

ВВЕДЕНИЕ
В COMSOL Multiphysics

Введение в COMSOL Multiphysics

© 1998–2018 COMSOL

Защищено патентами США, перечисленными на странице www.comsol.ru/patents, а также патентами США 7,519,518; 7,596,474; 7,623,991; 8,457,932; 8,954,302; 9,098,106; 9,146,652; 9,323,503; 9,372,673; и 9,454,625. Патенты заявлены.

Настоящая документация и описанное в ней программное обеспечение распространяются в соответствии с условиями лицензионного соглашения [COMSOL Software License Agreement \(www.comsol.ru/comsol-license-agreement\)](http://www.comsol.ru/comsol-license-agreement) и могут использоваться и копироваться исключительно в соответствии с его условиями.

COMSOL, логотип COMSOL, COMSOL Multiphysics, COMSOL Desktop, COMSOL Server, LiveLink и LiveLink являются товарными знаками или зарегистрированными товарными знаками COMSOL AB. Любые другие товарные знаки являются собственностью их владельцев. Компания COMSOL AB, ее дочерние компании и продукция не связаны с этими владельцами, не представляются, не финансируются и не поддерживаются ими. Полный список таких владельцев товарных знаков представлен на веб-сайте www.comsol.ru/trademarks.

Версия: COMSOL 5.4

Контактная информация

Воспользуйтесь страницей контактов COMSOL, размещенной по адресу www.comsol.ru/contact, для подачи общих запросов, связи со службой технической поддержки, а также для поиска необходимого адреса или номера телефона. Для получения контактной информации вы также можете обратиться к странице международных офисов продаж, размещенной по адресу www.comsol.ru/contact/offices.

Если вам необходимо обратиться в службу поддержки, соответствующая онлайн-форма расположена на странице COMSOL Access, размещенной по адресу www.comsol.ru/support/case. Другие полезные ссылки:

- Центр поддержки: www.comsol.ru/support
- Загрузка продуктов: www.comsol.ru/product-download
- Обновления продуктов: www.comsol.ru/support/updates
- Блог COMSOL: www.comsol.ru/blogs
- Форум: www.comsol.ru/community
- События: www.comsol.ru/events
- Галерея видеороликов COMSOL: www.comsol.ru/video
- База знаний: www.comsol.ru/support/knowledgebase

Идентификатор: CM010004

Содержание

Введение	5
COMSOL Desktop®	6
Пример 1. Анализ на прочность гаечного ключа	33
Model Wizard (Мастер создания моделей)	33
Geometry (Геометрия)	35
Materials (Материалы)	38
Global Definitions (Глобальные определения).....	39
Физический интерфейс и граничные условия.....	41
Mesh (Сетка).....	44
Study (Исследование)	46
Results (Результаты).....	46
Анализ сходимости	49
Пример 2. Электрическая шина — мультифизическая модель	58
Model Wizard (Мастер создания моделей)	60
Global Definitions (Глобальные определения).....	63
Автодополнение и поиск по параметрам и переменным.....	64
Geometry (Геометрия)	66
Materials (Материалы)	69
Физический интерфейс и граничные условия.....	75
Mesh (Сетка).....	82
Study (Исследование)	83

Results (Результаты)	84
Создание приложения в Application Builder (Среде разработки приложений)	92
Расширенные возможности	103
Parameters (Параметры), Functions (Функции), Variables (Переменные) и Couplings (Взаимосвязи)	103
Material Properties (Свойства материалов) и Material Libraries (Библиотеки материалов)	108
Добавление сеток	110
Добавление физических интерфейсов	113
Parametric Sweeps (Параметрические исследования) .	137
Parallel Computing (Параллельные вычисления)	151
Режим клиент-сервер (Client-Server) в COMSOL Multiphysics	154
Приложение А. Построение геометрии	157
Приложение В. Сочетания клавиш и действия мышью . .	173
Приложение С. Элементы языка и зарезервированные имена	179
Приложение D. Форматы файлов	194
Приложение E. Подключение модулей расширения группы LiveLink™	201

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 **Model Builder** (Построителя моделей). Оно также включает краткое руководство по созданию приложений в **Application Builder** (Среде разработки приложений).

Если вы еще не установили ПО, установите его, используя следующие инструкции: www.comsol.ru/product-download.

В программное обеспечение встроена обширная документация, дополняющая это руководство. Учебные и дополнительные материалы размещены на веб-сайте COMSOL, в том числе в видеогалерее по адресу www.comsol.ru/videos и в корпоративном блоге COMSOL по адресу www.comsol.ru/blogs.

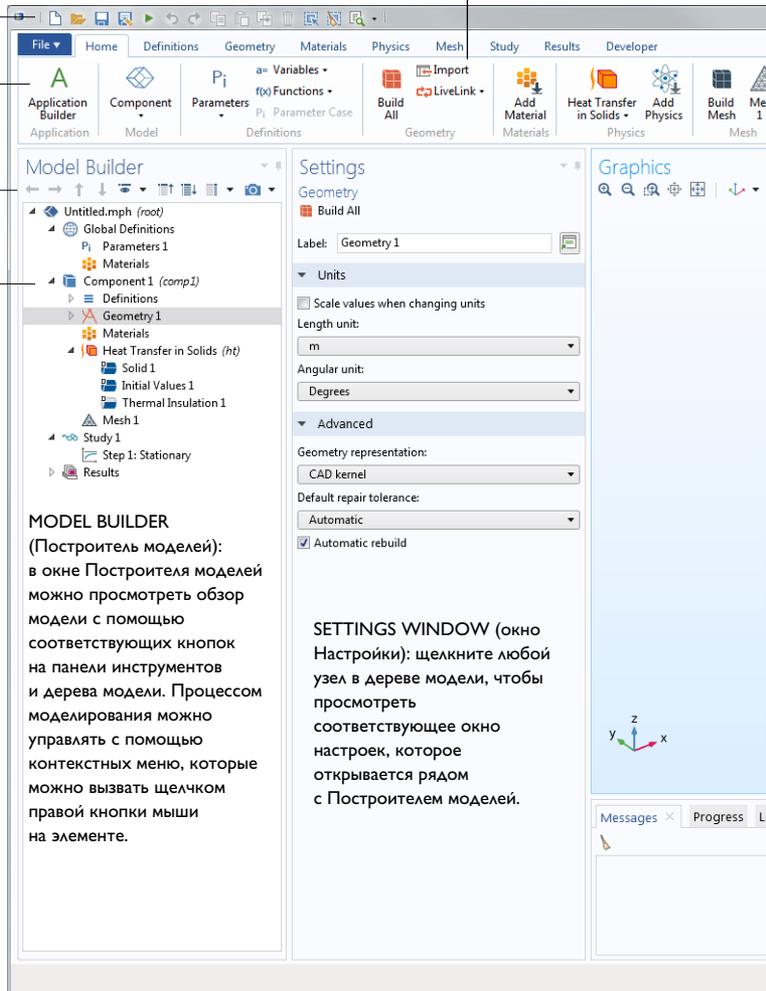
QUICK ACCESS TOOLBAR (Панель быстрого доступа): используйте эти кнопки для доступа к таким функциям, как открытие и сохранение файлов, отмена и повтор действий, копирование, вставка и удаление.

RIBBON (Лента): На вкладках ленты имеются кнопки и раскрывающиеся списки для управления всеми шагами в процессе моделирования.

APPLICATION BUILDER (Среда разработки приложений): нажмите эту кнопку, чтобы перейти к Среде разработки приложений и создать приложение на основе вашей модели.

MODEL BUILDER TOOLBAR (Панель инструментов Построителя моделей)

MODEL TREE (Дерево модели): в Дереве модели представлен обзор модели и всех необходимых функций и операций для построения и решения модели, а также для обработки результатов.

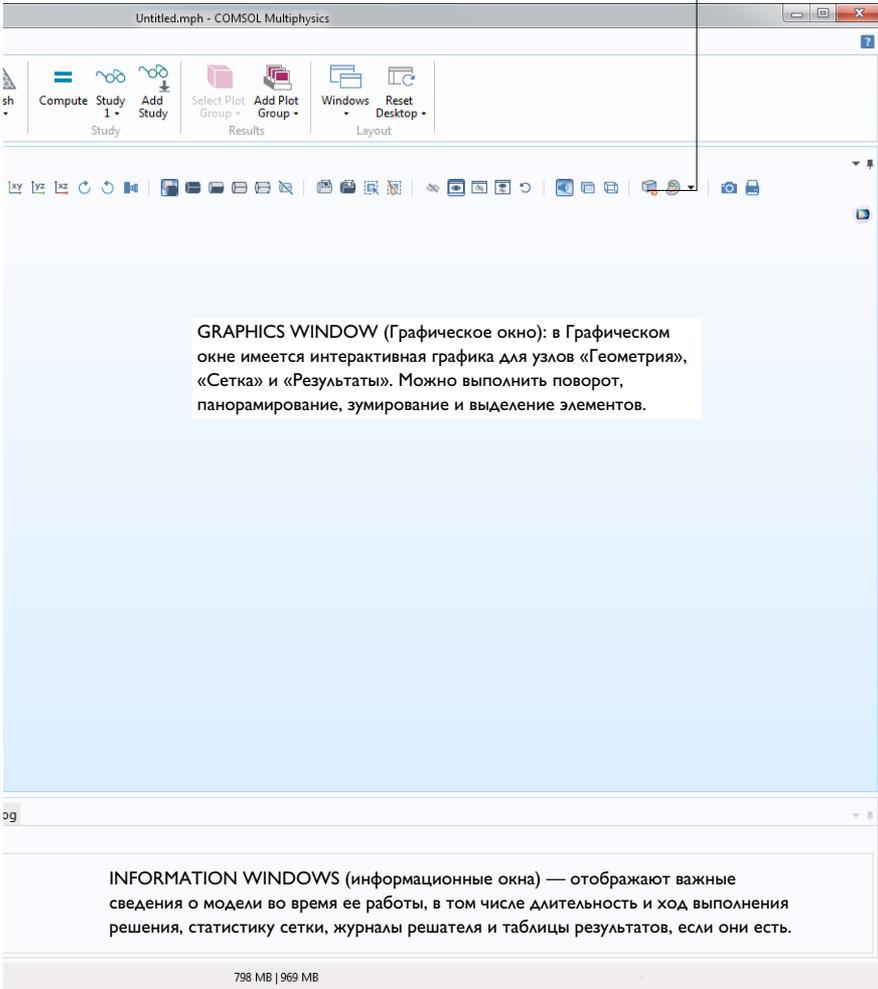


MODEL BUILDER

(Построитель моделей): в окне Построителя моделей можно посмотреть обзор модели с помощью соответствующих кнопок на панели инструментов и дерева модели. Процессом моделирования можно управлять с помощью контекстных меню, которые можно вызвать щелчком правой кнопки мыши на элементе.

SETTINGS WINDOW (окно Настройки): щелкните любой узел в дереве модели, чтобы посмотреть соответствующее окно настроек, которое открывается рядом с Построителем моделей.

GRAPHICS WINDOW TOOLBAR
(панель инструментов Графического окна)



Выше приведен снимок экрана **Model Builder** (Построителя моделей) в COMSOL Multiphysics, отображаемый при первом запуске программы. 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. Интерфейс ПО гибко настраивается. Окна можно изменять в размерах, двигать, закреплять и разъединять. Все изменения в программной среде будут сохранены по завершении сеанса и снова отобразятся при следующем запуске COMSOL Multiphysics. По мере построения модели будут добавляться новые окна и элементы интерфейса. (На стр. 26 показана программная оболочка с большим числом окон и элементов.) Так в общем случае доступны следующие окна и элементы пользовательского интерфейса:

Quick Access Toolbar (Панель быстрого доступа)

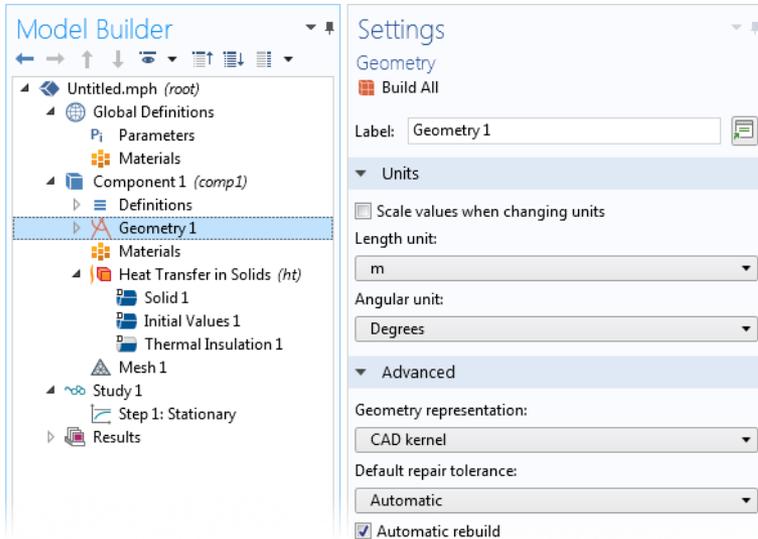
Панель инструментов быстрого доступа содержит такие команды, как **Open** (Открыть), **Save** (Сохранить), **Undo** (Отменить), **Redo** (Повторить), **Copy** (Копировать), **Paste** (Вставить) и **Delete** (Удалить). Ее содержимое можно настроить с помощью списка **Customize Quick Access Toolbar** (Настроить панель инструментов быстрого доступа). Для этого щелкните по направленной вниз стрелке в правой части панели инструментов.

Ribbon (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 контекстное меню и панели инструментов. Чтобы приступить к созданию приложения на основе вашей модели, просто нажмите кнопку **Application Builder** (Среда разработки приложений) для перехода из Построителя моделей в Среду разработки приложений.

Окно Settings (Настройки)

В этом окне задаются основные характеристики модели, включая размерность геометрии, свойства материалов, граничные и начальные условия, а также вся другая информация, которая может понадобиться для расчета модели. На иллюстрации ниже показано окно **Settings** (Настройки) узла **Geometry** (Геометрия).



Plot windows (Окна графиков)

Это окна для вывода графических данных. Как и окно **Graphics** (Графическое окно), окна **Plot** служат для визуализации результатов. Для одновременного отображения нескольких результатов можно использовать несколько окон графиков. Особый вид окна графиков — окно **Convergence Plot** (График сходимости), которое создается автоматически и показывает график сходимости решения в ходе выполнения расчета.

Information windows (Информационные окна)

Это окна для вывода неграфических данных, в том числе:

- **Messages** (Сообщения): В этом окне отображается различная информация о текущем сеансе COMSOL Multiphysics.
- **Progress** (Прогресс): Здесь доступны кнопки остановки расчета и информация о ходе решения.
- **Log** (Журнал): Здесь отображаются такие сведения от решателя, как число степеней свободы, время решения и данные по итерациям решателя.
- **Table** (Таблица): Числовые данные в табличном формате, который определяется в узле **Results** (Результаты).
- **External Process** (Внешний процесс): Панель управления кластерными, облачными и пакетными задачами.

Прочие окна

Выпадающий список **Windows** (Окна) на **главной вкладке** ленты позволяет переходить между всеми открытыми окнами программной среды COMSOL Desktop. В операционных системах OS X и Linux® вы можете воспользоваться меню **Windows** (Окна). Кроме описанных выше окон, вы можете перейти к окнам:

- **Add Physics** (Добавить физический интерфейс) и **Add Multiphysics** (Добавить мультифизический интерфейс): Расширяют физические интерфейсы модели.
- **Add Study** (Добавить исследование): Позволяет изменить тип исследования или добавить новый.
- **Add Material from Library** (Добавить материал из библиотеки) и **Material Browser** (Библиотека материалов): Предоставляет доступ к библиотекам со свойствами материалов. **Material Browser** позволяет посмотреть таблицу свойств материалов перед добавлением материала в модель, а также добавлять, удалять или переименовывать материалы в пользовательских библиотеках.
- **Application Libraries** (Библиотеки моделей и приложений): Позволяют выбирать MPH-файлы из библиотеки, содержащей учебные модели, готовые к запуску приложения, и документацию к ним.
- **Part Libraries** (Библиотека геометрических заготовок): Загружают предопределенные параметризованные геометрические заготовки.
- **Selection List** (Список для выборки): Показывает список геометрических объектов, областей, границ, ребер и точек, которые можно включить в выборку.
- **Properties** (Свойства): Показывает свойства узлов дерева модели.
- **Debug Log** (Журнал отладки): Показывает отладочную информацию для методов.
- **Recovery File** (Файлы восстановления): Показывает файлы восстановления.
- **Comparison Results** (Результаты сравнения): Позволяет сравнить настройки Построителя моделей и Среды разработки приложений для двух MPH-файлов.

Progress Bar (Индикатор выполнения) с кнопкой Cancel (Отмена)

Progress Bar (Индикатор выполнения) с кнопкой для отмены текущего расчета, если он запущен, расположен в правом нижнем углу интерфейса COMSOL Desktop.

Динамическая справка

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

Model Builder (Построитель моделей) и Application Builder (Среда разработки приложений)

Два основных компонента среды COMSOL Desktop — **Model Builder** и **Application Builder**.

Model Builder (Построитель моделей) — это инструмент для задания модели и ее компонентов: метода решения, анализа результатов и создания отчетов. Это достигается построением дерева модели. Дерево модели отражает лежащую в основе структуру данных — модельный объект, в котором хранится состояние модели, включая настройки геометрии, сетки, физики, граничных условий, исследований, решателей, постобработки и визуализаций.

Application Builder (Среда разработки приложений) позволяет быстро создать приложение с удобным в работе специализированным пользовательским интерфейсом. Приложение обычно основывается на модели, созданной с помощью **Model Builder**. **Application Builder** содержит два важных инструмента создания приложений — **Form editor** (Редактор форм) и **Method editor** (Редактор методов). Также приложение может содержать меню в форме панели или ленты **Ribbon**. В **Form editor** с помощью перетаскивания можно легко добавлять такие компоненты пользовательского интерфейса, как поля ввода, графические окна и кнопки. **Method editor** — это среда программирования, позволяющая изменять модель на базе объектно-ориентированного представления данных. Также вы можете использовать **Method editor**, чтобы добавить в пользовательский интерфейс логические условия срабатывания и другие вспомогательные функции. Код в **Method editor** пишется на языке программирования Java[®], при этом можно использовать весь синтаксис и библиотеки языка Java[®].

В **Method editor** программный код хранится в виде методов/макросов. Методом/макросом называется часть программы, которая в других языках программирования известна как подпрограмма, функция или процедура. Методы могут изменять структуру данных объекта модели в Построителе моделей и в Среде разработки приложений. Метод может как изменять объект

модели в текущем сеансе, так и изменять объект модели в процессе работы приложения для моделирования.

Данное руководство, «Введение в COMSOL Multiphysics», содержит подробные сведения, необходимые для начала работы с **Model Builder**, а также краткое введение в **Application Builder**. Работа с **Application Builder**, в том числе с **Form editor** и **Method editor**, подробно описана в руководстве «Введение в Среду разработки приложений».

Запуск приложений и COMSOL Server и компилятора COMSOL Compiler

Application Builder (Среда разработки приложений) включена в версию COMSOL Multiphysics для ОС Windows®. При наличии лицензии COMSOL Multiphysics пользователь может запускать приложения в среде COMSOL Desktop. Хотя версия программного пакета для macOS и Linux® не позволяет разрабатывать приложения, готовые приложения можно запускать в пакете COMSOL Multiphysics для этих операционных систем.

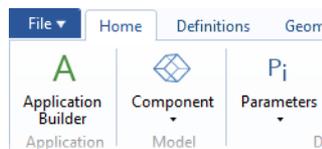
При наличии лицензии COMSOL Server приложения можно запускать из распространенных веб-браузеров в различных операционных системах и аппаратных платформах. Кроме того, приложения можно запускать, подключившись к COMSOL Server с помощью простого в установке клиента COMSOL Client for Windows®.

Клиент COMSOL Client for Windows® позволяет пользователю запускать приложения, для которых необходимы модули группы LiveLink™ для различных сторонних САД-пакетов. Функционал приложений, требующий модули интеграции, не работает через веб-браузер.

Запуск приложений в веб-браузере не требует установки никаких расширений или наличия подключаемых модулей (plug-ins) для веб-браузера. Запускаемые в веб-браузере приложения поддерживают одномерную, двумерную и трехмерную интерактивную графику. Трехмерная графика в веб-браузере отображается с помощью технологии WebGL™, доступной во всех распространенных веб-браузерах.

Чтобы создать приложение на основе модели, запустите **Application Builder** на вкладке ленты **Home** (Главная).

Используя компилятор COMSOL Compiler, вы можете превратить свое приложение для моделирования (файл MPH) в исполняемый файл для операционных систем Windows®, Linux® и macOS. Вы можете

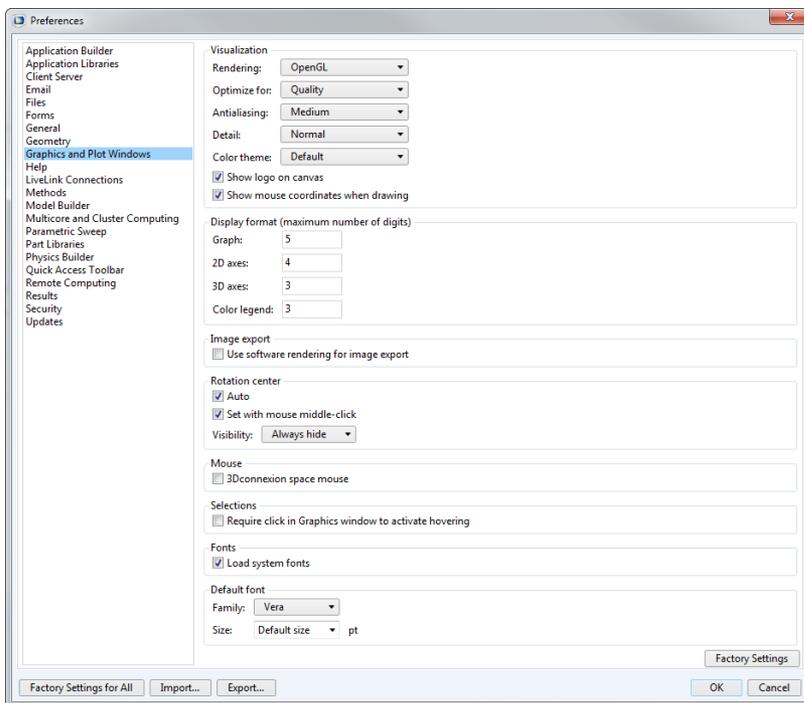


свободно распространять исполняемый файл и запускать его без программной лицензии COMSOL.

Дополнительная информация о создании приложений в системе COMSOL приведена в разделе «Создание приложения в Application Builder (Среде разработки приложений)» на стр. 92 и в руководстве «Введение в среду разработки приложений».

Preferences (Параметры и общие настройки)

Preferences (Параметры и общие настройки) — это пользовательские настройки среды моделирования. Большинство из них применяются ко всем сеансам моделирования, но некоторые сохраняются вместе с моделью. Для доступа к ним выберите пункт **Preferences** в меню **File** (Файл).



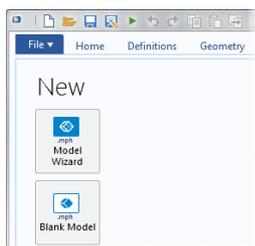
В окне **Preferences** можно изменять такие настройки, как режим рендеринга, количество знаков в числовых результатах, максимальное число процессорных ядер для выполнения вычислений, а также пути к пользовательским библиотекам приложений. Изучите текущие настройки, чтобы ознакомиться с различными вариантами.

Доступны три варианта графического рендеринга: **OpenGL[®]**, **DirectX[®]** и **Software Rendering** (Программный рендеринг). Режим **DirectX[®]** недоступен в OS X и Linux[®]. Для использования в Windows[®] необходимо, чтобы библиотеки DirectX[®] были установлены вместе с COMSOL. Если в компьютере нет отдельной дискретной видеокарты, может потребоваться переключение в режим **Software Rendering**, который будет работать медленнее, однако обеспечит поддержку всех графических возможностей. Список рекомендованных видеокарт приведен здесь:

www.comsol.ru/system-requirements

Создание новой модели

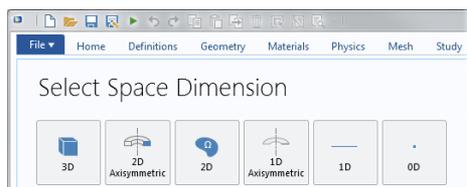
Модель можно создать при помощи **Model Wizard** (Мастера создания моделей) или на основе шаблона **Blank Model** (Пустая модель), как показано на иллюстрации ниже.



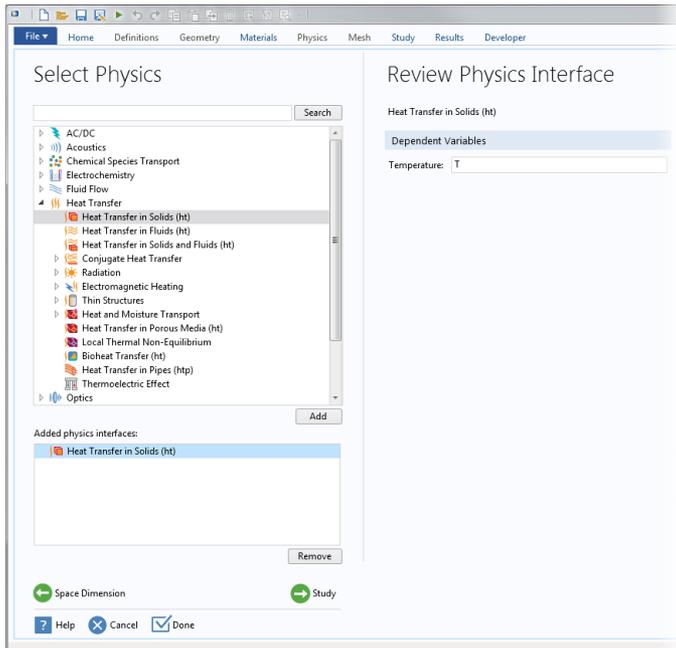
СОЗДАНИЕ МОДЕЛИ С ПОМОЩЬЮ MODEL WIZARD (МАСТЕРА СОЗДАНИЯ МОДЕЛЕЙ)

Model Wizard (Мастер создания моделей) поможет задать размерность пространства, выбрать необходимый физический интерфейс и тип исследования всего за несколько шагов:

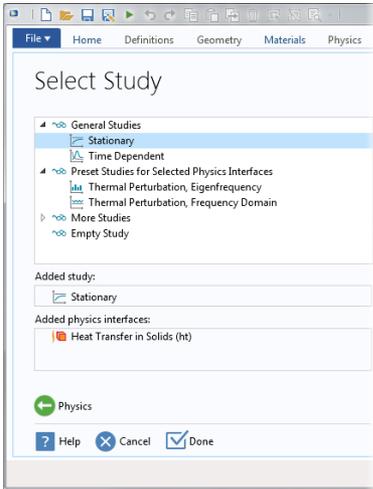
- 1 Сначала следует выбрать размерность пространства для компонента модели: **3D** (Трехмерная модель), **2D Axisymmetric** (Двухмерная осесимметричная модель), **2D** (Двухмерная модель), **1D Axisymmetric** (Одномерная осесимметричная модель) или **0D** (Нульмерная модель).



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



- 3 Выберите тип **Study** (Исследования), который содержит в своей основе соответствующий решатель или набор решателей, которые будут использоваться при вычислениях.



И наконец, нажмите **Done** (Готово). На рабочем столе появится дерево модели с учетом тех настроек, которые были заданы в **Model Wizard**.

СОЗДАНИЕ BLANK MODEL (ПУСТОЙ МОДЕЛИ)

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

Ribbon (Лента) и Quick Access Toolbar (панель инструментов быстрого доступа)

Вкладки ленты Ribbon в COMSOL Desktop отражают процесс моделирования и функционал, доступный на каждом этапе, включая в т.ч. 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 для параметризованной геометрии, просмотр материальных свойств и физических соотношений, построение сетки, проведение исследования и визуализация результатов моделирования.

У всех основных этапов, входящих в процесс моделирования, есть стандартные вкладки. Они упорядочены слева направо согласно классическому ходу рабочего процесса: **Definitions** (Определения), **Geometry** (Геометрия), **Materials** (Материалы), **Physics** (Физические интерфейсы), **Mesh** (Сетка), **Study** (Исследование), **Results** (Результаты) и **Developer** (Инструменты разработчика).

Контекстные вкладки отображаются, только когда это необходимо — например, вкладка **3D Plot Group** (Группа трехмерных 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 RIBBON И MODEL BUILDER (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 отображаемых окон в COMSOL Desktop, доступны только в ленте **Ribbon**. В интерфейсе COMSOL Desktop для OS X и Linux[®] эти функции находятся на панелях инструментов, которые заменяют собой ленту **Ribbon** на этих платформах. Также имеются операции, доступные только в дереве модели, например переупорядочивание и отключение узлов.

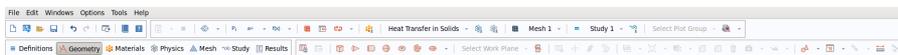
THE QUICK ACCESS TOOLBAR (ПАНЕЛЬ БЫСТРОГО ДОСТУПА)

Quick Access Toolbar (Панель быстрого доступа) содержит набор команд, не зависящих от отображаемой вкладки ленты. **Quick Access Toolbar** 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 **Quick Access Toolbar** над лентой или под ней.

MACOS и LINUX®

В среде COMSOL Desktop для ОС macOS и Linux® вместо ленты **Ribbon** используется набор меню и панелей инструментов.



Инструкции в этом руководстве написаны на основании версии среды COMSOL Desktop для Windows®. Однако COMSOL Multiphysics и среда COMSOL Desktop выглядят и работают в ОС macOS и Linux® почти так же, за исключением того, что элементы интерфейса ленты находятся в соответствующих меню и на панелях инструментов.

Model Builder (Построитель моделей) и 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 (подузлов) щелкните правой кнопкой мыши по соответствующему узлу. Таким образом, узлы добавляются в дерево.

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

Важно отметить, что при открытом окне **Help** (Справка) (с помощью пункта **Help** в меню **File** (Файл) или клавиши F1) пользователь может получить динамическую справку (только на английском языке), щелкнув по узлу.

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

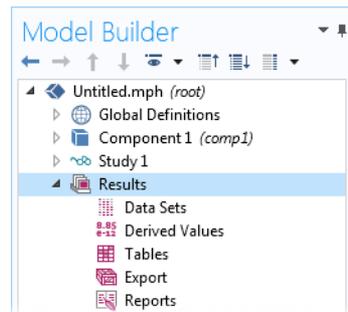
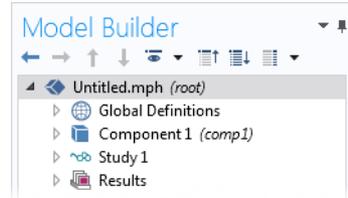
У дерева модели всегда есть корневой узел (изначально называемый *Untitled.mph*), а также узлы **Global Definitions** (Глобальные определения) и **Results** (Результаты). Надпись на корневом узле — это имя файла мультифизической модели (MPH-файла), в котором хранится данная модель.

В настройках корневого узла указаны имя автора, система единиц измерения по умолчанию и другие параметры.

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

Узел **Results** дает доступ к решению, полученному по окончании расчета, а также инструменты для обработки данных. Изначально узел **Results** состоит из пяти подузлов:

- **Data Sets** (Наборы данных) содержат список доступных пользователю решений.
- **Derived Values** (Вычисление выражений) можно вывести численные значения различных переменных и выражений на их основе, используя ряд инструментов для постобработки.
- **Tables** (Таблицы) удобны для отображения производных значений или результатов работы датчиков (*probes*), которые в реальном времени отслеживают ход решения при моделировании.
- Функция **Export** (Экспорт) позволяет выбирать и выгружать числовые данные, изображения и анимацию в соответствующие внешние файлы.
- **Reports** (Отчеты) 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 окне **Graphics** (Графическое окно) или в окнах графиков **Plot Windows**. Некоторые графики создаются автоматически в зависимости от вида моделирования, но вы также можете добавить дополнительные графики — для этого следует щелкнуть правой кнопкой мыши на узле **Results** и выбрать тип графика из списка.

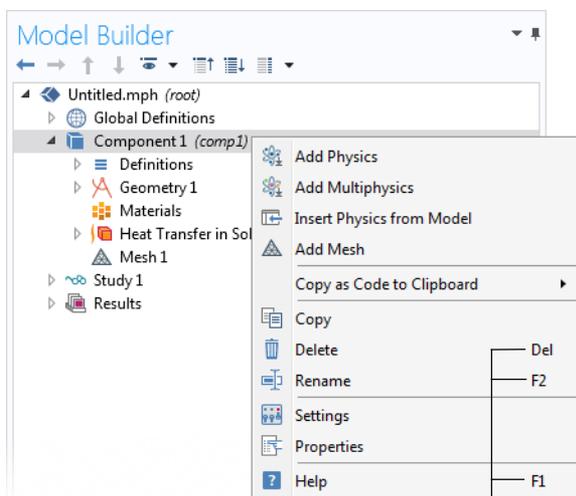
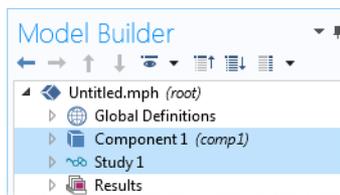
Узлы COMPONENT (КОМПОНЕНТ) и STUDY (ИССЛЕДОВАНИЕ)

Помимо трех только что описанных узлов, есть еще два дополнительных типа узлов верхнего уровня: узлы **Component** (Компонент) и **Study** (Исследование).

Обычно их генерирует **Model Wizard** (Мастер создания моделей) при создании новой модели. После того как в Мастере создания моделей выбран тип моделируемой физики (физический интерфейс) и тип **Study** (например, стационарное, во временной области, в частотной области или анализ на собственные частоты), он автоматически создает по одному узлу каждого типа и отображает их содержимое.

При разработке модели можно добавить дополнительные узлы **Component** и **Study**. Так как в модели может быть несколько узлов **Component** и **Study**, 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**, их можно связать для получения более сложной последовательности шагов моделирования.

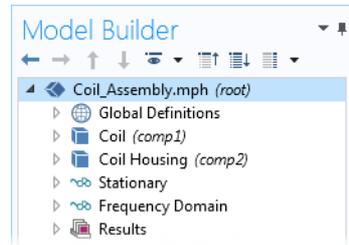


Сочетания «горячих» клавиш

Важно отметить, что каждый узел **Study** может выполнять различные типы вычислений, поэтому у каждого такого узла есть своя кнопка **Compute** (Запуск на расчет) = .

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

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



PARAMETERS (ПАРАМЕТРЫ), VARIABLES (ПЕРЕМЕННЫЕ) И ИХ ОБЛАСТЬ ДЕЙСТВИЯ

Global Parameters (Глобальные параметры)

Global Parameters (Глобальные параметры) — это определенные пользователем скалярные константы, которые доступны во всех элементах модели. Другими словами, они являются «глобальными» по своей природе. Типичные варианты применения:

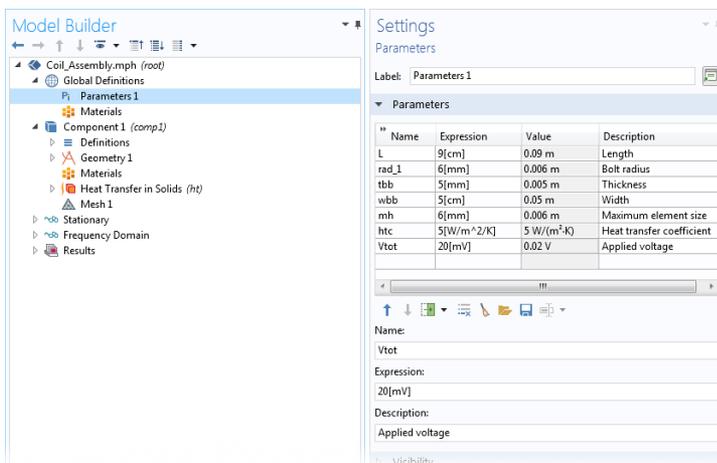
- Параметризация геометрических размеров.
- Задание размеров элементов сетки.
- Задание параметрического исследования (то есть моделирования, которое повторяется для большого числа значений какого-либо параметра, например частоты или нагрузки).

В выражения с глобальными параметрами могут входить числа, глобальные параметры, встроенные константы, встроенные и пользовательские функции, использующие выражения с глобальными параметрами в качестве аргументов, а также унарные и бинарные операторы. Список допустимых операторов указан в разделе «Приложение С. Элементы языка и зарезервированные имена» на стр. 179. Так как значения этих выражений вычисляются до начала расчета

модели, глобальные параметры не могут зависеть от переменной времени t . Точно так же они не могут зависеть от пространственных переменных x , y или z и от зависимых переменных, являющихся решениями ваших уравнений.

Важно помнить, что имена параметров чувствительны к регистру.

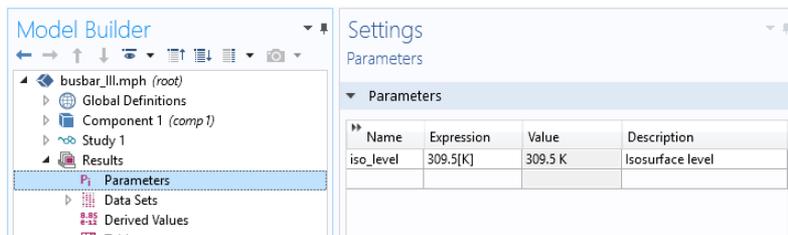
Глобальные параметры задаются в узле **Parameters** (Параметры) в разделе **Global Definitions** дерева модели.



Обратите внимание, что вы можете добавлять несколько узлов **Parameters** (Параметры), которые получают имена **Parameters 1**, **Parameters 2** и так далее. Кроме этого, параметры можно делить на группы и проводить параметрические исследования. Подробную информацию вы найдете в разделе «Parametric Sweeps (Параметрические исследования)» на стр. 137.

Results Parameters (Параметры раздела Результаты)

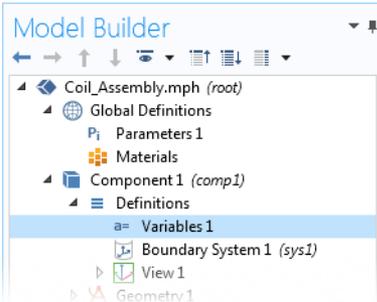
Для более гибкой обработки результатов можно задать параметры, относящиеся только к узлу **Results** (Результаты). При использовании этих параметров не требуется повторный расчет модели.



Result parameters (Параметры раздела Результаты) могут зависеть от других параметров и встроенных функций.

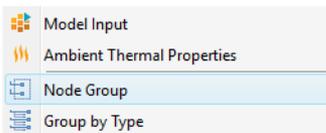
Variables (Переменные)

Для переменных предусмотрены соответствующие узлы **Variables** (Переменные) в дереве модели, и их можно задать в узле **Global Definitions** (Глобальные определения) или в подузле **Definitions** (Определения) узла **Component** (Компонент).



Как правило, выбор места для объявления переменной зависит от того, должна ли переменная быть глобальной (то есть доступной во всех элементах дерева модели) или локальной (то есть доступной только в одном узле **Component**). Как и выражение для параметра, выражение для переменной может содержать числа, параметры, встроенные константы, а также унарные и бинарные операторы. Однако в нем также могут использоваться такие переменные, как t , x , y , z , функции с выражениями для переменной в качестве аргументов, а также зависимые переменные, являющиеся результатом решения ваших уравнений, и их пространственные производные или производные по времени.

Если в вашей модели есть много узлов **Variables** (Переменные), их можно разбить на группы с помощью функциональной возможности **Node Group** (Группа узлов), как показано ниже.



Группы узлов позволяют разделить на группы узлы в разделах **Global Definitions** (Глобальные определения), **Definitions** (Определения), **Component** (Компонент), **Materials** (Материалы), в физических интерфейсах и результатах.

Переменные, используемые в приложениях

Параметры и переменные модели можно использовать в приложениях.

Например, можно разрешить пользователю приложения изменять значение

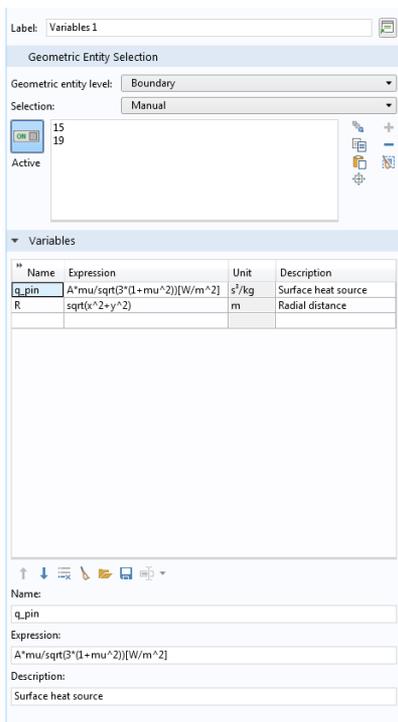
параметра. Кроме того, используемые в приложениях переменные могут определяться в **Application Builder** (Среде разработки приложений) в дереве приложения в узле **Declarations** (Объявления). Такие переменные могут также использоваться в **Model methods** (Макросах для модели).

Область действия

Область действия параметра или переменной указывает, где этот параметр или переменную можно использовать в выражениях. Все параметры задаются в узле **Parameters** (Параметры) узла **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 также можно объявить в узле **Global Definitions** в виде подузла **Variables** (Переменные) с глобальной областью 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**, но не в узлах **Geometry** или **Mesh**. Такие переменные можно использовать, например, для задания свойств материала в подузле **Materials** (Материалы) узла **Component** 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** либо только для отдельных **Domain** (Область), **Boundary** (Граница), **Edge** (Ребро) или **Point** (Точка).



На иллюстрации слева объявлены две переменные, q_{pin} и R , область действия которых ограничена всего двумя границами с номерами 15 и 19.

Такая группа номеров называется **Selections** (Выборка). Ей можно присвоить имя, по которому к ней можно будет обращаться из других частей модели. Это полезно, например, при задании свойств материалов или граничных условий, использующих переменную только на определенных границах, но не в других местах. Чтобы присвоить имя **Selection**, нажмите кнопку **Create Selection** (Создать выборку) (🔗) справа от списка **Selection**.

Хотя переменные, объявленные в подузле **Definitions** узла **Component** имеют локальную область действия, к ним можно обращаться и за пределами узла **Component** 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**, где она объявлена. Другими словами, если в узле **Component** под названием **MyModel** объявлена переменная foo , то к ней можно обратиться за пределами этого узла с помощью конструкции `MyModel.foo`. Это удобно, когда переменная требуется 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.

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

QUICK ACCESS TOOLBAR
(Панель быстрого доступа)

SETTINGS WINDOW (окно Настройки)

RIBBON (Лента)

MODEL BUILDER WINDOW (окно Построителя моделей)

MODEL TREE (Дерево модели)

The screenshot displays the ANSYS Fluent software interface. At the top is the ribbon with tabs for File, Home, Definitions, Geometry, Materials, Physics, Mesh, Study, Results, and Developer. Below the ribbon are three main windows:

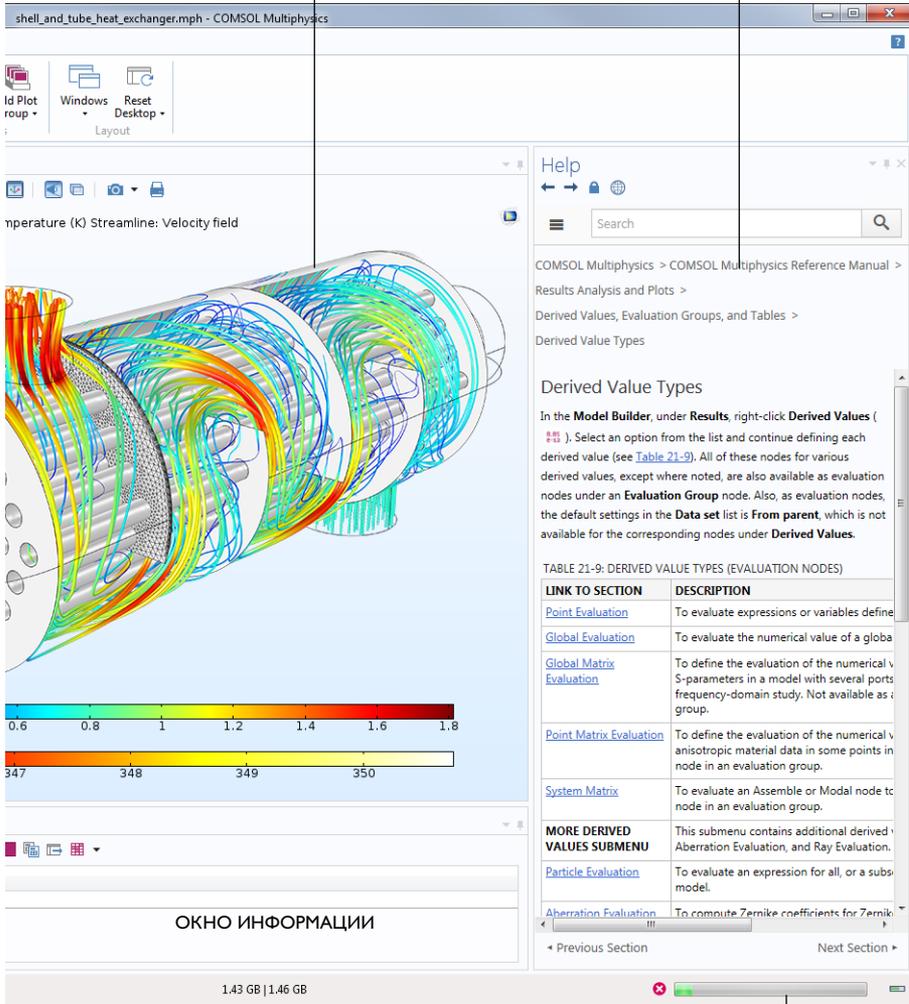
- Model Builder:** Shows a tree view of the model structure. The root is 'shell_and_tube_heat_exchanger.mph (root)'. It includes 'Component 1 (comp1)' with sub-items for Definitions, Geometry 1, Materials, Turbulent Flow, Heat Transfer in Fluids, Multiphysics, Mesh 1, and Study 1. Under Study 1, there are Results, Data Sets, Views, and Derived Values. The 'Derived Values' section is expanded to show 'Heat Transfer Coefficient', 'Inlet Pressure, Water', 'Inlet Pressure, Air', 'Tables', 'Velocity (spf)', 'Pressure (spf)', and 'Wall Resolution (spf)'. The 'Heat Transfer Coefficient' is selected.
- Settings:** Shows the 'Global Evaluation' settings for the 'Heat Transfer Coefficient'. The 'Data' section is set to 'Study 1/Solution 1 (sol1)'. The 'Expressions' section contains a table with one entry: 'aveop1(abs(nitf1.qwf...)' with unit 'W/(m^2...'. The 'Evaluate' button is visible.
- Plot 1:** A line graph showing 'Pressure (Pa)' on the y-axis (ranging from 0 to 30) versus 'x-coordinate (m)' on the x-axis (ranging from -0.1 to 0.6). The pressure starts at approximately 28 Pa at x = -0.1, rises slightly to a peak of about 30 Pa at x = -0.05, then drops sharply to about 18 Pa at x = 0, and continues to decrease with some fluctuations to about 2 Pa at x = 0.6.

On the right side of the interface, there is a 3D visualization of a heat exchanger model with a color scale for temperature. The scale ranges from 0.2 (blue) to 0.4 (red), with a maximum value of 346. Below the 3D model is a 'Messages' window showing the calculation of the average heat transfer coefficient: 'aveop1(abs(nitf1.qwf_u))/(T_water-T_air) (W/(m^2*K))' with a value of 5.5828.

PLOT WINDOW (окно Графика): окно графика служит для визуализации величин, датчиков и графиков сходимости. Для одновременного отображения нескольких результатов можно использовать несколько окон графиков.

GRAPHICS WINDOW
(Графическое окно)

DYNAMIC HELP (Динамическая справка): постоянно обновляется посредством доступа к Knowledge Base (Базе знаний) и Model Gallery (Галерее моделей). В окне Help (Справка) можно легко просматривать структуру папок и пользоваться расширенным поиском.



PROGRESS BAR (Индикатор выполнения) с кнопкой CANCEL (Отмена)

Встроенные константы, переменные и функции

В COMSOL Multiphysics встроено множество констант, переменных и функций. Их имена зарезервированы и поэтому не доступны для переопределения пользователем. 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.

Примеры важных зарезервированных имен:

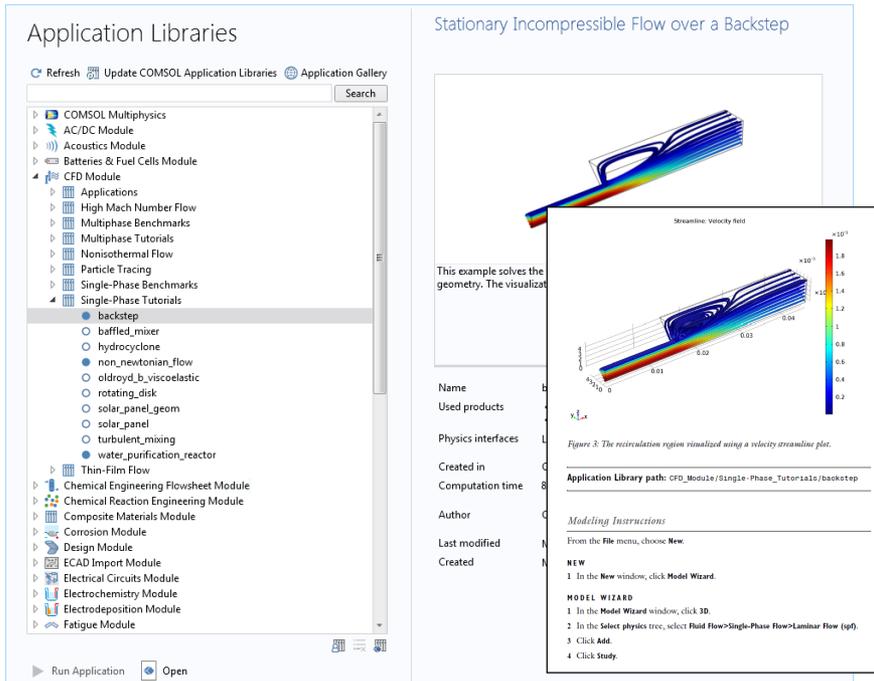
- Математические константы, такие как π (3,14...), мнимая единица i или j
- Физические константы, такие как g_const (ускорение свободного падения), c_const (скорость света) и R_const (универсальная газовая постоянная)
- Переменная времени t
- Производные первого и второго порядков от зависимых переменных (решения), имена которых получаются из имен пространственных координат и имен зависимых переменных (заданных пользователем)
- Математические функции, такие как \cos , \sin , \exp , \log , \log_{10} и \sqrt{x}

«Приложение С. Элементы языка и зарезервированные имена» на стр. 179.

Application Libraries (Библиотеки моделей и приложений)

Application Libraries (Библиотеки моделей и приложений) — это наборы МРН-файлов, содержащих учебные модели и готовые приложения с сопроводительной документацией. Учебные модели показывают, как использовать Построитель моделей, и включают документацию с теоретической информацией и пошаговыми инструкциями. Для готовых приложений есть подробные инструкции по работе с ними. Пользователи могут изучать и изменять учебные модели и приложения с учетом собственных потребностей. У каждого модуля расширения есть своя библиотека моделей и приложений с примерами из соответствующих областей применения и разделов физики. Пошаговые инструкции и МРН-файлы можно применять как шаблоны для создания собственных моделей.

