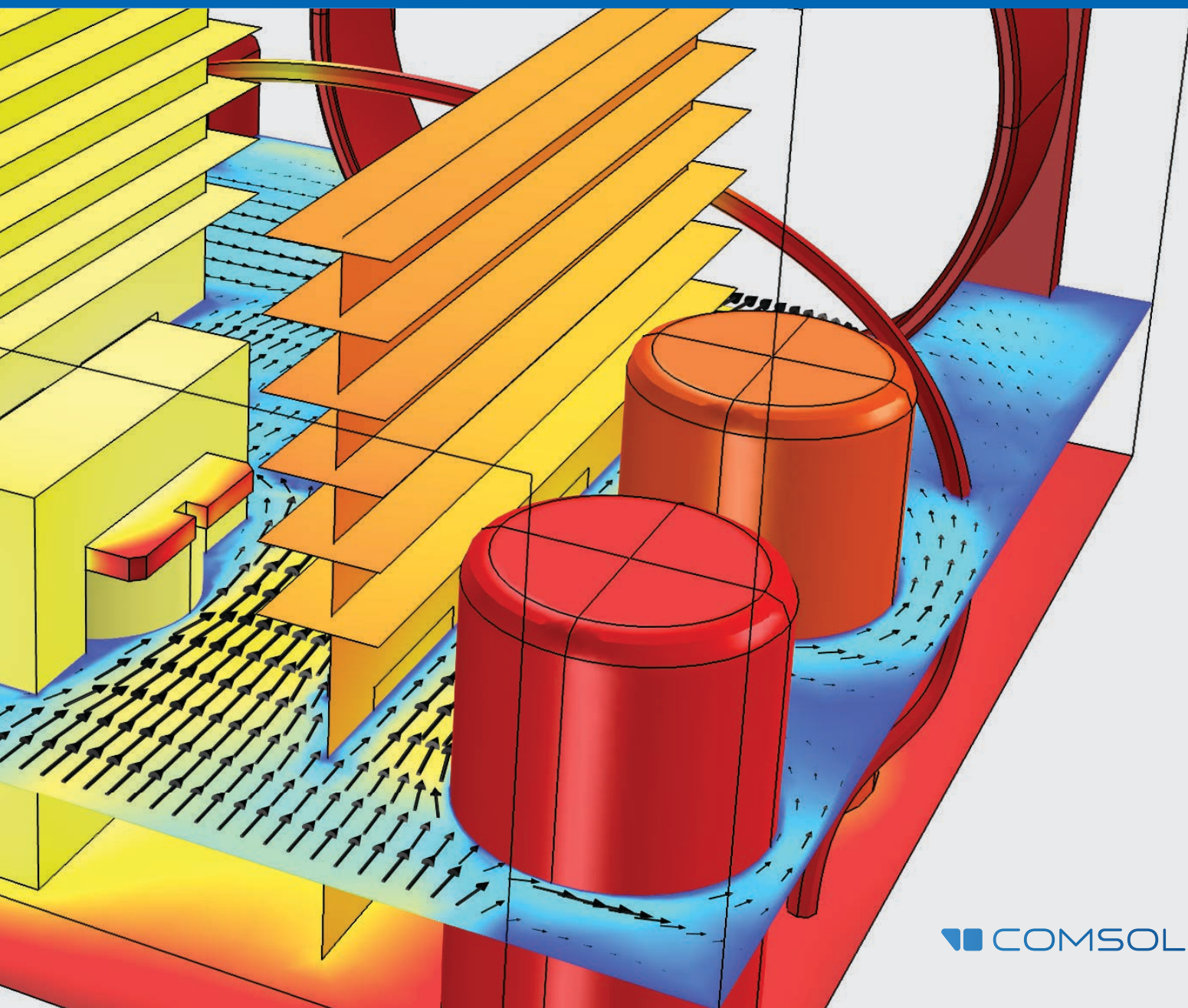


Специальные методы постобработки и визуализации в COMSOL Multiphysics®



Специальные методы постобработки и визуализации в COMSOL Multiphysics

COMSOL, COMSOL Multiphysics, Capture the Concept, COMSOL Desktop, LiveLink и COMSOL Server являются зарегистрированными товарными знаками или товарными знаками компании COMSOL AB. Любые другие торговые марки являются собственностью их владельцев. Корпорация COMSOL AB, ее дочерние компании и продукция, не связаны с этими владельцами, не утверждались, не финансировались и не поддерживались ими.

© 2015 г. COMSOL.

Контактная информация

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

Онлайн-форма запроса в техническую поддержку находится на странице COMSOL Access: www.comsol.ru/support/case.

Дополнительные ресурсы

Дополнительные ресурсы и учебные материалы, посвященные инструментам постпроцессинга в COMSOL®:

ПРЕДЫДУЩЕЕ РУКОВОДСТВО: ОСНОВЫ ПОСТОБРАБОТКИ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ В COMSOL MULTIPHYSICS

<https://www.comsol.ru/offers/Postprocessing-and-Visualization-Handbook-Part-1-ru>

ВИДЕО

<http://www.comsol.ru/videos?workflow=workflowstep-results>

БЛОГ

<https://www.comsol.ru/blogs/category/all/postprocessing/>

ФОРУМ

<https://www.comsol.ru/community/forums/results-and-visualization/>

БАЗА ЗНАНИЙ

<https://www.comsol.ru/support/knowledgebase/browse/900/>

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	1
ПОСТРОЕНИЕ ГРАФИКОВ ВЫРАЖЕНИЙ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ	
▪ Создание пользовательских выражений	2
▪ Использование производных значений для проверки модели	4
▪ Графики для отображения сетки	5
▪ Деформации, выражения для высот и масштабирование)	6
▪ Операции для интерпретации результатов	7
ИНСТРУМЕНТЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ	
▪ Управление видом и камерой	13
▪ Освещение и сцена	20
ТИПЫ ГРАФИКОВ ДЛЯ ОТДЕЛЬНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ЗАДАЧ	
▪ Графики в дальней зоне	23
▪ Трассировка частиц	24
СОВЕТЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ОПЫТНЫХ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ	
▪ Идеи для эффектных визуализаций	26
▪ Анимация	30
▪ Отрисовка и сглаживание	31
ПОСТОБРАБОТКА НИЗКОРАЗМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ	
▪ Повторение терминологии	33
▪ Свойства тонкого слоя	34
▪ Нарушения непрерывности	36
▪ Операторы Up (Верх) и Down (Низ)	36
▪ Оператор Side (Сторона)	37
▪ Сравнение графиков областей и границ	38
▪ Резюме	40
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	41

ВВЕДЕНИЕ

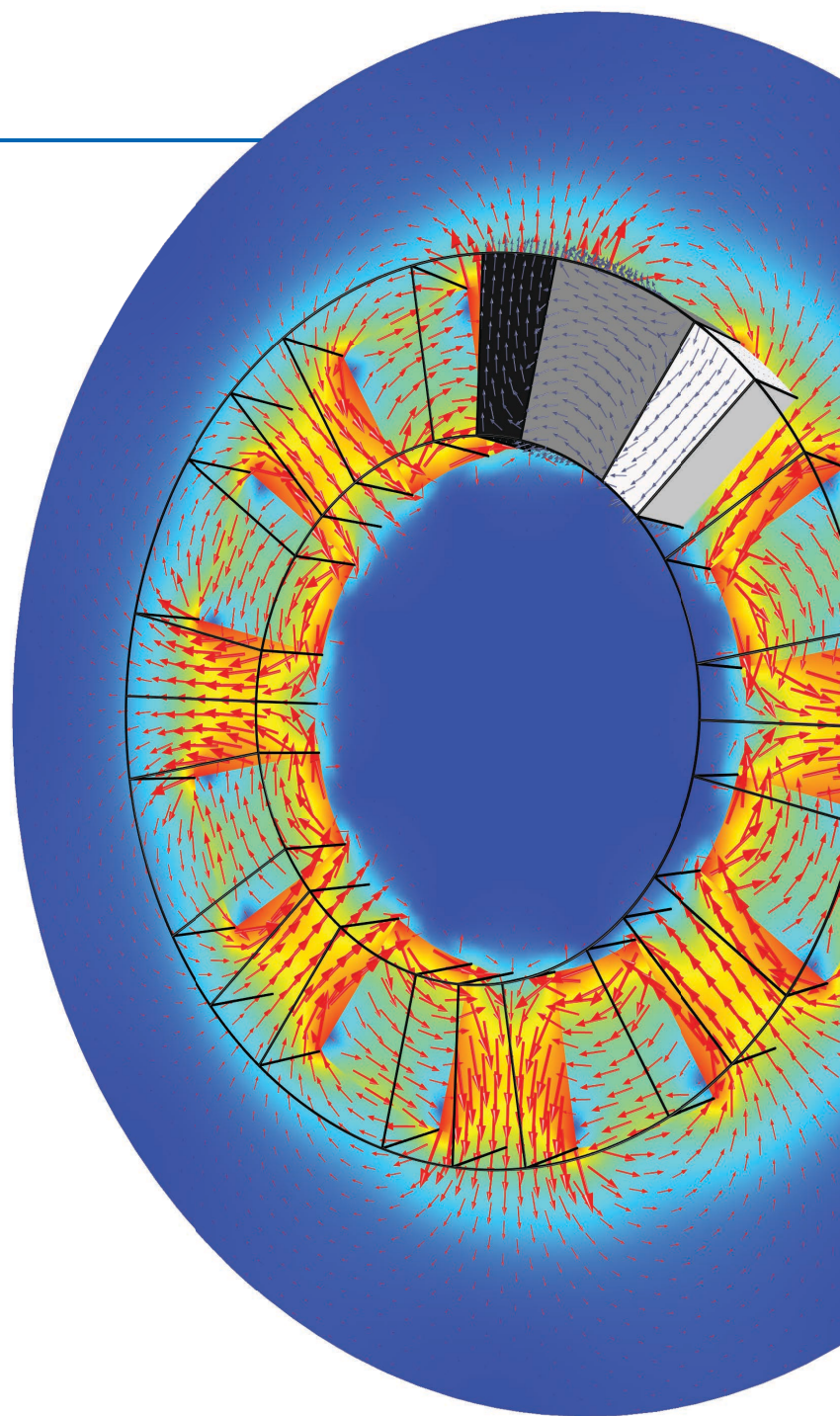
Добро пожаловать! Если вы читаете это, значит, первая часть этого набора руководств, Основы постобработки и визуализации в COMSOL Multiphysics®, помогла вам изучить методы постобработки и визуализации, которые используются в среде COMSOL Multiphysics®.

