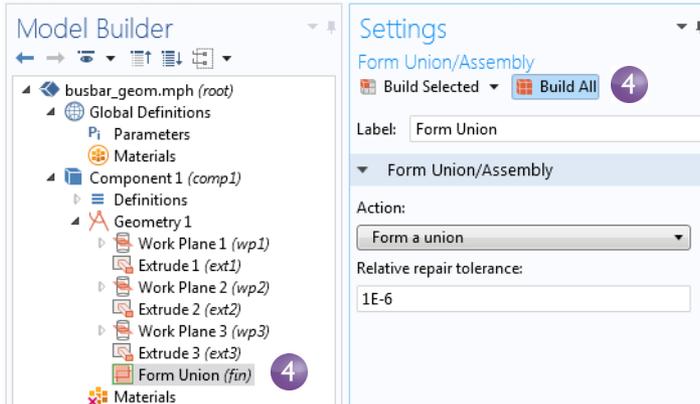
В окне Settings (Настройки) блока Parameters (Параметры) в столбце Expression (Выражение) щелкните параметр **wbb** и введите **10 [cm]**, чтобы изменить значение ширины электрической шины.



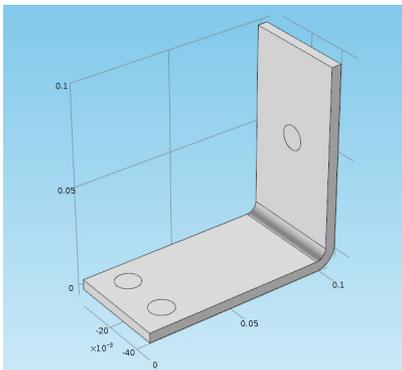
Parameters

Name	Expression	Value
L	9[cm]	0.090000 m
rad_1	6[mm]	0.0060000 m
tbb	5[mm]	0.0050000 m
wbb	10[cm]	0.10000 m
mh	6[mm]	0.0060000 m
htc	5[W/m^2/K]	5.0000 W/(m^2·K)
Vtot	20[mV]	0.020000 V

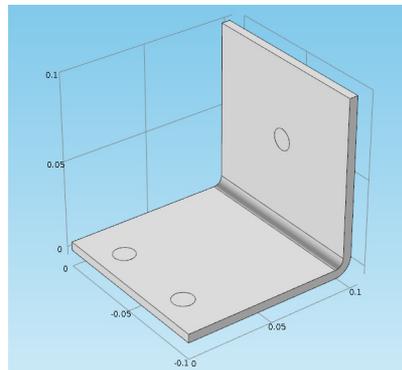
- 4 В Построителе моделей в разделе Component 1 > Geometry 1 (Компонент 1 > Геометрия 1), щелкните узел Form Union (Объединение форм) и нажмите  кнопку Build All (Построить все) в окне Settings (Настройки),  чтобы перезапустить последовательность геометрии. Кроме того, можно воспользоваться лентой и нажать кнопку Build All (Построить все) в группе Geometry (Геометрия) на вкладке Home (Главная).



- 5 На панели инструментов Graphics (Графика) нажмите кнопку (Масштаб сцены), чтобы  электрическая шина в Графическом окне стала шире.



wbb=5cm



wbb=10cm

- 6 Поэкспериментируйте с геометрией в Графическом окне:
- Чтобы повернуть электрическую шину, щелкните ее и потяните указатель в нужную сторону в Графическом окне.
  - Чтобы сдвинуть шину, щелкните ее правой кнопкой мыши и потяните.
  - Чтобы приблизить или отдалить геометрию, нажмите колесико прокрутки и потяните, не отпуская его.
  - Чтобы вернуться в исходную позицию, нажмите кнопку Go to Default 3D View (Перейти к трехмерному виду по умолчанию)  на панели инструментов.



- 7 Вернитесь к таблице Parameters (Параметры) и снова присвойте **wbb** значение **5 [cm]**.

Name	Expression	Value
L	9[cm]	0.090000 m
rad_1	6[mm]	0.0060000 m
tbb	5[mm]	0.0050000 m
wbb	5[cm]	0.050000 m
mh	6[mm]	0.0060000 m
htc	5[W/m^2/K]	5.0000 W/(m^2·K)
Vtot	20[mV]	0.020000 V

- 8 В Построителе моделей щелкните узел Form Union (Объединение форм)  и нажмите кнопку Build All (Построить все) , чтобы перезапустить последовательность геометрии.

- 9 На панели инструментов Graphics (Графика) нажмите кнопку Zoom Extents (Масштаб сцены) .

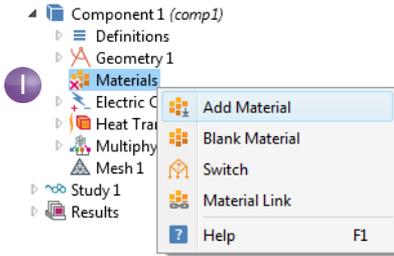
- 10 Если вы построили геометрию самостоятельно, то файл **busbar.mph** уже используется, но если вы открыли этот файл из Библиотек приложений, выберите Save As (Сохранить как) в меню File (Файл) и переименуйте модель **busbar.mph**.

Как только геометрия создана или импортирована, можно задавать материалы.

## Материалы

В узле Materials (Материалы)  хранятся свойства материалов для всех физик и геометрических областей узла Component (Компонент). Электрическая шина сделана из меди, а болты — из титанового сплава. Оба эти материала доступны во встроенной базе данных материалов.

- 1 В Построителе моделей, щелкните правой кнопкой мыши Component 1 > Materials (Компонент 1 > Материалы) и выберите Add Material (Добавить материал). По умолчанию окно открывается в правой части рабочего стола. Чтобы передвинуть окно, щелкните его заголовок и перетяните окно в другое место. При перемещении окна его можно пристыковать несколькими способами.

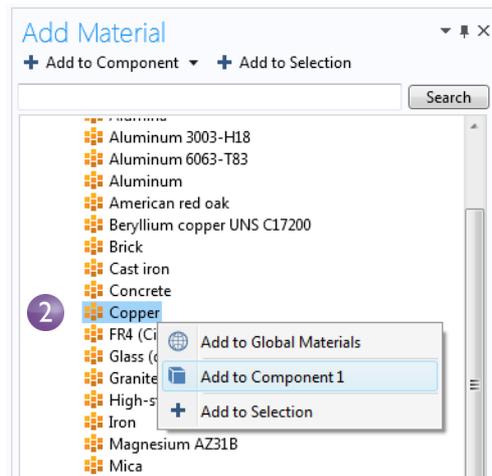


- 1  Если попытаться решить модель без указания материала (материал вы задаете чуть позже), то в левом нижнем углу узла Materials (Материалы) появится красный крестик (×).

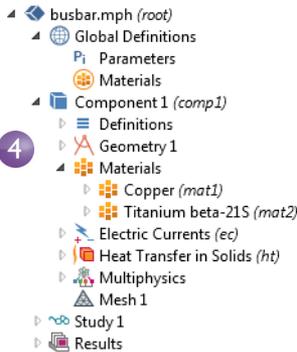
- 2 В окне Add Material (Добавление материала) раскройте папку Built-In materials (Встроенные материалы) и найдите Copper (Медь). Щелкните правой кнопкой мыши Copper (Медь) и выберите Add to Component 1 (Добавить в Компонент 1).

Узел Copper (Медь) добавлен в Построитель моделей.

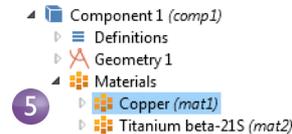
- 3 В окне Add Material (Добавить материал) прокрутите до элемента Titanium beta-21S в списке папки встроенных материалов. Щелкните правой кнопкой мыши и выберите Add to Component 1 (Добавить в Компонент 1).



4 В Построителе моделей сверните узел Geometry 1 (Геометрия 1), чтобы просмотреть модель.



5 Под узлом Materials (Материалы) щелкните Copper (Медь).



6 В окне Settings (Настройки) узла Material (Материал) изучите раздел Material Contents (Содержимое материала).

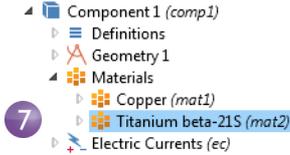
Property	Name	Value	Unit	Property group
<input checked="" type="checkbox"/> Electrical conductivity	sigma	5.998e7[S/m]	S/m	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Heat capacity at constant pressure	Cp	385[J/(kg*K)]	J/(kg*K)	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Relative permittivity	epsilon <sub>r</sub>	1	1	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Density	rho	8700[kg/m^3]	kg/m^3	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Thermal conductivity	k	400[W/(m*K)]	W/(m*K)	Basic
Relative permeability	mu <sub>r</sub>	1	1	Basic
Coefficient of thermal expansion	alpha	17e-6[1/K]	1/K	Basic
Young's modulus	E	110e9[Pa]	Pa	Young's modulus and Poisson's ratio
Poisson's ratio	nu	0.35	1	Young's modulus and Poisson's ratio
Reference resistivity	rho <sub>0</sub>	1.72e-8[ohm*...]	Ω·m	Linearized resistivity
Resistivity temperature coefficient	alpha	0.0039[1/K]	1/K	Linearized resistivity
Reference temperature	T <sub>ref</sub>	298[K]	K	Linearized resistivity

Раздел Material Contents (Содержимое материала) включает в себя полезную информацию об использовании и свойствах материала модели. Свойства, которые нужны для физики и одновременно доступны в материале, помечены зеленой галочкой . Свойства, которые нужны для физики, но отсутствуют в материале, помечены предупреждающим значком . Доступные свойства, которые не используются в модели, не имеют пометок.

Коэффициент теплового расширения из таблицы выше сейчас не используется, но понадобится позднее, когда мы добавим в модель давления и напряжения, вызванные нагревом.

Так как медь добавлена первой, она по умолчанию назначается материалом для всех частей. На следующем шаге вы назначите болтам свойства титана, который станет их материалом вместо меди.

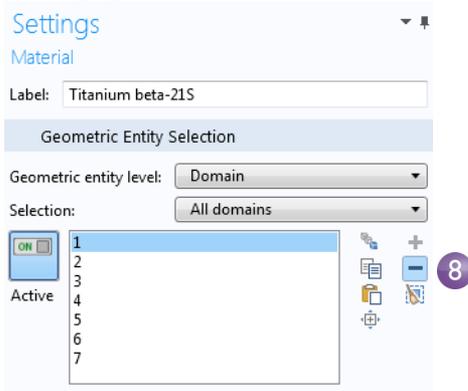
**7** В Построителе моделей щелкните Titanium beta-21S .



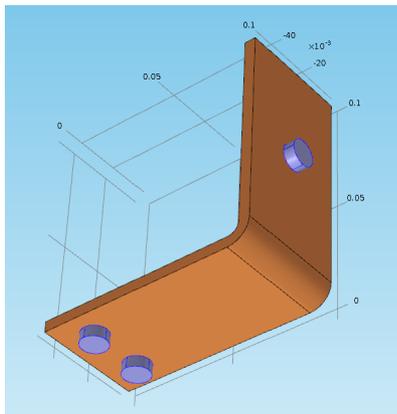
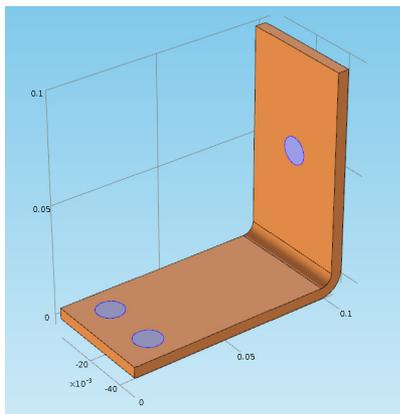
**8** Выберите All Domains (Все области) в списке Selection (Выборка) и щелкните domain 1 (область 1) в списке. Теперь удалите domain 1 (область 1) из списка выборки.

Удалить область (или любой другой геометрический объект, например, границу, грань или точку) можно двумя способами:

- Щелкните domain 1 (область 1) в списке выборки в окне Settings (Настройки) узла Material (Материал) и нажмите кнопку Remove from Selection (Удалить из выборки)  или нажмите **Delete** на клавиатуре.
- Кроме того, удалить domain 1 (область 1) из списка выборки можно в Графическом окне.

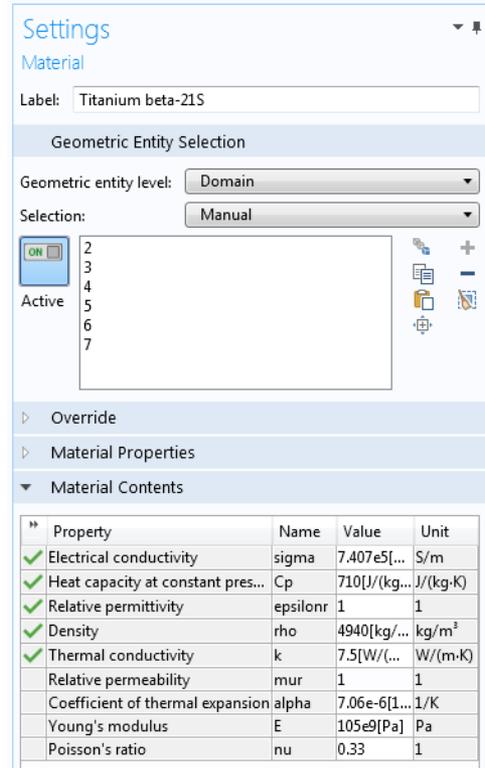


8 Области 2, 3, 4, 5, 6 и 7 подсвечены синим цветом.

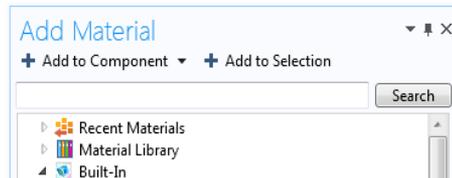


⚠ Чтобы медные компоненты отображались в реалистичном цвете материала, откройте окно Preferences (Параметры) в меню File (Файл). Затем на странице Graphics and Plot Windows (Графическое окно и окна графиков) установите флажок в поле Show material color and texture (Показывать цвет и текстуру материала). При этом другие материалы тоже станут отображаться в реалистичных цветах.

- 9 В окне Settings (Настройки) узла Material (Материал) убедитесь, что в разделе Material Contents (Содержимое материала) указан титан. Все свойства, необходимые для физики, должны быть помечены зеленой галочкой .

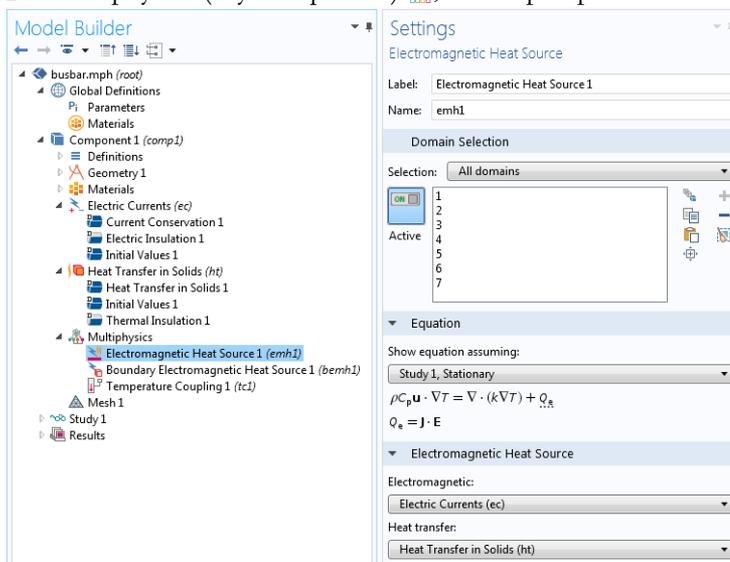


- 10 Закройте окно Add Material (Добавление материала), щелкнув значок в правом верхнем углу или нажав кнопку-переключатель Add Material (Добавить материал)  в группе Materials (Материалы) на вкладке ленты Home (Главная) .



Далее мы рассмотрим настройки области физики и зададим граничные условия для задачи о теплопередаче и пропускании электрического тока.

В окне Построителя моделей изучите узлы физик по умолчанию в мультифизическом интерфейсе Joule Heating (Джоулев нагрев). Сначала сверните узел Materials (Материалы). Затем щелкните узлы Electric Currents (Электрические токи) , Heat Transfer in Solids (Теплопередача в твердых телах)  и Multiphysics (Мультифизика) , чтобы раскрыть их.



Буква D в левом верхнем углу значка узла () обозначает, что это узел по умолчанию (default).

Уравнения, которые решает COMSOL, отображаются в разделе Equation (Уравнение) окна Settings (Настройки) соответствующих узлов физик.

Форма уравнения по умолчанию наследуется из исследования, добавленного в Мастере создания моделей. Для Джоулева нагрева COMSOL отображает уравнения, решенные относительно температуры и электрического напряжения.

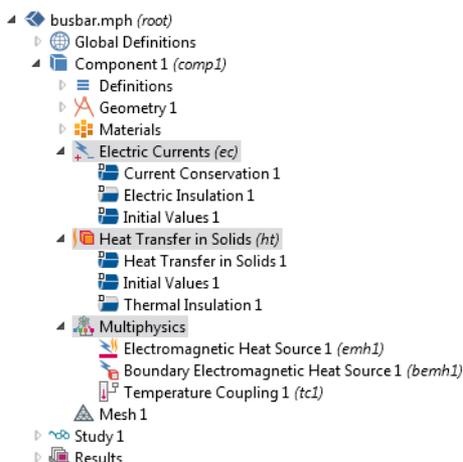
-  Чтобы уравнения всегда отображались в окне Settings (Настройки), нажмите кнопку Show (Показать) () на панели инструментов Построителя моделей и выберите Equation Sections (Разделы уравнений), поставив флажок рядом с этим пунктом.

В узлах Heat Transfer in Solids (*ht*) (Теплопередача в твердых телах) и Electric Currents (*ec*) (Электрические токи) доступны настройки для теплопроводности и электропроводности соответственно.

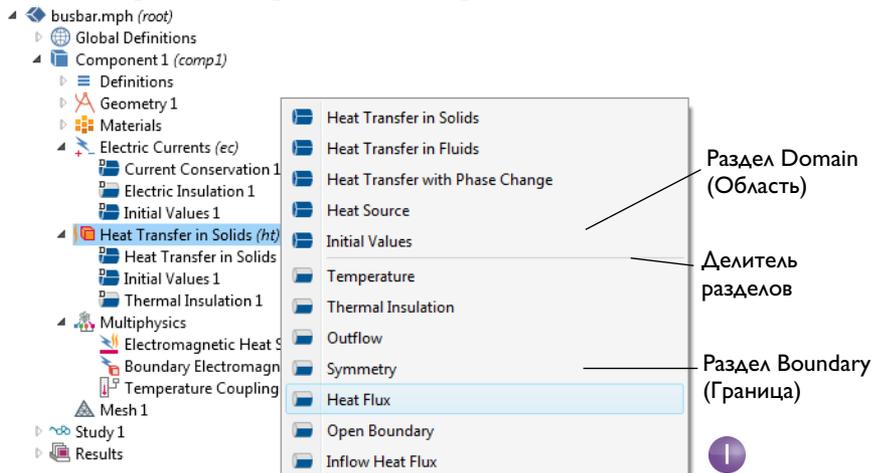
В узле Electric Currents (Электрические токи) узел Current Conservation (Сохранение заряда) отражает сохранение электрического заряда на уровне области, а узел Electric Insulation (Электрическая изоляция) содержит граничное условие по умолчанию для электрических токов.

В узле Heat Transfer in Solids (Теплопередача в твердых телах) узел Heat Transfer in Solids (Теплопередача в твердых телах) на уровне области отражает сохранение тепловой энергии, а узел Thermal Insulation (Теплоизоляция) содержит граничное условие по умолчанию для теплопередачи. Источник тепла для Джоулева нагрева задается в узле Electromagnetic Heat Source (Источник электромагнитного нагрева) в узле Multiphysics (Мультифизика). Узел Initial Values (Начальные значения), доступный в интерфейсах Electric Currents (Электрические токи) и Heat Transfer in Solids (Теплопередача в твердых телах), содержит начальные приближения для нелинейного решателя стационарных задач и начальные условия для задач, зависящих от времени.

Теперь задайте граничные условия.



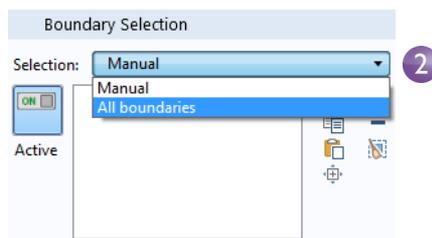
1 Щелкните правой кнопкой мыши узел Heat Transfer in Solids (Теплопередача в твердых телах) . Во втором разделе контекстного меню — разделе  границы — выберите Heat Flux (Тепловой поток).



2 В окне Settings (Настройки) блока Heat Flux (Тепловой поток) выберите All boundaries (Все границы) из списка Selection (Выборка).

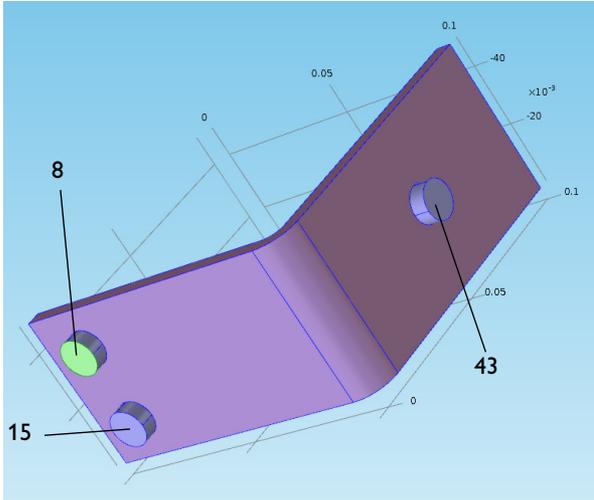
Предположим, что круглые поверхности болта не нагреваются и не охлаждаются окружающей средой.

На следующем шаге вы удалите выборку этих границ из списка выборки теплового потока, после чего к ним будет применяться граничное условие изоляции по умолчанию для интерфейсов Heat Transfer (Теплопередача).



3 Поверните электрическую шину обратной стороной. Наведите указатель мыши на одну из круглых поверхностей титанового болта, чтобы подсветить ее зеленым цветом. Щелкните поверхность болта, чтобы удалить ее выборку границ из списка Selection (Выборка). Повторите это действие для двух оставшихся круглых поверхностей болта из списка выборки. Границы 8, 15 и 43 удалены.

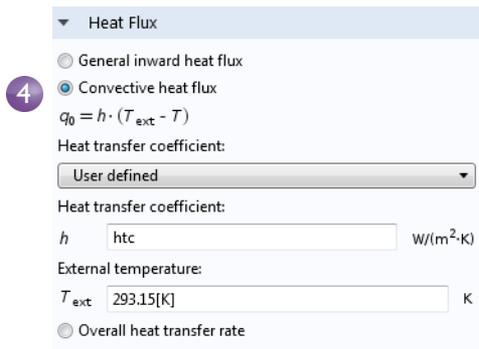
3 Перекрестная проверка: Границы 8, 15 и 43 удалены из списка Selection (Выборка).



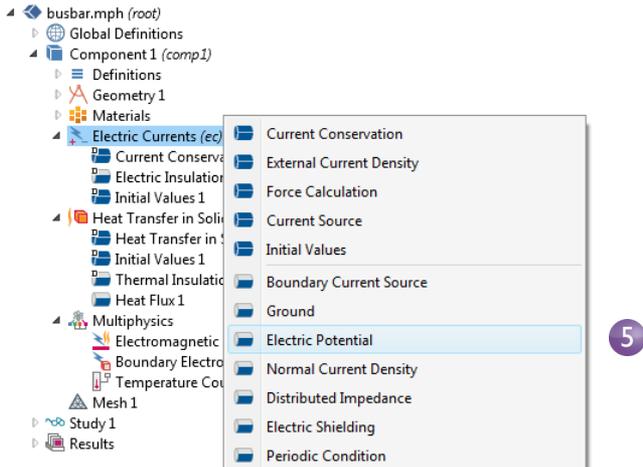
4 В окне Settings (Настройки) блока Heat Flux (Тепловой поток) в разделе Heat Flux (Тепловой поток) нажмите кнопку Convective heat flux (Конвективный тепловой поток). Введите  $htc$  в поле Heat transfer coefficient (Коэффициент теплопередачи),  $h$ .

Этот параметр вводится в таблицу Parameter (Параметр) в «Глобальные определения» на стр. 58 или импортируется вместе с геометрией.

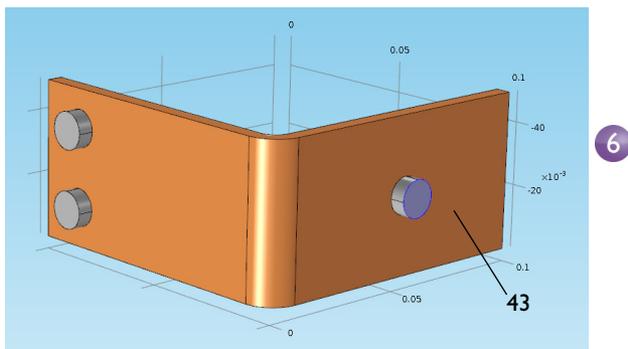
Далее установите граничные условия для электрического тока следующим образом:



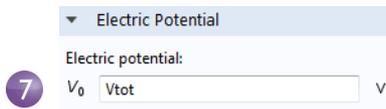
- 5 В Построителе моделей щелкните правой кнопкой мыши узел Electric Currents (Электрические токи) . Во втором разделе контекстного меню — разделе границы — выберите Electric Potential (Электрическое напряжение). Узел Electric Potential  (Электрическое напряжение) добавлен в дерево модели.



- 6 Наведите указатель мыши на круглую грань одного титанового болта, чтобы подсветить ее, а затем щелкните ее для добавления (boundary 43 (граница 43)) в список Selection (Выборка).

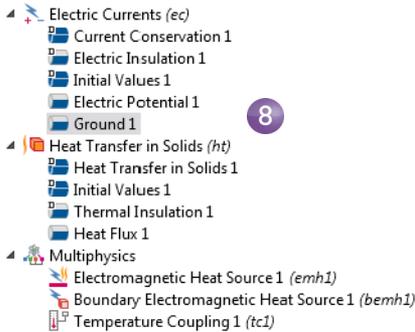


- 7 В окне Settings (Настройки) блока Electric Potential (Электрическое напряжение) введите  $V_{tot}$  в поле Electric potential (Электрическое напряжение).



И наконец, осталось заземлить поверхности двух оставшихся болтов.

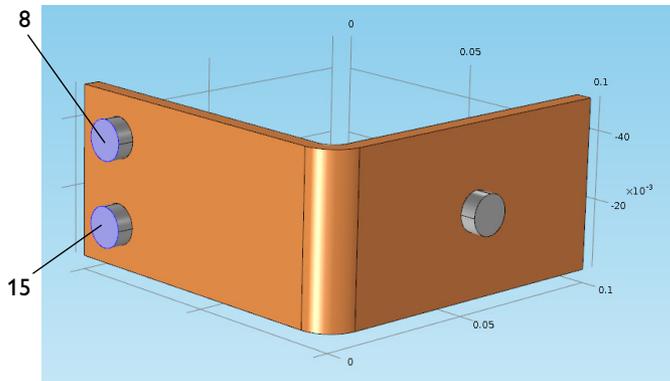
- 8 В Построителе моделей щелкните правой кнопкой мыши узел Electric Currents (Электрические токи) . В разделе границ контекстного меню выберите Ground (Заземление). Узел Ground (Заземление)  добавлен в Построитель моделей. Теперь последовательность дерева модели должна выглядеть, как на этой иллюстрации.



- 9 В Графическом окне щелкните один из оставшихся болтов, чтобы добавить его в список Selection (Выборка).

9

Перекрестная проверка: Границы 8 и 15.



Повторите это действие для последнего болта. Границы 8 и 15 добавлены в список выборки для граничного условия Ground (Заземление).

- 10 На панели инструментов Graphics (Графика) нажмите кнопку Go to Default 3D View (Перейти к трехмерному виду по умолчанию) .



10

- ⚠ Вместо использования готового мультифизического интерфейса Joule heating (Джоулев нагрев) можно вручную объединить интерфейсы Electric Currents (Электрические токи) и Heat Transfer in Solids (Теплопередача в твердых телах). Например, сначала можно настроить и решить модель для электрических токов, а затем последовательно добавить теплопередачу в твердых телах. В этом случае нужно щелкнуть правой кнопкой мыши узел Multiphysics (Мультифизика), чтобы добавить соответствующую мультифизическую связь.

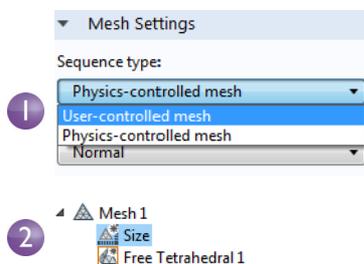
## Сетка

---

Простейший вариант построения сетки — это создание неструктурированной тетраэдральной сетки, которая отлично подойдет для электрической шины. Кроме того, можно создать несколько сеточных последовательностей, как показано в «Добавление сеток» на стр. 90.

- ⚠ Сетка под управлением физики создается по умолчанию. В большинстве случаев можно сразу перейти к разделу Study (Исследование) и решить модель. В этом упражнении настройки изучаются для того, чтобы параметризовать настройки сетки.

- 1 В Построителе моделей щелкните узел Mesh 1 (Сетка 1) . В окне Settings (Настройки) раздела Mesh (Сетка), выберите сетку User-controlled mesh (Под управлением пользователя) из списка Sequence type (Тип последовательности).
- 2 В разделе Mesh 1 (Сетка 1) щелкните узел Size (Размер) .



3 В окне Settings (Настройки) блока Size (Размер) в разделе Element Size (Размер элемента) нажмите кнопку Custom (Пользовательский).