Чтобы открыть окно **Application Libraries**, выберите пункт **Application Libraries**  в меню **Windows** (Окна) главной вкладки ленты или в меню **File** (Файл) . Вы можете найти модель или приложение по его имени или просмотреть те из них, что относятся к тому или иному модулю.



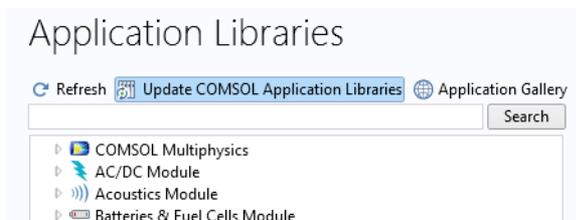
Выберите **Open** (Открыть) , **Run Application** (Запустить приложение)  или **Open PDF Document** (Открыть документ PDF) . Можно также выбрать **Help > Documentation** в меню **File** для поиска по имени модели или приложения или по модулю. Обратите внимание, что кнопка **Run Application** доступна только в том случае, если в МРН-файле есть готовое приложение.

МРН-файлы в Библиотеках моделей и приложений COMSOL могут быть в двух форматах: полном и компактном.

- Полные МРН-файлы содержат все сетки и решения. В окне Библиотек моделей и приложений они отмечены пиктограммой . Если размер МРН-файла превышает 25 МБ, то при выборе узла модели в дереве Библиотек моделей и приложений отображается подсказка с текстом **Large file** (Большой файл) и размером файла.
- Компактные МРН-файлы содержат все настройки модели, но без построенных сеток и данных решения, что позволяет уменьшить размер файлов на DVD или в загружаемом образе диска. В некоторых

MPH-файлах решений нет по другим причинам, например, если вычисления выполняются быстро и решение легко получить заново. С их помощью можно изучать настройки, а также строить сетки и выполнять повторные расчеты. Кроме того, при обновлении Библиотек моделей и приложений можно загрузить полные версии большинства этих файлов со всеми сетками и решениями. В окне Библиотек моделей и приложений они отмечены пиктограммой . 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, то в контекстном меню соответствующего узла отображается пункт **Download File with Solutions** (Загрузить файл с решениями) .

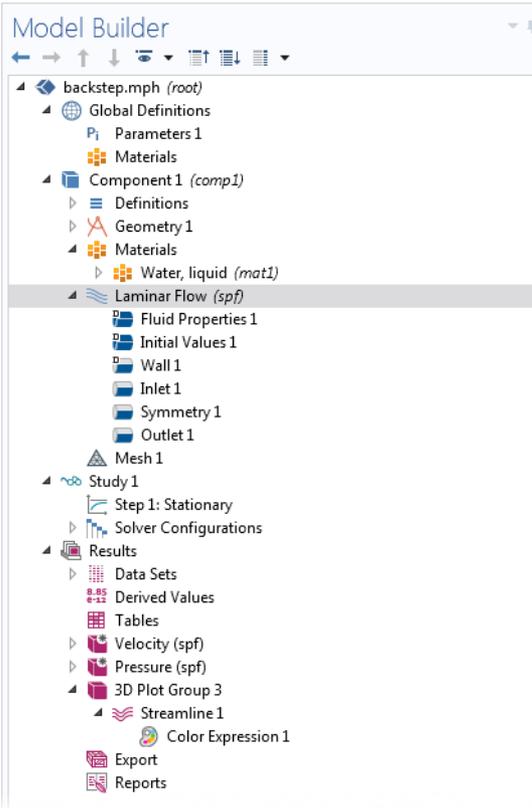
COMSOL регулярно обновляет Библиотеки моделей и приложений. Чтобы проверить доступные обновления, щелкните по кнопке **Update COMSOL Application Libraries** (Обновить Библиотеку моделей и приложений COMSOL)  в верхней части окна **Application Libraries**. Эта команда также доступна в меню **File > Help** в операционной системе Windows® и в меню **Help** (Справка) в операционных системах macOS и Linux®. Эта опция, подключит вас к интерактивному интерфейсу веб-сайта COMSOL, в котором можно выбрать новые приложения и последние обновления для загрузки.



Если ваш компьютер подключен к Интернету, вы можете нажать кнопку **Application Gallery** (Галерея моделей и приложений), чтобы получить доступ к большому набору дополнительных примеров с веб-сайта COMSOL.

Рабочий процесс и последовательность операций

В окне **Model Builder** (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 ветвях дерева модели учитывается порядковый номер узла, поэтому для изменения последовательности операций можно перемещать подузлы вверх или вниз:

- **Geometry** (Геометрия)
- **Materials** (Материалы)
- **Physics** (Физика)
- **Mesh** (Сетка)
- **Study** (Исследование)
- **Plot Groups** (Группы графиков)

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

- **Perfectly Matched Layer** (Идеально согласованные слои)
- **Infinite Elements** (Бесконечные элементы)

Переупорядочить узлы можно следующими способами:

- Перетащить их мышью
- Щелкнуть правой кнопкой мыши по узлу 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 **Model File for MATLAB[®]** или как **Model File for Java[®]**, предварительно выбрав опцию **Compact History** (Компактная история) 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 **Compact History** из журнала удаляются все переопределенные изменения и остаются только те недавние, которые действительны для модели. В **Application Builder** (Среде разработки приложений) вы можете использовать опцию **Record Method** (Записать метод), чтобы просмотреть и отредактировать программный код в **Method editor** (Редакторе методов).

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 рекомендуем вам тщательно изучить два примера, описанных в последующих разделах данного документа, чтобы получить общее представление о пакете.

Пример 1. Анализ на прочность гаечного ключа

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

Хотя бы раз в жизни вам наверняка приходилось закручивать болт гаечным ключом. В этом примере рассматривается механическая модель для подобной задачи и анализируется целостность структуры гаечного ключа в наихудшем случае нагрузки.

Гаечный ключ изготовлен, разумеется, из стали, являющейся пластичным материалом. Если к гаечному ключу приложить слишком большой крутящий момент, то инструмент необратимо деформируется из-за упругопластических свойств стали при превышении предела текучести. Чтобы проверить, правильно ли выбраны линейные размеры ручки, следует убедиться, что уровень механического напряжения не превышает предел текучести.

Эта учебная модель поможет вам быстро ознакомиться с работой в **Model Builder** (Построителе моделей). Сначала открывается **Model Wizard** (Мастер создания моделей) и добавляется физический интерфейс для расчета механики твердого тела. Затем импортируется геометрия, а в качестве материала выбирается сталь. После этого вы сможете изучить остальные этапы создания модели — определить параметр и граничное условие для нагрузки, выбрать геометрические объекты в Графическом окне, задать сетку и тип **Study** (Исследования), а затем изучить результаты как в числовом виде, так и с помощью визуализаций.

Если вы хотите поработать с более сложной моделью, прочитайте этот раздел, чтобы усвоить некоторые ключевые функции, а затем перейдите к следующему примеру — «Пример 2. Электрическая шина — мультифизическая модель» на стр. 58.

Model Wizard (Мастер создания моделей)

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



Если вы выбрали **Blank Model**, щелкните правой кнопкой мыши корневой узел в дереве модели, чтобы вручную добавить узлы **Component** (Компонент) и **Study** (Исследование). В этом учебном примере мы предлагаем нажать кнопку **Model Wizard**.

1



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

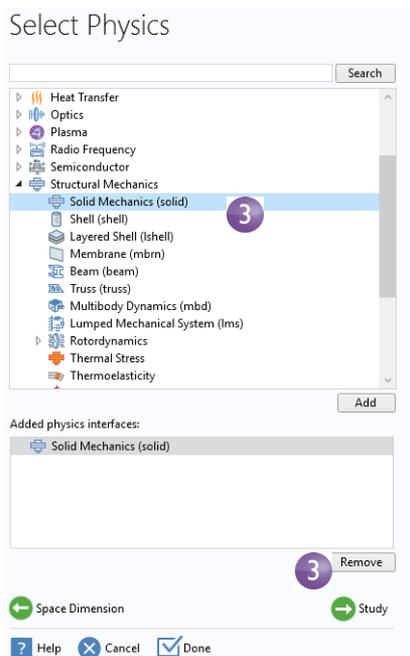
Мастер создания моделей поможет вам выполнить первичную настройку модели. Следующее окно позволяет выбрать размерность пространства моделирования.

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



- 3 В разделе **Select Physics** (Выберите физический интерфейс) выберите **Structural Mechanics > Solid Mechanics (solid)**. Нажмите **Add** (Добавить).

Если в системе не установлены модули расширения, то единственным интерфейсом физики в каталоге **Structural Mechanics** (Механика конструкций) будет **Solid Mechanics** (Механика твердого тела). На иллюстрации справа показана часть каталога **Structural Mechanics** в случае активных всех модулей расширения.

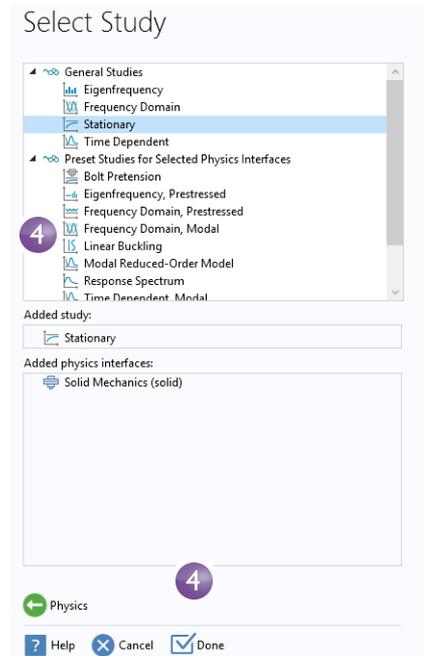


Для продолжения нажмите **Study**.

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

Решатель и настройки уравнений для предустановленных исследований адаптируются к выбранным физикам — в данном примере к механике твердого тела. Так как у нас не будет зависящих от времени нагрузок и свойств материалов, то можно использовать стационарное исследование — **Stationary**.

Все элементы в ветви **Custom Studies** (Пользовательские исследования)  настраиваются вручную.



Geometry (Геометрия)

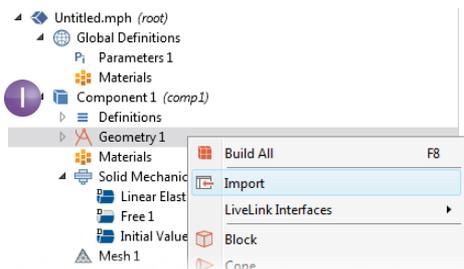
В этой учебной модели используется геометрия, созданная и сохраненная в собственном формате COMSOL для CAD — .mphbin. Узнать, как создавать собственную геометрию, вы можете в приложении А «Приложение А. Построение геометрии» на стр. 157.

Расположение файлов

Расположение библиотеки моделей и 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:

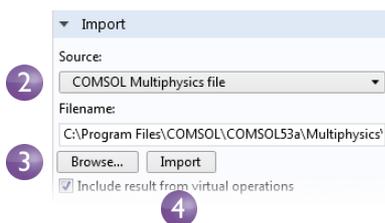
C:\Program Files\COMSOL\COMSOL54\Multiphysics\applications.

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



Это же действие можно выполнить, нажав кнопку **Import** на вкладке ленты **Geometry** (Геометрия).

- 2 В окне настроек функции **Import** выберите в списке **Source** (Источник) опцию **COMSOL Multiphysics file** (Файл COMSOL Multiphysics).



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

```
C:\Program Files\COMSOL\COMSOL54\Multiphysics\applications\  
COMSOL_Multiphysics\Structural_Mechanics\wrench.mphbin
```

Добавьте файл двойным щелчком или нажмите кнопку **Open** (Открыть).

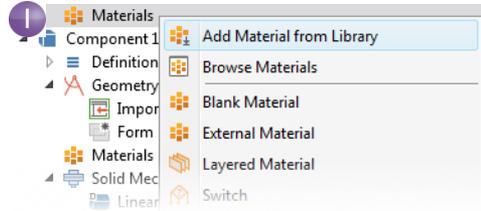
Materials (Материалы)

В узле **Materials** (Материалы)  хранятся свойства материалов для всех физик и всех областей узла **Component** (Компонент). Для болта и инструмента будем использовать один и тот же обобщенный материал для стали. Вот как можно выбрать ее в Построителе моделей.

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

Окно **Add Materials** можно открыть двумя способами:

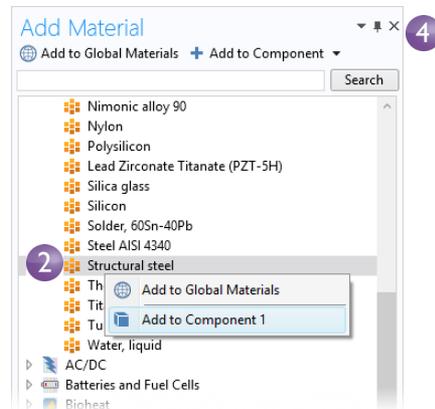
- Щелкните правой кнопкой мыши **Component 1 > Materials**  (Компонент 1 > Материалы) в **Model Builder** (Построителе моделей) и выберите **Add Material from Library** (Добавить материал из библиотеки) 



- Перейдите на вкладку **Home** (Главная) на ленте и нажмите **Add Material** (Добавить материал).

2 В окне **Add Material** раскройте каталог **Built-In** (Встроенные материалы). 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 физическим интерфейсом при моделировании.



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

3

Property	Variable	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	0.30	1	Young's modulus and Poisson's ratio
Relative permeability	mur_iso ;...	1	1	Basic
Heat capacity at constant pressure	Cp	475[J/(kg*K)]	J/(kg-K)	Basic
Thermal conductivity	k_iso ; kii...	44.5[W/(m*K)]	W/(m-K)	Basic
Electrical conductivity	sigma_iso...	4.032e6[S/m]	S/m	Basic
Relative permittivity	epsilon_iso...	1	1	Basic
Coefficient of thermal expansion	alpha_iso ;...	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

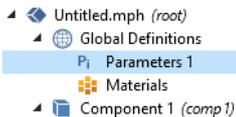
! Чтобы узнать больше о работе с материалами, просмотрите разделы «Materials (Материалы)» на стр. 69 и «Кастомизация материалов» на стр. 108 для учебной модели электрической шины.

Global Definitions (Глобальные определения)

Теперь зададим глобальный параметр нагрузки, приложенной к гаечному ключу.

Parameters (Параметры)

1 В **Model Builder** (Построителе моделей) в разделе **Global Definitions** (Глобальные определения) выберите **Parameters** (Параметры) P1.



2 Перейдите в окно **Settings** (Настройки) узла **Parameters**. В таблице **Parameters** 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 сила указана в ньютонах. Столбец **Value** (Значение) обновится автоматически на основе введенного выражения, как только вы уберете курсор из поля или нажмете **Enter**.

- В столбце или поле **Description** (Описание) введите **Applied force** (Приложенная сила).

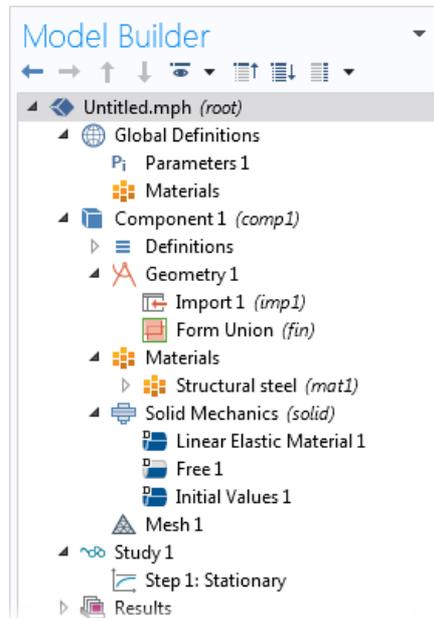
Parameters			
Name	Expression	Value	Description
F	150[N]	150 N	Applied force

2

- ⚠ Если в таблице **Parameters** несколько записей, ее можно отсортировать по любому столбцу, нажав на его заголовок.

Разделы «Global Definitions (Глобальные определения)» на стр. 63 и «Parameters (Параметры), Functions (Функции), Variables (Переменные) и Couplings (Взаимосвязи)» на стр. 103 подробнее объясняют, как работать с параметрами.

Итак, вы добавили физику и тип исследования, импортировали геометрию, добавили материал, а также задали один параметр. Теперь последовательность узлов в **Model Builder** (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 пиктограммы узла.



Узлы по умолчанию в разделе **Solid Mechanics: Linear Elastic Material** (Линейно-упругий материал), **Free** (Свободные граничные условия) и **Initial Values** (Начальные значения).

Узел **Linear Elastic Material** представляет собой материальную модель по умолчанию в интерфейсе **Solid Mechanics**. Узел **Free** задает граничное условие, позволяющее всем границам свободно перемещаться без ограничений и нагрузок. Узел **Initial Values** задает начальные значения смещения и скорости для нелинейного анализа или анализа во временной области (т. е. не для рассматриваемого нами случая).

Узлы физического интерфейса, определенные по умолчанию, нельзя удалить. Настройки, отличающиеся от настроек по умолчанию, можно задать, добавляя новые узлы. Новые узлы будут переопределять или дополнять настройки узлов по умолчанию и других узлов. Дополнительная информация

приведена в разделе «Override (Переопределение) и Contribution (Дополнение) — исключаящие и дополняющие узлы» на стр. 121.

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

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

Физический интерфейс и граничные условия

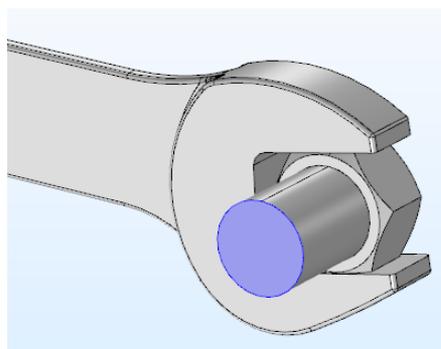
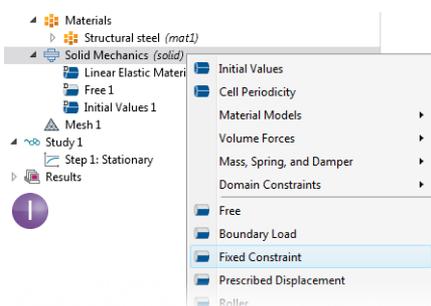
Теперь, когда заданы геометрия и материалы, вы можете задать граничные условия.

- В **Model Builder** (Построителе моделей) щелкните правой кнопкой мыши по **Solid Mechanics (solid)** и выберите **Fixed Constraint** (Фиксированное ограничение).

Граничное условие ограничивает нулем смещение каждой точки граничной поверхности во всех направлениях.

Можно также использовать **Ribbon** (Ленту) и выбрать **Boundaries > Fixed Constraint** на вкладке **Physics**.

- В окне **Graphics** (Графическом окне) поверните геометрию, щелкнув в любом месте окна и перетащив гаечный ключ, как показано на иллюстрации. Щелкните по выступающей передней поверхности частично смоделированного болта. Выделенная граница будет отмечена синим цветом. Граница в списке **Selection** должна иметь номер 35.

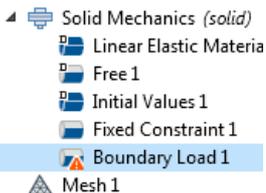


- 3 Нажмите кнопку **Go to Default 3D View** (Перейти к трехмерному виду по умолчанию)  на панели инструментов **Graphics** (Графика), чтобы вернуть геометрию в исходный вид.



3

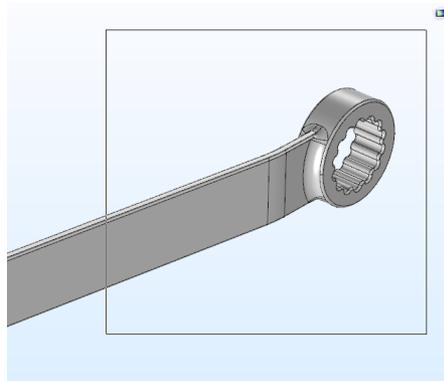
- 4 В **Model Builder** щелкните правой кнопкой мыши по **Solid Mechanics (solid)**  и выберите **Boundary Load** (Граничная нагрузка). Узел **Boundary Load**  будет добавлен в последовательность Построителя моделей.



Атрибут «warning» (предупреждение), отображаемый на узле **Boundary Load**, показывает, что выборка границ для данного ГУ пока пуста. На следующем шаге следует выбрать границу.

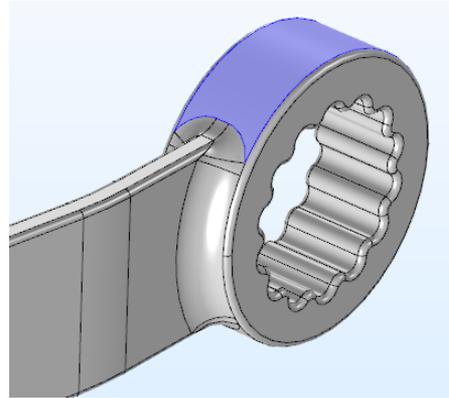
- 5 В окне **Graphics** нажмите кнопку **Zoom Box** (Панель масштабирования)  на панели инструментов и перетащите указатель мыши, чтобы выбрать квадратную область, как показано на иллюстрации справа. Отпустите кнопку мыши, чтобы приблизить эту область.

5



6 Выберите верхнюю грань накидной головки ключа (границу 111), щелкнув по границе (которая при этом будет отмечена синим) и добавив ее в список **Selection** (Выборка).

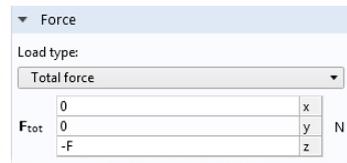
6



7 В окне **Settings** (Настройки) узла **Boundary Load** (Граничная нагрузка) в разделе **Force** (Сила) выберите **Total force** (Результирующая сила) в поле **Load type** (Тип нагрузки) и введите значение $-F$

7

7



в текстовом поле для z -компоненты. Знак минуса обозначает отрицательное направление по оси z (т. е. вниз). При таких настройках нагрузка в 150 Н будет равномерно распределяться по выбранной поверхности.

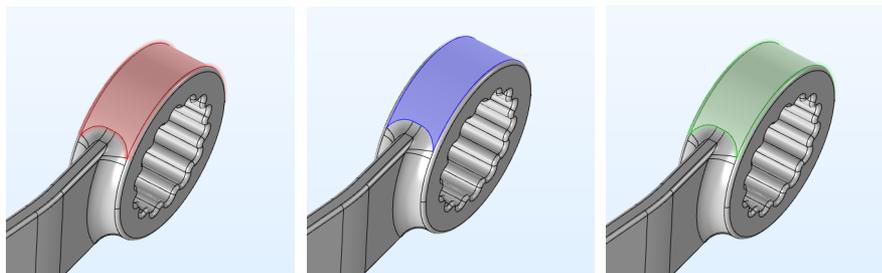
Обратите внимание, что для упрощения моделирования механический контакт между болтом и гаечным ключом рассматривается в приближении простой границы раздела двух материалов. Это внутреннее граничное условие создается автоматически и обеспечивает непрерывность нормального давления и смещения по всей поверхности раздела материалов. Более подробный анализ конструкции с детальным описанием механического контакта может быть выполнен с использованием функционала модуля **Structural Mechanics** (Механика конструкций).

ВЫБОР ГРАНИЦ И ДРУГИХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Когда граница не выбрана, она обычно окрашена в серый цвет, если вы не изменили настройки внешнего вида материала в узле **Materials** (Материалы), см. стр. 69. Чтобы выбрать границу, сначала наведите на нее курсор мыши. Если граница раньше не была выбрана, она будет окрашена красным. Щелкните левой кнопкой мыши, чтобы выбрать эту границу. Теперь она будет окрашена в синий цвет. Номер границы появится в списке **Selection** (Выборка) в окне **Settings** (Настройки) соответствующего граничного условия. Если вы наведете курсор мыши на уже выбранную границу, она будет окрашена в зеленый цвет. Если щелкнуть по границе, отмеченной зеленым,

то выделение снимается и граница опять будет окрашена в серый цвет. Таким же образом можно выделять геометрические объекты, области, границы, ребра и точки или снимать с них выделение.

На рисунке ниже приведены иллюстрации различных состояний и цветовой индикации выделения границы.



Подсвечено для включения в выборку

Включено в выборку

Подсвечено для исключения из выборки

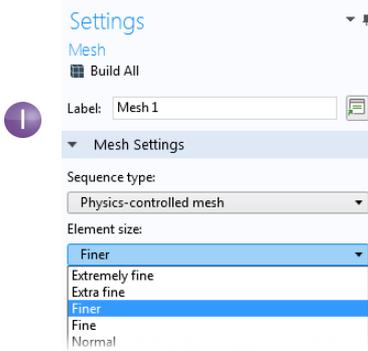
Чтобы выбрать внутренние поверхности, закрытые другими поверхностями, возможно переключаться между теми из них, которые лежат под курсором, одним из следующих способов: прокручивая колесо мыши, нажимая на стрелки вверх и вниз на клавиатуре или проводя двумя пальцами по сенсорной панели.

Mesh (Сетка)

Настройки узла **Mesh** задают разрешение сетки конечных элементов, которая используется для дискретизации модели. В методе конечных элементов модель разбивается на малые геометрические примитивы — в данном случае на тетраэдры. Далее в каждом тетраэдре с помощью набора полиномиальных функций выполняется аппроксимация поля смещений, которое показывает деформацию объекта по каждой из трех координатных осей. Затем для вычисления напряжения программный пакет дифференцирует поле смещения.

Сетка в этом примере будет использована немного мельче, чем стандартная (дефолтная), так как геометрия содержит малые грани и поверхности. Это позволит эффективнее рассчитывать различные вариации поля напряжений и получить более точный результат. Измельчение сетки для повышения точности расчетов всегда в той или иной степени замедляет работу и увеличивает потребление памяти.

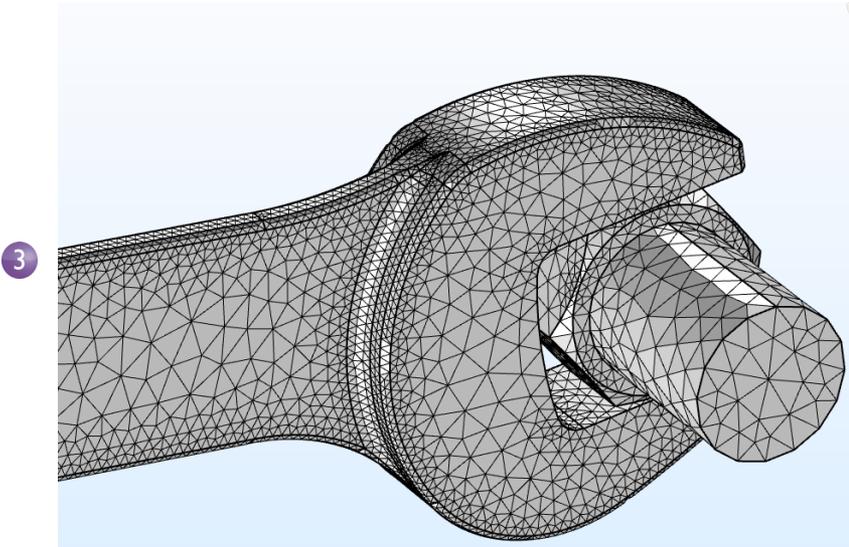
- 1 В **Model Builder** (Построителе моделей) в разделе **Component 1** (Компонент 1) выберите **Mesh 1** (Сетка 1) ▲. В окне настроек сетки в разделе **Mesh Settings** (Настройки сетки) выберите типоразмер **Finer** из списка **Element size** (Размер элементов).



- 2 Нажмите кнопку **Build All** (Построить все) ■ в окне настроек или на панели инструментов **Mesh** (Сетка).

Для проведения решения на созданной сетке потребуется около 5 ГБ памяти. Если оперативная память вашего компьютера менее 5 ГБ, то можно в списке **Element size** (Размер элементов) выбрать **Fine** (вместо **Finer**).

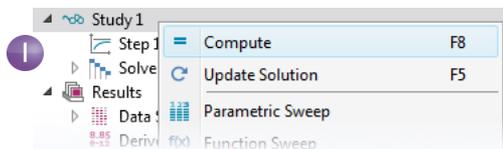
- 3 Через несколько секунд сетка отобразится в окне **Graphics** (Графическом окне). Поверните гаечный ключ и посмотрите на получившееся распределение элементов и их размеры.



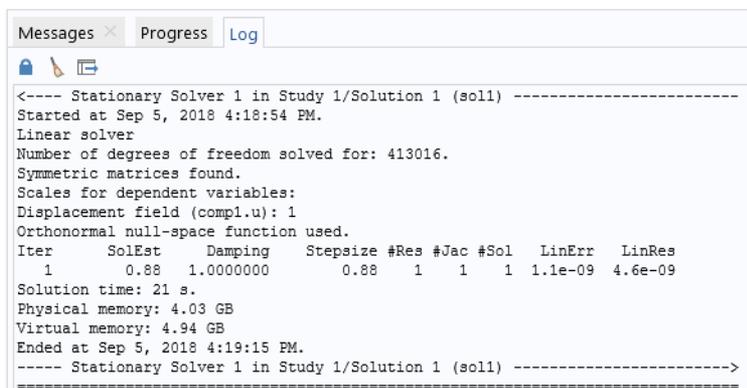
Study (Исследование)

На первом этапе настройки модели вы выбрали исследование **Stationary** (Стационарное), для которого используется стационарный решатель. В данном случае предполагается, что нагрузка, деформация и напряжение не изменяются во времени. Для запуска решателя:

- Щелкните правой кнопкой мыши **Study 1** и выберите **Compute** (Запуск на расчет) = (или нажмите F8).



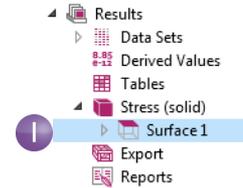
Через несколько секунд вычислений в Графическом окне отобразится график по умолчанию. Окно **Progress** (Прогресс) во время решения показывает информацию о ходе решения, полученную от решателей. Дополнительная информация о вычислениях (после их завершения) находится в окнах **Messages** (Сообщения) и **Log** (Журнал). Перейдите на вкладки **Messages** и **Log** (Журнал) в окне **Graphics** (Графическом окне), чтобы ее просмотреть. Окно **Messages** можно также открыть из выпадающего списка **Windows** (Окна) на вкладке ленты **Home** (Главная).



Results (Результаты)

Напряжение по Мизесу отображается в окне **Graphics** (Графическом окне) в виде графика типа **Surface** (Распределение по поверхности) по умолчанию, а для визуализации смещений используется его опция **Deformation** (Деформация). Измените единицу измерения по умолчанию (N/m^2) на более удобные МПа, как описано ниже.

- 1 В **Model Builder** (Построителе моделей) раскройте узел **Results > Stress (solid)** (Результаты > Напряжение)  и щелкните по **Surface 1** .

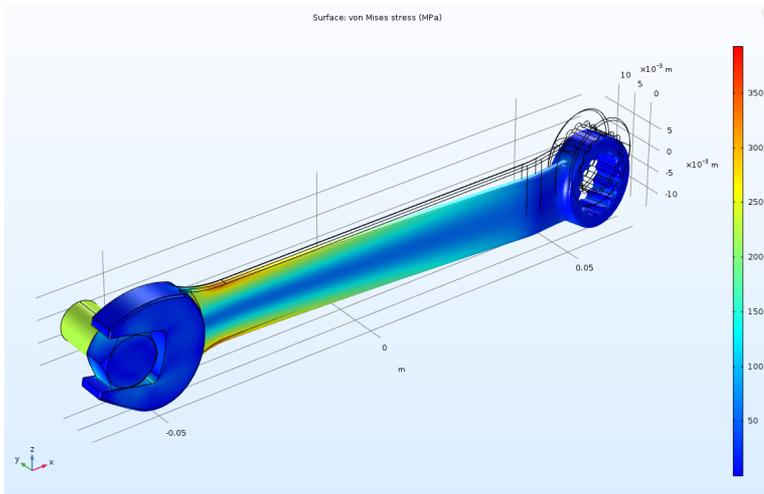


- 2 В окне **Settings** (Настройки) в разделе **Expression** (Выражение) в списке **Unit** (Единица измерения) выберите **MPa** (или введите MPa в этом поле).



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

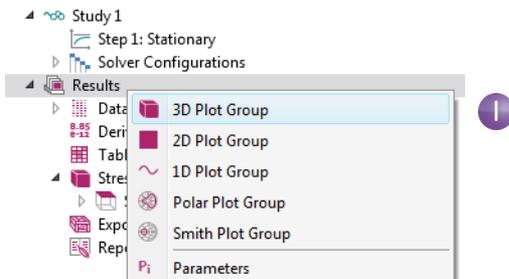
Показано распределение напряжения по Мизесу в болте и гаечном ключе при вертикально приложенной нагрузке.



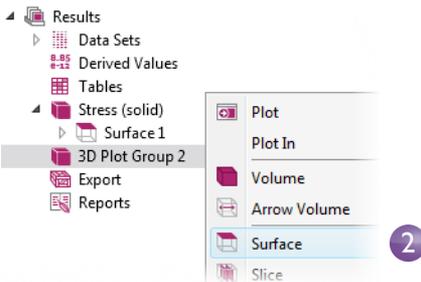
Стандартная сталь, из которой делают такие инструменты, как гаечный ключ, имеет предел текучести около 600 МПа, поэтому наша нагрузка в 150 Н (т. е. примерно 34 фунт-силы) в результате приводит к ситуации, близкой к пластической деформации. Допустим, требуется определить предельно допустимый уровень с трехкратным запасом прочности. Чтобы быстро

оценить, какая часть гаечного ключа наиболее подвержена риску пластической деформации, постройте график для неравенства, например `solid.mises>200[MPa]`.

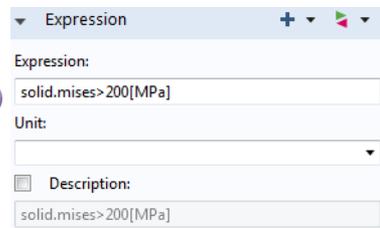
- 1 Щелкните правой кнопкой мыши по узлу **Results** (Результаты) и добавьте **3D Plot Group** (Группу трехмерных графиков).



- 2 Щелкните правой кнопкой мыши по узлу **3D Plot Group 2** (Группа трехмерных графиков 2) и выберите **Surface** (Распределение по поверхности).



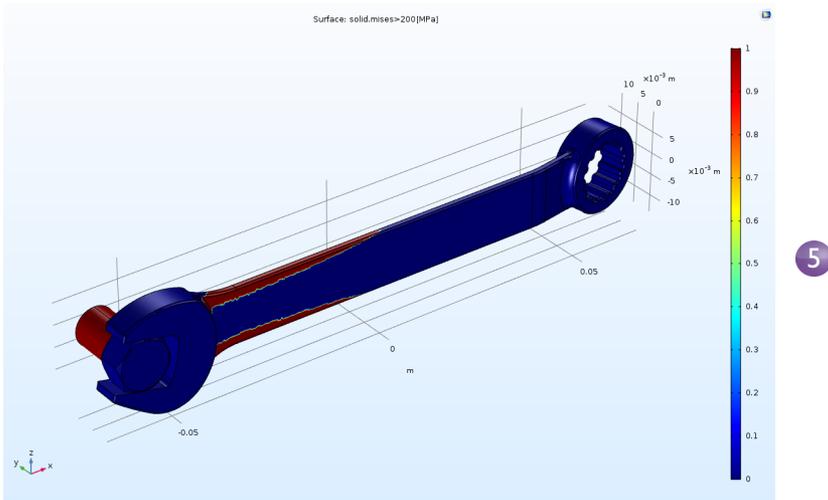
- 3 В окне **Settings** графика **Surface** нажмите кнопку **Replace Expression** (Заменить выражение) и двойным щелчком выберите **Model > Component 1 > Solid Mechanics > Stress > solid.mises-von Mises stress** (Модель > Компонент 1 > Механика твердого тела > Напряжение > напряжение по Мизесу). Если имя переменной заранее известно, можно напрямую ввести `solid.mises` в поле **Expression** (Выражение). Отредактируйте выражение, приведя его к виду `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.

- 4 Нажмите кнопку **Plot** (Построить график) .
- 5 В **Model Builder** (Построителе моделей) щелкните **3D Plot Group 2** (Группа трехмерных графиков 2). Нажмите клавишу F2 и в диалоговом окне **Rename 3D Plot Group** (Переименовать трехмерный график) введите **Safety Margin** (Безопасный уровень). Нажмите **OK**. Вы также можете редактировать имя в верхней части окна **Settings** (Настройки).

Как видно из графика, напряжение в болте достаточно велико, но нам более интересен гаечный ключ. Чтобы гаечный ключ гарантированно выдерживал нагрузку 150 Н с трехкратным запасом прочности, следует 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 напряжений 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

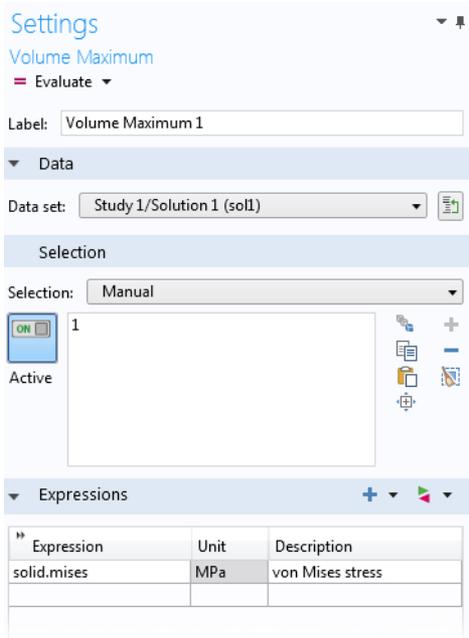
Чтобы проверить точность расчета максимального напряжения по Мизесу в гаечном ключе, требуется провести анализ сходимости по сетке (в английской терминологии — mesh convergence analysis). Для этого воспользуемся более мелкой сеткой и, соответственно, увеличим число степеней свободы (DOF).



В этом разделе описывается достаточно специализированный и продвинутый функционал, поэтому при первом чтении его можно пропустить. Для выполнения анализа сходимости рекомендуется использовать компьютер с не менее чем 4 ГБ оперативной памяти (RAM).

РАСЧЕТ МАКСИМАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПО МИЗЕСУ

- 1 Чтобы проанализировать напряжение по Мизесу в гаечном ключе, в разделе **Results** (Результаты) дерева модели щелкните правой кнопкой мыши по узлу **Derived Values** (Расчет выражений) ^{MAX} и выберите **Maximum > Volume Maximum** (Максимум > По объему) ^{MAX}.
- 2 В окне **Settings** для **Volume Maximum** в разделе **Selection** (Выборка) выберите **Manual** (Вручную) и в нем укажите домен 1, щелкнув по гаечному ключу в окне **Graphics** (Графическом окне). Мы будем анализировать только значения в области гаечного ключа без учета напряжений в болте.
- 3 В первой строке таблицы **Expressions** (Выражения) в столбце **Expression** введите `solid.mises`. Чтобы найти выражение для напряжения по Мизесу, вы можете также щелкнуть по кнопке **Replace Expression** (Заменить выражение)  и перейти к этой переменной.
- 4 В таблице **Expressions** введите значение МПа в поле **Unit** (Единица измерения).



Settings
Volume Maximum
= Evaluate

Label: Volume Maximum 1

Data
Data set: Study 1/Solution 1 (sol1)

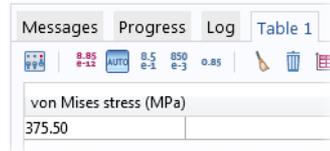
Selection
Selection: Manual

1
Active

Expressions

Expression	Unit	Description
solid.mises	MPa	von Mises stress

5 Для анализа максимального напряжения нажмите **Evaluate** (Рассчитать) в окне **Settings** для **Volume Maximum**. Результат расчета — примерно 375 МПа — отобразится в окне **Table** (Таблица).



5

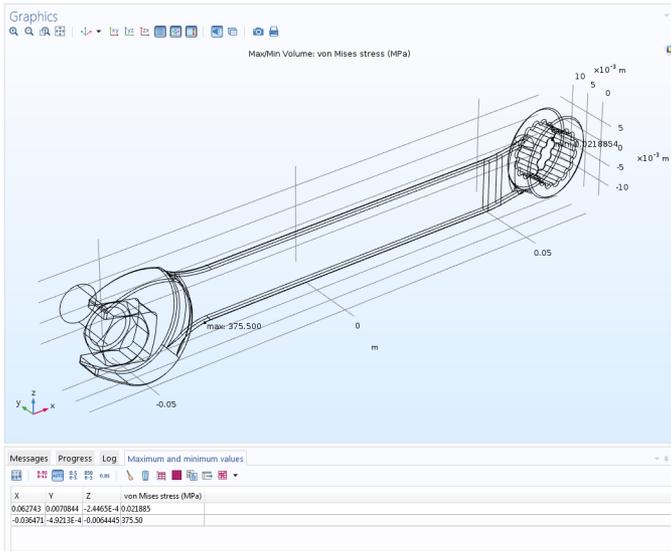
6 Чтобы проверить, в какой точке достигается максимальное значение, постройте график **Max/Min Volume** (Максимум/минимум по объему). Щелкните правой кнопкой мыши по узлу **Results** (Результаты) и добавьте **3D Plot Group** (Группа трехмерных графиков). Далее щелкните правой кнопкой мыши по узлу **3D Plot Group 3** (Группа трехмерных графиков 3) и выберите **More Plots > Max/Min Volume**.

7 Для построения графика для гаечного ключа, а не болта щелкните правой кнопкой мыши по узлу **Max/Min Volume** и выберите **Selection** (Выборка), далее выберите только домен 1, соответствующий гаечному ключу.

8 В окне **Settings** (Настройки) для графика **Max/Min Volume** в текстовом поле **Expression** введите `solid.mises`.

9 В окне **Settings** раздела **Expression** в поле **Unit** (Единица измерения) выберите **MPa** (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 (точные значения могут отличаться в зависимости от запущенной версии).

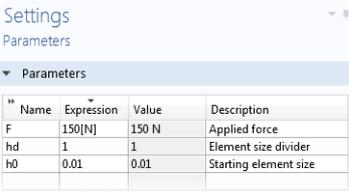


10

ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ СЕТКИ

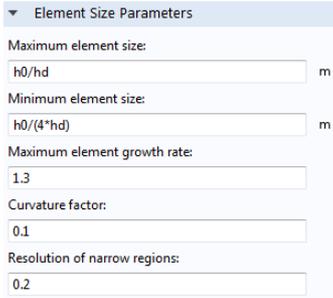
Теперь зададим параметрическое исследование, чтобы последовательно сгущать сетку в ходе решения и в конечном счете получить график зависимости максимального напряжения по Мизесу от размера сетки. Сначала зададим параметры, которые будут контролировать плотность сетки.

- 1 В **Model Builder** (Построителе моделей) щелкните по **Parameters** (Параметры)  в разделе **Global Definitions** (Глобальные определения) .
- 2 Перейдите в окно **Settings** (Настройки) узла **Parameters**. В таблице **Parameters** или в полях под этой таблицей укажите следующее:
 - 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** (Масштабирующий делитель размера элемента сетки).
- 3 Теперь создайте новый параметр с именем **h0**, выражением **0.01** и описанием **Starting element size** (Начальный размер элемента). Этот параметр будет определять размер элемента в начале параметрического исследования.



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

- 4 В **Model Builder** в разделе **Component 1** (Компонент 1) выберите **Mesh 1** (Сетка 1) . В окне **Settings** (Настройки) раздела **Mesh** (Сетка) выберите опцию **User-controlled** (сетка под управлением пользователя) из списка **Sequence type** (Тип последовательности).
- 5 В разделе **Mesh 1** (Сетка 1) щелкните по узлу **Size** (Размер) .
- 6 В окне **Settings** (Настройки) узла **Size** 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:

- h_0/h_d в поле **Maximum element size** (Максимальный размер элемента).
- $h_0/(4 \cdot h_d)$ 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 областей).

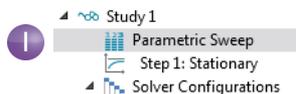
Дополнительную информацию о параметрах, регулирующих размеры элементов сетки см. на стр. 82.

PARAMETRIC SWEEP (ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ)

И SOLVER SETTINGS (НАСТРОЙКИ РЕШАТЕЛЯ)

Теперь добавим параметрическое исследование для параметра h_d .

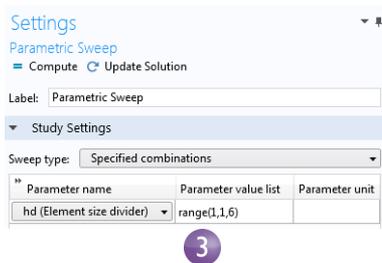
- 1 В **Model Builder** (Построителе моделей) щелкните правой кнопкой мыши по **Study 1** (Исследование 1)  и выберите **Parametric Sweep** (Параметрическое исследование) .



Узел **Parametric Sweep** добавится в последовательность Построителя моделей.

- 2 В окне **Settings** (Настройки) для **Parametric Sweep** под таблицей в разделе **Study Settings** (Настройки исследования) нажмите кнопку **Add** (Добавить) . В списке **Parameter names** (Имена параметров) таблицы выберите h_d .

- 3 Задайте диапазон **Parameter values** (Значения параметров) для анализа. Нажмите кнопку **Range** (Диапазон)  и введите значения в диалоговом окне **Range**. В поле **Start** (Начало) введите 1. В поле **Step** (Шаг) введите 1, а в поле **Stop** (Окончание) укажите 6. Нажмите кнопку **Replace** (Заменить). В поле **Parameter value list** (Список значений параметров) отобразится $\text{range}(1, 1, 6)$.



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

Дополнительную информацию о задании параметрического исследования см. на стр. 137.

Для наибольшего значения параметра hd получается более миллиона степеней свободы (DOFs). Соответственно, мы переключимся на менее затратный с точки зрения памяти итерационный 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 по **Suggested Iterative Solver** (Предлагаемый итеративный решатель)  и выберите **Enable** (Включить). При выборе итерационного решателя обычно расходуется меньше памяти, но для эффективной работы иногда требуется настройка решателя под конкретную физику.
- 5 В разделе **General** (Общие свойства) в окне **Settings** (Настройки) узла **Suggested Iterative Solver** (Предлагаемый итеративный решатель) измените значение параметра **Preconditioning** (Предобусловливание) на **Right**. Это низкоуровневая настройка решателя, благодаря которой не будет появляться никаких предупреждений. Данная настройка не влияет на результат вычислений. Предобусловливание — это математическое преобразование, которое адаптирует систему уравнений конечных элементов к требованиям итеративного решателя.
- 6 Щелкните по узлу **Study 1** (Исследование 1) и выберите **Compute** (Запуск расчета)  либо в окне **Settings** (Настройки), либо щелчком правой кнопкой мыши по узлу. Также можно нажать **Compute** (Запуск расчета) на вкладке ленты **Home** (Главная) или **Study** (Исследование). Расчет займет несколько минут в зависимости от мощности компьютера и потребует около 4 ГБ оперативной памяти.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

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

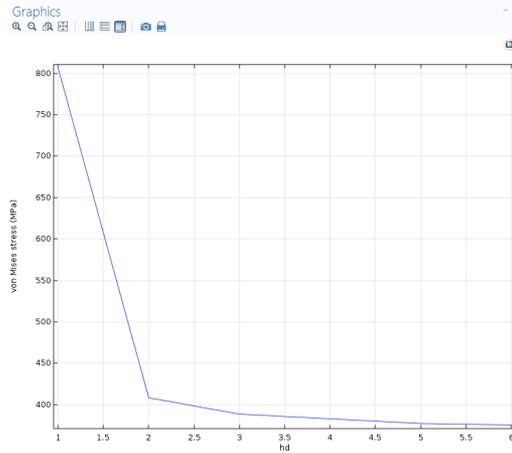
- 1 В разделе **Results > Derived values** (Результаты > Вычисление выражений) Построителя моделей выберите узел **Volume Maximum I** .
Результаты параметрического исследования хранятся в новом **Data Set** (Наборе данных) под названием **Study 1/Parametric Solutions 1** (Исследование 1/Параметрические решения 1). Теперь скорректируем настройки для операции **Volume Maximum**:
- 2 В окне **Settings** (Настройки) для **Volume Maximum** измените **Data Set** (Набор данных) на **Study 1/Parametric Solutions 1** (Исследование 1/Параметрические решения 1).
- 3 Щелкните стрелку рядом с кнопкой **Evaluate** (Вычислить) в верхней части окна **Settings** (Настройки) для **Volume Maximum** (Максимум по объему)

и укажите, что результат вычисления требуется вывести в **New Table** (Новую таблицу). Операция может занять примерно 20 секунд.

- 4 Чтобы построить график на основе результатов, представленных в таблице, нажмите кнопку **Table Graph** (Табличный график)  в верхней части окна **Table** (Таблица).

hd	von Mises stress (MPa)
1.0000	806.26
2.0000	408.35
3.0000	388.68
4.0000	382.98
5.0000	377.35
6.0000	375.45

4



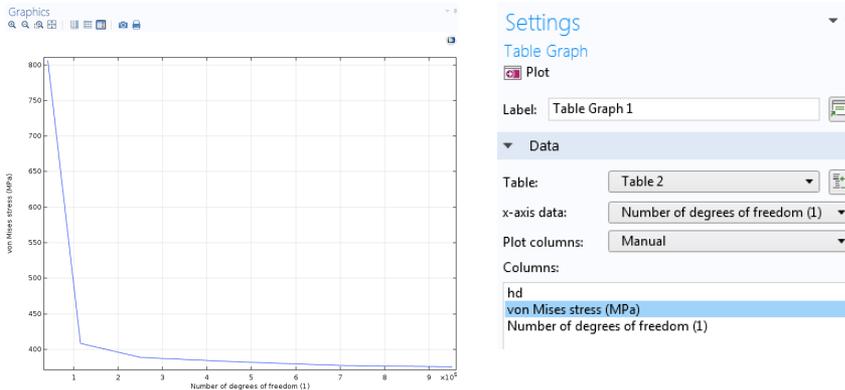
Однако интереснее построить график зависимости максимального значения напряжения от числа степеней свободы (DoFs). Для этого воспользуемся встроенной переменной `numberofdofs`.

- 5 Щелкните правой кнопкой мыши по узлу **Derived Values** (Вычисление выражений)  и выберите **Global Evaluation** (Расчет глобального выражения) .
- 6 В окне **Settings** (Настройки) для **Global Evaluation** измените **Data Set** (Набор данных) на **Study I/Parametric Solutions I** (Исследование 1/Параметрические решения 1).
- 7 В поле **Expressions** (Выражения) введите `numberofdofs`.
 Вы можете ввести первые несколько символов имени переменной и нажать `Ctrl+Space`, чтобы увидеть список доступных переменных.
- 8 В окне **Settings** (Настройки) для **Global Evaluation** (Расчет глобального выражения) щелкните по стрелке рядом с кнопкой **Evaluate** (Вычислить) и укажите, что результат вычисления требуется вывести в **Table 2** (Таблицу 2). Рядом с ранее вычисленными значениями каждого параметра отобразятся значения количества степеней свободы.