В первой части мы учились использовать наборы данных, производные значения и группы графиков. В конце мы проработали несколько полезных советов, например отображение сетки на поверхностях, интерактивные инструменты размещения и сочетания клавиш, с помощью которых можно управлять узлом View (Вид) и выделением объектов.

В этой части мы сделаем шаг вперед и пристальнее изучим гибкие возможности постобработки в среде COMSOL®, которые нужны для более опытных пользователей. В частности, это методы, помогающие проверить, понять и согласовать вашу модель. Они включают в себя операции над наборами данных, создание деформаций для отображения реалистичных смещений, задание пользовательских выражений и интерпретацию результатов.

Наконец, мы вкратце затронем специфичные для отдельных задач вопросы, например: когда следует и когда не следует менять разрешение и сглаживание графиков, как улучшить визуализацию с помощью инструментов камеры и освещения, какие комбинации помогут создать впечатляющие визуализации и какие методы постобработки применяются для объектов более низкой размерности, чем сама модель.

Мы надеемся, что предлагаемое руководство поможет вам посмотреть на свои модели свежим взглядом и упростит процесс анализа, визуализации и распространения ваших работ.



МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Модель ротора Хальбаха, состоящего из 4-полюсных пар. На графике показана плотность магнитного потока в поперечном сечении в зависимости от угла поворота ротора.

ПОСТРОЕНИЕ ГРАФИКОВ ВЫРАЖЕНИЙ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

ССЫЛКА

Различные типы графиков, доступные в программном пакете COMSOL Multiphysics®, описаны в разделе *Plot Types (Типы графиков)* руководства «[Основы постобработки и визуализации в COMSOL Multiphysics®](#)».

СОЗДАНИЕ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ ВЫРАЖЕНИЙ

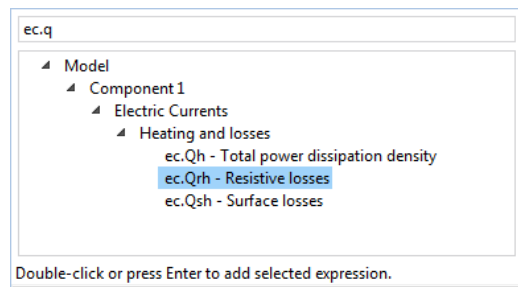
При построении графиков любого типа в среде COMSOL отображаемая величина определяется выражением. Прежде чем перейти к инструментам визуализации, кратко остановимся на устройстве этих выражений.

COMSOL предлагает множество заранее заданных величин для построения графиков, но иногда бывает нужно создать свои собственные выражения. В качестве примера пользовательского выражения воссоздадим формулу для джоулева нагрева в модели электрической шины, к которой приложено напряжение в 20 мВ.

Откройте Библиотеку приложений (*File > Application Libraries, Файл > Библиотеки Приложений*) и выберите *COMSOL Multiphysics > Multiphysics > busbar (COMSOL Multiphysics > Мультифизическое моделирование > Электрическая шина)*. Это моделирование показывает нагрев электрической шины, вызванный протекающим через нее электрическим током.

Математическое описание джоулева нагрева — это рассеиваемая мощность $Q = \vec{J} \cdot \vec{E}$, где \vec{J} — это плотность тока, а \vec{E} — электрическое поле.

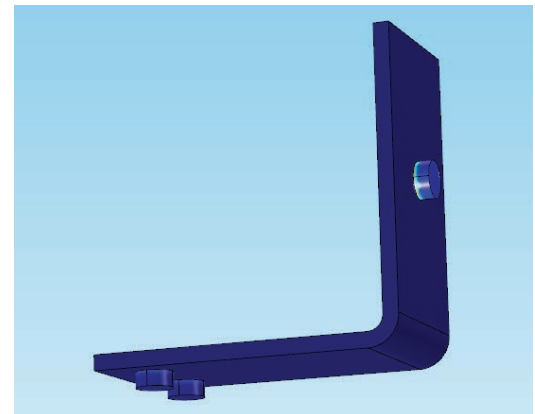
Эквивалент этой физической величины в COMSOL — плотность рассеиваемой мощности, которая обозначается *ec.Qrh* (префикс *ec* относится к интерфейсу Electric Currents (Электрические токи) в этой модели, а сама величина называется Resistive losses, (Реостатные потери). Эти величины можно найти, щелкнув Replace Expression (Заменить выражение) в настройках графика, и проведя поиск в поле *Type filter text (Введите текст фильтра)*:



Добавьте группу 3d-графиков в узел Results (Результаты) модели электрической шины и добавьте

график скалярного поля к этой группе. В этом узле мы изучим несколько различных величин. Для начала постройте выражение *ec.Qrh*.

На первый взгляд, в электрической шине мало реостатных потерь, и они в основном сосредоточены в одном болте в задней части.



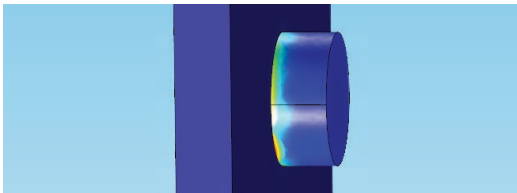
Если щелкнуть электрическую шину в любом месте, вы вызовете таблицу Evaluation 3D (Трехмерная оценка) ниже графического окна. В таблице будут показаны координаты точки, которую вы щелкнули, и величина реостатных потерь в этой точке. Они будут варьироваться от очень малых — порядка единиц — до тысяч ватт на кубический метр ($\text{Вт}/\text{м}^3$); но так как основная часть шины нагревается значительно меньше, чем болт, градиент цвета кажется практически однородным на большом диапазоне значений.

x	y	z	Value
0.10270	-0.030059	0.051780	3082915
0.071804	-0.028356	0.0050000	7073.3
0.10000	-0.025490	0.013108	6835.8

Скалярное произведение, соответствующее джоулеву нагреву, представляется суммой $\vec{J} \cdot \vec{E} = J_x E_x + J_y E_y + J_z E_z$. Эквивалентное этому выражение в обозначениях COMSOL *ec.Jx*ec.Ex + ec.Jy*ec.Ey + ec.Jz*ec.Ez*. Если вы постройте это выражение, график будет выглядеть точно так же, как график выражения *ec.Qrh*.

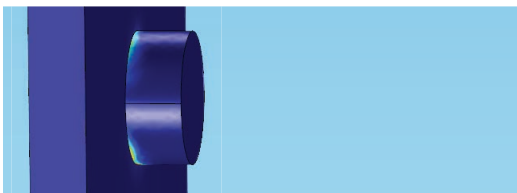
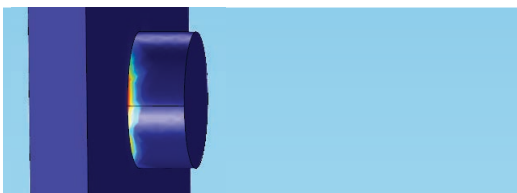
СОВЕТ

Сочетание клавиш *Ctrl + Пробел* вызывает функцию автодополнения, открывая меню *Replace Expression (Заменить выражение)* со списком величин, в названиях которых содержатся введенные в поле *Expression (Выражение)* символы.



Мы можем легко разбить это выражение на слагаемые и посмотреть, какой вклад вносит каждое слагаемое. Замените выражение на произведение тока и электрического поля в направлении x ($ec.Jx*ec.Ex$); график выглядит почти так же, как раньше.

Однако если мы заменим выражение на $ec.Jy*ec.Ey$, мы увидим, что рассеиваемая мощность, связанная с направлением уменьше (в верхней части на иллюстрации ниже); большая часть рассеивается у заднего болта, но меньше, чем рассеиваемая мощность, связанная с направлением x . Еще меньше рассеиваемая мощность, связанная с направлением z (в нижней части на иллюстрации ниже):



Теперь постройте норму плотности тока, $ec.normJ$. Вы снова увидите, что ток сосредоточен вокруг заднего болта.

Отключите узел этого графика скалярного поля и добавьте второй график скалярного поля к группе графиков. Постройте норму электрического поля, $ec.normE$. И в этом случае электрическое поле вновь сосредоточится внутри болтов. Джоулев нагрев описывается скалярным произведением этих двух величин, и следовательно, график покажет максимум нагрева в области болта.

ПРИМЕЧАНИЯ

Имена выражений следуют шаблону **interface.quantity (интерфейс.величина)**. Например, $ec.Jx*ec.Ex$ обозначает произведение x -компонент векторов плотности тока и электрического поля, которые определены в интерфейсе физики Electric Currents (Электрические токи). В программный пакет COMSOL® встроены многие другие математические операторы и функции, список которых приводится в разделе *Global and Local Definitions (Глобальные и локальные определения)* в руководстве [COMSOL Multiphysics Reference Manual](#) из документации COMSOL. Вы также можете создавать свои переменные и операторы и вводить их вручную, следя за тем, чтобы величина, которую вы строите, была корректно определена.

Отключите график нормы электрического поля и добавьте векторный объемный график. По умолчанию строится график плотности тока. Вы можете использовать приведенные ниже настройки графика или настроить их в соответствии с собственными предпочтениями.

▼ Expression + ▼ 🚩 ▼

x component:

A/m²

y component:

A/m²

z component:

A/m²

Description:

▶ Title

▼ Arrow Positioning

— x grid points

Entry method: Number of points ▼

Points:

— y grid points

Entry method: Number of points ▼

Points:

— z grid points

Entry method: Number of points ▼

Points:

▼ Coloring and Style

Arrow type: Arrow ▼

Arrow length: Proportional ▼

Arrow base: Tail ▼

Scale factor:

СПЕЦИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ПОСТОБРАБОТКИ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ В COMSOL MULTIPHYSICS

COMSOL 3

В результате векторный график показывает силу тока в разных точках электрической шины. Векторный график на иллюстрации ниже показывает цветом величину нормы электрического поля, $es.normE$.