В блоке Element Size Parameters (Параметры размера элемента) введите:

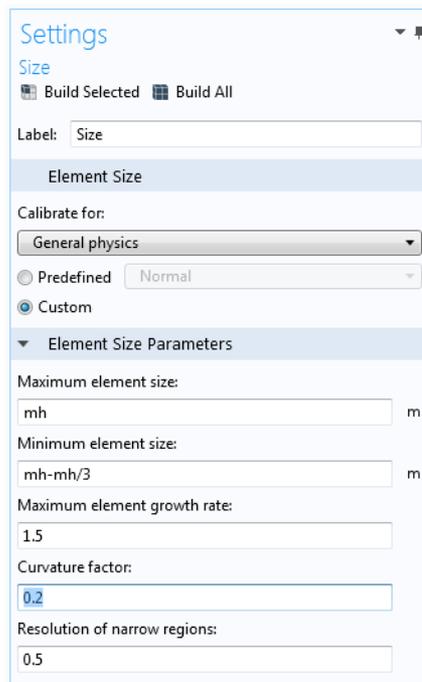
- **mh** в поле Maximum element size (Максимальный размер элемента). Обратите внимание, что **mh** равен 6 мм — значению, введенному ранее как глобальный параметр. Параметр **mh** ограничивает размеры элементов этим значением.
- **mh-mh/3** в поле Minimum element size (Минимальный размер элемента). Минимальный размер элемента немного меньше максимального.
- **0.2** в поле Curvature factor (Коэффициент кривизны). Коэффициент кривизны определяет количество элементов на искривленных границах — чем меньше этот коэффициент, тем мельче сетка.

Остальные два параметра остаются без изменений.

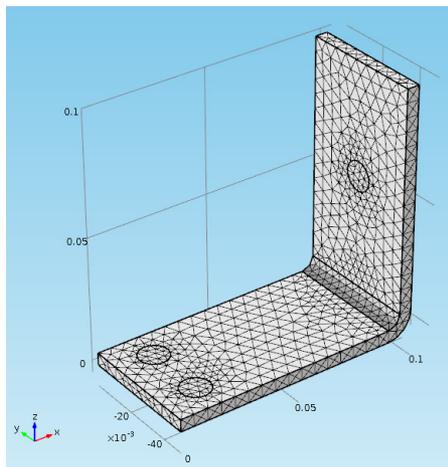
Параметр The Maximum element growth rate (Максимальная скорость увеличения элемента) определяет скорость прироста размеров элементов в какой-либо области. Чем больше это значение, тем быстрее идет прирост. При значении 1 элементы не увеличиваются в размере.

Для параметра Resolution of narrow regions (Разрешение узких участков) большее значение обычно порождает более мелкую сетку.

Звездочка (\*) в правом верхнем углу узла Size (Размер)  обозначает, что узел сейчас редактируется.



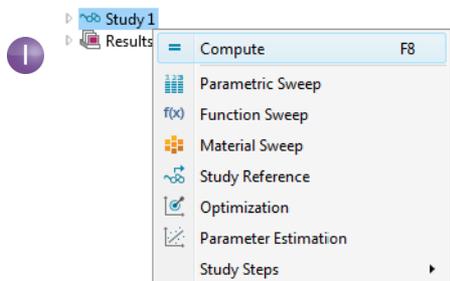
- 4 Нажмите кнопку Build All (Построить все) в окне **Settings** (Настройки) для узла Size (Размер), чтобы создать сетку, изображенную на этой иллюстрации:



Также можно нажать Build Mesh (Построить сетку) на вкладке ленты Home (Главная).

## Исследование

- 1 Для запуска моделирования щелкните правой кнопкой мыши Study 1 (Исследование 1)  в Построителе моделей и выберите Compute =. Также можно нажать клавишу F8 или кнопку Compute (Вычислить) на вкладке ленты Home (Главная).



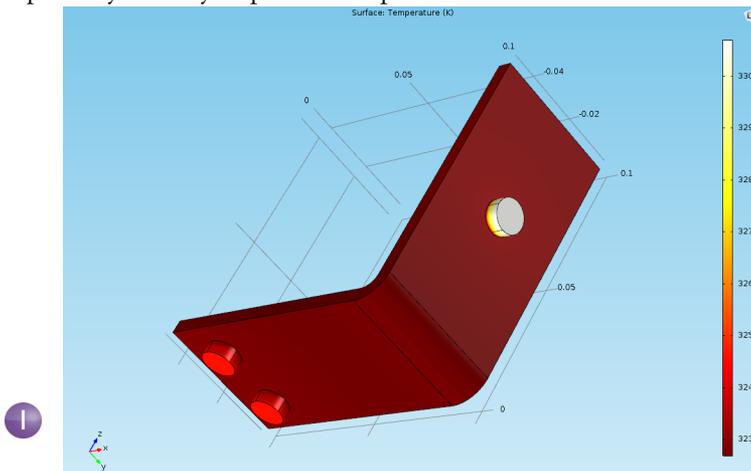
Узел Study (Исследование)  автоматически задает последовательность решения для моделирования, исходя из выбранных физики и типа исследования. Решение модели займет всего несколько секунд. В ходе процесса решения строится два графика сходимости, которые можно увидеть на вкладках рядом с Графическим окном. На этих графиках показана сходимость результатов для различных алгоритмов решателя, используемых в рамках исследования.

## Результаты

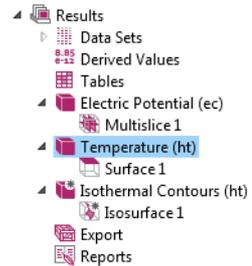
По умолчанию в узле Results (Результаты) создаются три группы графиков: мультисрезовой для электрического напряжения, график скалярного поля для температуры, а также Isothermal Contours (Изотермальные контуры), содержащие график Isosurface (Изоповерхность) для температуры.

Выберите Results > Temperature (Результаты > Температура) , чтобы просмотреть график температуры в Графическом окне. Перепад температур в приборе составляет менее 10 К из-за высокой теплопроводности меди и титана. Наибольшие температурные различия наблюдаются в верхнем болте, который проводит вдвое больше тока, чем два нижних болта. Температура значительно выше 293 К — температуры окружающей среды.

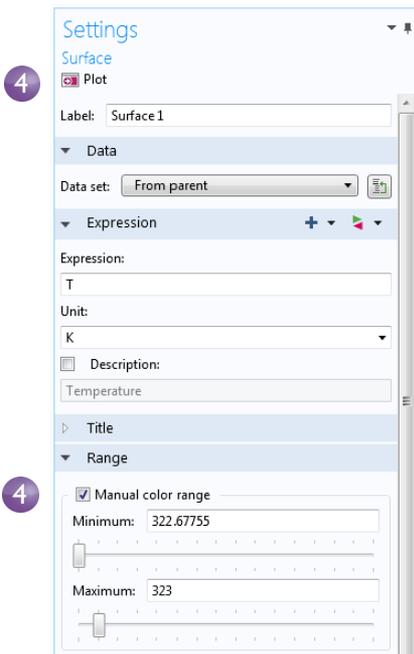
- 1 Щелкните и потяните изображение в Графическом окне, чтобы повернуть электрическую шину обратной стороной.



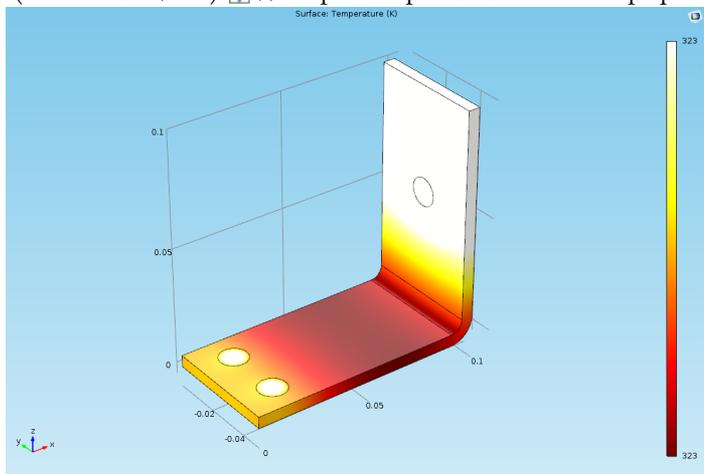
- 2 На панели инструментов Graphics (Графика) нажмите кнопку Go to Default 3D View (Перейти к трехмерному виду по умолчанию) .
- 3 В Построителе моделей раскройте узел Results > Temperature (Результаты > Температура)  и щелкните узел Surface 1 (Поверхность 1) .
- 4 В окне Settings (Настройки) узла Surface (Поверхность) щелкните Range (Диапазон), чтобы раскрыть этот раздел. Установите флажок в поле Manual



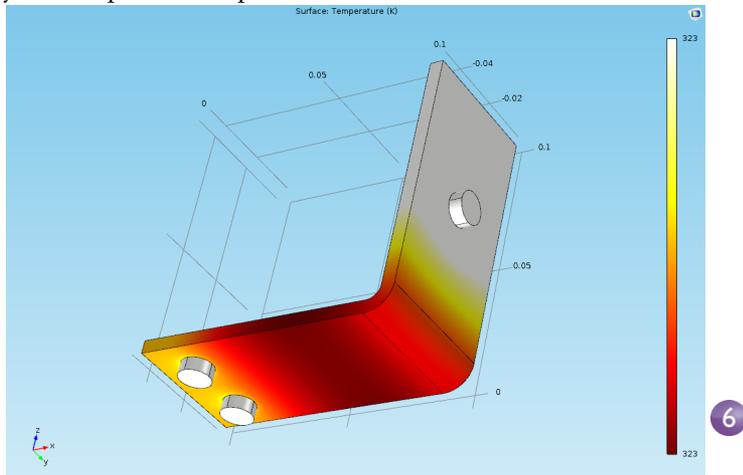
color range (Ручной диапазон цветов) и введите **323** в поле Maximum (Максимум) вместо значения по умолчанию. Нажмите кнопку Plot (Построить график)  в окне Settings (Настройки) узла Surface (Поверхность).



5 На панели инструментов Graphics (Графика) нажмите кнопку Zoom Extents (Масштаб сцены)  для просмотра обновленного графика.



- 6 Щелкните и потяните электрическую шину в Графическом окне, чтобы повернуть ее обратной стороной.

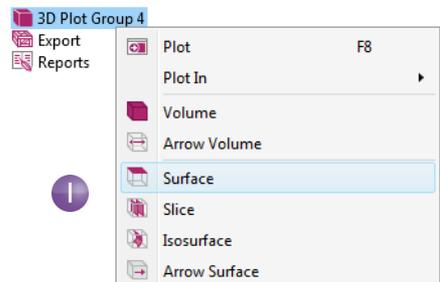


Распределение температуры имеет одностороннюю симметрию с вертикальной плоскостью симметрии, проходящей между двумя титановыми болтами через центр верхнего болта. В этом случае для расчета модели не требуется много вычислительных ресурсов, поэтому можно моделировать всю геометрию. Для более сложных моделей следует использовать симметрии, которые снижают трудоемкость вычислений.

Выберите Go to Default 3D View (Перейти к трехмерному виду по умолчанию) на панели инструментов Графического окна.

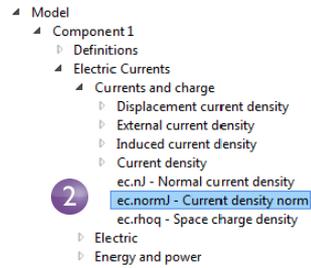
Теперь построим график поверхности для плотности тока в приборе.

- 1 В Построителе моделей щелкните правой кнопкой мыши Results (Результаты) и добавьте 3D Plot Group (Группа 3D-графиков). Щелкните правой кнопкой мыши 3D Plot Group 4 (Группа 3D-графиков 4) и добавьте узел Surface (Поверхность).

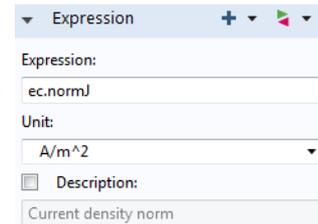


- 2 В окне Settings (Настройки) узла Surface (Поверхность) в разделе Expression (Выражение) нажмите кнопку Replace Expression (Заменить выражение)  .  
Перейдите в раздел Model > Component 1 > Electric Currents > Currents and charge > **ec.normJ** -Current density norm (Модель > Компонент 1 > Электрические токи > Токи и заряды > **ec.normJ** -Норма плотности тока) и выберите его двойным щелчком или клавишей Enter.

Переменная **ec.normJ** обозначает модуль, или абсолютную величину, вектора плотности тока. Если имя переменной заранее известно, можно сразу ввести **ec.normJ** в поле Expression (Выражение).



2

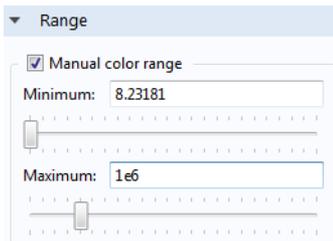


- 3 Нажмите кнопку Plot (Построить график)  .

График в Графическом окне практически одноцветный из-за высокой плотности тока на контактных площадках болтов. Теперь вручную изменим диапазон таблицы цветов, чтобы визуализировать распределение плотности тока.

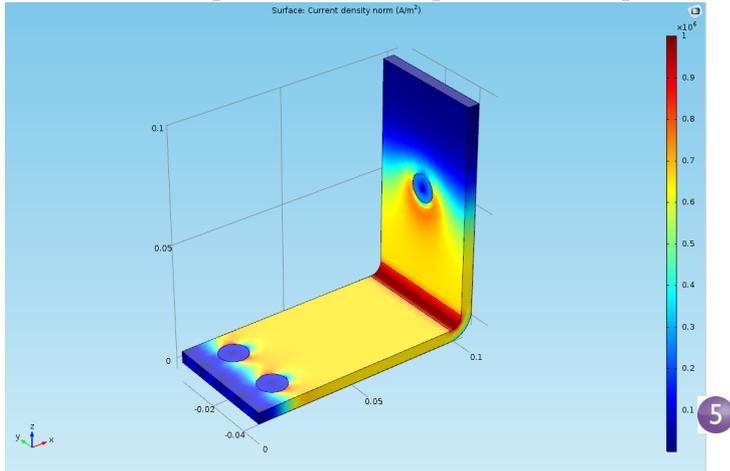
- 4 В окне Settings (Настройки) узла Surface (Поверхность) в разделе Range (Диапазон) установите флажок в поле Manual color range (Ручной диапазон цветов). Введите **1e6** в поле Maximum (Максимум) вместо значения по умолчанию.

4

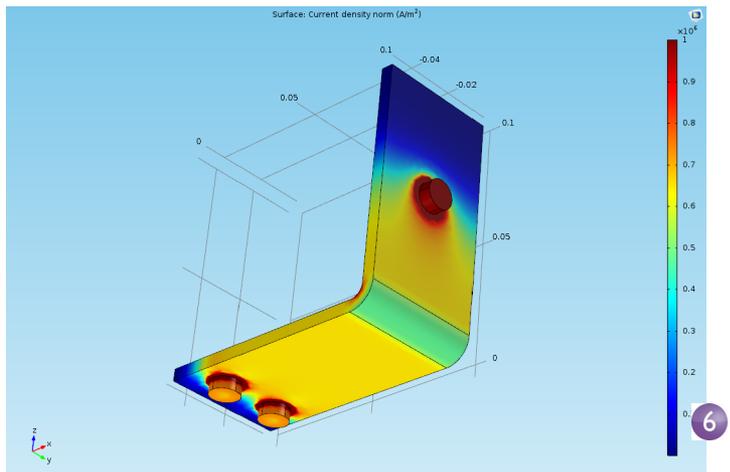


5 Нажмите кнопку Plot (Построить график) .

Как видно из графика, кратчайший путь тока находится там, где электрическая шина изогнута под 90 градусов. Обратите внимание, что края электрической шины за пределами болтов практически не проводят ток.



6 Щелкните и потяните электрическую шину в Графическом окне, чтобы повернуть ее обратной стороной. Снова поверните изображение, чтобы увидеть высокую плотность тока вокруг контактных поверхностей каждого болта.



Не забудьте сохранить модель. Эта версия модели, **busbar.mph**, повторно используется под другим именем в последующих учебных примерах.

По завершении нажмите кнопку Go to Default 3D View (Перейти к трехмерному виду по умолчанию)  на панели инструментов Graphics (Графика). На следующем шаге вы создадите графическую миниатюру модели.

## СОЗДАНИЕ МОДЕЛИ ИЗОБРАЖЕНИЯ ИЗ ГРАФИКОВ

Для любого решения можно создать картинку, которая будет отображаться в COMSOL при просмотре файлов моделей. Когда график будет построен, в Построителе моделей в разделе Results (Результаты) щелкните график. Затем щелкните корневой узел (первый по порядку узел в дереве модели). В окне Settings (Настройки) узла Root (Корневой) в разделе Thumbnail (Миниатюра) нажмите Set from Graphics Window (Взять из Графического окна).

Создать изображения из графика можно еще двумя способами. Первый способ — нажать кнопку Image Snapshot (Снимок изображения)  на панели инструментов Graphics (Графика), чтобы создать картинку напрямую. Кроме того, для создания графического файла можно добавить узел Image (Изображение)  в узел Export (Экспорт). Щелкните правой кнопкой мыши нужную группу графиков и выберите Add Image to Export (Добавить изображение для экспорта).

На этом изучение учебной модели электрической шины завершено. В следующих разделах более углубленно рассматриваются уже сделанные вами операции, а также добавляются расширенные эффекты, такие как тепловое расширение и поток текучей среды. Эти дополнительные темы начинаются со следующих страниц:

- «Параметры, функции, переменные и взаимосвязи» на стр. 83.
- «Свойства материалов и библиотеки материалов» на стр. 88.
- «Добавление сеток» на стр. 90.
- «Добавление физик» на стр. 92.
- «Параметрическое исследование» на стр. 116.
- «Параллельные вычисления» на стр. 127.
- «Приложение А. Построение геометрии» на стр. 130.

## Темы для углубленного изучения

---

### Параметры, функции, переменные и взаимосвязи

---

Этот раздел посвящен работе с параметрами, функциями, переменными и взаимосвязями компонентов.

Узлы Global Definitions (Глобальные определения) и Component Definitions (Определения компонентов) позволяют настраивать входные данные модели и взаимосвязи между компонентами, а также упорядочивать процесс моделирования. Вы уже использовали данные узлы, когда добавляли параметры для настройки входных данных модели в разделе «Глобальные определения» на стр. 58.

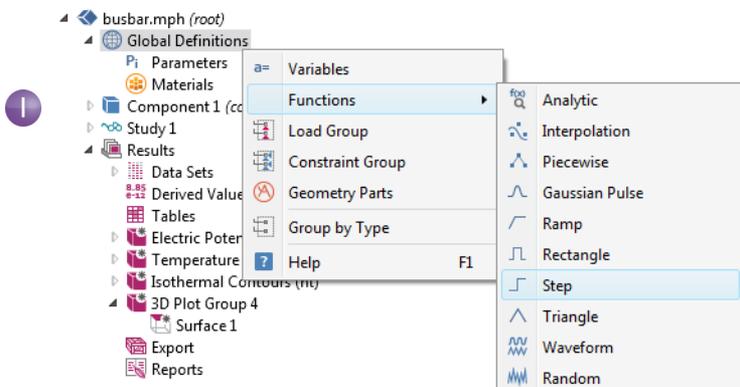
Функции, доступные в узлах Global Definitions (Глобальные определения) и Component Definitions (Определения компонентов), содержат набор готовых шаблонов для удобной настройки мультифизического моделирования. Например, шаблон функции Step (Ступенька) может создать гладкую ступенчатую функцию для различных типов пространственных или временных переходов.

Предположим, вы хотите добавить исследование, зависящее от времени, в модель электрической шины, к которой приложено электрическое напряжение, возрастающее с 0 до 20 мВ за 0,5 секунды. Для этого можно воспользоваться ступенчатой функцией, умноженной на значение параметра  $v_{tot}$ . Чтобы освоить объявление и проверку функций, в этом разделе вы добавите в модель ступенчатую функцию, плавно возрастающую с 0 до 1 за 0,5 секунд.

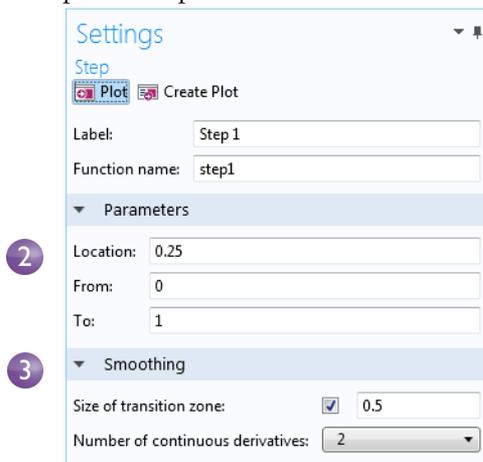
#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИЙ

В этом разделе вы можете работать с файлом модели, созданным при работе с предыдущим разделом. Найдите и откройте файл **busbar.mph**, если он еще не открыт на рабочем столе.

- 1 Щелкните правой кнопкой мыши узел Global Definitions (Глобальные определения) и выберите Functions > Step (Функции > Ступенька).



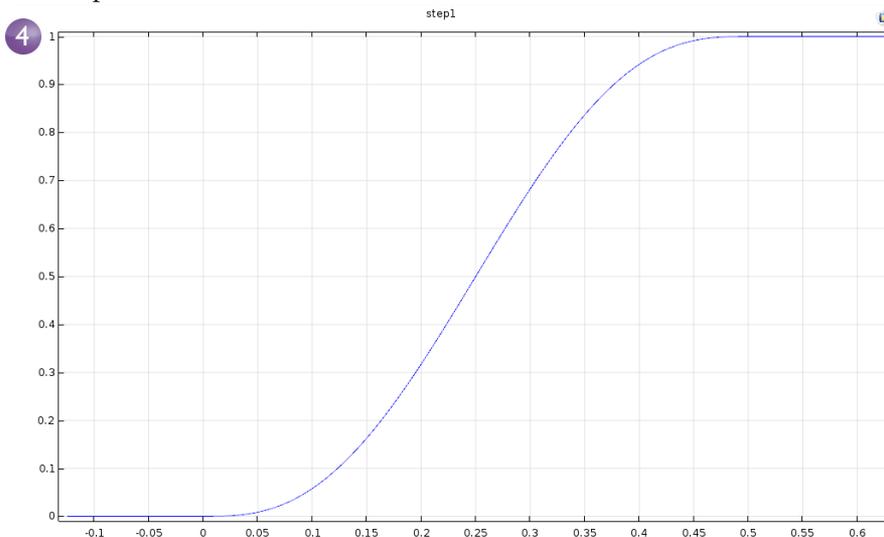
- 2 В окне Settings (Настройки) блока Step (Ступенька) введите 0.25 в поле Location (Местоположение), чтобы задать среднюю точку ступеньки, в которой она принимает значение 0.5.



- 3 Щелкните Smoothing (Сглаживание), чтобы раскрыть этот раздел, и введите 0.5 в поле Size of transition zone (Размер области перехода) для настройки ширины интервала сглаживания. Количество непрерывных производных (2) оставьте без изменений.

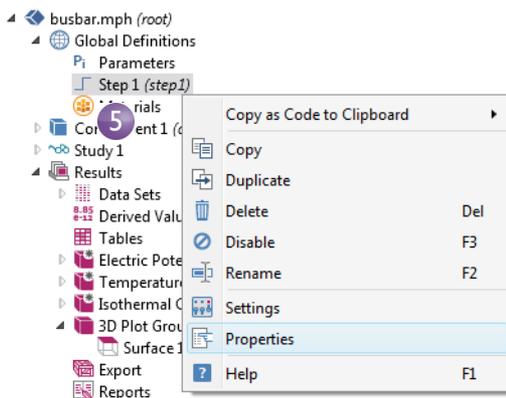
4 Нажмите кнопку Plot (Построить график)  в окне Settings (Настройки) узла Step (Ступенька).

Если у вас получился такой же график, как на иллюстрации ниже, то функция задана правильно.

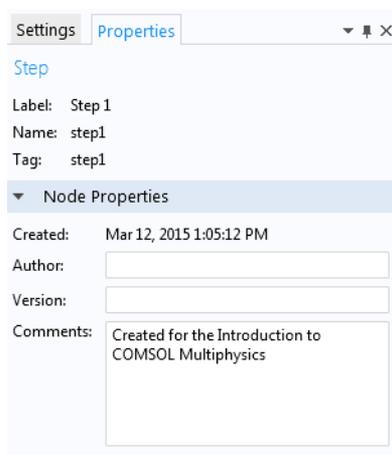


Для наглядности можно также добавить комментарии или переименовать функцию.

5 Щелкните правой кнопкой мыши узел Step 1 (Ступенька)  в Построителе моделей и выберите Properties (Свойства).



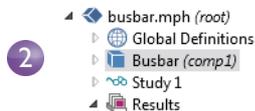
- 6 В окне Properties (Свойства) введите любую информацию, которую считаете необходимой. По завершении щелкните правой кнопкой мыши вкладку Properties (Свойства) и выберите Close (Заккрыть).



В данном упражнении предположим, что нам нужно добавить второй компонент, который описывает электроприбор, подключенный титановыми болтами к электрической шине.

Сначала нужно присвоить Component 1 (Компонент 1) имя, относящееся к электрической шине.

- 1 Щелкните правой кнопкой мыши узел Component 1 (Компонент 1) и выберите Rename (Переименовать) (или нажмите F2).
- 2 В окне Rename Component (Переименование компонента) введите **Busbar** (Электрическая шина). Нажмите ОК и сохраните модель.



## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ

### КОМПОНЕНТОВ

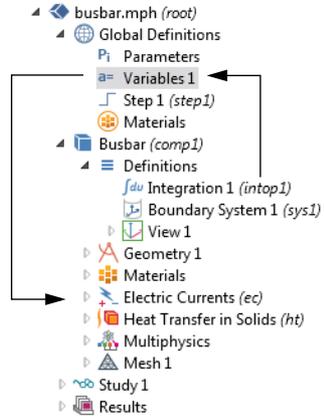
Щелкните правой кнопкой мыши узел Definitions (Определения)  $\equiv$  в разделе Busbar (comp1), чтобы добавить связь компонента, вычисляющую интеграл по любой переменной Busbar (comp1) на границах болтов, примыкающих к электроприбору. С помощью такой связи можно, например, объявить в узле Global Definitions (Глобальные определения) переменную для расчета общей силы тока. Эта переменная будет иметь глобальную область действия и сможет, к примеру, сформировать граничное условие для тока, подающегося на электроприбор, который моделируется вторым компонентом.

Связи компонентов в узле определений используются во многих задачах.

Связи Average  $\overline{\phantom{x}}$  (Среднее), Maximum  $\text{MAX}$  (Максимум) и Minimum  $\text{MIN}$  (Минимум) могут использоваться для построения результатов, а также в граничных условиях, источниках, членах уравнений, свойствах и в других элементах моделей. Связи Probes (Датчики)  $\text{P}$  служат для мониторинга хода решения. Так, с их помощью можно проследить решение в какой-либо критической точке во время моделирования по времени или значение каждого параметра в параметрическом исследовании.

Пример использования оператора среднего приведен в разделе «Параметрическое исследование» на стр. 116. См. также раздел «Функции» на стр. 154, где приведен полный список функций COMSOL.

⚠ Чтобы узнать больше о работе с определениями, в Построителе моделей щелкните узел Definitions  $\equiv$  (Определения) или Global Definitions  $\text{G}$  (Глобальные определения) и нажмите F1, чтобы открыть окно Help (Справка)  $\text{H}$  (справка доступна только на английском языке). В этом окне отображается полезная информация о выбранном элементе на рабочем столе и даны ссылки на документацию. При первом запуске содержимое окна может загружаться до минуты, но при последующих запусках этой задержки уже не будет.



## Свойства материалов и библиотеки материалов

Вы уже использовали возможности узла Materials (Материалы), когда задавали свойства меди и титана для модели электрической шины. В узле Materials (Материалы) вы также можете создавать собственные материалы и сохранять их в своей библиотеке материалов. Кроме того, можно добавлять новые свойства для уже существующих материалов. В тех случаях, когда заданные свойства являются функциями других переменных, например, температуры, график позволяет проверить функции свойств в нужном диапазоне. Также вы можете загружать электронные таблицы Excel® и задавать функции интерполяции для свойств материалов с помощью LiveLink™ for Excel®.

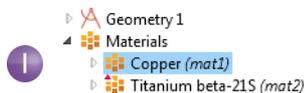
Расширение «Библиотека материалов» содержит более 2500 материалов и десятки тысяч функций свойств, зависящих от температуры.

Сначала рассмотрим добавление свойств к существующим материалам. Допустим, вы хотите добавить модуль объемной упругости и модуль поперечной упругости в свойства меди.

### НАСТРОЙКА МАТЕРИАЛОВ

Продолжим работать с электрической шиной.

- 1 В Построителе моделей в разделе Materials (Материалы) щелкните Copper (Медь) .

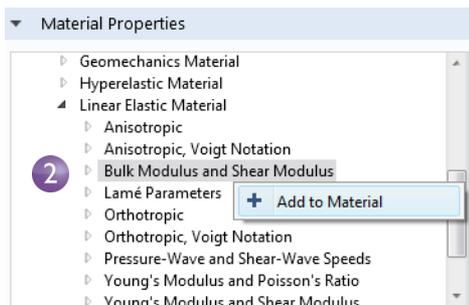


- 2 В окне Settings (Настройки) узла Material (Материал) раскройте щелчком раздел Material Properties (Свойства материала), содержащий список всех заданных свойств.

Раскройте раздел Solid Mechanics > Linear Elastic Material (Механика твердого тела > Линейно-упругий материал). Щелкните правой

кнопкой мыши Bulk Modulus and Shear Modulus (Модуль объемной упругости и модуль поперечной упругости) и выберите + Add to Material (Добавить в материал).