Анализ сходимости показывает, что рассчитанное значение максимального напряжения по Мизесу в ручке гаечного ключа уменьшается с начального

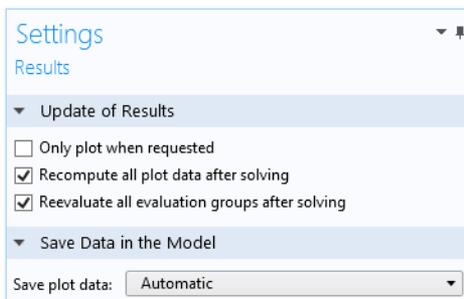
достаточно высокого значения для сетки, имеющей около 40 000 степеней свободы, до 375 МПа для сетки, имеющей около 1 000 000 степеней свободы. Он также показывает, что результаты для примерно 500 000 степеней свободы имеют практически такую же точность, как и для 1 000 000.

На рисунке ниже показаны соответствующие окна **Table Graph** (Табличный график) и **Table Graph Settings** (Настройки табличного графика).



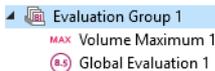
В зависимости от установленной у вас версии COMSOL Multiphysics эти значения могут немного различаться из-за разного числа элементов, созданных алгоритмом построения сетки (сеточным генератором).

Помимо узла **Derived Values** (Вычисление выражений), вы можете использовать узел **Evaluation Groups** (Группы расчетов). **Evaluation Group** имеет похожие на **Plot Groups** (Группы графиков) и **Derived Values** свойства. **Evaluation Group** содержит уже интегрированную к ней таблицу, в то время как узел **Derived Values** выводит данные в таблицу по вашему выбору. Кроме этого, значения в узле **Evaluation Groups** автоматически пересчитываются с каждым новым запуском на расчет. Чтобы активировать данную опцию, поставьте соответствующий флажок в окне **Settings** (Настройки) узла **Results** (Результаты), как показано на рисунке ниже.

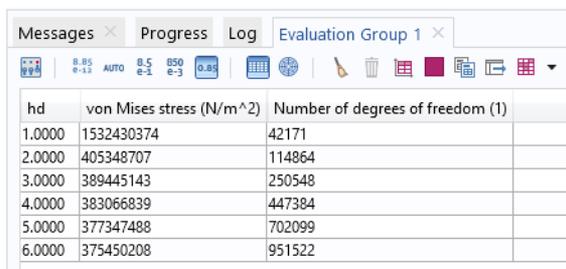


В окне **Settings** вы можете также указать, что все графики нужно повторно перестраивать после перерасчета.

Вы можете добавить узел **Evaluation Group** так же, как вы добавляете узел **Plot Group** (Группа графиков): выбрав данный элемент в контекстном меню, всплывающем по нажатию правой кнопкой мыши на узел **Results**. На рисунке ниже показан узел **Evaluation Group**, который выполняет ту же задачу, что и узел **Derived Values**, описанный выше.



На рисунке ниже показана соответствующая таблица значений в узле **Evaluation Group**.



hd	von Mises stress (N/m ²)	Number of degrees of freedom (1)
1.0000	1532430374	42171
2.0000	405348707	114864
3.0000	389445143	250548
4.0000	383066839	447384
5.0000	377347488	702099
6.0000	375450208	951522

На этом изучение учебной модели гаечного ключа завершено.

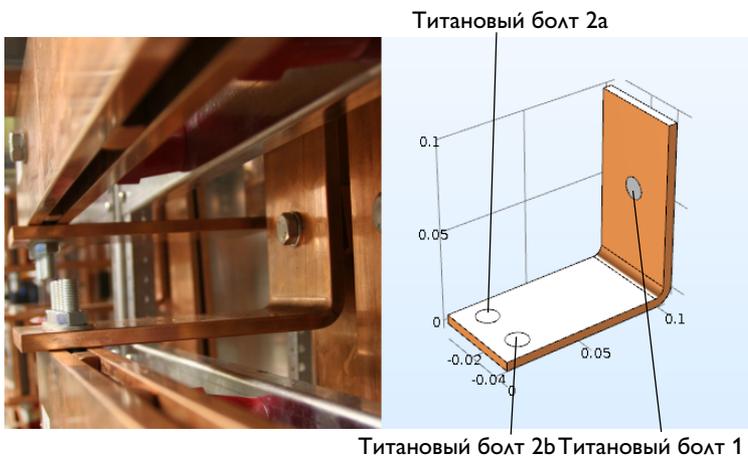
Пример 2. Электрическая шина — мультифизическая модель

Джоулев нагрев электрической шины

Эта учебная модель демонстрирует принципы мультифизического моделирования в COMSOL Multiphysics. Вы узнаете, как использовать предварительно сконфигурированные сочетания мультифизических интерфейсов и учитывать физические явления, не включенные в рассмотрение изначально. В итоге у вас получится полноценная мультифизическая модель.

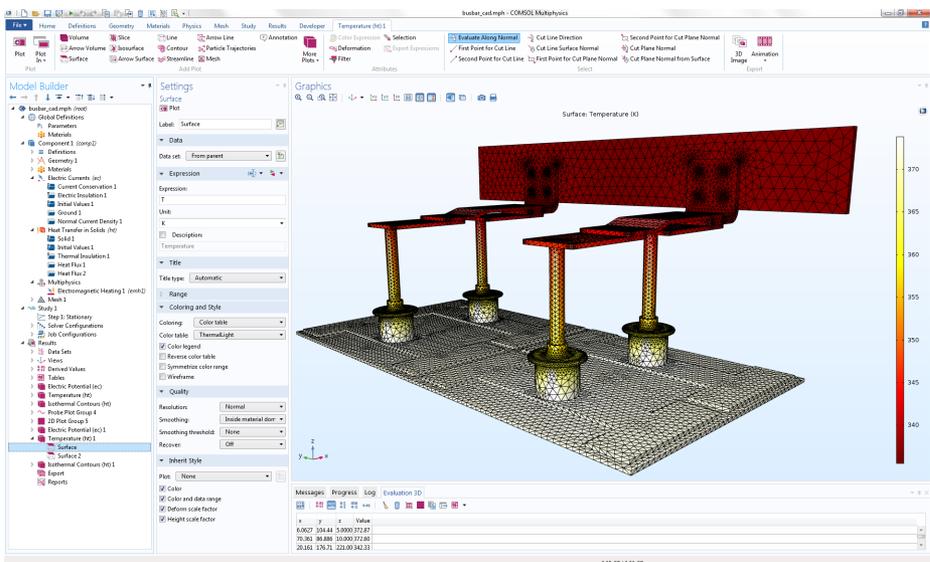
Модель, которую предполагается создать, будет анализировать электрическую шину, подводящую постоянный ток большой величины к промышленному оборудованию, как показано на иллюстрации ниже. Ток, протекающий по электрической шине от болта 1 к болтам 2a и 2b, нагревает ее за счет резистивных потерь — это явление называется джоулевым нагревом. Электрическая шина изготовлена из меди, а болты — из титанового сплава. Болты шин обычно изготавливают из стали, но в этом примере мы рассмотрим случай сильно коррозионной среды. По этой причине был выбран титановый сплав.

В обычных условиях электрический ток протекает преимущественно по медному проводнику. Однако в этом примере показано влияние нежелательной электрической нагрузки от болтов на шину. Наличие разных материалов очень важно, так как электропроводность титана ниже, чем у меди, поэтому плотность тока в болтах будет более высокой.



Задача моделирования — точно рассчитать нагрев электрической шины. После знакомства и анализа базового мультифизического явления можно изучить механические напряжения и деформации в электрической шине, вызванные тепловым расширением, а также охлаждение системы воздушным потоком.

Явление джоулева нагрева описывается законами сохранения для электрического тока и энергии. После решения уравнений для этих двух законов мы получим поле температуры и электрическое поле соответственно. Все поверхности, кроме контактных поверхностей болтов, охлаждаются за счет естественной конвекции воздухом вокруг электрической шины. Предположим, что выступающие части болта не влияют на охлаждение или нагрев устройства. Электрический потенциал на вертикальной поверхности верхнего болта справа составляет 20 мВ, а потенциал на двух горизонтальных поверхностях нижних болтов равен 0 В. В результате получается довольно высокая и потенциально небезопасная нагрузка на электрическую шину данного типа. Более сложные граничные условия для электродинамического анализа, в том числе возможность задавать полный ток через границу, доступны в модуле AC/DC. Более сложная модель, рассматривающая сборку из нескольких электрических шин, как показано на рисунке ниже, включена в Библиотеки моделей и приложений для ряда модулей расширения, в том числе для модуля AC/DC и некоторых продуктов группы LiveLink™ для различных CAD-пакетов.



Обзор модели электрической шины

На основе этой учебной модели дополнительно рассматриваются более сложные и углубленные темы, демонстрирующие обширные возможности COMSOL Multiphysics. Эти темы раскрыты в следующих разделах:

- «Parameters (Параметры), Functions (Функции), Variables (Переменные) и Couplings (Взаимосвязи)» на стр. 103 рассказывает, как задавать функции и связи между компонентами.
- «Material Properties (Свойства материалов) и Material Libraries (Библиотеки материалов)» на стр. 108 показывает, как настраивать материалы и добавлять их в вашу собственную библиотеку материалов.
- «Добавление сеток» на стр. 110 — здесь вы узнаете, как добавить и определить две различные сетки, а затем сравнить их в Графическом окне.
- «Добавление физических интерфейсов» на стр. 113 — в этом разделе можно изучить мультифизические возможности пакета, добавив в модель электрической шины расчет деформации твердого тела и ламинарных потоков.
- «Parametric Sweeps (Параметрические исследования)» на стр. 137 показывает, как задать изменение ширины электрической шины с помощью параметра и получить решение для диапазона значений этого параметра. В результате получится график зависимости средней температуры от ширины.
- «Parallel Computing (Параллельные вычисления)» на стр. 151 даст представление о вычислениях на кластерах.
- «Режим клиент-сервер (Client-Server) в COMSOL Multiphysics» на стр. 154 — этот раздел даст представление об организации режима работы «клиент — сервер» в COMSOL Multiphysics.

Model Wizard (Мастер создания моделей)

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



Когда программа запустится, нажмите кнопку **Model Wizard** (Мастер создания моделей). Кроме того, Мастер создания моделей всегда можно открыть, выбрав **File > New** (Файл > Создать). Затем выберите **Model Wizard**.

1



2 В окне **Select Space Dimension** (Выбрать размерность пространства) нажмите кнопку **3D**.

2



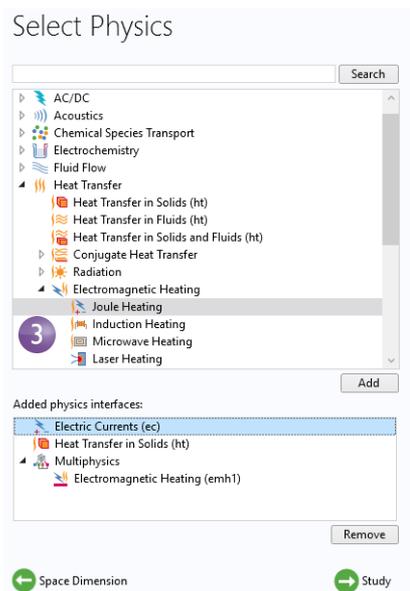
3 В окне **Select Physics** (Выбрать физический интерфейс) раскройте узел **Heat Transfer > Electromagnetic Heating** (Теплопередача > Электромагнитный нагрев). После этого щелкните правой кнопкой мыши по узлу **Joule Heating** (Джоулев нагрев) и выберите **Add Physics**. Нажмите кнопку **Study** (Исследование).

Кроме того, для добавления физического интерфейса можно сделать двойной щелчок мыши по названию интерфейса или нажать кнопку **Add** (Добавить).

Еще один способ добавить физический интерфейс — открыть окно **Add Physics** (Добавление физического интерфейса), щелкнув правой кнопкой мыши по узлу **Component** (Компонент)

в Построителе моделей и выбрав **Add Physics** (Добавить физический интерфейс).

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



3

4 В окне **Select Study** (Выбор исследования) щелкните по типу исследования **Stationary** (Стационарное), чтобы выбрать его. Нажмите кнопку **Done** (Готово).

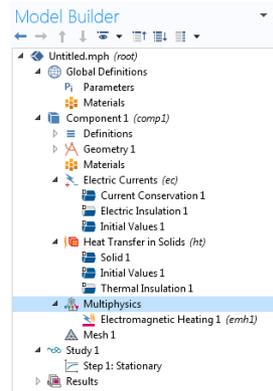
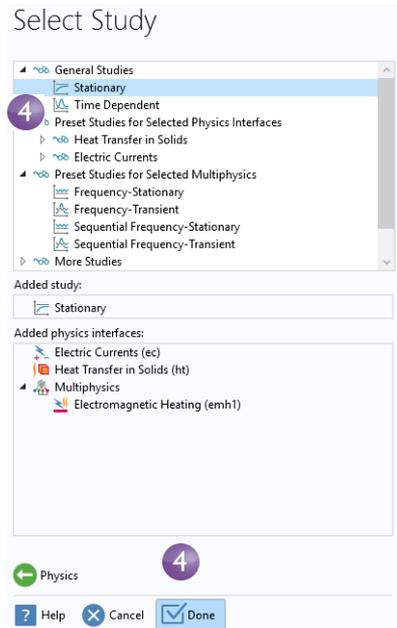
С помощью стационарного исследования мы будем искать установившуюся температуру шины, находящейся в тепловом равновесии с окружающей средой.

Предварительно настроенное **Study** (Исследование) содержит настройки решателя и уравнений, адаптированные для выбранного сочетания физических интерфейсов, то есть в данном случае для интерфейса **Joule Heating** (Джоулев нагрев).

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

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

Физический интерфейс — это пользовательский интерфейс для конкретной области физики, определяющий уравнения, настройки построения сетки, решателей и отображения результатов. Мультифизический интерфейс — это сочетание физических интерфейсов и мультифизических связей между ними. Мультифизический интерфейс **Joule Heating** (Джоулев нагрев) состоит из двух физических интерфейсов — **Electric Currents** (Электрические токи) и **Heat Transfer in Solids** (Теплопередача в твердых телах), а также мультифизической связи **Electromagnetic Heating** (Электромагнитный нагрев), который отображается в узле **Multiphysics** (Мультифизика). Этот метод комбинирования физических явлений позволяет гибко использовать все функции отдельных физических интерфейсов для мультифизического моделирования.



Global Definitions (Глобальные определения)

Для экономии времени рекомендуется подгрузить геометрию из файла. В этом случае вы можете сразу перейти к разделу «Geometry (Геометрия)» на стр. 66.

Если же вы хотите самостоятельно построить геометрию, то ее параметры можно задать в узле **Global Definitions** (Глобальные определения). Сначала выполните шаги с 1 по 3 ниже, чтобы задать список параметров для модели. Затем выполните шаг 4 и перейдите к разделу «Приложение А. Построение геометрии» на стр. 157.

Узел **Global Definitions** (Глобальные определения)  в Построителе моделей содержит **Parameters** (Параметры), **Variable** (Переменные) и **Functions** (Функции), имеющие глобальную область

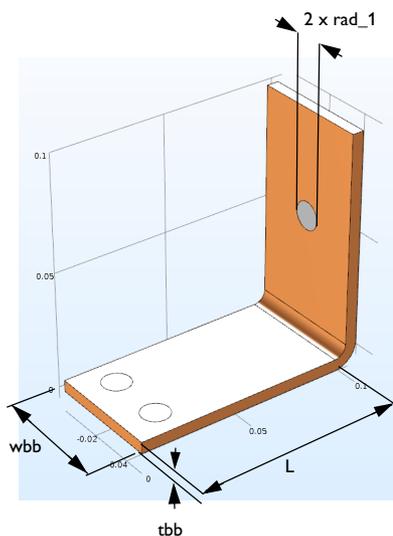
действия. Дерево модели может содержать сразу несколько компонентов модели, и определения с глобальной областью действия доступны всем компонентам. В этом примере есть только один узел **Component** (Компонент), использующий параметры. Если вы хотите ограничить область действия только этим компонентом, вы можете задать **Variables** (Переменные) и **Functions** (Функции) в подузле **Definitions** (Определения) соответствующего узла **Component** (Компонент). Однако там нельзя задавать **Parameters** (Параметры), поскольку последние задаются в узле **Global Definitions** (Глобальные определения) и всегда имеют глобальную область действия.

Так как далее в этом примере вы запустите параметрическое исследование для геометрии, с самого начала опишите геометрическую модель с помощью параметров. На этом шаге введите параметры: длину нижней части электрической шины L , радиус титановых болтов rad_1 , толщину электрической шины tbb и ширину устройства wbb .

Добавьте также параметр для управления размером сетки mh , коэффициент теплоотдачи при охлаждении естественной конвекцией htc и величину напряжения на электрической шине V_{tot} .

1 В узле **Global Definitions**  выберите раздел **Parameters** (Параметры) P_1 .

В таблице **Parameters** (Параметры) щелкните по первой строке в блоке **Name** (Имя) и введите L .



- 2 Щелкните по первой строке в блоке **Expression** (Выражение) и введите для L значение 9[cm]. Единица измерения указывается в квадратных скобках.
- 3 Добавьте остальные параметры: rad_1, tbb, wbb, mh, htc и Vtot из списка **Parameters** (Параметры) ниже. Полезно добавлять описания к переменным, чтобы другие пользователи и вы сами понимали их назначение.

Parameters			
Name	Expression	Value	Description
L	9[cm]	0.09 m	Length
rad_1	6[mm]	0.006 m	Bolt radius
tbb	5[mm]	0.005 m	Thickness
wbb	5[cm]	0.05 m	Width
mh	3[mm]	0.006 m	Maximum element size
htc	5[W/m^2/K]	5 W/(m^2·K)	Heat transfer coefficient
Vtot	20[mV]	0.02 V	Applied voltage

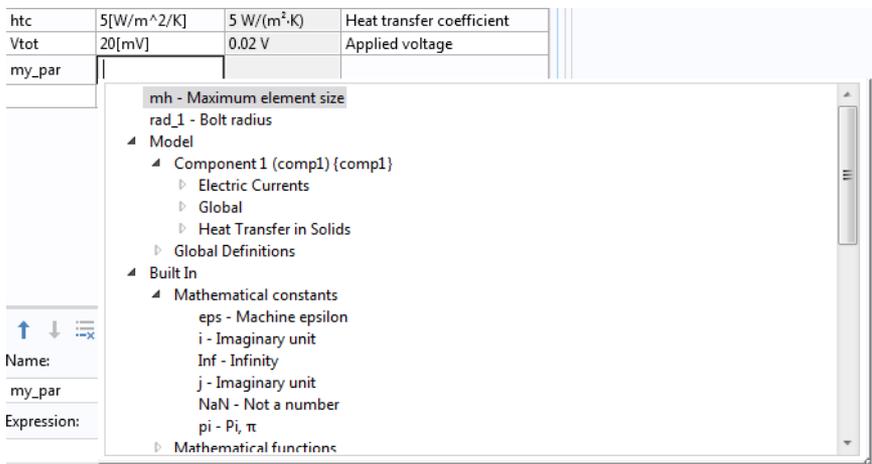
Нажмите кнопку **Save** (Сохранить)  на панели инструментов быстрого доступа и назовите модель busbar.mph или используйте соответствующий пункт меню **File** (Файл). После этого перейдите к разделу «Приложение А. Построение геометрии» на стр. 157.

Автодополнение и поиск по параметрам и переменным

Дерево модели содержит большое число параметров и переменных. Чтобы их было проще отыскать, вы можете использовать инструменты автодополнения и поиска, описанные ниже.

AUTOCOMPLETION (АВТОДОПОЛНЕНИЕ)

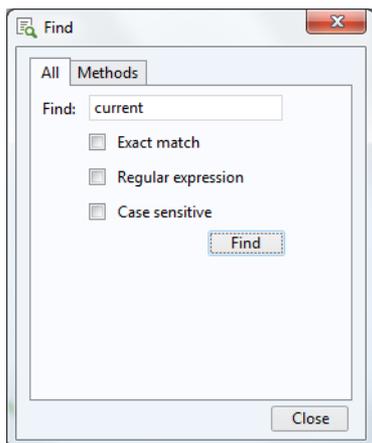
Используйте **Ctrl+Space** для автодополнения имен параметров и переменных. Например, в таблице **Parameters** (Параметры) вы можете щелкнуть по пустому полю **Expression** (Выражение) и нажать **Ctrl+Space**. Как показано на рисунке ниже, вы увидите список параметров и переменных.



Эта функция также работает для других полей ввода в **Model Builder** (Построителе моделей).

FIND (ПОИСК)

Чтобы найти параметры и переменные в дереве модели, щелкните по кнопке **Find** (Поиск) на панели быстрого доступа или используйте комбинацию клавиш **Ctrl+F**. При этом откроется окно **Find**.



Результаты поиска показаны в окне **Find Results** (Результаты поиска), как, например, на иллюстрации ниже, взятой из законченной модели электрической шины.

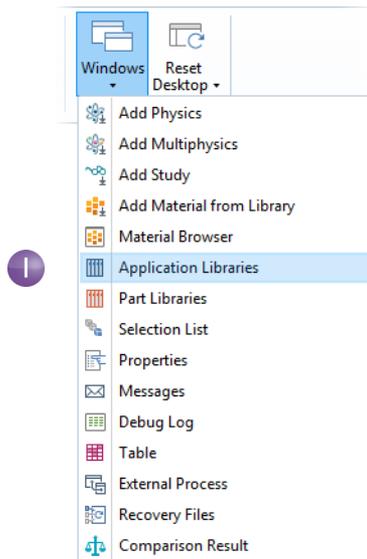
Node	Type	Text
Electric Currents (ec) {ec}	Node	Electric Currents
Electric Currents (ec) {ec}	Node	Electric Currents
Current Conservation 1 {cucn1}	Node	Current Conservation 1
Current Conservation 1 {cucn1}	Node	Current Conservation
Electromagnetic Heat Source 1 (emh1) {emh1}	Setting	Electric Currents (ec) {ec}
Boundary Electromagnetic Heat Source 1 (bemh1) {bemh1}	Setting	Electric Currents (ec) {ec}
Temperature Coupling 1 (tc1) {tc1}	Setting	Electric Currents (ec) {ec}
Current Density (pg4)	Node	Current Density
Surface 1 {surf1}	Setting	Current density norm

Вы можете открыть окно **Settings** (Настройки) для найденного узла, указанного в строках этого списка, дважды щелкнув по данной строке.

Geometry (Геометрия)

В этом разделе описано, как открыть геометрию из Библиотеки моделей и приложений. Физические интерфейсы, исследование, параметры и геометрия уже добавлены и хранятся в файле модели, который вы сейчас откроете.

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



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

Открыть файл вы можете:

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

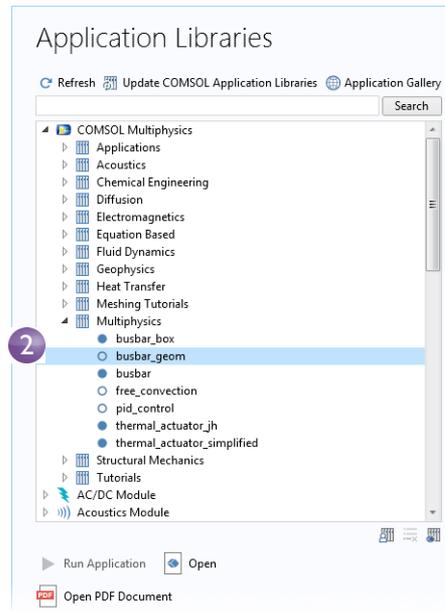
При запросе о сохранении **Untitled.mph** можно нажать No (Нет).

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

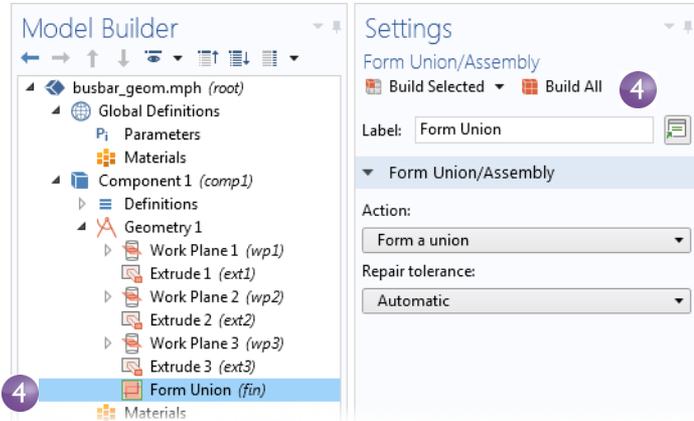
- 3 В разделе **Global Definitions** (Глобальные определения) щелкните по узлу **Parameters** (Параметры) P_1 .

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

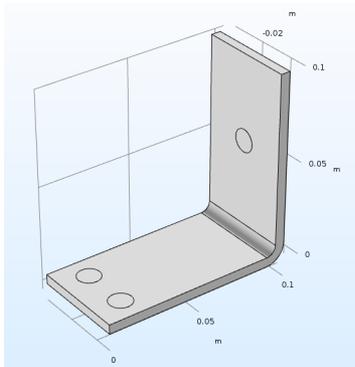
- 4 В **Model Builder** (Построителе моделей) в разделе **Component 1 > Geometry 1** (Компонент 1 > Геометрия 1) щелкните по узлу **Form Union** (Образовать объединение) и нажмите кнопку **Build All** (Построить все) в окне **Settings** (Настройки), чтобы перестроить геометрическую последовательность. Кроме того, можно воспользоваться лентой и нажать кнопку **Build All** (Построить все) в группе **Geometry** (Геометрия) на вкладке **Home** (Главная).



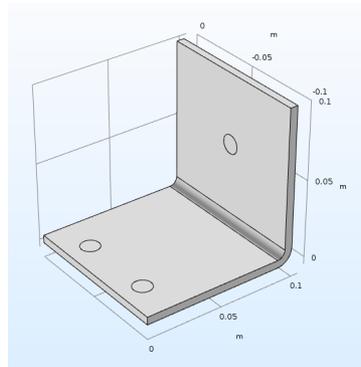
Name	Expression	Value
L	9[cm]	0.09 m
rad_1	6[mm]	0.006 m
tbb	5[mm]	0.005 m
wbb	10[cm]	0.1 m
mh	6[mm]	0.006 m
htc	5[W/m^2/K]	5 W/(m^2·K)
Vtot	20[mV]	0.02 V



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



wbb = 5cm



wbb = 10cm

6 Поэкспериментируйте с геометрией в окне **Graphics** (Графическом окне):

- Чтобы повернуть электрическую шину, нажмите левую кнопку мыши и перетащите указатель в нужную сторону в графическом окне.
- Чтобы переместить шину, щелкните по ней и перемещайте с нажатой правой кнопкой мыши.
- Чтобы приблизить или отдалить шину, перемещайте мышью с нажатым колесом.
- 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].

8 В **Model Builder** щелкните по узлу **Form Union** (Образовать объединение)  и нажмите кнопку **Build All** (Построить все) , чтобы перестроить геометрическую последовательность.

7

Name	Expression	Value
L	9[cm]	0.09 m
rad_1	6[mm]	0.006 m
tbb	5[mm]	0.005 m
wbb	5[cm]	0.05 m
mh	6[mm]	0.006 m
htc	5[W/m^2/K]	5 W/(m^2·K)
Vtot	20[mV]	0.02 V

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

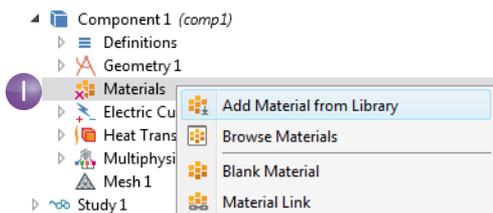
10 Если вы построили геометрию самостоятельно, то ваш файл уже имеет название **busbar.mph**, а если вы открыли этот файл из Библиотек моделей и приложений, выберите **Save As** (Сохранить как) в меню **File** (Файл) и переименуйте модель в **busbar.mph**.

После создания или импорта геометрии можно перейти к определению материалов.

Materials (Материалы)

В узле **Materials** (Материалы)  хранятся свойства материалов для всех физических интерфейсов и геометрических областей узла **Component** (Компонент). Электрическая шина изготовлена из меди, а болты — из титанового сплава. Оба этих материала доступны во встроенной базе данных (библиотеке) материалов.

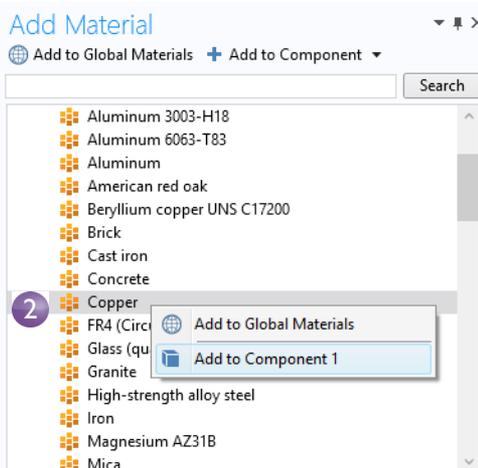
- 1 В Построителе моделей щелкните правой кнопкой мыши по **Component 1** > **Materials** (Компонент 1 > Материалы) и выберите **Add Material from Library** (Добавить материал из библиотеки).



По умолчанию окно открывается в правой части рабочего стола. Чтобы передвинуть окно, щелкните по его заголовку и перетяните окно в другое место. При перемещении окна его можно пристыковать несколькими способами, которые будут отображаться в окне программы.

- ! Если попытаться рассчитать модель без указания материалов, то в левом нижнем углу узла **Materials** (Материалы) появится красный крестик (×).

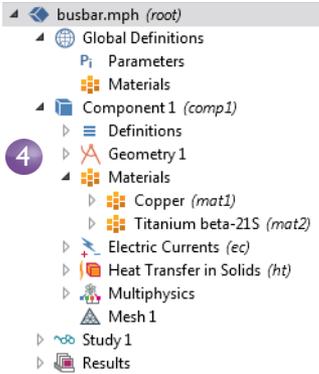
- 2 В окне **Add Material** (Добавление материала) раскройте каталог **Built-In materials** (Встроенные материалы) и найдите **Copper** (Медь). Щелкните правой кнопкой мыши по **Copper** (Медь) и выберите **Add to Component 1** (Добавить в Компонент 1). Вместо щелчка правой кнопкой мыши вы можете дважды щелкнуть по материалу.



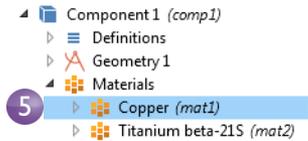
Узел **Copper** (Медь) добавится в Построитель моделей.

- 3 В окне **Add Material** (Добавить материал) прокрутите список каталога материалов **Built-In** (Встроенные) до элемента **Titanium beta-21S**. 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 В узле **Materials** (Материалы) щелкните по **Copper** (Медь) .



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

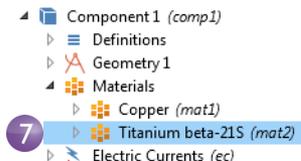
Property	Variable	Value	Unit	Property group
<input checked="" type="checkbox"/> Electrical conductivity	sigma_iso...	5.998e7[S/m]	S/m	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Heat capacity at constant pressure	Cp	385J/(kg*K)	J/(kg*K)	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Relative permittivity	epsilononr_i...	1	1	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Density	rho	8960[kg/m^3]	kg/m^3	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Thermal conductivity	k_iso ; kii...	400[W/(m*K)]	W/(m*K)	Basic
Relative permeability	mur_iso ; ...	1	1	Basic
Coefficient of thermal expansion	alpha_iso...	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	rho0	1.72e-8[ohm...	Ω·m	Linearized resistivity
Resistivity temperature coefficient	alpha	0.0039[1/K]	1/K	Linearized resistivity
Reference temperature	Tref	298[K]	K	Linearized resistivity

Раздел **Material Contents** (Содержимое материала) включает в себя полезную информацию о свойствах материалов, в т. ч. используемых в модели. Свойства, которые требуются для физических интерфейсов и при этом доступны в материале, помечены зеленой галочкой . Свойства, которые требуются для физики, но отсутствуют в материале, помечены предупреждающим значком . Доступные свойства, которые не используются в модели, не имеют меток.

- ⚠ **Coefficient of thermal expansion** (Коэффициент теплового расширения), **Young's modulus** (Модуль Юнга) и **Poisson's ratio** (Коэффициент Пуассона) из таблицы выше сейчас не используются, но потребуются позднее, когда мы добавим в модель учет напряжений и деформаций, вызванных нагревом.

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

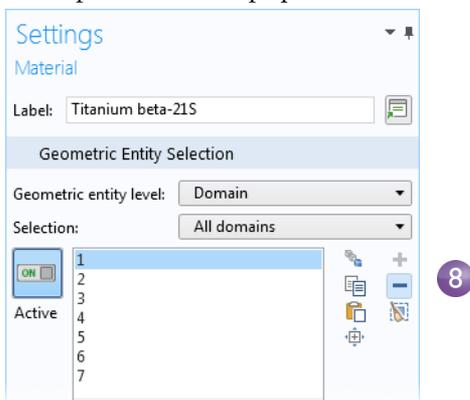
7 В Построителе моделей щелкните по **Titanium beta-21S** ✨.



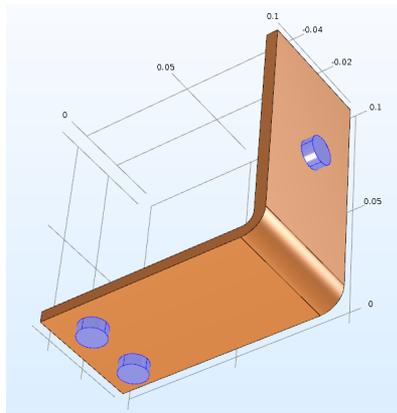
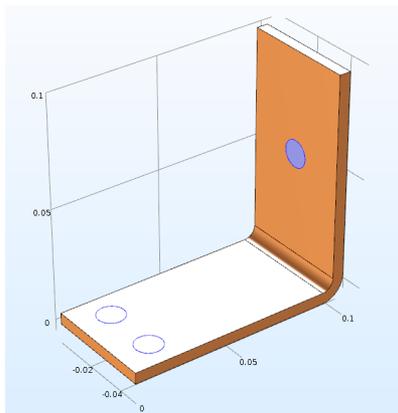
8 Выберите **All Domains** (Все области) в списке **Selection** (Выборка) и выберите область 1 в списке. Теперь удалите область 1 из списка выборки.

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

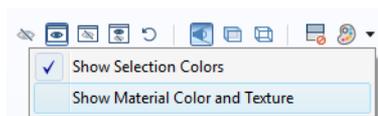
- Щелкните по области 1 в списке выборки, расположенном в окне **Settings** (Настройки) узла **Material** (Материал). После этого щелкните по кнопке **Remove from Selection** (Удалить из выборки)  или нажмите клавишу **Delete** на клавиатуре.
- Кроме того, удалить область 1 из списка выборки можно непосредственно в графическом окне.



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

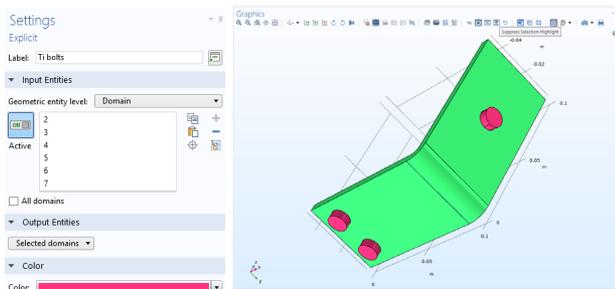


Вы можете включать и выключать отображение цвета и текстуры материала кнопкой **Color** (Цвет) на панели инструментов Графического окна. Чтобы медные компоненты



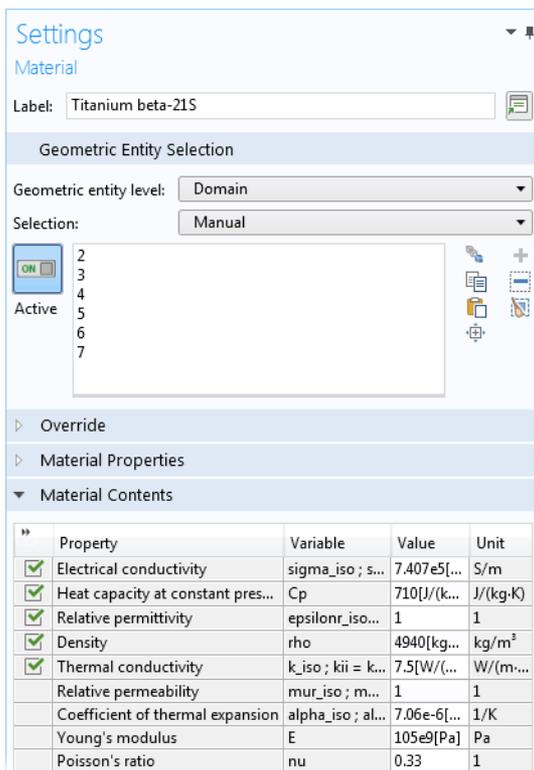
отображались в реалистичном цвете, выберите вариант **Show Material Color and Texture** (Показывать цвет и текстуру материала). При этом другие материалы тоже станут отображаться в реалистичных цветах. Вы можете включить цветовое выделение выборок с помощью варианта **Show Selection Colors** (Показать выборку цветом).

На рисунках ниже показаны окно **Settings** (Настройки) и Графическое окно, в которых использован нестандартный розовый цвет для выделения выборки. Добавлена и вторая выборка (не показана) с другим цветом выделения (зеленым).

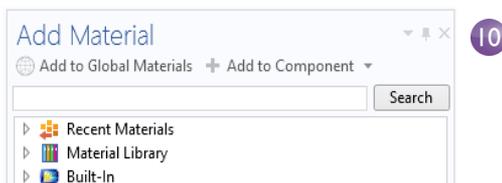


Обратите внимание: чтобы увидеть цвет при создании выборки, щелкните кнопку **Suppress Selection Highlight** (Отключить подсветку выборки) в панели инструментов Графического окна. Подробная информация о **Selections** (Выборках) приведена на стр. 116.

9 В окне **Settings** (Настройки) узла **Material** (Материал) просмотрите раздел **Material Contents** (Содержимое материала) для титана. Все свойства, необходимые для физических интерфейсов, должны быть помечены зеленой галочкой .



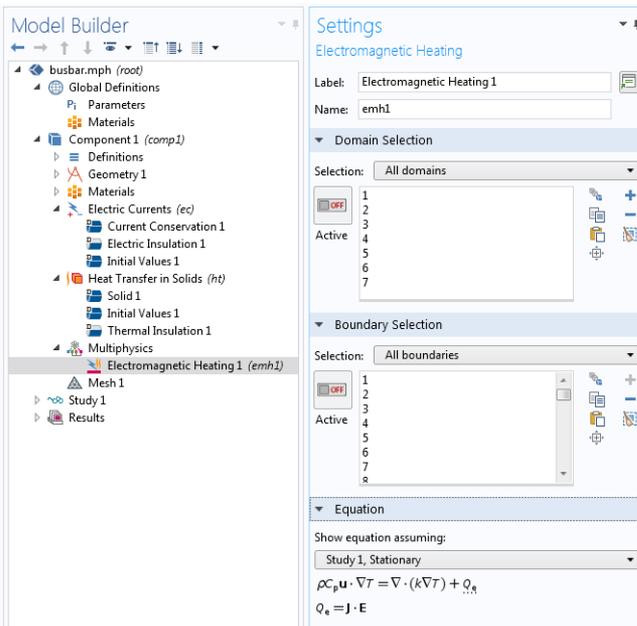
10 Закройте окно **Add Material** (Добавление материала), щелкнув по значку в правом верхнем углу или нажав кнопку-переключатель **Add Material** (Добавить материал)  в группе **Materials** (Материалы) на вкладке ленты **Home** (Главная).



Физический интерфейс и граничные условия

Далее мы рассмотрим настройки, применяемые к различным доменам, и зададим граничные условия для задачи теплопередачи и протекания электрического тока.

В окне Построителя моделей изучите дефолтные узлы физических интерфейсов, входящих в мультифизический интерфейс **Joule Heating** (Джоулев нагрев). Сначала сверните узел **Materials** (Материалы). Затем щелкните по стрелкам рядом с узлами **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 (дефолтный).

Решаемые в интерфейсе уравнения отображаются в разделе **Equation** (Уравнение) окна **Settings** (Настройки) соответствующих узлов физических интерфейсов.

Форма уравнения по умолчанию наследуется из исследования, добавленного в Мастере создания моделей. Для мультифизического интерфейса **Joule Heating** (Джоулев нагрев) отображаются уравнения, определяющие температуру и электрический потенциал.



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**

(Теплопередача в твердых телах) и **Electric Currents** (Электрические токи) доступны настройки для задания теплопроводности и электропроводности соответственно.

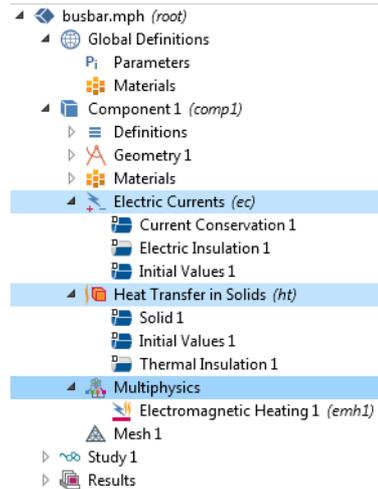
В узле **Electric Currents** узел **Current Conservation** (Сохранение тока) отражает сохранение электрического тока на уровне области, а узел **Electric Insulation** (Электрическая изоляция) содержит граничное условие по умолчанию для электрических токов.

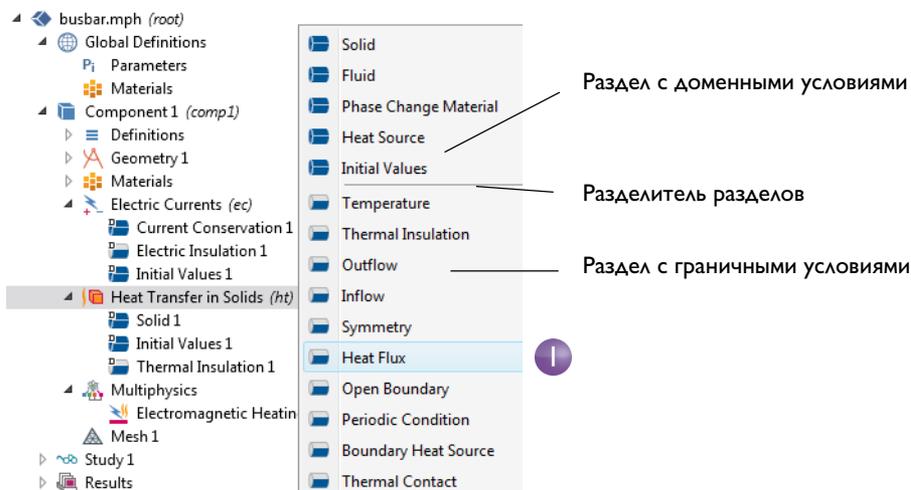
В узле **Heat Transfer in Solids**

(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 **Heat Transfer in Solids** (Теплопередача в твердых телах). Источник тепла для джоулева нагрева определяется в узле **Electromagnetic Heating** (Электромагнитный нагрев) в узле **Multiphysics** (Мультифизика). Узел **Initial Values** (Начальные условия), доступный в интерфейсах **Electric Currents** (Электрические токи) и **Heat Transfer in Solids** (Теплопередача в твердых телах), содержит условия, которые используются, например, в качестве начального приближения для нелинейного стационарного решателя или в качестве начальных условий для динамических задач во временной области.

Теперь задайте граничные условия.

1 Щелкните правой кнопкой мыши по узлу **Heat Transfer in Solids** (Теплопередача в твердых телах) . Во втором разделе контекстного меню — разделе граничных условий — выберите **Heat Flux** (Тепловой поток) .



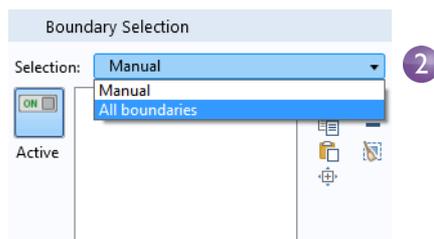


- 2 В окне **Settings** (Настройки) для **Heat Flux** (Тепловой поток) выберите **All boundaries** (Все границы) из списка **Selection** (Выборка).

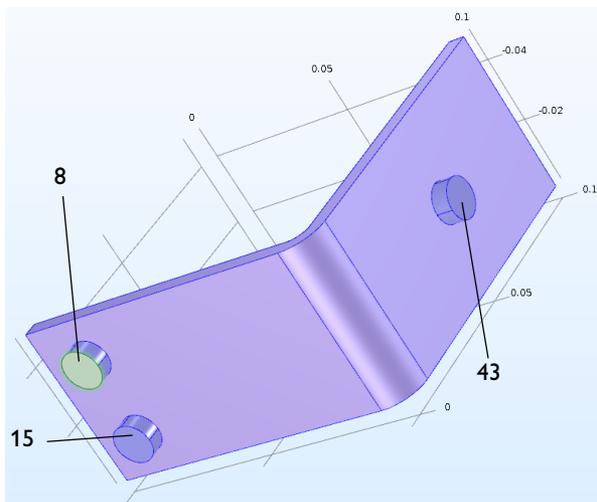
Предположим, что круглые торцы болтов не нагреваются и не охлаждаются окружающей средой.

На следующем шаге вы удалите выборку этих границ из списка выборки теплового потока, после чего к ним вновь будет применено граничное условие **Thermal Insulation** (Теплоизоляция) по умолчанию для интерфейса **Heat Transfer in Solids** (Теплопередача в твердых телах).

- 3 Поверните электрическую шину задней стороной. Наведите указатель мыши на одну из круглых поверхностей титанового болта, чтобы подсветить ее зеленым цветом. Щелкните по поверхности болта, чтобы удалить эту 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 выборки.



- 4 В окне **Settings** (Настройки) для **Heat Flux** (Тепловой поток) в разделе **Heat Flux** нажмите кнопку **Convective heat flux** (Конвективный тепловой поток). Введите h_{tc} в поле **Heat transfer coefficient** (Коэффициент теплоотдачи), h . Этот параметр вводится в таблицу **Parameters** (Параметры) в разделе описания «Global Definitions (Глобальные определения)» на стр. 63.

4

Heat Flux

General inward heat flux

Convective heat flux

$$q_0 = h \cdot (T_{ext} - T)$$

Heat transfer coefficient:

User defined

Heat transfer coefficient:

h W/(m²·K)

External temperature:

T_{ext} User defined

K

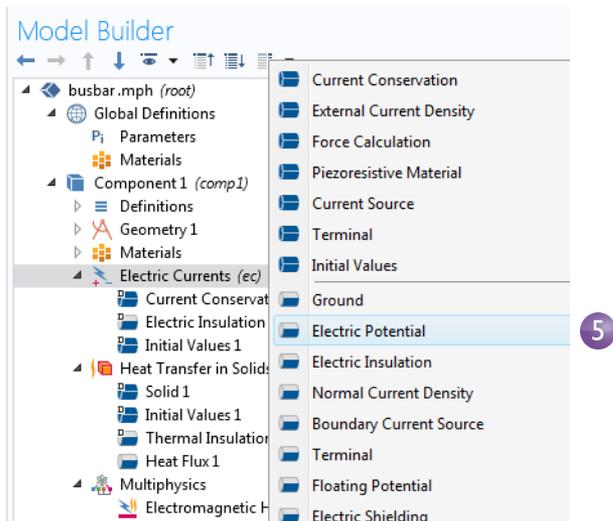
Heat rate

$$q_0 = \frac{P_0}{A}$$

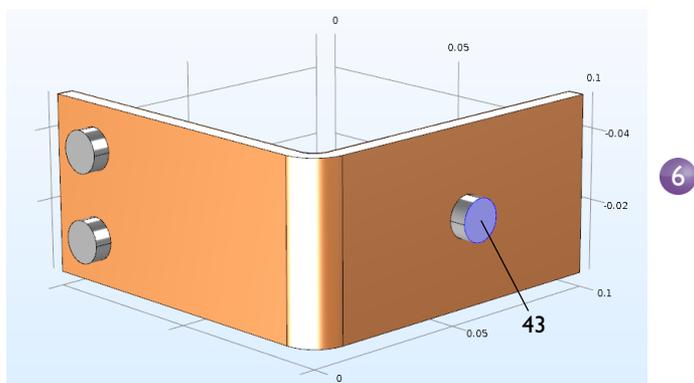
- ⚠ Более сложные граничные условия для исследования процессов теплопередачи доступны в модуле **Heat Transfer** (Теплопередача). Например, они позволяют задавать полную мощность, подаваемую на границу (Total deposited power), или граничные условия для таких типичных случаев свободной конвекции, как горизонтальные и вертикальные стенки.

Далее зададим граничные условия для электрического тока следующим образом:

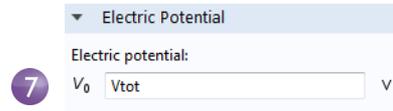
- 5 В Построителе моделей щелкните правой кнопкой мыши по узлу **Electric Currents** (Электрические токи) . Во втором разделе контекстного меню — разделе граничных условий — выберите **Electric Potential** (Электрический потенциал). Узел **Electric Potential** (Электрический потенциал)  добавится в дерево модели.



- 6 Наведите указатель мыши на круглую поверхность одного титанового болта, чтобы подсветить ее, а затем щелкните по ней для добавления границы 43 в список **Selection** (Выборка).



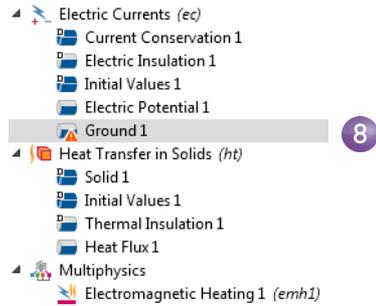
7 В окне **Settings** (Настройки) для **Electric Potential** (Электрический потенциал) введите V_{tot} в поле **Electric potential** (Электрический потенциал).



Наконец, осталось заземлить поверхности двух оставшихся болтов.

8 В Построителе моделей щелкните правой кнопкой мыши по узлу **Electric Currents** (Электрические токи).

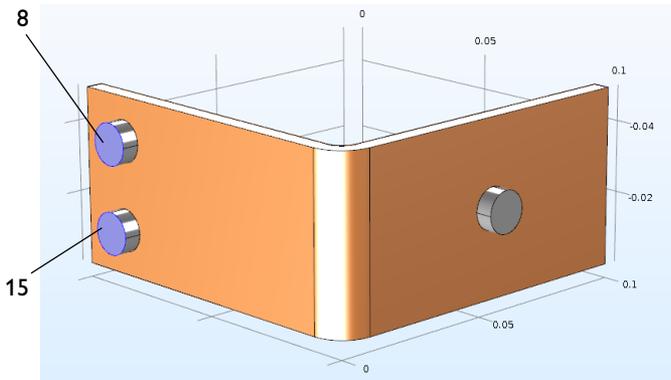
В разделе границ контекстного меню выберите **Ground** (Заземление). Узел **Ground** добавится в дерево модели. Теперь последовательность узлов дерева модели должна выглядеть, как на этой иллюстрации.



Значок «warning» (предупреждение), отображаемый на узле **Ground** (Заземление), показывает, что выборка для данного условия пуста. На следующем шаге мы выберем границы.

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 View** (Перейти к виду по умолчанию).