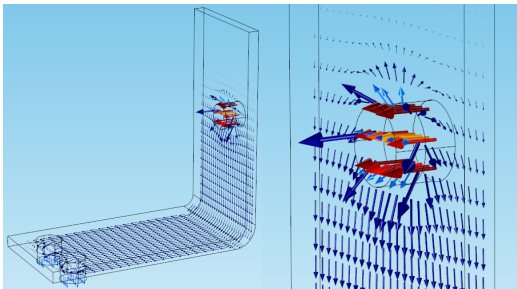


График подтверждает, что болты оказались областями с максимальной плотностью тока, и эти области будут нагреваться сильнее всего. Стрелки также показывают, как показывали и графики джоулева нагрева, что большая часть реостатных потерь связана с направлением x .

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОИЗВОДНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ДЛЯ ПРОВЕРКИ МОДЕЛИ

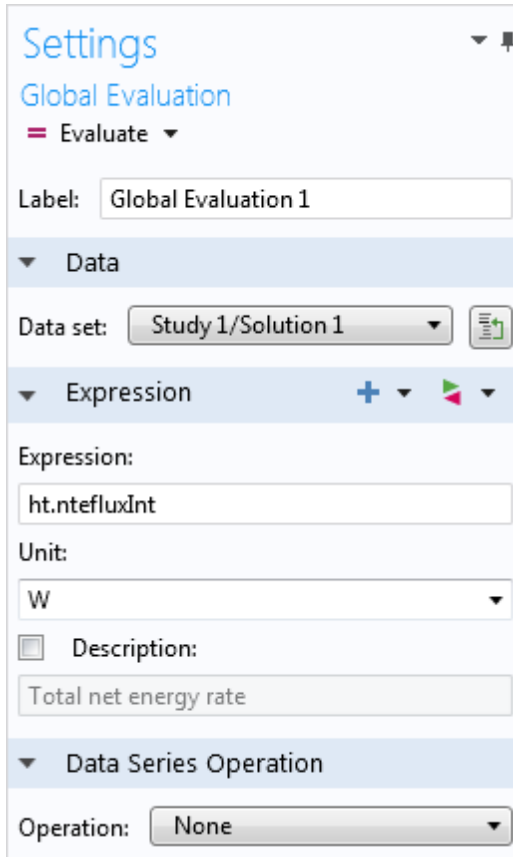
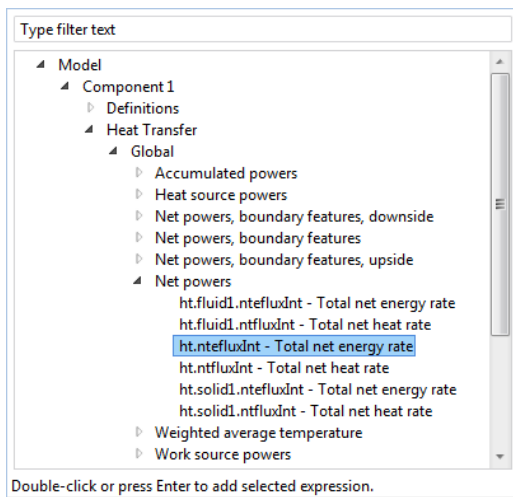
В руководстве *Основы постобработки и визуализации в COMSOL Multiphysics* мы кратко коснулись производных значений. Производные значения могут не только помочь вам проанализировать показатели эффективности, специфичные для вашего приложения, но и рассказать многое о сетке, с которой вы работаете. Во время проверки точности модели, помимо прочего, следует убедиться, что сетка достаточно мелкая, чтобы описать поведение системы. Для этого хорошо подходят Global Evaluations (Глобальные вычисления), одни из нескольких производных значений, доступных в среде COMSOL.

Откроем модель радиатора, которая использовалась в первом руководстве. Если у вас установлен модуль Heat Transfer (Теплопередача) или CFD (Вычислительная гидродинамика), откройте модель радиатора, выбрав меню File > Application Libraries > Heat Transfer Module > Tutorials, Forced and Natural Convection (Файл > Библиотеки приложений > Модуль Теплопередача > Учебные модели, вынужденная и свободная конвекция) или File > Application Libraries > CFD Module > Non-Isothermal Flow (Файл > Библиотеки приложений > Модуль Вычислительная гидродинамика > Неизотермический поток).

Если свойства материалов и граничные условия заданы правильно, важным показателем точности модели является сохранение массы и энергии. В узле Results (Результаты), раскройте узел Derived Values (Производные значения). После того как вы изучите существующие подузлы, удалите или отключите их,

чтобы мы могли продемонстрировать весь процесс с чистого листа. Затем добавьте два глобальных вычисления через контекстное меню.

Первое глобальное вычисление даст нам поток мощности, протекающий через устройство. В настройках перейдите к *Replace Expression > Model > Component 1 > Heat Transfer > Global > Net powers* (Заменить выражение > Модель > Компонент 1 > Теплопередача > Глобальные величины > Отбираемая мощность) и выберите *ht.ntefluxInt* — полная отбираемая мощность.

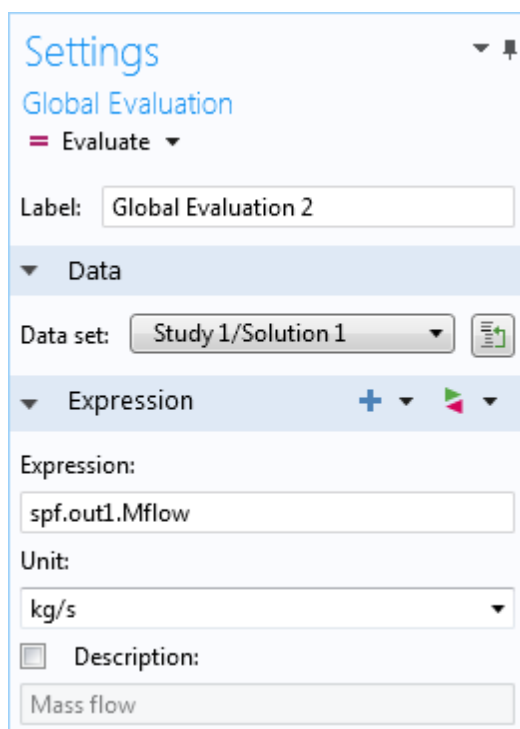


ОБНОВЛЕНИЕ БИБЛИОТЕК

Приведенная в этом руководстве информация подразумевает, что вы пользуетесь обновленными Библиотеками приложений COMSOL. Чтобы обновить их, выберите пункт меню File > Help > Update COMSOL Application Library (Файл > Справка > Обновить Библиотеку приложений COMSOL). Затем щелкните Find Applications (Найти приложения) и Uncheck all (Снять все) на следующем экране. Перейдите к модели, которую вы ищете, выберите ее и щелкните Download (Загрузить).

Щелкните Evaluate (Вычислить). Под графическим окном откроется таблица, показывающая значение полной отбираемой мощности: 0,99996 Вт. Так как тепловой поток был задан равным 1 Вт, мы видим, что энергия сохраняется с приемлемым уровнем точности.

Второе глобальное вычисление даст нам поток массы. В настройках Global Evaluation 2 (Глобальное вычисление 2) перейдите к *Replace Expression > Model 1 > Component 1 > Laminar flow (Заменить выражение > Модель 1 > Компонент 1 > Ламинарный поток)* и выберите *spf.out1.Mflow — поток массы*.



Щелкните Evaluate (Вычислить). Результат $2,709e^{-5}$ кг/с. Перемножив входную скорость потока (5 см/с), плотность жидкости ($1,2754$ кг/м³) и площадь входного канала (3 см на 1,5 см), мы получим значение $2,8e^{-5}$ кг/с; это свидетельствует о том, что закон сохранения массы хорошо выполняется.

Так как эти вычисления совпали с ожидаемыми результатами, мы знаем, что сетка достаточно мелкая, и модель точна при изучаемых условиях эксплуатации.

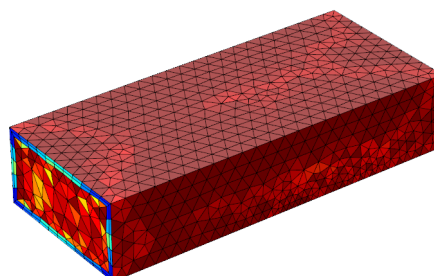
ГРАФИКИ ДЛЯ ОТОБРАЖЕНИЯ СЕТКИ

Качество постобработки, как и точность решения, сильно зависят от размера и качества элементов сетки. Слишком крупная сетка даст слишком мало точек на графике, а искаженные элементы повлияют

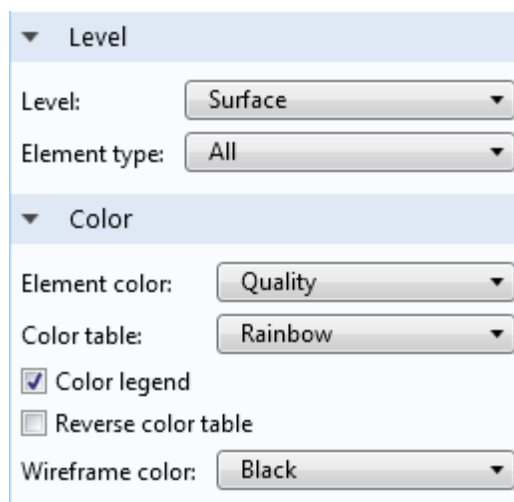
на геометрическое и численное представление вашей модели. В обоих случаях точность будет низкой. Мы уже обсуждали, как проверить, достаточно ли мелка сетка, с помощью производных значений. Теперь посмотрим на качество сетки.

Для того, чтобы определить качество сетки и визуализировать элементы геометрии модели, вы можете создать график для отображения сетки. Для его построения не требуется решать модель.

В модели радиатора в узле Component 1 (Компонент 1) щелкните правой кнопкой мыши узел Mesh (Сетка) и выберите Plot (Построить). Вы увидите примерно следующее:



Прилагаемая цветовая шкала от 0 до 1 по умолчанию показывает качество элементов. Вы можете также задать цвет, показывающий размер элемента, задать однородный цвет или отключить его.