Здесь вы можете указать модуль объемной упругости и модуль поперечной упругости для меди в модели.

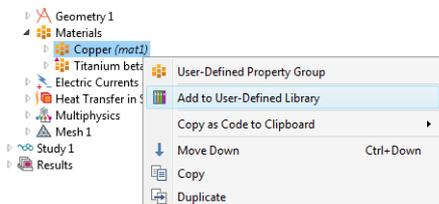


- 3 Найдите раздел Material Contents (Содержимое материала). Теперь в таблице появились строки Bulk modulus (Модуль объемной упругости) и Shear modulus (Модуль поперечной упругости). Предупреждающий значок  показывает, что значения еще не заданы. Чтобы присвоить значения, щелкните столбец Value (Значения). В строке Bulk modulus (Модуль объемной упругости) введите **140e9**, а в строке Shear modulus (Модуль поперечной упругости) укажите **46e9**.

Material Contents					
Property	Name	Value	Unit	Property group	
Bulk modulus	K	140e9	N/m <sup>2</sup>	Bulk modulus and shear mod...	▲
 Shear modulus	G	46e9	N/m <sup>2</sup>	Bulk modulus and shear mod...	
<input checked="" type="checkbox"/> Electrical conductivity	sigma	5.998e7[S/...	S/m	Basic	
<input checked="" type="checkbox"/> Heat capacity at constant pressure	Cp	385[J/(kg*...	J/(kg·K)	Basic	
<input checked="" type="checkbox"/> Relative permittivity	epsilon_r	1	1	Basic	
<input checked="" type="checkbox"/> Density	rho	8700[kg/m...	kg/m <sup>3</sup>	Basic	
<input checked="" type="checkbox"/> Thermal conductivity	k	400[W/(m...	W/(m·K)	Basic	
Relative permeability	mu_r	1	1	Basic	
Coefficient of thermal expansion	alpha	17e-6[1/K]	1/K	Basic	
Young's modulus	E	110e9[Pa]	Pa	Young's modulus and Poisson...	
Poisson's ratio	nu	0.35	1	Young's modulus and Poisson...	
Reference resistivity	rho_0	1.72e-8[Ohm...	Ohm·m	Linearized resistivity	

После добавления этих свойств медь как материал изменит свои характеристики. Вы можете сохранить измененный материал в собственную библиотеку материалов, но не в библиотеку материалов механики твердого тела, так как она предназначена только для чтения.

- 4 В Построителе моделей щелкните правой кнопкой мыши Copper (Медь) и выберите Add to User-Defined Library  (Добавить в пользовательскую библиотеку).



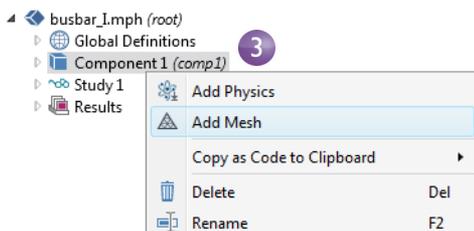
## Добавление сеток

Компонент модели может содержать различные сеточные последовательности для создания сеток с индивидуальными настройками. Эти последовательности доступны на этапах исследования. В каждом исследовании пользователь может указать, какую сетку использовать для данного моделирования.

В модель электрической шины добавлен второй узел сетки, чтобы создать уточненную сетку вокруг болтов и сгиба.

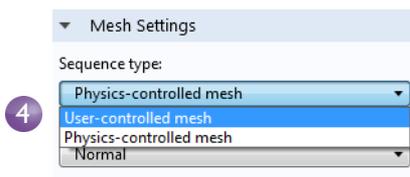
### ДОБАВЛЕНИЕ СЕТКИ

- 1 Откройте созданную ранее модель **busbar.mph**.
- 2 Чтобы сохранить эту модель для дальнейшего использования, выберите File > Save As (Файл > Сохранить как) и назовите ее **busbar\_1.mph**.
- 3 Для добавления второго узла сетки щелкните правой кнопкой мыши узел Component 1 (comp1) (Компонент 1) и выберите Add Mesh (Добавить сетку).



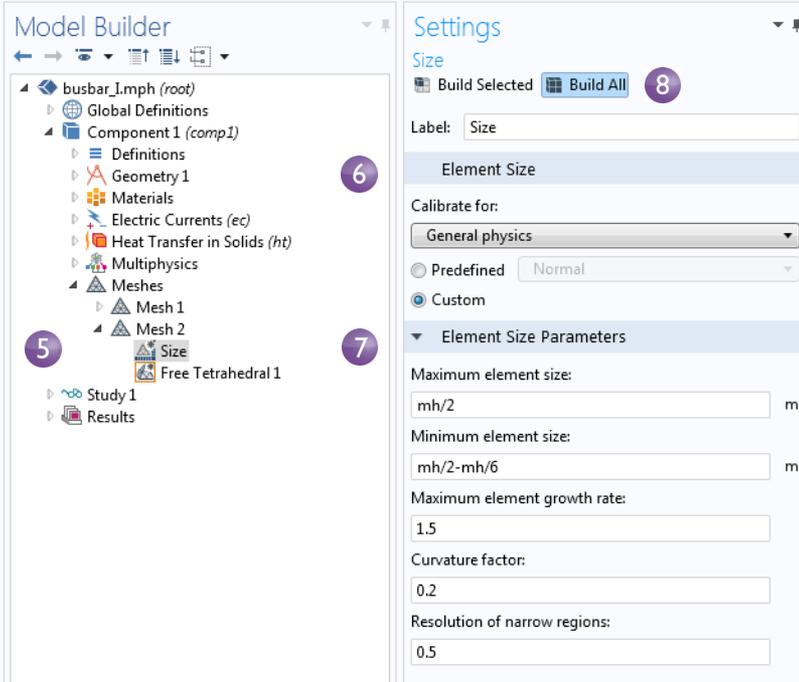
Если вы добавите еще один узел Mesh (Сетка), система создаст родительский узел Meshes (Сетки), в который попадут обе сетки Mesh 1 и Mesh 2.

- 4 Щелкните узел Mesh 2 (Сетка 2). В окне Settings (Настройки) узла Mesh (Сетка) в разделе Mesh Settings (Настройки сетки) выберите сетку User-controlled (Под управлением пользователя) из списка Sequence type (Тип последовательности).



Узлы Size (Размер) и Free Tetrahedral (Свободный тетраэдр) добавлены в Mesh 2 (Сетка 2).

5 В Построителе моделей в Mesh 2 (Сетка 2) щелкните Size  (Размер).



Звездочка в правом верхнем углу узла обозначает, что узел сейчас редактируется.

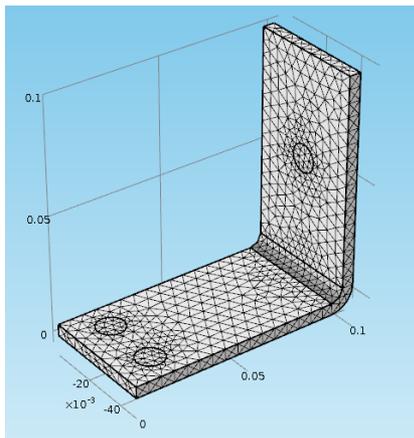
6 В окне Settings (Настройки) узла Size (Размер) в разделе Element Size (Размер элемента) нажмите кнопку Custom (Пользовательский).

7 В блоке Element Size Parameters (Параметры размера элемента) введите:

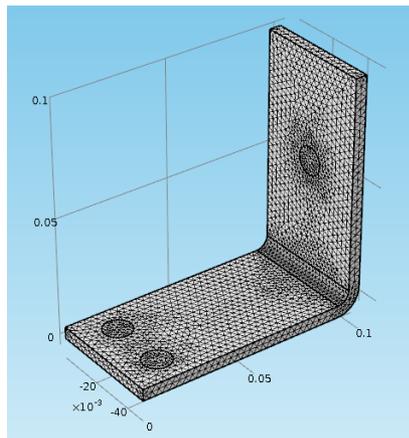
- $mh/2$  в поле Maximum element size (Максимальный размер элемента), где  $mh$  – заданный ранее управляющий параметр сетки, равный 6 мм.
- $mh/2 - mh/6$  в поле Minimum element size (Минимальный размер элемента)
- $0.2$  в поле Curvature factor (Коэффициент кривизны).

8 Нажмите Build All (Построить все) . Сохраните файл **busbar\_1.mph**.

Сравните сетки Mesh 1 и Mesh 2, щелкнув узлы Mesh (Сетка). Сетка в Графическом окне обновлена. Как вариант, вместо использования множества сеток можно выполнить параметрическое исследование максимального размера сетки **mh**, заданного в разделе «Глобальные определения» на стр. 58.



Сетка 1



Сетка 2

## Добавление физик

---

Отличительные черты ПО COMSOL — в частности, адаптируемость и совместимость — особенно хорошо заметны при добавлении физики в существующую модель. В этом разделе вы увидите, с какой легкостью выполняется эта непростая задача. Следуя этим инструкциям, вы сможете добавить механику конструкций и поток текучей среды в модель электрической шины.

## МЕХАНИКА КОНСТРУКЦИЙ

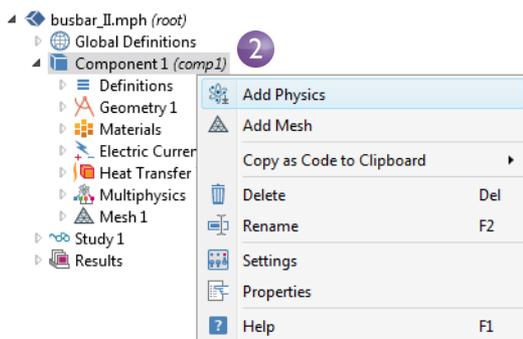
Выполнив моделирование Джоулева нагрева электрической шины, мы узнали, что в ней повышается температура. Возникает вопрос: к каким механическим деформациям приводит тепловое расширение? Чтобы ответить на него, нужно дополнить модель физическими аспектами механики конструкций.

! Для этого нам потребуется модуль Structural Mechanics (Механика конструкций) или модуль MEMS (Микроэлектромеханические системы), которые расширяют базовый интерфейс Solid Mechanics (Механика твердого тела).

Если вы хотите добавить охлаждение потоком текучей среды или если у вас нет модулей Structural Mechanics (Механика конструкций) и MEMS (Микроэлектромеханические системы), изучите этот раздел и перейдите к «Охлаждение потоком текучей среды» на стр. 100.

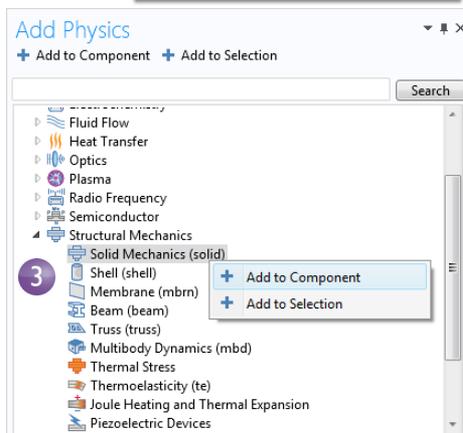
1 Откройте созданную ранее модель **busbar.mph**. В главном меню выберите File > Save As (Файл > Сохранить как) и сохраните модель под именем **busbar\_II.mph**.

2 В Построителе моделей щелкните правой кнопкой мыши узел Component 1 (Компонент 1) и выберите Add Physics (Добавить физику).



3 В окне Add Physics (Добавление физики) в разделе Structural Mechanics (Механика конструкций) выберите Solid Mechanics (Механика твердого тела).

Для добавления этого интерфейса щелкните правой кнопкой мыши и выберите Add to Component (Добавить в компонент) или нажмите кнопку + Add to Component (Добавить в компонент) в верхней части окна.



4 Закройте окно Add Physics (Добавление физики) и сохраните файл.

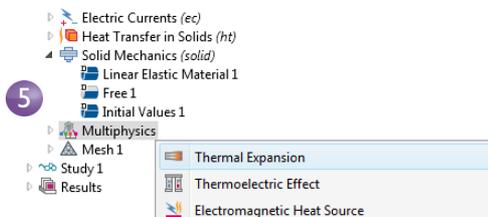
- ⚠ При добавлении дополнительной физики нужно убедиться, что материалы в узле Materials (Материалы) имеют все свойства, необходимые для выбранной физики. В данном примере уже известно, что у меди и титана есть все нужные свойства.

Начнем с того, что добавим эффект теплового расширения в структурный анализ.

5 В Построителе моделей щелкните правой кнопкой мыши узел Multiphysics (Мультифизика) и выберите Thermal Expansion (Тепловое расширение).

Узел Thermal Expansion (Тепловое расширение) добавлен в Построитель моделей.

Можно также использовать ленту и выбрать Multiphysics > Thermal Expansion (Мультифизика > Тепловое расширение) на вкладке Physics (Физика).



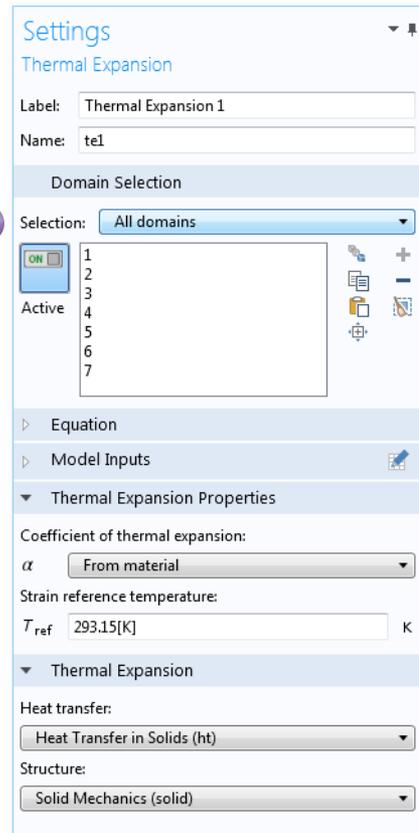
6 В окне Settings (Настройки) блока Thermal Expansion (Тепловое расширение) выберите All domains (Все области) из списка Selection (Выборка). В результате для медных элементов и титановых болтов будет включено тепловое расширение.

В разделе Thermal Expansion Properties (Свойства теплового расширения) этого окна отображается информация о коэффициенте теплового расширения и опорной температуре деформации. Значение коэффициента теплового расширения берется из узла Materials (Материалы). Опорная температура деформации по умолчанию равна 293,15 К (комнатной температуре) и является максимальной температурой, при которой тепловое расширение еще не наблюдается. В разделе Thermal Expansion (Тепловое расширение) в нижней части окна Settings

(Настройки) показано, какие два интерфейса физик определяют физику теплового расширения и механику твердого тела. Это удобно, когда в компоненте модели используется несколько интерфейсов физик для теплопередачи или механики твердого тела. Оставьте без изменений все настройки по умолчанию в этом окне.

Теперь зафиксируем электрическую шину в точках размещения титановых болтов.

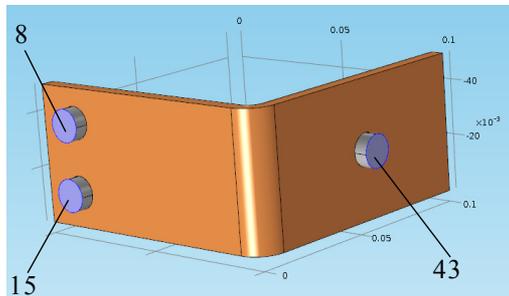
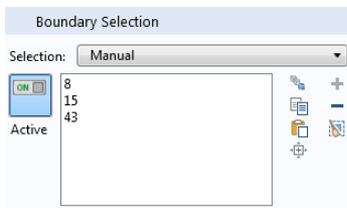
7 В дереве модели щелкните правой кнопкой мыши узел Solid Mechanics (Механика твердого тела) и на уровне границы выберите Fixed Constraint (Фиксированное ограничение). Одноименный узел добавлен в дерево.



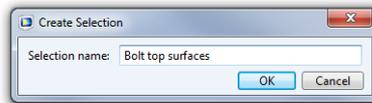
8 Щелкните узел Fixed Constraint (Фиксированное ограничение) . Поверните электрическую шину обратной стороной в Графическом окне. Щелкните круглую поверхность одного из болтов, чтобы добавить ее в список Selection (Выборка).



9 Повторите эту процедуру для остальных болтов для добавления границ 8, 15 и 43.

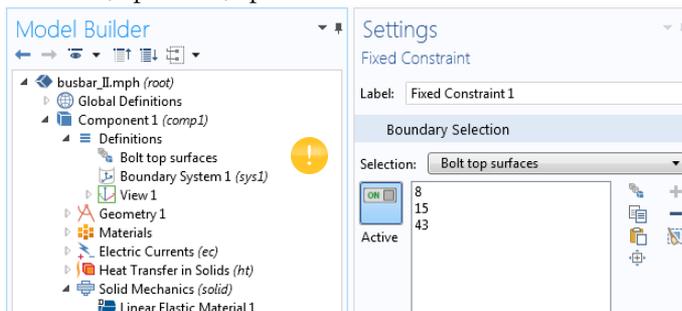


Чтобы облегчить управление большим количеством выборок границ, их можно сгруппировать в пользовательскую выборку.



Когда границы 8, 15 и 43 выбраны, нажмите кнопку Create Selection (Создать выборку)  и назовите ее, например, Bolt top surfaces (Верхние поверхности болтов).

Созданная выборка затем будет добавлена как узел в раздел Component 1 > Definitions (Компонент 1 > Определения) и станет доступна в списке Selection (Выборка) для всех типов граничных условий. Аналогично можно группировать области, границы, грани и точки.

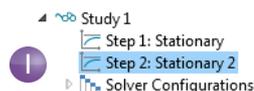


Далее мы обновим исследование так, чтобы оно учитывало добавленную физику.

## РЕШЕНИЕ ДЛЯ ДЖОУЛЕВА НАГРЕВА И ТЕПЛООВОГО РАСШИРЕНИЯ

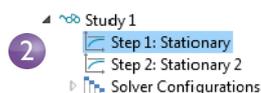
Эффект Джоулева нагрева не зависит от давления и деформации в электрической шине, если предположить, что деформация мала, а давление электрического контакта не учитывается. Это означает, что при моделировании температуру можно использовать как входной параметр для структурного анализа. Другими словами, расширенная мультифизическая задача является слабо связанной. Соответственно, для экономии времени ее можно решить, разбив на два шага: сначала Джоулева нагрева, а затем — структурный анализ.

- 1 В Построителе моделей щелкните правой кнопкой мыши Study 1 (Исследование 1) и выберите Study Steps > Stationary > Stationary (Шаги исследования > Стационарные > Стационарные), чтобы добавить второй шаг исследования.



При добавлении шагов исследования следует вручную подключать нужную физику к соответствующему шагу. Для начала необходимо отключить структурный анализ, добавленный на первом этапе.

- 2 В разделе Study 1 (Исследование 1) щелкните узел Step 1: Stationary (Шаг 1: Стационарный).
- 3 В окне Settings (Настройки) узла Stationary (Стационарный) найдите Physics and Variables Selection (Выбор физики и переменных).



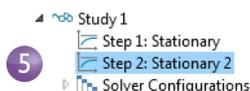
- 4 В строке Solid Mechanics (solid) (Механика твердого тела (твердое)) в разделе Solve for (Решить для) переключите флажок  на , чтобы исключить из шага 1 механику твердого тела.

4

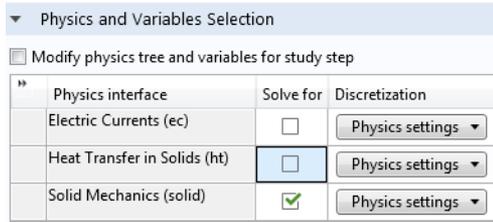
Physics and Variables Selection			
<input type="checkbox"/> Modify physics tree and variables for study step			
	Physics interface	Solve for	Discretization
	Electric Currents (ec)	<input checked="" type="checkbox"/>	Physics settings ▾
	Heat Transfer in Solids (ht)	<input checked="" type="checkbox"/>	Physics settings ▾
	Solid Mechanics (solid)	<input type="checkbox"/>	Physics settings ▾

Повторите эти действия для удаления электрических токов (ec) и теплопередачи в твердых телах (ht) из второго шага исследования.

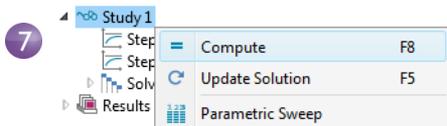
- 5 В разделе Study 1 (Исследование 2) щелкните Step 1: Stationary 2 (Шаг 2: Стационарное).



6 В разделе Physics and Variables Selection (Выбор физики и переменных) в строках Electric Currents (ec) и Heat Transfer in Solids (ht) переключите флажок  на  чтобы исключить из второго шага Джоулев нагрев.



7 Щелкните правой кнопкой мыши узел Study 1 (Исследование 1) ∞ и выберите Compute = (Вычислить), или нажмите F8, или нажмите кнопку Compute (Вычислить) на ленте, чтобы запустить решение.

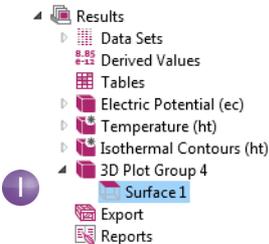


Сохраните файл **busbar\_II.mph**, в котором теперь содержится интерфейс Solid Mechanics (Механика твердого тела) и дополнительный шаг исследования.

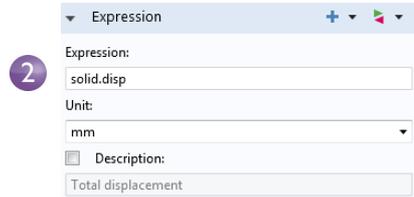
## ИТОГОВАЯ ДЕФОРМАЦИЯ

Теперь добавьте график смещения.

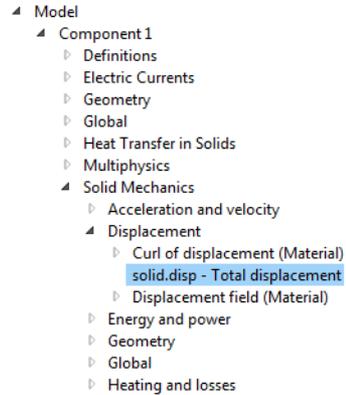
1 В разделе Results > 3D Plot Group 4 (Результаты > Группа 3D-графиков 4) щелкните узел Surface 1 (Поверхность 1) 📄.



- 2 В окне Settings (Настройки) узла Surface (Поверхность) в разделе Expression (Выражение) нажмите кнопку Replace Expression (Заменить выражение) .



В контекстном меню выберите Model > Component 1 > Solid Mechanics > Displacement > solid.disp — Total displacement (Модель > Компонент 1 > Механика твердого тела > Смещение > solid.disp - Общее смещение).



Также можно напрямую ввести **solid.disp** в поле Expression (Выражение).

Теперь зададим более удобную единицу измерения. В окне Settings (Настройки) раздела Expression (Выражение), в списке Unit (Единица измерения) выберите **mm** (или введите **mm** в этом поле).

- 3 Щелкните Range (Диапазон), чтобы раскрыть этот раздел. Сбросьте флажок Manual color range (Ручной диапазон цветов).

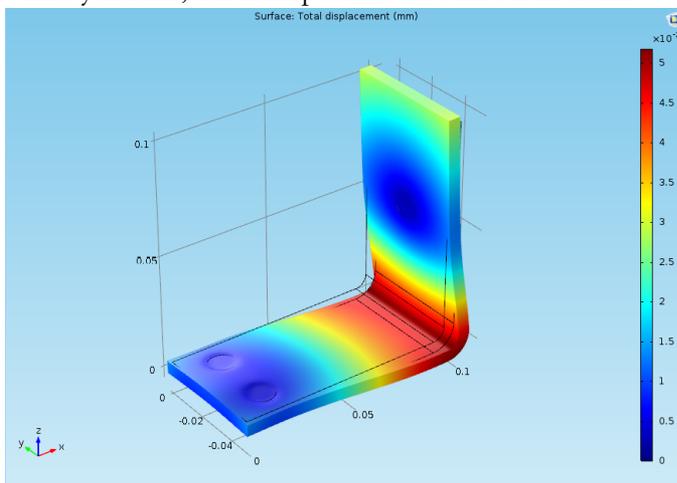


На графике поверхности COMSOL отображает локальное смещение, вызванное тепловым расширением. Далее добавим сведения о деформации электрической шины.

- 4 В Построителе моделей в разделе Results > 3D Plot Group 4 (Результаты > Группа 3D-графиков 4) щелкните правой кнопкой мыши узел Surface 1 (Поверхность 1)  и добавьте узел Deformation (Деформация) . График в Графическом окне автоматически обновляется. Нажмите кнопку Go to Default 3D View (Перейти к трехмерному виду по умолчанию) , чтобы привести график к виду, изображенному на иллюстрации ниже.



Деформации, показанные на иллюстрации, для наглядности значительно усилены, так как в реальности они очень малы.



5 Сохраните файл **busbar\_II.mph**, в котором теперь содержится график поверхности с деформацией.



Для оценки целостности электрической шины и болтов можно также построить график напряжения по Мизесу и основного напряжения.

## ОХЛАЖДЕНИЕ ПОТОКОМ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ

После анализа тепловыделения электрической шины и возможного теплового расширения вам может потребоваться рассмотреть варианты охлаждения шины путем подачи воздушного потока на ее поверхности. Для этого не требуются какие-либо дополнительные модули, так как модель включает в себя только Джоулев нагрев без анализа теплового расширения.

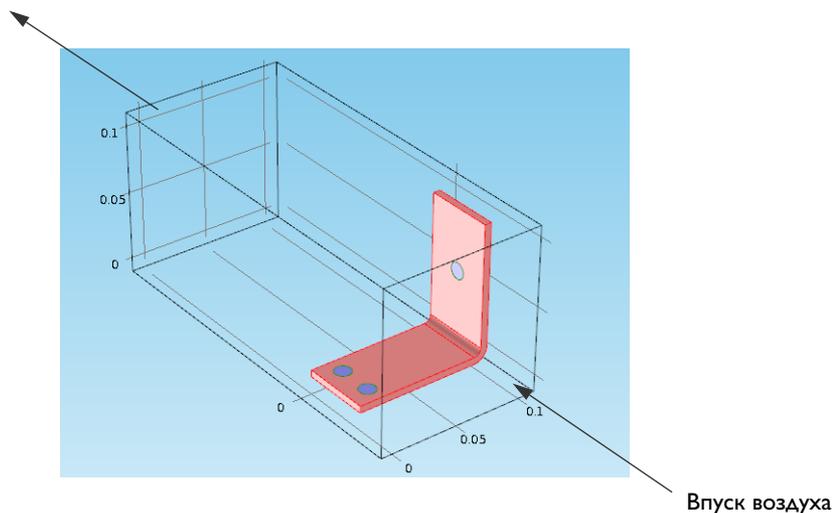


Если у вас установлен модуль CFD (Вычислительная гидродинамика), вы можете воспользоваться мультифизическим интерфейсом Non-Isothermal Flow (Неизотермический поток). Если у вас установлен модуль Heat Transfer (Теплопередача), вы можете воспользоваться мультифизическим интерфейсом Conjugate Heat Transfer (Сопряженная теплопередача). Каждый из этих двух интерфейсов автоматически определяет связанную теплопередачу в твердых телах и текучих средах, в том числе ламинарные и турбулентные потоки, а в этом примере все делается вручную и с ограниченной функциональностью.

При добавлении потока текучей среды в модель Джоулева нагрева формируется новая мультифизическая связь. Для моделирования области потока нужно создать воздушную область вокруг электрической шины. Это можно сделать вручную, изменив геометрию первой модели или открыв файл из библиотеки приложений. В данном случае откройте файл с уже созданной воздушной областью.

После загрузки геометрии вы научитесь моделировать воздушный поток, как показано на иллюстрации:

Выпуск воздуха



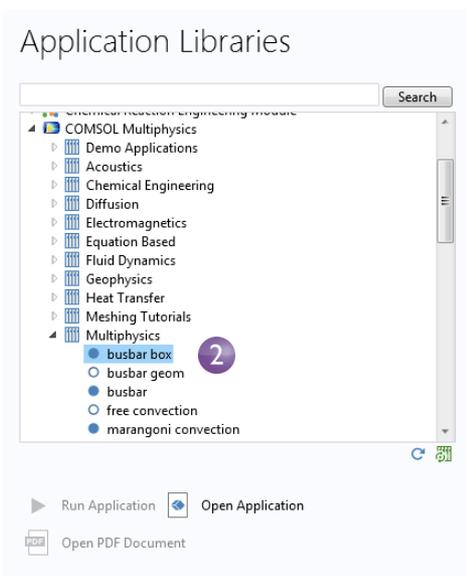
## НАСТРОЙКА СКОРОСТИ ВПУСКА

Сначала загрузите геометрию и добавьте параметр, задающий скорость впуска воздуха.

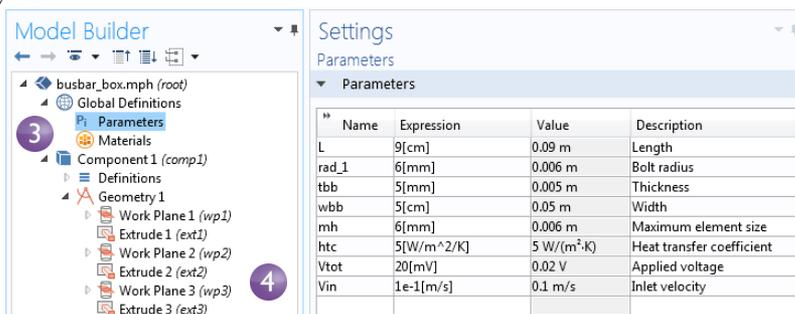
- 1 Если вы только что перезапустили программу, нажмите кнопку Cancel (Отмена)  в новом окне, которое появляется автоматически.
- 2 Щелкните вкладку Home (Главная) и в меню Windows (Окна) выберите Application Libraries (Библиотеки приложений) . Перейдите в раздел

COMSOL Multiphysics > Multiphysics > busbar box (COMSOL Multiphysics > Мультифизика > область электрической шины).