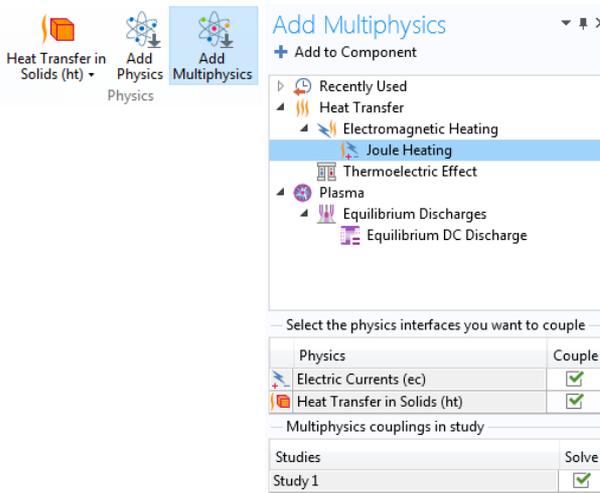
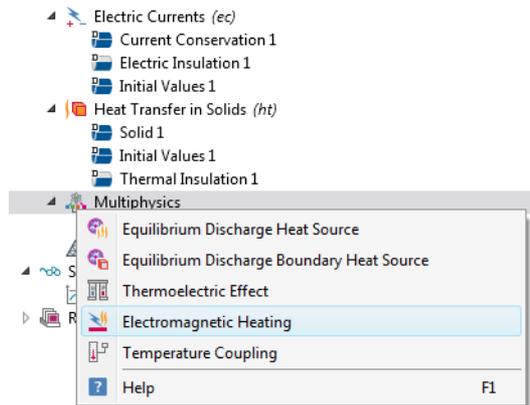
Более сложные граничные условия для электродинамического анализа, в том числе возможность задавать полный ток через границу, доступны в модуле AC/DC.

РУЧНАЯ СВЯЗКА ФИЗИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕЙСОВ

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 **Electric Currents** (Электрических токов), после чего добавить интерфейс **Heat**

Transfer in Solids (Теплопередача в твердых телах). При таком алгоритме следует щелкнуть правой кнопкой мыши по узлу **Multiphysics** (Мультифизика), чтобы добавить соответствующую мультифизическую связь.

Также вы можете нажать на кнопку **Add Multiphysics** (Добавить мультифизическую связь) во вкладке **Physics** (Физические интерфейсы), находящейся в ленте, и выбрать предлагаемую мультифизическую связь в окне **Add Multiphysics** (Добавление мультифизической связи).

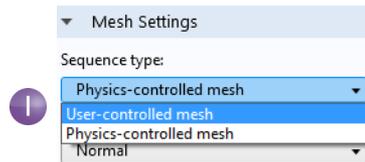


Mesh (Сетка)

Простейший вариант построения сетки — это создание неструктурированной тетраэдральной сетки, которая отлично подойдет для электрической шины. Как вариант, вы можете создать несколько сеточных последовательно-стей, что разбирается в разделе «Добавление сеток» на стр. 110.

- 1 **Physics-controlled mesh** (Сетка под управлением физики) создается по умолчанию. В большинстве случаев можно сразу перейти к разделу **Study** (Исследование) и запустить модель на расчет. Но для данной задачи мы в качестве примера более подробно изучим настройки, определяющие сеточное разбиение, и параметризуем часть из них.

- 1 В Построителе моделей щелкните по узлу **Mesh 1** (Сетка 1) . В окне **Settings** (Настройки) раздела **Mesh** (Сетка) выберите сетку **User-controlled** (Под управлением пользователя) из списка **Sequence type** (Тип последовательности).



- 2 В разделе **Mesh 1** (Сетка 1) щелкните по узлу **Size** (Размер) .

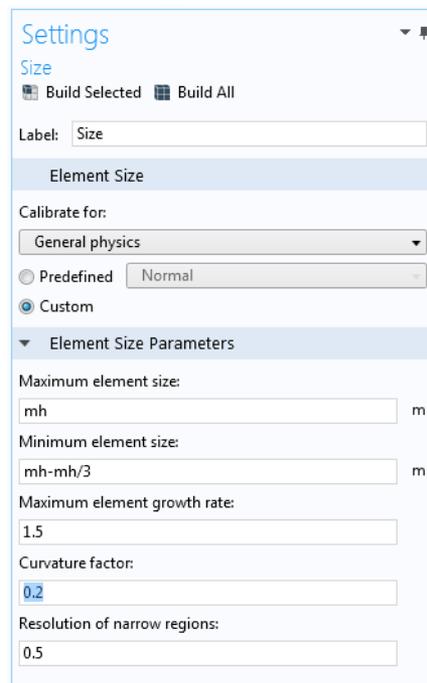


- 3 В окне **Settings** (Настройки) узла **Size** (Размер) в разделе **Element Size** (Размер элемента) нажмите кнопку **Custom** (Пользовательский).

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

- m_h в поле **Maximum element size** (Максимальный размер элемента). Обратите внимание, что m_h равен 3 мм — значению, введенному ранее как глобальный параметр. Параметр m_h ограничивает размеры элементов этим значением.
- $m_h - m_h / 3$ в поле **Minimum element size** (Минимальный размер элемента). Минимальный размер элемента немного меньше максимального.

3



- 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 оставим без изменений.

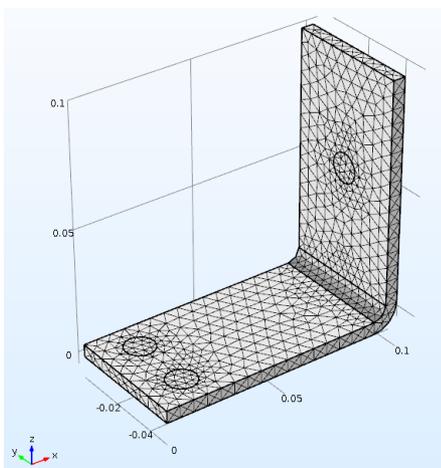
Maximum element growth rate (Максимальная скорость увеличения элемента) ограничивает разность размеров двух соседних элементов сетки (от малого до большого). Чем меньше значение, тем более плотной получается сетка. При значении 1 элементы не увеличиваются в размере.

Для параметра **Resolution of narrow regions** (Разрешение узких участков) большие значения обычно порождают более мелкую и подробную сетку.

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

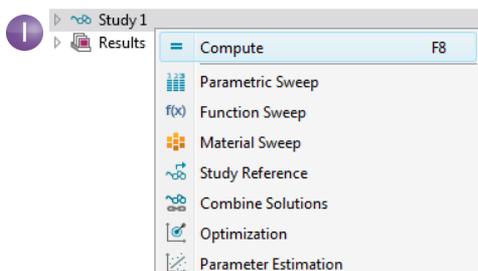
- 4 Нажмите кнопку **Build All** (Построить все)  в окне **Settings** (Настройки) для узла **Size** (Размер), чтобы сгенерировать сетку, изображенную на иллюстрации ниже.

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



Study (Исследование)

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



автоматически задает последовательность решения для моделирования, исходя из выбранных физических интерфейсов и типа исследования.

В данном случае расчет модели займет всего несколько секунд. В процессе решения строятся два графика сходимости, которые можно увидеть на вкладках рядом с окном **Graphics**. На этих графиках показана сходимость различных алгоритмов решателя, используемых в рамках исследования.

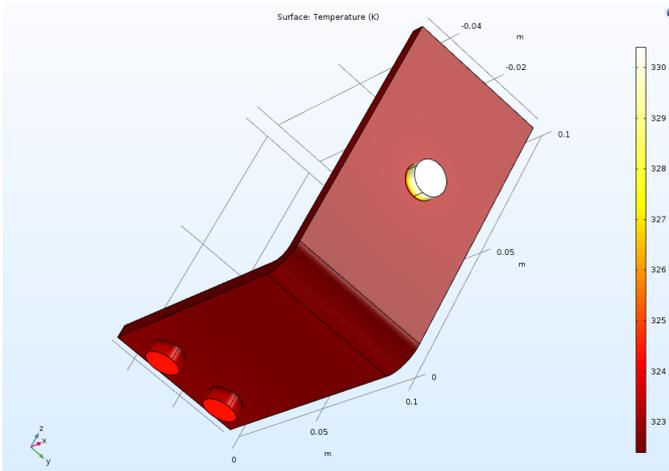
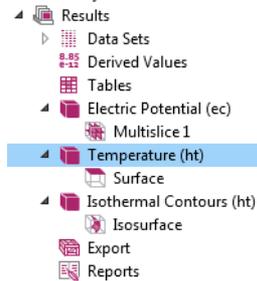
Results (Результаты)

По умолчанию в узле **Results** (Результаты) создаются три группы графиков: **Multislice** (мультисрезовый) для электрического потенциала, **Surface** (Распределение по поверхности) для температуры, а также еще один график **Isothermal Contours** (Изотермические контуры), имеющий тип **Isosurface** (Изоповерхность), для температуры.

Выберите **Results > Temperature** (Результаты > Температура) , чтобы просмотреть график распределения 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 больший ток, чем два нижних болта. Температура заметно выше 293 К — температуры окружающей среды.

- 1 Нажмите левую кнопку мыши и переместите курсор в графическом окне, чтобы повернуть электрическую шину обратной стороной.

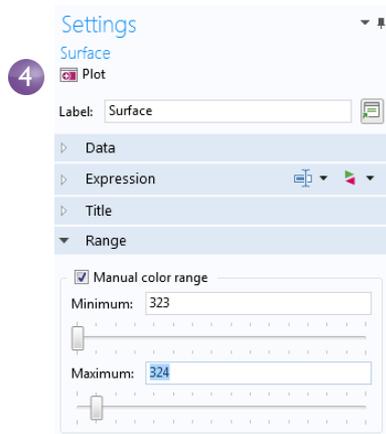


- 2 На панели инструментов **Graphics** (Графика) нажмите кнопку **Go to Default 3D View** (Перейти к трехмерному виду по умолчанию) .

Вы можете вручную настроить диапазон цветовой схемы, чтобы визуализировать перепад температур в медной части.

- 3 В Построителе моделей раскройте узел **Results > Temperature** (Результаты > Температура)  и щелкните по узлу **Surface 1** (Поверхность 1) .

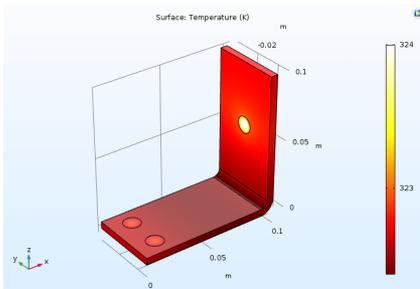
- 4 В окне **Settings** (Настройки) для **Surface** щелкните по **Range** (Диапазон), чтобы раскрыть этот раздел. Установите флажок в поле **Manual color range** (Ручной диапазон цветов) и введите 324 в поле **Maximum** (Максимум). Оставьте значение по умолчанию в поле **Minimum** (Минимум). Нажмите кнопку **Plot** (Построить график)  в окне **Settings** (Настройки) узла **Surface** (Распределение по поверхности).



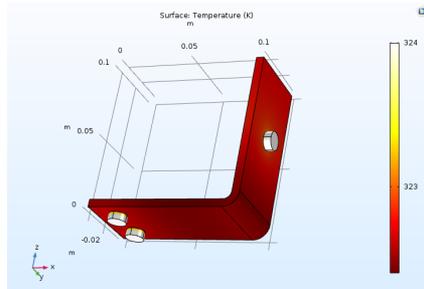
4

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

- 6 Поверните электрическую шину в графическом окне обратной стороной.



5



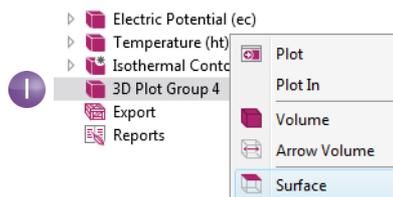
6

Распределение температуры имеет двустороннюю симметрию с вертикальной плоскостью симметрии, проходящей между двумя нижними титановыми болтами и через центр верхнего болта. В рассматриваемом случае для расчета модели не требуется много вычислительных ресурсов, поэтому можно моделировать всю геометрию. Однако для более сложных моделей рекомендуем использовать условия симметрии, которые снижают трудоемкость вычислений.

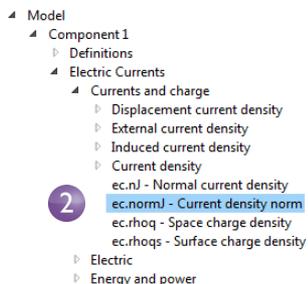
Выберите **Go to Default 3D View** (Перейти к трехмерному виду по умолчанию) на панели инструментов графического окна .

Теперь построим график **Surface** (Распределение по поверхности) для плотности тока в устройстве.

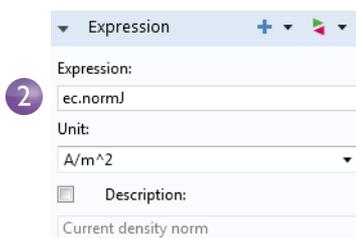
1 В Построителе моделей щелкните правой кнопкой мыши по **Results** (Результаты)  и добавьте **3D Plot Group** (Группа трехмерных графиков) . Щелкните правой кнопкой мыши по **3D Plot Group 4** (Группа трехмерных графиков 4)  и добавьте узел **Surface** .



2 В окне **Settings** (Настройки) узла **Surface** (Распределение по поверхности) 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 > Норма плотности тока) и выберите его двойным щелчком или клавишей Enter.



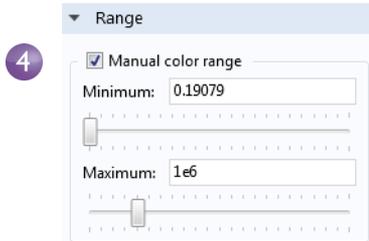
Переменная $ec.normJ$ представляет собой модуль, или абсолютную величину, вектора плотности тока. Если вы знаете имя переменной, вы можете ввести $ec.normJ$ в поле **Expression** (Выражение) или использовать автодополнение: набрать $normJ$ и нажать **Ctrl+Space**, чтобы дополнить имя переменной.



3 Нажмите кнопку **Plot** (Построить график) .

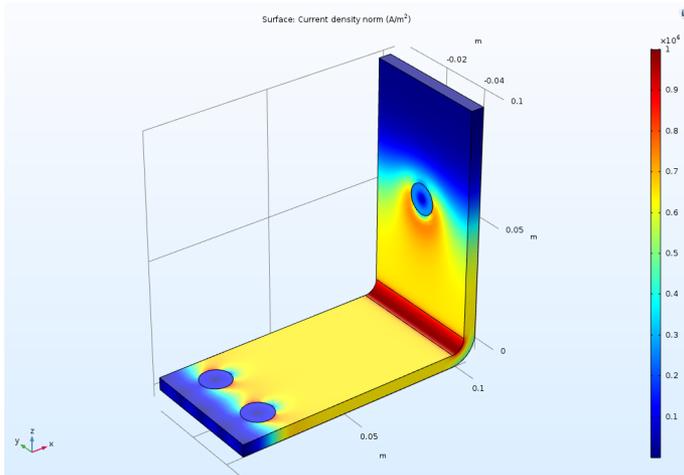
График в графическом окне практически одноцветный из-за высокой плотности тока на гранях, контактирующих с болтами. Теперь вручную изменим диапазон цветовой схемы, чтобы визуализировать распределение плотности тока.

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

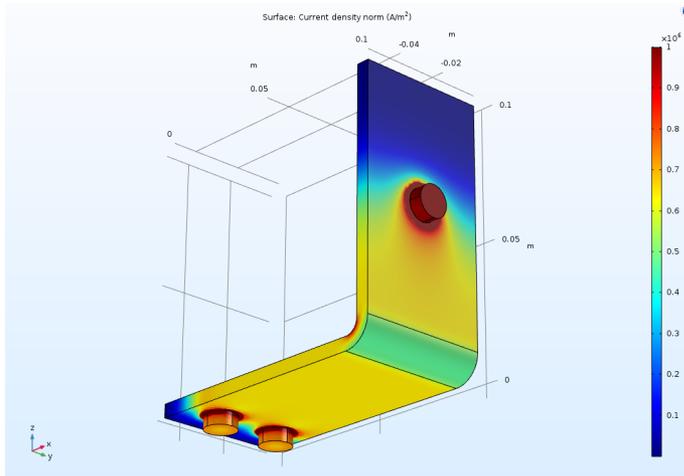


5 Нажмите кнопку **Plot** (Построить график) .

Как видно из графика, кратчайший путь тока находится там, где электрическая шина изогнута под углом 90 градусов. Обратите внимание, что ток почти не протекает по краям электрической шины за пределами болтов.



- Поверните электрическую шину в графическом окне обратной стороной. Продолжайте поворачивать изображение, чтобы увидеть высокую плотность тока вокруг контактных поверхностей каждого болта.



По завершении нажмите кнопку **Go to Default View** (Перейти к виду по умолчанию)  на панели инструментов **Graphics** (Графика).

РАСЧЕТ МАКСИМАЛЬНОЙ И МИНИМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

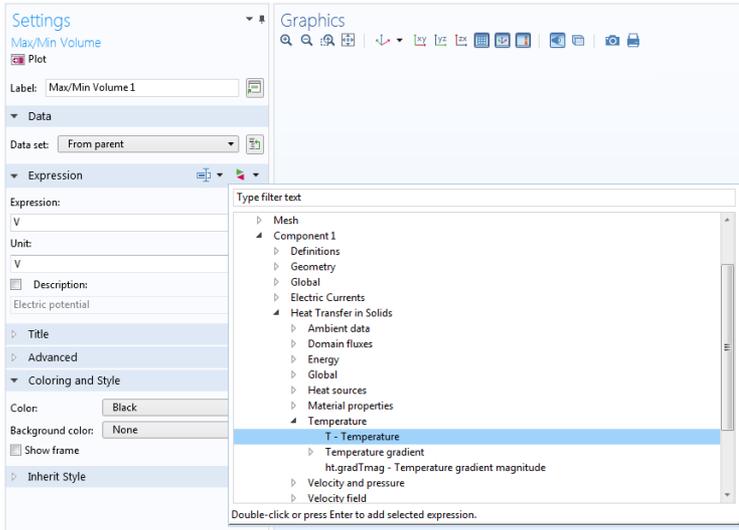
Вы можете легко определить положение точек, в которых значения температуры на электрической шине будут максимальными или минимальными.

- Щелкните правой кнопкой мыши по **Results > Temperature** (Результаты > Температура)  и выберите **More Plots > Max/Min Volume** (Дополнительные графики > Максимум/минимум по объему).

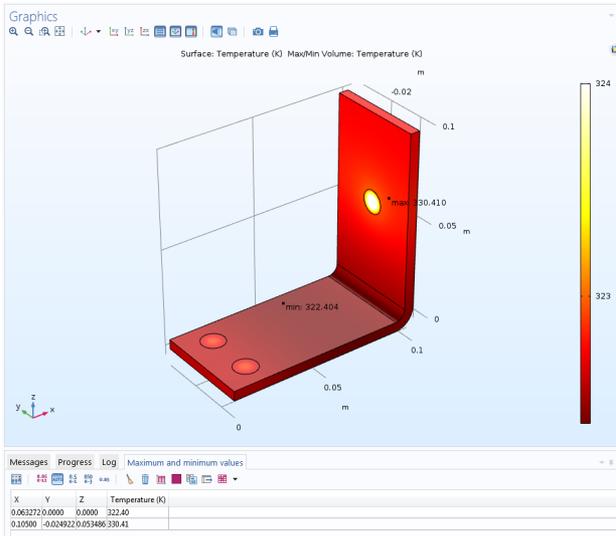


- В окне **Settings** (Настройки) узла **Max/Min Volume** (Максимум/минимум по объему) в разделе **Expression** (Выражение) нажмите кнопку **Replace Expression** (Заменить выражение) . Перейдите к **Mode 1 > Component 1 >**

Heat Transfer in Solids > Temperature > T - Temperature (Модель > Компонент 1 > Теплопередача в твердых телах > T - Температура) и дважды щелкните или нажмите **Enter** для выбора. Вы также можете найти переменную для Temperature (Температуры) при помощи поля поиска, расположенного над деревом переменных постобработки или вручную введите T. Щелкните **Plot** (Построить график).



Максимальные и минимальные значения показаны на графике в графическом окне, а положение точек с максимальной и минимальной температурой, а также сами эти значения температуры отображаются в таблице **Maximum and minimum values** (Максимальные и минимальные значения). Значения могут немного различаться в зависимости от версии ПО, в которой вы работаете. Для более плотной сетки результаты будут одинаковыми независимо от версии.

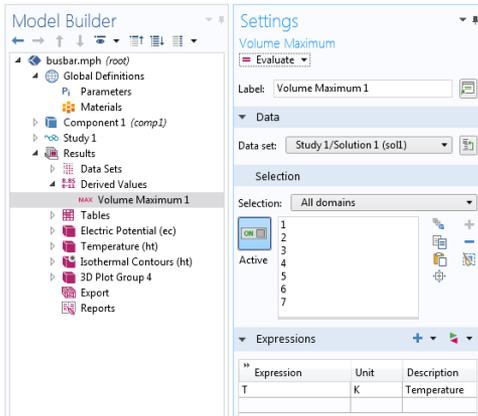


2

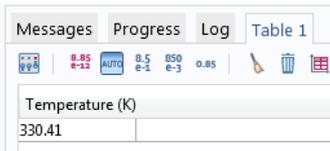
Кроме метода для построения максимальных и минимальных значений, описанного выше, вы можете использовать узел **Derived Values** (Вычисление выражений) или функцию **Evaluation Group** (Группа расчетов), чтобы вывести численные значения. Далее показано, как использовать узел **Derived Values**.

- 3 В разделе **Results** (Результаты) дерева модели щелкните правой кнопкой мыши по узлу **Derived Values** (Вычисление выражений) и выберите пункт **Maximum > Volume Maximum** (Максимум > Максимум по объему) **MAX**.
- 4 В окне **Settings** (Настройки) для **Volume Maximum** (Максимум по объему) в разделе **Selection** (Выборка) выберите пункт **All domains** (Все области).

- 5 В первой строке таблицы **Expression** (Выражение) введите T как обозначение температуры (если оно не было подставлено автоматически) и щелкните по кнопке **Evaluate** (Вычислить) в верхней части окна **Settings** (Настройки).



Полученная максимальная температура показана в **таблице 1**.



На следующем шаге вы научитесь создавать **Thumbnail** — графическую миниатюру модели.

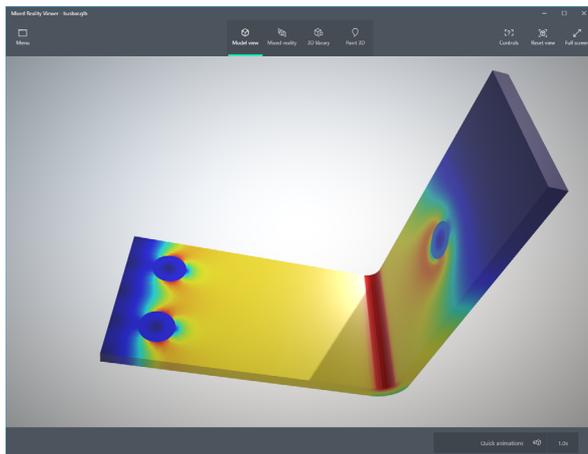
СОЗДАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ИЗ ГРАФИКОВ МОДЕЛИ

Для любого решения можно создать изображение, которое будет отображаться в COMSOL при просмотре файлов моделей. Когда график будет построен, в Построителе моделей в разделе **Results** (Результаты) щелкните по соответствующему узлу графика. Затем щелкните по корневому узлу (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 на основе графиков можно еще двумя способами. Первый способ — нажать кнопку **Image Snapshot** (Снимок изображения)  в Графическом окне, чтобы создать изображение напрямую. Кроме того, для создания графического файла можно добавить узел **ID Image**, **2D Image** или **3D Image** (1D, 2D или 3D-изображение)  в узел **Export** (Экспорт). Щелкните правой кнопкой мыши по нужной группе графиков и выберите **Add Image to Export** (Добавить изображение для экспорта).



В версии 5.4 вы можете щелкнуть кнопку **Image Snapshot** (Снять текущее состояние изображения), чтобы экспортировать визуализацию результатов в формат **gLTF™** (расширение файлов **.gLTF**). Эти файлы можно открыть в программных пакетах для визуализации трехмерных изображений, например в **Mixed Reality Viewer** компании **Microsoft®**, как показано на рисунке ниже. (Если вы работаете в операционной системе **Windows® 10**, этот пакет может быть уже установлен в вашей системе.) В Интернете вы найдете программы для просмотра файлов **gLTF**, работающие в веб-браузерах.



Обязательно сохраните модель на этом этапе. Эту версию модели, **busbar.mph**, мы повторно используем и переименуем при рассмотрении других разделов данного пособия.

Создание приложения в **Application Builder** (Среде разработки приложений)

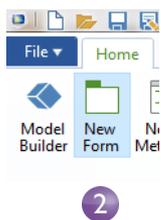
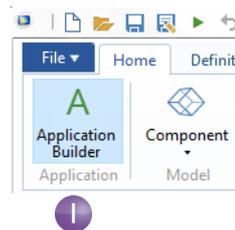
Данный раздел представляет собой краткое введение, посвященное созданию приложений на основе модели электрической шины с помощью **Application Builder** (Среды разработки приложений). Приложение будет иметь специализированный пользовательский интерфейс, предназначенный для взаимодействия с моделью электрической шины и содержащий поля ввода для значений длины, ширины и приложенного напряжения. Результатами будут значение максимальной температуры и график распределения температуры.

Вы научитесь использовать мастер **New Form** (Новая форма) для быстрого создания приложений. Мастер **New Form** используется для создания формы

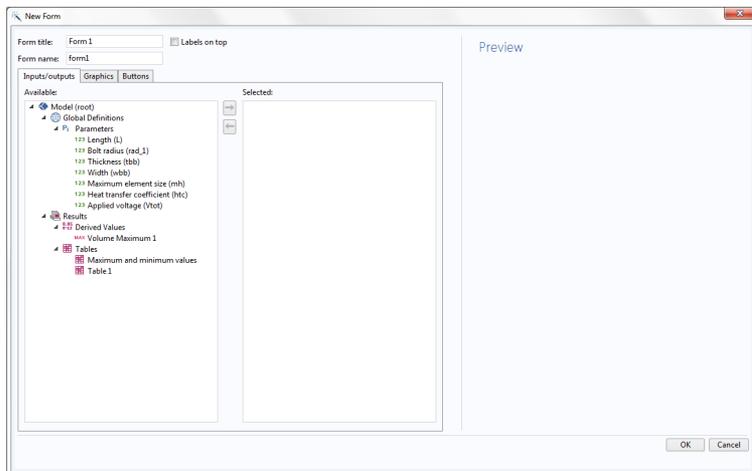
с компонентами пользовательского интерфейса, которые также называются **form objects** (объектами формы). Мастер позволяет быстро получить доступ к некоторым объектам формы из числа доступных для создания приложений в **Application Builder** (Среде разработки приложений). В этом примере описывается использование данного мастера для добавления полей ввода, числового вывода информации, графиков и кнопок. Подробная информация о разработке приложений приведена в руководстве «Введение в Среду разработки приложений».

СОЗДАНИЕ NEW FORM (НОВОЙ ФОРМЫ)

- 1 Чтобы переключиться из Построителя моделей в Среду разработки приложений, нажмите кнопку **Application Builder** в левой части вкладки **Home** (Главная) на ленте.
- 2 Для создания новой формы нажмите кнопку **New Form** (Новая форма) на ленте.

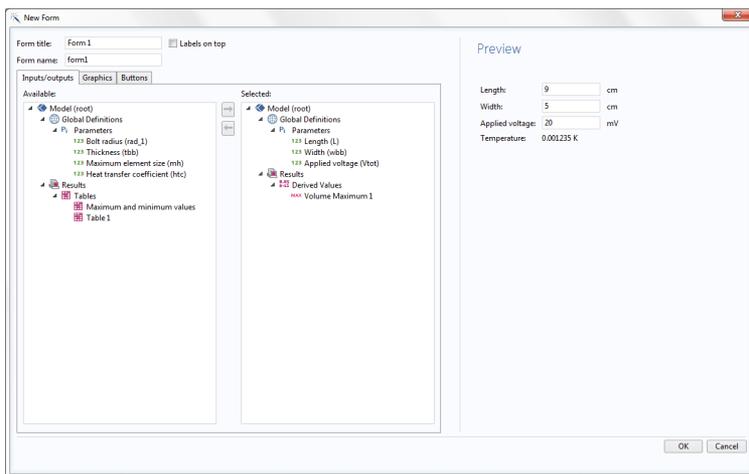


Отобразится окно мастера.



Оно состоит из трех вкладок: **Inputs/outputs** (Ввод/вывод), **Graphics** (Графика) и **Buttons** (Кнопки). На вкладке **Inputs/outputs** (Ввод/вывод) двойным щелчком можно выбрать узлы дерева модели, которые будут доступны в пользовательском интерфейсе приложения. Для этого приложения мы выберем несколько параметров для полей ввода и максимальную температуру в качестве выходной информации.

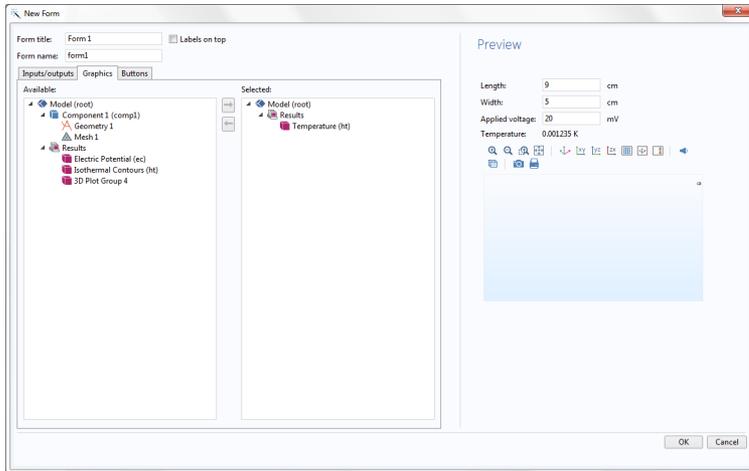
- 3 Дважды щелкните по каждому из данных параметров: **Length** (Длина, L), **Width** (Ширина, wbb) и **Applied voltage** (Приложенное напряжение, V_{tot}). После этого дважды щелкните по **Volume Maximum** (Максимум по объему) в разделе **Derived Values** (Вычисление выражений).



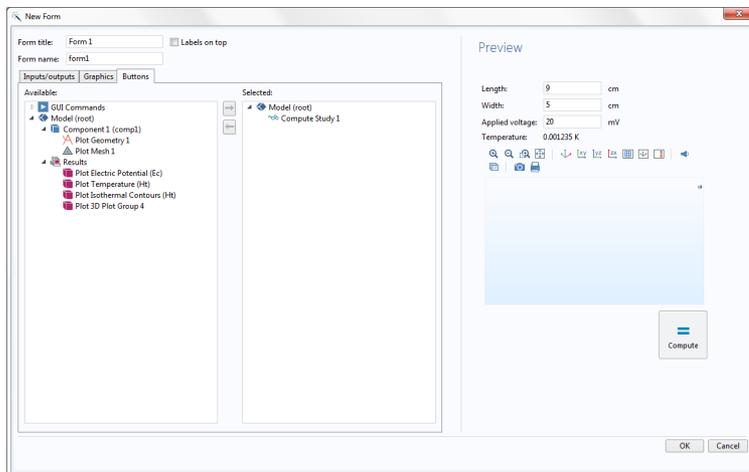
Раздел **Preview** (Предварительный просмотр) в правой части отображает вид пользовательского интерфейса.

- 4 Выберите вкладку **Graphics** (Графика) в мастере и дважды щелкните по графику **Temperature** (Температура). В области **Preview**

(Предварительный просмотр) появится заполнитель (заготовка) для графического объекта.

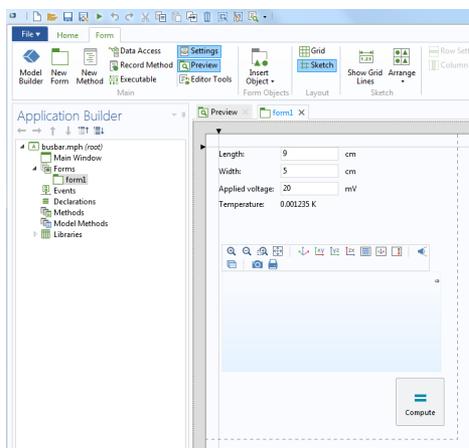


- 5 Выберите вкладку **Buttons** (Кнопки) в мастере и дважды щелкните по **Compute Study 1** (Запуск на расчет исследования 1). В области **Preview** (Предварительный просмотр) под графическим объектом появится кнопка.

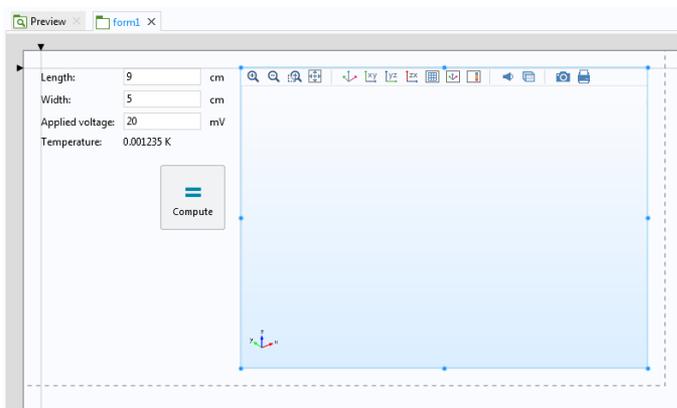


- 6 После этого нажмите **OK**, чтобы сохранить настройки и закрыть мастер. После закрытия мастера **New Form** (Новая форма) открывается **Form editor** (Редактор форм).

Form editor (Редактор форм) позволяет перетаскивать объекты формы и добавлять новые объекты.



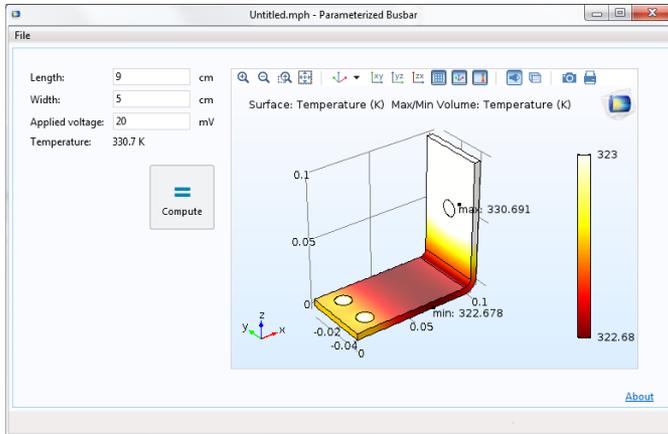
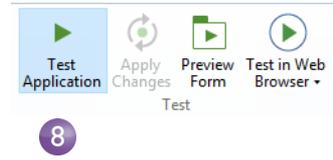
7 Например, можно изменить вид пользовательского интерфейса, поместив графический объект справа от полей ввода, а кнопку — ниже полей ввода, как показано на иллюстрации ниже. Синие направляющие линии помогают выравнивать объекты.



Вы можете увеличивать графический объект, раздвигая синие маркерные линии.

- 8 Можно проверить приложение, нажав кнопку **Test Application** (Протестировать приложение) на ленте **Ribbon**.

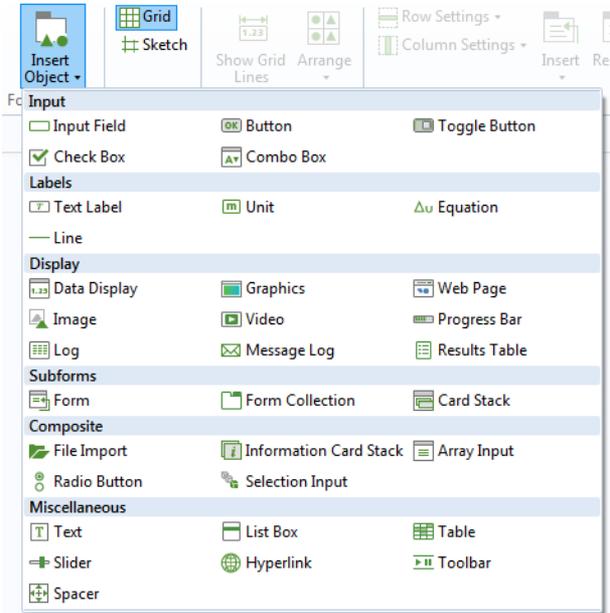
При этом на время выполнения создается копия приложения, благодаря чему в процессе разработки можно быстро тестировать различные варианты приложений.



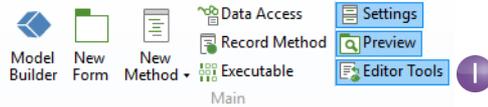
- 9 Попробуйте ввести новое значение параметра **Length** (Длина) и нажмите **Compute** (Запуск на расчет).

ДОБАВЛЕНИЕ КНОПКИ

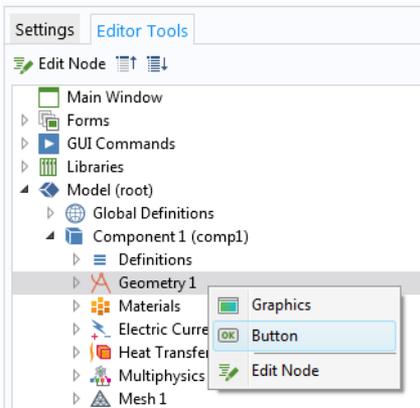
Перед началом расчета вы можете предварительно просмотреть геометрию. Это можно легко сделать, добавив кнопку. Кнопку можно добавить двумя способами. Используйте команду **Insert Object** (Вставить объект) в ленте, как показано на иллюстрации ниже, или используйте окно **Editor Tools** (Средства редактирования). В этом примере описан второй способ.



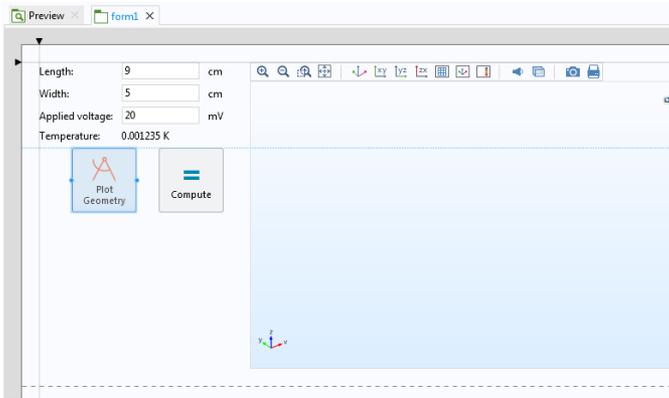
1 Убедитесь, что окно **Editor Tools** (Средства редактирования) активно, выбрав соответствующую кнопку на ленте.



2 В дереве **Editor Tools** (Средства редактирования) щелкните правой кнопкой мыши по узлу **Geometry** (Геометрия) и выберите пункт **Button** (Кнопка).



- 3 Перетащите кнопку **Plot Geometry** (Построить геометрию) влево от кнопки **Compute** (Запуск на расчет).



3

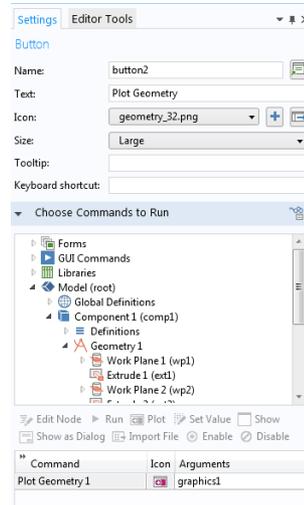
Каждая кнопка при нажатии инициирует последовательность команд, определяющих дальнейшие действия. Эта последовательность команд определяется в окне **Settings** (Настройки) кнопки, которое можно открыть (если оно еще не открыто) двойным щелчком по кнопке.

- 4 Дважды щелкните по кнопке **Plot Geometry** (Построить геометрию), чтобы увидеть соответствующее окно **Settings**. Последовательность команд отображается под деревом, в разделе **Choose Commands to Run** (Выбор команд для выполнения).

В этом случае последовательность команд для кнопки **Plot Geometry** (Построить геометрию) содержит одну команду, выполняющую построение геометрии. Входной аргумент сообщает, в какое графическое окно передать построенную геометрию — в данном случае это графический объект **graphics1**.

Чтобы автоматически подстроить масштаб осей, можно добавить команду **Zoom Extents** (Масштаб сцены).

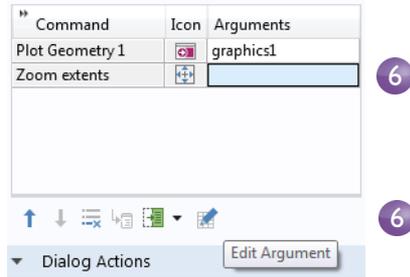
- 5 В разделе **Choose Commands to Run** (Выберите команды для выполнения) найдите команду **Zoom Extents** (Масштаб сцены), выбрав **GUI Commands > View Commands** (Команды графического интерфейса пользователя >



4

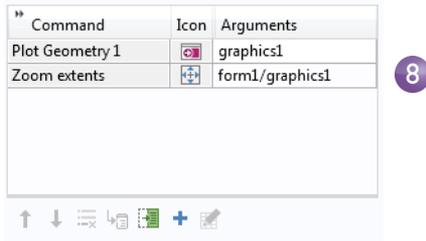
Показать команды). Дважды щелкните по команде, чтобы добавить ее к существующей последовательности.

- 6 После этого добавьте входной аргумент для команды **Zoom Extents** (Масштаб сцены). Щелкните по белому полю рядом с командой **Zoom Extents** (Масштаб сцены) и нажмите кнопку **Edit Argument** (Изменить аргумент).

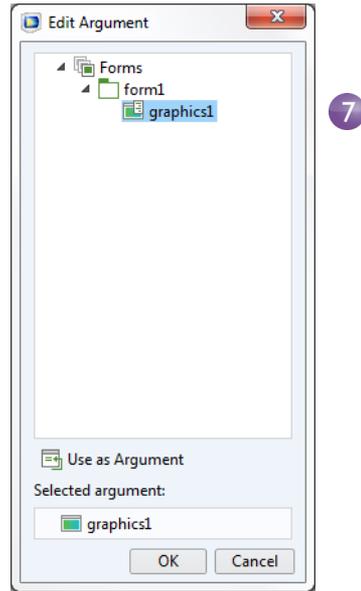


- 7 Откроется диалоговое окно, содержащее возможные входные аргументы. Выберите **graphics1** в разделе **form1**.

- 8 Последовательность команд теперь сформирована.



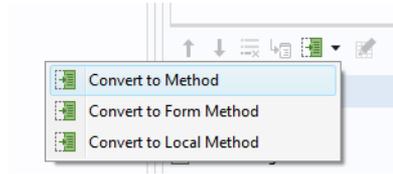
- 9 Чтобы убедиться, что новая кнопка **Plot Geometry** (Построить геометрию) работает, можно выполнить повторную проверку приложения, нажав кнопку **Test Application** (Протестировать приложение) на ленте.



METHODS (МЕТОДЫ И МАКРОСЫ)

Чтобы осуществлять более сложные операции, чем позволяет последовательность команд, можно воспользоваться **Method editor** (Редактором методов) и написать в нем код. Этот код будет определять действия, происходящие по нажатию кнопки или выбору пункта меню. Простой способ начать работу с **Method editor** (Редактором методов) — преобразовать существующую последовательность команд в метод.

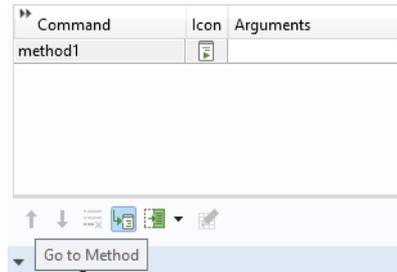
- 1 Найдите или откройте окно **Settings** (Настройки) кнопки **Plot Geometry** (Построить геометрию). Нажмите кнопку **Convert to New Method** (Преобразовать в новый метод) под последовательностью команд.



1

- 2 Чтобы открыть метод в **Method editor** (Редакторе методов), нажмите кнопку **Go to Method** (Перейти к методу) под последовательностью команд.

Откроется **Method editor** (Редактор методов) с кодом метода **method1**, соответствующего командам **Plot Geometry** (Построить геометрию) и **Zoom Extents** (Масштаб сцены) из предыдущей последовательности команд.

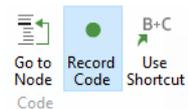


2



2

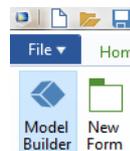
Application Builder (Среда разработки приложений) содержит несколько инструментов для автоматического создания и генерации кода. Помимо преобразования последовательности команд в метод, можно, например, нажать кнопку **Record Code** (Записать код) на ленте.



При этом будет создан код, соответствующий каждой из операций, которые вы произведете в окнах COMSOL Desktop. Нажмите кнопку **Stop Recording** (Остановить запись) на ленте, чтобы остановить запись и вернуться к **Method editor** (Редактору методов).

Чтобы подробнее изучить Редактор форм и Редактор методов, обратитесь к книге «*Введение в Среду разработки приложений*». В этой книге также приведена информация о написании методов. Более подробную информацию о методах вы найдете в *Руководстве по программированию приложений*.

На этом изучение учебной модели электрической шины завершено. Чтобы вернуться к Построителю моделей, нажмите кнопку **Model Builder** (Построитель моделей) на ленте.



В следующих разделах более подробно рассматриваются либо уже выполненные шаги, либо детально обсуждаются дополнительные аспекты моделирования, такие как учет термического расширения и гидродинамических эффектов.

Ниже представлено содержание данных дополнительных тем с указанием страниц, где можно найти эти разделы:

- «Parameters (Параметры), Functions (Функции), Variables (Переменные) и Couplings (Взаимосвязи)» на стр. 103
- «Material Properties (Свойства материалов) и Material Libraries (Библиотеки материалов)» на стр. 108
- «Добавление сеток» на стр. 110
- «Добавление физических интерфейсов» на стр. 113
- «Parametric Sweeps (Параметрические исследования)» на стр. 137
- «Parallel Computing (Параллельные вычисления)» на стр. 151
- «Режим клиент-сервер (Client-Server) в COMSOL Multiphysics» на стр. 154
- «Приложение А. Построение геометрии» на стр. 157

Parameters (Параметры), Functions (Функции), Variables (Переменные) и Couplings (Взаимосвязи)

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

Узлы **Global Definitions** (Глобальные определения) и **Component > Definitions** (Компонент > Определения) позволяют настраивать входные данные модели и взаимосвязи между компонентами, а также упорядочивать процесс моделирования. Вы уже использовали эти узлы, когда добавляли параметры для настройки входных данных модели в разделе «Global Definitions (Глобальные определения)» на стр. 63.

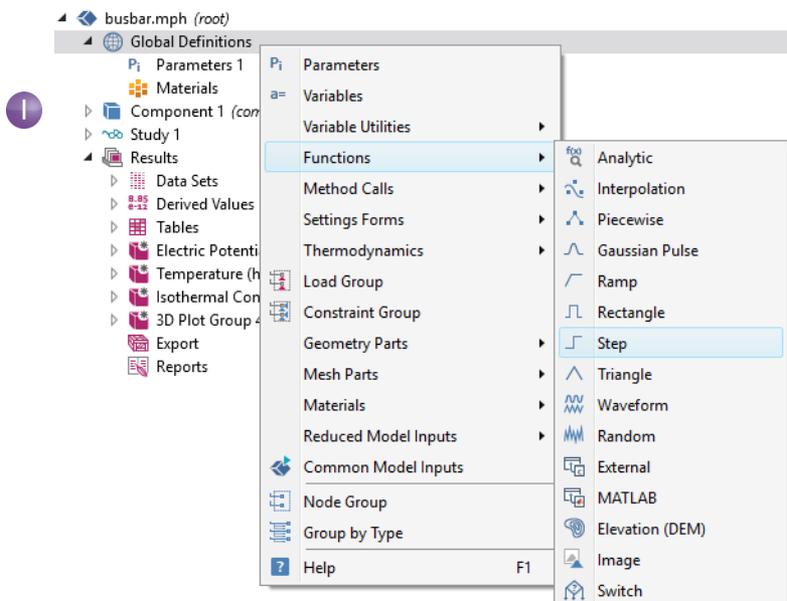
Функции, доступные в узлах **Global Definitions** (Глобальные определения) и **Component > Definitions** (Компонент > Определения), содержат набор готовых шаблонов функций для удобной настройки мультифизического моделирования. Например, шаблон функции **Step** поможет создать гладкую ступенчатую функцию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

Предположим, вы хотите добавить исследование во временной области в модель электрической шины и рассмотреть случай приложения к ней электрического напряжения, возрастающего с 0 до 20 мВ за 0,5 секунды. Для этого можно воспользоваться ступенчатой функцией **Step**, умноженной на значение параметра V_{tot} . Чтобы освоить объявление и проверку функций, в этом разделе вы добавите в модель функцию **Step**, плавно возрастающую с 0 до 1 за 0,5 секунды.

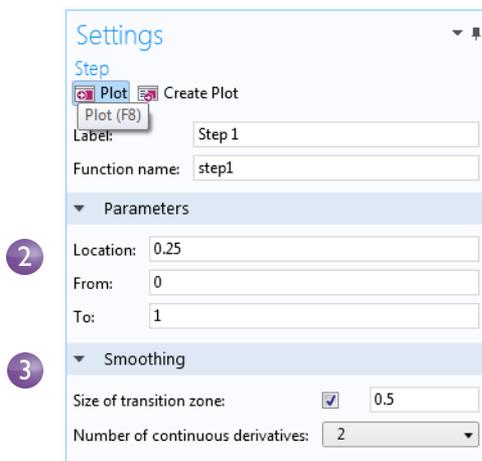
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИЙ

Вы можете использовать файл модели, созданный в процессе работы с предыдущим разделом. Найдите и откройте файл `busbar.mph`, если он еще не открыт на рабочем столе.

- 1 Щелкните правой кнопкой мыши по узлу **Global Definitions** (Глобальные определения) и выберите **Functions > Step** (Функции > Ступенчатая функция).

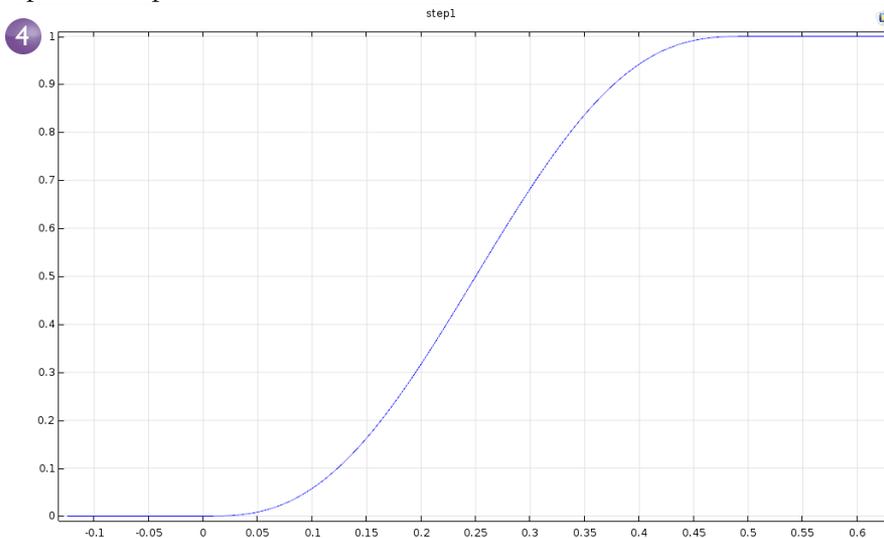


- 2 В окне **Settings** (Настройки) для **Step** введите 0.25 в поле **Location** (Местоположение), чтобы задать среднюю точку ступеньки, в которой она принимает значение 0.5.