Качество сетки показывает, насколько ячейки сетки изотропны. Элемент с равными длинами ребер, например двумерный равносторонний треугольник, характеризуется качеством, равным единице. Полностью сплюснутый треугольник с нулевой площадью будет характеризоваться нулевым качеством. Такие же геометрические формулы есть и для трехмерных тетраэдрических элементов. Для других типов элементов: параллелепипедов или призм — качество несет другой смысл.

СПРАВКА

Краткие сведения о глобальных вычислениях приведены в разделе *Data Sets, Derived Values, and Tables (Наборы данных, производные значения и таблицы)* руководства [Основы постобработки и визуализации в COMSOL Multiphysics®](#). Дополнительная информация о производных значениях и интерпретации результатов содержится в подразделе *Операции для интерпретации результатов* в конце этого раздела

СОБЕТ

Иногда сетку в некоторых областях нужно сделать мельче, особенно если в этих областях присутствует большой градиент исследуемой величины. Подстройку сетки можно произвести с помощью инструмента *Adaptive Mesh Refinement (Адаптивное измельчение сетки)*, который анализирует ошибки решения и оптимизирует сетку соответствующим образом. Подробнее об отображении сетки на графике рассказывается в подразделе *Комбинирование графиков* раздела *Советы и рекомендации для опытных пользователей*.

ДЕФОРМАЦИИ, ВЫРАЖЕНИЯ ДЛЯ ВЫСОТ И МАСШТАБИРОВАНИЕ

Ряд методов позволяет вам создать графики, на которых изменения модели: смещение, изгиб или сжатие — зрительно преувеличены. Это позволяет визуализировать деформации, которые в масштабе 1:1 были бы незаметны.

Для демонстрации этих методов мы используем две модели: пьезоакустический преобразователь и микрзеркало. Возможно, вам не придется работать с такими моделями, но эти же методы могут быть применены к любой мультифизической модели (например, смещения нелинейных или пьезоэлектрических материалов в механике конструкций могут быть построены так же, как и для упругих материалов).

Если у вас установлен модуль MEMS (Микроэлектромеханические системы), перейдите к меню *File > Application Libraries > MEMS Module > Actuators (Файл > Библиотеки приложений > Модуль MEMS > Приводы)* и откройте модель микрзеркала. Эта модель представляет собой управляемое электростатическим способом микрзеркало. Такие оптические полупроводники часто играют роль отражателей, например в цифровой кинематографии.

Механический анализ в трех измерениях позволяет установить напряжения и деформации, необходимые для того, чтобы поднять зеркало на заданную высоту. Анализ проводится для двух устройств: со стальными и алюминиевыми пластинами, — и результаты показывают реакцию зеркала на разные величины предварительного напряжения.

Если вы следуете нашему руководству, добавьте группу 3D-графиков с графиком скалярного поля к узлу Results (Результаты). В поле для выражения автоматически подставляется выражение для смещения, так что сразу можно щелкнуть Plot (Построить).

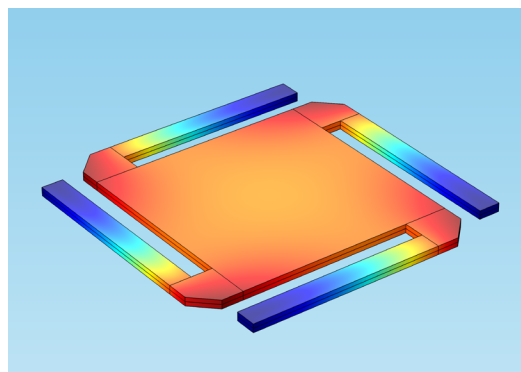
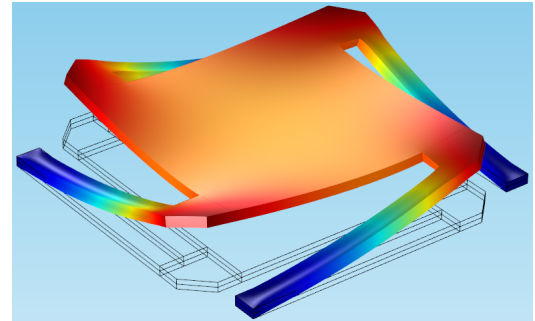


График показывает деформацию в разных точках микрзеркала. Давайте сделаем ее чуть более реалистичной, чтобы лучше изобразить сдвиг.

Добавьте к графику скалярного поля деформацию (щелкните правой кнопкой мыши Surface 1 (Поверхность 1) и выберите *Deformation (Деформация)*). Программа автоматически подставляет (u, v, w) и строит компоненты поля смещения. Установите масштабный коэффициент, равный 1, и щелкните Plot (Построить).



Теперь поверх граней, показывающих исходное положение микрзеркала, мы видим деформацию.

Взглянем теперь на пьезоакустический преобразователь. Эта модель доступна в разделе меню *File > Application Libraries > Acoustics Module > Piezoelectric Devices (Файл > Библиотеки приложений > Модуль Акустика > Пьезоэлектрические устройства)*, если у вас установлен модуль Акустика.

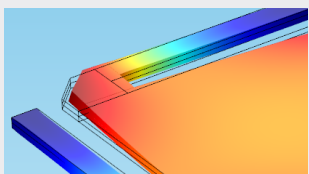
Пьезоакустические преобразователи преобразовывают электрический ток в давление звука и наоборот. Их используют в самых разнообразных устройствах и приложениях, например в ультразвуковом оборудовании, сонарах, микрофонах и при построении изображений биологических объектов.

Преобразователь представляет собой прямоугольник из пьезоэлектрического материала, закрепленный с одной стороны. Воздушная область представлена одной четвертью круга. Мы визуализируем давление звука в воздухе при приложении к преобразователю напряжения в 100 В.

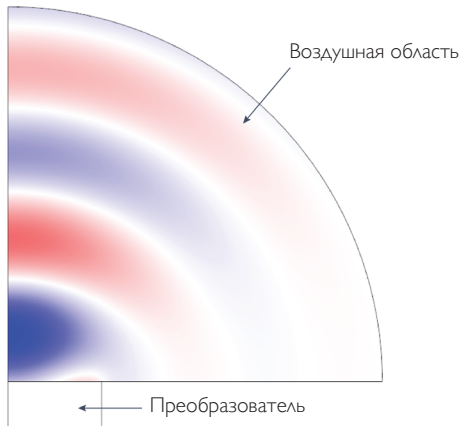
Создайте новую группу 2D-графиков и добавьте к ней график скалярного поля. Перейдите к *Replace Expression > Model > Component 1 > Pressure Acoustics, Frequency Domain > Pressure and sound pressure level (Заменить выражение > Модель > Компонент 1 > Скалярная акустика, частотная область > Давление и уровень давления звука)* и выберите *acpr.p_t* — поле полного давления звука как выражение для графика.

СОВЕТ

Вы также можете поэкспериментировать с x -, y - и z -компонентами, чтобы увидеть, как микрзеркало деформируется в разных направлениях. На иллюстрации ниже показаны деформации изгиба (только в направлениях x и y), где компонента в направлении z задана равной нулю.



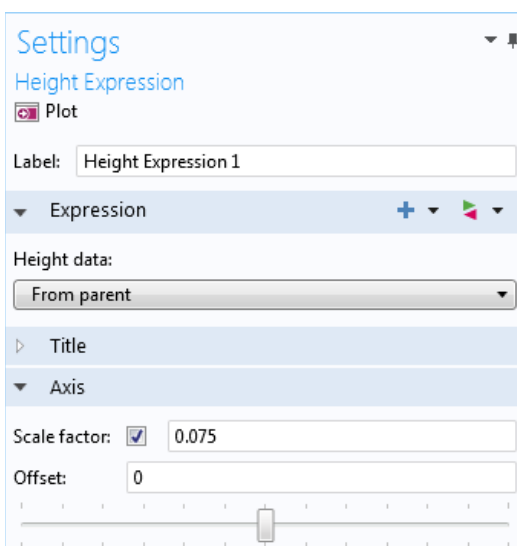
На иллюстрации ниже выбрана цветовая схема WaveLight с симметричным диапазоном:



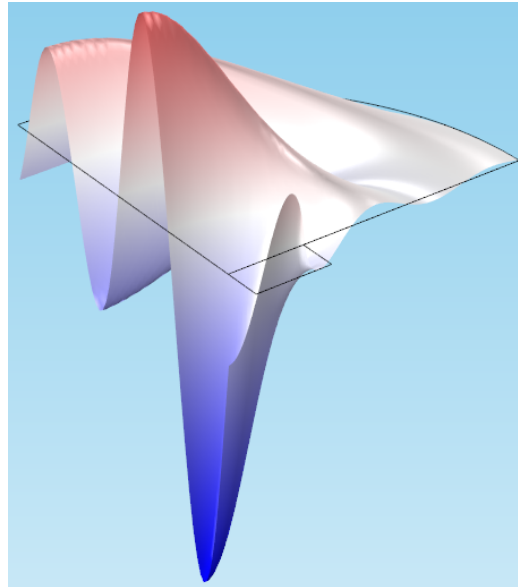
Мы видим поле давления в воздушной области, убывающее вдаль от преобразователя. Но для того, чтобы пристальнее изучить эти волны, добавим специальный тип деформации, который называется выражением для высоты и который позволит нам полнее визуализировать поле давления в трех измерениях.

Выражения для высоты особенно полезны в тех случаях, когда результаты имеют волновую природу или когда скалярные или векторные величины изменяются в основном лишь в одном направлении. В отличие от остальных деформаций, которые требуют больше настроек, выражения для высоты — простой способ визуализировать пики и впадины.

Щелкните правой кнопкой мыши узел Surface (Поверхность) и выберите *Height Expression* (Выражение для высоты). Данные будут автоматически собраны из родительского узла, из графика давления звука.



На вкладке Scale (Масштаб) задайте масштабный коэффициент, равный 0,1 или менее (вы поймете, зачем это нужно, если зададите большее значение, например 1). Затем щелкните Plot (Построить).