Откройте двойным щелчком файл, который содержит геометрию и дополнительные этапы физического моделирования, добавленные в разделе «Настройка материалов» на стр. 88.



- 3 В разделе Global Definitions (Глобальные определения) щелкните узел Parameters (Параметры)  $P_1$ .
- 4 В окне Settings (Настройки) раздела Parameters (Параметры) щелкните пустую строку сразу под строкой  $V_{tot}$ . В столбце Name (Имя) введите  $V_{in}$ . Введите  $1e-1$  [m/s] в столбце Expression (Выражение) и произвольное описание в столбце Description (Описание) — например, «Скорость пуска».

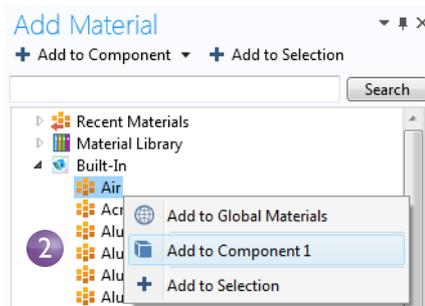


- 5 Выберите File > Save As (Файл > Сохранить как) и сохраните модель под новым именем **busbar\_box\_I.mph**.

## ДОБАВЛЕНИЕ ВОЗДУХА

Теперь нужно задать свойства материала для воздуха.

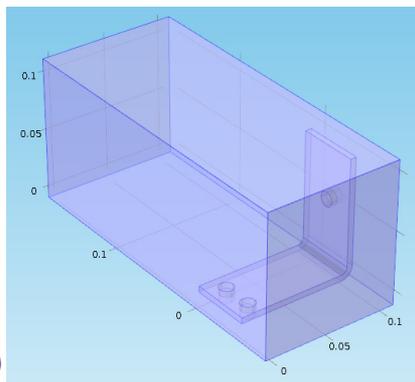
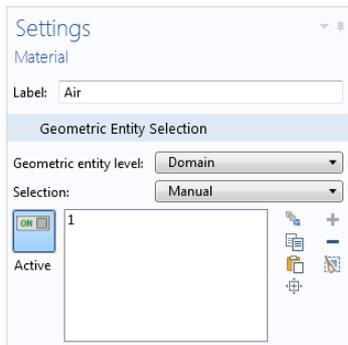
- 1 На вкладке Home (Главная) выберите Add Material (Добавить материал)  или щелкните правой кнопкой мыши узел Materials (Материалы) и выберите Add Material (Добавить материал).
- 2 В окне Add Material (Добавление материала) раскройте узел Built-In (Встроенные). Щелкните правой кнопкой мыши Air (Воздух) и выберите Add to Component 1 (Добавить в Компонент 1). Закройте окно Add Materials (Добавление материалов).
- 3 В Построителе моделей в разделе Materials (Материалы) щелкните узел Air (Воздух) .



- Materials
  - Copper (mat1)
  - Titanium beta-21S (mat2)
  - Air (mat3)**

- 4 На панели инструментов Графического окна нажмите кнопку Zoom Extents (Масштаб сцены) .

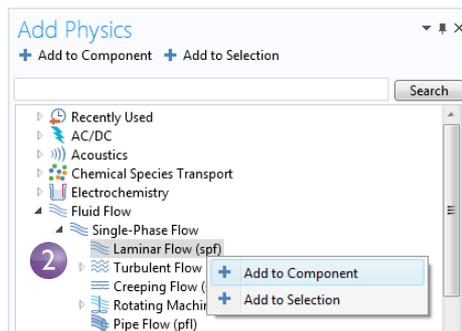
- 5 В Графическом окне щелкните воздушную область Domain 1 (Область 1), чтобы добавить ее в список Selection (Выборка), который подсветится синим цветом. На этом этапе свойства материала для воздуха присваиваются воздушной области.



## ДОБАВЛЕНИЕ ПОТОКА ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ

Теперь добавьте физику потока текучей среды.

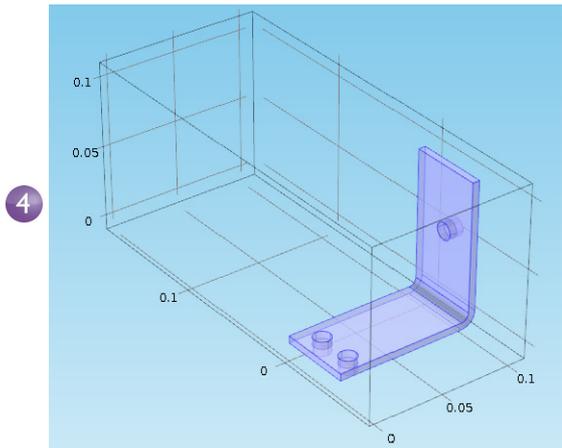
- 1 В дереве модели щелкните правой кнопкой мыши Component 1 (Компонент 1) и выберите Add Physics (Добавить физику).
- 2 В окне Add Physics (Добавить физику) в разделе Fluid Flow > Single-Phase Flow (Поток текучей среды > Однофазный поток) щелкните правой кнопкой мыши Laminar Flow (Ламинарный поток) и выберите + Add to Component (Добавить в компонент). В Построителе моделей в разделе Component 1 (Компонент 1) появится элемент Laminar Flow (Ламинарный поток). Закройте окно Add Physics (Добавление физики).



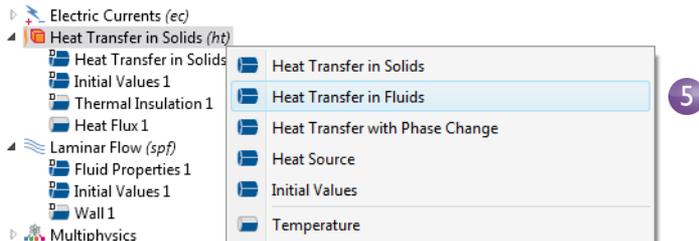
- 3 На панели инструментов Graphics (Графика) нажмите кнопку Transparency (Прозрачность) . Также нажмите кнопку Wireframe Rendering (Каркасное построение) . Эти две настройки облегчают просмотр содержимого области. Вы можете включать и выключать эти опции во время моделирования, чтобы подобрать оптимальный режим отображения.

После того, как вы добавили поток текучей среды в модель, нужно удалить воздушную область Domain 1 (Область 1) из интерфейса Electric Currents (ec) (Электрические токи), так как мы предполагаем, что электропроводность воздуха равна нулю и токов в нем нет. Затем необходимо связать теплопередающую часть мультифизического интерфейса Joule heating (Джоулев нагрев) с потоком текучей среды.

- 4 В Построителе моделей выберите узел Electric Currents (ec) (Электрические токи) . В Графическом окне наведите указатель мыши на воздушную область и щелкните ее, чтобы удалить из списка выборки. На данном этапе должна быть выделена и подсвечена синим цветом только электрическая шина.



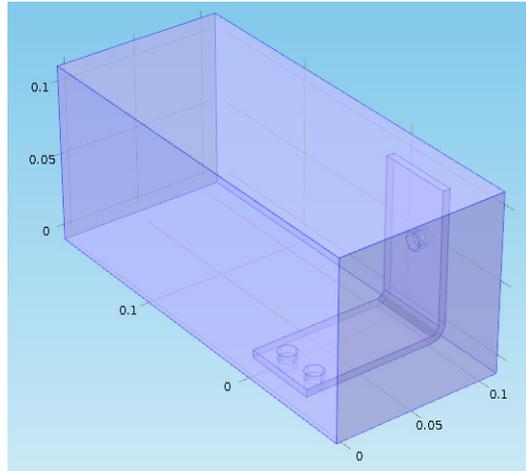
- 5 В Построителе моделей щелкните правой кнопкой мыши Heat Transfer in Solids (Теплопередача в твердых телах) . В первом разделе контекстного меню — уровне области  — выберите Heat Transfer in Fluids (Теплопередача в текучих средах).



6 В Графическом окне щелкните воздушную область Domain 1 (Область 1), чтобы добавить ее в список Selection (Выборка).

Теперь свяжите поток текучей среды и теплопередачу.

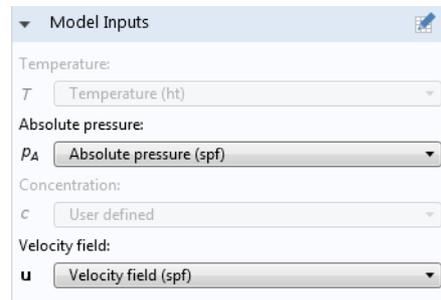
6



7 В окне Settings (Настройки) блока Heat Transfer in Fluids (Теплопередача в текучих средах) в разделе Model Inputs (Вводные данные модели) выберите Velocity field (spf) из списка Velocity field (Поле скорости). Затем выберите Absolute pressure (spf) (Абсолютное давление) из списка Absolute pressure (Абсолютное давление).

7

7

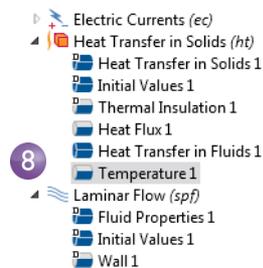


Таким образом поле потока и давление берутся из интерфейса Laminar Flow (Ламинарный поток) связываются с теплопередачей.

Теперь задайте граничные условия, указав впуск и выпуск для теплопередачи в области текучей среды.

8 В Построителе моделей щелкните правой кнопкой мыши Heat Transfer in Solids (Теплопередача в твердых телах) . Во втором разделе контекстного меню — разделе границы  — выберите Temperature (Температура).

Узел Temperature (Температура) добавлен в Построитель моделей.



9 В Графическом окне щелкните границу впуска Boundary 2 (Граница 2), чтобы добавить ее в список Selection (Выборка).

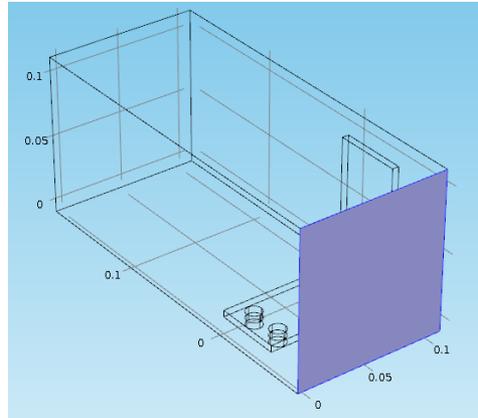
Температуре впуска будет присвоено значение по умолчанию: 293,15 К.

Окно графики должно выглядеть примерно так, как на иллюстрации справа (возможны небольшие отличия

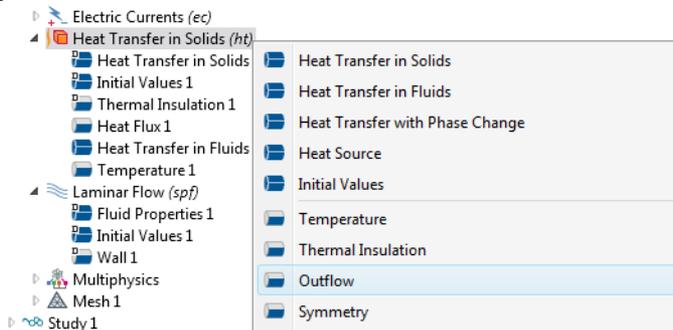
в зависимости от того,

включены ли прозрачность и каркасное построение). Теперь нужно задать выпуск.

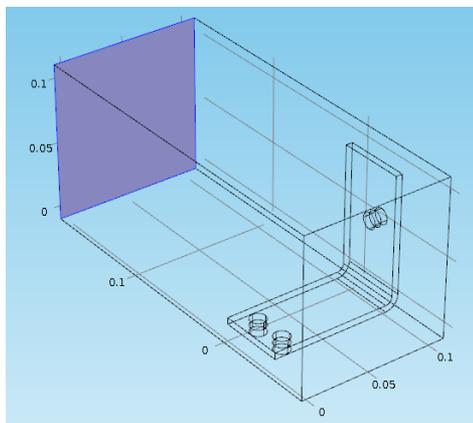
9



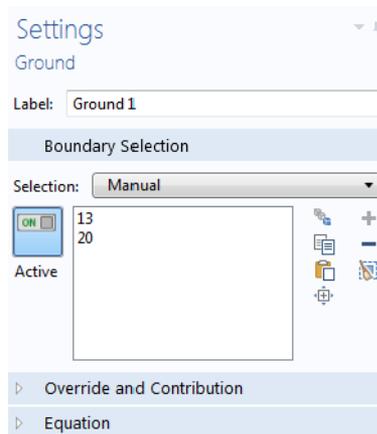
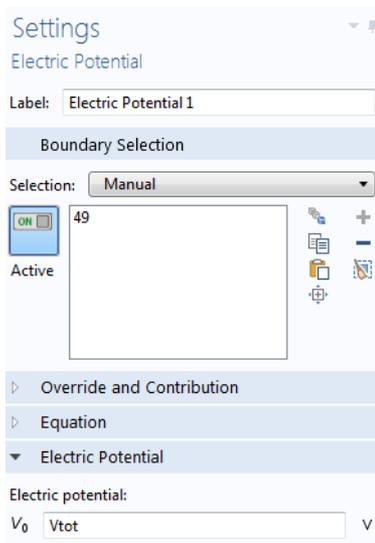
10 В Построителе моделей щелкните правой кнопкой мыши Heat Transfer in Solids (Теплопередача в твердых телах) . На уровне границы выберите Outflow (Выходной поток). Узел Outflow (Выходной поток)  добавлен в Построитель моделей.



11 В Графическом окне щелкните границу выпуска Boundary 5 (Граница 5), чтобы добавить ее в список Selection (Выборка). Чтобы подсветить границу перед тем, как выбрать ее, прокручивайте вниз колесиком мыши или нажимайте стрелки вверх и вниз на клавиатуре.

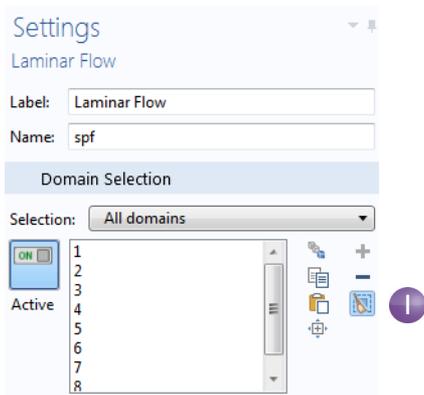


⚠ В настройках электрической шины и болтов, а также в границах Electric Potential 1 (Электрическое напряжение 1) и Ground 1 (Заземление 1) сохраняется правильная выборка несмотря на добавление геометрии для воздушной области. Для проверки щелкните узлы Electric Potential 1 (Электрическое напряжение 1) и Ground 1 (Заземление 1) в разделе Electric Currents (Электрические токи) Построителя моделей и убедитесь, что границы в них выбраны корректно.



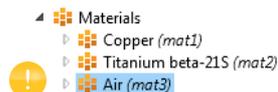
Теперь настроим поток. Обозначим, что поток текучей среды занимает только часть ее области, а затем зададим условия впуска, выпуска и симметрии.

- 1 В дереве модели щелкните узел Laminar Flow (Ламинарный поток) . В окне Settings (Настройки) раздела Laminar Flow (Ламинарный поток) нажмите кнопку Clear Selection (Очистить выборку) .



- 2 В Графическом окне щелкните воздушную область Domain 1 (Область 1), чтобы добавить ее в список Selection (Выборка).

-  Желательно также проверить, что материал Air (Воздух) в узле Materials (Материалы) имеет все свойства, которые нужны подключенным мультифизическим интерфейсам.

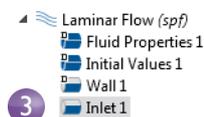


В дереве модели в разделе Materials (Материалы) щелкните Air (Воздух). В окне Settings (Настройки) блока Material (Материал) в разделе Material Contents (Содержимое материала) проверьте, нет ли пропущенных свойств с предупреждающим знаком .

Дополнительную информацию см. в разделе «Материалы» на стр. 62.

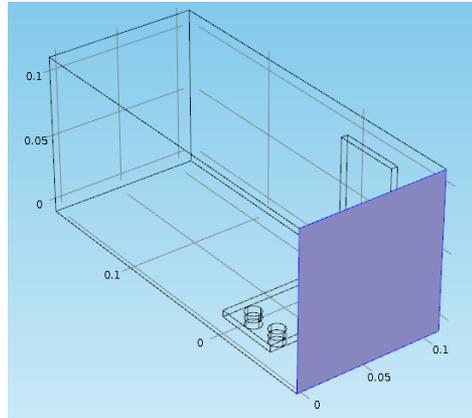
Переходим к настройке границ.

- 3 В Построителе моделей щелкните правой кнопкой мыши Laminar Flow  (Ламинарный поток) и на уровне границы выберите Inlet (Впуск). Узел Inlet (Впуск)  добавлен в Построитель моделей.



4 В Графическом окне щелкните впуск Boundary 2 (Граница 2), чтобы добавить его в список Selection (Выборка).

4



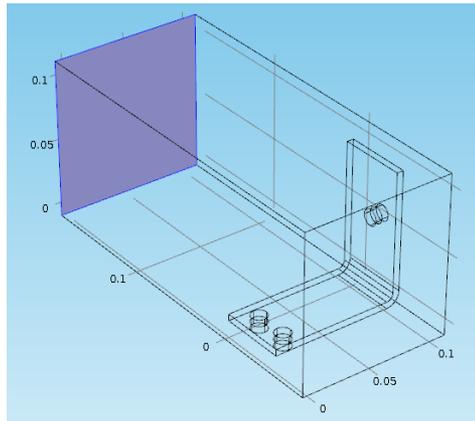
5 В окне Settings (Настройки) блока Inlet (Впуск) в разделе Velocity (Скорость) в поле  $U_0$  введите **vin** в качестве Normal inflow velocity (Нормальной скорости входного потока).

5



6 Щелкните правой кнопкой мыши Laminar Flow (Ламинарный поток) и на уровне границы выберите Outlet (Выпуск). В Графическом окне щелкните границу выпуска Boundary 5 (Граница 5), чтобы добавить ее в список Selection (Выборка). Чтобы подсветить границу перед тем, как выбрать ее, прокручивайте вниз колесиком мыши или нажимайте стрелки на клавиатуре.

6

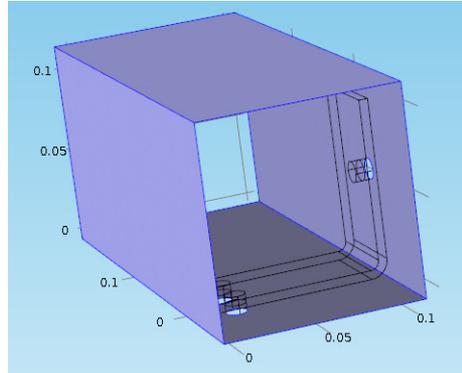


И наконец, осталось добавить границы симметрии. Предположим, что поток около внешних поверхностей каналов аналогичен потоку около их внутренних поверхностей. Это допущение можно сформулировать в виде условия симметрии.

- 7 Щелкните правой кнопкой мыши Laminar Flow (Ламинарный поток)  и выберите Symmetry (Симметрия). Узел Symmetry (Симметрия)  добавлен в последовательность.
- 8 В Графическом окне щелкните каждую синюю поверхность, как показано на иллюстрации ниже (Границы **1**, **3**, **4** и **4B**), чтобы добавить их в список Selection (Выборка). Чтобы выделить все поверхности, вам может потребоваться использовать колесико мыши или поворот геометрии.

Сохраните файл

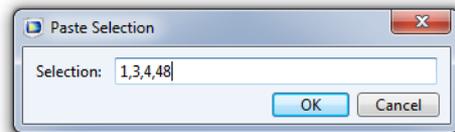
**busbar\_box\_1.mph**, в котором теперь содержится материал Air (Воздух) и настройки для интерфейса Laminar Flow (Ламинарный поток).



8



Если границы заранее известны, можно нажать кнопку Paste Selection (Вставка выборки)  и сразу ввести информацию. В данном примере введите **1, 3, 4, 4B** в окне Paste Selection (Вставка выборки). После нажатия кнопки ОК границы автоматически добавятся в список Selection (Выборка).



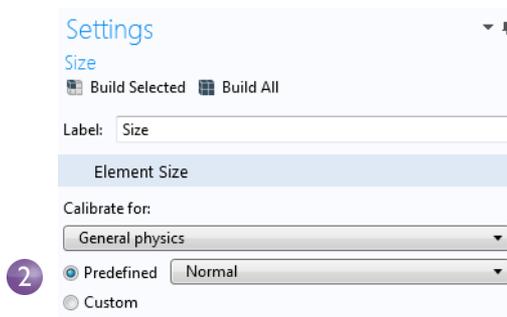
## УКРУПНЕНИЕ СЕТКИ

Чтобы быстро получить решение, мы немного укрупним сетку, снизив ее детализацию. Текущие настройки сетки могут замедлить процесс вычисления, но при необходимости вы всегда сможете восстановить их.

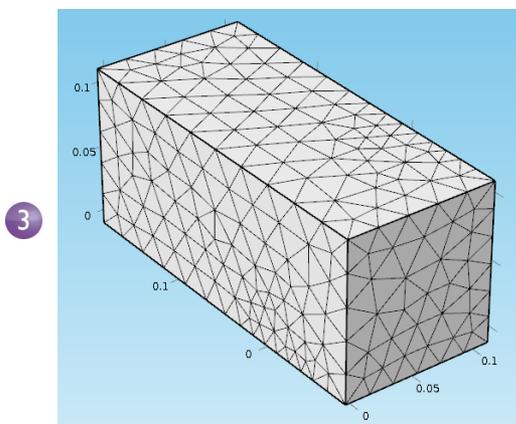
- 1 В Построителе моделей раскройте узел Mesh 1 (Сетка 1)  и щелкните узел Size (Размер) .



- 2 В окне Settings (Настройки) блока Size (Размер) в разделе Element Size (Размер элемента) нажмите кнопку Predefined (Предустановленные) и проверьте, выбран ли вариант Normal (Нормальный).



- 3 Нажмите кнопку Build All (Построить все) . Геометрия отображается вместе с сеткой в Графическом окне; чтобы изображение выглядело, как на иллюстрации ниже, выключите прозрачность.



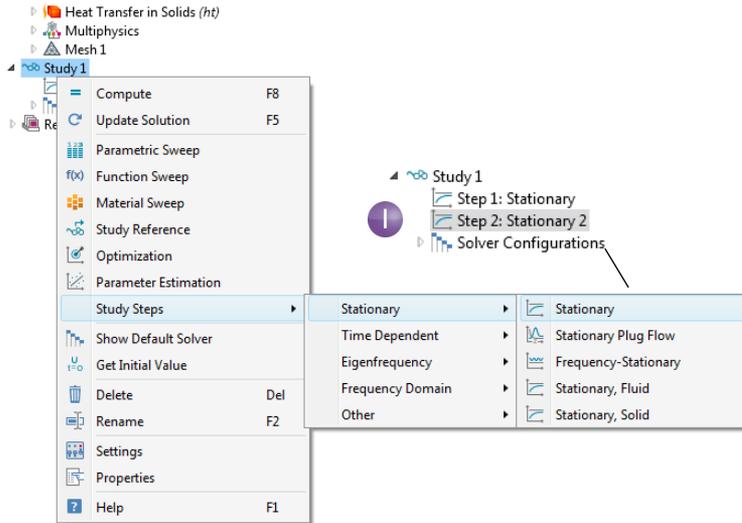
Предположим, что скорость потока достаточно велика для того, чтобы пренебречь повышением температуры в поле потока.

Тогда задачу можно сначала решить для потока текучей среды, а затем на основе полученных результатов решить ее для температуры. Для этого воспользуемся последовательностью исследования.

### РЕШЕНИЕ ДЛЯ ПОТОКА ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ И ДЖОУЛЕВА НАГРЕВА

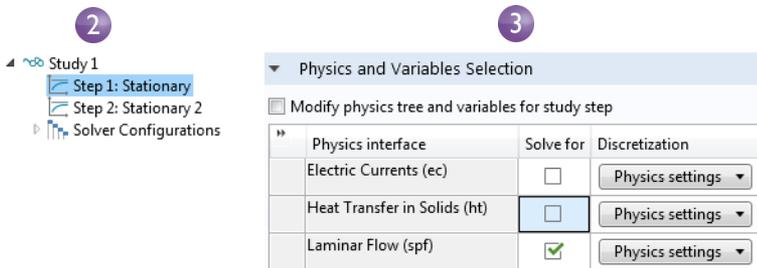
Если поток текучей среды решается до поля температур, то мы получаем слабо связанную мультифизическую задачу. Последовательность исследования, описанная в этом разделе, автоматически решает подобные слабые связи.

- 1 В дереве модели щелкните правой кнопкой мыши Study 1 (Исследование 1) и выберите Study Steps > Stationary > Stationary (Шаги исследования > Стационарные > Стационарные), чтобы добавить второй шаг исследования в Построитель моделей.



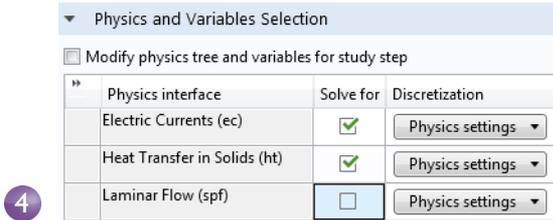
Далее следует подключить нужную физику к соответствующему шагу исследования. Сначала отключите интерфейсы Electric Currents (ec) (Электрические токи) и Heat Transfer in Solids (ht) (Теплопередача в твердых телах), связанные с Джоулевым нагревом из первого этапа.

- 2 В разделе Study 1 (Исследование 1) щелкните Step 1: Stationary (Шаг 1: Стационарное).

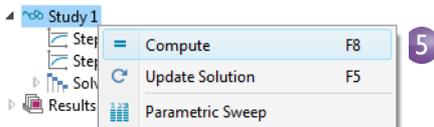


- 3 В окне Settings (Настройки) узла Stationary (Стационарное) найдите раздел Physics and Variables Selection (Выбор физики и переменных). В строках Electric Currents (ec) (Электрические токи) и Heat Transfer in Solids (ht) (Теплопередача в твердых телах) переключите флажок  на  в столбце Solve for (Решить для), удалив Joule heating (Джоулев нагрев) из Step 1 (Шаг 1).

- 4 Повторите это действие. В разделе Study 1 (Исследование 1) щелкните узел Step 2: Stationary 2 (Шаг 2: Стационарное). В разделе Physics and Variables Selection (Выбор физики и переменных) в строке Laminar Flow (spf) (Ламинарный поток) щелкните в столбце Solve for (Решить для), чтобы переключить флажок  на .



- 5 Щелкните правой кнопкой мыши узел Study 1 (Исследование 1) и выберите Compute (Вычислить), = или нажмите F8, или нажмите кнопку Compute (Вычислить) на ленте. В результате система автоматически создаст последовательность решателя, которая сначала вычислит ламинарный поток, а затем Джоулев нагрев.



- 6 Когда решение будет готово, выберите график Temperature (ht) (Температура) в узле Results (Результаты) Построителя моделей. Если прозрачность еще не включена, нажмите кнопку Transparency (Прозрачность)  на панели инструментов Graphics (Графика), чтобы визуализировать поле температур внутри области. Чтобы приблизить диаграмму, щелкните среднюю кнопку мыши и потяните указатель, не отпуская кнопку (или колесико).

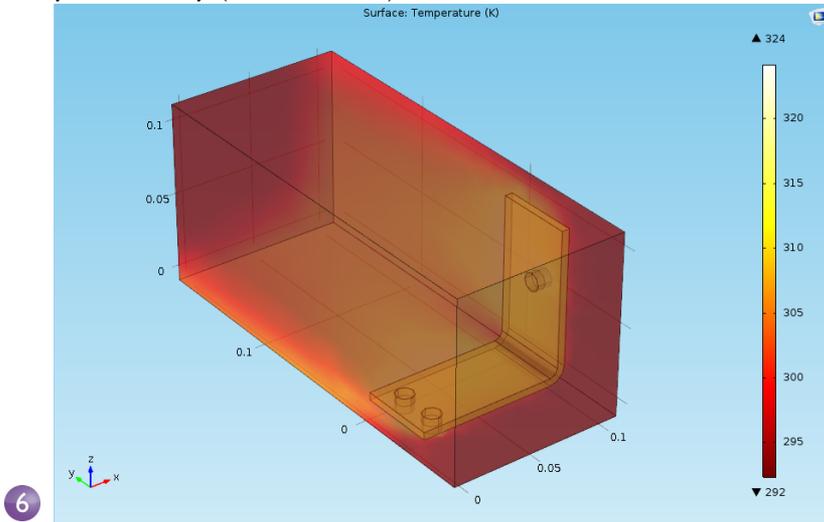


График поверхности Temperature (Температура) в Графическом окне показывает температуру в электрической шине и окружающей области. Как видим, поле температур недостаточно гладкое из-за относительно крупной сетки. Чтобы получить более точное и гладкое решение, лучше всего уточнить сетку.

- 7 Сохраните файл **busbar\_box\_1.mph** на этом месте, чтобы при необходимости использовать его в будущем. Далее мы будем работать с исходным файлом **busbar.mph**.