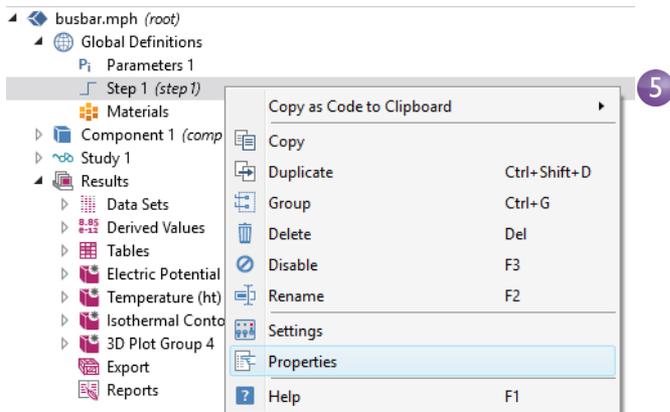
- 3 Щелкните по **Smoothing** (Сглаживание), чтобы раскрыть этот раздел, и введите 0,5 в поле **Size of transition zone** (Размер переходной зоны) для настройки ширины интервала сглаживания. Параметр **Number of continuous derivatives** (Количество непрерывных производных) оставьте равным значению по умолчанию (2).
- 4 Нажмите кнопку **Plot** (Построить график)  в окне **Settings** (Настройки) узла **Step** (Ступенчатая функция).

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

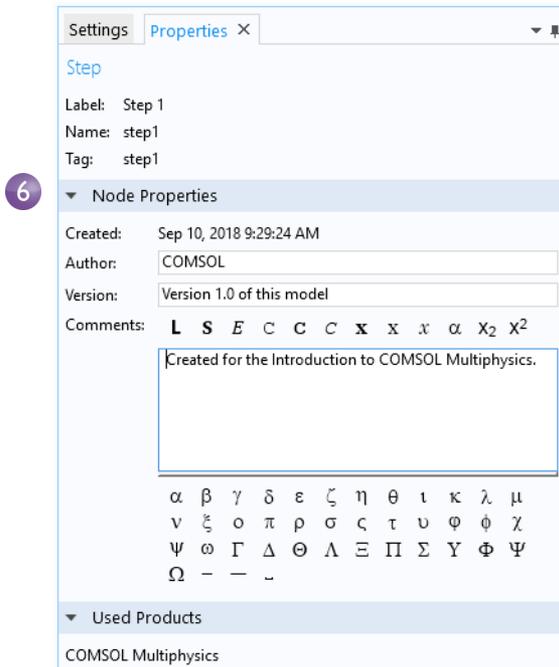


Для наглядности можно также добавить комментарии или переименовать функцию.

5 Щелкните правой кнопкой мыши по узлу **Step 1** в Построителе моделей и выберите **Properties** (Свойства).



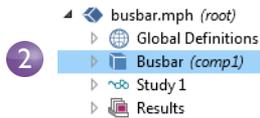
6 В окне **Properties** (Свойства) введите любую информацию, которую считаете необходимой. По завершении щелкните правой кнопкой мыши по вкладке **Properties** (Свойства) и выберите **Close** (Закрыть). Специальные символы и теги разметки, которые вы используете, будут отображаться в отчетах, сформированных при помощи узла **Reports** (Отчеты).



В данном упражнении предположим, что нам требуется добавить второй компонент, который описывает электрическое устройство, соединенное титановыми болтами с электрической шиной.

Сначала следует переименовать **Component 1** (Компонент 1), чтобы обозначить его как электрическую шину.

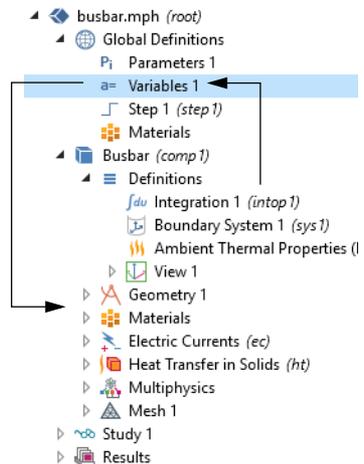
- 1 Щелкните правой кнопкой мыши по узлу **Component 1** (Компонент 1) и выберите **Rename** (Переименовать) (или нажмите **F2**).
- 2 В окне **Rename Component** (Переименование компонента) введите **Busbar** (Электрическая шина). Нажмите **OK** и сохраните модель.



ОПРЕДЕЛЕНИЕ COMPONENT COUPLINGS (ВЗАИМОСВЯЗЕЙ МЕЖДУ КОМПОНЕНТАМИ) И PROBES (ДАТЧИКОВ)

Щелкните правой кнопкой мыши по узлу **Definitions** (Определения) в разделе **Busbar (comp1)**, чтобы добавить взаимосвязь между компонентами, вычисляющую интеграл по любой переменной **Busbar (comp1)** на границах болтов, примыкающих к электрическому устройству. С помощью такой взаимосвязи можно, например, объявить в узле **Variables** (Переменные) в разделе **Global Definitions** (Глобальные определения) переменную для расчета общей силы тока. Эта переменная будет иметь глобальную область действия и сможет, например, сформировать граничное условие для силы тока, подающегося на электрическое устройство, которое моделируется вторым компонентом.

Component Couplings (Взаимосвязи между компонентами) в узле **Definitions** (Определения) используются во многих задачах. Взаимосвязи **Average** (Среднее) ^{av}, **Maximum** (Максимум) ^{max} и **Minimum** (Минимум) ^{min} могут использоваться для анализа результатов, а также в граничных условиях, источниковых членах, приемниках, свойствах и в других элементах, влияющих на уравнения модели. **Probes** (Датчики) служат для наблюдения за ходом решения. С их помощью можно отслеживать решение (интересующую переменную или выражение) в критической точке непосредственно во время расчета во временной области или для каждого значения параметра при параметрическом исследовании.



Пример использования оператора усреднения **Average** приведен в разделе «Parametric Sweeps (Параметрические исследования)» на стр. 137. Список доступных функций приведен в разделе «Functions (Функции)» на стр. 185.



Чтобы узнать больше о работе с определениями, в Построителе моделей щелкните по узлу **Definitions (Определения)**  или **Global Definitions (Глобальные определения)**  и нажмите F1, чтобы открыть окно **Help (Справка)** . В этом окне отображается полезная информация о выбранном элементе и ссылки на документацию. При первом запуске содержимое окна справки может загружаться достаточно долго (порядка минуты), но при последующих запусках этой задержки уже не будет.

Material Properties (Свойства материалов) и Material Libraries (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, возможность построить график данной функции позволяет проверить корректность изменения свойств в нужном диапазоне. Также вы можете загружать электронные таблицы Excel[®] и задавать интерполяционные функции для свойств материалов с помощью LiveLink[™] for Excel[®].

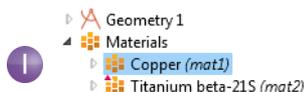
Расширение **Material Library (Библиотека материалов)** содержит более 2500 материалов и десятки тысяч свойств, заданных в виде зависимости от температуры. Кроме того, многие модули расширения содержат специализированные библиотеки материалов для конкретных прикладных задач.

Сначала рассмотрим добавление свойств к существующим материалам. Допустим, вы хотите добавить модуль объемной упругости (bulk modulus) и модуль сдвига (shear modulus) в свойства меди.

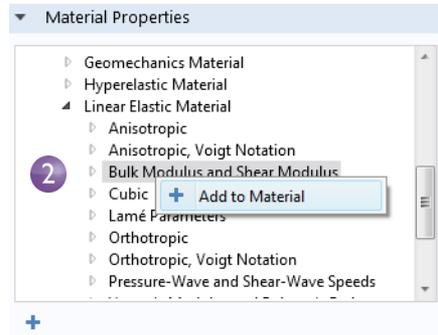
КАСТОМИЗАЦИЯ МАТЕРИАЛОВ

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 мыши 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 сдвига) и выберите **Add to Material** (Добавить в материал) +.

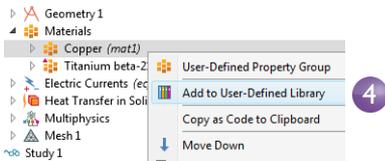
Здесь вы можете указать модуль объемной упругости и модуль сдвига для меди в модели.

3 Перейдите к разделу **Material Contents** (Содержимое материала) в узле **Copper** (Медь). Теперь в таблице появились строки **Bulk modulus** (Модуль объемной упругости) и **Shear modulus** (Модуль сдвига). Предупреждающий значок ⚠ показывает, что значения еще не заданы. Чтобы присвоить значения, щелкните по столбцу **Value** (Значение). В строке **Bulk modulus** (Модуль объемной упругости) введите 140e9, а в строке **Shear modulus** (Модуль сдвига) укажите 46e9.

Property	Name	Value	Unit	Property group
Bulk modulus	K	140e9	N/m ²	Bulk modulus and shear mod...
⚠ Shear modulus	G	46e9	N/m ²	Bulk modulus and shear mod...
✓ Electrical conductivity	sigma	5.998e7[S/...	S/m	Basic
✓ Heat capacity at constant pressure	Cp	385[J/(kg*...	J/(kg·K)	Basic
✓ Relative permittivity	epsilon_r	1	1	Basic
✓ Density	rho	8700[kg/m...	kg/m ³	Basic
✓ 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 reactivity	rho_0	1.72e-8[ob...	0 m	Linearized reactivity

Добавление этих свойств в общем случае изменяет материал **Copper**. Вы можете сохранить измененный материал в собственную библиотеку материалов, но не в библиотеку материалов для **Solid Mechanics** (механики твердого тела), так как она предназначена только для чтения.

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



Чтобы просмотреть эту библиотеку, щелкните по кнопке **Browse Materials** (Просмотреть материалы) на вкладке **Materials** (Материалы) на ленте.

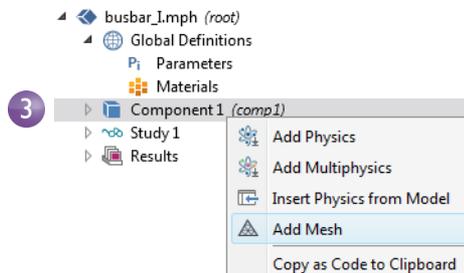
Добавление сеток

Компонент модели может содержать несколько различных сеточных последовательностей с индивидуальными настройками. Сеточная последовательность — это упорядоченный набор инструкций для генерации сетки. Какая последовательность используется для расчета, выбирается в конкретном **Study** (Исследовании). Т. е. пользователь может указать, какую сетку использовать при проведении данного моделирования.

Давайте добавим в модель электрической шины второй узел сетки, чтобы создать последовательность с более плотной сеткой на участках вокруг болтов и изгиба.

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_I.mph`.



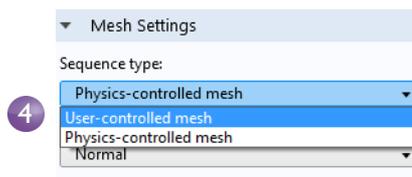
- 3 Чтобы добавить второй узел сетки, щелкните правой кнопкой мыши по узлу **Component 1** (Компонент 1)  и выберите команду **Add Mesh** (Добавить сетку) . Если вы следовали инструкциям из раздела «Parameters (Параметры), Functions (Функции), Variables (Переменные) и Couplings

(Взаимосвязи)» на стр. 103, то компонент **Component 1** сейчас называется **Busbar** (Электрическая шина).

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

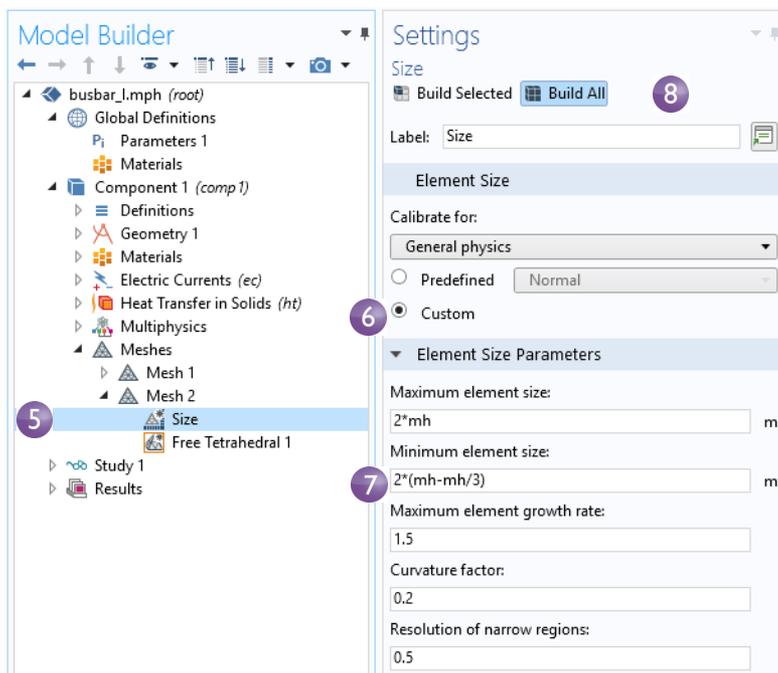
4 Щелкните по узлу **Mesh 2** (Сетка 2).

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** (Свободная тетраэдрическая сетка) теперь доступны 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.

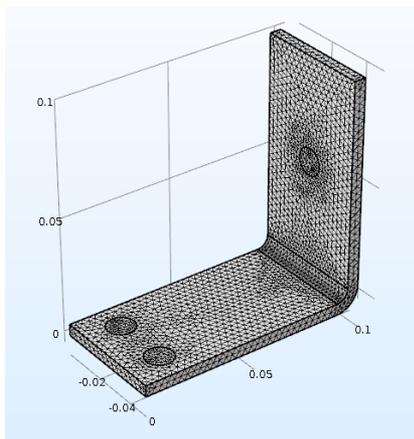
6 В окне **Settings** (Настройки) узла **Size** (Размер) в разделе **Element Size** (Размер элемента) нажмите кнопку **Custom** (Пользовательский).

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

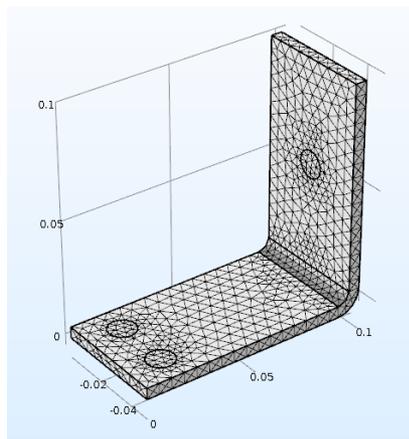
- $2 * mh$ в поле **Maximum element size** (Максимальный размер элемента), где mh — заданный ранее управляющий параметр сетки, равный 3 мм.
- $2 * (mh - mh / 3)$ в поле **Minimum element size** (Минимальный размер элемента).
- 0.2 в поле **Curvature factor** (Коэффициент кривизны).

8 Нажмите **Build All** (Построить все) . Сохраните файл busbar_I.mph.

Сравните сетки **Mesh 1** и **Mesh 2**, щелкнув по узлам **Mesh** (Сетка). Сетка при этом будет обновляться в Графическом окне. Как вариант, вместо использования многочисленных конфигураций сеток можно выполнить параметрическое исследование по максимальному размеру сетки mh , определенному в разделе «Global Definitions (Глобальные определения)» на стр. 63.



Mesh 1 (Сетка 1)



Mesh 2 (Сетка 2)

Добавление физических интерфейсов

Отличительные черты COMSOL Multiphysics, в частности гибкость и совместимость, особенно хорошо видны при добавлении новых физических интерфейсов в существующую модель. В этом разделе вы увидите, с какой легкостью выполняется эта, казалось бы, непростая задача. Следуя этим инструкциям, вы сможете добавить учет механики конструкций и гидродинамических эффектов в модель электрической шины.

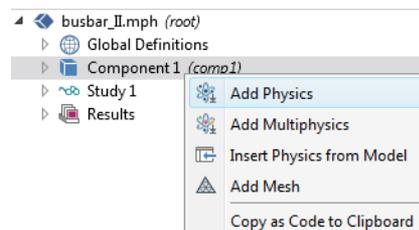
STRUCTURAL MECHANICS (МЕХАНИКА КОНСТРУКЦИЙ)

Выполнив моделирование джоулева нагрева электрической шины, мы узнали, что в ней повышается температура. Обычно в таких ситуациях возникает практический вопрос: к каким механическим деформациям приводит тепловое расширение? Чтобы ответить на него, следует дополнить модель физическим интерфейсом, который будет описывать механику конструкций.

! Для этого нам потребуется модуль **Structural Mechanics** (Механика конструкций) или модуль **MEMS** (Микроэлектромеханические системы), которые содержат интерфейс **Solid Mechanics** (Механика твердого тела) с расширенным функционалом.

Если вы более заинтересованы добавить охлаждение потоком текучей среды или если у вас нет модулей **Structural Mechanics** (Механика конструкций) и **MEMS** (Микроэлектромеханические системы), просто обзорно изучите этот раздел и перейдите к следующему разделу «Моделирование охлаждения и учет гидродинамических процессов» на стр. 122.

- 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`. Вместо этого вы также можете загрузить модель `busbar.mph` из **Application Libraries** (Библиотеки моделей и приложений), как было показано ранее.
- 2 В Построителе моделей щелкните правой кнопкой мыши по узлу **Component 1** (Компонент 1) и выберите **Add Physics** (Добавить физический интерфейс).



3 В окне **Add Physics** 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 физического интерфейса) и сохраните файл.

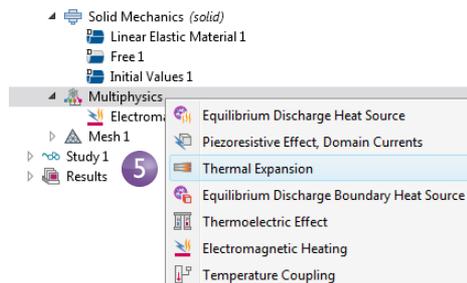
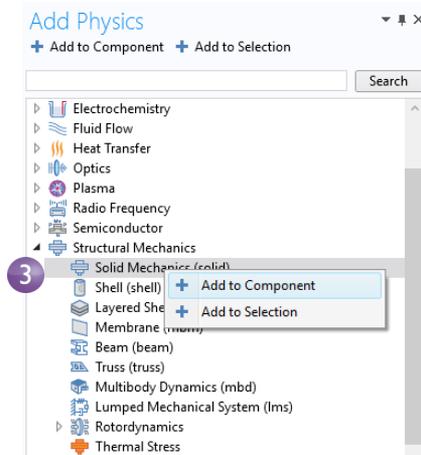
 При добавлении дополнительного физического интерфейса следует убедиться, что материалы в узле **Materials** (Материалы) имеют все свойства, необходимые для выбранной физики. В данном примере у меди и титана все нужные свойства уже заданы изначально.

Начнем с учета влияния теплового расширения в анализе на прочность.

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

Узел **Thermal Expansion** (Тепловое расширение) будет добавлен в дерево модели.

Можно также использовать ленту **Ribbon** и выбрать **Multiphysics Couplings** > **Thermal Expansion** (Мультифизические взаимосвязи > Тепловое расширение) на вкладке **Physics**.



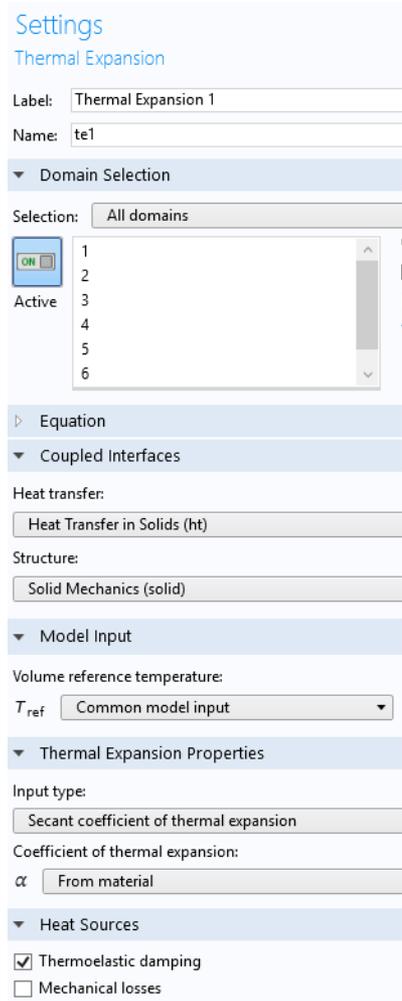
6 В окне **Settings** (Настройки) для **Thermal Expansion** (Тепловое расширение) выберите **All domains** (Все области) из списка **Selection** (Выборка). В результате для медных элементов и титановых болтов будет включено тепловое расширение.

Раздел **Thermal Expansion Properties** (Характеристики теплового расширения) содержит информацию о **Coefficient of thermal expansion** (коэффициенте теплового расширения) и **Strain reference temperature** (базовой температуре деформации) (есть также более сложные настройки). Значение **Coefficient of thermal expansion** (коэффициента теплового расширения) по умолчанию берется из узла **Materials** (Материалы). Параметр **Volume reference temperature** (Базовая температура деформации) в разделе **Model Input** (Входные данные модели) использует значение по умолчанию **293,15 K** (комнатная температура), взятое из узла **Common model inputs** (Общие входные данные) из раздела **Global Definitions** (Глобальные определения).

Этот параметр определяет температуру, при которой тепловое расширение равно нулю. Раздел **Coupled Interfaces** (Взаимосвязанные интерфейсы) показывает, какие два физических интерфейса определяют физику теплопередачи и механику твердых тел. Это удобно, когда в компоненте модели используется несколько физических интерфейсов, описывающих теплопередачу или механику твердого тела. Оставьте без изменений все настройки по умолчанию в этом окне.

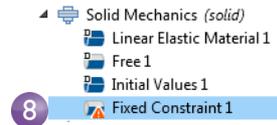
Теперь зафиксируем электрическую шину в точках размещения титановых болтов.

6

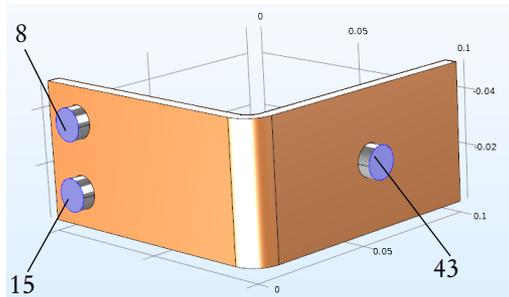
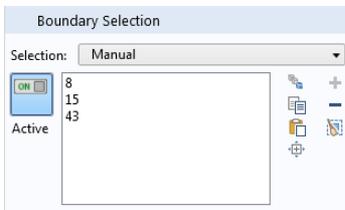


7 В дереве модели щелкните правой кнопкой мыши по узлу **Solid Mechanics** (Механика твердого тела) и на уровне границы выберите **Fixed Constraint** (Фиксированное ограничение). Одноименный узел будет добавлен в дерево.

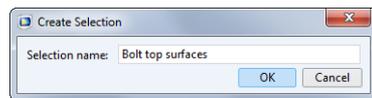
8 Щелкните по узлу **Fixed Constraint** (Фиксированное ограничение). Поверните электрическую шину обратной стороной в Графическом окне. Щелкните по поверхности одного из болтов, чтобы добавить ее в список **Selection** (Выборка).



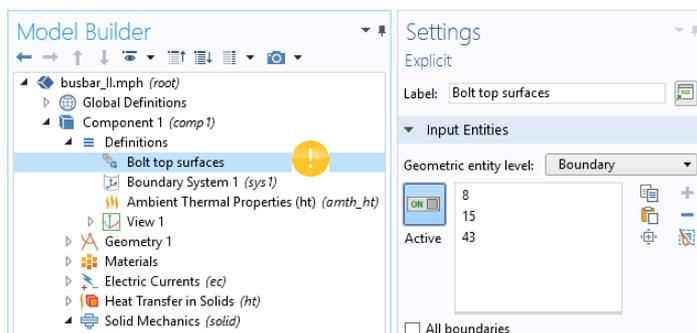
9 Повторите эту процедуру для остальных болтов для добавления границ 8, 15 и 43.



⚠ Чтобы облегчить управление несколькими выборками 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, ребра и точки.



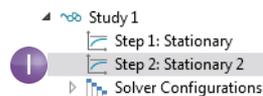
Далее мы обновим исследование так, чтобы оно учитывало добавленный физический интерфейс.

РАСЧЕТ ДЖОУЛЕВА НАГРЕВА И ТЕПЛООВОГО РАСШИРЕНИЯ

Эффект джоулева нагрева не зависит от напряжений и деформаций электрической шины, если предположить, что свойства материалов не зависят от температуры, деформация мала, а электрическое контактное давление не учитывается. Это означает, что при моделировании температуру можно использовать лишь как входной параметр для анализа на прочность. Другими словами, расширенная мультифизическая задача является слабо связанной. Соответственно, для экономии времени ее можно решить, разбив на два шага: расчет джоулева нагрева и анализ на прочность. В более сложных задачах вы можете учесть все перечисленные выше явления.

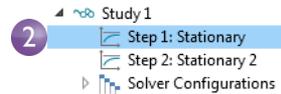
⚠ В этом примере можно пропустить все эти шаги и просто щелкнуть кнопку **Compute** (Запуск на расчет). Тем не менее описанные ниже методы могут сократить время вычисления и требуемую для вычислений память, особенно для больших моделей.

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



⚠ При добавлении дополнительных шагов исследования следует вручную выбрать, для каких интерфейсов будет проводиться расчет на соответствующем шаге. Для начала отключим для первого шага расчет на прочность.

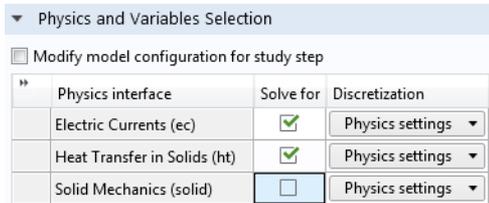
2 В разделе **Study 1** (Исследование 1) щелкните по узлу **Step 1: Stationary** (Шаг 1: Стационарное исследование) .



3 В окне **Settings** (Настройки) узла **Stationary** (Стационарный) найдите **Physics and Variables Selection** (Выбор физических интерфейсов и переменных).

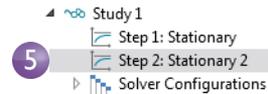
4 В строке **Solid Mechanics (solid)** в разделе **Solve for** (Проводить расчет для) переключите флажок  на , чтобы исключить из **Study Step 1** (шага 1) расчет механики твердого тела.

4



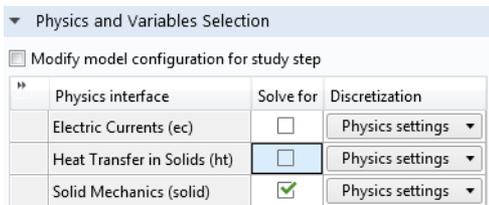
В разделе **Multiphysics** (Мультифизика) оставьте настройки по умолчанию. Проведите аналогичную операцию для исключения интерфейсов **Electric Currents (ec)** и **Heat Transfer in Solids (ht)** из второго шага исследования.

5 В разделе **Study 1** (Исследование 1) щелкните по узлу **Step 2: Stationary 2** (Шаг 2: Стационарное исследование 2) .

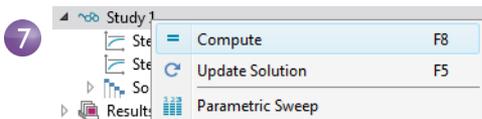


6 В разделе **Physics and Variables Selection** (Выбор физических интерфейсов и переменных) в строках **Electric Currents (ec)** и **Heat Transfer in Solids (ht)** переключите флажок  на , чтобы исключить из **Step 2: Stationary 2** (Шага 2: Стационарное исследование 2) расчет джоулева нагрева.

6



7 Щелкните правой кнопкой мыши по узлу **Study 1** (Исследование 1)  и выберите **Compute** (Запуск на расчет) , или нажмите F8, или нажмите кнопку **Compute** (Запуск на расчет) на **Ribbon** (ленте), чтобы запустить расчет.

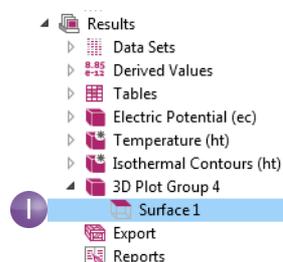


Сохраните файл как busbar_II.mph, в котором теперь содержится интерфейс **Solid Mechanics** (Механика твердого тела) и дополнительный шаг исследования.

РЕЗУЛЬТАТ РАСЧЕТА ДЕФОРМАЦИЙ

Нам следует вручную добавить дополнительные графики для вновь добавленного физического интерфейса **Solid Mechanics** (Механика твердого тела). Сначала добавим график деформаций.

- 1 В разделе **Results > 3D Plot Group 4** (Результаты > Группа трехмерных графиков 4) щелкните по узлу **Surface 1** (Распределение по поверхности 1) .



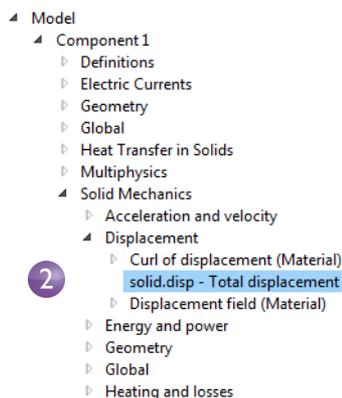
- 2 В окне **Settings** (Настройки) узла **Surface** (Распределение по поверхности) в разделе **Expression** (Выражение) нажмите кнопку **Replace Expression** (Заменить выражение) .



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



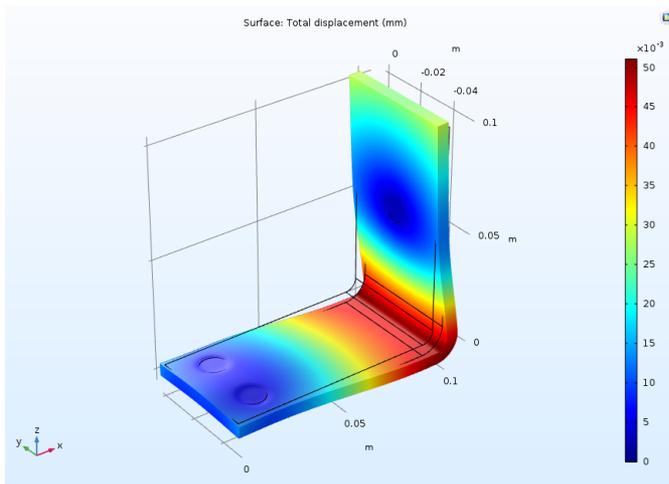
- 3 Щелкните по **Range** (Диапазон), чтобы раскрыть этот раздел. Сбросьте флажок **Manual color range** (Ручной диапазон цветов).



На графике отображается локальное смещение, вызванное тепловым расширением, на поверхности шины. Далее добавим дополнительную визуализацию деформации электрической шины.

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

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



- 5 Сохраните файл **busbar_II.mph**, в котором теперь содержится график распределения смещения по поверхности с дополнительной опцией **Deformation** (Деформация).

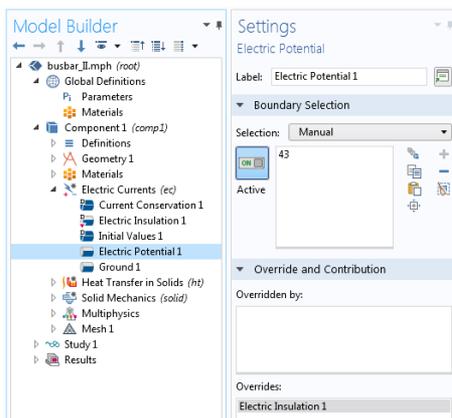
Для оценки целостности электрической шины и болтов можно также построить график напряжения по Мизесу (von Mises stress) и главного напряжения (principal stress).

VERRIDE (ПЕРЕОПРЕДЕЛЕНИЕ) И CONTRIBUTION (ДОПОЛНЕНИЕ) — ИСКЛЮЧАЮЩИЕ И ДОПОЛНЯЮЩИЕ УЗЛЫ

Узлы физического интерфейса в дереве модели обычно выполняются последовательно, начиная с верхнего узла. В зависимости от выборки узел может частично или полностью переопределять другой узел, расположенный ранее в этой последовательности. Узлы физических интерфейсов делятся на два типа: исключающие и дополняющие. От этого зависит, как узлы взаимодействуют друг с другом.

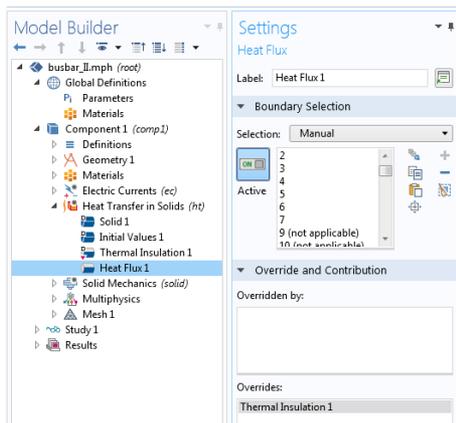
Граничное условие ограничения — типичный случай исключающего узла. Примеры граничных условий ограничения — условие **Electric Potential** (Электрический потенциал) или условие **Fixed Constraint** (Фиксированное ограничение). Например, если в интерфейсе **Electric Currents** (Электрические токи) заданы два или более узла **Electric Potential** (Электрический потенциал) для одной и той же границы, то последний узел **Electric Potential** (Электрический потенциал) в последовательности переопределяет настройки всех остальных узлов. Узел **Ground** (Заземление) — тоже исключающий узел, который переопределяет граничные условия, заданные всеми предыдущими узлами.

На иллюстрации ниже показан раздел **Override and Contribution** (Переопределение и дополнение) в окне **Settings** (Настройки) граничного условия **Electric Potential** (Электрический потенциал). Список **Overrides** (Переопределение) показывает, что это граничное условие получает приоритет над граничным условием по умолчанию **Electric Insulation** (Электрическая изоляция).



Условия, определяющие поток через границу, например тепловой поток (heat flux), — типичный пример дополняющего узла. Можно сложить несколько граничных условий для теплового потока, и все они внесут свой вклад

в полный тепловой поток. На иллюстрации ниже показан пример, в котором граничное условие **Heat Flux 2** (Тепловой поток 2) переопределяет граничное условие по умолчанию **Thermal Insulation** (Теплоизоляция) и вместе с граничным условием **Heat Flux 1** (Тепловой поток 1) вносит свой вклад в тепловой поток.



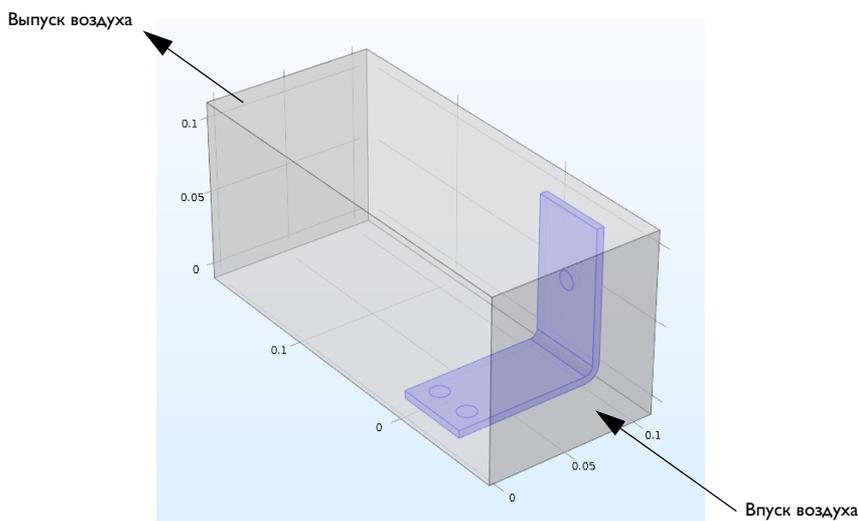
В дереве модели отношения переопределения и дополнения показываются красными стрелками и оранжевыми кругами соответственно.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОХЛАЖДЕНИЯ И УЧЕТ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

После анализа тепловыделения электрической шины и возможного теплового расширения вам может потребоваться рассмотреть варианты охлаждения шины путем воздействия воздушных потоков на ее поверхности. Для этого не требуются какие-либо дополнительные модули (если при этом наша модель будет включать в себя только джоулев нагрев без анализа теплового расширения).

- Если у вас установлен модуль **CFD** (Вычислительная гидродинамика), вы можете сразу 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 сопряженную теплопередачу в твердых телах и текучих средах, в том числе с учетом ламинарных и турбулентных потоков. В данном же примере все делается вручную и с использованием ограниченного базового функционала.

При добавлении учета гидродинамических эффектов, связанных с охлаждением, в модели джоулева нагрева понадобится сформировать новую мультифизическую связь. Для моделирования области потока следует создать область, заполненную воздухом, вокруг электрической шины. Это можно сделать вручную, изменив геометрию первой модели или открыв файл из **Application Library** (библиотеки моделей и приложений). Чтобы сэкономить время, откройте файл с уже созданной воздушной областью. После загрузки геометрии вы научитесь моделировать воздушный поток, показанный на иллюстрации:

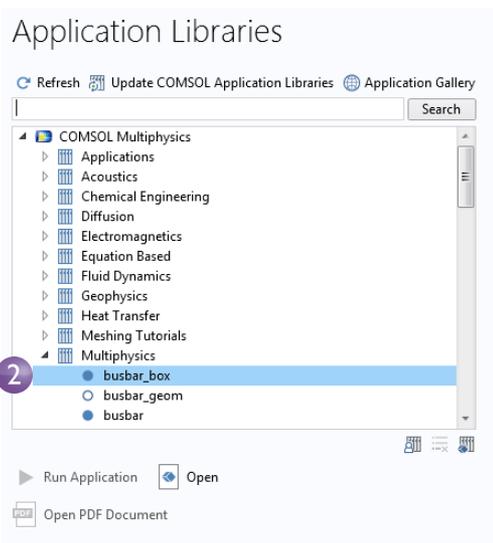


ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ПОТОКА НА ВХОДЕ

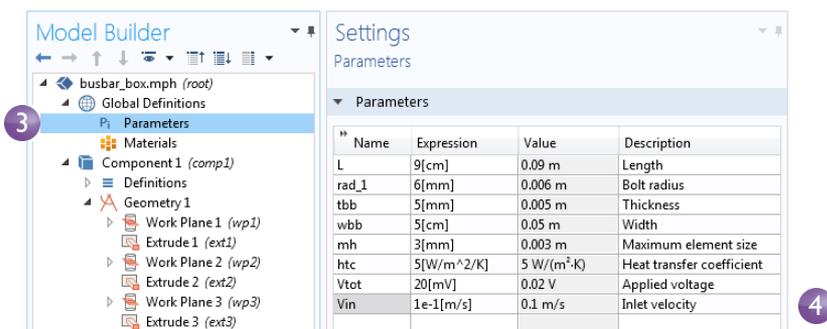
Сначала загрузите геометрию и добавьте параметр, задающий скорость входного потока.

- 1 Если вы только что перезапустили программу, нажмите кнопку **Cancel** (Отмена)  в новом окне, которое появляется автоматически.
- 2 Щелкните по вкладке **Home** (Главная) и в меню **Windows** (Окна) выберите **Application Libraries** (Библиотеки моделей и приложений) . Перейдите к **COMSOL Multiphysics > Multiphysics > busbar box**. Вы также можете открыть Библиотеки моделей и приложений непосредственно из меню **File** (Файл).

Откройте двойным щелчком файл, который содержит геометрию и уже проведенные настройки для физического моделирования, добавленные в разделе «Кастомизация материалов» на стр. 108.



- 3 В разделе **Global Definitions** (Глобальные определения) щелкните по узлу **Parameters** (Параметры) P_1 .
- 4 В окне **Settings** (Настройки) раздела **Parameters** (Параметры) щелкните по пустой строке 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, «Inlet velocity».



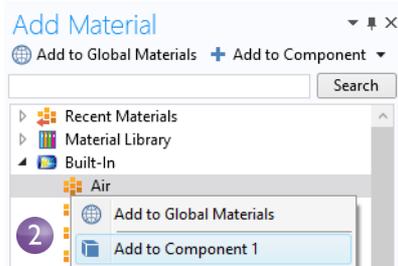
- 5 Выберите **File > Save As** (Файл > Сохранить как) и сохраните модель под новым именем `busbar_box_I.mph`.

ДОБАВЛЕНИЕ ВОЗДУХА

Теперь следует добавить свойства материала для воздуха.

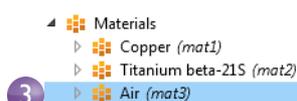
1 На вкладке **Home** (Главная) выберите **Add Material** (Добавить материал)  или щелкните правой кнопкой мыши по узлу **Materials** (Материалы) и выберите **Add Material** (Добавить материал).

2 В окне **Add Material** (Добавление материала) раскройте узел **Built-In** (Встроенные). Щелкните правой кнопкой мыши по **Air** (Воздух) и выберите **Add to Component 1** (Добавить в компонент 1). Закройте окно **Add Materials** (Добавление материалов).

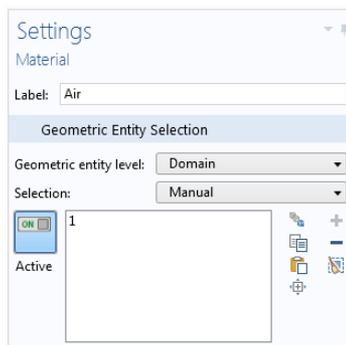
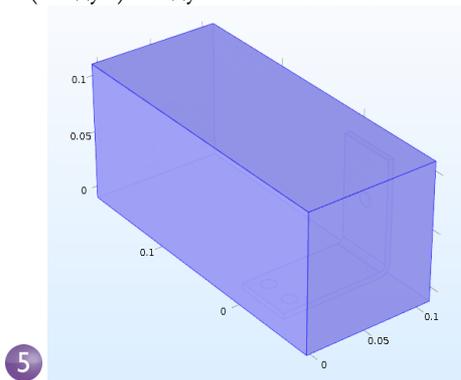


3 В Построителе моделей в разделе **Materials** (Материалы) щелкните по узлу **Air** (Воздух) .

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



5 В Графическом окне щелкните по воздушной области (область 1), чтобы добавить ее в список **Selection** (Выборка), при этом ее цвет изменится на синий. Данная операция позволила присвоить свойства материала **Air** (воздух) воздушной области.

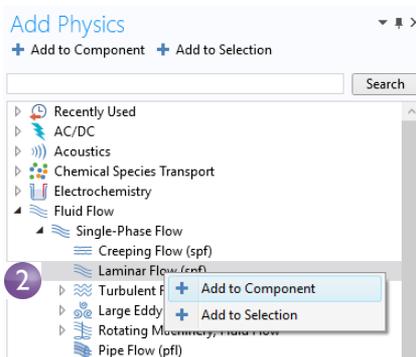


ДОБАВЛЕНИЕ ИНТЕРФЕЙСА ГИДРОДИНАМИКИ

Теперь добавьте физический интерфейс для описания гидродинамических явлений в модели.

1 В дереве модели щелкните правой кнопкой мыши по **Component 1** (Компонент 1)  и выберите **Add Physics** (Добавить физический интерфейс) .

2 В окне **Add Physics** (Добавить физический интерфейс) в разделе **Fluid Flow > Single-Phase Flow** (Гидродинамика > Однофазный поток) щелкните правой кнопкой мыши по **Laminar Flow** (Ламинарный поток)  и выберите **Add to Component** (Добавить в компонент) . В дереве модели в разделе **Component 1** (Компонент 1) появится элемент **Laminar Flow** (Ламинарный поток). Закройте окно **Add Physics** (Добавление физического интерфейса).

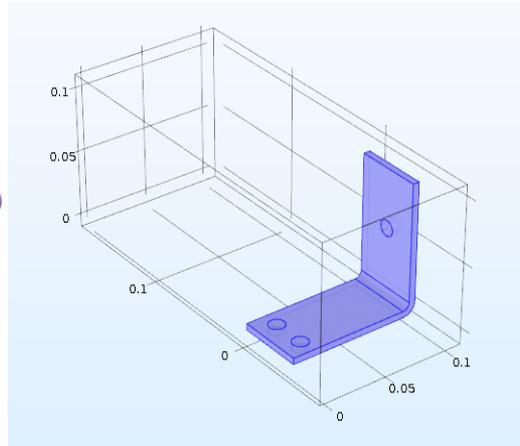


3 На панели инструментов **Graphics** (Графика) нажмите кнопку **Transparency** (Прозрачность геометрии) . Также нажмите кнопку **Wireframe Rendering** (Каркасное представление геометрии) . Эти две настройки облегчают просмотр внутреннего содержимого области. Вы можете включать и выключать эти настройки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

После того как вы добавили гидродинамический интерфейс в модель, следует удалить воздушную область (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 расчет теплопередачи в мультифизическом интерфейсе **Joule heating** (Джоулев нагрев) с гидродинамикой.

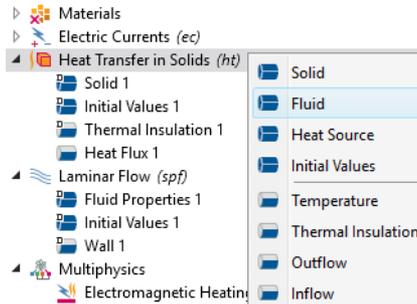
4 В дереве модели выберите узел **Electric Currents (ec)** (Электрические токи) . В Графическом окне наведите указатель мыши на воздушную область и щелкните по ней, чтобы удалить из списка выборки. На данном этапе должна быть выделена и подсвечена синим цветом только электрическая шина.

4



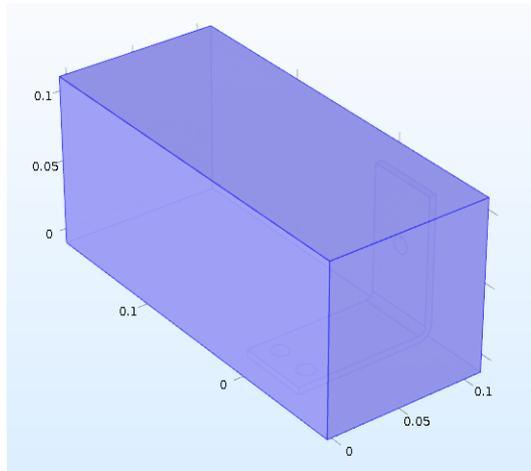
5 В Построителе моделей щелкните правой кнопкой мыши по **Heat Transfer in Solids** (Теплопередача в твердых телах) . В первом разделе контекстного меню (на уровне области) выберите **Fluid** (Текучая среда) .

5

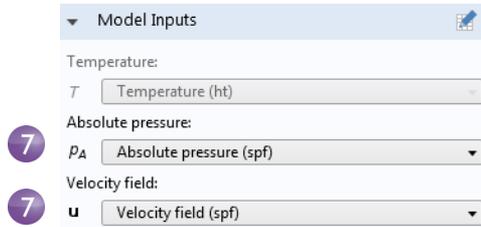


6 В Графическом окне щелкните по воздушной области (область 1), чтобы добавить ее в список **Selection** (Выборка). Теперь свяжите гидродинамику и теплопередачу.

6



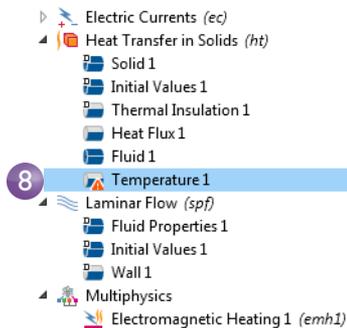
7 В окне **Settings** (Настройки) для **Fluid** (Текучая среда) в разделе **Model Inputs** (Исходные данные модели) выберите **Velocity field (spf)** из списка **Velocity field** (Поле скорости). Затем выберите **Absolute pressure (spf)** (Абсолютное давление) из списка **Absolute pressure** (Абсолютное давление).



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

Теперь задайте граничные условия в входном и выходном сечениях для расчета теплопередачи в воздушной области.

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) .



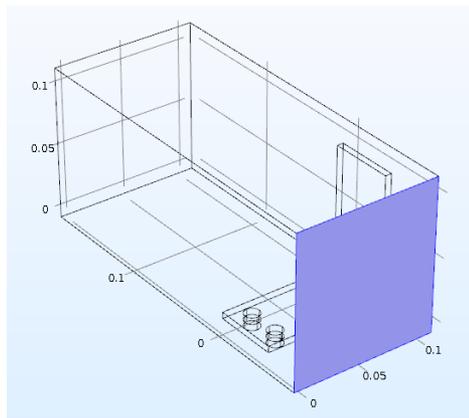
Узел **Temperature** (Температура) добавится в дерево модели.

9 В Графическом окне щелкните по входному сечению (граница 2), чтобы добавить его в список **Selection** (Выборка).

Температуре на входе будет присвоено значение по умолчанию: 293.15 К.

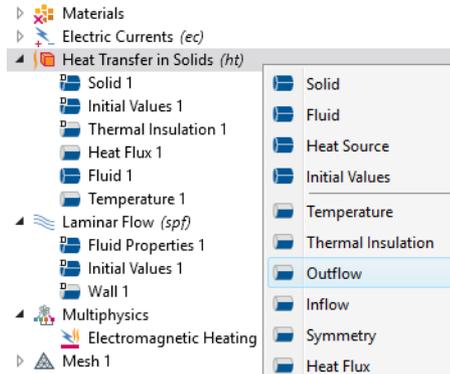
Графическое окно должно выглядеть примерно так, как на иллюстрации справа [возможны небольшие

9

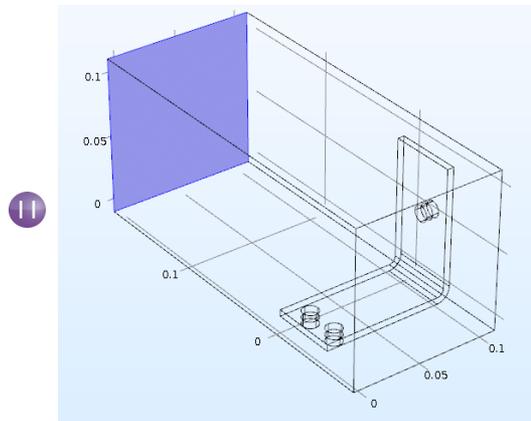


отличия в зависимости от того, включены ли опции **Transparency** (Прозрачность геометрии) и **Wireframe Rendering** (Каркасное представление геометрии)]. Затем определите условие на выходном сечении.

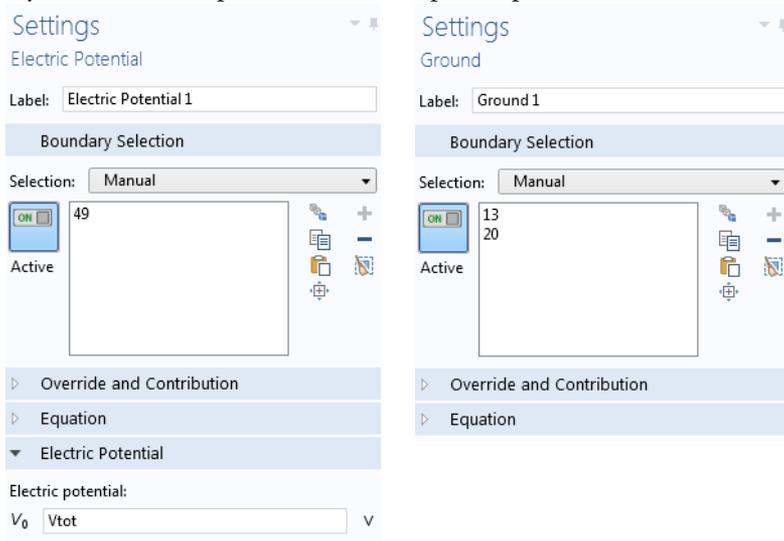
10 В Построителе моделей щелкните правой кнопкой мыши по **Heat Transfer in Solids** (Теплопередача в твердых телах) . Выберите граничное условие **Outflow** (Выходное сечение). Узел **Outflow** (Выходное сечение)  добавится в дерево модели.