ОПЕРАЦИИ ДЛЯ ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ

Чтобы оценить точность вашей модели, понять физические эффекты и проверить конструкцию устройства, нередко требуется решить модель несколько раз. Это может быть вычисление средних значений, поиск локальных максимумов и минимумов какой-либо векторной величины или сверка результатов моделирования с экспериментальными данными.

Давайте посмотрим на операции, которые можно совершить с наборами данных и производными значениями.

СРЕДНИЕ ЗНАЧЕНИЯ

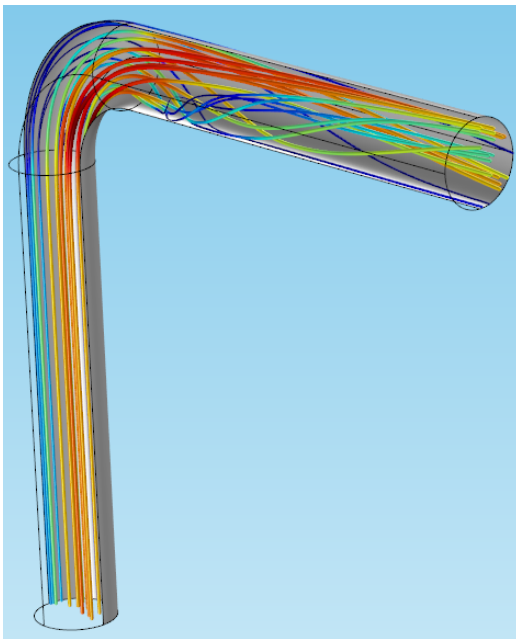
Можно вычислить средние по набору областей значения для какого-либо набора данных. Для демонстрации мы посмотрим на модель турбулентного потока в трубе, хотя эти методы применимы ко многим типам моделей. Если у вас установлен модуль CFD (Вычислительная гидродинамика), откройте решение модели колена трубы из меню *File > Application Libraries > CFD Module > Single-Phase Benchmarks* (Файл > Библиотеки приложений > Модуль Вычислительная гидродинамика > Однофазные эталонные модели).

Эта модель потока в прямом колене трубы использует модель турбулентности *k- ω* . В модели два компонента; на втором из них мы остановимся подробно.

СПРАВКА

Вводная информация про наборы данных и производные значения приведена в разделе *Data Sets, Derived Values, and Tables* (Наборы данных, производные значения и таблицы) руководства [Основы постобработки и визуализации в COMSOL Multiphysics®](#).

Взгляните на группу графиков *Pressure (spf2)*, которая содержит графики скорости и давления текучей среды внутри трубы. На иллюстрации ниже мы видим линии тока, показывающие скорость воды. Этот график показывает зону сепарации после поворота и завихрения, вызванные центростремительной силой.

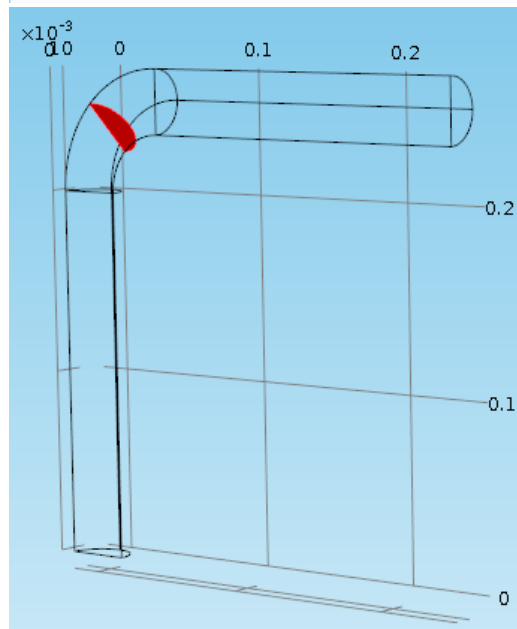
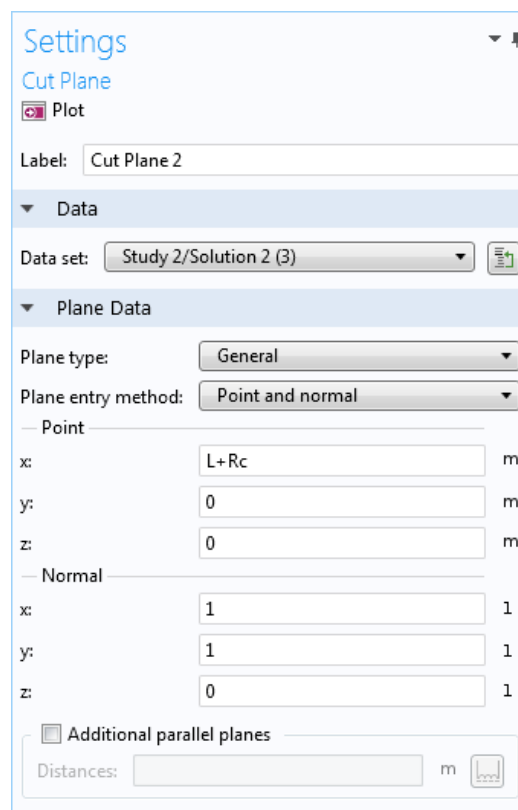


Но допустим, к примеру, что мы хотим определить, какой насос будет необходим для заданной скорости потока, или узнать, какой вклад вносит поворот в общее падение давления. Или, предположим, что мы хотим измерить давление в определенной плоскости, чтобы сверить результаты моделирования с проектными корреляциями.

Для этого мы можем создать секущую плоскость в колене, чтобы измерить, к примеру, падение давления между входным каналом и коленом и вычислить результат, используя среднее по поверхности.

Хотя некоторые наборы данных и вычисления уже готовы, мы начнем с нуля для демонстрации метода.

Щелкните правой кнопкой мыши Data Sets (Наборы данных) и выберите *Cut Plane (Секущая плоскость)*. Положение плоскости определяется длиной входной трубы, L , и радиусом поворота, R_c . Чтобы сориентировать плоскость перпендикулярно стенкам трубы посередине поворота, задайте вектор нормали, равный $(1, 1, 0)$.



Щелкните правой кнопкой мыши узел Derived Values (Производные значения) и выберите *Average > Surface Average (Средние значения > Среднее по поверхности)*. В качестве набора данных укажите решение на секущей плоскости, которую вы только что создали. В поле *Expression (Выражение)*, введите p_2 (это выражение для давления, используемое вторым компонентом этой модели).

Щелкните Evaluate (Вычислить). Появившаяся таблица покажет давление, примерно 1970 Па.

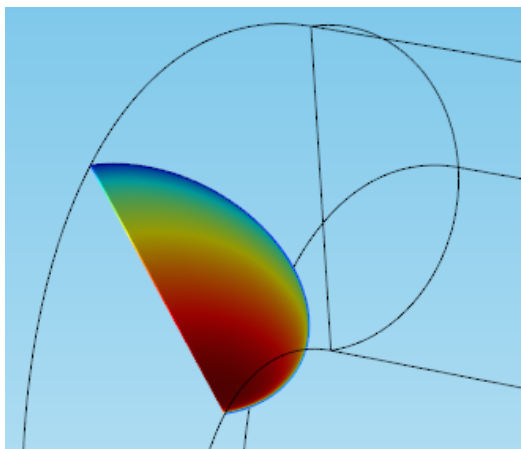
visc_fact	Pressure (Pa)
1	1970.0236095933185

Мы найдем давление во входном канале, используя другое среднее по поверхности. Добавьте второе среднее по поверхности и выберите в качестве набора данных Study 2/Solution 2 (3), где содержится решение второго компонента.

Затем выберите входную границу (границу 1) и вычислите выражение p_2 еще раз.

visc_fact	Pressure (Pa)
1	3444.152484074552

Сравнивая эти два вычисления, мы показали, что падение давления между входным каналом и серединой поворота довольно велико — почти 1500 Па. Если мы построим на секущей плоскости величину скорости потока, мы также увидим, что скорость очень быстро меняется в направлении от внешнего радиуса поворота к внутреннему. Это объясняет падение давления.



КОНТУРНЫЕ ГРАФИКИ

Контурные графики — один из самых быстрых и мощных способов проверить, выдержит ли устройство целевые условия эксплуатации, например будет ли в какой-то области устройства температура превышать пороговые значения или будет ли напряжение превышать предел прочности материала.

Мы проверим его на модели шкива, использованной в руководстве [Основы постобработки и визуализации в COMSOL Multiphysics](#) в которой мы познакомили читателей с решениями, секущими плоскостями и таблицами. Откройте модель, выбрав *File > Application Libraries > COMSOL Multiphysics > Structural Mechanics > stresses in pulley* (Файл > Библиотеки приложений > COMSOL Multiphysics > Механика конструкций > Напряжения в шкиве).

В узле Results (Результаты) есть список двумерных и одномерных графиков. Добавьте новую группу двумерных графиков и добавьте к ней контурный график. По умолчанию выражение будет описывать смещение, испытываемое шкивом на скорости вращения 9000 об./мин. Измените выражение на *solid.mises*, чтобы увидеть напряжение по Мизесу. На вкладке Coloring and Style (Цвета и стиль) задайте тип контура *Filled* (С заполнением).

Data

Data set: Study 1/Solution 1

Parameter value (n): 9000

Expression

Expression: solid.mises

Unit: MPa

Description: von Mises stress

Name	Value	Description
solid.refpntx	0	Reference point for...
solid.refpnty	0	Reference point for...
solid.refpntz	0	Reference point for...

Title

Levels

Coloring and Style

Contour type: Filled

Fill surfaces outside of contour levels

Coloring: Color table

Color table: Rainbow

Color legend

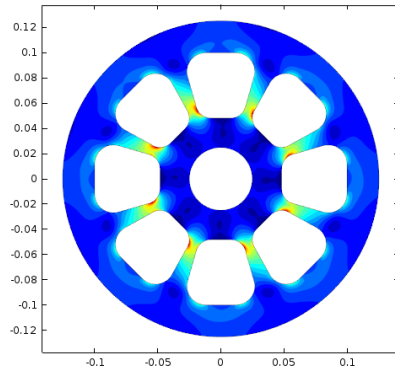
Reverse color table

Symmetrize color range

НАПРЯЖЕНИЕ ПО МИЗЕСУ

Выражение для графика *solid.mises*, соответствующее напряжению по Мизесу, находится в меню *Replace Expression > Model 1 > Component 1 > Solid Mechanics > Stress* (Заменить выражение > Модель 1 > Компонент 1 > Механика твердого тела > Напряжение).