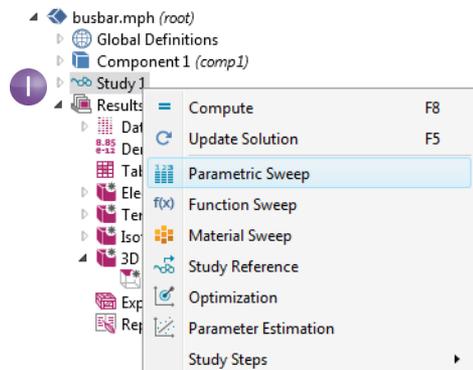
## Параметрическое исследование

### ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ПАРАМЕТРА

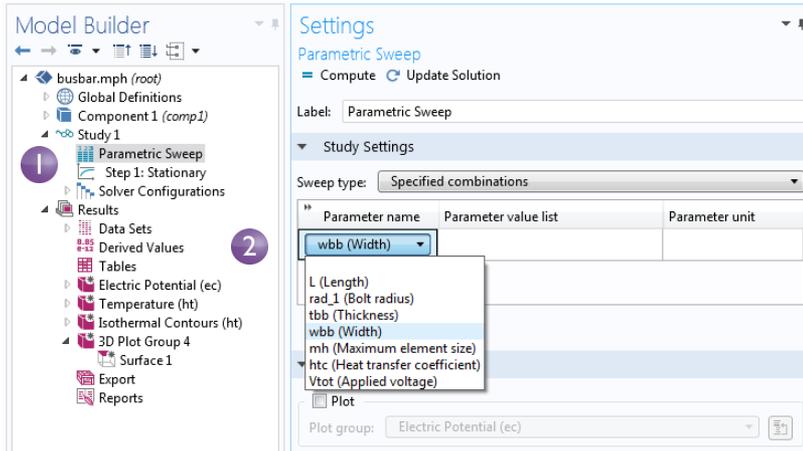
Во многих случаях удобно создать несколько вариантов конструкции, чтобы уложиться в определенные ограничения. В предыдущем примере с электрической шиной основной задачей было снижение или рабочей температуры, или плотности тока. Проиллюстрируем первый вариант. Так как плотность тока зависит от геометрии электрической шины, то, регулируя ширину **wbb**, можно изменять плотность тока и, как следствие, частично влиять на рабочую температуру. Выполним параметрическое исследование параметра **wbb**, чтобы изучить возникающие изменения.

### ДОБАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

- 1 В меню File (Файл) откройте файл модели **busbar.mph**. Если вы не сохранили модель, откройте ее из Библиотеки приложений: File > Application Libraries > COMSOL Multiphysics > Multiphysics > busbar (Файл > Библиотеки приложений > COMSOL Multiphysics > Мультифизика > электрическая шина). В Построителе моделей щелкните правой кнопкой мыши Study 1 (Исследование 1) и выберите Parametric Sweep (Параметрическое исследование) . Узел Parametric Sweep (Параметрическое исследование) добавлен в последовательность Построителя моделей.



- 2 В окне Settings (Настройки) блока Parametric Sweep (Параметрическое исследование) под пустой таблицей параметров нажмите кнопку Add (Добавить) +. В списке Parameter names (Имена параметров) таблицы выберите **wbb**.

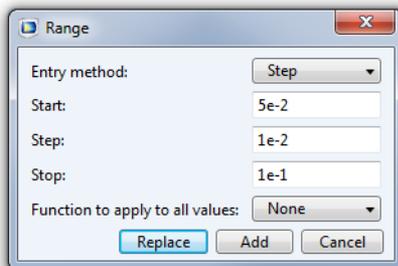


- ⚠ Тип Sweep (Параметрический анализ), который отображается над именами параметров, служит для управления параметрическим исследованием с множеством параметров. Доступны два варианта анализа: All combinations (По всем сочетаниям) и Specified combinations (По указанным сочетаниям).

3 Введите диапазон значений параметра, чтобы исследовать значения ширины электрической шины в диапазоне от 5 до 10 см с шагом в 1 см. Эту информацию можно ввести разными способами:

- Скопируйте или введите **range (0.05, 0.01, 0.1)** в поле Parameter value list (Список значений параметра).

- Нажмите кнопку Range (Диапазон)  и введите значения в диалоговом окне Range (Диапазон). В поле Start (Начальное) введите **5e-2**. В поле Step (Шаг) введите **1e-2**, а в поле Stop (Конечное) укажите **1e-1**. Нажмите Replace (Заменить).



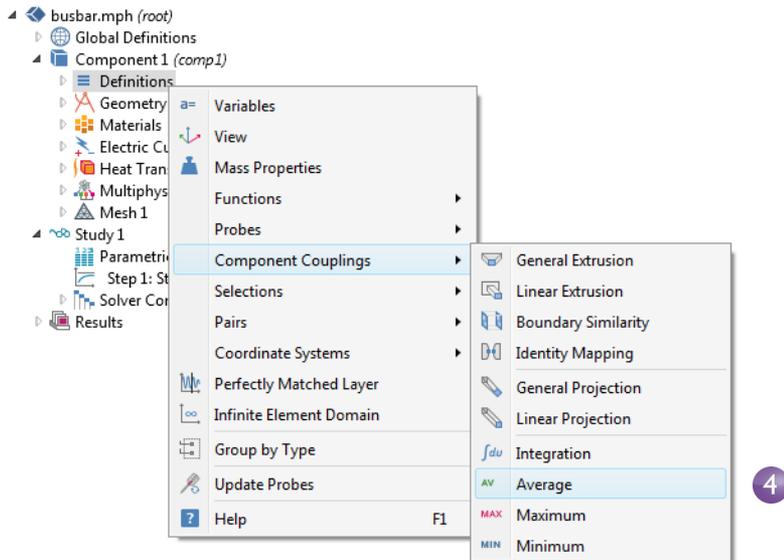
- При любом из этих способов можно переопределить размерность с единиц системы СИ по умолчанию на пользовательские единицы.

Вместо 5e-2 можно ввести 5[cm], аналогично и 1[cm] вместо 1e-2 и 10[cm] вместо

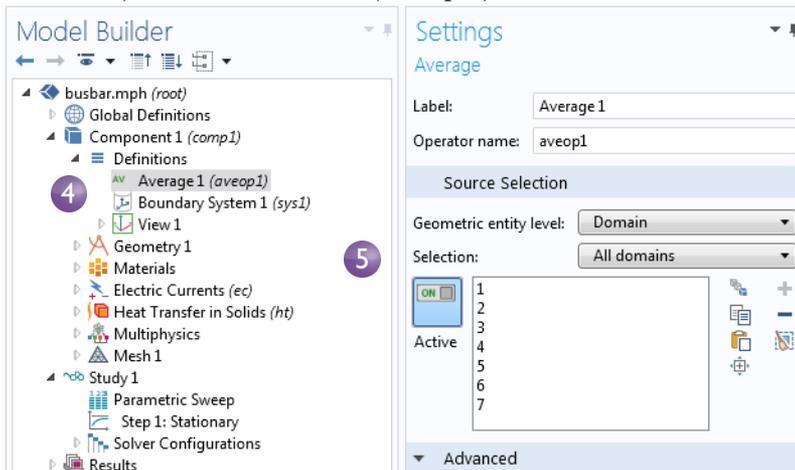
1e-1. Кроме того, в окне Settings (Настройки) корневого узла дерева модели можно изменить систему единиц по умолчанию.

Далее задайте связь компонента Average (Среднее), которая понадобится позднее для расчета средней температуры в электрической шине.

- 4 В разделе Component 1 (Компонент 1) щелкните правой кнопкой мыши Definitions ≡ (Определения) и выберите Component Couplings > Average (Связи компонента > Среднее).



- 5 В окне Settings (Настройки) блока Average (Среднее) выберите All domains (Все области) из списка Selection (Выборка).



В результате будет создан оператор **aveop1**. Теперь этот оператор может вычислять среднее значение любой величины в выбранных областях. Чуть ниже мы воспользуемся им для расчета средней температуры, но его также

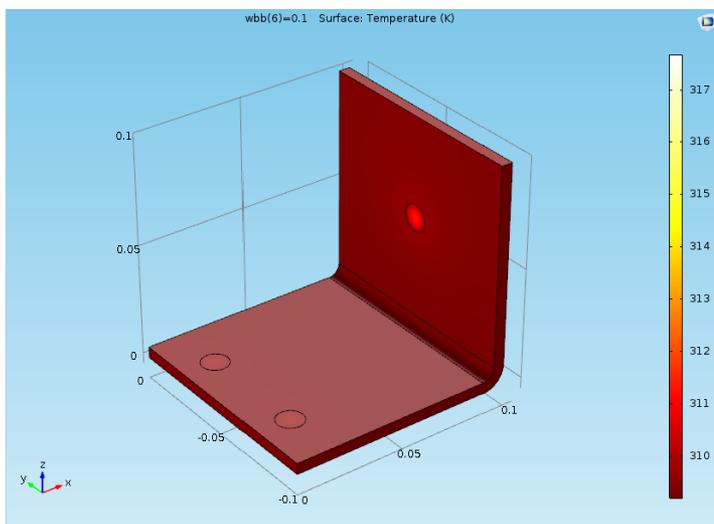
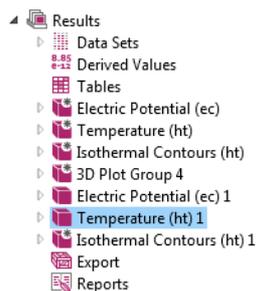
можно применять для вычисления среднего электрического напряжения, плотности тока и так далее.

- 6 Выберите File > Save As (Файл > Сохранить как) и сохраните модель под новым именем **busbar\_III.mph**.
- 7 Для запуска анализа щелкните правой кнопкой мыши Study 1 (Исследование 1) и выберите Compute (Вычислить) или нажмите кнопку Compute (Вычислить) на вкладке Home (Главная). =

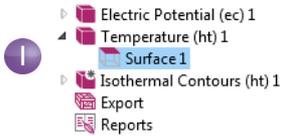
## РЕЗУЛЬТАТЫ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Щелкните узел Temperature (ht) 1 (Температура 1) в разделе Results (Результаты) Построителя моделей.

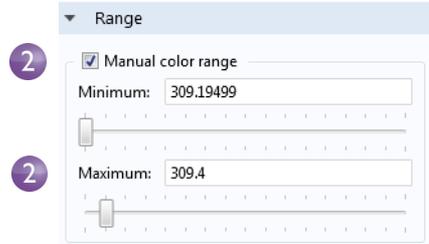
График в Графическом окне показывает температуру в более широкой электрической шине для последнего значения параметра **wbb=0.1 [m]** (**10 [cm]**). Чтобы увидеть весь график, выберите Zoom Extents (Масштаб сцены)  на панели инструментов Графического окна. Так как график получился практически одноцветным, нужно отрегулировать максимальный диапазон цветов.



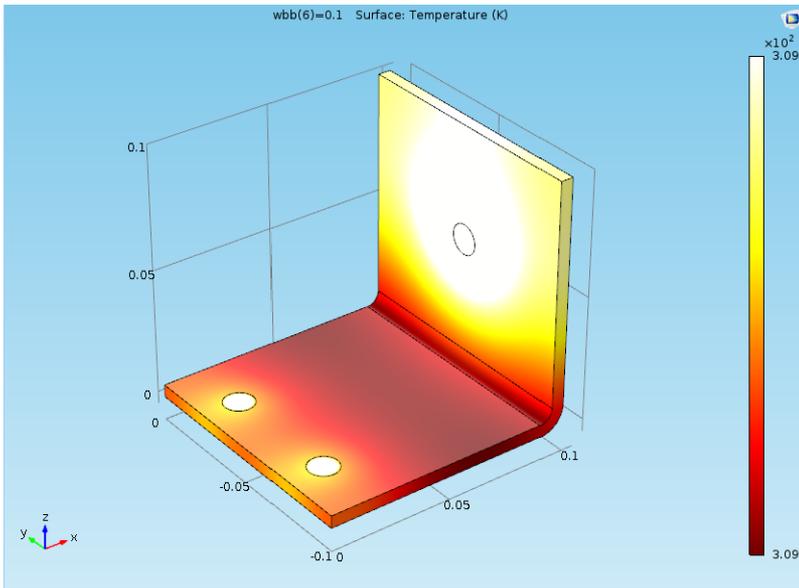
- 1 В узле Temperature (ht) 1 (Температура 1) щелкните узел Surface (Поверхность) .



- 2 В окне Settings (Настройки) узла Surface (Поверхность) щелкните Range (Диапазон), чтобы раскрыть этот раздел. Установите флажок в поле Manual color range (Ручной диапазон цветов). Введите **309.4** в поле Maximum (Максимум) вместо значения по умолчанию.

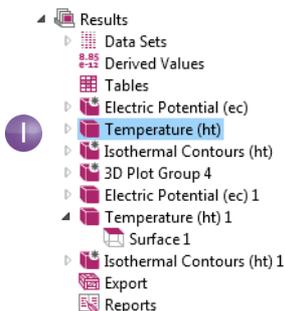


- 3 График Temperature (ht) 1 (Температура 1) обновлен в Графическом окне для значения **wbb=0.1 [m] (10 [cm])**.

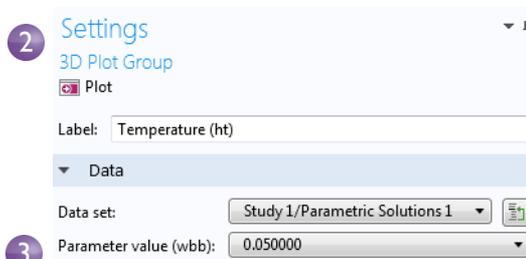


Сравните с графиком более широкой электрической шины для значения **wbb=0.05 [m] (5 [cm])**.

- 1 В Построителе моделей щелкните первый узел Temperature (ht) (Температура) .

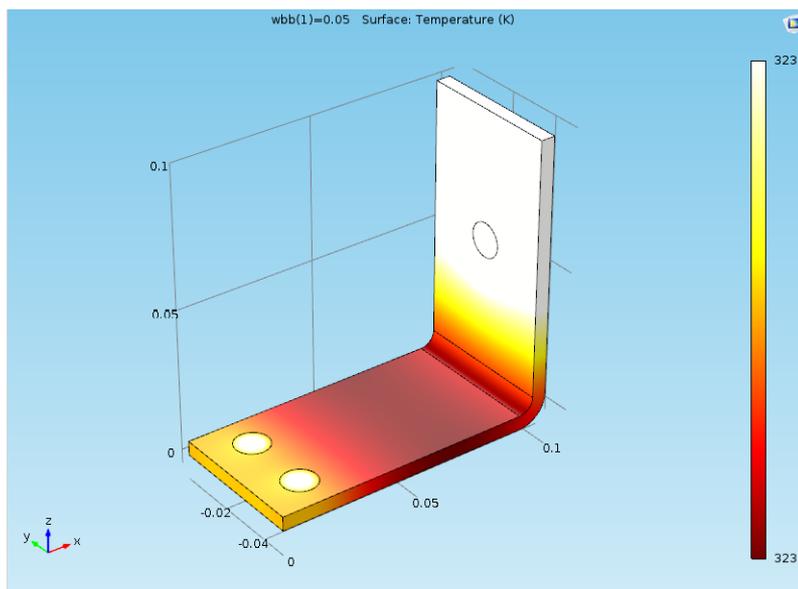


- 2 В окне Settings (Настройки) блока 3D Plot Group (Группа 3D-графиков) выберите Study 1/Parametric Solutions 1 (Исследование 1/Параметрические решения 1) из списка Data set (Набор данных). Этот набор данных содержит результаты параметрического исследования.



- 3 В списке Parameter value (Значение параметра) выберите 0.05 (что соответствует **wbb=5 cm**). Нажмите кнопку Plot (Построить график) . Нажмите кнопку Zoom Extents (Масштаб сцены)  на панели инструментов Графического окна.

График Temperature (ht) (Температура) обновлен для значения  $wbb=0.05$  [m] (5 [cm]). Обратите внимание, что если вы уже обновили диапазон цветов для этого графика, то он должен выглядеть как на иллюстрации ниже. Если нет, выполните соответствующие действия.



Как и для более широкой электрической шины, график может получиться практически одноцветным, поэтому измените максимальный диапазон цветов.

- 1 В первом узле Temperature (ht) (Температура) щелкните узел Surface (Поверхность) .
- 2 В окне Settings (Настройки) блока Surface (Поверхность) щелкните Range (Диапазон), чтобы раскрыть этот раздел, если он свернут. Установите флажок в поле Manual color range (Ручной диапазон цветов).
- 3 Введите 323 в поле Maximum (Максимум) вместо значения по умолчанию, чтобы построить график для  $wbb=5$  см.

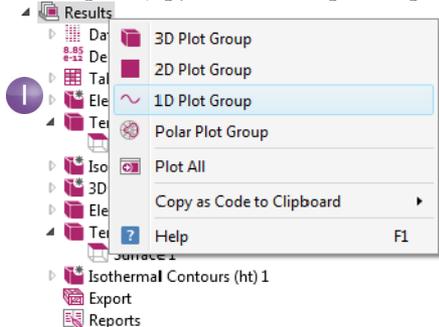
График Temperature (ht) (Температура) обновлен в Графическом окне для значения  $wbb=0.05$  [m] (5 [cm]).

Щелкните первый и второй узлы графика Temperature (Температура), чтобы сравнить графики в Графическом окне. Максимальная температура падает с 331 до 318 К при увеличении ширины электрической шины с 5 до 10 см.

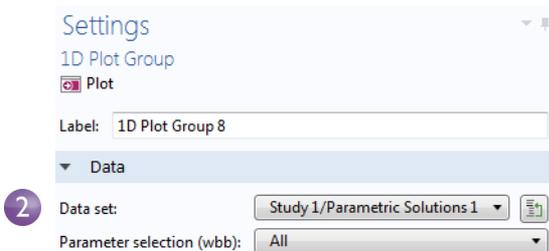
## ДОБАВЛЕНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ГРАФИКОВ

Для углубленного анализа этих результатов можно построить график средней температуры для каждого значения ширины.

- 1 Щелкните правой кнопкой мыши Results (Результаты) и добавьте 1D Plot Group (Группа одномерных графиков).

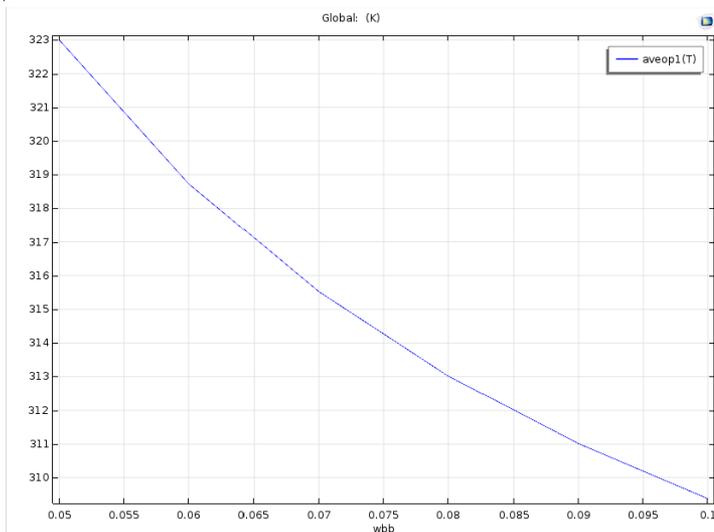


- 2 В окне Settings (Настройки) блока 1D Plot Group (Группа одномерных графиков) выберите Study 1/Parametric Solutions 1 (Исследование 1/Параметрические решения 1) из списка Data set (Набор данных).





6 Нажмите кнопку Plot (График)  и сохраните модель **busbar\_III.mph** с этими дополнительными графиками и результатами параметрического исследования.



На графике видно, что средняя температура тоже падает по мере увеличения ширины. Это означает, что задачу по снижению рабочей температуры можно решить путем использования более широкой электрической шины.

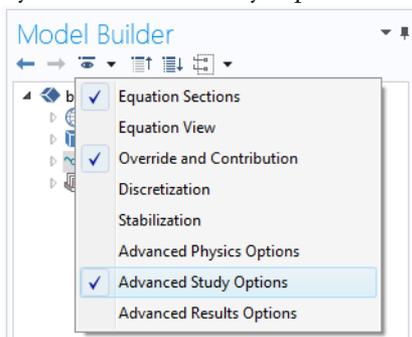
При рассмотрении параметрических исследований встает вопрос параллельных вычислений. Эффективность такого исследования возросла бы при одновременном решении всех параметров.

## Параллельные вычисления

---

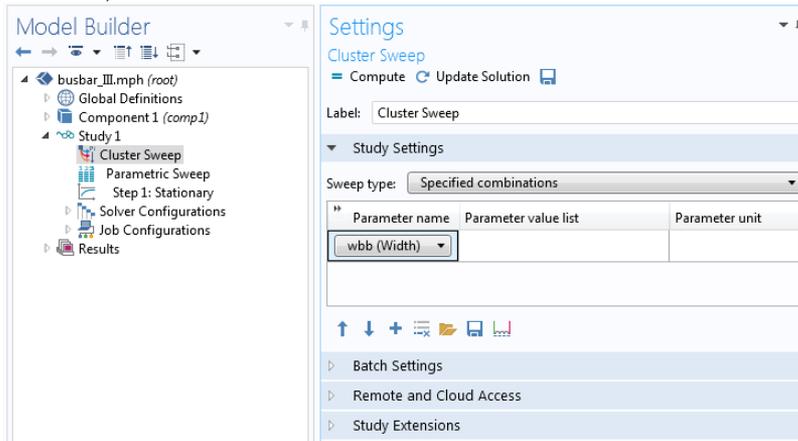
COMSOL поддерживает большинство типов параллельных вычислений, включая параллелизм с общей памятью для многоядерных процессоров и высокопроизводительные вычисления (HPC) для кластеров и облачных сред. Все лицензии COMSOL поддерживают многоядерность. Для кластерных и облачных вычислений, в том числе параллельных, необходима плавающая сетевая лицензия.

Кластеры и облачные среды можно использовать для кластерных исследований и облачных вычислений. Если у вас есть плавающая сетевая лицензия, эти две опции будут доступны по щелчку правой кнопкой мыши в узле Study (Исследование). Однако сначала нужно включить Advanced Study Options (Расширенные опции исследования), нажав кнопку Show (Показать)  на панели инструментов Model Builder (Построитель моделей) и выбрав пункт Advanced Study Options.



## КЛАСТЕРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Кластерное исследование позволяет решать несколько моделей одновременно и с разными наборами параметров. Он представляет собой обобщенный случай параметрического исследования. Щелкните правой кнопкой мыши узел Study 1 (Исследование 1) и добавьте узел Cluster Sweep (Кластерное исследование).



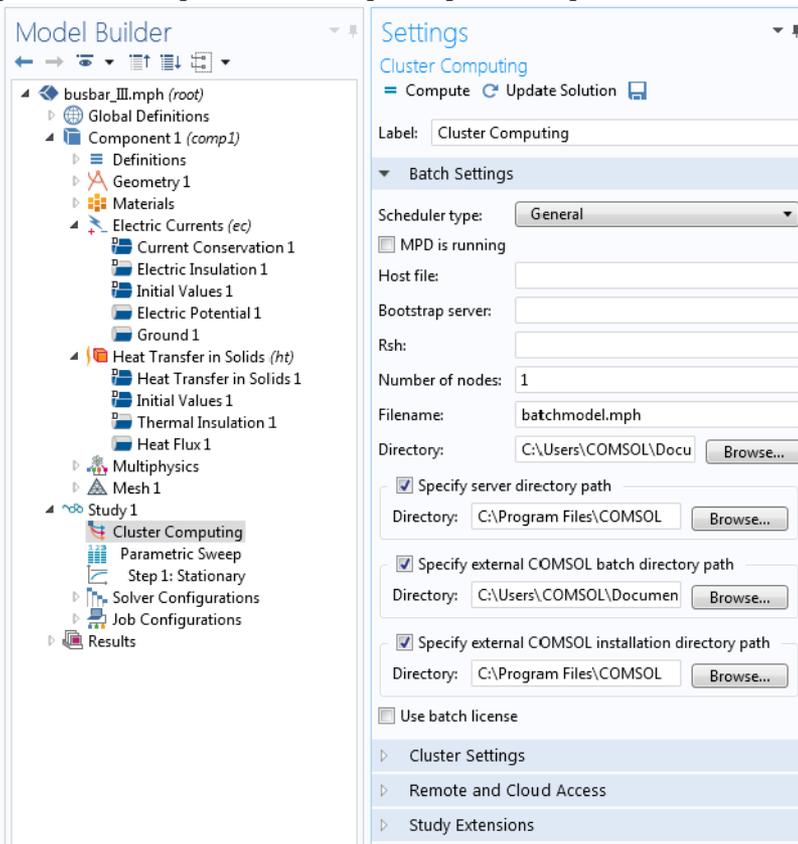
Настройки исследования для кластерного исследования аналогичны настройкам параметрического исследования, но содержат ряд дополнительных опций, связанных с кластерами и облачными средами. На иллюстрации выше показано, как выглядит верхняя часть окна Settings (Настройки) кластерного исследования для того исследования, которое мы задали в разделе «Параметрическое исследование» на стр. 116.

## КЛАСТЕРНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ

Кластеры и облачные функции можно также использовать для решения одной большой модели с использованием распределенной памяти. Для ускорения работы кластер COMSOL может применять многоядерную обработку с общей памятью на каждом узле в сочетании с моделью распределения памяти на основе интерфейса передачи сообщений (Message Passing Interface, MPI) Этот подход, который также называется гибридным параллелизмом, значительно ускоряет работу благодаря эффективному использованию вычислительных ресурсов.

Щелкните правой кнопкой мыши узел Study (Исследование) и добавьте узел Cluster Computing (Кластерные вычисления). Теперь узел Cluster Computing (Кластерные вычисления) можно использовать вместе с кластерным исследованием. Когда система спросит, нужно ли удалить кластерное исследование, нажмите Yes (Да).

В окне Settings (Настройки) для узла Cluster Computing (Кластерные вычисления), изображенном на иллюстрации ниже, можно управлять настройками кластера и облачной среды при моделировании.



Для этого следует выбрать тип кластерной задачи в списке Cluster type (Тип кластера). COMSOL поддерживает Windows® Compute Cluster Server (WCCS) 2003, Windows® HPC Server (HPCS) 2008, Open Grid Scheduler/ Grid Engine (OGS/GE), SLURM или нераспределенный.

Дополнительную информацию о параллельном запуске ПО COMSOL см. в *COMSOL Multiphysics Reference Manual* (Справочное руководство COMSOL Multiphysics).

## Приложение А. Построение геометрии

В этом разделе подробно рассматривается создание геометрии электрической шины с помощью встроенных в COMSOL инструментов геометрии. Здесь даны пошаговые инструкции по построению геометрии на основе параметров, заданных в разделе Global Definitions (Глобальные определения). Используя параметрические размерности, можно выполнять *what-if* анализ (анализ «что-если»), а также параметрические исследования геометрии.

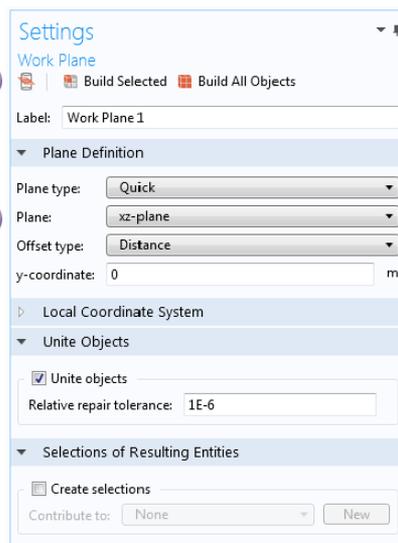
Кроме того, вместо построения геометрии непосредственно в среде COMSOL, можно просто импортировать ее из САПР. Дополнительный модуль CAD Import (Импорт данных из САПР) поддерживает множество файловых форматов САПР. Кроме того, доступно несколько модулей расширения, в которых реализованы двунаправленные интерфейсы с популярными САПР. Список приведен в разделе «Приложение Е. Подключение модулей расширения LiveLink™» на стр. 169.

Если вы уже сделали это, начните с раздела «Пример 2. Электрическая шина. Мультифизическая модель» на стр. 54. Для добавления физики и типа исследования воспользуйтесь Мастером создания моделей, а параметры добавьте в разделе Global Definitions (Глобальные определения). Затем вернитесь в этот раздел для дальнейшего изучения моделирования геометрии. Первый этап в последовательности геометрии — это построение профиля электрической шины.

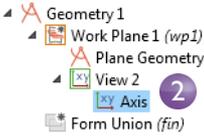
1 В разделе Component 1 (Компонент 1) щелкните правой кнопкой мыши Geometry 1 (Геометрия 1)  и выберите Work Plane  (Рабочая плоскость). В окне Settings (Настройки) раздела Work Plane (Рабочая плоскость):

- Выберите xz-plane в списке Plane (Плоскость).
- Нажмите кнопку Show Work Plane (Показать рабочую плоскость)  в окне Settings (Настройки) для панели инструментов Work Plane (Рабочая плоскость).

Далее измените настройки оси и сетки в рабочей плоскости 1.



2 В Построителе моделей раскройте узел View 2 (Вид 2) и щелкните Axis (Ось).



3 В окне Settings (Настройки) раздела Axis (Ось):

В блоке Axis (Ось):

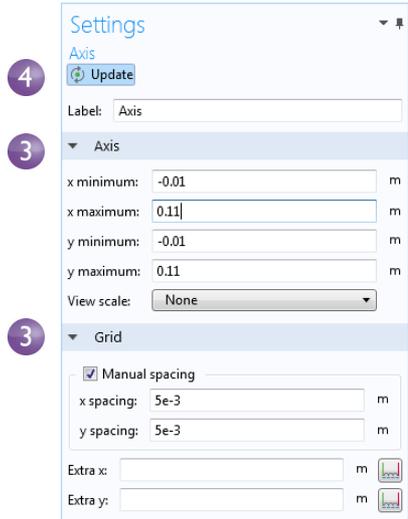
- В полях x minimum (минимум по x) и y minimum (минимум по y) введите **-0.01**.
- В полях x maximum (максимум по x) и y maximum (максимум по y) введите **0.11**.

В блоке Grid (Сетка):

- Установите флажок в поле Manual Spacing (Ручные отступы).
- В полях x spacing (отступ по x) и y spacing (отступ по y) введите **5e-3**.

4 Нажмите кнопку Update (Обновить) на панели инструментов.