11 В Графическом окне щелкните по выходной границе (граница 5), чтобы добавить ее в список **Selection** (Выборка). Чтобы подсветить границу перед тем, как выбрать ее, используйте для прокрутки колесо мыши или стрелки «вверх» и «вниз» на клавиатуре.

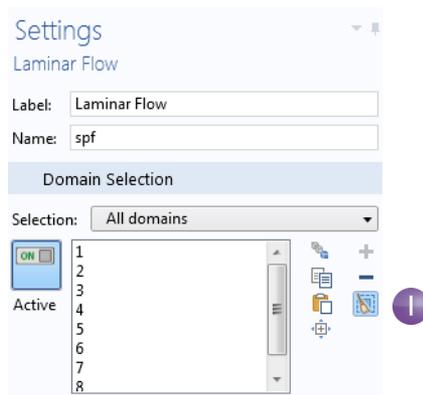


- 
 В настройках электрической шины и болтов, а также в границах **Electric Potential I** (Электрический потенциал 1) и **Ground I** (Заземление 1) сохраняется правильная выборка, несмотря на добавление геометрии для воздушной области. Для проверки щелкните по узлам **Electric Potential I** (Электрический потенциал 1) и **Ground I** (Заземление 1) в разделе **Electric Currents** (Электрические токи) дерева модели и убедитесь, что границы в них выбраны правильно.



Теперь зададим настройки для потока. Нам необходимо корректно указать домен для расчета гидродинамики, а затем задать условия во входном и выходном сечениях, а также условия симметрии. Для этого сначала удалите все области из выборки, а затем добавьте только воздушную область.

- В дереве модели щелкните по узлу **Laminar Flow** (Ламинарный поток) . В окне **Settings** (Настройки) раздела **Laminar Flow** (Ламинарный поток) нажмите кнопку **Clear Selection** (Очистить выборку) .
- В Графическом окне щелкните по блоку воздуха (область 1), чтобы добавить его в список **Selection** (Выборка).

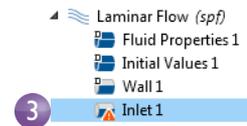


Желательно также проверить, что материал **Air** (Воздух) в узле **Materials** (Материалы) имеет все свойства, которые требуются для данного сочетания мультифизических интерфейсов. В дереве модели в разделе **Materials** (Материалы) щелкните по **Air** (Воздух). В окне **Settings** (Настройки) для **Material** (Материал) в разделе **Material Contents** (Содержимое материала) проверьте, нет ли пропущенных свойств с предупреждающим знаком . Подробная информация приведена в разделе «Materials (Материалы)» на стр. 69.



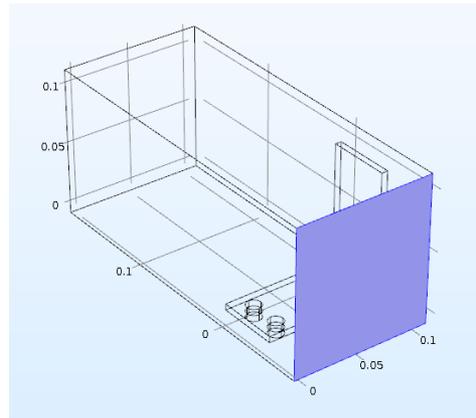
Перейдем к настройке граничных условий.

3 В Построителе моделей щелкните правой кнопкой мыши по **Laminar Flow** (Ламинарный поток)  и выберите ГУ **Inlet** (Входное сечение). Узел **Inlet**  добавится в дерево модели.

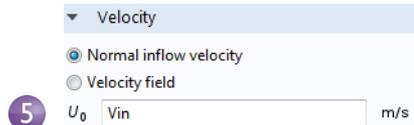


4 В Графическом окне щелкните по входному сечению (граница 2), чтобы добавить его в список **Selection** (Выборка).

4



5 В окне **Settings** (Настройки) для **Inlet** (Входное сечение) в разделе **Velocity** (Скорость) в поле U_0 введите V_{in} в качестве **Normal inflow velocity** (Нормальная компонента скорости входного потока).



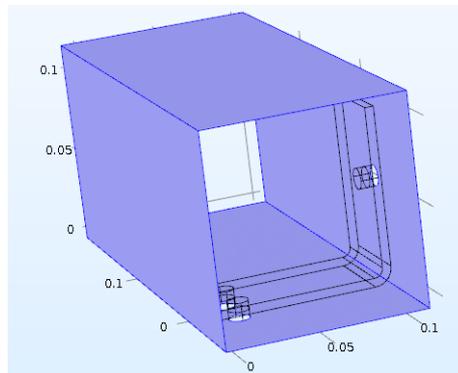
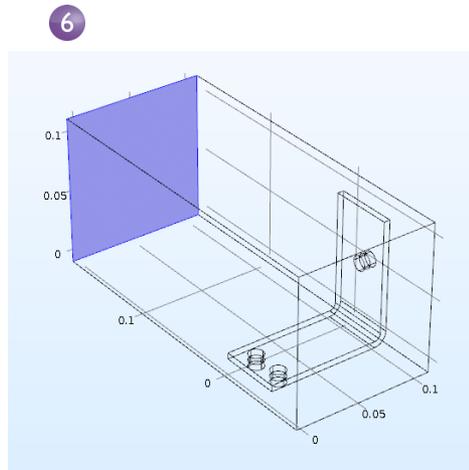
- 6 Щелкните правой кнопкой мыши по **Laminar Flow** (Ламинарный поток)  и выберите ГУ **Outlet** (Выходное сечение) . В Графическом окне щелкните по соответствующей границе (граница 5), чтобы добавить ее в список **Selection** (Выборка). Чтобы подсветить границу перед тем, как выбрать ее, используйте прокрутку колесом мыши или стрелки на клавиатуре.

Наконец, осталось добавить условия симметрии.

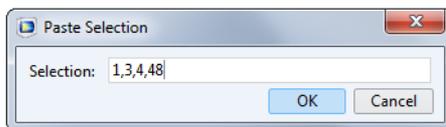
Предположим, что поток около внешних поверхностей канала аналогичен потоку внутри канала. Это допущение можно сформулировать в виде условия симметрии.

- 7 Щелкните правой кнопкой мыши по **Laminar Flow** (Ламинарный поток)  и выберите **Symmetry** (Симметрия). Узел **Symmetry** (Симметрия)  добавится в последовательность.
- 8 В Графическом окне щелкните по каждой из синих поверхностей, показанных на иллюстрации ниже (границы 1, 3, 4 и 48), чтобы добавить их в список **Selection** (Выборка). Чтобы выделить все поверхности, вы можете использовать колесо мыши или вращать геометрию.

Сохраните файл `busbar_box_1.mph`, в котором теперь содержатся материал **Air** (Воздух) и настройки для интерфейса **Laminar Flow** (Ламинарный поток).



❗ Если номера границ известны, можно нажать кнопку **Paste Selection** (Вставить выборку) и ввести необходимую информацию. В данном примере введите 1, 3, 4, 48 в окне **Paste Selection** (Вставка выборки). После нажатия кнопки **OK** границы автоматически добавятся в список **Selection** (Выборка).



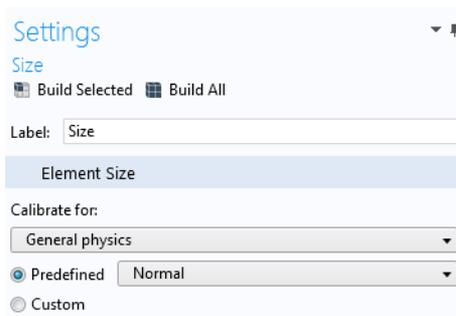
УВЕЛИЧЕНИЕ ХАРАКТЕРНОГО РАЗМЕРА СЕТКИ

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.

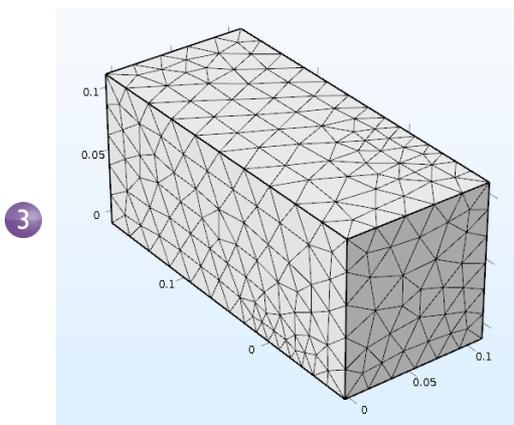
1 В Построителе моделей раскройте узел **Mesh 1** (Сетка 1) и щелкните по узлу **Size** (Размер).



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



3 Нажмите кнопку **Build All** (Построить все) и проверьте, отображается ли полученная сетка в Графическом окне. Чтобы изображение выглядело, как на иллюстрации ниже, может потребоваться выключить опцию **Transparency** (Прозрачность геометрии).



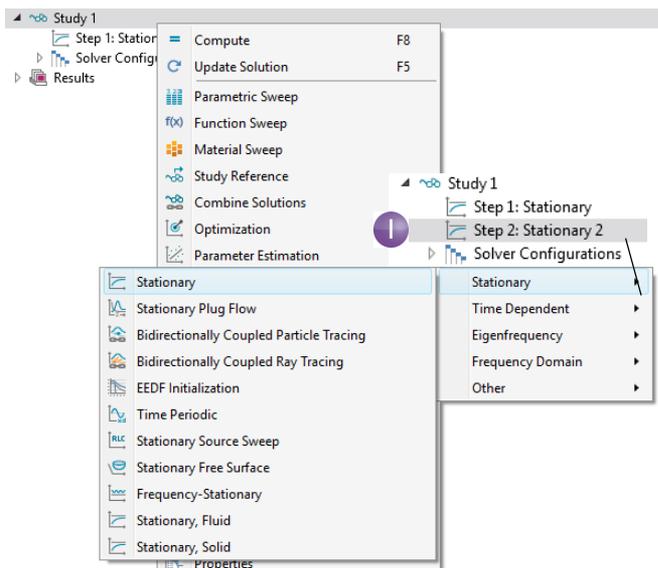
Предположим, что скорость потока достаточно велика, что позволит пренебречь повышением температуры в поле потока.

Тогда можно сначала решить гидродинамическую часть задачи, а затем тепловую, используя полученное поле потока в качестве входных данных. Реализуем это, настроив последовательность исследования.

РАСЧЕТ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ И ДЖОУЛЕВА НАГРЕВА

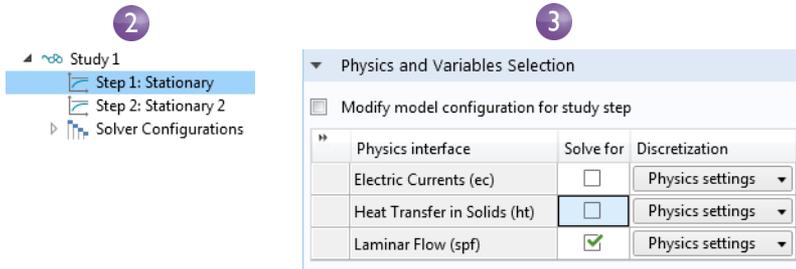
Т. к. мы проводим сначала гидродинамический расчет, а лишь затем определяем поля температур, то в итоге мы получаем слабо связанную мультифизическую задачу. Последовательность исследования, описанная в этом разделе, позволит автоматически решать подобные слабые (или однонаправленные) связи.

- 1 В дереве модели щелкните правой кнопкой мыши по **Study 1** (Исследование 1) ∞ и выберите **Study Steps > Stationary > Stationary** (Шаги исследования > Стационарный > Стационарный) \square , чтобы добавить второй стационарный шаг исследования в **Model Builder** (Построитель моделей).

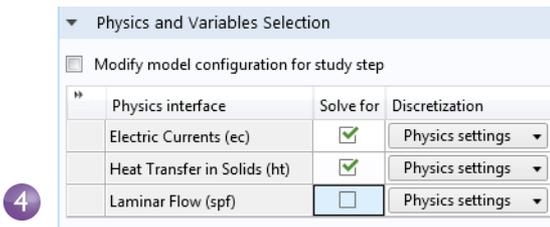


Далее следует правильно выставить то, какие физические интерфейсы будут рассчитываться на каждом шаге комплексного исследования. Сначала отключите интерфейсы **Electric Currents (ec)** (Электрические токи) и **Heat Transfer in Solids (ht)** (Теплопередача в твердых телах), для первого шага расчета.

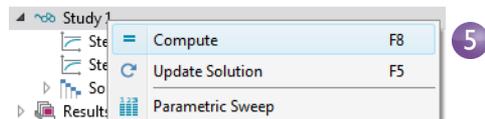
- 2 В разделе **Study 1** (Исследование 1) щелкните по **Step 1: Stationary** (Шаг 1: стационарное исследование) .



- 3 В окне **Settings** (Настройки) узла **Stationary** (Стационарный) перейдите в раздел **Physics and Variables Selection** (Выбор физического интерфейса 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** (Найти решение для), убрав все что связано с джоулевым нагревом из **Step 1** (Шаг 1).
- 4 Проведем еще одну аналогичную операцию. В разделе **Study 1** (Исследование 1) щелкните по узлу **Step 2: Stationary 2**  (Шаг 2: стационарное исследование 2). В разделе **Physics and Variables Selection** (Выбор физических интерфейсов и переменных) в строке **Laminar Flow (spf)** (Ламинарный поток) щелкните по столбцу **Solve for** (Найти решение для), чтобы переключить флажок на .



- 5 Щелкните правой кнопкой мыши по узлу **Study 1** (Исследование 1)  и выберите **Compute** (Запуск на расчет) , или нажмите F8, или нажмите кнопку **Compute** (Запуск на расчет) на ленте. В результате система автоматически создаст новую последовательность решателя, которая сначала рассчитает ламинарный поток, а затем джоулев нагрев.



- 6 Когда расчет будет окончен, выберите график **Temperature (ht)** (Температура) в узле **Results** (Результаты) Построителя моделей. Если прозрачность еще не включена, нажмите кнопку **Transparency** (Прозрачность геометрии)  на панели инструментов **Graphics** (Графика), чтобы визуализировать поле температур внутри области. Чтобы изменить масштаб, нажмите и удерживайте среднюю кнопку (или колесо) мыши, перемещая указатель.

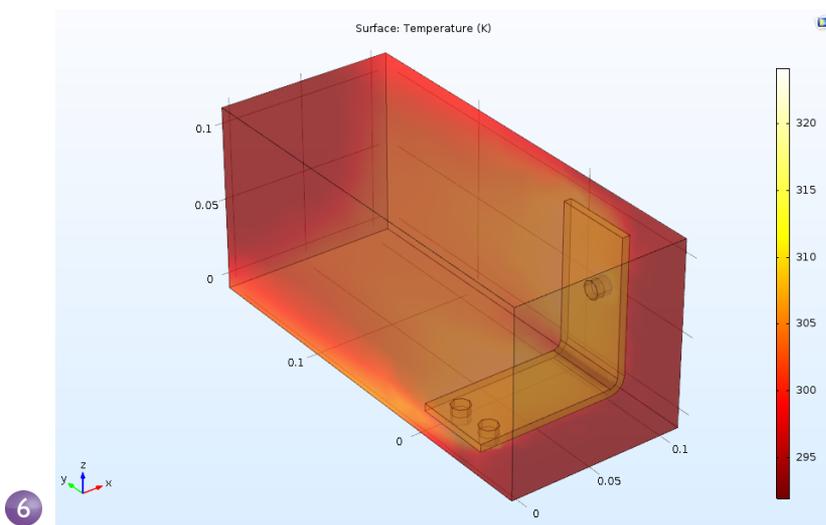


График **Temperature Surface** (Распределение температуры по поверхности) в Графическом окне показывает температуру в электрической шине и окружающей области. Недостаточно гладкие переходы в распределении поля температур вызваны относительно крупной сеткой. Чтобы получить более гладкое решение, можно измельчить сетку.

- 7 Сохраните модель в файле `busbar_box_1.mph`, чтобы при необходимости вы могли в любой момент к нему вернуться. Далее мы будем работать с исходным файлом `busbar.mph`.

Parametric Sweeps (Параметрические исследования)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО РАЗМЕРА В КАЧЕСТВЕ ПАРАМЕТРА ДЛЯ PARAMETRIC SWEEP (ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ)

Во многих случаях удобно виртуально рассмотреть несколько вариантов конструкции, чтобы определить, какой из них лучше соответствует определенным ограничениям и постановке задачи. В предыдущем примере с электрической шиной основной задачей могло бы быть снижение рабочей температуры или плотности тока. Рассмотрим подробнее первый вариант. Поскольку плотность тока зависит от геометрии электрической шины, при изменении ширины *wbb* должна изменяться плотность тока, что, в свою очередь, может влиять на рабочую температуру. Выполним параметрическое исследование по параметру *wbb*, чтобы изучить эти изменения.

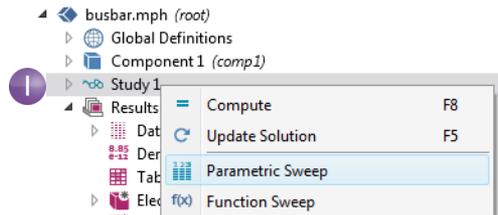
ДОБАВЛЕНИЕ PARAMETRIC SWEEP (ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ)

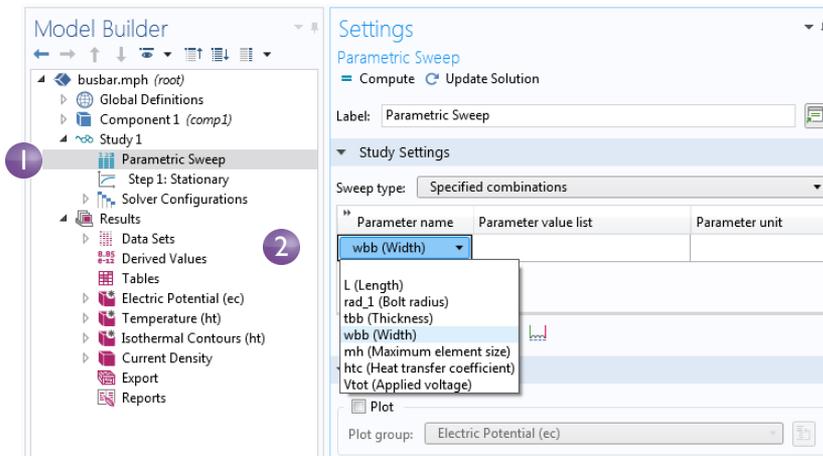
- 1 Через меню **File** (Файл) откройте файл модели *busbar.mph*. Если вы не сохранили модель, откройте ее из Библиотеки моделей и приложений: **File > Application Libraries > COMSOL Multiphysics > Multiphysics > busbar** (Файл >

Библиотеки моделей и приложений > COMSOL Multiphysics > Мультифизика > электрическая шина).

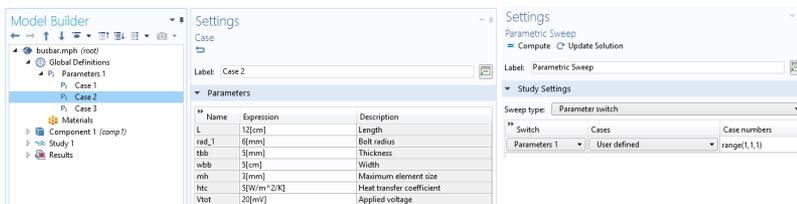
В Построителе моделей щелкните правой кнопкой мыши по **Study 1** (Исследование 1)  и выберите **Parametric Sweep** (Параметрическое исследование) . Узел **Parametric Sweep** (Параметрическое исследование) добавится в последовательность Построителя моделей.

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





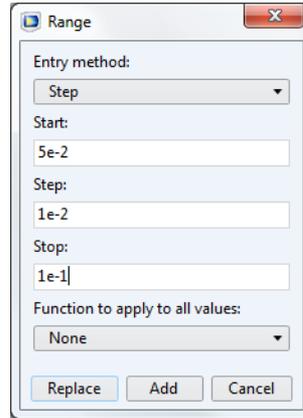
Настройка **Sweep type** (Тип параметрического исследования) служит для управления параметрическим исследованием с несколькими параметрами. Вы можете выбирать, проводить параметрическое исследование по всем комбинациям данных параметров (опция **All combinations**), по подмножеству указанных комбинаций (опция **Specified combinations**) или с переключением между параметрами (опция **Parameter switch**). Опция **Parameter switch** (Переключение между параметрами) позволяет проводить параметрическое исследование, переключаясь между параметрами, входящими в одну группу. Группы параметров задаются в узле **Global Definitions** (Глобальные определения), как показано ниже.



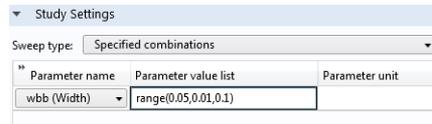
3 Введите диапазон значений параметра, чтобы исследовать значения ширины электрической шины в диапазоне от 5 см до 10 см с шагом 1 см. Эту информацию можно ввести разными способами:

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

- Щелкните по полю **Parameter value list** (Список значений параметра), а затем щелкните по кнопке **Range** (Диапазон) , чтобы ввести значения в диалоговом окне **Range** (Диапазон). В поле **Start** (Начало) введите `5e-2`. В поле **Step** (Шаг) введите `1e-2`, а в поле **Stop** (Окончание) укажите `1e-1`. Нажмите кнопку **Replace** (Заменить).

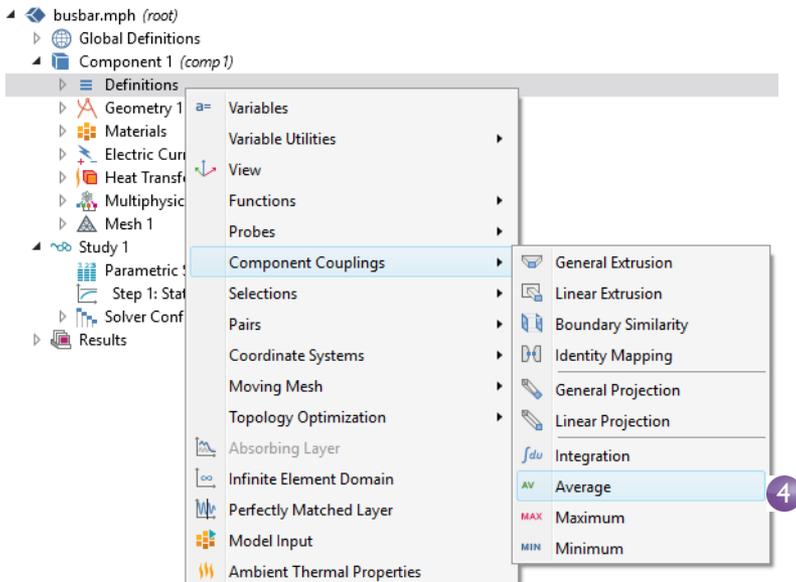


- В любом из этих способов можно переопределить размерность с единиц системы СИ по умолчанию на пользовательские единицы. Вместо `5e-2` можно ввести `5[cm]`, аналогично `1[cm]` вместо `1e-2` и `10[cm]` вместо `1e-1`. Кроме того, в окне **Settings** (Настройки) корневого узла дерева модели можно изменить систему единиц по умолчанию.

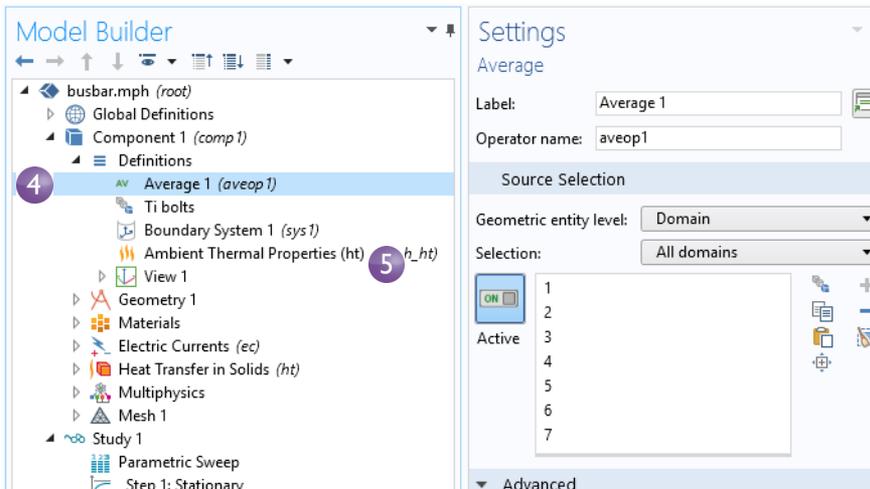


Далее задайте взаимосвязь между компонентами типа **Average** (Среднее), которая потребуется позднее для расчета средней температуры в электрической шине.

- 4 В разделе **Component 1** (Компонент 1) щелкните правой кнопкой мыши по **Definitions** (Определения) и выберите **Component Couplings > Average** (Взаимосвязи между компонентами > Среднее) .



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



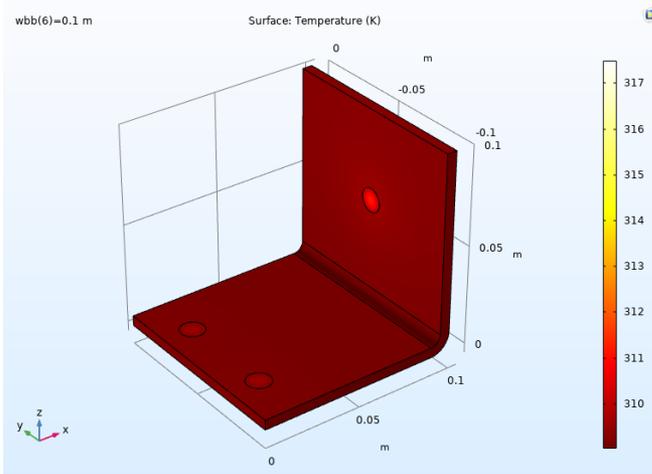
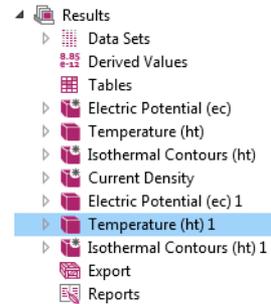
В результате будет создан оператор `aveop1`. Теперь этот оператор позволит вычислять среднее значение любой величины, определенной на выбранных областях. Далее мы воспользуемся им для расчета средней температуры, но его также можно применять для вычисления среднего электрического напряжения, плотности тока и т. д.

- 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 по **Study 1** (Исследование 1)  и выберите **Compute** (Запуск на расчет)  или нажмите кнопку **Compute** (Запуск на расчет) на вкладке **Home** (Главная).

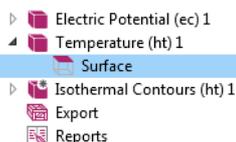
РЕЗУЛЬТАТЫ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Щелкните по узлу **Temperature (ht) 1** (второй график с распределением температуры) в разделе **Results** (Результаты) дерева модели.

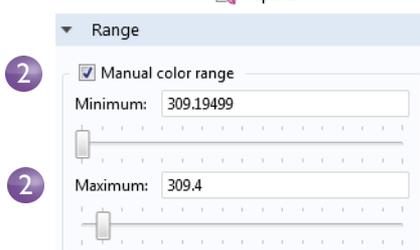
График в Графическом окне показывает температуру в более широкой электрической шине для последнего значения параметра `wbb=0.1 [m]` (`10 [cm]`). Чтобы увидеть весь график, выберите **Zoom Extents** (Масштаб сцены)  на панели инструментов Графического окна. Так как график получился почти одноцветным,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



1 В узле **Temperature (ht) 1** щелкните по узлу **Surface** (Распределение по поверхности) .



2 В окне **Settings** (Настройки) для **Surface** щелкните по **Range** (Диапазон), чтобы раскрыть этот раздел. Установите флажок в поле **Manual color range** (Ручной диапазон цветов). Введите 309.5 в поле **Maximum** (Максимум) вместо значения по умолчанию.



3 График **Temperature (ht) 1** будет заново построен в Графическом окне для значения $wbb=0.1$ [m] (10 [cm]).

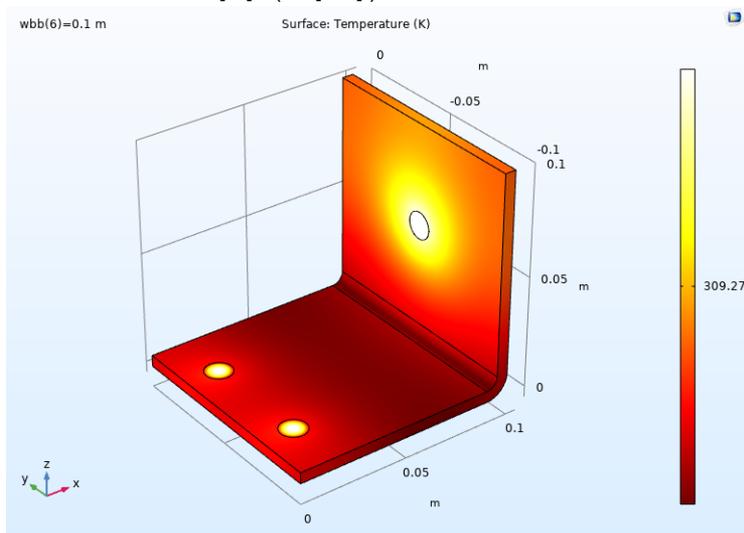
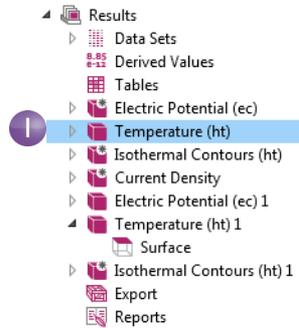
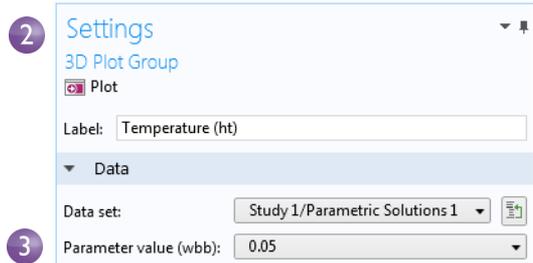


График может выглядеть немного иначе в зависимости от версии ПО, в которой вы работаете. Сравните график для более широкой электрической шины с графиком для значения $wbb=0.05$ [m] (5 [cm]). Для этого вы можете повторно использовать одну из заданных ранее групп графиков.

1 В Построителе моделей щелкните по первому узлу **Temperature (ht)** .

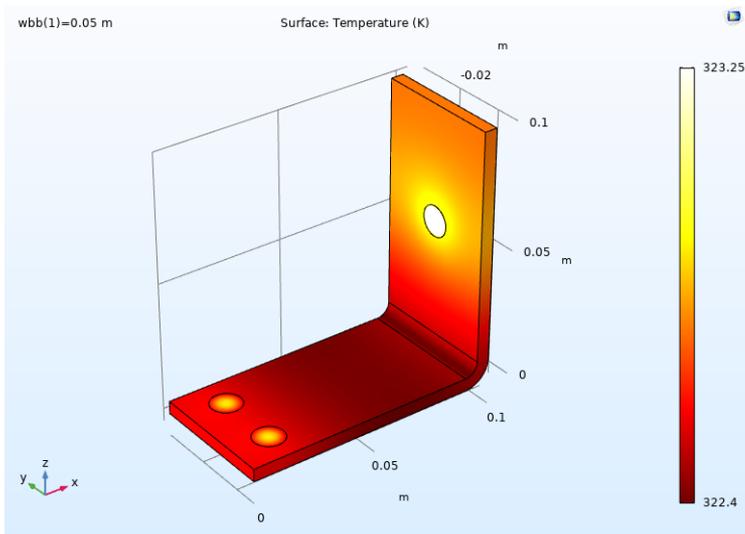


2 В окне **Settings** (Настройки) для **3D Plot Group** (Группа трехмерных графиков) выберите **Study 1 / Parametric Solutions 1** (Исследование 1 / Параметрические решения 1) из списка **Data set** (Набор данных). Этот набор данных содержит результаты параметрического исследования.



3 В списке **Parameter value** (Значение параметра) выберите **0.05** (что соответствует $wbb=5$ см). Щелкните по кнопке **Plot** (Построить) . Нажмите кнопку **Zoom Extents** (Масштаб сцены)  на панели инструментов Графического окна.

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



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

- 1 В первом узле **Temperature (ht)** щелкните по узлу **Surface** (Распределение по поверхности) .
- 2 В окне **Settings** (Настройки) для **Surface** щелкните по **Range** (Диапазон), чтобы развернуть этот раздел, если он свернут. Установите флажок в поле **Manual color range** (Ручной диапазон цветов).
- 3 Введите 323.25 в поле **Maximum** (Максимум) вместо значения по умолчанию.

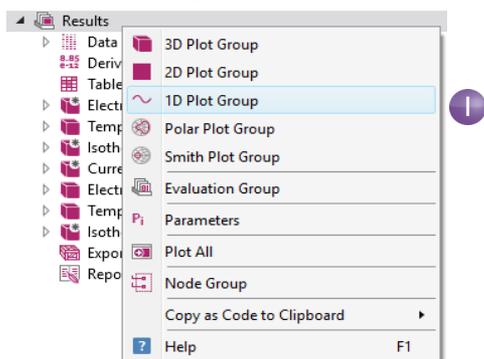
График **Temperature (ht) (Температура)** будет заново построен в Графическом окне для значения $wbb=0.05[m]$ (5[см]).

Щелкните по первому и второму узлам графика **Temperature** (Температура), чтобы сравнить графики в Графическом окне. При увеличении ширины электрической шины с 5 см до 10 см максимальная температура снижается.

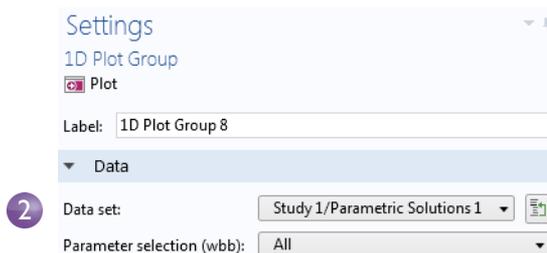
ДОБАВЛЕНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ГРАФИКОВ

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

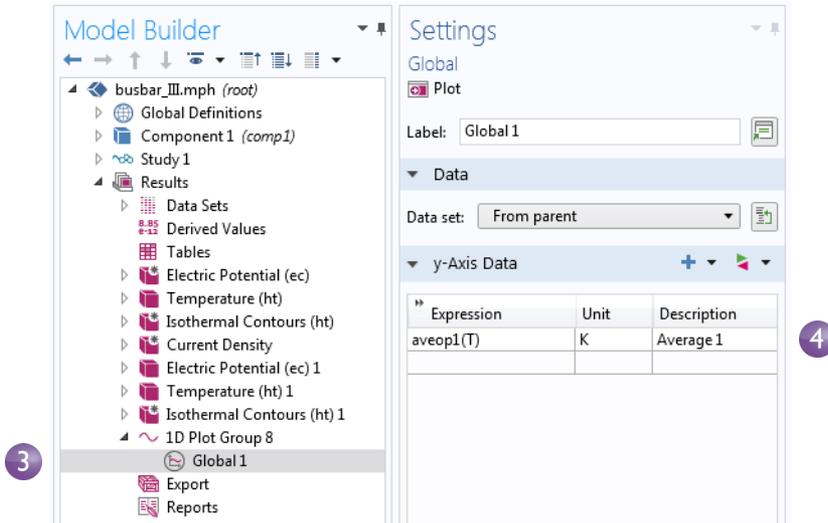
- 1 Щелкните правой кнопкой мыши по **Results** (Результаты)  и добавьте **ID Plot Group** (Группа одномерных графиков) .



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

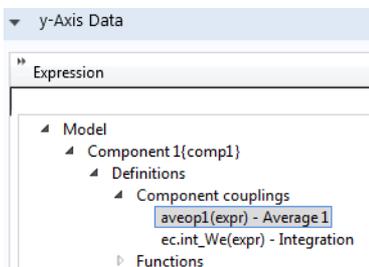


- 3 В Построителе моделей щелкните правой кнопкой мыши по **ID Plot Group 8** (Группа одномерных графиков 8) и добавьте узел **Global** (Глобальные) .



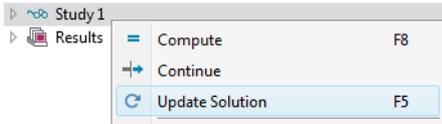
- 4 В окне **Settings** (Настройки) узла **Global** (Глобальные) в разделе **y-Axis Data** (Данные по оси Y) щелкните первую строку в столбце **Expressions** (Выражения) и введите **aveop1 (T)**. Это оператор, который мы задали ранее на стр. 141. Для расчета средних значений других величин используется аналогичный синтаксис.

 Вы можете использовать автодополнение, щелкнув по первой строке и нажав **Ctrl+Space**.

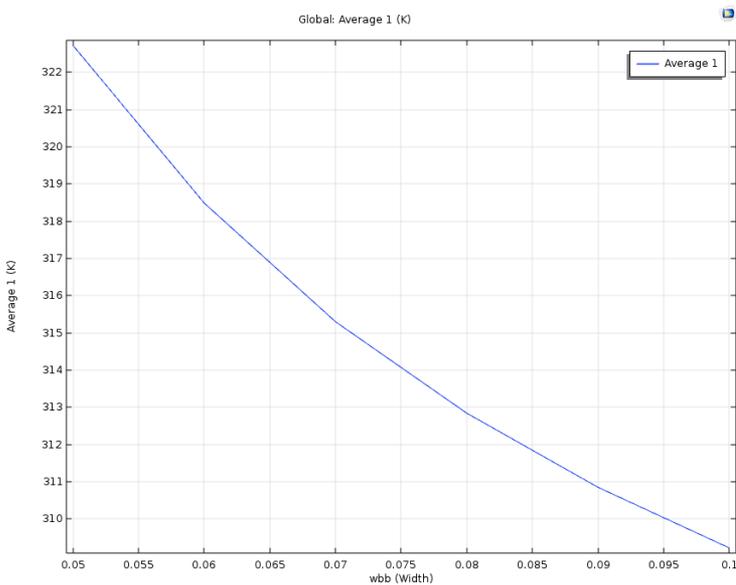




Чтобы использовать вновь добавленный оператор для взаимосвязи, не проводя повторно расчет модели, вы можете выбрать опцию **Update Solution** (Обновить решение), доступную по щелчку правой кнопкой мыши по узлу **Study** (Исследование).



- 5 Нажмите кнопку **Plot** (График) и сохраните модель busbar_III.mph с этими дополнительными графиками, использующими результаты параметрического исследования.

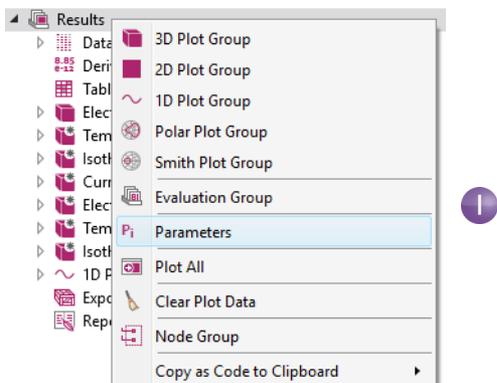


На графике видно, что средняя температура падает по мере увеличения ширины.

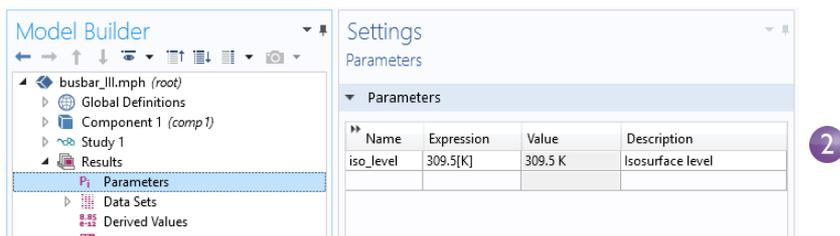
ПАРАМЕТРЫ В УЗЛЕ RESULTS (РЕЗУЛЬТАТЫ)

Для большей гибкости можно задать параметры, которые используются только в узле **Results** (Результаты). При использовании этих параметров не требуется повторный расчет модели. Следующий пример показывает создание анимации на основе параметра, определенного в узле **Results** (Результаты).

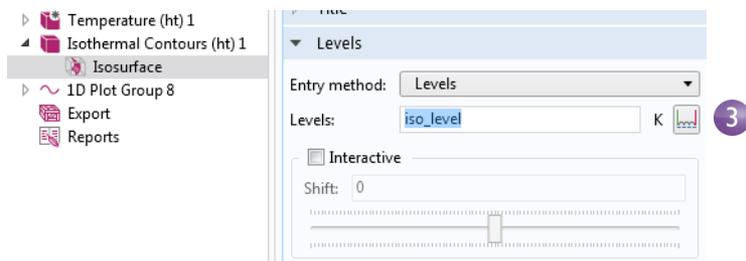
- 1 Щелкните правой кнопкой мыши по узлу **Results** (Результаты) и выберите **Parameters** (Параметры).



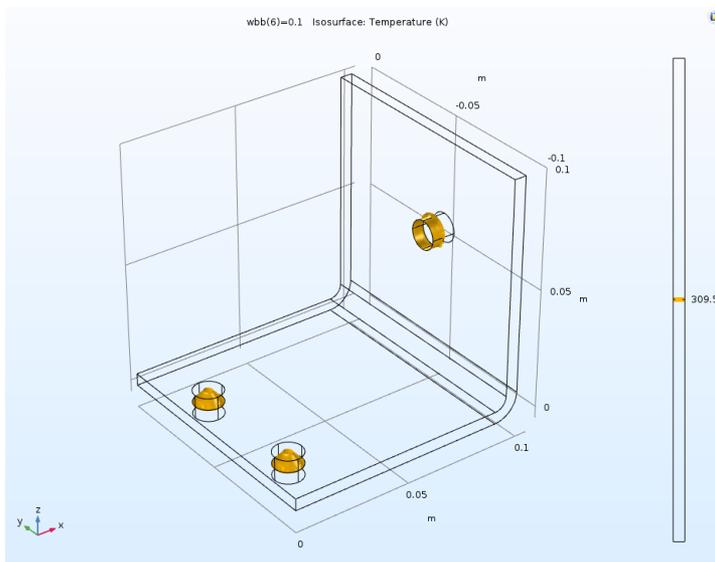
- 2 Определите параметр под названием `iso_level` и введите в поле **Expression** (Выражение) значение `309.5[K]`.



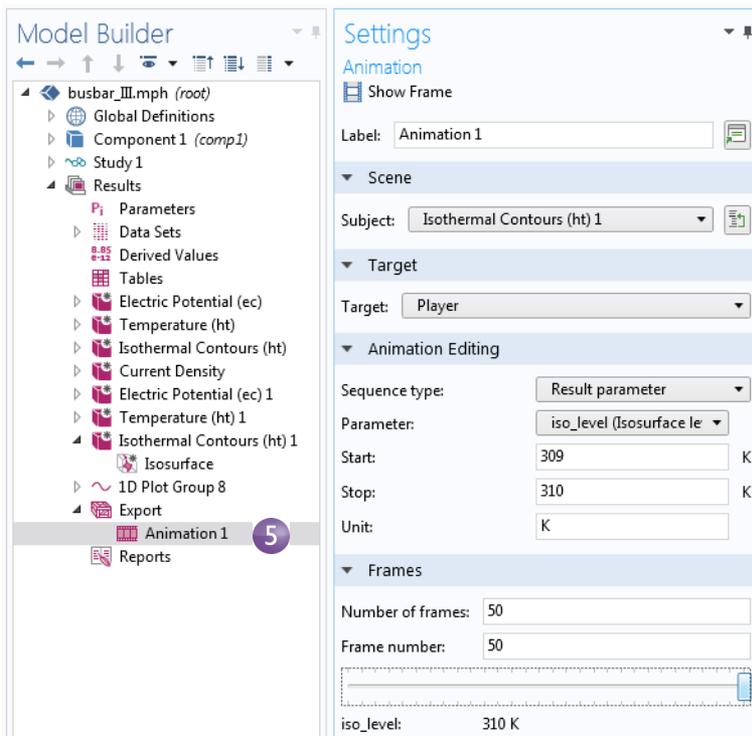
- 3 В группе графиков **Isothermal Contours (ht)** (Изотермические контуры) в окне **Settings** (Настройки) графика **Isosurface** (Изоповерхность) измените метод **Entry** (Ввод) на **Levels** (Уровни). В поле выражения **Levels** (Уровни) введите `iso_level`.



4 В том же окне **Settings** (Настройки) щелкните по **Plot** (Построить график).



- 5 Создайте **Animation** (Анимацию) одним из двух способов: выбрав **Player** (Проигрыватель) в меню **Animation** (Анимация) вкладки **Isothermal Contours (ht) 1** на ленте или щелкнув правой кнопкой мыши по узлу **Export** (Экспорт) и выбрав **Animation > Player** (Анимация > Проигрыватель).



- 6 В окне **Settings** (Настройки) для **Animation** (Анимация) измените **Sequence Type** (Тип последовательности) на **Result parameter** (Параметр результата) и выберите параметр **iso_level**. Введите 309 в поле **Start** (Начало) и 310 в поле **Stop** (Окончание). Щелкните по кнопке **Play** (Воспроизвести) на панели инструментов **Graphics** (Графика) или кнопке **Show frame** (Показать кадр) в окне **Settings** (Настройки) для **Animation** (Анимация). Чтобы получить более плавную анимацию, увеличьте параметр **Number of frames** (Число кадров), например, до 50.

При работе с параметрическими исследованиями всегда возникает вопрос о параллельных вычислениях. Эффективность такого исследования возросла бы при одновременном расчете всех параметров.

Parallel Computing (Параллельные вычисления)

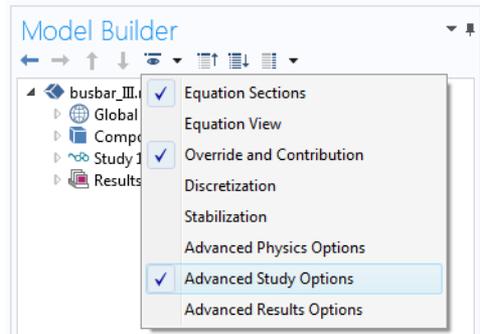
COMSOL Multiphysics и COMSOL Server поддерживают большинство типов параллельных вычислений, включая параллелизм с общей памятью для многоядерных процессоров и высокопроизводительные вычисления (HPC) для кластеров и облачных сред. Все лицензии COMSOL поддерживают многоядерность. Для кластерных и облачных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

Кластеры и облачные среды можно использовать в двух вариантах:

Cluster Sweep (Кластерное параметрическое исследование) или **Cluster Computing** (Кластерный расчет). Если у вас есть плавающая сетевая лицензия, эти две возможности будут доступны по щелчку правой кнопкой мыши по узлу **Study** (Исследование).

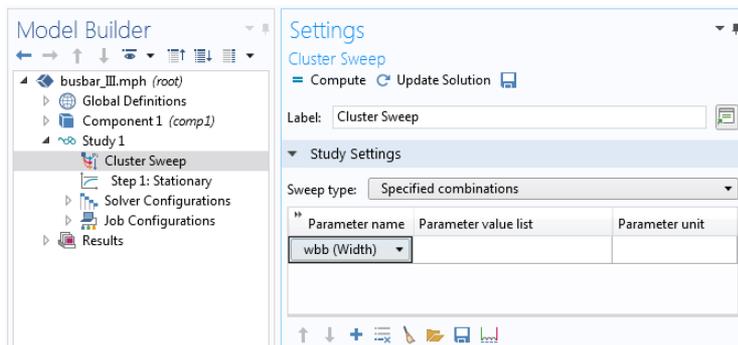
Однако сначала следует активировать **Advanced Study Options**

(Расширенные возможности исследования), нажав кнопку **Show** (Показать) на панели инструментов **Model Builder** (Построитель моделей) и выбрав пункт **Advanced Study Options**.



CLUSTER SWEEP (КЛАСТЕРНОЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ)

Cluster Sweep (Кластерное параметрическое исследование) позволяет рассчитывать несколько моделей одновременно, используя при этом для каждой свой набор параметров. Это можно рассматривать как обобщение стандартного **Parametric Sweep** (параметрического исследования). Щелкните правой кнопкой мыши по узлу **Study** (Исследование) и добавьте узел **Cluster Sweep** (Кластерное параметрическое исследование).



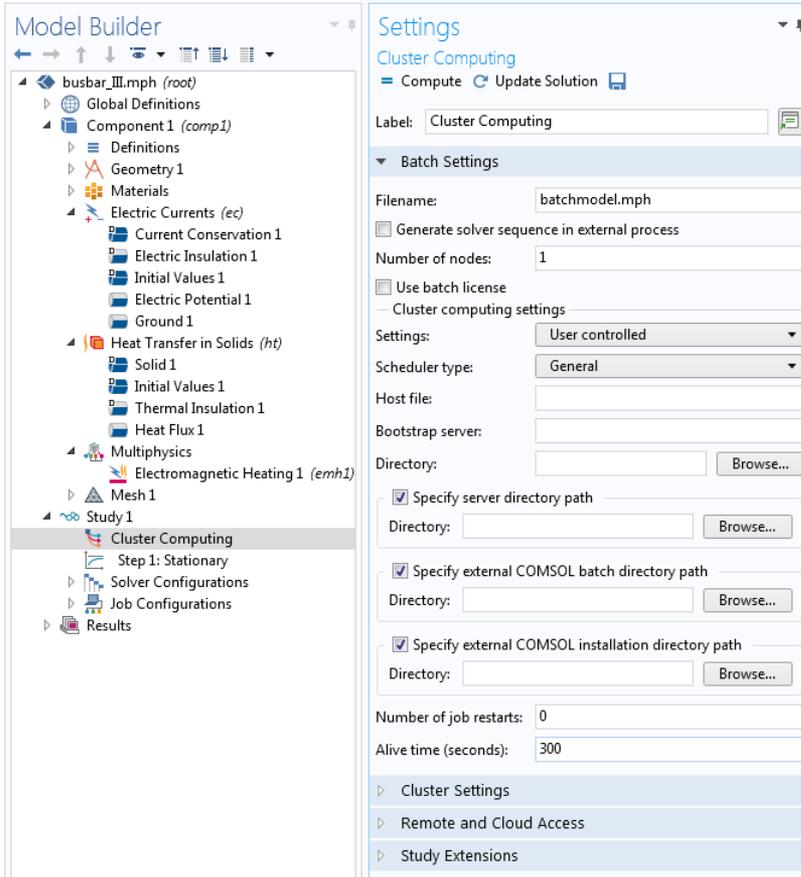
Настройки исследования для кластерного параметрического исследования аналогичны настройкам для обычного параметрического исследования, но содержат ряд дополнительных опций, необходимых для настройки используемого кластера или облака. На иллюстрации выше показано, как выглядит верхняя часть окна **Settings** (Настройки) кластерного параметрического исследования для того же исследования, что было определено в разделе «Parametric Sweeps (Параметрические исследования)» на стр. 137. Чтобы запустить кластерное исследование, в этом случае следует сначала удалить узел **Parametric Sweep** (Параметрическое исследование).