Цвет на контурном графике ясно показывает области высоких и низких напряжений; контур с наибольшим значением напряжения можно использовать, чтобы определить, выдержит ли шкив.



Чтобы увидеть точные значения на каждой границе контура, скопируйте этот график. В новом графике измените тип контура на *Lines* (Линии) и установите флажок в поле *Level labels* (Метки уровней).

Coloring and Style

Contour type: Lines

Level labels

Precision: 4

Label color: Black

Coloring: Color table

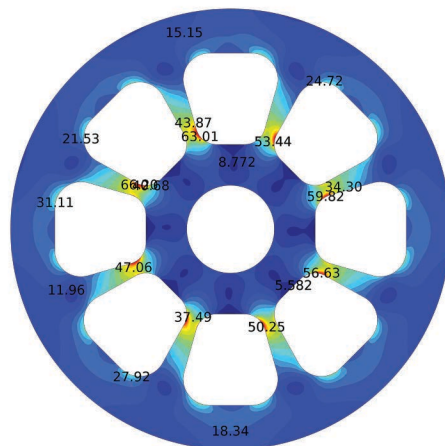
Color table: Rainbow

Color legend

Reverse color table

Symmetrize color range

Затем щелкните Plot (Построить).



Новый график показывает значение вдоль каждого контура, с максимальным напряжением в самой узкой области спиц (около 63 МПа). Эти метки очень полезны, чтобы бегло посмотреть на данные; если напряжение в какой-то области будет слишком большим, вы это сразу заметите.

ОБЪЕДИНЕНИЕ

Функция Join (Объединить) соединяет решения из двух наборов данных, позволяя вам их сравнить. Это поможет вам визуализировать разницу между двумя решениями, создать сводку с несколькими решениями или посмотреть, как две разные сетки влияют на результат.

Мы снова воспользуемся моделью радиатора. В модели, показанной ниже, мы провели параметрический анализ: вычислили исследования при средней входной скорости, изменяющейся в диапазоне от 0,05 м/с до 0,5 м/с с шагом 0,05 м/с. (Эти значения приведены здесь только для примера и не обязательно похожи на типичные значения скоростей в современных охлаждающих установках.)

Объединенные решения можно добавить к узлу Data Sets (Наборы данных). Мы возьмем новое исследование и сравним данные для двух разных скоростей. Первый набор данных — для скорости $U_0 = 0,05$ (где U_0 — это средняя входная скорость воздуха, продуваемого через радиатор). Второй набор данных — такой же, но для скорости $U_0 = 0,5$. В качестве метода объединения данных выберем *Difference* (Разность).

Settings

Join

Plot

Label: Join 1

Data 1

Data: Study 1/Solution 1 (2)

Solutions: One

Parameter value (U_0): 0.05

Data 2

Data: Study 1/Solution 1 (2)

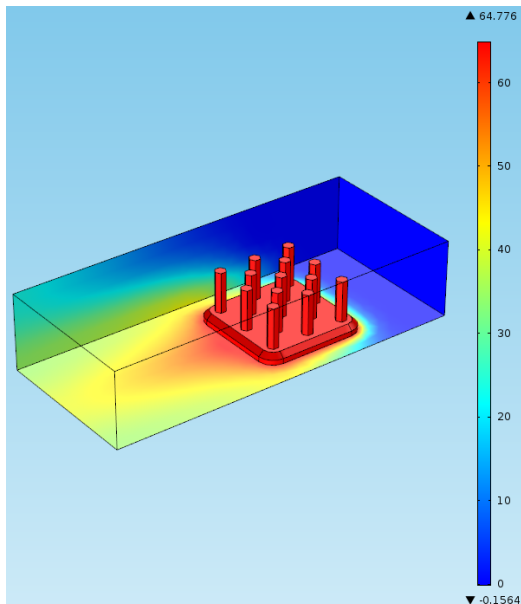
Solutions: One

Parameter value (U_0): 0.5

Combination

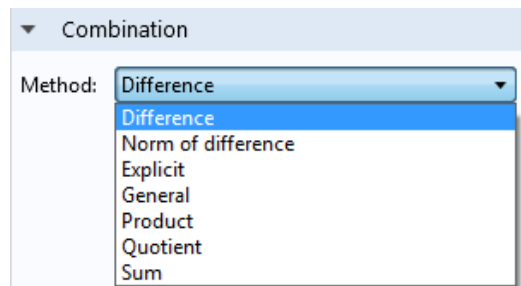
Method: Difference

Если мы создадим новую группу 3D-графиков на основе объединенных данных Join 1, мы обнаружим, что низкая скорость потока ($U0 = 0,05 \text{ м/с}$) приводит к температуре на 64 К выше, чем высокая скорость потока.



Это означает, как мы и ожидали, что скорость потока очень сильно влияет на охлаждение, и моделирование позволяет численно оценить этот эффект. Для подобного устройства на основе результатов моделирования можно определить оптимальную скорость потока воздуха от вентилятора, изучив результаты распределения температуры при разных скоростях потока.

Наконец, заметим, что из всех методов объединения данных, доступных для оператора Join (Объединить), два заслуживают особого внимания: *General* (Общий) и *Explicit* (Явный). Большинство методов объединения данных — те или иные варианты метода *General* (Общий). Как если бы вы смешивали ингредиенты для готовки, объединенное решение не содержит информации об отдельных частях после объединения; это ограничивает пользователя одной независимой переменной для каждого решения. Если провести параллель с обычными функциями, мы можем вычислить $f(v)-g(v)$ или $f(u)-g(u)$, но не $f(u)-g(v)$.



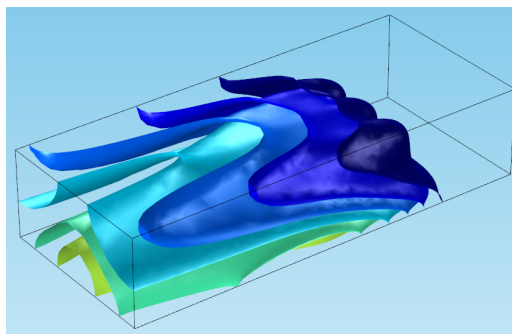
Метод *Explicit* (Явный) позволяет реализовать операции объединения, сохраняя данные отдельных исходных наборов — они остаются доступными, например для построения графиков на основе объединенного решения. COMSOL создает два новых оператора, которые получают доступ к величинам из наборов данных, так что вы сможете реализовать функцию $f(u)-g(v)$ с методом *Explicit* (Явный), если только u — это допустимая переменная для функции f , и v — это допустимая переменная для функции g .

ФИЛЬТРЫ

Иногда геометрия модели не позволит вам заглянуть внутрь этой модели. Однако в COMSOL есть легкий способ снять с нее «верхний слой» и заглянуть внутрь. Эта функция называется фильтром, и ее можно добавить к двумерным и трехмерным графикам (кроме графиков линий тока).

Фильтры — более простой и вычислительно легкий, если сравнить с заданием нескольких наборов данных с выделениями, способ ограничить отображаемое на графике выражение заданным диапазоном. В процессе интерпретации результатов моделирования это поможет вам увидеть физические эффекты с близкого расстояния и без помех.

В модели радиатора группа 3d-графиков *Isothermal Contours* (ht) содержит графики изоповерхностей, отображающие температуру. В настройках графика изоповерхностей на вкладке *Level* (Уровень) число уровней задано равным 10.



Эта иллюстрация показывает изоповерхности температуры. Но мы не видим сам радиатор.

СОВЕТ

Как мы продемонстрировали, не обязательно объединять данные двух разных решателей; вы можете объединять наборы данных, чтобы изучить одно решение, полученное при двух разных значениях параметра.

СПРАВКА

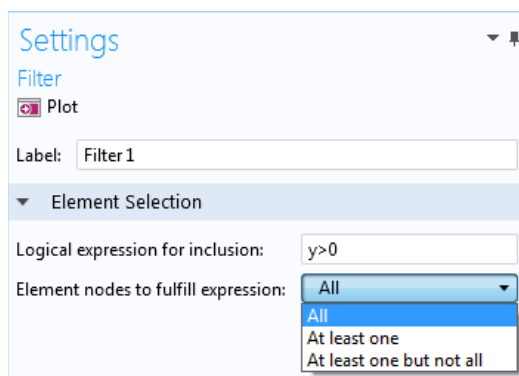
Краткое объяснение поверхностей уровня приведено в разделе *Plot Types* (Типы графиков) руководства [Основы постобработки и визуализации в COMSOL Multiphysics](#).

В таком случае, чтобы добавить решение, содержащее только половину геометрии, нам придется создать секущую плоскость и аккуратно разметить все выделения. Вместо этого мы воспользуемся фильтром.

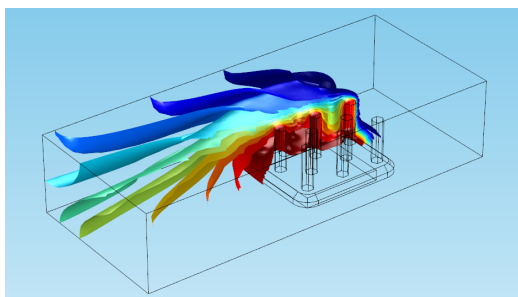
Щелкните правой кнопкой мыши по узлу графика изоповерхности и выберите *Filter* (Фильтр). В настройках фильтра вы можете выбрать логическое выражение, определяющее, какую область поверхности графика следует отображать. Например, если мы зададим выражение $y > 0$, мы исключим все области изоповерхности, которые лежат в отрицательном направлении оси y нашей координатной системы.