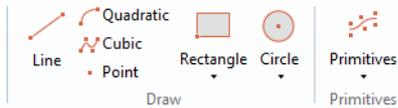
Обратите внимание, что после нажатия кнопки Update (Обновить) введенные вами значения автоматически немного корректируются с учетом соотношения сторон экрана.



Геометрию можно нарисовать в Графическом окне с помощью интерактивных графических инструментов, доступных на вкладке Work Plane (Рабочая плоскость) ленты.



Вкладка Work Plane (Рабочая плоскость)



Геометрические примитивы

Для добавления геометрических объектов в последовательность геометрии можно также щелкнуть узел Plane Geometry (Геометрия плоскости) в разделе Work Plane 1 (Рабочая плоскость 1).

Далее мы создадим профиль электрической шины.

- 5 В Построителе моделей в разделе Work Plane 1 (Рабочая плоскость 1) щелкните правой кнопкой мыши Plane Geometry (Геометрия плоскости)  и выберите Rectangle  (Прямоугольник).

В окне Settings (Настройки) блока Rectangle (Прямоугольник) в разделе Size (Размер) введите:

- $L+2*tbb$  в поле Width (Ширина).
- $0.1$  в поле Height (Высота).

Нажмите кнопку Build Selected (Построить выбранные) .

- 6 Создайте второй прямоугольник. В разделе Work Plane 1 (Рабочая плоскость 1) щелкните правой кнопкой мыши Plane Geometry  (Геометрия плоскости) и выберите Rectangle  (Прямоугольник).

В блоке Size (Размер) введите:

- $L+tbb$  в поле Width (Ширина)
- $0.1-tbb$  в поле Height (Высота).

В блоке Position (Положение) введите:

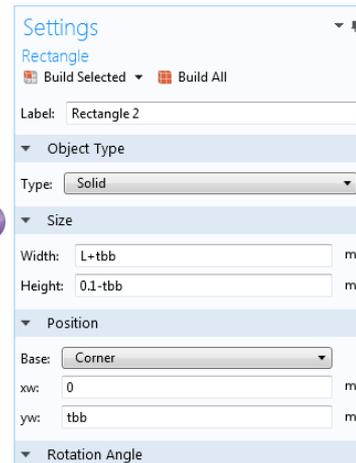
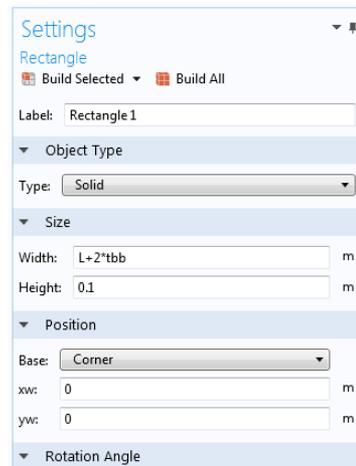
- $tbb$  в поле  $yw$ .

Нажмите кнопку Build Selected (Построить выбранные) .

С помощью операции Boolean Difference (Логическая разность) вычтите второй прямоугольник из первого.

- 7 В разделе Work Plane 1 (Рабочая плоскость 1) щелкните правой кнопкой мыши Plane Geometry  (Геометрия плоскости) и выберите Booleans and Partitions > Difference  (Логические операции и разбиение > Разность). В Графическом окне щелкните  $r1$  (большой из двух прямоугольников), чтобы добавить его в список Objects to add (Объекты для сложения) окна Settings (Настройки) для узла Difference (Разность).

 Для облегчения выбора геометрии можно включить отображение ярлыков в Графическом окне. В Построителе моделей в разделе Geometry 1 > WorkPlane 1 (Геометрия 1 > Рабочая плоскость 1)

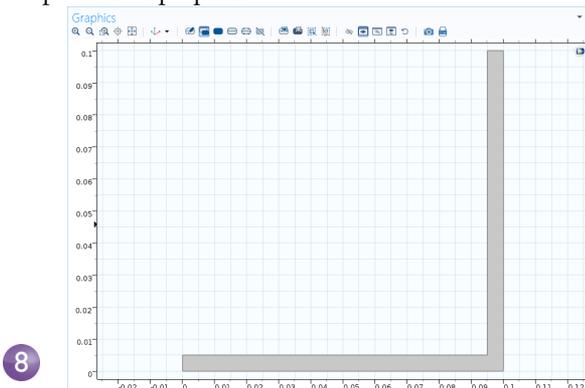
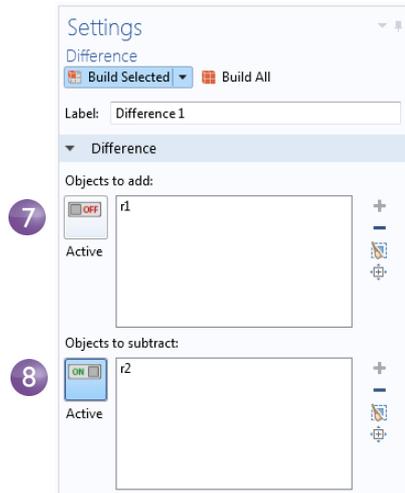


щелкните узел View 2 (Вид 2). Перейдите в окно Settings (Настройки) раздела View и установите флажок в поле Show geometry labels (Показывать ярлыки геометрий).

- 8 Щелкните узел Difference (Разность). В окне Settings (Настройки) узла Difference (Разность) нажмите кнопку Active selection (Активная выборка) слева от списка Objects to subtract (Объекты для вычитания). Выберите меньший прямоугольник **r2**: прокрутите мышью наложенные прямоугольники, чтобы подсветить его, а затем щелкните, чтобы выбрать. Нажмите Build Selected (Построить выбранные) .

Также прямоугольник **r2** в Графическом окне можно выбрать с помощью функции Selection List (Список выборки). Перейдите на вкладку Home (Главная) на ленте и выберите Windows > Selection List (Окна > Список выборки). В списке выборки щелкните r2 (solid), чтобы подсветить прямоугольник. Затем щелкните правой кнопкой мыши r2 (solid) в списке и выберите Add to Selection (Добавить в выборку), чтобы добавить прямоугольник в список Objects to subtract (Объекты для вычитания). Щелкните заголовок окна Selection List (Список выборки) и выберите Close (Заккрыть).

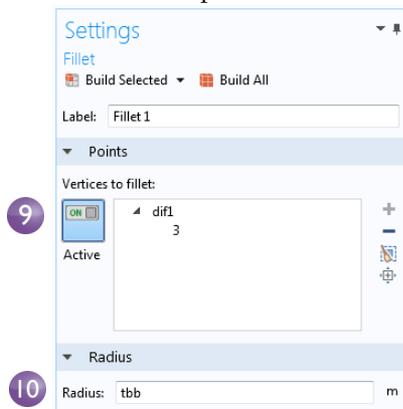
В результате построения выбранной геометрии у вас должен получиться L-образный профиль, повернутый обратной стороной. Теперь скруглим углы L-образного профиля.



9 В разделе Work Plane 1 (Рабочая плоскость 1) щелкните правой кнопкой мыши Plane Geometry (Геометрия плоскости) и выберите Fillet (Галтель).

Выберите point 3 (точка 3) для добавления в список Vertices to fillet (Вершины для скругления). Точки можно добавить несколькими способами:

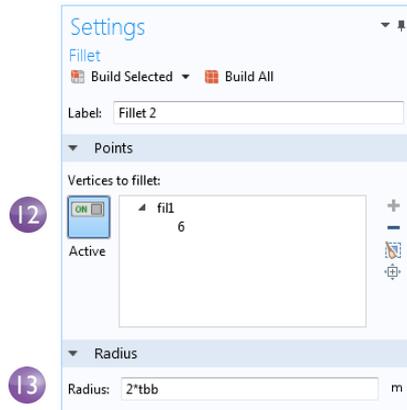
- В Графическом окне щелкните point 3 (точка 3) в правом внутреннем угле, чтобы добавить ее в список Vertices to fillet (Вершины для скругления).
- На вкладке Home (Главная) выберите Windows > Selection List (Окна > Список выборки). В окне Selection List (Список выборки) щелкните 3. В Графическом окне подсвечивается соответствующая точка. Нажмите кнопку Add to Selection (Добавить в выборку) + в окне Settings (Настройки) раздела Fillet (Галтель) или щелкните правой кнопкой мыши список выборки.



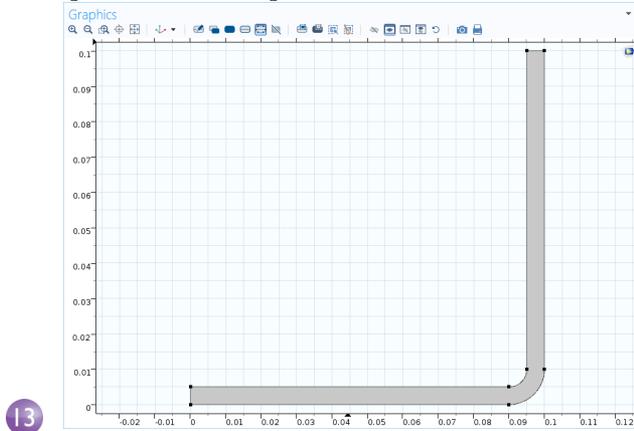
10 Введите **tbb** в поле Radius (Радиус). Нажмите Build Selected (Построить выбранные).

Это относится к внутреннему углу.

- 11 Для внешнего угла щелкните правой кнопкой мыши Plane Geometry (Геометрия плоскости) и выберите Fillet (Галтель).
- 12 В Графическом окне щелкните point 6 (точка 6) во внешнем угле, чтобы добавить ее в список Vertices to fillet (Вершины для скругления).
- 13 Введите  $2 * tbb$  в поле Radius (Радиус). Нажмите Build Selected (Построить выбранные).

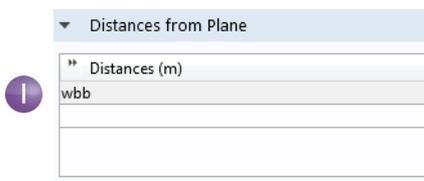


Результат изображен на иллюстрации:



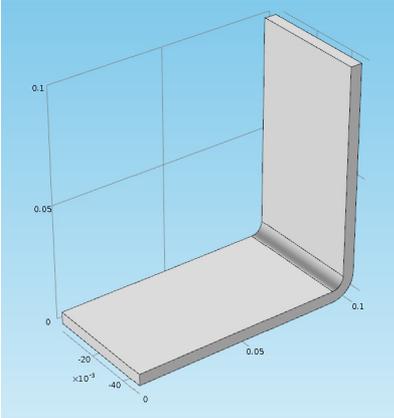
Далее нужно выдавить рабочую плоскость, чтобы получить трехмерную геометрию электрической шины.

- 1 В Построителе моделей щелкните правой кнопкой мыши Work Plane 1 (Рабочая плоскость 1) и выберите Extrude (Выдавить). В окне Settings (Настройки) блока Extrude (Выдавить) введите  $wbb$  в таблице Distances from Plane (Расстояния от плоскости) вместо значения по умолчанию, чтобы выдавить плоскость на ширину профиля.



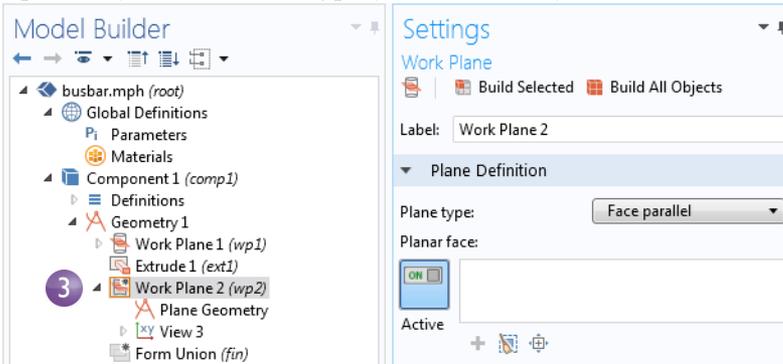
В таблице можно ввести несколько значений, чтобы создать многослойные структуры из различных материалов. Для данного случая достаточно одного выдавленного слоя.

- 2 Нажмите **Build Selected** (Построить выбранные) , а затем нажмите кнопку **Zoom Extents** (Масштаб сцены)  на панели инструментов Graphics (Графика). Нажмите кнопку **Save** (Сохранить)  и сохраните модель под именем **busbar.mph**, если вы еще не сделали этого.



Теперь создайте титановые болты, выдавив две окружности на двух рабочих плоскостях.

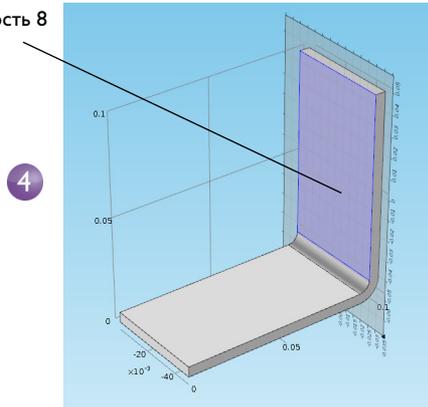
- 3 В Построителе моделей щелкните правой кнопкой **Geometry 1** (Геометрия 1)  и добавьте **Work Plane**  (Рабочую плоскость). Узел **Work Plane 2** (Рабочая плоскость 2) добавлен. В окне **Settings** (Настройки) для блока **Work Plane** (Рабочая плоскость), в разделе **Plane Definition** (Определение плоскости) выберите **Face parallel** (Параллельно поверхности) в списке **Plane type** (Тип плоскости).



- 4 В Графическом окне шелкните face 8 (поверхность 8), как показано на иллюстрации ниже, чтобы добавить ее в список Planar face (Плоская поверхность) в окне Settings (Настройки) блока Work Plane (Рабочая плоскость).

Поверхность под номером 8 теперь подсвечена синим цветом, а рабочая плоскость размещена поверх нее.

Поверхность 8



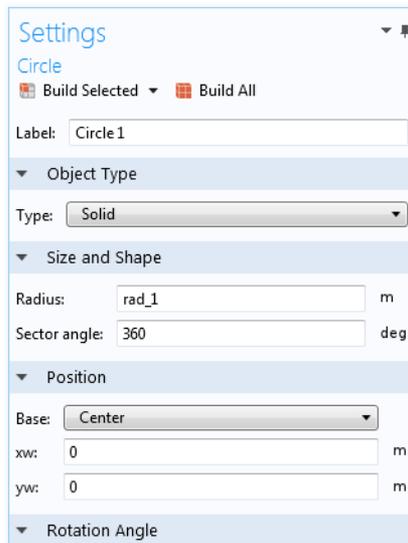
- 5 Нажмите кнопку Show Work Plane (Показать рабочую плоскость) , чтобы нарисовать первую окружность там, где будет находиться первый болт. Нажмите кнопку Zoom Extents (Масштаб сцены)  на панели инструментов Graphics (Графика).

- 6 В разделе Work Plane 2 (Рабочая плоскость 2) щелкните правой кнопкой мыши Plane Geometry  (Геометрия плоскости) и выберите Circle  (Окружность).

В окне Settings (Настройки) раздела Circle (Окружность):

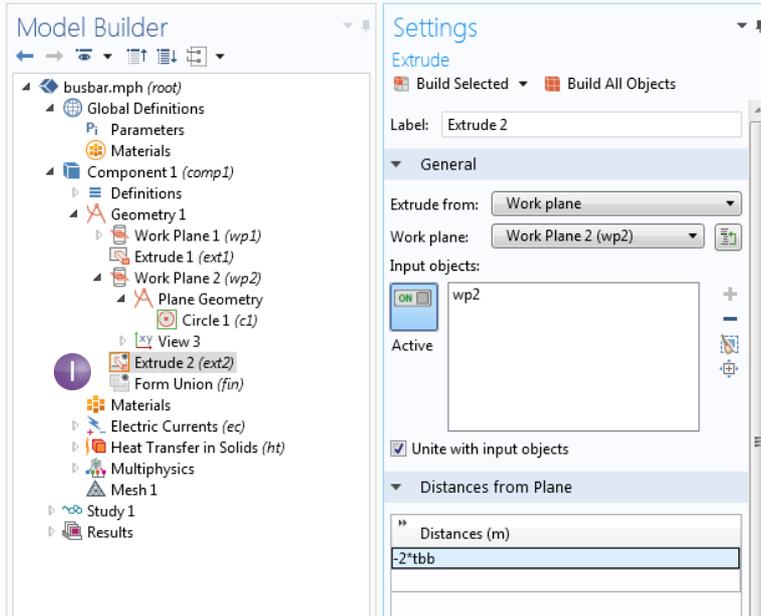
- В разделе Size and Shape (Размер и форма) в поле Radius (Радиус) введите **rad\_1**.
- В разделе Position (Положение) оставьте координаты по умолчанию  $xw$  и  $yw$ : (0, 0).

Нажмите Build Selected (Построить выбранные) .

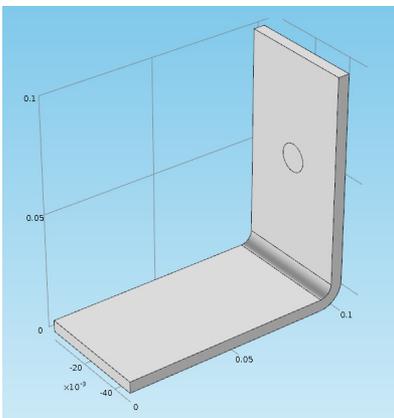


Теперь добавим операцию выдавливания.

- 1 В Построителе моделей щелкните правой кнопкой мыши Work Plane 2 (Рабочая плоскость 2) и выберите Extrude (Выдавить). В окне Settings (Настройки) блока Extrude (Выдавить) в первой строке таблицы Distances from Plane (Расстояния от плоскости) введите  $-2 * t_{bb}$ , чтобы выдавить окружность.

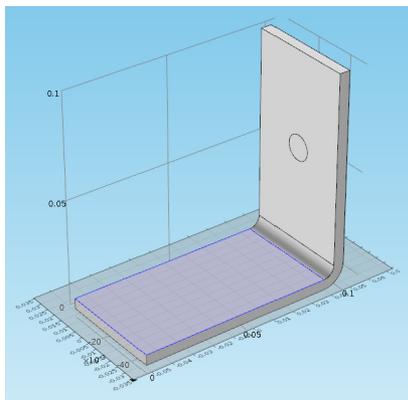


- 2 Нажмите кнопку Build Selected (Построить выбранные), чтобы создать цилиндрическую часть титанового болта, проходящего сквозь электрическую шину.



Нарисуйте два оставшихся болта.

- Щелкните правой кнопкой мыши Geometry 1 (Геометрия 1)  и выберите Work Plane  (Рабочая плоскость). Узел Work Plane 3 (Рабочая плоскость 3) добавлен. В окне Settings (Настройки) для блока Work Plane (Рабочая плоскость) для рабочей плоскости 3 выберите Face parallel (Параллельно поверхности) в списке Plane type (Тип плоскости).
- В Графическом окне щелкните Face 4 (Поверхность 4), как показано на иллюстрации, чтобы добавить ее в список Planar face (Плоская поверхность) в окне Settings (Настройки) блока Work Plane (Рабочая плоскость).



- Нажмите кнопку Show Work Plane (Показать рабочую плоскость)  в окне Settings (Настройки) блока Work Plane (Рабочая плоскость) и кнопку Zoom Extents (Масштаб сцены)  на панели инструментов Graphics (Графика), чтобы лучше рассмотреть геометрию.

Для параметризации положения двух остальных болтов добавьте окружности, формирующие поперечные сечения болтов.

- 6 В разделе Work Plane 3 (Рабочая плоскость 3) щелкните правой кнопкой мыши Plane Geometry  $\Delta$  (Геометрия плоскости) и выберите Circle  $\odot$  (Окружность).

В окне Settings (Настройки) раздела Circle (Окружность):

- В разделе Size and Shape (Размер и форма) введите **rad\_1** в поле Radius (Радиус).
- В разделе Position (Положение) введите  **$-L/2+1.5e-2$**  в поле xw и  **$-wbb/4$**  в поле yw.

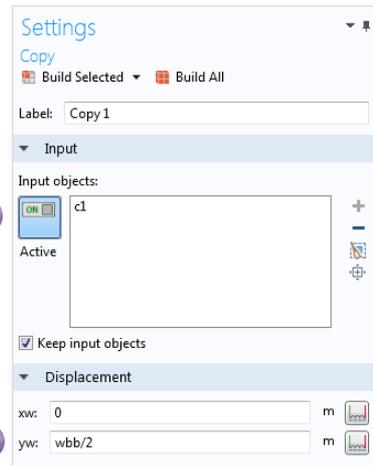
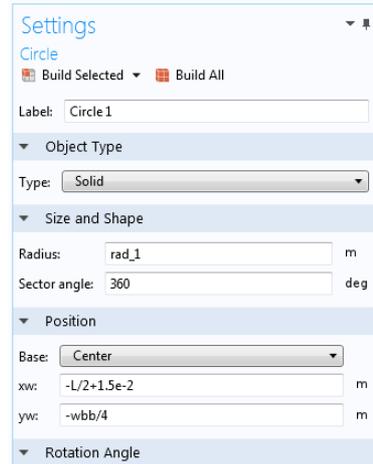
Нажмите Build Selected (Построить выбранные)  $\square$ .

Скопируйте только что созданные окружности, чтобы сформировать третий болт электрической шины.

- 7 В разделе Work Plane 3 (Рабочая плоскость 3) щелкните правой кнопкой мыши Plane Geometry  $\Delta$  (Геометрия плоскости) и выберите Transforms > Copy  $\square$  (Преобразования > Копирование).

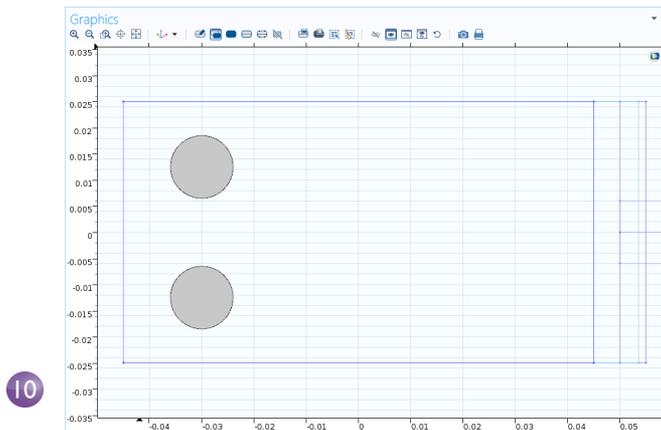
- 8 В Графическом окне) щелкните окружность **c1**, чтобы выбрать ее и добавить в список Input objects (Входные объекты) в окне Settings (Настройки) блока Copy (Копировать).

- 9 В окне Settings (Настройки) блока Copy (Копировать) в разделе Displacement (Смещение) введите **wbb/2** в поле yw.



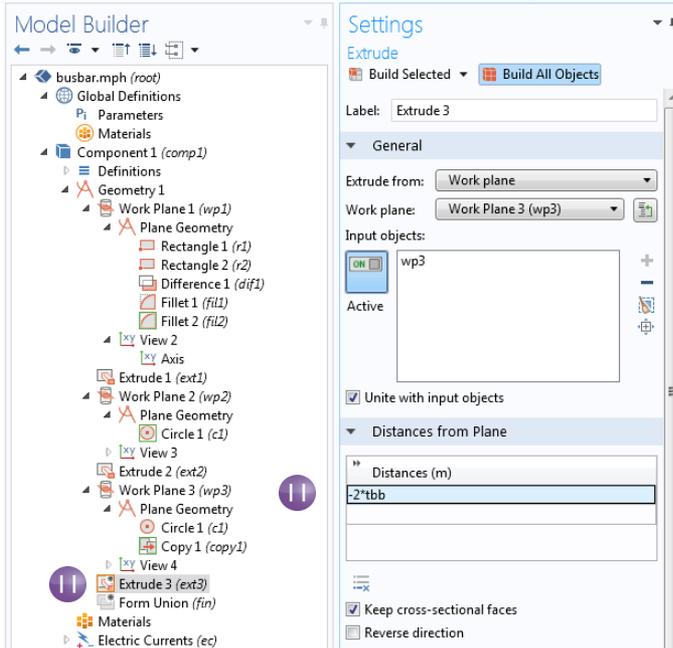
10 Нажмите Build Selected (Построить выбранные), а затем  нажмите кнопку Zoom Extents (Масштаб сцены)  на панели инструментов Graphics (Графика).

На этом этапе геометрия, если смотреть с рабочей плоскости, должна выглядеть, как на этой иллюстрации.

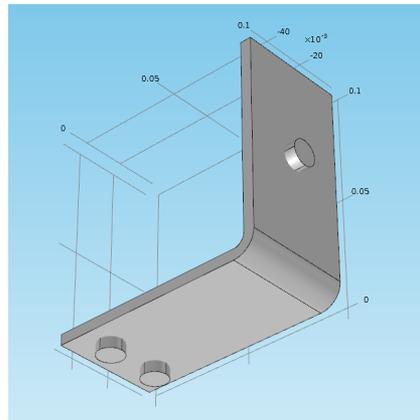
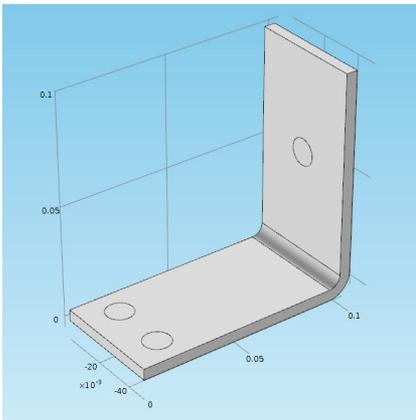


Далее нужно выдавить окружности.

- 11 В Построителе моделей щелкните правой кнопкой мыши Work Plane 3 (Рабочая плоскость 3)  и выберите Extrude (Выдавить) . В окне Settings (Настройки) блока Extrude (Выдавить) в первой строке таблицы Distances from Plane (Расстояния от плоскости) введите  $-2 \cdot t_{bb}$  вместо значения по умолчанию. Нажмите Build All Objects  (Построить все объекты).



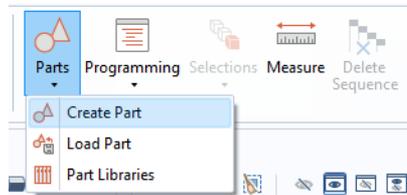
Геометрия и последовательность геометрии должны выглядеть, как на иллюстрациях ниже. Нажмите кнопку Save (Сохранить)  сохраните модель под именем **busbar.mph**.



## СОЗДАНИЕ ЧАСТЕЙ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИБЛИОТЕК ЧАСТЕЙ

После настройки электрической шины или другой геометрии полезно сохранить ее, чтобы при необходимости использовать в будущем. В рассмотренных нами примерах геометрия сохранялась прямо в файле модели COMSOL, который тоже будет использоваться для настройки полной модели электрической шины. Вместо этого можно создать часть для многократного использования, которая хранится в отдельном файле, доступном в Библиотеках частей, и может стать составным компонентом для более сложной геометрии модели COMSOL.

При построении геометрии электрической шины вы использовали функции на вкладках Geometry (Геометрия) и Workplane (Рабочая плоскость). Меню Parts (Части) находится в группе Other (Прочие) на этих вкладках.



С помощью меню Parts (Части) можно создать или загрузить часть, а также добавить ее из Библиотек частей в геометрию модели. По умолчанию в систему уже встроены несколько Библиотек частей. Части, созданные пользователем, добавляются в родительский узел Parts (Части) в разделе Global Definitions (Глобальные определения) дерева модели. Дополнительную информацию о работе с частями и Библиотеками частей см. в *COMSOL Multiphysics Reference Manual* (Справочное руководство COMSOL Multiphysics).

❗ Чтобы продолжить изучение учебной модели электрической шины, вернитесь в раздел «Материалы» на стр. 62.