CLUSTER COMPUTING (КЛАСТЕРНЫЙ РАСЧЕТ)

Кластер или облако можно также использовать для решения одной большой модели с использованием распределенной памяти. Для ускорения работы реализация кластера в программном обеспечении COMSOL может применять многоядерные вычисления с общей памятью в каждом узле в сочетании с моделью распределенной памяти на основе интерфейса передачи сообщений **MPI** (Message Passing Interface). Этот подход, который также называется гибридным параллелизмом, значительно ускоряет работу благодаря эффективному использованию вычислительных ресурсов.

Щелкните правой кнопкой мыши по узлу **Study** (Исследование) и добавьте узел **Cluster Computing** (Кластерный расчет). Узел **Cluster Computing** (Кластерный расчет) нельзя использовать вместе с **Cluster Sweep** (Кластерным параметрическим исследованием). На вопрос, следует ли удалить **Cluster Sweep**, ответьте **Yes** (Да).

Окно **Settings** (Настройки) для **Cluster Computing** (Кластерный расчет), изображенное на иллюстрации ниже, позволяет управлять настройками кластера или облака для моделирования.



В меню **Settings** (Настройки) в разделе **Cluster computing settings** (Настройки кластерных вычислений) есть два варианта: **Preferences** (Согласно общим настройкам) и **User controlled** (Настраиваются пользователем). На рисунке выше показан вариант **User controlled**. Если выбран вариант **Preferences**, настройки берутся из диалогового окна **Preferences** (Параметры и общие настройки) в меню **File** (Файл).

Для этого следует выбрать тип кластерной задачи в списке **Scheduler type** (Тип планировщика). COMSOL Multiphysics и COMSOL Server поддерживают варианты General (общий), Windows® HPC Server (HPCS) 2008/2012/2016, Open Grid Scheduler/ Grid Engine (OGS/GE), SLURM, PBS и Not distributed (нераспределенный). Вариант **General** (Общий) — универсальный вариант для

кластеров Linux®. Дополнительные настройки кластера и планировщика, например **Prepend command** (Добавить команду в начало) и **Postpend command** (Добавить команду в конец), доступны в окне **Preferences** (Параметры и общие настройки) из меню **File** (Файл).

Дополнительную информацию о параллельном выполнении см. в «Справочном руководстве (*Reference Manual*)».

- ⚠ Настройки **Cluster Sweep** (Кластерное параметрическое исследование) и **Cluster Computing** (Кластерный расчет) видны, только если у вас есть плавающая сетевая лицензия и включена опция **Advanced Study Options** (Расширенные возможности исследования).

Режим клиент-сервер (Client-Server) в COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics с плавающей сетевой лицензией (FNL) можно использовать в клиент-серверном режиме работы: доступ к удаленным вычислительным ресурсам позволяет рассчитывать большие модели, а видеокарта на локальном компьютере используется для отображения графики. (Этот режим работы не следует путать с продуктом COMSOL Server, используемым совместно с приложениями COMSOL для моделирования.)

Клиент-серверный режим работы COMSOL Multiphysics может иметь значительные преимущества, поскольку инженерные и научные вычислительные задачи подразумевают большой объем данных — во время моделирования обычно создаются мегабайты и даже гигабайты данных. Чтобы создавать и хранить эти данные, требуются компьютеры с мощными процессорами, большим объемом оперативной памяти и жесткого диска. А для визуализации больших объемов данных напротив важно наличие высокопроизводительной видеокарты на локальном компьютере.

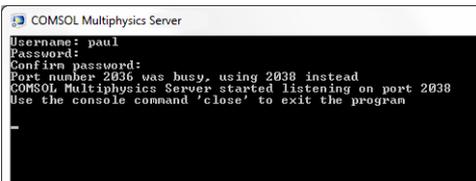
Идеально было бы всегда иметь высокопроизводительный компьютер с избытком памяти и вычислительной мощности для всех этапов моделирования. Но если это не так, а вам требуется рассчитывать модели большого размера, можно воспользоваться сетевым доступом к общим вычислительным ресурсам.

В любой момент работы с COMSOL Multiphysics вы можете подключиться к удаленному вычислительному ресурсу, используя клиент-серверный режим работы. Это выполняется в два этапа. Сначала следует подключиться к удаленной системе и вызвать сервер COMSOL Multiphysics, который запустит серверный процесс COMSOL Multiphysics и создаст сетевое

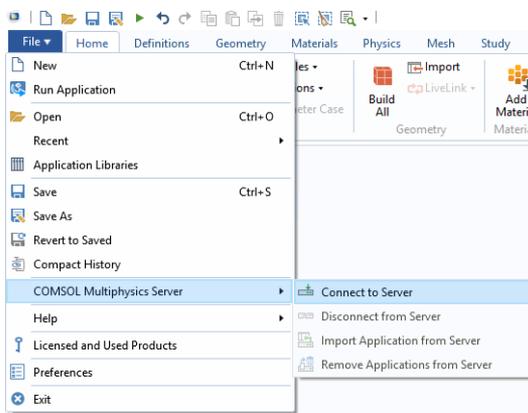
соединение. Затем на локальном компьютере следует ввести информацию о сетевом соединении в открытую сессию COMSOL Multiphysics. После этого данные модели и результаты будут передаваться по сети, а для всех вычислений будет использоваться удаленный вычислительный ресурс.

Имеется несколько способов запустить сеанс сервера COMSOL Multiphysics. В Windows® 7 можно, например, запустить сеанс сервера из начального меню в разделе **COMSOL Multiphysics 5.3 > Client-Server**. В Windows® 10 можно запустить сеанс сервера с помощью пункта **COMSOL Launchers** (Средства запуска COMSOL) в меню «Пуск» Windows. В Linux® можно использовать команду `comsol mphserver`. Сеансы клиента и сервера можно запускать в разных операционных системах. Например, сервер можно запустить в Linux®, а сеанс клиента — в Windows®.

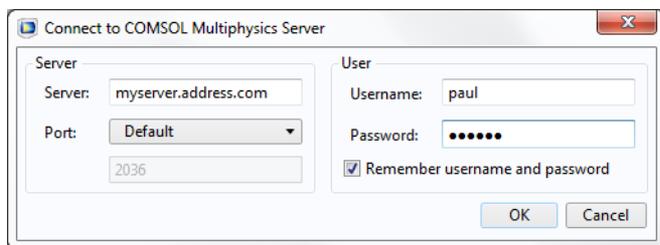
При первом запуске сервера COMSOL Multiphysics на компьютере появляется запрос на ввод имени пользователя и пароля, связанных с режимом работы «клиент-сервер», которые сохраняются для будущих соединений. На рисунке ниже показано окно команды для запуска сеанса сервера в Windows.



На рисунке ниже показано, как подключиться к сеансу сервера посредством пользовательского интерфейса COMSOL Desktop. Чтобы установить соединение, в меню **File** (Файл) выберите **COMSOL Multiphysics Server** (Сервер COMSOL Multiphysics) > **Connect to Server** (Подключиться к серверу).



После этого появится запрос на ввод имени пользователя и пароля, которые были указаны при первом запуске сеанса сервера.



Connect to COMSOL Multiphysics Server

Server

Server: myserver.address.com

Port: Default

2036

User

Username: paul

Password: ●●●●●●●

Remember username and password

OK Cancel

Более подробная информация о режиме работы «клиент-сервер» COMSOL Multiphysics приведена в «*Справочном руководстве*».

Приложение А. Построение геометрии

В этом разделе подробно рассматривается создание геометрии электрической шины с помощью встроенных в COMSOL Multiphysics геометрических инструментов. Ниже приведены пошаговые инструкции по построению геометрии на основе параметров, заданных в разделе **Global Definitions** (Глобальные определения).

Все операции с геометрией в соответствующем узле дерева модели образуют параметрическую последовательность операций, называемую геометрической последовательностью (*geometry sequence*). Используя параметризацию размеров, можно выполнять точечный *анализ методом «что, если»*, а также универсальные параметрические исследования с изменением геометрии.

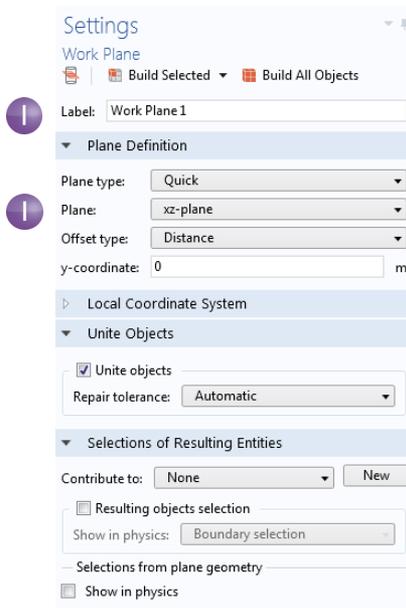
Кроме того, вместо построения геометрии средствами COMSOL Multiphysics можно импортировать геометрию, созданную в стороннем CAD-пакете. Дополнительные модули **CAD Import** (Импорт данных из CAD) и **Design** (Проектирование) поддерживают множество широко используемых CAD-форматов файлов. Кроме того, доступно несколько модулей расширения, в которых реализованы двунаправленные интерфейсы с популярными CAD-пакетами. Просмотреть их список можно в разделе «Приложение Е. Подключение модулей расширения группы LiveLink™» на стр. 201. Отметим, что в модуле **Design** (Проектирование), помимо функций, доступных в модуле **CAD Import** (Импорт данных из CAD), добавлены инструменты для проведения трехмерных геометрических операций **loft** (лофтинг), **fillet** (скругление), **chamfer** (фаска), **midsurface** (формирование срединной поверхности) и **thicken** (формирование утолщения).

Если вы еще не создавали заготовку модели, то начните с раздела «Пример 2. Электрическая шина — мультифизическая модель» на стр. 58. Выполните шаги, описанные в разделе «Model Wizard (Мастер создания моделей)» на стр. 33, чтобы добавить физические интерфейсы и исследование, а затем добавьте параметры, выполнив шаги в разделе **Global Definitions** (Глобальные определения). Затем вернитесь к этому разделу для изучения принципов отрисовки геометрии. Первый шаг в нашей геометрической последовательности — это построение профиля электрической шины.

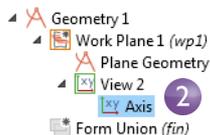
1 В разделе **Component 1** (Компонент 1) щелкните правой кнопкой мыши по **Geometry 1** (Геометрия 1)  и выберите **Work Plane**  (Рабочая плоскость). В окне **Settings** (Настройки) раздела **Work Plane** (Рабочая плоскость):

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

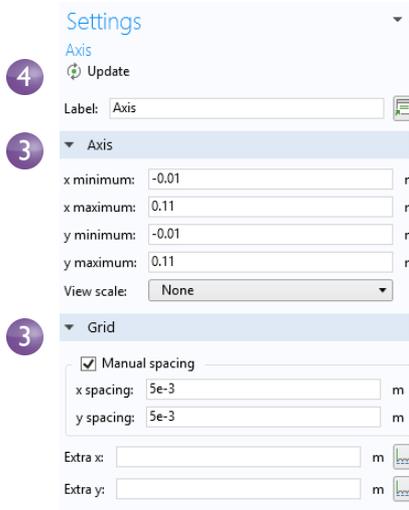
Далее измените настройки оси и сетки в **Work Plane 1**.



2 В Построителе моделей раскройте узел **View 2** (Вид 2)  и щелкните по **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** (Ручной интервал).
- В полях **x spacing** (интервал по x) и **y spacing** (интервал по y) введите 5e-3.

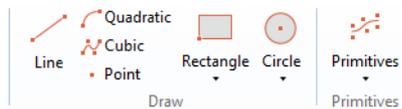
4 Нажмите кнопку **Update** (Обновить)  на панели инструментов.

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

Геометрию можно создать 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 геометрическую последовательность можно также щелкнуть по узлу **Plane Geometry** (Геометрия плоскости)  в разделе **Work Plane I** (Рабочая плоскость 1) .

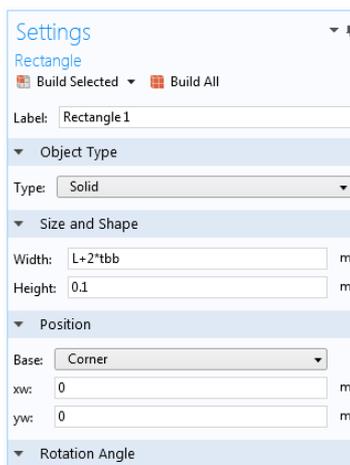
Давайте создадим профиль электрической шины.

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

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

- $L+2*tbb$ в поле **Width** (Ширина).
- $0.1 [m]$ 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 по **Plane Geometry** (Геометрия плоскости)  и выберите **Rectangle** (Прямоугольник) .

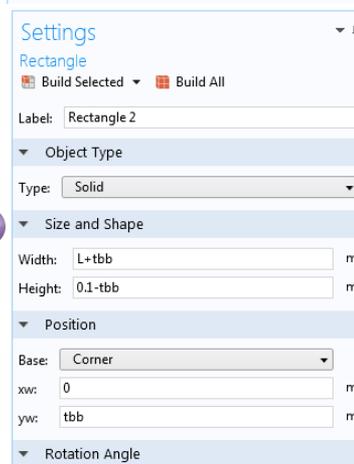
В блоке **Size** (Размер) введите:

- $L+tbb$ 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) .

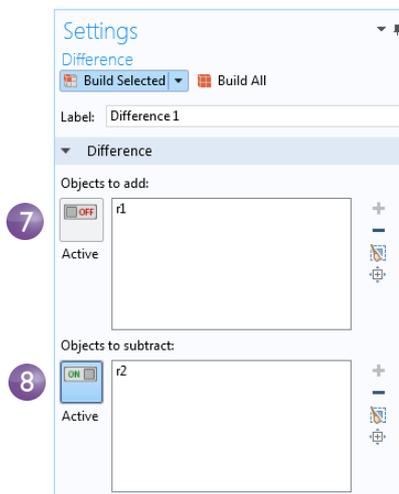


С помощью операции **Boolean Difference** (Логическая разность) вычтите второй прямоугольник из первого.

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

! Для облегчения выбора геометрии можно включить отображение меток (labels) геометрии в Графическом окне. В Построителе моделей в разделе **Geometry 1 > WorkPlane 1** (Геометрия 1 > Рабочая плоскость 1) щелкните по узлу **View 2** (Вид 2). Перейдите в окно **Settings** (Настройки) раздела **View** и установите флажок в поле **Show geometry labels** (Показывать метки геометрий).

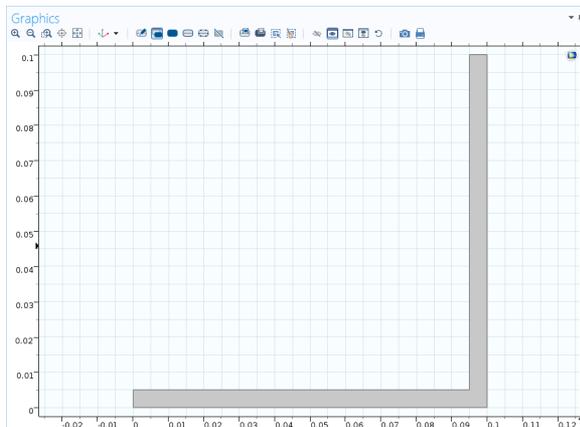
8 Щелкните по узлу **Difference** (Разность). В окне **Settings** (Настройки) узла **Difference** (Разность) нажмите кнопку **Active** (Активировать выборку) слева от списка **Objects to subtract** (Объекты для вычитания). Выберите меньший прямоугольник r2: прокрутите колесом мыши или с помощью стрелок на клавиатуре наложенные прямоугольники, чтобы подсветить его, а затем щелкните, чтобы выбрать. Нажмите **Build Selected** (Построить выбранное) .



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

В результате построения выбранной геометрии у вас должен получиться угловой профиль (L-профиль), повернутый обратной стороной. Теперь скруглим углы углового профиля.

8



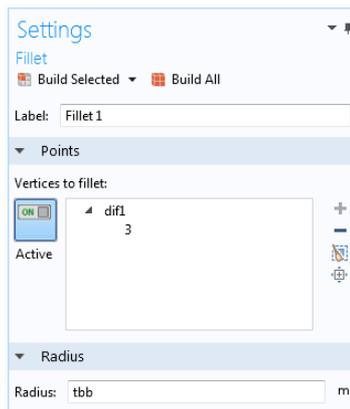
9 В разделе **Work Plane 1** (Рабочая плоскость 1) щелкните правой кнопкой мыши по **Plane Geometry** (Геометрия плоскости)  и выберите **Fillet** (Скругление/Галтель) .

В Графическом окне щелкните по точке 3 (в правом внутреннем углу), чтобы добавить ее в список **Vertices to fillet** (Вершины для скругления). Точки можно добавлять несколькими способами:

- В Графическом окне щелкните по точке 3, чтобы добавить ее в список **Vertices to fillet** (Вершины для скругления).

- На вкладке **Home** (Главная) выберите **Windows > Selection List** (Окна > Список для выборки). В окне **Selection List** (Список для выборки) щелкните по 3. В Графическом окне подсвечивается соответствующая точка. Нажмите кнопку **Add to Selection** (Добавить в выборку)  в окне **Settings** (Настройки) раздела **Fillet** (Скругление/Галтель) или щелкните правой кнопкой мыши в **Selection List** (Список для выборки).

9



10

10 Введите **tbb** в поле **Radius** (Радиус).

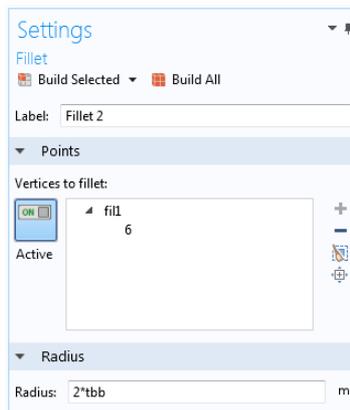
Нажмите **Build Selected** (Построить выбранные) .

Таким образом, создается галтель/скругление во внутреннем углу.

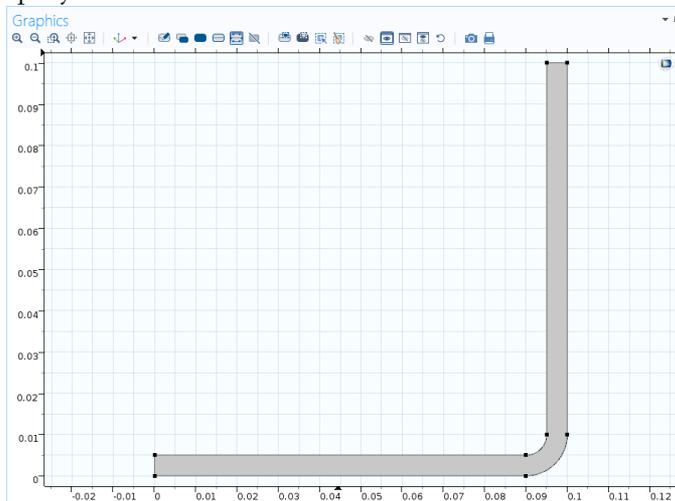
11 Для внешнего угла щелкните правой кнопкой мыши по **Plane Geometry** (Геометрия плоскости)  и выберите **Fillet** (Скругление/Галтель) .

12 В Графическом окне щелкните по точке 6 во внешнем угле, чтобы добавить ее в список **Vertices to fillet** (Вершины для скругления).

13 Введите $2 \cdot t_{bb}$ в поле **Radius** (Радиус). Нажмите **Build Selected** (Построить выбранное) .

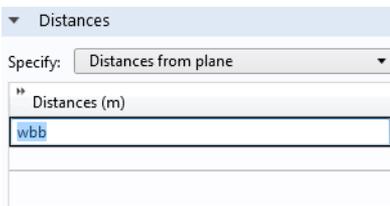


Геометрия должна совпадать с той, что изображена на рисунке.



Далее следует «протянуть» рабочую плоскость, чтобы получить трехмерную геометрию электрической шины.

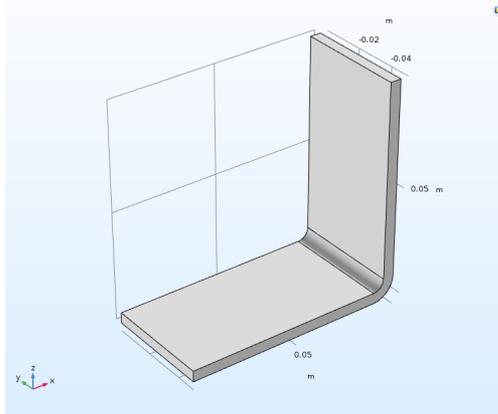
1 В Построителе моделей щелкните правой кнопкой мыши по **Work Plane 1** (Рабочая плоскость 3)  и выберите операцию **Extrude** (Протяжка) . В окне **Settings** (Настройки) для **Extrude** (Протяжка) введите w_{bb} в таблице **Distances from Plane** (Расстояния от плоскости) вместо значения по умолчанию, чтобы протянуть плоскость на ширину профиля.



В таблице можно вводить несколько значений, чтобы создавать многослойные структуры, например из различных материалов. Для данного случая достаточно одного слоя.

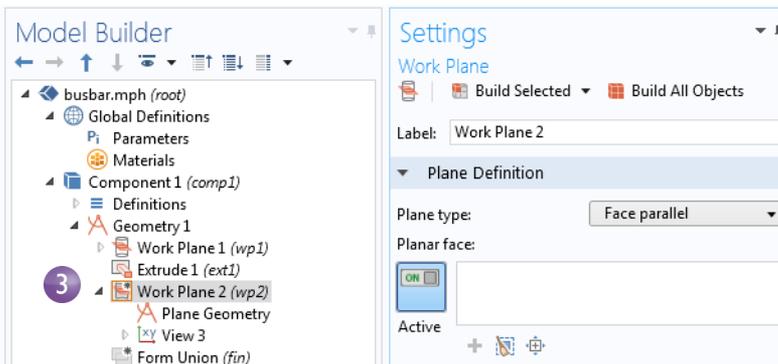
2 Нажмите **Build Selected**

(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, протянув две окружности на двух рабочих плоскостях.

3 В Построителе моделей щелкните правой кнопкой мыши по **Geometry 1** (Геометрия 1) и добавьте **Work Plane** (Рабочую плоскость) . Добавится узел **Work Plane 2** (Рабочая плоскость 2). В окне **Settings** (Настройки) для **Work Plane** (Рабочая плоскость) в разделе **Plane Definition** (Определение плоскости) выберите **Face parallel** (Параллельно поверхности) из списка **Plane type** (Тип плоскости).



4 В Графическом окне щелкните по поверхности 8, как показано на иллюстрации ниже, чтобы добавить ее в список **Planar face** (Плоская поверхность) в окне **Settings** (Настройки) для **Work Plane** (Рабочая плоскость).

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

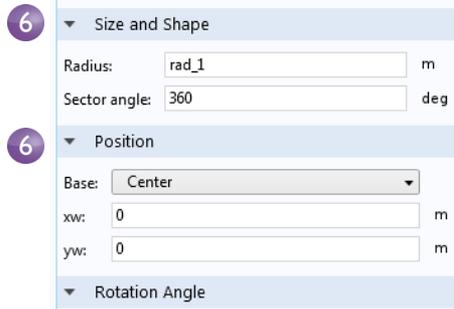
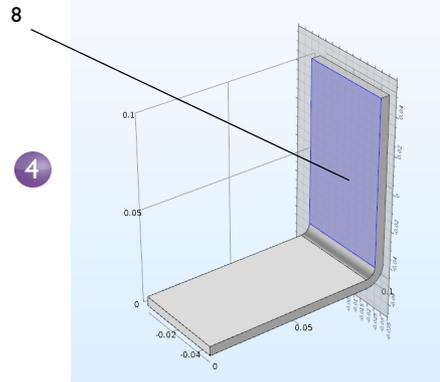
- 5 Нажмите кнопку **Show Work Plane** (Показать рабочую плоскость) , чтобы построить первую окружность там, где будет находиться первый болт. Нажмите кнопку **Zoom Extents** (Масштаб сцены)  на панели инструментов **Graphics** (Графика).

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

В окне **Settings** (Настройки) для **Circle** (Окружность):

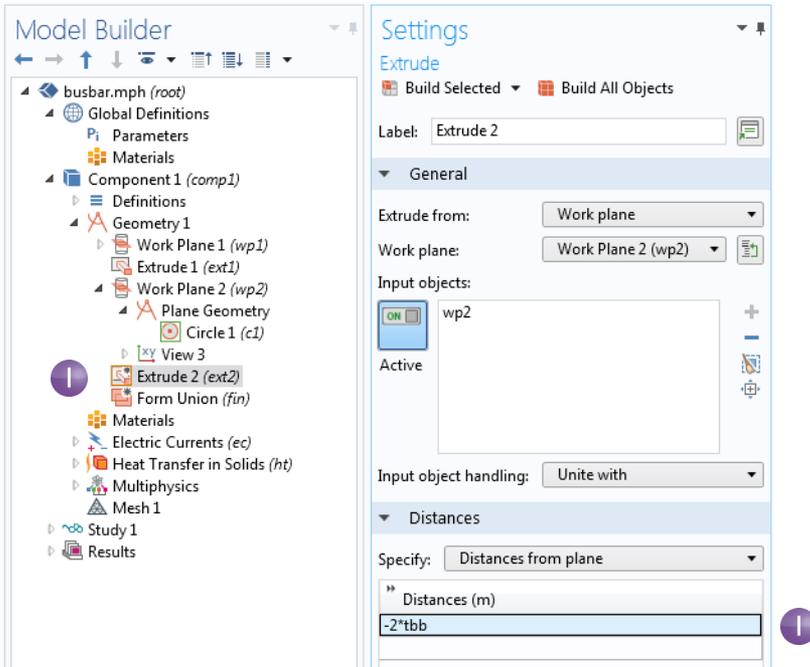
- В разделе **Size and Shape** (Размер и форма) в поле **Radius** (Радиус) введите `rad_1`.
- В разделе **Position** (Положение) оставьте координаты **xw** и **yw** по умолчанию `(0, 0)`.

Нажмите **Build Selected**  (Построить выбранные).

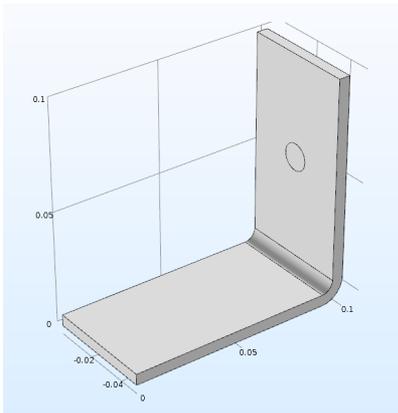


Для продолжения создания болта добавим операцию протяжки **Extrude** (Протяжка).

- 1 В Построителе моделей щелкните правой кнопкой мыши по **Work Plane 2** (Рабочая плоскость 2)  и выберите **Extrude** (Протяжка) . В окне **Settings** (Настройки) для **Extrude** в первой строке таблицы **Distances from Plane** (Расстояния от плоскости) введите `-2*tbb`, чтобы протянуть окружность.

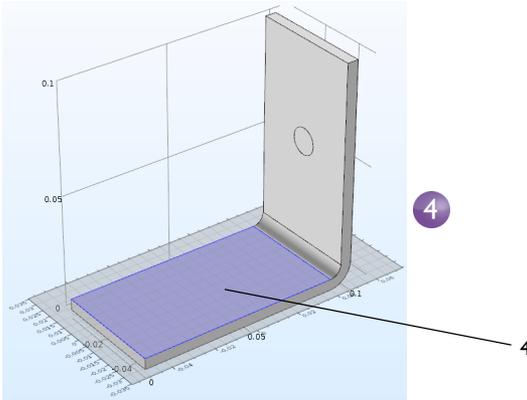


2 Нажмите кнопку **Build Selected** (Построить выбранные) , чтобы создать цилиндрическую часть титанового болта, проходящего сквозь электрическую шину.



Постройте остальные два болта.

- Щелкните правой кнопкой мыши по **Geometry 1** (Геометрия 1)  и выберите **Work Plane** (Рабочая плоскость) . Добавится узел **Work Plane 3** (Рабочая плоскость 3). В окне **Settings** (Настройки) для **Work Plane** (Рабочая плоскость), **Work Plane 3**, выберите **Face parallel** (Параллельно поверхности) из списка **Plane type** (Тип плоскости).
- В Графическом окне щелкните по поверхности 4, как показано на иллюстрации, чтобы добавить ее в список **Planar face** (Плоская поверхность) в окне **Settings** (Настройки) для **Work Plane** (Рабочая плоскость).



- Нажмите кнопку **Show Work Plane** (Показать рабочую плоскость)  в окне **Settings** (Настройки) для **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, образующие поперечные сечения болтов.

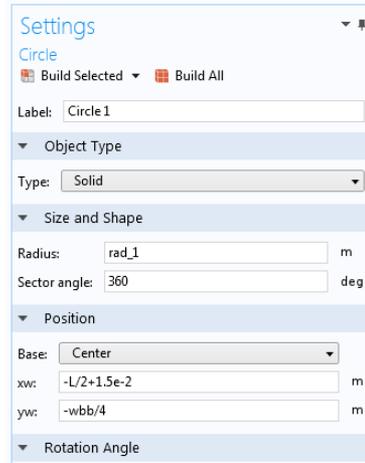
- В разделе **Work Plane 3** (Рабочая плоскость 3) щелкните правой кнопкой мыши по **Plane Geometry** (Геометрия плоскости)  и выберите **Circle** (Окружность) .

В окне **Settings** (Настройки) для **Circle** (Окружность):

- В разделе **Size and Shape** (Размер и форма) введите rad_1 в поле **Radius** (Радиус).
- В разделе **Position** (Положение) введите $-L/2+1.5[cm]$ в поле **xw** и $-wbb/4$ в поле **yw**.

Нажмите **Build Selected** (Построить выбранное) .

Скопируйте только что созданную окружность, чтобы сформировать третий болт электрической шины.

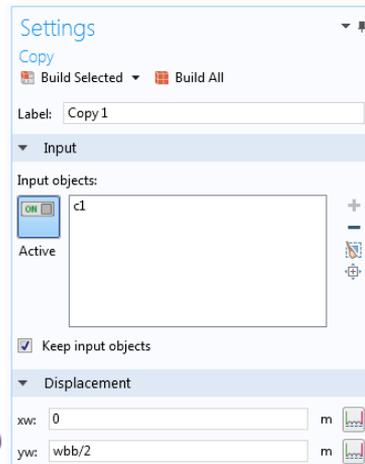


7 В разделе **Work Plane 3** (Рабочая плоскость 3) щелкните правой кнопкой мыши по **Plane Geometry** (Геометрия плоскости)  и выберите **Transforms > Copy** (Преобразования > Копирование) .

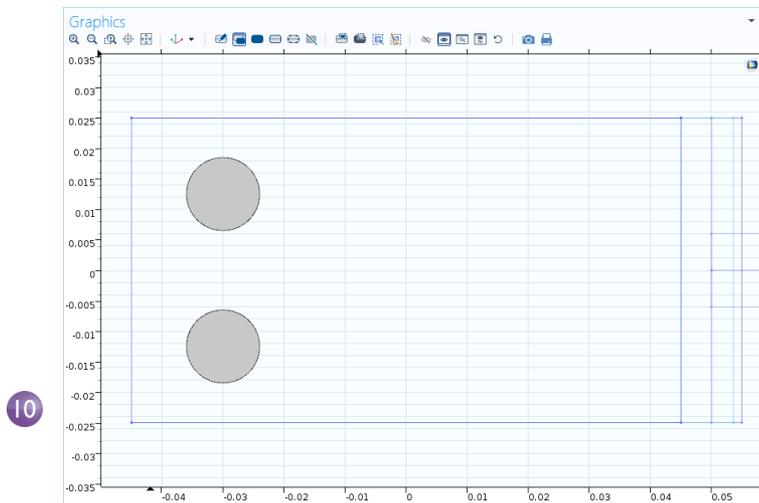
8 В Графическом окне щелкните по окружности c1, чтобы выбрать ее и добавить в список **Input objects** (Входные объекты) в окне **Settings** (Настройки) для **Copy** (Копировать).

9 В окне **Settings** (Настройки) для **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).

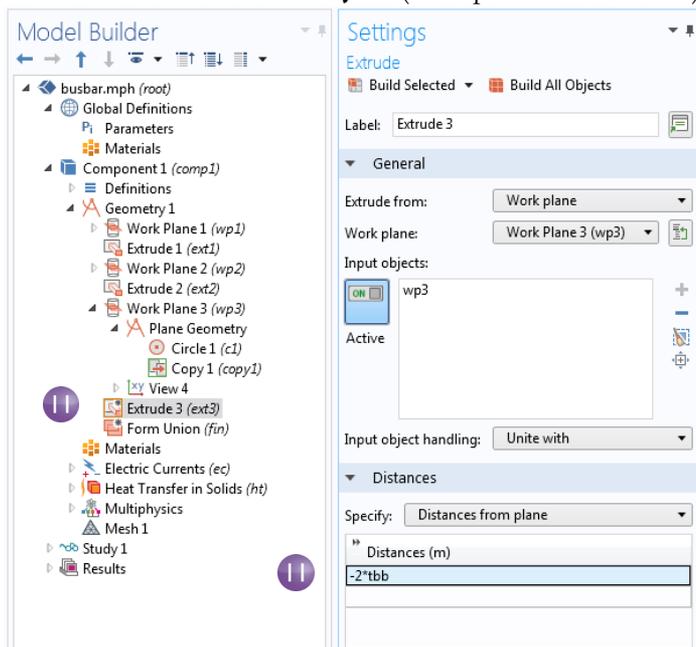


Геометрия, показанная в рабочей плоскости, должна выглядеть, как на этой иллюстрации.

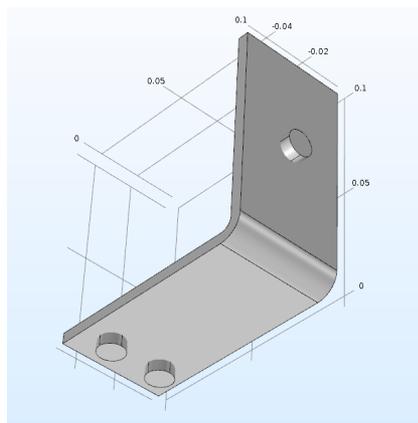
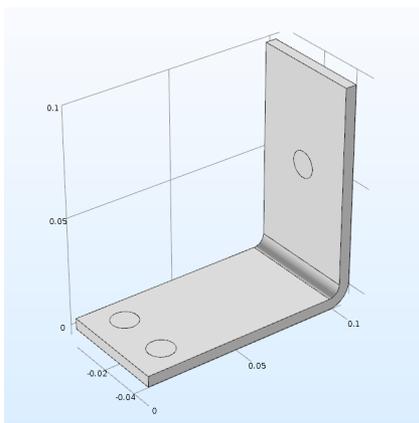


Далее следует протянуть окружности.

11 В Построителе моделей щелкните правой кнопкой мыши по **Work Plane 3** (Рабочая плоскость 3) и выберите **Extrude** (Протяжка). В окне **Settings** (Настройки) для **Extrude** (Протяжка) 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 соответствующая ей геометрическая последовательность должны выглядеть аналогично иллюстрациям ниже. Нажмите кнопку **Save** (Сохранить) и сохраните модель под именем **busbar.mph**.



Создание геометрических заготовок и использование библиотек геометрических заготовок

После настройки электрической шины или другой геометрии иногда полезно сохранить ее, чтобы при необходимости использовать в будущем.

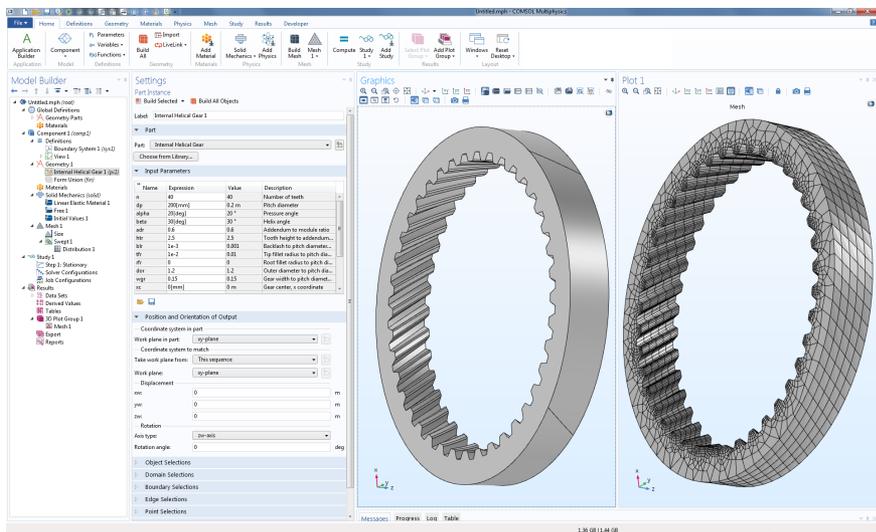
В рассмотренных нами примерах геометрия сохранялась прямо в файле модели COMSOL, который затем используется непосредственно для решения задачи моделирования электрической шины. Вместо этого можно создать параметризованную заготовку (т. н. part) для многократного использования, которая будет храниться в отдельном файле, доступном в **Part Libraries** (Библиотеки геометрических заготовок), 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** (Геометрические заготовки) находится в группе **Other** (Прочие) на этих же вкладках.



С помощью меню **Parts** (Геометрические заготовки) можно создать или загрузить часть, а также добавить ее из **Part Libraries** (Библиотеки геометрических заготовок) в геометрию модели. По умолчанию в систему уже встроены несколько **Part Libraries** (Библиотеки геометрических заготовок). Заготовки, созданные пользователем, добавляются в родительский узел **Parts** (Геометрические заготовки) в разделе **Global Definitions** (Глобальные определения) дерева модели.

На рисунке ниже показана заготовка **Internal Helical Gear** (Шестерня с внутренними косыми зубьями) из библиотеки геометрических заготовок для модуля **Multibody Dynamics** (Динамика многотельных структур). Для нее доступно 18 входных параметров, которые определяют ее размеры.



Дополнительную информацию о работе с частями и библиотеками частей см. в «Справочном руководстве».



Чтобы продолжить изучение учебной модели электрической шины, вернитесь в раздел «Materials (Материалы)» на стр. 69.

Приложение В. Сочетания клавиш и действия мышью

Следующие сочетания клавиш применимы в основном к **Model Builder** (Построителю моделей) и окну **Graphics** (Графическому окну). О том, как и какие сочетания клавиш использовать в **Application Builder** (Среде разработки приложений), читайте в руководстве «*Введение в Среду разработки приложений*».

СОЧЕТАНИЕ КЛАВИШ (WINDOWS, LINUX)	СОЧЕТАНИЕ КЛАВИШ (MACOS)	ДЕЙСТВИЕ
F1 (Fn+F1 на некоторых устройствах)	F1	Отобразить 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 каталог
F3	F3	Отключить выбранные узлы
F4	F4	Включить выбранные узлы
F5	F5	Обновить решение и соответствующие ему наборы данных с учетом всех новых определений (Global Definitions и Definitions) без полного перерасчета модели
F6	F6	Построить предыдущий узел в ветке геометрии или построить предыдущий график для решения во временной области, анализа на собственные частоты или собственные значения.
F7	F7	Построить выбранный узел в ветках геометрии и сетки, рассчитать выбранный шаг исследования, узел в последовательности решателя или построить следующий график для решения во временной области, анализа на собственные частоты или собственные значения.

СОЧЕТАНИЕ КЛАВИШ (WINDOWS, LINUX)	СОЧЕТАНИЕ КЛАВИШ (MACOS)	ДЕЙСТВИЕ
F8	F8	Построить геометрию, построить сетку, рассчитать всю последовательность решателя, обновить результаты, обновить график или выполнить вызов макроса.
Del	Del	Удалить выбранные узлы или объекты
Стрелка влево (Windows); Shift + стрелка влево (Linux)	Стрелка влево	Свернуть ветку в дереве модели
Стрелка вправо (Windows); Shift + стрелка вправо (Linux)	Стрелка вправо	Развернуть ветку 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
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 или объекты
Ctrl + D	Command + D	Сбросить выделение областей, границ, граней или точек
Ctrl + Shift + D	Command + Shift + D	Дублировать выбранный узел в дереве модели
Ctrl + F	Command + F	Поиск по строке
Ctrl + G	Command+G	Сгруппировать узлы
Ctrl + Shift + G	Command + Shift + G	Разгруппировать узлы
Ctrl + K	Command + K	Создать ярлык для использования в Application Builder (Среде разработки приложений)
Ctrl + L	Command + L	Сохранить снимок изображения
Ctrl + N	Command + N	Новая модель
Ctrl + O	Command + O	Открыть файл модели

СОЧЕТАНИЕ КЛАВИШ (WINDOWS, LINUX)	СОЧЕТАНИЕ КЛАВИШ (MACOS)	ДЕЙСТВИЕ
Ctrl + P	Command + P	Распечатать содержимое окна для графика
Ctrl + S	Command + S	Сохранить файл модели
Ctrl + V	Command + V	Вставить скопированный текст или объект
Ctrl + X	Command + X	Вырезать скопированный текст или объект
Ctrl + Y	Ctrl + Shift + Z	Повторить последнюю отмененную операцию
Ctrl + Z	Command + Z	Отменить последнюю операцию
Ctrl + стрелка вверх	Command + стрелка вверх	Поднять на один шаг вверх узел определений, узел геометрии, узел в физическом интерфейсе (кроме узлов по умолчанию), узел материала, узел сетки, узел шага исследования или узел результатов
Ctrl + стрелка вниз	Command + стрелка вниз	Опустить на один шаг вниз узел определений, узел геометрии, узел в физическом интерфейсе (кроме узлов по умолчанию), узел материала, узел сетки, узел шага исследования или узел результатов
Ctrl + Tab	Ctrl + Tab	Переключиться в следующее окно рабочего стола
Ctrl + Shift + Tab	Ctrl + Shift + Tab	Переключиться в предыдущее окно рабочего стола
Ctrl + Alt + A	Не доступно	Перейти в Application Builder (Среду разработки приложений)
Ctrl + Alt + M	Не доступно	Перейти в Model Builder (Построитель моделей)
Ctrl + Alt + стрелка влево	Command + Alt + стрелка влево	Переключиться в окно Построителя моделей
Ctrl + Alt + стрелка вправо	Command + Alt + стрелка вправо	Переключиться в окно Settings (Настройки)
Ctrl + Alt + стрелка вверх	Command + Alt + стрелка вверх	Переключиться в предыдущий раздел окна Settings (Настройки)

СОЧЕТАНИЕ КЛАВИШ (WINDOWS, LINUX)	СОЧЕТАНИЕ КЛАВИШ (MACOS)	ДЕЙСТВИЕ
Ctrl + Alt + стрелка вниз	Command + Alt + стрелка вниз	Переключиться в следующий раздел окна Settings (Настройки)
Ctrl + F4	Command + W	Закрывать активное окно программной среды COMSOL Desktop, если это возможно
Shift + F10 или (только Windows) клавиша меню	Ctrl + F10	Открыть контекстное меню
Ctrl + пробел или Ctrl + /	Ctrl + пробел	Открыть список заранее определенных величин для вставки в поля Expression (Выражение)
Зажать левую кнопку мыши и потянуть 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
Зажать правую кнопку мыши и потянуть указатель, не отпуская кнопку.	Аналогично Windows; доступно только для двухкнопочной мыши.	Передвинуть видимую рамку на плоскости изображения в произвольном направлении
Зажать среднюю кнопку мыши вне модели и потянуть указатель, не отпуская кнопку.	Аналогично Windows; доступно только для двухкнопочной мыши.	Приблизить/удалить сцену вокруг позиции указателя мыши, из которой началось движение
Зажать Ctrl и левую кнопку мыши. Потянуть указатель мыши, удерживая клавишу и кнопку.	Аналогично Windows; доступно только для двухкнопочной мыши.	Наклонять и панорамировать камеру, вращая ее вокруг осей X и Y в плоскости изображения
Зажать Ctrl и правую кнопку мыши. Потянуть указатель мыши, удерживая клавишу и кнопку.	Аналогично Windows; доступно только для двухкнопочной мыши.	Перемещать камеру в плоскости, параллельной плоскости изображения

СОЧЕТАНИЕ КЛАВИШ (WINDOWS, LINUX)	СОЧЕТАНИЕ КЛАВИШ (MACOS)	ДЕЙСТВИЕ
Зажать Ctrl и среднюю кнопку мыши. Переместить указатель мыши, удерживая клавишу и кнопку.	Аналогично Windows; доступно только для двухкнопочной мыши.	Перемещать камеру к объекту и от него (эффект наезжающей/отъезжающей камеры)
Зажать Ctrl и среднюю кнопку мыши.	Аналогично Windows; доступно только для двухкнопочной мыши.	Показать крупным планом изображение части модели вокруг точки, в которой находится указатель мыши
Нажать Ctrl + Alt и левую кнопку мыши. Переместить указатель мыши, удерживая клавиши и кнопку.	Аналогично Windows; доступно только для двухкнопочной мыши.	Повернуть камеру вокруг оси
Нажать Alt и левую кнопку мыши. Переместить указатель мыши, удерживая клавишу и кнопку.	Аналогично Windows; доступно только для двухкнопочной мыши.	Повернуть камеру вокруг ее оси, проходящей через камеру и точку вращения сцены (эффект крена)
Нажать Alt и правую кнопку мыши. Переместить указатель мыши, удерживая клавишу и кнопку.	Аналогично Windows; доступно только для двухкнопочной мыши.	Переместить сцену в плоскости, ортогональной оси, проходящей через камеру и точку вращения сцены
Нажать Alt и среднюю кнопку мыши. Переместить указатель мыши, удерживая клавишу и кнопку.	Аналогично Windows; доступно только для двухкнопочной мыши.	Переместить камеру по ее оси, проходящей через камеру и точку вращения сцены
Клик средней кнопкой мыши по модели.	Аналогично Windows; доступно только для двухкнопочной мыши.	Установить центр вращения

СОЧЕТАНИЕ КЛАВИШ (WINDOWS, LINUX)	СОЧЕТАНИЕ КЛАВИШ (MACOS)	ДЕЙСТВИЕ
Нажать клавишу X, Y или Z и левую кнопку мыши. Переместить указатель мыши, удерживая клавишу и кнопку.	Аналогично Windows; доступно только для двухкнопочной мыши.	Поворот вокруг оси X, Y или Z соответственно
R	R	Переключение между выбранным вручную и автоматическим центром вращения

Приложение С. Элементы языка и зарезервированные имена

Построение дерева модели в COMSOL эквивалентно графическому программированию последовательности операций. С помощью функции **Record Code** (Записать код) в **Application Builder** (Среде разработки приложений) или путем сохранения файла модели для MATLAB® или Java® можно получить последовательность операций в виде списка традиционного скрипта и строчек кода. В этом разделе рассмотрены следующие категории элементов языка, используемого программным обеспечением COMSOL:

- **Constants** (Константы)
- **Variables** (Переменные)
- **Functions** (Функции)
- **Operators** (Операторы)
- **Expressions** (Выражения)

Эти элементы языка могут быть встроенными или определяемыми пользователем. Операторы не могут определяться пользователем. Выражения всегда определяются пользователем.

ЗАРЕЗЕРВИРОВАННЫЕ ИМЕНА

Имена встроенных элементов зарезервированы и поэтому недоступны для переопределения пользователем. 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 *Programming Reference Manual* («Справочном руководстве по программированию») и *Application Programming Guide* («Руководстве по программированию приложений»).

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 могут

быть определены 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

В Построителе моделей доступно три вида констант: 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 встроенные математические и числовые константы, а также встроенные физические константы. Константы и параметры могут иметь размерность.

ВСТРОЕННЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ И ЧИСЛОВЫЕ КОНСТАНТЫ

ОПИСАНИЕ	НАЗВАНИЕ	ЗНАЧЕНИЕ
Относительная погрешность чисел с плавающей запятой для чисел двойной точности — так называемое «машинное эпсилон»	<code>eps</code>	2^{-52} ($\sim 2.2204 \cdot 10^{-16}$)
Мнимая единица	<code>i, j</code>	<code>i, sqrt(-1)</code>
Бесконечность, ∞	<code>inf, Inf</code>	Значение, которое слишком велико для представления в формате с плавающей запятой
Нечисловое значение	<code>NaN, nan</code>	Неопределенное или непредставимое значение, например, результат операций <code>0/0</code> или <code>inf/inf</code>
π	<code>pi</code>	3.141592653589793

ВСТРОЕННЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ КОНСТАНТЫ

ОПИСАНИЕ	НАЗВАНИЕ	ЗНАЧЕНИЕ
Ускорение свободного падения	<code>g_const</code>	9.80665[m/s ²]
Постоянная Авогадро	<code>N_A_const</code>	6.02214129e23[1/mol]
Постоянная Больцмана	<code>k_B_const</code>	1.3806488e-23[J/K]
Характеристический импеданс вакуума (импеданс свободного пространства)	<code>Z0_const</code>	376.73031346177066[ohm]
Масса электрона	<code>me_const</code>	9.10938291e-31[kg]
Заряд электрона	<code>e_const</code>	1.602176565e-19[C]
Постоянная Фарадея	<code>F_const</code>	96485.3365[C/mol]
Постоянная тонкой структуры	<code>alpha_const</code>	7.2973525698e-3
Гравитационная постоянная	<code>G_const</code>	6.67384e-11[m ³ /(kg*s ²)]
Молярный объем идеального газа (при 273,15 К и 1 атм)	<code>V_m_const</code>	2.2413968e-2[m ³ /mol]
Масса нейтрона	<code>mn_const</code>	1.674927351e-27[kg]
Магнитная проницаемость вакуума (магнитная постоянная)	<code>mu0_const</code>	4*pi*1e-7[H/m]
Диэлектрическая проницаемость вакуума (электрическая постоянная)	<code>epsilon0_const</code>	8.854187817000001e-12[F/m]
Постоянная Планка	<code>h_const</code>	6.62606957e-34[J*s]
Постоянная Планка, деленная на 2 pi	<code>hbar_const</code>	1.05457172533629e-34[J*s]
Масса протона	<code>mp_const</code>	1.672621777e-27[kg]
Скорость света в вакууме	<code>c_const</code>	299792458[m/s]
Постоянная Стефана — Больцмана	<code>sigma_const</code>	5.670373e-8[W/(m ² *K ⁴)]
Универсальная газовая постоянная	<code>R_const</code>	8.3144621[J/(mol*K)]
Постоянная закона смещения Вина	<code>b_const</code>	2.8977721e-3[m*K]

PARAMETERS (ПАРАМЕТРЫ)

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

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

Параметр можно объявить в виде выражения, содержащего числа, другие параметры, встроенные константы, встроенные функции от параметров и встроенные константы. В квадратных скобках [] желательно указывать размерность параметра, за исключением безразмерных параметров.

Variables (Переменные)

В Построителе моделей используются переменные двух типов: встроенные и пользовательские. Переменные могут быть скалярными или полевыми. Переменные могут иметь размерность.

Примечание. Переменные пространственных координат и зависимые от них переменные, определяемые пользователем, представляют особый интерес. Имена по умолчанию для этих переменных отражают размерность пространства геометрии и физического интерфейса соответственно. На основе имен, выбранных для этих переменных, COMSOL Multiphysics создает список встроенных переменных — производных первого и второго порядков по пространственным координатам и времени.