Выпадающий список *Element nodes to fulfill expression* (Узлы элементов, в которых проверяется выражение) предлагает выбрать, какие элементы сетки следует включать; по умолчанию включаются все элементы — вариант *All* (Все). Другие варианты:

- *At least one* (Хотя бы один) отобразит элементы хотя бы для одного узла (а, возможно, и для всех узлов) которых логическое выражение истинно
- *At least one but not all* (Хотя бы один, но не все) отобразит элементы, хотя бы для одного узла (но не для всех узлов) которых логическое выражение истинно

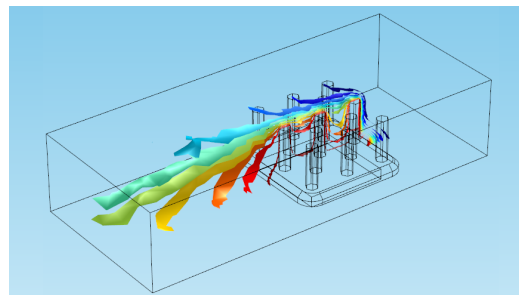


Пока оставьте вариант *All* (Все) и щелкните Plot (Построить).



Теперь мы видим изоповерхности температуры в области $y > 0$.

Выберите в списке *Element nodes to fulfill expression* (Узлы элементов, в которых проверяется выражение) вариант *At least one but not all* (Хотя бы один, но не все).




При этом будет отображаться область вблизи логического выражения, то есть, отображены будут элементы, которые пересекают линию $y=0$ так, что некоторые узлы не удовлетворяют условию $y > 0$. Это может быть особенно полезно для построения графиков вблизи границ с резким перепадом значений.

На этом мы заканчиваем демонстрацию методов постобработки для интерпретации результатов; мы выделяли отдельные части решения, вычисляли значения переменных в заданных точках и объединяли наборы данных. Далее мы расскажем об инструментах управления видом и камерой в среде COMSOL.

ИНСТРУМЕНТЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

УПРАВЛЕНИЕ ВИДОМ И КАМЕРОЙ

Узел View (Вид) — мощный инструмент настройки отображения объектов в графическом окне. Расположенные в узле Definitions (Определения) настройки вида помогут вам задать нужный угол зрения и стиль отображения. Здесь вы можете добавить, повернуть или приглушить источники освещения, задать цвета и расположение, скрыть или отобразить области модели. Если провести параллель с театром, узел View (Вид) расставляет декорации на сцене, пока занавес не поднят.

Чтобы открыть узел View (Вид), относящийся к конкретной группе графиков, щелкните узел группы графиков (например, *3D Plot Group 1*) и перейдите на вкладку Plot Settings (Настройки графика). В поле *View (Вид)* можно применить разные настройки вида к группе графиков или напрямую открыть настройки вида, нажав кнопку *Go to Source (Перейти к коду)* рядом с выпадающим списком .

УПРАВЛЕНИЕ КАМЕРОЙ И СОЧЕТАНИЯ КЛАВИШ

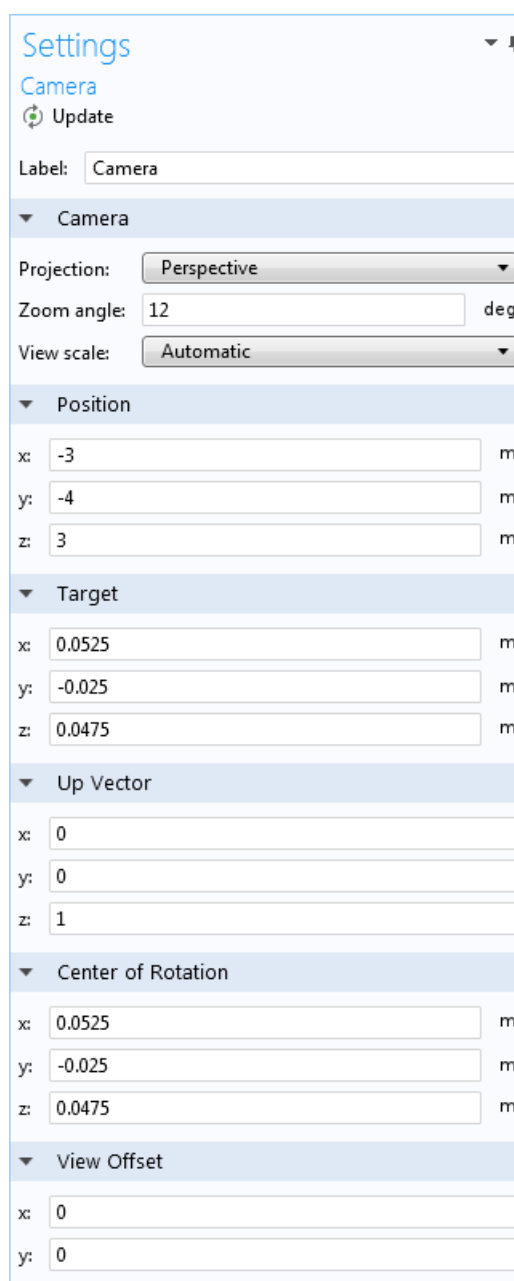
В узле View (Вид) расположены настройки камеры. По аналогии с фото- или видеосъемкой правильное положение камеры позволит вам подчеркнуть характерные особенности и получить прекрасный кадр. В COMSOL существуют сочетания клавиш для управления камерой, и мы приведем несколько полезных советов, которые позволят получить удачные кадры.

Откройте любую модель и щелкните узел Camera (Камера) в узле View 1 (Вид 1). В настройках камеры можно задать угол зрения, положение, масштаб и перспективу камеры. Вы можете представить себе настоящую фотокамеру, стоящую перед графическим окном; вы смотрите на объект прямо через видоискатель камеры.

Это означает, что перемещаясь по графическому окну, вы смещаете камеру, а не саму геометрию — кроме случаев, когда производится операция с геометрией, например жесткое преобразование.


На следующих страницах показаны часто используемые для ориентации камеры сочетания клавиш.

Иллюстрации в этом разделе показывают сочетания клавиш на примере модели электрической шины (*File > Application Libraries > COMSOL Multiphysics > Multiphysics > busbar (Файл > Библиотеки приложений > COMSOL Multiphysics > Мультифизические модели > Электрическая шина)*), однако мы рекомендуем попрактиковаться с сочетаниями клавиш на ваших собственных моделях. Вот как выглядят настройки камеры:



Settings

Camera

 Update

Label:

Camera

Projection:

Zoom angle: deg

View scale:

Position

x: m

y: m

z: m

Target

x: m

y: m

z: m

Up Vector

x:

y:

z:

Center of Rotation

x: m

y: m

z: m

View Offset

x:

y:

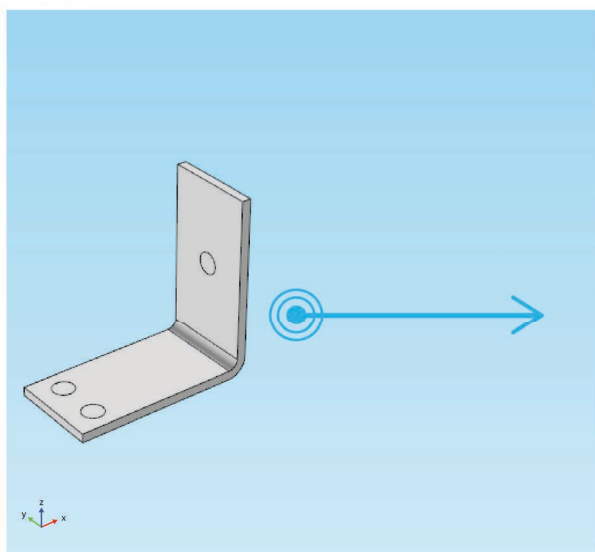
ПРИМЕЧАНИЕ

Для пользователей Mac: третье и шестое сочетания будут работать только на двухкнопочной мыши или на мыши с центральным колесом прокрутки.

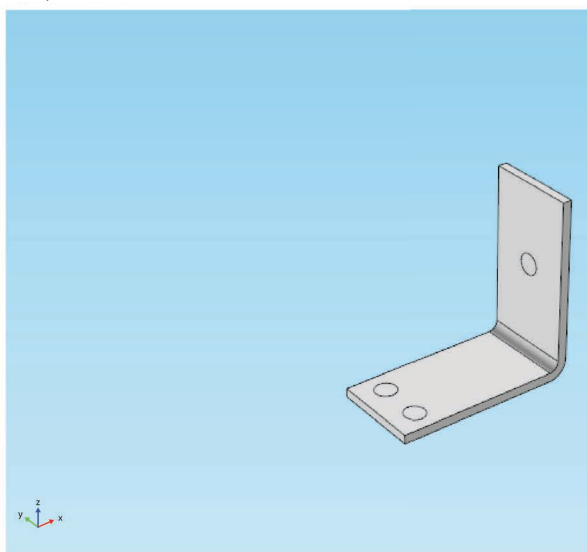
Зажмите правую кнопку мыши и потяните. Это первое сочетание сдвигает область вида влево, вправо, вниз или вверх вдоль плоскости видоискателя камеры (плоскости графического окна). При этом меняется View Offset (Смещение вида).

ДЕЙСТВИЕ Сдвинуть область вида на плоскости графического окна.