## Приложение В. Сочетания клавиш и действия мышью

СОЧЕТАНИЕ КЛАВИШ (WINDOWS, LINUX)	СОЧЕТАНИЕ КЛАВИШ (OS X)	ДЕЙСТВИЕ
F1	F1	Открыть справку по выбранному узлу или окну
Ctrl+F1	Command+F1	Открыть начальную страницу документации COMSOL в отдельном окне
F2	F2	Переименовать выбранный узел, файл или папку
F3	F3	Отключить выбранные узлы
F4	F4	Включить выбранные узлы
F5	F5	Обновить решения наборов данных с учетом всех новых определений и глобальных определений без пересчета модели
F6	F6	Построить предыдущий узел в разделе геометрии
F7	F7	Построить выбранный узел в разделах геометрии и сетки, рассчитать выбранный шаг исследования или узел в последовательности решателя
F8	F8	Построить геометрию, построить сетку, вычислить всю последовательность решателя, обновить результаты или обновить график
Del	Del	Удалить выбранные узлы
Стрелка влево (Windows); Shift + стрелка влево (Linux)	Стрелка влево	Свернуть раздел в дереве модели
Стрелка вправо (Windows); Shift + стрелка вправо (Linux)	Стрелка вправо	Развернуть раздел в дереве модели
Стрелка вверх	Стрелка вверх	Перейти на один узел вверх в дереве модели
Стрелка вниз	Стрелка вниз	Перейти на один узел вниз в дереве модели

СОЧЕТАНИЕ КЛАВИШ (WINDOWS, LINUX)	СОЧЕТАНИЕ КЛАВИШ (OS X)	ДЕЙСТВИЕ
Alt + стрелка влево	Ctrl + стрелка влево	Перейти к предыдущему выбранному узлу в дереве модели
Alt + стрелка вправо	Ctrl + стрелка вправо	Перейти к следующему выбранному узлу в дереве модели
Ctrl + A	Command + A	Выбрать все области, границы, грани или точки; выбрать все ячейки в таблице
Ctrl + C	Command + C	Копировать текст в полях
Ctrl + D	Command + D	Сбросить выделение областей, границ, граней или точек
Ctrl + F	Command + F [[check]]	Поиск по строке
Ctrl + N	Command + N	Создать модель
Ctrl + O	Command + O	Открыть файл модели
Ctrl + P	Command + P	Распечатать содержимое окна графика
Ctrl + S	Command + S	Сохранить файл модели
Ctrl + V	Command + V	Вставить скопированный текст
Ctrl + Y	Ctrl + Shift + Z	Повторить последнюю отмененную операцию
Ctrl + Z	Command + Z	Отменить последнюю операцию
Ctrl + стрелка вверх	Command + стрелка вверх	Поднять на одну позицию узел определений, узел геометрии, узел физики (кроме узлов по умолчанию), узел материала, узел сетки, узел шага исследования или узел результатов
Ctrl + стрелка вниз	Command + стрелка вниз	Опустить на одну позицию узел определений, узел геометрии, узел физики (кроме узлов по умолчанию), узел материала, узел сетки, узел шага исследования или узел результатов
Ctrl + Tab	Ctrl + Tab	Переключиться на следующее окно рабочего стола
Ctrl + Shift + Tab	Ctrl + Shift + Tab	Переключиться на предыдущее окно рабочего стола

СОЧЕТАНИЕ КЛАВИШ (WINDOWS, LINUX)	СОЧЕТАНИЕ КЛАВИШ (OS X)	ДЕЙСТВИЕ
Ctrl + Alt + A	Недоступно	Перейти в Среду разработки приложений
Ctrl + Alt + M	Недоступно	Перейти в Построитель моделей
Ctrl + Alt + стрелка влево	Command + Alt + стрелка влево	Переключиться на окно Построителя моделей
Ctrl + Alt + стрелка вправо	Command + Alt + стрелка вправо	Переключиться на окно Settings (Настройки)
Ctrl + Alt + стрелка вверх	Command + Alt + стрелка вверх	Переключиться на предыдущий раздел окна Settings (Настройки)
Ctrl + Alt + стрелка вниз	Command + Alt + стрелка вниз	Переключиться на следующий раздел окна Settings (Настройки)
Shift + F10 или (только Windows) клавиша Menu	Ctrl + F10	Открыть контекстное меню
Ctrl + пробел	Ctrl + пробел	Открыть список готовых величин для вставки в поля Expression (Выражение) для построения графиков и оценки результатов
Щелкните левой кнопкой мыши и потяните указатель, не отпуская кнопку.	Аналогично Windows; доступно только для двухкнопочной мыши.	Повернуть сцену вокруг осей, параллельных осям X и Y на экране, начиная с точки вращения сцены.
Щелкните правой кнопкой мыши и потяните указатель, не отпуская кнопку.	Аналогично Windows; доступно только для двухкнопочной мыши.	Передвинуть видимую рамку на плоскости изображения в произвольном направлении.
Щелкните средней кнопкой мыши и потяните указатель, не отпуская кнопку.	Аналогично Windows; доступно только для двухкнопочной мыши.	Приблизить/отдалить сцену вокруг позиции указателя мыши, из которой началось движение.
Нажмите Ctrl и щелкните левой кнопкой мыши. Потяните указатель мыши, удерживая клавишу и кнопку.	Аналогично Windows; доступно только для двухкнопочной мыши.	Наклонить и панорамировать камеру, вращая ее около осей X и Y в плоскости изображения.

СОЧЕТАНИЕ КЛАВИШ (WINDOWS, LINUX)	СОЧЕТАНИЕ КЛАВИШ (OS X)	ДЕЙСТВИЕ
Нажмите Ctrl и щелкните правой кнопкой мыши. Потяните указатель мыши, удерживая клавишу и кнопку.	Аналогично Windows; доступно только для двухкнопочной мыши.	Передвинуть камеру в плоскости, параллельной плоскости изображения.
Нажмите Ctrl и щелкните средней кнопкой мыши. Потяните указатель мыши, удерживая клавишу и кнопку.	Аналогично Windows; доступно только для двухкнопочной мыши.	Передвинуть камеру к объекту и от него (эффект наезжающей/отъезжающей камеры).
Нажмите Ctrl + Alt и щелкните левой кнопкой мыши. Потяните указатель мыши, удерживая клавиши и кнопку.	Аналогично Windows; доступно только для двухкнопочной мыши.	Повернуть камеру вокруг оси.
Нажмите Alt и щелкните левой кнопкой мыши. Потяните указатель мыши, удерживая клавишу и кнопку.	Аналогично Windows; доступно только для двухкнопочной мыши.	Повернуть камеру около ее оси между самой камерой и точкой вращения сцены (эффект крена).
Нажмите Alt и щелкните правой кнопкой мыши. Потяните указатель мыши, удерживая клавишу и кнопку.	Аналогично Windows; доступно только для двухкнопочной мыши.	Передвинуть сцену в плоскости, перпендикулярной оси между камерой и точкой вращения сцены.
Нажмите Alt и щелкните средней кнопкой мыши. Потяните указатель мыши, удерживая клавишу и кнопку.	Аналогично Windows; доступно только для двухкнопочной мыши.	Передвинуть камеру вдоль ее оси между самой камерой и точкой вращения сцены.

## Приложение С. Элементы языка и зарезервированные имена

---

Построение дерева модели в COMSOL эквивалентно графическому программированию последовательности операций. При сохранении файла модели для MATLAB® или Java® создается последовательность операций в виде списка обычных операторов программирования. В этом разделе рассмотрены следующие категории элементов, доступные в языке, лежащем в основе ПО COMSOL:

- константы,
- переменные,
- функции,
- операторы,
- выражения.

Эти элементы языка могут быть встроенными или пользовательскими. Операторы не могут быть пользовательскими. Выражения всегда только пользовательские.

### О ЗАРЕЗЕРВИРОВАННЫХ ИМЕНАХ

*Имена встроенных элементов зарезервированы и поэтому недоступны для переопределения.* При попытке присвоить пользовательской переменной, параметру или функции зарезервированное имя система выделит введенный текст оранжевым, а при выборе этой текстовой строки отобразит всплывающую подсказку с ошибкой. *Имена функций резервируются только для функций, при этом их можно использовать для переменных и параметров. Аналогично имена переменных и параметров могут использоваться для функций.* Далее будут перечислены наиболее часто используемые встроенные элементы и зарезервированные для них имена. Более полный список встроенных элементов приведен в *COMSOL Multiphysics Reference Manual* (Справочное руководство COMSOL Multiphysics).

### ПЕРЕМЕННЫЕ, ИСПОЛЪЗУЕМЫЕ В ПРИЛОЖЕНИЯХ

Параметры и переменные модели можно использовать в приложениях. Например, можно разрешить пользователю приложения изменять значение параметра. Кроме того, переменные для использования в приложениях задаются в Среде разработки приложений в узле Declarations (Объявления). Такие переменные доступны глобально в объектах и методах форм, но не могут использоваться в Построителе моделей.

## Константы и параметры

---

Константы бывают трех типов: встроенные математические и числовые константы, встроенные физические константы и параметры. Параметры — это пользовательские константы, которые могут изменяться при параметрическом анализе. Константы являются скалярными величинами. В таблицах ниже приведены математические и числовые константы, а также встроенные физические константы. Константы и параметры могут иметь размерность.

### ВСТРОЕННЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ И ЧИСЛОВЫЕ КОНСТАНТЫ

ОПИСАНИЕ	ИМЯ	ЗНАЧЕНИЕ
Относительная точность чисел с плавающей запятой для чисел двойной точности (double) — т. н. «машинный эпсилон»	<b>eps</b>	$2^{-52}$ ( $\sim 2.2204 \cdot 10^{-16}$ )
Мнимая единица	<b>i, j</b>	<b>i, sqrt(-1)</b>
Бесконечность, $\infty$	<b>inf, Inf</b>	Значение, которое слишком велико для представления с плавающей запятой
Нечисловое значение	<b>NaN, nan</b>	Неопределенное или непредставимое значение, например, результат операций <b>0/0</b> или <b>inf/inf</b>
$\pi$	<b>pi</b>	<b>3,141592653589793</b>

## ВСТРОЕННЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ КОНСТАНТЫ

ОПИСАНИЕ	ИМЯ	ЗНАЧЕНИЕ
Ускорение свободного падения	<b>g_const</b>	9,80665 [м/с <sup>2</sup> ]
Постоянная Авогадро	<b>N_A_const</b>	6,02214129e23 [1/моль]
Постоянная Больцмана	<b>k_B_const</b>	1,3806488e-23 [Дж/К]
Характеристический импеданс вакуума (импеданс пустого пространства)	<b>Z0_const</b>	376,73031346177066 [Ом]
Масса электрона	<b>me_const</b>	9,10938291e-31 [кг]
Заряд электрона	<b>e_const</b>	1,602176565e-19 [Кл]
Постоянная Фарадея	<b>F_const</b>	96485,3365 [Кл/моль]
Постоянная тонкой структуры	<b>alpha_const</b>	7,2973525698e-3
Гравитационная постоянная	<b>G_const</b>	6,67384e-11 [м <sup>3</sup> /(кг*с <sup>2</sup> ) ]
Молярный объем идеального газа (при 273,15 К и 1 атм)	<b>V_m_const</b>	2,2413968e-2 [м <sup>3</sup> /моль]
Масса нейтрона	<b>mn_const</b>	1,674927351e-27 [кг]
Магнитная проницаемость вакуума (магнитная постоянная)	<b>mu0_const</b>	4*pi*1e-7 [Гн/м]
Диэлектрическая проницаемость вакуума (электрическая постоянная)	<b>epsilon0_const</b>	8,854187817000001e-12 [Ф/м]
Постоянная Планка	<b>h_const</b>	6,62606957e-34 [Дж*с]
Постоянная Планка, выраженная через 2 pi	<b>hbar_const</b>	1,05457172533629e-34 [Дж*с]
Масса протона	<b>mp_const</b>	1,672621777e-27 [кг]
Скорость света в вакууме	<b>c_const</b>	299792458 [м/с]
Постоянная Стефана — Больцмана	<b>sigma_const</b>	5,670373e-8 [W/(м <sup>2</sup> *К <sup>4</sup> ) ]
Универсальная газовая постоянная	<b>R_const</b>	8,3144621 [Дж/(моль*К) ]
Постоянная закона смещения Вина	<b>b_const</b>	2,8977721e-3 [м*К]

## ПАРАМЕТРЫ

Параметры — пользовательские скалярные константы в разделе Global Definitions (Глобальные определения) дерева модели. Примеры использования:

- Параметризация геометрических размерностей.
- Параметризация размеров элементов сетки.
- Определение параметров для параметрических исследований.

Параметр можно объявить в виде выражения, содержащего числа, параметры, встроенные константы, встроенные функции от параметров и встроенные константы. В квадратных скобках  $\square$  необходимо указать размерность параметра — за исключением безразмерных параметров.

## Переменные

---

Переменные могут быть двух типов — встроенные и пользовательские. Переменные могут быть скалярными или полевыми. Переменные могут иметь размерность.

Примечание. Одна из групп пользовательских переменных представляет особый интерес. Переменные пространственных координат и зависимые переменные. Имена по умолчанию для этих переменных отражают размерность пространства геометрии и интерфейс физик соответственно. На основе имен, выбранных для данных переменных, COMSOL создает список встроенных переменных — производных первого и второго порядков по пространственным координатам и времени.

## ВСТРОЕННЫЕ ПЕРЕМЕННЫЕ

ИМЯ	ОПИСАНИЕ	ТИП
<b>t</b>	Время	Скалярная
<b>freq</b>	Частота	Скалярная
<b>lambda</b>	Собственное значение	Скалярная
<b>phase</b>	Фазовый угол	Скалярная
<b>numberofdofs</b>	Число степеней свободы	Скалярная
<b>h</b>	Размер элемента сетки (длина самой длинной грани элемента)	Полевая
<b>meshtype</b>	Индекс типа сетки для элемента сетки; характеризует количество граней в элементе	Полевая
<b>meshelement</b>	Номер элемента сетки	Полевая
<b>dvol</b>	Переменная для коэффициента масштабирования по объему; это определитель якобиана для привязки локальных координат (координат элемента) к глобальным координатам.	Полевая
<b>qual</b>	Мера качества сетки: 0 — низкое качество, 1 — отличное качество	Полевая

## ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИЕ ПЕРЕМЕННЫЕ, ПОРОЖДАЮЩИЕ ВСТРОЕННЫЕ ПЕРЕМЕННЫЕ

ИМЯ ПО УМОЛЧАНИЮ	ОПИСАНИЕ	ТИП
<b>x, y, z</b>	Пространственные координаты (декартовы)	Полевая
<b>r, phi, z</b>	Пространственные координаты (цилиндрические)	Полевая
<b>u, T □ □□.</b>	Зависимые переменные (решение)	Полевая

Пример: Пусть **T** — имя переменной для температуры в двумерной модели теплопередачи, зависящей от времени, **x** и **y** — имена пространственных координат. В этом случае будут созданы следующие встроенные переменные: **T, Tx, Ty, Txx, Txy, Tyx, Tyy, Tt, Txt, Tyt, Ttxt, Txyt, Tyxt, Tyyt, Ttt, Txtt, Tytt, Txxtt, Txytt, Tyxtt** и **Tyytt**. Здесь **Tx** соответствует частной производной температуры **T** по **x**, а **Ttt** соответствует производной второго порядка от **T** и так далее. Если переменные пространственных координат имеют другие имена — например, **psi** и **chi**, — то **Txy** будет называться **Tpsichi**, а **Txt** станет **Tpsit**. (Переменная **t** является встроенной, поэтому ее имя нельзя изменить.)

## Функции

---

Функции могут быть двух типов — встроенные и пользовательские. В зависимости от входных аргументов функции бывают скалярными или полевыми. Входные и выходные аргументы функций могут иметь размерность.

### ВСТРОЕННЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ

Входные и (или) выходные аргументы этих функций не имеют размерности.

ИМЯ	ОПИСАНИЕ	ПРИМЕР СИНТАКСИСА
<b>abs</b>	Абсолютная величина	<b>abs (x)</b>
<b>acos</b>	Арккосинус (в радианах)	<b>acos (x)</b>
<b>acosh</b>	Гиперболический арккосинус	<b>acosh (x)</b>
<b>acot</b>	Арккотангенс (в радианах)	<b>acot (x)</b>
<b>acoth</b>	Гиперболический арккотангенс	<b>acoth (x)</b>
<b>acsc</b>	Арккосеканс (в радианах)	<b>acsc (x)</b>
<b>acsch</b>	Гиперболический арккосеканс	<b>acsch (x)</b>
<b>arg</b>	Фазовый угол (в радианах)	<b>arg (x)</b>
<b>asec</b>	Арксеканс (в радианах)	<b>asec (x)</b>
<b>asech</b>	Гиперболический арксеканс	<b>asech (x)</b>
<b>asin</b>	Арсинус (в радианах)	<b>asin (x)</b>
<b>asinh</b>	Гиперболический арксинус	<b>asinh (x)</b>
<b>atan</b>	Арктангенс (в радианах)	<b>atan (x)</b>
<b>atan2</b>	Четырехквadrантный арктангенс (в радианах)	<b>atan2 (y, x)</b>
<b>atanh</b>	Гиперболический арктангенс	<b>atanh (x)</b>
<b>besselj</b>	Функция Бесселя первого рода	<b>besselj (a, x)</b>
<b>bessely</b>	Функция Бесселя второго рода	<b>bessely (a, x)</b>
<b>besseli</b>	Модифицированная функция Бесселя первого рода	<b>besseli (a, x)</b>
<b>besselk</b>	Модифицированная функция Бесселя второго рода	<b>besselk (a, x)</b>
<b>ceil</b>	Ближайшее следующее целое	<b>ceil (x)</b>
<b>conj</b>	Комплексно сопряженное число	<b>conj (x)</b>
<b>cos</b>	Косинус	<b>cos (x)</b>
<b>cosh</b>	Гиперболический косинус	<b>cosh (x)</b>
<b>cot</b>	Котангенс	<b>cot (x)</b>

ИМЯ	ОПИСАНИЕ	ПРИМЕР СИНТАКСИСА
<b>coth</b>	Гиперболический котангенс	<b>coth (x)</b>
<b>csc</b>	Косеканс	<b>csc (x)</b>
<b>csch</b>	Гиперболический косеканс	<b>csch (x)</b>
<b>erf</b>	Функция ошибок	<b>erf (x)</b>
<b>exp</b>	Экспонента	<b>exp (x)</b>
<b>floor</b>	Ближайшее предыдущее целое	<b>floor (x)</b>
<b>gamma</b>	Гамма-функция	<b>gamma (x)</b>
<b>imag</b>	Мнимая часть	<b>imag (u)</b>
<b>log</b>	Натуральный логарифм	<b>log (x)</b>
<b>log10</b>	Десятичный логарифм	<b>log10 (x)</b>
<b>log2</b>	Двоичный логарифм	<b>log2 (x)</b>
<b>max</b>	Максимум из двух аргументов	<b>max (a, b)</b>
<b>min</b>	Минимум из двух аргументов	<b>min (a, b)</b>
<b>mod</b>	Оператор деления с остатком	<b>mod (a, b)</b>
<b>psi</b>	Пси-функция и ее производные	<b>psi (x, k)</b>
<b>range</b>	Создает диапазон чисел	<b>range (a, step, b)</b>
<b>real</b>	Действительная часть	<b>real (u)</b>
<b>round</b>	Округление до ближайшего целого	<b>round (x)</b>
<b>sec</b>	Секанс	<b>sec (x)</b>
<b>sech</b>	Гиперболический секанс	<b>sech (x)</b>
<b>sign</b>	Функция знака	<b>sign (u)</b>
<b>sin</b>	Синус	<b>sin (x)</b>
<b>sinh</b>	Гиперболический синус	<b>sinh (x)</b>
<b>sqrt</b>	Квадратный корень	<b>sqrt (x)</b>
<b>tan</b>	Тангенс	<b>tan (x)</b>
<b>tanh</b>	Гиперболический тангенс	<b>tanh (x)</b>

## ВСТРОЕННЫЕ ФУНКЦИИ ОПЕРАТОРОВ

Эти встроенные функции работают не так, как встроенные математические функции. Они не упоминаются в тексте руководства, но приведены здесь, чтобы список зарезервированных имен был полным. Дополнительную информацию см. в *COMSOL Multiphysics Reference Manual* (Справочное руководство COMSOL Multiphysics).

ИМЯ	ИМЯ	ИМЯ	ИМЯ
<b>adj</b>	<b>dtang</b>	<b>linsol</b>	<b>sens</b>
<b>at</b>	<b>emetric</b>	<b>lintotal</b>	<b>shapeorder</b>
<b>ballavg</b>	<b>env</b>	<b>lintotalavg</b>	<b>side</b>
<b>ballint</b>	<b>error</b>	<b>lintotalpeak</b>	<b>sphavg</b>
<b>bdf</b>	<b>fsens</b>	<b>lintotalrms</b>	<b>sphint</b>
<b>bndenv</b>	<b>if</b>	<b>linzero</b>	<b>subst</b>
<b>centroid</b>	<b>integrate</b>	<b>mean</b>	<b>sum</b>
<b>circavg</b>	<b>isdefined</b>	<b>noenv</b>	<b>test</b>
<b>circint</b>		<b>nojac</b>	<b>timeavg</b>
<b>circumcenter</b>	<b>isinf</b>	<b>pd</b>	<b>timeint</b>
<b>d</b>	<b>islinear</b>	<b>ppr</b>	<b>try_catch</b>
<b>depends</b>	<b>isnan</b>	<b>pprint</b>	<b>up</b>
<b>dest</b>	<b>jacdepends</b>	<b>prev</b>	<b>var</b>
<b>diskavg</b>	<b>lindev</b>	<b>reacf</b>	<b>with</b>
<b>diskint</b>	<b>linper</b>	<b>realdot</b>	
<b>down</b>	<b>linpoint</b>	<b>scope.ati</b>	

## ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИЕ ФУНКЦИИ

Пользовательскую функцию можно объявить в разделах Global Definitions (Глобальные определения) и Component Definitions (Определения компонента) дерева модели, выбрав шаблон из меню Functions (Функции) и задав имя и детализированную форму функции.

ИМЯ ШАБЛОНА	АРГУМЕНТЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ	ПРИМЕР СИНТАКСИСА
Функция аналитики	Имя функции является ее идентификатором, например <b>an1</b> . Функция задана математическим выражением с аргументами. Пример: Для аргументов <b>x</b> и <b>y</b> функция принимает вид <b>sin(x)*cos(y)</b> . У функции произвольное количество аргументов.	Имя функции с аргументами через запятую в круглых скобках. Пример: <b>an1(x, y)</b>
Профиль высоты	Имя функции является ее идентификатором, например <b>elev1</b> . Служит для импорта геопространственных данных о профиле высоты из цифровых моделей профиля высоты, а также для привязки этих данных к функции от x и y. Файл DEM содержит данные о профиле высоты какого-либо участка земной поверхности. Результирующая функция ведет себя аналогично сеточной функции интерполяции.	Имя функции с аргументами через запятую в круглых скобках. Пример: <b>elev1(x, y)</b>
Колокольный импульс	Имя функции является ее идентификатором, например <b>gp1</b> . Функция колокольного импульса представляет собой колоколообразную кривую и определяется выражением $y(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}}$ Она задается параметром среднего $x_0$ и среднеквадратическим отклонением $\sigma$ . У функции один аргумент.	Имя функции с одним аргументом в круглых скобках. Пример: <b>gp1(x)</b>

ИМЯ ШАБЛОНА	АРГУМЕНТЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ	ПРИМЕР СИНТАКСИСА
Изображение	<p>Имя функции является ее идентификатором, например <b>im1</b>.</p> <p>Служит для импорта изображений форматов BMP, JPEG, PNG и GIF, а также для привязки данных RGB-модели изображения к скалярным (с одним каналом) значениям выходной функции. По умолчанию для выходных значений функции используется привязка по формуле <math>(R+G+B)/3</math>.</p>	<p>Имя функции с аргументами через запятую в круглых скобках. Пример:</p> <p><b>im1 (x, y)</b></p>
Интерполяция	<p>Имя функции является ее идентификатором, например <b>int1</b>.</p> <p>Функция интерполяции задается таблицей или файлом, содержащим значения функции в отдельных точках. Поддерживаются следующие форматы файлов: электронная таблица, сетка и секции.</p> <p>У функции от одного до трех аргументов.</p>	<p>Имя функции с аргументами через запятую в круглых скобках. Пример:</p> <p><b>int1 (x, y, z)</b></p>
Кусочная функция	<p>Имя функции является ее идентификатором, например <b>pw1</b>.</p> <p>Кусочная функция создается из фрагментов нескольких функций, каждая из которых задана на своем интервале. Задайте аргумент, методы экстраполяции и сглаживания, а также функции и их интервалы.</p> <p>У этой функции один аргумент с различными значениями на разных интервалах, которые не могут пересекаться или иметь разрывы между собой.</p>	<p>Имя функции с одним аргументом в круглых скобках. Пример:</p> <p><b>pw1 (x)</b></p>
Линейно-нарастающая функция	<p>Имя функции является ее идентификатором, например <b>rm1</b>.</p> <p>Линейно-нарастающая функция — это линейная функция, которая в определенный момент времени начинает быстро расти по закону, заданному пользователем.</p> <p>У функции один аргумент. Также ее можно сгладить.</p>	<p>Имя функции с одним аргументом в круглых скобках. Пример:</p> <p><b>rm1 (x)</b></p>

ИМЯ ШАБЛОНА	АРГУМЕНТЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ	ПРИМЕР СИНТАКСИСА
Случайное число	Имя функции является ее идентификатором, например <b>rn1</b> . Функция генерации случайных чисел создает белый шум с равномерным или нормальным распределением и может иметь один или несколько аргументов для моделирования белого шума. У функции произвольное количество аргументов.	Имя функции с аргументами через запятую в круглых скобках. Пример: <b>rn1 (x, y)</b> Аргументы x и y служат начальными числами для генерации случайных последовательностей.
Прямоугольная функция	Имя функции является ее идентификатором, например <b>rect1</b> . Прямоугольная функция равна <b>1</b> на указанном интервале и <b>0</b> на всех остальных. У функции один аргумент.	Имя функции с одним аргументом в круглых скобках. Пример: <b>rect1 (x)</b>
Ступенчатая функция	Имя функции является ее идентификатором, например <b>step1</b> . Ступенчатая функция резко возрастает с <b>0</b> до указанного значения (амплитуды) в определенной точке. У функции один аргумент. Также ее можно сгладить.	Имя функции с одним аргументом в круглых скобках. Пример: <b>step1 (x)</b>
Треугольная функция	Имя функции является ее идентификатором, например <b>tri1</b> . Треугольная функция линейно возрастает и линейно убывает на заданном интервале, а на всех остальных интервалах обращается в <b>0</b> . У функции один аргумент. Также ее можно сгладить.	Имя функции с одним аргументом в круглых скобках. Пример: <b>tri1 (x)</b>
Функция формы импульса	Имя функции является ее идентификатором, например <b>wv1</b> . Функция формы импульса — это периодическая функция, имеющая одну из следующих характеристических форм: пилообразная, синусоидальная, квадратная или треугольная. У функции один аргумент. Также ее можно сгладить.	Имя функции с одним аргументом в круглых скобках. Пример: <b>wv1 (x)</b>

ИМЯ ШАБЛОНА	АРГУМЕНТЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ	ПРИМЕР СИНТАКСИСА
Внешняя функция (только глобальные определения)	Внешняя функция задает интерфейс к одной или нескольким функциям, написанным на языке программирования C, которые, например, могут быть интерфейсными обертками к исходному коду на Фортране. Такую внешнюю функцию можно использовать, к примеру, для подключения пользовательской общей библиотеки. Обратите внимание, что расширение файла общей библиотеки зависит от платформы: .dll (Windows), .so (Linux) или .dylib (OS X).	Имя функции и соответствующее количество аргументов в круглых скобках. Пример: <b>myextfunc (a ,b)</b>
Функция MATLAB® (только глобальные определения)	К функции MATLAB® подключены одна или несколько функций, написанных на языке MATLAB®. С такими функциями можно работать так же, как и с обычными функциями COMSOL, если установлены модуль расширения LiveLink™ for MATLAB® и система MATLAB®. (Функции MATLAB® выполняются системой MATLAB® во время работы.)	Имя функции и соответствующее количество аргументов в круглых скобках. Пример: <b>mymatlabfunc (a ,b)</b>

## Унарные и бинарные операторы

---

ОЧЕРЕДНОСТЬ	ОБОЗНАЧЕНИЕ	ОПИСАНИЕ
1	<code>() {} .</code>	Группировка, списки, область действия
2	<code>^</code>	Возведение в степень
3	<code>! - +</code>	Унарные: Логическое НЕ, минус, плюс
4	<code>[]</code>	Размерность
5	<code>* /</code>	Умножение, деление
6	<code>+ -</code>	Бинарные: Сложение, вычитание
7	<code>&lt; &lt;= &gt; &gt;=</code>	Операторы сравнения: Меньше, Меньше или равно, Больше, Больше или равно, Равно
8	<code>== !=</code>	Операторы сравнения: Равно, Не равно
9	<code>&amp;&amp;</code>	Логическое И
10	<code>  </code>	Логическое ИЛИ
11	<code>,</code>	Разделитель элементов списка

## Выражения

---

### ПАРАМЕТРЫ

Выражение параметра может содержать числа, другие параметры, встроенные константы, встроенные функции выражений параметров, а также унарные и бинарные операторы. Параметры могут иметь размерность.

### ПЕРЕМЕННЫЕ

Выражение для переменной может содержать числа, параметры, константы, другие переменные, функции от выражений с переменными, а также унарные и бинарные операторы. Переменные могут иметь размерность.

### ФУНКЦИИ

Объявление функции может содержать вводные аргументы, числа, параметры, константы, функции выражений параметров с вводными аргументами, а также унарные и бинарные операторы.

## Приложение D. Форматы файлов

---

### Форматы файлов COMSOL

---

Тип файла модели COMSOL с расширением **.mph** используется по умолчанию и содержит дерево модели целиком. Файл содержит двоичные и текстовые данные. Сетка и данные о решении хранятся в двоичном формате, а вся остальная информация — в виде простого текста.

Тип файла Среды разработки приложений с расширением **.mphapp** содержит приложение, которое можно запускать в COMSOL Multiphysics, клиенте COMSOL для Windows® или в веб-браузере. Дополнительную информацию см. в *COMSOL Multiphysics Reference Manual* (Справочное руководство COMSOL Multiphysics), и в *Application Builder Reference Manual* (Справочное руководство Среды разработки приложений).

Типы двоичных и текстовых файлов COMSOL с расширениями **.mphbin** и **.mptxt** соответственно содержат объекты геометрии или объекты сетки, которые можно импортировать прямо в разделы Geometry (Геометрия) и Mesh (Сетка) дерева модели.

Тип файла Построителя физик с расширением **.mphphb** содержит один или несколько интерфейсов физик, которые доступны в Мастере создания моделей. Дополнительную информацию см. в «Руководстве по Построителю физик».

Дополнительную информацию обо всех остальных форматах, поддерживаемых COMSOL, см. в разделе «Поддерживаемые внешние форматы файлов».

ТИП ФАЙЛА	РАСШИРЕНИЕ	ЧТЕНИЕ	ЗАПИСЬ
Модель COMSOL	.mph	Да	Да
Среда разработки приложений	.mphapp	Да	Да
Двоичные данные	.mphbin	Да	Да
Тестовые данные	.mptxt	Да	Да
Генератор интерфейсов для новой физики	.mphphb	Да	Да

## Поддерживаемые внешние форматы файлов

### САПР

Модули CAD Import (Импорт данных из САПР) и Design (Проектирование) позволяют импортировать ряд популярных типов файлов САПР. Поддержка дополнительных типов файлов доступна через двунаправленный интерфейс, который реализован в модулях расширения LiveLink для САПР и File Import (Импорт файлов) для CATIA® V5.