ВСТРОЕННЫЕ ПЕРЕМЕННЫЕ

НАЗВАНИЕ	ОПИСАНИЕ	ТИП
curv	Кривизна границы в 2D	Полевая
curv1, curv2	Компоненты главной кривизны границы в 3D	Полевая
dom	Номер области для области, границы, грани или точки	Полевая
dvol	Переменная для коэффициента масштабирования по объему; это определитель Якобиана для преобразования локальных координат (координат элемента) в глобальные.	Полевая
freq	Частота	Глобальная переменная
h	Размер элемента сетки (длина самой длинной грани элемента)	Полевая
lambda	Собственное значение	Глобальная переменная
linearizedelem	Элементы, которым принудительно присваивается свойство линейности	Полевая
numberofdofs	Число степеней свободы	Глобальная переменная
meshtype	Индекс типа сетки для элемента сетки; равен числу граней в элементе	Полевая
meshelement	Номер элемента сетки	Полевая
meshvol	Объем (линеаризованного) элемента	Полевая
nx, ny, nz	Нормали для границ	Полевая
phase	Фазовый угол	Глобальная переменная
qual	Качество сетки	Полевая
realdetjac	Определитель Якобиана для преобразования прямого элемента сетки в потенциально изогнутый элемент в процессе решения. С помощью этой переменной можно измерить разницу между формой изогнутого элемента и соответствующего прямого.	Полевая

<code>realdetjacmin</code>	Скалярная полевая переменная для каждого элемента, определяемая как минимальное значение переменной <code>realdetjac</code> для соответствующего элемента. Нулевое значение переменной <code>realdetjacmin</code> указывает на то, что данный элемент «вывернут наизнанку», то есть является инвертированным элементом.	Полевая
<code>s, s1, s2</code>	Переменные для определения параметрических кривых и поверхностей	Полевая
<code>t</code>	Время	Глобальная переменная
<code>tcurvx, tcurvy, tcurv1x, curv1y, tcurv1z, tcurv2x, tcurv2y, tcurv2z</code>	Касательные направления для соответствующих переменных кривизны	Полевая
<code>tx, ty, t1x, t1y, t1z, t2x, t2y, t2z</code>	Составляющие касательного вектора для параметрических кривых и поверхностей	Полевая
<code>qual</code>	Мера качества сетки: от 0 (низкое качество) до 1 (идеальное качество)	Полевая

ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИЕ ПЕРЕМЕННЫЕ, ПОРОЖДАЮЩИЕ ВСТРОЕННЫЕ ПЕРЕМЕННЫЕ

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

Пример: Пусть `T` – имя переменной для температуры в двухмерной модели теплопередачи, зависящей от времени, `x` и `y` – имена пространственных координат. В этом случае будут созданы следующие встроенные переменные: `T, Tx, Ty, Txx, Txy, Tux, Tyy, Tt, Txt, Tyt, Txxt, Txyt, Tuxt, Tuut, Ttt, Txtt, Tytt, Txxtt, Txytt, Tuxt, Tuutt`. Здесь `Tx` соответствует частной производной температуры `T` по `x`, а `Ttt` соответствует производной второго порядка от `T` и так далее. Если пространственным координатам назначены другие имена, например `psi` и `chi` — то `Txy` станет `Trpsichi`, а `Txt` станет `Trpsit`. (Переменная времени `t` является встроенной; пользователь не может изменить ее имя.)

Functions (Функции)

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

ВСТРОЕННЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ

Входные и выходные аргументы этих функций не имеют размерности.

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

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

ВСТРОЕННЫЕ ОПЕРАТОРЫ

Эти встроенные операторы работают не так, как встроенные математические функции. Они могут не упоминаться во вводном тексте, но приведены здесь, чтобы список зарезервированных имен был полным. Дополнительную информацию см. в «Справочном руководстве».

НАЗВАНИЕ	НАЗВАНИЕ	НАЗВАНИЕ	НАЗВАНИЕ
adj	dtang	mean	timeavg
at	emetric	noenv	timeint
atlocal	env	nox	timemax
attimemax	error	pd	timemin
attimemin	fsens	ppr	treatasconst
atxd	fsensimag	pprint	try_catch
atonly	if	prev	uflux
ballavg	integrate	reacf	up
ballint	isdefined	realdot	var
bdf	isinf	residual	with
bndenv	islinear	scope.atenti	withsol
centroid	isnan	scope.ati	
circavg	jacdepends	sens	
circint	lindev	setconst	
circumcenter	linper	setind	
d	linpoint	setval	
depends	linsol	shapeorder	
dest	lintotal	side	
dflux	lintotalavg	sphavg	
diskavg	lintotalpeak	sphint	
diskint	lintotalrms	subst	
down	linzero	sum	
dtang	nojac	test	

ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИЕ ФУНКЦИИ

Пользовательскую функцию можно задать в дереве модели в узле **Global Definitions** (Глобальные определения) или для каждого параметра **Component** (Компонент) в узле **Definitions** (Определения). Выберите шаблон в меню **Functions** (Функции) и укажите параметры, чтобы задать имя и точную форму функции.

ИМЯ ШАБЛОНА	АРГУМЕНТЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ	ПРИМЕР СИНТАКСИСА
Analytic (Аналитическая функция)	Имя функции является ее идентификатором, например, an1 . Функция задана математическим выражением с аргументами. Пример: Для аргументов x и y функция принимает вид sin(x)*cos(y) . У функции может быть произвольное количество аргументов.	При использовании записывается имя функции с аргументами через запятую в круглых скобках. Пример: an1(x,y)
Elevation (Профиль высоты)	Имя функции является ее идентификатором, например, elev1 . Служит для импорта геопространственных данных о профиле высоты из цифровых моделей профиля высоты (digital elevation models — DEM), а также для преобразования этих данных в функцию от x и y . DEM-файл содержит данные о профиле высоты участка земной поверхности. Полученная функция ведет себя аналогично интерполяционной функции по пространственной сетке.	При использовании записывается имя функции с аргументами через запятую в круглых скобках. Пример: elev1(x,y)

ИМЯ ШАБЛОНА	АРГУМЕНТЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ	ПРИМЕР СИНТАКСИСА
Gaussian Pulse (Колоколообразный импульс)	<p>Имя функции является ее идентификатором, например, gp1.</p> <p>Gaussian pulse (Колоколообразный импульс) представляет собой колоколообразную кривую и определяется выражением</p> $y(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}}$ <p>Она задается параметром среднего значения x_0 и среднеквадратическим отклонением σ.</p> <p>Функция имеет один аргумент.</p>	<p>При использовании записывается имя функции с одним аргументом в круглых скобках. Пример:</p> <p>gp1 (x)</p>
Image (Изображение)	<p>Имя функции является ее идентификатором, например, im1.</p> <p>Служит для импорта изображений форматов BMP, JPEG, PNG и GIF, а также для преобразования данных RGB изображения в выходное значение скалярной (одноканальной) функции. По умолчанию для выходного значения функции используется преобразование (R+G+B)/3.</p>	<p>При использовании записывается имя функции с аргументами через запятую в круглых скобках. Пример:</p> <p>im1 (x, y)</p>
Interpolation (Интерполяция)	<p>Имя функции является ее идентификатором, например, int1.</p> <p>Интерполяционная функция определяется таблицей или файлом, содержащим значения функции в отдельных точках.</p> <p>Поддерживаются следующие форматы файлов: электронная таблица, сетка и сечения.</p> <p>У функции может быть от одного до трех аргументов.</p>	<p>При использовании записывается имя функции с аргументами через запятую в круглых скобках. Пример:</p> <p>int1 (x, y, z)</p>

ИМЯ ШАБЛОНА	АРГУМЕНТЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ	ПРИМЕР СИНТАКСИСА
Piecewise (Кусочная функция)	Имя функции является ее идентификатором, например, pw1 . Кусочная функция создается из кусков нескольких функций, каждая из которых задана на своем интервале. Определяется аргумент, методы экстраполяции и сглаживания, а также функции и их интервалы. У этой функции может быть один аргумент с различными значениями на разных интервалах, которые не могут пересекаться или иметь разрывы между собой.	При использовании записывается имя функции с одним аргументом в круглых скобках. Пример: pw1 (x)
Ramp (Линейно нарастающая функция)	Имя функции является ее идентификатором, например, rm1 . Линейно нарастающая функция — это линейная функция, которая в определенный момент времени начинает линейно нарастать с крутизной, заданной пользователем. Функция имеет один аргумент. Также ее можно сгладить.	При использовании записывается имя функции с одним аргументом в круглых скобках. Пример: rm1 (x)
Random (Случайная функция)	Имя функции является ее идентификатором, например, rn1 . Случайная функция создает белый шум с равномерным или нормальным распределением и может иметь один или несколько аргументов для моделирования белого шума. У функции произвольное количество аргументов.	При использовании записывается имя функции с аргументами через запятую в круглых скобках. Пример: rn1 (x , y) Аргументы x и y служат начальными числами для случайной функции.
Rectangle (Прямоугольная функция)	Имя функции является ее идентификатором, например, rect1 . Прямоугольная функция равна 1 на интервале и 0 вне его. Функция имеет один аргумент.	При использовании записывается имя функции с одним аргументом в круглых скобках. Пример: rect1 (x)

ИМЯ ШАБЛОНА	АРГУМЕНТЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ	ПРИМЕР СИНТАКСИСА
Step (Ступенчатая функция)	Имя функции является ее идентификатором, например, step1 . Ступенчатая функция резко возрастает с 0 до другого значения (амплитуды) в определенной точке. Функция имеет один аргумент. Также ее можно сгладить.	При использовании записывается имя функции с одним аргументом в круглых скобках. Пример: step1(x)
Switch (Переключатель)	Имя функции является ее идентификатором, например, sw1 . Switch используется для переключения между глобальными функциями во время параметрического расчета по функциям. Функции добавляются в качестве подузлов в узле Switch (Переключатель). Переключатель для функций играет роль инструкции переключения (как в любом языке программирования); другими словами, он динамически выбирает одну из основных своих подветвей в зависимости от параметра, определяемого решателями, которые используются при исследовании Function Sweep (Параметрическое исследование с переключением функций). Узел Switch (Переключатель) можно также добавить в разделе Materials (Материалы) и затем выполнить Material Sweep (Параметрическое исследование по материалам) для перебора определенного набора материалов.	Switch (Переключатель) является узлом, содержащим другие функции.
Triangle (Треугольная функция)	Имя функции является ее идентификатором, например, tri1 . Треугольная функция линейно возрастает и линейно убывает на заданном интервале и равна 0 вне его. Функция имеет один аргумент. Также ее можно сгладить.	При использовании записывается имя функции с одним аргументом в круглых скобках. Пример: tri1(x)

ИМЯ ШАБЛОНА	АРГУМЕНТЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ	ПРИМЕР СИНТАКСИСА
Waveform (Периодическая волновая функция)	Имя функции является ее идентификатором, например, wv1 . Waveform (Волновая периодическая функция) имеет одну из следующих характеристических форм: sawtooth (пилообразная), sine (синусоидальная), square (квадратная/меандр) или triangle (треугольная). Функция имеет один аргумент. Также ее можно сгладить.	При использовании записывается имя функции с одним аргументом в круглых скобках. Пример: wv1 (x)
External (Внешняя функция, доступна только в Global Definitions)	External (Внешняя) функция определяет интерфейс для одной или нескольких функций, написанных на языке программирования C, которые, например, могут быть интерфейсными (оберточными) функциями для исходного кода, например на Fortran. Такую внешнюю функцию можно использовать, например, для подключения пользовательской общей библиотеки. Обратите внимание, что расширение файла общей библиотеки зависит от платформы: .dll (Windows), .so (Linux) или .dylib (macOS).	При использовании записывается имя функции и соответствующее количество аргументов в круглых скобках. Пример: myextfunc (a, b)
MATLAB®- функция (доступна только в Global Definitions)	Функция MATLAB® является интерфейсом для одной или нескольких функций, написанных на языке MATLAB®. Эти функции можно использовать точно так же, как и любые другие функции, определенные в COMSOL Multiphysics, при условии установки LiveLink™ for MATLAB® и MATLAB®. (Функции MATLAB® рассчитываются в MATLAB® во время выполнения.)	При использовании записывается имя функции и соответствующее количество аргументов в круглых скобках. Пример: mymatlabfunc (a, b)

Унарные и бинарные операторы

Следующая таблица содержит унарные и бинарные операторы, которые можно использовать в выражениях в Построителе моделей.

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

Выражения

ПАРАМЕТРЫ

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

ПЕРЕМЕННЫЕ

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

ФУНКЦИИ

Объявление функции может содержать входные аргументы, числа, параметры, константы, функции выражений параметров, включая входные аргументы, а также унарные и бинарные операторы.

Форматы файлов COMSOL

MPH-файл модели COMSOL с расширением `.mph` представляет собой стандартный тип файла, содержащий все дерево модели или дерево приложений, созданное в Построителе моделей или в Среде разработки приложений соответственно. Файл содержит двоичные и текстовые данные. Сетка и данные о решении хранятся в двоичном формате, а вся остальная информация — в виде простого текста.

Двоичные и текстовые файлы COMSOL с расширениями `.mphbin` и `.mphtxt` содержат соответственно объекты геометрии или объекты сетки, которые можно импортировать прямо в разделы **Geometry** (Геометрия) и **Mesh** (Сетка) дерева модели. Если для создания геометрии модели использовался модуль Импорт данных из CAD, модуль Проектирование либо один из модулей расширения группы LiveLink™ для сторонних CAD-пакетов, то этот же модуль может потребоваться для открытия соответствующего файла. Это связано с тем, что для работы с геометрической моделью могут потребоваться возможности, доступные только в модулях расширения.

Файл для **Physics Builder** (Построителя физических интерфейсов) с расширением `.mphphb` содержит один или несколько пользовательских физических интерфейсов, которые доступны посредством Model Builder (Построителя моделей). Дополнительную информацию см. в *«Руководстве по Построителю физических интерфейсов»*.

Дополнительную информацию обо всех остальных форматах, поддерживаемых COMSOL Multiphysics, см. в разделе [«Поддерживаемые внешние форматы файлов»](#).

ТИП ФАЙЛА	РАСШИРЕНИЕ	ЧТЕНИЕ	ЗАПИСЬ
Модель и приложение COMSOL	<code>.mph</code>	Да	Да
Двоичные данные	<code>.mphbin</code>	Да	Да
Physics Builder (Построитель физических интерфейсов)	<code>.mphphb</code>	Да	Да
Текстовые данные	<code>.mphtxt</code>	Да	Да

Поддерживаемые внешние форматы файлов

CAD

Модули **CAD Import** (Импорт данных из CAD) и **Design** (Проектирование) позволяют импортировать ряд стандартных типов файлов сторонних CAD-пакетов. Поддержка дополнительных типов файлов доступна через двунаправленный интерфейс, который реализован в модулях расширения группы LiveLink для сторонних CAD-пакетов и File Import for CATIA® V5. Типы файлов DXF (2D), VRML (3D) и STL (3D) импортируются средствами COMSOL Multiphysics без дополнительных 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® ^{1,2,3}	.dwg	Да	Да ⁹
Inventor® ^{1,2,3}	.ipt, .iam	Да	Да ⁹
NX® ^{1,4}	.prt	Да	Нет
PTC® Creo® Parametric™ ^{1,3}	.prt, .asm	Да	Да ⁹
PTC® Pro/ENGINEER® ^{1,3}	.prt, .asm	Да	Да ⁹
Revit® Architecture ^{3,5}	.rvt	Да ⁹	Да ⁹
Solid Edge® ^{3,6}	.par, .asm	Да ⁹	Да ⁹
SOLIDWORKS® ^{1,2,3}	.sldprt, .sldasm	Да	Да ⁹
DXF (3D ^{1,2} и 2D)	.dxf	Да	Да ¹⁰
Parasolid® ¹	.x_t, .xmt_txt, .x_b, .xmt_bin	Да	Да
ACIS® ¹	.sat, .sab, .asat, .asab	Да	Да
STEP ¹	.step, .stp	Да	Нет
IGES ¹	.iges, .igs	Да	Нет
CATIA® V5 ^{2,7}	.CATPart, .CATProduct	Да	Нет
VRML, v1 ⁸	.vrm1, .wr1	Да	Нет

ТИП ФАЙЛА	РАСШИРЕНИЕ	ЧТЕНИЕ	ЗАПИСЬ
STL	.stl	Да	Да

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

²Функция импорта поддерживается только в операционных системах Windows®

³Синхронизация файлов между COMSOL Multiphysics и связанным CAD-пакетов поддерживается только в операционных системах Windows® 7, 8, 8.1, 10

⁴Импорт поддерживается только в операционных системах Windows® и Linux

⁵Требуется LiveLink™ for Revit®

⁶Требуется LiveLink™ for Solid Edge®

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

⁸Ограничено до одной геометрической области

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

¹⁰Запись в файл поддерживается только для двухмерной геометрии

ECAD

Модуль **ECAD Import** (Импорт данных из ECAD) позволяет импортировать файлы двухмерных макетов и топологий и автоматически преобразовывать их в трехмерные CAD-модели. Файл в формате Touchstone служит для экспорта S-параметров рассеяния, импеданса и адмиттанса при проведении переключения портов в процессе частотного анализа (Frequency Domain). Файл SPICE Circuit Netlist при импорте преобразуется в последовательность узлов сосредоточенных элементов цепи в узле **Electrical Circuit** (Электрическая цепь).

ТИП ФАЙЛА	РАСШИРЕНИЕ	ЧТЕНИЕ	ЗАПИСЬ
NETEX-G ¹	.asc	Да	Нет
IPC-2581 ¹	.cvg, .xml	Да	Нет
ODB++ ¹	.zip, .tar, .tgz, .tar.gz	Да	Нет
ODB++(X) ¹	.xml	Да	Нет
GDS ¹	.gds	Да	Нет
Touchstone ²	.s2p, .s3p, .s4p, ...	Нет	Да

ТИП ФАЙЛА	РАСШИРЕНИЕ	ЧТЕНИЕ	ЗАПИСЬ
SPICE Circuit Netlist ³	.cir	Да	Нет

¹Требуется модуль ECAD Import (Импорт данных из ECAD)

²Требуется один из следующих модулей: AC/DC, RF (Радиочастоты), MEMS, Wave Optics (Волновая оптика)

³Требуется один из следующих модулей: AC/DC, RF (Радиочастоты), MEMS, Plasma или Semiconductor (Полупроводники)

БАЗЫ ДАННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Модули **Chemical Reaction Engineering** (Химические реакции) и **Plasma** (Плазма) могут считывать файлы CHEMKIN[®] для моделирования сложных химических реакций в газовой фазе. Модуль **Plasma** (Плазма) может считывать из файлов LXCAT наборы сечений столкновения электронов.

ТИП ФАЙЛА	РАСШИРЕНИЕ	ЧТЕНИЕ	ЗАПИСЬ
CHEMKIN ^{®1}	.dat, .txt, .inp ³	Да	Нет
CAPE-OPEN ¹ (прямое подключение)	Н/П	Н/П	Н/П
Файл LXCAT ²	.lxcacat, .txt	Да	Нет

¹Требуется модуль Chemical Reaction Engineering (Химические реакции) или модуль Plasma (Плазма). Модуль Plasma (Плазма) поддерживает только данные термодинамики и переноса.

²Требуется модуль Plasma (Плазма)

³Наиболее популярные расширения, в общем случае допустимо любое расширение

СЕТКА

Файлы типа NASTRAN[®] Bulk Data служат для импорта объемных сеток. Файлы типа 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 одной геометрической области.

ТИП ФАЙЛА	РАСШИРЕНИЕ	ЧТЕНИЕ	ЗАПИСЬ
NASTRAN [®] Bulk Data	.nas, .bdf, .nastran, .dat	Да	Да
STL	.stl	Да	Да
VRML, v1	.vrml, .wrl	Да	Нет
VTK	.vtu	Нет	Да

ИЗОБРАЖЕНИЯ И АНИМАЦИИ

Результаты визуализации можно экспортировать в популярные графические форматы, перечисленные в таблице ниже. Изображения можно также загружать и использовать в качестве интерполяционных функций при физическом моделировании. Анимации можно экспортировать в форматы Animated GIF, Adobe® Flash® и AVI.

ТИП ФАЙЛА	РАСШИРЕНИЕ	ЧТЕНИЕ	ЗАПИСЬ
Adobe® Flash®	.swf	Нет	Да
Анимированный GIF	.gif	Нет	Да
AVI ¹	.avi	Нет	Да
BMP	.bmp	Да	Да
EPS (только одномерные графики)	.eps	Нет	Да
GIF	.gif	Да	Да
JPEG	.jpg, .jpeg	Да	Да
MP4	.mp4	Да	Нет
OGV	.ogv	Да	Нет
PNG	.png	Да	Да
TIFF	.tif, .tiff	Нет	Да
WEBM	.webm	Да	Нет

¹Только для Windows®

ЯЗЫКИ ПРОГРАММИРОВАНИЯ И ЭЛЕКТРОННЫЕ ТАБЛИЦЫ

Формат Model files for Java® — это редактируемые файлы сценариев с расширением .java, содержащие последовательность команд COMSOL в виде программного кода на Java®. Для добавления дополнительных команд можно редактировать эти файлы в текстовом редакторе. Java® файлы можно скомпилировать в файлы классов Java® с расширением .class и запускать как отдельные приложения. Программный код, используемый в файлах модели для Java®, в основном идентичен коду, используемому в **Method editor** (Редакторе методов) в **Application Builder** (Среде разработки приложений). Обратите внимание, что **Method editor** (Редактор методов) имеет встроенный компилятор Java®.

Формат Model files for MATLAB® — это редактируемые файлы сценариев (М-файлы), аналогичные формату файлов моделей для Java®, но предназначенные для системы MATLAB®. Эти файлы моделей с расширением .m содержат последовательность команд COMSOL в виде М-файла MATLAB®. Данные файлы моделей можно запускать в MATLAB®

так же, как и обычные скрипты в М-файлах. Для добавления дополнительных команд COMSOL или общих команд MATLAB® файлы можно редактировать в текстовом редакторе. Для запуска файлов моделей в формате М-файла необходим модуль расширения COMSOL LiveLink™ for MATLAB®.

Имея лицензию LiveLink™ для Excel®, можно сохранять модели в формате Visual Basic for Applications (VBA) для использования в Excel®.

Скомпилированный код на С можно несколькими способами связать с моделью или приложением, в том числе с помощью интерфейсов **External Material** (Внешний материал) и **External Function** (Внешняя функция) в Построителе моделей, а также с помощью интерфейса **External Library** (Внешняя библиотека) в Среде разработки приложений.

ТИП ФАЙЛА	РАСШИРЕНИЕ	ЧТЕНИЕ	ЗАПИСЬ
MATLAB®: Model file for MATLAB®	.m	Нет	Да
MATLAB®: Функция ¹	.m	Да	Нет
Java®: Файл архива	.jar ⁶	Да	Нет
Java®: Скомпилированный Model file for Java®	.class	Да	Нет
Java®: Model file for Java®	.java	Нет	Да
С: Функция	.dll ³ , .so ⁴ , .dylib ⁵	Да	Нет
Fortran ⁷ : Функция	.dll ³ , .so ⁴	Да	Нет
Excel® ²	.xlsx, .vba	Да	Да

¹Требуется LiveLink™ for MATLAB®

²Требуется LiveLink™ for Excel®, доступный только для Windows®

³Доступно только для Windows®

⁴Доступно только для Linux®

⁵Доступно только для macOS

⁶Можно связать с методом в приложении с помощью Среды разработки приложений

⁷Требуются интерфейсная (оберточная) функция на С для кода на Фортране и подключение DLL с кодом на С в качестве внешней библиотеки С в Среде разработки приложений. Кроме того, можно добавить DLL с кодом на Fortran непосредственно в качестве внешней библиотеки С в Среде разработки приложений. Примечание. Необходимо учитывать правила именования функций, экспортируемых из Fortran. Например, в Windows® обычно требуется, чтобы имена функций в Fortran набирались в верхнем регистре.

ФОРМАТЫ ЧИСЛОВЫХ И ИНТЕРПОЛЯЦИОННЫХ ДАННЫХ

Файлы пространственных сеток и электронных таблиц можно использовать для задания интерполяционных функций. Электронные таблицы можно загружать 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 формате простого текста, в формате значений, разделенные запятыми, или в файлы данных различного типа.

Текстовые файлы непрерывных и дискретных цветовых схем служат для хранения пользовательских цветовых схем для визуализации результатов.

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

ТИП ФАЙЛА	РАСШИРЕНИЕ	ЧТЕНИЕ	ЗАПИСЬ
Формат для копирования и вставки электронной таблицы	Н/П	Да	Да
Электронная таблица Excel ^{®1}	.xlsx	Да	Да
Таблица	.txt, .csv, .dat	Да	Да
Пространственная сетка	.txt	Да	Да
Таблица по секциям	.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 цветовая схема	.txt	Да	Нет
Массив точек для наборов данных Cut Point (Точки)	.txt	Да	Нет
DEM	.dem	Да	Нет
VTK	.vtu	Нет	Да

¹Требуется LiveLink™ for Excel®, доступный только для Windows®

Приложение Е. Подключение модулей расширения группы LiveLink™

В следующей таблице приведены возможности совместного запуска программного обеспечения COMSOL и различных партнерских приложений с помощью модулей расширения LiveLink.

Продукт COMSOL®	Можно запускать COMSOL из партнерского приложения	Можно запускать партнерское приложение из COMSOL	Можно подключаться к текущим сеансам
LiveLink™ for Excel®	Да ¹	Да ²	Нет
LiveLink™ for MATLAB®	Да ³	Да ⁴	Да ⁵
LiveLink™ for AutoCad®	Нет	Нет	Да
LiveLink™ for Revit®	Нет	Нет	Да
LiveLink™ for PTC®Creo® Parametric™	Нет	Нет	Да
LiveLink™ for Inventor®			
- Двусторонний режим	Нет	Нет	Да
- One Window Mode (Однооконный режим)	Да	Нет	Нет
LiveLink™ for PTC®Pro/ENGINEER®	Нет	Нет	Да
LiveLink™ for Solid Edge®	Нет	Нет	Да
LiveLink™ for SOLIDWORKS®			
- Двусторонний режим	Нет	Нет	Да
- One Window Mode (Однооконный режим)	Да	Нет	Нет

¹При загрузке модели из Excel® автоматически открывается окно модели и создается соответствующая связь. Окно модели отображает геометрию, сетку и результаты расчетов.

²При запуске в среде COMSOL Desktop модели, содержащей таблицу со ссылками на электронную таблицу Excel®, в фоновом режиме автоматически запускается процесс Excel®.

³Сервер COMSOL Multiphysics можно запустить из сеанса MATLAB® с помощью системной команды, а затем подключиться к этому серверу, введя **mphstart** в командной строке MATLAB®.

⁴Ярлык COMSOL with MATLAB® на рабочем столе запускает сервер COMSOL Multiphysics и MATLAB®, а затем автоматически соединяет их друг с другом. При запуске в интерфейсе COMSOL Desktop расчета модели COMSOL Multiphysics, содержащей функцию MATLAB® (Global Definitions > Functions (Глобальные определения > Функции)), автоматически запускается процесс MATLAB® и устанавливается соединение.

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

Указатель

- A** AC/DC Module (модуль AC/DC) 59, 81
- accuracy (точность)
 - convergence analysis (анализ сходимости) 49
- Add Material window (окно Добавление материала)
 - busbar model (модель шины) 70
 - opening (открыть) 38, 70
- Add Multiphysics (Добавление мультифизической связи)
 - button (кнопка) 81
 - window (окно) 81
- add-on modules (модули расширения)
 - AC/DC Module (модуль AC/DC) 59, 78, 81
 - Application Libraries (Библиотеки моделей и приложений) 28
 - CAD Import Module (модуль Импорт данных из CAD) 157, 195
 - CFD Module (модуль Вычислительная гидродинамика) 122
 - Chemical Reaction Engineering Module (модуль Химические реакции) 197
 - Design Module (модуль Проектирование) 157, 195
 - ECAD Import Module (модуль Импорт данных из ECAD) 196
 - MEMS Module (модуль Микроэлектромеханические системы) 113
 - physics list (список физических интерфейсов) 34, 61
 - Plasma Module (модуль Плазма) 197
 - Structural Mechanics Module (Модуль Механика конструкций) 33, 43
 - study types (типы исследований) 62
- advanced study options (расширенные возможности исследования) 151, 154
- advanced topics (расширенные возможности) 103
- all combinations (все комбинации)
 - parametric sweep (параметрическое исследование) 138
- analysis (анализ)
 - convergence (сходимости) 49
 - parametric sweep (параметрическое исследование) 54
- animation (анимация) 19, 150
- application (приложение) 12, 92
- Application Builder (Среда разработки приложений) 6, 8, 11, 12, 24, 93, 180
- Application Gallery (Галерея моделей и приложений) 30
- Application Libraries (Библиотеки моделей и приложений)
 - examples (примеры) 28
 - file types (типы файлов) 29
 - MPN files (MPN-файлы) 10, 28

- Application Library update (Обновление Библиотеки моделей и приложений) 30
- autocomplete (автодополнение)
 - parameter and variable names (имена параметров и переменных) 146
 - parameters and variables (параметры и переменные) 64
- average temperature (средняя температура) 141
- B** blank model, creating (пустая модель, создание) 14, 16
- boundaries (границы) 77
 - adding to selection (добавление к выборке) 79
 - variables scope (область действия переменных) 24
- boundary condition (граничное условие) 75
 - automatically defined (автоматическое определение) 43
- boundary load (граничная нагрузка) 42
- busbar, setting (шина, настройки) 75
- electric current (электрический ток) 75, 79
- fixed constraint (фиксированное ограничение) 41
- free (свободное) 40
- ground, electrical (заземление, электрическое) 80
- heat transfer (теплопередача) 75
- insulating (изоляция) 77
- material interface (интерфейс Материал) 43
- settings window (окно Настройки) 8
- boundary load (граничная нагрузка) 43
- boundary section (раздел доменных и граничных условий)
 - context menu (контекстное меню) 76
- boundary selection, busbar model (выбор границы, модель шины) 77
- Build All button (кнопка Построить все)
 - geometry (геометрия) 67
 - meshes (сетки) 83
- Build All button (кнопка Построить всё)
 - meshes (сетки) 45
- built-in (встроенные)
 - constants, functions, and variables (константы, функции и переменные) 28
 - materials (материалы) 38, 69
 - variables (переменные) 86
- button object (объект Кнопка) 95
- C** CAD Import Module (модуль Импорт данных из CAD) 157, 195
- Cancel button (кнопка Отмена) 10, 27
- case (группа)
 - parameter (параметр) 22, 138
- CFD Module (модуль Вычислительная гидродинамика) 122
- chamfer (фаска) 157
- Chemical Reaction Engineering Module (модуль Химические реакции) 197
- cloud computing (облачные вычисления) 151
- Cluster Computing node (узел Кластерный расчет) 151, 154

- cluster job (кластерная задача) 153
- Cluster Sweep node (узел Кластерное параметрическое исследование) 151, 154
- coloring (отображение цвета)
 - materials (материалы) 73
 - selections (выборки) 73
- command sequence (последовательность команд) 99
- Compact MPH files (Компактные MPH-файлы) 29
- compiler (компилятор) 12
- component coupling (взаимосвязь между компонентами) 140
- Component node, adding materials (узел Компонент, добавление материалов) 70
- computing studies (расчет исследований) 54
- COMSOL Client 12
- COMSOL Compiler 12
- COMSOL Desktop environment (Среда COMSOL Desktop)
 - customizing (настройка) 25
 - on Linux (на Linux) 18
 - on macOS (на macOS) 18
 - overview (обзор) 6
- COMSOL Multiphysics 12
 - native CAD format (собственный формат CAD) 36
 - opening (запуск) 33
- COMSOL Server 12
- constants (константы)
 - mathematical and physical types (математические и физические) 28
- context menu (контекстное меню)
 - domain and boundary sections (раздел граничных условий) 76
 - contextual tab (контекстная вкладка) 17
- contributing node (дополняющий узел) 121
- convergence analysis (анализ сходимости) 49, 55
- Convergence plot (График сходимости) 9, 84
- cooling (охлаждение)
 - air stream (воздушный поток) 59
 - natural convection (естественная конвекция) 63
- coupling operator (оператор взаимосвязи) 140
- Create Selection button (кнопка Создать выборку) 116
- custom studies (пользовательские исследования) 62
- customized desktop (настроенный рабочий стол) 25
- D** data sets, defined (наборы данных, определение) 19
- default feature (свойство по умолчанию) 75
- Definitions node (узел Определения) 32
- degrees of freedom (степени свободы) 49, 56
- derivatives (производные) 28
- Derived Values (Вычисление выражений) 56, 90
 - defined (определение) 19
 - Global Evaluation (Расчет глобального выражения) 55
 - Volume Maximum (Максимум по объему) 50, 54, 90
- Design Module (модуль Проектирование) 157, 195
- DirectX 14

- discretize (дискретизация) 44
- documentation, models
 - (документация, модели) 10, 28
- domain level (уровень области) 76
- domain section (раздел области)
 - context menu (контекстное меню) 76
- domains (области)
 - materials (материалы) 72
 - remove from selection (удаление из выборки) 72
 - variables score (область действия переменных) 24
- Dynamic help (Динамическая справка) 11, 27
- E** ECAD Import Module (модуль Импорт данных из ECAD) 196
- edges (ребра)
 - variables score (область действия переменных) 24
- Editor Templates window (окно Редактор шаблонов) 97
- eigenfrequency analysis (анализ на собственные частоты) 20
- Electric Currents interface (интерфейс Электрические токи)
 - defining boundary conditions (задаваемые граничные условия) 76
 - multiphysics (мультифизика) 62, 81
 - overview (обзор) 75
- electric potential (электрический потенциал) 59
- physics node (узел физики) 79
- voltage drop, parameter (падение напряжения, параметр) 63
- electrical heating (электрический нагрев) 58
- empty (пустая)
 - Selection (Выборка) 42
- equation (уравнение)
 - built-in (встроенное) 75
 - user-defined (пользовательское) 48
- evaluating (анализ)
 - volume maximum (максимум по объему) 50, 88, 90
 - von Mises stress (напряжения по Мизесу) 51
- Evaluation Group (Группа расчетов) 56, 90
 - automatic re-evaluation (автоматический пересчет) 56
- example (пример)
 - advanced, electrical heating (углубленный, электрический нагрев) 58
 - basic, structural mechanics (простой, механика конструкций) 33
- Excel® 199, 201
- exclusive node (исключающий узел) 121
- executable (исполняемый файл) 12
- Export node (узел Экспорт) 19
- exporting images (экспорт изображений) 91
- expressions (выражения)
 - Boolean (логические) 48
 - manual entry (ручной ввод) 51, 64
 - replacing (замена) 48, 86, 88
 - units, specifying (единицы измерения, определяющие) 50
 - user-defined (пользовательские) 48
- External Process window (окно Внешний процесс) 9
- F** fillet (скругление) 157
- find (поиск)
 - parameters and variables (параметры и переменные) 65

- finite element (конечный элемент)
 - mesh (сетка) 44
 - preconditioning
 - (предобусловливание) 54
 - tetrahedra (тетраэдр) 44
 - Fixed Constraint node (узел
 - Фиксированное ограничение) 41
 - Floating Network License (Плавающая сетевая лицензия) 151
 - Form editor (Редактор форм) 11, 95
 - form objects (объекты формы) 93
 - form union, geometry (образовать объединение, геометрия) 67
 - frequency response (частотная характеристика) 21
 - frequency-domain study
 - (исследование в частотной области) 20
 - Full MPN files (полные MPN-файлы) 29
 - functions (функции)
 - advanced topics (расширенные возможности) 103
 - built-in (встроенные) 28
 - mathematical (математические) 28
 - scope (область действия) 63
 - Functions node (узел Функции) 63
- G**
- geometric dimensions
 - (геометрические размеры)
 - parameters (параметры) 10, 21, 171
 - parametric sweep
 - (параметрическое исследование) 63
 - geometry (геометрия)
 - building (построение) 63
 - CAD format (формат CAD) 35
 - importing (импорт) 35
 - in Application Libraries
 - (в Библиотеках моделей и приложений) 66
 - loading from file (загрузка из файла)
 - 63, 66
 - operations (операции) 157
 - parameterized (параметризация)
 - 10, 21, 63, 67, 171
 - sequence (последовательность)
 - 157
 - settings window (окно Настройки)
 - 8
 - Geometry node (узел Геометрия) 31
 - Global Definitions node (узел
 - Глобальные определения) 19, 22
 - functions (функции) 63
 - parameters (параметры) 63
 - scope (область действия) 24, 63
 - variables (переменные) 23
 - global parameters (глобальные параметры) 22, 39, 52, 63
 - expression (выражение) 21
 - gTF-file format (формат файла gTF)
 - 92
 - graphics (графика)
 - rendering and hardware (рендеринг и оборудование) 14
 - graphics object (графический объект)
 - 94, 96
 - Graphics toolbar (панель инструментов
 - Графика)
 - default view button (кнопка Вид по умолчанию) 42, 47, 80, 88
 - image snapshot button (кнопка Снимок изображения) 91
 - zoom extents button (кнопка Масштаб сцены) 68, 85
 - Graphics window (Графическое окно)
 - 7, 9, 27
 - geometry (геометрия) 37
 - plot (график) 46

- rotate geometry (поворот геометрии) 41, 84, 85
- selecting boundary (выбор границы) 41, 43, 80
- toolbar (панель инструментов) 7
- using (использование) 37, 69
- zoom box (панель масштабирования) 42
- Ground, boundary condition (заземление, граничное условие) 80
- grouping (группировка) nodes (узлы) 23
- H** Heat Transfer in Solids interface (интерфейс Теплопередача в твердых телах)
 - defining boundary conditions (задаваемые граничные условия) 76
 - multiphysics (мультифизика) 62, 81
 - overview (обзор) 75
- Heat Transfer Module (модуль Теплопередача) 122
- Help window (окно Справка) 11
 - opening (открытие) 18
- high performance computing (высокопроизводительные вычисления) 151
- Home tab (вкладка Главная) 16
- HPC 151
- hybrid parallelism (гибридный параллелизм) 152
- I** Image Snapshot button (кнопка Снимок изображения) 91
- images, creating thumbnails (изображения, создание миниатюр) 91
- importing geometry (импорт геометрии) 35, 36
- infinite elements (бесконечные элементы) 32
- information windows (информационные окна) 7, 9, 27
- initial conditions (начальные условия) 8
- Initial Values node (узел Начальные значения)
 - Electric Currents interface (интерфейс Электрические токи) 76
 - Heat Transfer in Solids interface (интерфейс Теплопередача в твердых телах) 76
 - Solid Mechanics interface (интерфейс Механика твердого тела) 40
- input fields (поля ввода) 94
- Input Parameters (входные параметры)
 - for part (для заготовки) 171
- Insert Object menu (меню Вставить объект) 97
- Isosurface plot (график Изоповерхность) 84, 148
- iterative solver (итерационный решатель)
 - preconditioning (предобусловливание) 54
- J** Java file (файл Java) 32, 198
- Joule heating (Джоулев нагрев) equations (уравнения) 75
- multiphysics coupling (объединение мультифизических интерфейсов) 81

message passing interface (интерфейс передачи сообщений) 152
 Messages window (окно Сообщения) 9, 46
 method (метод) 100
 model (модель) 24
 Method editor (Редактор методов) 11, 100
 midsurface (формирование срединной поверхности) 157
 modal tab (модальная вкладка) 17
 Model Builder (Построитель моделей) 6, 93
 defined (определение) 11
 example (пример) 31
 expanding sections (раскрываемые разделы) 76
 geometry import (импорт геометрии) 36
 node sequence example (пример последовательности узлов) 40
 ribbon (лента) 17
 toolbar (панель инструментов) 6
 window (окно) 26
 model history (журнал модели) 32
 model method (макрос для модели) 24
 model tree (дерево модели) 6, 26
 building (построение) 18
 defined (определение) 63
 example (пример) 31
 geometry (геометрия) 31
 Global Definitions node (узел Глобальные определения) 19, 39, 63
 Materials node (узел Материалы) 31, 38
 Model Builder (Построитель моделей) 11
 nodes (узлы) 18
 Results node (узел Результаты) 19
 ribbon (лента) 17
 root node (корневой узел) 19
 Study node (узел Исследование) 20, 31
 Model Wizard (Мастер создания моделей)
 adding physics (добавление физического интерфейса) 20, 34, 61
 Component node (узел Компонент) 20
 creating a new model (создание новой модели) 14
 custom studies (пользовательские исследования) 35, 62
 opening (запуск) 34, 60
 preset studies (предустановленные исследования) 35, 62
 space dimension (размерность пространства) 34, 61
 study (исследование) 20, 62
 models (модели)
 defining (определение) 11
 discretization (дискретизация) 44
 documentation (документация) 10, 28
 saving (сохранение) 69
 structural mechanics (механика конструкций) 33
 symmetry (симметрия) 86
 workflow (процесс моделирования) 31
 MPH file (MPH-файл) 194
 full and compact (полный и компактный) 29
 saving (сохранение) 69, 92
 MPHBIN file (MPHBIN-файл) 194

- MPHPHV file (MPHPHV-файл) 194
- MPHTXT file (MPHTXT-файл) 194
- MPI (ИПС – интерфейс передачи сообщений) 152
- multicore processors (многоядерные процессоры) 151
- multiphysics interface (мультифизический интерфейс) 62
- multiphysics models (мультифизические модели) 58
- Multiphysics node (узел Мультифизика) 75, 76, 81, 114
- multiphysics phenomena (мультифизическое явление) 59
- Multislice plot (Мультисрезовый график) 84
- N**
 - New Form wizard (мастер Новая форма) 92
 - no solutions stored, message («Не содержит решений», сообщение) 30
 - node groups (группы узлов) 23
 - nodes (узлы) 18
 - default feature (свойство по умолчанию) 40
 - reordering (переупорядочивание) 32
- O**
 - OpenGL 14
 - Override and Contribution (Переопределение и дополнение) 40, 121
- P**
 - parallel computing (параллельные вычисления) 151
 - parameter (параметр)
 - case (группа) 22, 138
 - parameter switch (переключение между параметрами)
 - parametric sweep (параметрическое исследование) 138
 - (параметрическое исследование) 138
 - parameters (параметры) 21, 94
 - defining (определение) 52, 63
 - editing (изменение) 67
 - expression (выражение) 21, 52
 - global (глобальные) 22
 - meshes (сетки) 52
 - name (имя) 52
 - range of values (диапазон значений) 53
 - results (результаты) 22, 147
 - scope (область действия) 63
 - using, referencing (использование, ссылки) 78
 - Parameters node (узел Параметры) 63, 103
 - parametric geometry model (параметрическая модель геометрии) 157
 - parametric study (параметрическое исследование) 63
 - parametric sweep (параметрическое исследование) 21
 - all combinations (все комбинации) 138
 - example (пример) 53
 - meshes (сетки) 52
 - parameter switch (переключение между параметрами) 138
 - range, defining (диапазон, определение) 53
 - specified combinations (указанные комбинации) 138
 - part (заготовка) 10, 171
 - Input Parameters (Входные параметры) 171

- Part Libraries (Библиотека геометрических заготовок) 171
- perfectly matched layer (PML) (идеально согласованный слой) 32
- physics (физика)
 - adding (добавление) 61
 - boundary conditions (граничные условия) 75
 - electromagnetic heating (электромагнитный нагрев) 61
 - heat transfer (теплопередача) 61
 - Joule heating (Джоулев нагрев) 58, 75
 - laminar flow (ламинарный поток) 126
 - model tree (дерево модели) 31
- physics interface (физический интерфейс) 15, 62
- Electric Currents (Электрические токи) 62
- Heat Transfer in Solids (Теплопередача в твердых телах) 62
- Joule Heating (Джоулев нагрев) 61
- Laminar Flow (Ламинарный поток) 126
- Solid Mechanics (Механика твердого тела) 34
- Plasma Module (модуль Плазма) 197
- player (проигрыватель) 150
- plot (график)
 - regenerate after solving (перестроение после перерасчета) 57
- plot group (группа графиков) 20
 - 3D, adding (трехмерная, добавление) 48
- Plot window (окно График) 26
- plots (графики)
 - expression, user-defined (выражение, пользовательское) 48
 - max/min volume (максимум/минимум по объему) 51
 - model tree (дерево модели) 31
 - regenerating (построение) 51
 - surface (поверхность) 46, 48
 - windows (окна) 9
- points, variables score (точки, область действия переменных) 24
- Poisson's ratio (коэффициент Пуассона) 72
- polynomial functions (полиномиальные функции) 44
- preconditioning (предобусловливание) 54
- preferences (параметры и общие настройки) 13
- preset studies (предварительно настроенные исследования) 62
- principal stress (главное напряжение) 120
- program code (программный код)
 - model file for Java (файл модели для Java) 32
 - model M-file (M-файл модели) 32
- progress bar (Индикатор выполнения) 10, 27
- Progress window (окно Прогресс) 9, 46
- Q** Quick Access Toolbar (Панель быстрого доступа) 6, 8, 17, 26
- R** Record Code (Запись кода) 101
- renaming plot groups (переименование группы графиков) 49

- rendering options (настройки рендеринга) 14
 - reports, defined (Отчеты, определение) 19
 - reserved name (зарезервированное имя) 28
 - resolution of curvature, mesh (разрешение кривизны, сетка) 83
 - results (результаты)
 - color table range (диапазон цветовой схемы) 85, 87
 - Derived Values (Вычисление выражений) 50, 54, 90
 - displaying (отображение) 46
 - parameters (параметры) 22, 147
 - surface settings, modify (настройки поверхности, изменение) 85
 - units, changing (единицы измерения, изменение) 46
 - Results node (узел Результаты)
 - 3D plot group (Группа трехмерных графиков) 51, 86
 - busbar defaults (шина по умолчанию) 84
 - subnodes (подузлы) 19
 - surface node, adding (узел Распределение по поверхности, добавление) 86
 - ribbon (лента) 6, 26
 - Add Material (Добавить материал) 38, 74, 125
 - Build All (Построить все) 67
 - Build Mesh (Построить сетку) 83
 - Compute (Запуск на расчет) 54, 118, 135
 - defined (определение) 8, 16
 - example (пример) 6
 - importing geometry (импорт геометрии) 36
 - Model Builder (построитель моделей) 17
 - Physics tab (вкладка Физика) 41, 114
 - Windows (Окна) 10, 46, 161
 - Work Plane (Рабочая плоскость) 159
 - root node (корневой узел)
 - default units (единицы измерения по умолчанию) 139
 - defined (определение) 19
 - model thumbnails (миниатюра модели) 91
 - Model Wizard (Мастер создания моделей) 34
 - running simulations (запуск моделирования) 83
- S**
- saving files (сохранение файлов) 69, 92
 - scheduler (планировщик)
 - Grid Engine 153
 - Open Grid Scheduler 153
 - PBS 153
 - SLURM 153
 - Windows HPC Server 153
 - scope (область действия)
 - global definitions (глобальные определения) 63
 - parameters and variables (параметры и переменные) 24
 - parameters and variables, defined (параметры и переменные, определение) 21
 - variable name (имя переменной) 25
 - search (поиск)
 - parameters and variables (параметры и переменные) 65
 - Select Study window (окно выбора Исследования) 16

- selecting (выборка)
 - multiple boundaries (несколько границ) 116
- selecting internal surfaces (выделение внутренних поверхностей) 44
- Selection (Выборка) 73, 74, 116
 - empty (пустая) 42
- Selection List window (окно Список для выборки) 10, 161
- selection of geometry objects, domains, boundaries, edges, and points (выделение геометрических объектов, областей, границ, ребер и точек) 44
- Settings window (окно Настройки) 6, 8, 18, 26
- shared memory parallelism (паралелизм с общей памятью) 151
- Show Material Color and Texture (Показывать цвет и текстуру материала) 73
- Show Selection Colors (Показать выборку цветом) 73
- simulation, running (моделирование, запуск) 83
- software rendering (программный рендеринг) 14
- Solid Mechanics interface (интерфейс Механика твердого тела) 34
 - add-on modules (модули расширения) 113
- solvers (решатели)
 - configurations (конфигурации) 54
 - iterative (итерационный) 53, 54
 - stationary (стационарный) 46, 54
 - using (использование) 46
- space dimension (размерность пространства) 14
- specified combinations (указанные комбинации)
 - parametric sweep (параметрическое исследование) 138
- Stationary study (Стационарное исследование) 35, 46
- steady-state study (стационарное исследование) 20
- structural analysis (анализ конструкции) 33
- structural displacement field (поле смещения конструкции) 44
- structural mechanics (механика конструкций)
 - design (конструирование) 49
 - plastic deformation (пластическая деформация) 47
 - stresses and strains (напряжения и деформации) 59, 72
 - von Mises stress (напряжение по Мизесу) 46
- Structural Mechanics Module (Модуль Механика конструкций)
 - application library (библиотека приложений) 33
 - mechanical contact (механический контакт) 43
 - thermal expansion (тепловое расширение) 113
- studies (исследования)
 - computing solutions (расчет решений) 54, 83
 - defining (определение) 46
 - example, multigrid iterative (пример, многосеточное итерационное) 54
 - example, stationary (пример, стационарное) 46

- model tree (дерево модели) 31
- preset (предварительная настройка) 62
- types (типы) 20
- Study node (узел Исследование) 20
 - solution sequence (последовательность решения) 83
- Suppress Selection Highlight (Отключить подсветку выборки) 74
- Surface plot (график Распределение по поверхности)
 - busbar results (результаты шины) 84
 - color table range (диапазон цветовой схемы) 87
 - deformation (деформация) 46
 - electrical current density (плотность электрического тока) 86
 - replace expression (замена выражения) 86
 - settings (настройки) 48
 - updating (обновление) 85, 87
- T** table (таблица)
 - Maximum and minimum (Максимальные и минимальные значения) 89
- Table window (окно Таблица) 9
 - graph plot (построение графика) 55
 - wrench results (результаты гаечного ключа) 51
- Tables node (узел Таблицы) 19
- tables, evaluating (таблицы, анализ) 55
- temperature (температура) 84, 136
- temperature, average (температура, средняя) 141
- Test Application (Тестирование приложения) 97
- tetrahedron, polynomial functions (тетраэдр, полиномиальные функции) 44
- thermal expansion (тепловое расширение) 59, 72
- thicken (формирование утолщения) 157
- thumbnail image (изображение миниатюры) 91
- time-dependent study (исследование во временной области) 20
- torque, applied (момент, крутящий) 33
- U** unit, changing (единица измерения, изменение) 46, 119
- update COMSOL Application Libraries (Обновить Библиотеку моделей и приложений COMSOL) 30
- Update Solution (Обновить решение) 147
- user interface (интерфейс пользователя)
 - COMSOL Desktop 6
 - overview (обзор) 6
- user-controlled mesh (сетка под управлением пользователя) 52
- V** variables (переменные)
 - advanced topics (расширенные возможности) 103
 - built-in (встроенные) 28
 - example, built-in (пример, встроенный) 55
 - expression (выражение) 23
 - scope (область действия) 63
 - scope, limit (область действия, ограничение) 24
- Variables node (узел Переменные) 23, 63

- visualization (визуализация) 9
 - color table (цветовая схема) 85, 87
- Volume Maximum, evaluating (Максимум по объему, анализ) 50, 88, 90
- von Mises stress (напряжение по Мизесу) 46, 120
- W** Windows list (список Окна) 46, 161
- wizard (мастер)
 - New Form (Новая форма) 92
- workflow (рабочий процесс) 28
- Y** yield stress (предел текучести) 33, 47
- Young's modulus (Модуль Юнга) 72
- Z** zoom (масштаб) 136
- Zoom Extents command (команда Масштаб сцены) 99