Типы файлов DXF (2D), VRML (3D) и STL (3D) импортируются средствами COMSOL Multiphysics без каких-либо модулей расширения. Если в таблице ниже не указано иное, импорт перечисленных в ней типов файлов поддерживается всеми версиями COMSOL для операционных систем Linux®, Mac OS X и Windows®.

ТИП ФАЙЛА	РАСШИРЕНИЕ	ЧТЕНИЕ	ЗАПИСЬ
AutoCAD® <sup>1,2,3</sup>	.dwg	Да	Да <sup>9</sup>
Inventor® <sup>1,2,3</sup>	.ipt, .iam	Да	Да <sup>9</sup>
NX® <sup>1,4</sup>	.prt	Да	Нет
PTC® Creo® Parametric™ <sup>1,3</sup>	.prt, .asm	Да	Да <sup>9</sup>
PTC® Pro/ENGINEER® <sup>1,3</sup>	.prt, .asm	Да	Да <sup>9</sup>
Revit® Architecture <sup>3,5</sup>	.rvt	Да <sup>9</sup>	Да <sup>9</sup>
Solid Edge® <sup>3,6</sup>	.par, .asm	Да <sup>9</sup>	Да <sup>9</sup>
SOLIDWORKS® <sup>1,2,3</sup>	.sldprt, .sldasm	Да	Да <sup>9</sup>
DXF (3D <sup>1,2</sup> и 2D)	.dxf	Да	Да <sup>10</sup>
Parasolid® <sup>1</sup>	.x_t, .xmt_txt, .x_b, .xmt_bin	Да	Да
ACIS® <sup>1</sup>	.sat, .sab, .asat, .asab	Да	Да
STEP <sup>1</sup>	.step, .stp	Да	Нет
IGES <sup>1</sup>	.iges, .igs	Да	Нет
CATIA® V5 <sup>2,7</sup>	.CATPart, .CATProduct	Да	Нет
VRML, v1 <sup>8</sup>	.vrm, .wrl	Да	Нет

ТИП ФАЙЛА	РАСШИРЕНИЕ	ЧТЕНИЕ	ЗАПИСЬ
STL <sup>8</sup>	.stl	Да	Да

<sup>1</sup>Требуется один из продуктов LiveLink™ for AutoCAD®, Revit®, PTC® Creo® Parametric™, Inventor®, PTC® Pro/ENGINEER®, Solid Edge®, SOLIDWORKS®, или модуль CAD Import (Импорт данных из САПР); или модуль Design (Проектирование)

<sup>2</sup>Функция импорта поддерживается только в операционных системах Windows®

<sup>3</sup>Синхронизация файлов между системой COMSOL и связанной САПР поддерживается только в операционных системах Windows® 7, 8 и 8.1

<sup>4</sup>Импорт поддерживается только в операционных системах Windows® и Linux

<sup>5</sup>Требуется LiveLink™ for Revit®

<sup>6</sup>Требуется LiveLink™ for Solid Edge®

<sup>7</sup>Требуется модуль CAD Import (Импорт данных из САПР); или модуль Design (Проектирование); или один из продуктов LiveLink™ для AutoCAD®, PTC® Creo® Parametric™, Inventor®, PTC Pro/ENGINEER®, Solid Edge®, или SOLIDWORKS®) и File Import for CATIA® V5

<sup>8</sup>Ограничено до одной геометрической области

<sup>9</sup>Загрузка/выгрузка из файла средствами связанной САПР при условии, что исходная геометрия была создана в этой САПР

<sup>10</sup>Запись в файл поддерживается только для двумерной геометрии

## ECAD

Модуль ECAD Import (Импорт данных из ECAD) позволяет импортировать файлы двумерных макетов и автоматически преобразовывать их в трехмерные модели САПР. Типа файла Touchstone служит для экспорта S-параметров, полного сопротивления и значений допуска в реальном времени и из частотного анализа. Тип файла SPICE Circuit Netlist при импорте преобразуется в последовательность точечных элементов цепи в узле Electrical Circuit (Электрический ток).

ТИП ФАЙЛА	РАСШИРЕНИЕ	ЧТЕНИЕ	ЗАПИСЬ
NETEX-G <sup>1</sup>	.asc	Да	Нет
ODB++ <sup>1</sup>	.zip, .tar, .tgz, .tar.gz	Да	Нет
ODB++(X) <sup>1</sup>	.xml	Да	Нет
GDS <sup>1</sup>	.gds	Да	Нет
Touchstone <sup>2</sup>	.s2p, .s3p, .s4p, ...	Нет	Да

ТИП ФАЙЛА	РАСШИРЕНИЕ	ЧТЕНИЕ	ЗАПИСЬ
SPICE Circuit Netlist <sup>3</sup>	.cir	Да	Нет

<sup>1</sup>Требуется модуль ECAD Import (Импорт данных из ECAD)

<sup>2</sup>Требуется один из следующих модулей: AC/DC (Переменный/постоянный ток), RF (Радиочастоты), MEMS (Микроэлектромеханические системы) или Wave Optics (Волновая оптика)

<sup>3</sup>Требуется один из следующих модулей: AC/DC (Переменный/постоянный ток), RF (Радиочастоты), MEMS (Микроэлектромеханические системы), Plasma (Плазма) или Semiconductor (Полупроводники)

## БАЗЫ ДАННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Модуль Chemical Reaction Engineering (Разработка химических реакций) может считывать файлы CHEMKIN<sup>®</sup> для моделирования сложных химических реакций в газовой фазе. Модуль Plasma (Плазма) может считывать из файлов LXCAT наборы поперечных сечений при столкновении электронов.

ТИП ФАЙЛА	РАСШИРЕНИЕ	ЧТЕНИЕ	ЗАПИСЬ
CHEMKIN <sup>®</sup> <sup>1</sup>	.dat, .txt, .inp <sup>3</sup>	Да	Нет
CAPE-OPEN <sup>1</sup> (прямое подключение)	н/д	н/д	н/д
Файл LXCAT <sup>2</sup>	.lxcat, .txt	Да	Нет

<sup>1</sup>Требуется модуль Chemical Reaction Engineering (Разработка химических реакций)

<sup>2</sup>Требуется модуль Plasma (Плазма)

<sup>3</sup>Наиболее популярные расширения; в общем случае допустимо любое расширение

## СЕТКА

Файлы типа NASTRAN<sup>®</sup> Bulk Data служат для импорта объемных сеток. Типы файлов VRML и STL служат для импорта треугольных поверхностных сеток и не могут использоваться для создания объемных сеток. При импорте в качестве геометрии файлы VRML и STL могут стать основой для создания объемной сетки в определенной геометрической области.

ТИП ФАЙЛА	РАСШИРЕНИЕ	ЧТЕНИЕ	ЗАПИСЬ
NASTRAN <sup>®</sup> Bulk Data	.nas, .bdf, .nastran, .dat	Да	Да
VRML, v1	.vrm, .wrl	Да	Нет
STL	.stl	Да	Да

## ИЗОБРАЖЕНИЯ И ВИДЕОКЛИПЫ

Результаты визуализации можно экспортировать в популярные графические форматы, перечисленные в таблице ниже. Изображения можно считывать и использовать для интерполяции при физическом моделировании.

Анимированные элементы можно экспортировать в форматы Animated GIF, Adobe® Flash® и AVI.

ТИП ФАЙЛА	РАСШИРЕНИЕ	ЧТЕНИЕ	ЗАПИСЬ
JPEG	.jpg, .jpeg	Да	Да
PNG	.png	Да	Да
BMP	.bmp	Да	Да
TIFF	.tif, .tiff	Нет	Да
GIF	.gif	Да	Да
EPS (только одномерные графы)	.eps	Нет	Да
GIF с анимацией	.gif	Нет	Да
Adobe® Flash®	.swf	Нет	Да
AVI <sup>1</sup>	.avi	Нет	Да

<sup>1</sup>Доступно только для Windows®

## ЯЗЫКИ ПРОГРАММИРОВАНИЯ И ЭЛЕКТРОННЫЕ ТАБЛИЦЫ

Файлы моделей для Java<sup>®</sup> — это редактируемые файлы сценариев с расширением *.java*, содержащие последовательность команд COMSOL в виде программного кода на Java<sup>®</sup>. Для добавления дополнительных команд измените эти файлы в текстовом редакторе. Эти файлы Java<sup>®</sup> можно скомпилировать в файлы классов Java<sup>®</sup> с расширением *.class* и запускать как отдельные приложения.

Файлы моделей MATLAB<sup>®</sup> — это редактируемые файлы сценариев (М-файлы), аналогичные файлам моделей для Java<sup>®</sup>, но предназначенные для системы MATLAB<sup>®</sup>. Эти файлы моделей с расширением *.m* содержат последовательность команд COMSOL в виде М-файлов MATLAB<sup>®</sup>. Файлы моделей можно запускать в MATLAB<sup>®</sup> так же, как и обычные сценарии в М-файлах. Для добавления дополнительных команд COMSOL или общих команд MATLAB<sup>®</sup> файлы можно изменить в текстовом редакторе. Для запуска файлов моделей в формате М-файлов необходим модуль расширения COMSOL LiveLink<sup>™</sup> for MATLAB<sup>®</sup>.

ТИП ФАЙЛА	РАСШИРЕНИЕ	ЧТЕНИЕ	ЗАПИСЬ
MATLAB <sup>®</sup> : файл модели для MATLAB <sup>®</sup>	.m	Нет	Да
MATLAB <sup>®</sup> : Функция <sup>1</sup>	.m	Да	Нет
Java <sup>®</sup> : файл модели для Java <sup>®</sup>	.java	Нет	Да
Java <sup>®</sup> : скомпилированный файл модели для Java <sup>®</sup>	.class	Да	Нет
C: Функция	.dll <sup>3</sup> , .so <sup>4</sup> , .dylib <sup>5</sup>	Да	Нет
Excel <sup>®2</sup>	.xlsx	Да	Да

<sup>1</sup>Требуется LiveLink<sup>™</sup> for MATLAB<sup>®</sup>

<sup>2</sup>Требуется LiveLink<sup>™</sup> for Excel<sup>®</sup>, доступный только для Windows<sup>®</sup>

<sup>3</sup>Доступно только для Windows<sup>®</sup>

<sup>4</sup>Доступно только для Linux<sup>®</sup>

<sup>5</sup>Доступно только для OS X

## ФОРМАТЫ ЧИСЛОВЫХ И ИНТЕРПОЛЯЦИОННЫХ ДАННЫХ

Файлы сеток, секций и электронных таблиц можно использовать для задания функций интерполяции. Типы файлов секций и электронных таблиц можно далее считывать и использовать для задания кривых интерполяции, а также экспортировать в них результаты. Кроме того, таблицы можно копировать и вставлять в файлы электронных таблиц.

Параметры и переменные можно импортировать и экспортировать в простой текст, значения, разделенные запятыми, или в типы файлов данных.

Файлы таблиц непрерывных и дискретных цветов служат для хранения пользовательских таблиц цветов для визуализации результатов.

Файлы цифровых моделей профиля высоты (DEM) можно считывать и использовать в качестве параметрической поверхности для задания геометрии.

ТИП ФАЙЛА	РАСШИРЕНИЕ	ЧТЕНИЕ	ЗАПИСЬ
Формат для копирования и вставки электронной таблицы	н/д	Да	Да
Электронная таблица Excel <sup>1</sup>	.xlsx	Да	Да
Таблица	.txt, .csv, .dat	Да	Да
Сетка	.txt	Да	Да
С разбивкой на разделы	.txt, .csv, .dat	Да	Да
Электронная таблица	.txt, .csv, .dat	Да	Да
Параметры	.txt, .csv, .dat	Да	Да
Переменные	.txt, .csv, .dat	Да	Да
Непрерывная и дискретная таблица цветов	.txt	Да	Нет
Точечные данные для наборов данных по точкам сечения	.txt	Да	Нет
DEM	.dem	Да	Нет

<sup>1</sup>Требуется LiveLink™ for Excel®, доступный только для Windows®

## Приложение Е. Подключение модулей расширения LiveLink™

В следующей таблице приведены опции запуска ПО COMSOL и различных партнерских приложений с помощью модулей расширения LiveLink.

ПО COMSOL®	Можно запускать COMSOL из партнерского приложения	Можно запускать партнерское приложение из COMSOL	Можно подключаться к запущенным сеансам
LiveLink™ for Excel®	Да <sup>1</sup>	Да <sup>2</sup>	Нет
LiveLink™ for MATLAB®	Да <sup>3</sup>	Да <sup>4</sup>	Да <sup>5</sup>
LiveLink™ for AutoCad®	Нет	Нет	Да
LiveLink™ for Revit®	Нет	Нет	Да
LiveLink™ for PTC®Creo® Parametric™	Нет	Нет	Да
LiveLink™ for Inventor®			
- Двухнаправленный режим	Нет	Нет	Да
- Однооконный режим	Да	Нет	Нет
LiveLink™ for PTC® Pro/ENGINEER®	Нет	Нет	Да
LiveLink™ for Solid Edge®	Нет	Нет	Да
LiveLink™ for SOLIDWORKS®			
- Двухнаправленный режим	Нет	Нет	Да
- Однооконный режим	Да	Нет	Нет

<sup>1</sup>При загрузке модели COMSOL из Excel® автоматически открывается окно модели COMSOL и создается соответствующая привязка. Окно модели COMSOL отображает геометрию, сетку и результаты расчетов.

<sup>2</sup>При запуске в среде COMSOL Desktop модели, содержащей таблицу со ссылками на электронную таблицу Excel®, в фоновом режиме автоматически запускается приложение Excel®.

<sup>3</sup>Сервер COMSOL Multiphysics можно запустить из рабочего сеанса MATLAB® с помощью **системной** команды, а затем подключиться к этому серверу, набрав **mphstart** в командной строке MATLAB®.

<sup>4</sup>Ярлык COMSOL 5.1 with MATLAB® на рабочем столе запускает сервер COMSOL Multiphysics и MATLAB®, а затем автоматически соединяет их друг с другом. При запуске модели COMSOL в интерфейсе COMSOL Desktop, содержащем функцию MATLAB® (Global Definitions > Functions (Глобальные определения > Функции)), автоматически открывается среда MATLAB® и устанавливается соединение.

<sup>5</sup>Для подключения рабочего сеанса MATLAB® к запущенному серверу COMSOL Multiphysics можно ввести команду COMSOL **mphstart** в командной строке MATLAB®.



# Индекс

---

- C** COMSOL Multiphysics
  - встроенный формат САПР 33
  - просмотр 30
- D** DirectX 11
- E** Excel® 169
- H** HPC 127
- J** Java 167
  - Java-файл 29
- L** LU-факторизация 42
- M** MATLAB® 167
  - M-файл 29
  - MPH-файлы
    - полные и компактные 24
    - сохранение 62, 81
  - MPI 128
- O** OpenGL 11
- A** адаптивная сетевая лицензия 127
  - анализ
    - пример, параметрический анализ 52
    - сходимости 47
  - анализ собственной частоты 18
  - анализ сходимости 47, 53
- Б** бесконечные элементы 29
  - библиотеки приложений
    - MPH-файлы 23
    - примеры 23
    - просмотр 23
    - типы файлов 24
  - браузер материалов
    - определение 10
    - раздел материалов 35, 64
- В** версия Linux 16
  - версия OS X 16
  - визуализация 9
    - таблица цветов 77, 80
    - точность 44
  - вкладка Home (Главная) 15
  - восстановление без изменения полинома 48
- В** встроенные
  - константы, функции и переменные 22
  - материалы 35, 62
  - переменные 80
- выбор граничного условия, модель электрической шины 70
- выбор нескольких границ 96
- выборка 96
- выражения
  - введенные вручную 48, 59
  - единицы измерения, указание 48
  - замена 46, 80
  - логические 46
  - пользовательские 45
- высокопроизводительные вычисления 127
- Г** геометрические измерения
  - параметрический анализ 58
  - параметры 19
- геометрия
  - библиотеки приложений 59
  - загрузка из файла 58, 59
  - импорт 32
  - окно настроек 8
  - параметризованные 19, 58, 60
  - построение 58
  - формат САПР 32
- глобальные параметры 20, 36, 49
- границы
  - область действия переменных 21
- границы 71
  - добавление в выборку 72
  - область действия переменных 21
- граничное условие 68
  - автоматически заданное 40
  - граничная нагрузка 39
  - заземление, электрическое 73
  - изоляция 70

- интерфейс материала 40
  - окно настроек 8
  - свободный 37
  - теплопередача 68
  - фиксированное ограничение 38
  - электрическая шина, настройка 68
  - электрический ток 68, 71
  - граничная нагрузка 40
  - графика
    - построение и аппаратные ресурсы 11
  - группа диаграмм 17
  - трехмерные, добавление 45
- А** Джоулев нагрев
- мультифизическая связь 74
  - уравнения 68
- дерево модели
- геометрия 29
  - корневой узел 17
  - лента 15
  - определение 58
  - построение 16
  - построитель моделей 16
  - пример 28
  - узел Global Definitions (Глобальные определения) 17, 36, 58
  - узел Materials (Материалы) 29, 35
  - узел Results (Результаты) 17
  - узел Study (Исследование) 18, 29
  - узлы 16
- диаграмма Isosurface (Изоповерхность) 77
- диаграмма Max/Min Volume (Макс./мин. объем) 48
- диаграмма Multislice (Мультисрезы) 77
- диаграмма сходимости 9, 76
- диаграммы 45
- выражение, пользовательское 45
  - дерево модели 29
  - макс./мин. объем 48
  - окон 9
  - поверхности 44, 46
  - повторное создание 45, 49
- динамическая справка 10
- дискретизировать 40
- документация, модели 23
- дополнительные темы 83
- Е** единицы измерения, изменение 44, 99
- Ж** журнал модели 29
- З** заземление, граничное условие 73
- запуск моделирования 76
  - зарезервированное имя 22
- И** идеально подобранный слой (PML) 29
- изображения, создание миниатюр 82
  - импорт геометрии 32, 33
  - интерфейс Electric Current (Электрический ток)
    - мультифизический 57, 74
    - обзор 63
    - определение граничных условий 64
  - интерфейс Heat Transfer in Solids (Теплопередача в твердых телах)
    - мультифизический 57, 74
    - определение граничных условий 69
    - обзор 68
  - интерфейс Laminar Flow (Ламинарный поток) 104
  - интерфейс Solid Mechanics (Механика твердого тела) 31
  - модули расширения 93
  - интерфейс материалов
    - механический контакт 40
    - точность визуализации 44
  - интерфейс передачи сообщений (Message Passing Interface) 128
  - интерфейс физик 13
    - Electric Current (Электрический ток) 57
    - Heat Transfer in Solids (Теплопередача в твердых телах) 57
    - Joule Heating (Джоулев нагрев) 56
    - Laminar Flow (Ламинарный поток) 104

- Solid Mechanics (Механика твердого тела) 31
- информационные окна 9
- исследование в частотной области 18
- исследование, зависящее от времени 18
- исследования
  - вычислительные решения 52, 76
  - дерево модели 29
  - задание 41
  - предустановленные 57
  - пример, мультисеточные итерации 52
  - пример, стационарные 41
  - типы 18
- итеративный решатель
  - мультисетка 31
  - предобусловливание 51
- К**
  - кнопка Build All (Построить все)
    - геометрия 61
    - сетки 41, 76
  - кнопка Create Selection (Создать выборку) 96
  - кнопка Image Snapshot (Снимок экрана) 82
  - кнопка отмены 10
  - компактные MPN-файлы 25
  - конечный элемент
    - предобусловливание 51
    - разреженная матрица 42
    - сетка 40
    - четырёхгранники 40
  - константы
    - математические и физические типы 23
  - контекстная вкладка 15
  - контекстное меню
    - разделы областей и границ 70
  - корневой узел
    - единицы измерения по умолчанию 118
    - мастер создания моделей 31
    - миниатюры моделей 82
    - определение 17
  - крутящий момент, приложенный 30
- Л**
  - лента
    - Build All (Построить все) 61
    - Build Mesh (Построить сетку) 76
    - Compute (Вычислить) 52, 98, 114
    - Work Plane (Рабочая плоскость) 131
    - вкладка Physics (Физика) 38, 94
    - добавление материала 35, 67, 103
    - импорт геометрии 33
    - окна 10, 43, 133
    - определение 8, 14
    - построитель моделей 15
    - пример 6
- М**
  - максимальный объем, оценка 48
  - мастер создания моделей
    - добавление физики 18, 31, 56
    - исследование 18, 57
    - пользовательские исследования 32, 57
    - предустановленные исследования 32, 57
    - просмотр 31, 56
    - размерность пространства 31, 56
    - создание модели 12
    - узел Component (Компонент) 18
  - материалы
    - дерево модели 29
    - медь 54
    - области, присвоение 65
    - окно настроек 8
    - сталь 35, 45
    - титановый сплав 54
  - математические константы и функции 23
  - матрица 42
  - механика конструкций
    - напряжения и деформации 54, 64
    - напряжение по Мизесу 44
    - пластическая деформация 45
    - проектирование 47
  - миниатюра 82
  - многоядерные процессоры 127
  - модальная вкладка 15
  - модели
    - дискретизация 40
    - документация 23

- задание 16
  - механика конструкций 30
  - рабочий процесс 28
  - симметрия 79
  - сохранение 62
  - моделирование, запуск 76
  - модули расширения
    - AC/DC (Переменный/постоянный ток) 55
    - CAD Import (Импорт данных из САПР) 130, 163
    - CFD (Вычислительная гидродинамика) 100
    - Chemical Reaction Engineering (Разработка химических реакций) 165
    - ECAD Import (Импорт данных из ECAD) 164
    - MEMS (Микроэлектромеханические системы) 93
    - Plasma (Плазма) 165
    - Structural Mechanics (Механика конструкций) 30, 40
    - библиотеки приложений 23
    - список физик 31, 57
    - типы исследований 57
  - модули расширения LiveLink™ 169
  - модуль AC/DC (Переменный/постоянный ток) 55
  - модуль CAD Import (Импорт данных из САПР) 130, 163
  - модуль CFD (Вычислительная гидродинамика) 100
  - модуль Chemical Reaction Engineering (Разработка химических реакций) 165
  - модуль ECAD Import (Импорт данных из ECAD) 164
  - модуль Heat Transfer (Теплопередача) 100
  - модуль MEMS (Микроэлектромеханические системы)
    - тепловое расширение 93
  - модуль Plasma (Плазма) 165
  - модуль Structural Mechanics (Механика конструкций)
    - библиотека приложений 30
    - механический контакт 40
    - тепловое расширение 93
  - мультифизический интерфейс Joule Heating (Джоулев нагрев) 56
  - мультифизический узел 68, 69, 74, 94
  - мультифизические модели 54
  - мультифизические явления 54
- Н**
- наборы данных, определение 17
  - напряжение по Мизесу 43, 100
  - напряжение текучести 30, 45
  - настраиваемый рабочий стол 25
  - настройки 11
  - настройки параметра
    - выражение 49
    - имя 49
  - начальные условия 8
  - новая модель, создание 12, 14
- О**
- области
    - материалы 65
    - область действия переменных 21
    - удалить из выборки 65
    - физики 38
  - область действия
    - глобальные определения 58
    - имя переменной 22
    - параметры и переменные 21
    - параметры и переменные, определение 19
  - область действия точек, переменных 21
  - облачные вычисления 127
  - обновление Библиотеки приложений 25
  - объединение форм, геометрия 61
  - окно External Process (Внешний процесс) 10
  - окно Graphics (Графика) 9
    - выбор граничного условия 38, 39, 73
    - геометрия 34

- геометрия вращения 38, 77, 79
- диаграмма 43
- использование 34, 62
- панель масштабирования 39
- окно Help (Справка)
  - определение 10
  - просмотр 16
- окно Log (Журнал) 10, 43
- окно Messages (Сообщения) 9, 43
- окно Progress (Ход выполнения) 9
- окно Select Study (Выбор исследования) 14
- окно Selection List (Список выборок) 10, 133
- окно Settings (Настройки) 8, 16
- окно Table (Таблица) 10
  - диаграмма графа 52
  - результаты для гаечного ключа 48
- основное напряжение 100
- отчеты, определение 17
- охлаждение
  - воздушное 54
  - естественная конвекция 58
- оценка
  - максимального объема 48
  - напряжение по Мизесу 48
- П** панель инструментов быстрого доступа 8, 16
- панель инструментов Graphics (Графика)
  - кнопка просмотра по умолчанию 38, 44, 73, 82
  - кнопка регулировки масштаба 61, 78
  - кнопка создания снимка экрана 82
- параллелизм с общей памятью 127
- параллельные вычисления 127
- параметрический анализ 18
  - диапазон, задание 51
  - пример 50
  - сетки 49
- параметрическое исследование 58
- параметры 19
  - выражение 19
  - глобальные 20
  - диапазон значений 51
  - задание 49, 58
  - изменение 60
  - использование, привязка 71
  - сетки 49
  - область действия 58
- переименование групп диаграмм 46
- переменные
  - встроенные 22
  - выражение 20
  - дополнительные темы 83
  - область действия 58
  - область действия, ограничение 21
  - пример, встроенные 52
- поверхностная диаграмма
  - диапазон таблицы цветов 80
  - деформация 44
  - замена выражения 80
  - настройки 46
  - обновление 78, 80
  - плотность электрического тока 79
  - результаты для электрической шины 77
- поле структурного смещения 40
- полиномиальные функции 40
- полные MPH-файлы 24
- пользовательские исследования 57
- пользовательский интерфейс COMSOL Desktop 6
  - обзор 6
- построитель моделей
  - импорт геометрии 33
  - лента 15
  - определение 16
  - пример 28
  - пример последовательности узла 37
  - раскрытие разделов 68
- предобусловливание 51
- предустановленные исследования 57
- приложение 23
- пример
  - базовый, механика конструкций 30
  - расширенный, электронагрев 54

- программное построение 11
- программный код
  - M-файл модели 29
  - файла модели для Java 29
- производные 23
- производные значения
  - глобальная оценка 52
  - максимальный объем 48, 52
  - определение 17
- прямой решатель 43
- Р** рабочий процесс 28
- раздел границ
  - контекстное меню 70
- раздел области
  - контекстное меню 70
- размер элемента сетки
  - настройки 41
  - параметры, задание 19, 75
- размерность пространства 12
- разреженная система матричных уравнений 42
- разрешение кривизны, сетка 75
- расчетные исследования 52
- расширенные опции
  - исследования 127
- режимы построения 11
- результаты
  - диапазон таблицы цветов 77, 80
  - единицы измерения, изменение 44
  - качество, точность 44
  - настройки поверхности, изменение 77
  - отображение 44
  - опция восстановления 44, 46, 48
  - производные значения 48, 52
- решатели
  - итеративные 50, 51
  - использование 41
  - конфигурации 42, 51
  - настройки по умолчанию 41
  - настройки по умолчанию, изменение 42
  - настройки с ограничением по памяти 42
- прямые 43
  - стационарные 41, 51
  - требования к памяти 41
- С** сетка
  - анализ сходимости 47
  - дерево модели 29
  - конечный элемент 40
  - настройки 40
  - неструктурированный
    - четырёхгранник 74
  - параметризация 49, 74
  - плотность 49
  - под управлением пользователя 50, 74
  - под управлением физик, по умолчанию 74
  - уточнение 49
- сетка под управлением пользователя 50
- система матричных уравнений 42
- смешанный параллелизм 128
- сообщение об ошибке, недостаточно памяти 42
- сохранение файлов 62, 81
- список окон 43, 133
- среда COMSOL Desktop
  - на Linux 16
  - на OS X 16
  - обзор 6
  - персонализация 25
- среда разработки приложений 5, 6, 8, 20, 23, 149
- средняя температура 119
- стационарное исследование 18, 32, 41
- степени свободы 47, 53
- структурный анализ 30
- Т** таблицы, оценка 52
- температура 77, 115
- температура, средняя 119
- тепловое расширение 54, 65
- точность
  - анализ сходимости 47
  - опция восстановления 44

- модель электрической шины 63
  - просмотр 35, 63
  - требования к памяти (RAM) 41
- У** увеличение 115
- узел Cluster Computing (Кластерные вычисления) 127
- узел Cluster Sweep (Кластерный анализ) 127
- узел Component (Компонент), добавление материалов 63
- узел Definitions (Определения) 29
- узел Export (Экспорт), определение 17
- узел Fixed Constraint (Фиксированное ограничение) 38
- узел Functions (Функции) 58
- узел Geometry (Геометрия) 29
- узел Global Definitions (Глобальные определения) 17
  - область действия 21, 58
  - параметры 58
  - переменные 20
  - функции 58
- узел Initial Values (Исходные значения)
  - интерфейс Electric Current (Электрический ток) 69
  - интерфейс Heat Transfer in Solids (Теплопередача в твердых телах) 69
  - интерфейс Solid Mechanics (Механика твердого тела) 37
- узел Materials (Материалы) 35, 62
- узел Parameters (Параметры) 58, 83
- узел Results (Результаты)
  - группа трехмерных диаграмм 48, 79
  - настройки электрической шины по умолчанию 77
  - подузлы 17
  - узел поверхности, добавление 79
- узел Study (Исследование) 18
  - последовательность решения 76
- узел Tables (Таблицы) 17
- узел Variables (Переменные) 20, 58
- узлы 16
  - переупорядочение 29
  - функция по умолчанию 37
- уравнение
  - встроенное 68
  - пользовательские 45
- уровень области 69
- Ф** физики
  - граничные условия 68
  - дерево модели 29
  - Джоулев нагрев 54, 68
  - добавление 56
  - ламинарный поток 104
  - теплопередача 56
  - электромагнитный нагрев 56
- функции
  - ppg(), опция восстановления 48
  - встроенные 22
  - дополнительные темы 83
  - математические 23
  - область действия 58
- функция по умолчанию 68
- Ч** частотная характеристика 19
  - четырёхгранник, полиномиальные функции 40
- Ш** шкала выполнения 10
- Э** экспорт изображений 82
  - электрическое напряжение 55
  - падение напряжения, параметр 58
  - узел физики 72
  - электронагрев 55