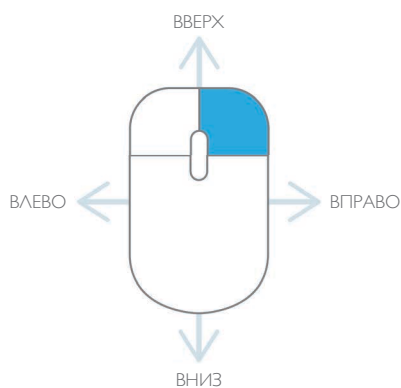
Действие



Результат



СОЧЕТАНИЕ



КАМЕРА

Было

Стало

СМЕЩЕНИЕ ВИДА

x

x

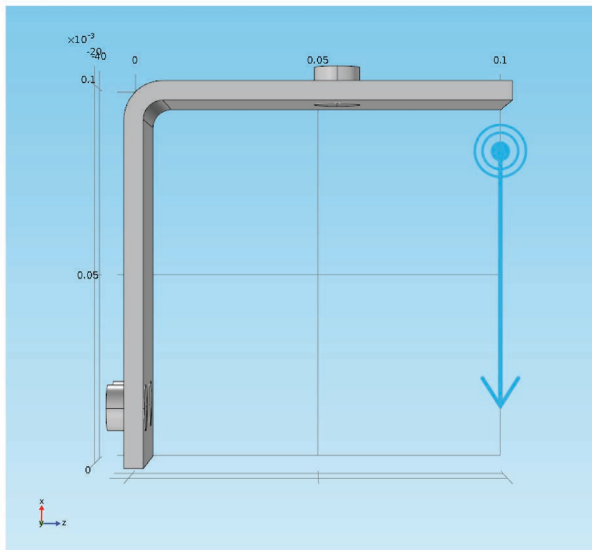
y

y

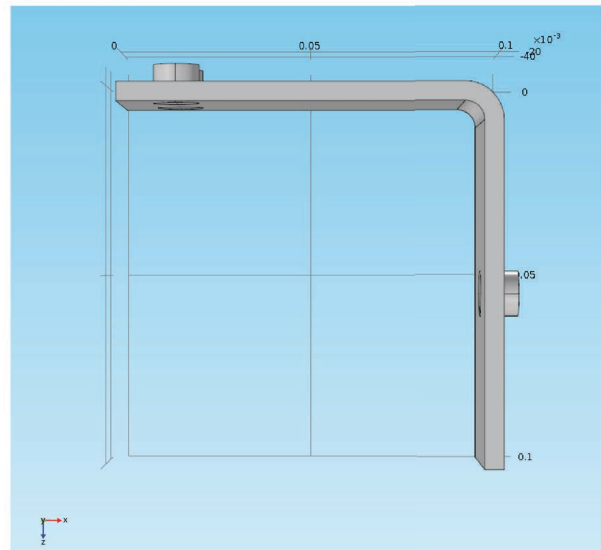
Зажмите левую кнопку мыши и потяните, удерживая клавишу Alt. Это сочетание вращает камеру вокруг оси, перпендикулярной плоскости графического окна.

ДЕЙСТВИЕ Вращать камеру.

Действие



Результат



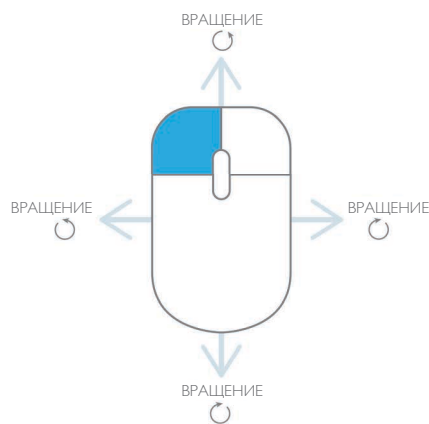
СОЧЕТАНИЕ

WINDOWS/LINUX



MAC

Используйте клавишу Alt



КАМЕРА

Было

Стало

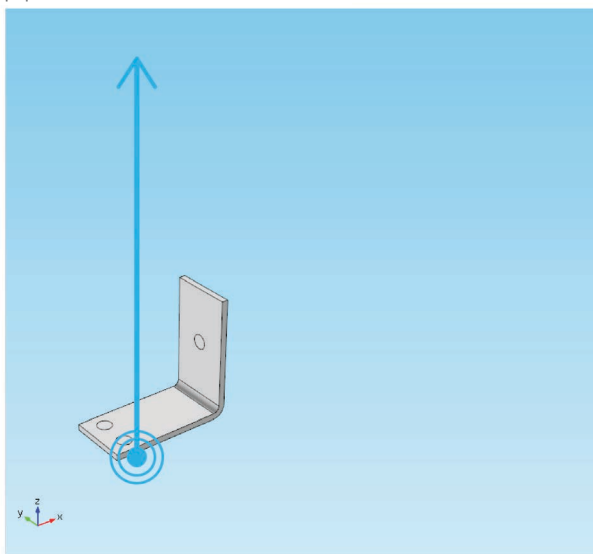
НАПРАВЛЕНИЕ ВВЕРХ

x	<input type="text" value="1"/>	x	<input type="text" value="0"/>
y	<input type="text" value="0"/>	y	<input type="text" value="0"/>
z	<input type="text" value="0"/>	z	<input type="text" value="-1"/>

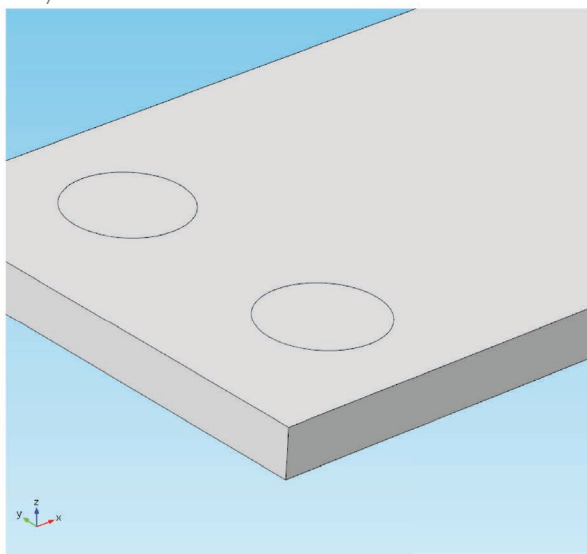
Зажмите колесо прокрутки и потяните. Еще одно простое действие — приближение или удаление области, где расположен указатель мыши. Кнопки изменения масштаба в графических инструментах тоже легко доступны, но они приближают центр видимого окна с определенным шагом и не управляются указателем мыши: Это сочетание позволяет более точно контролировать увеличение.

ДЕЙСТВИЕ Приблизить или отдалить область, где расположен указатель мыши.

Действие

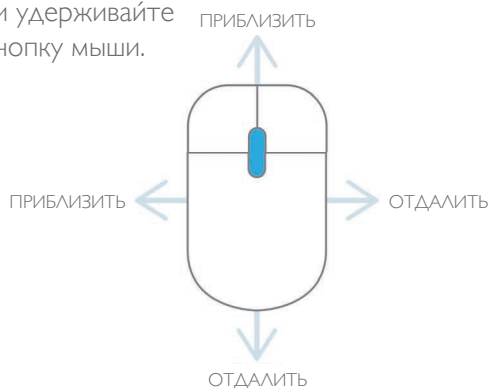


Результат



СОЧЕТАНИЕ

Щелкните и удерживайте среднюю кнопку мыши.



КАМЕРА

Было

Стало

УГОЛ ОБЗОРА

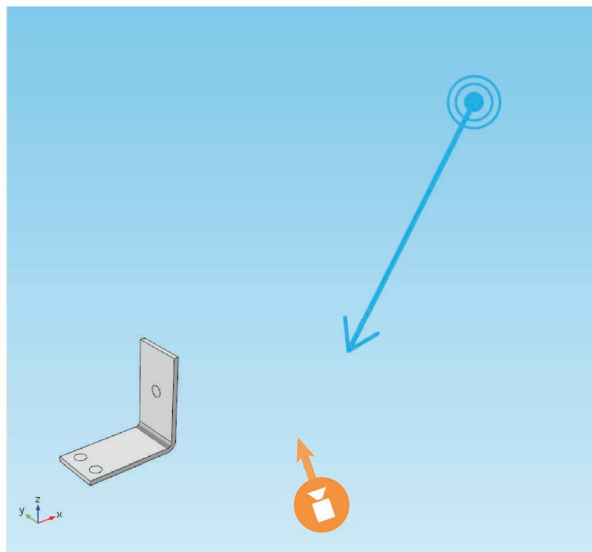
42°

8.75°

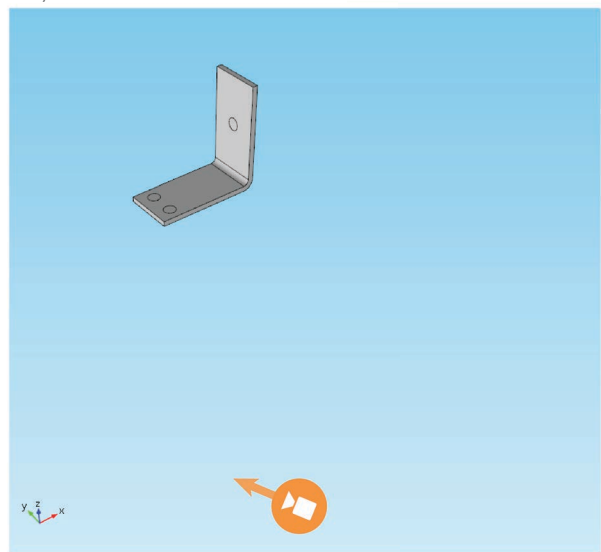
Зажмите левую клавишу мыши и потяните, удерживая клавишу **Ctrl**. Это сочетание меняет наклон и панораму камеры. При этом меняется положение камеры и угол, под которым камера видит геометрию компонентов (в отличие от первого сочетания, смещающее видимую область в плоскости видоискателя камеры). Оранжевая пиктограмма показывает, куда направлена камера. Так как это сочетание двигает и вращает камеру относительно геометрии компонентов, вы увидите, что модель двигается в направлении, противоположном движению мыши.

ДЕЙСТВИЕ Изменить наклон и панораму камеры, не меняя ее расположения.

Действие

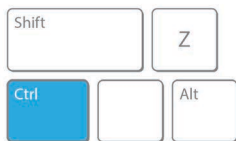


Результат



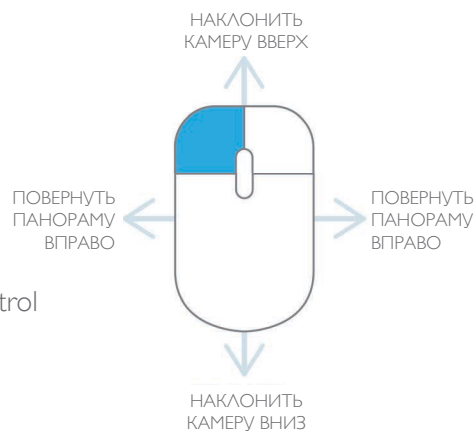
СОЧЕТАНИЕ

WINDOWS/LINUX



MAC

Используйте клавишу Control



КАМЕРА

Было

Стало

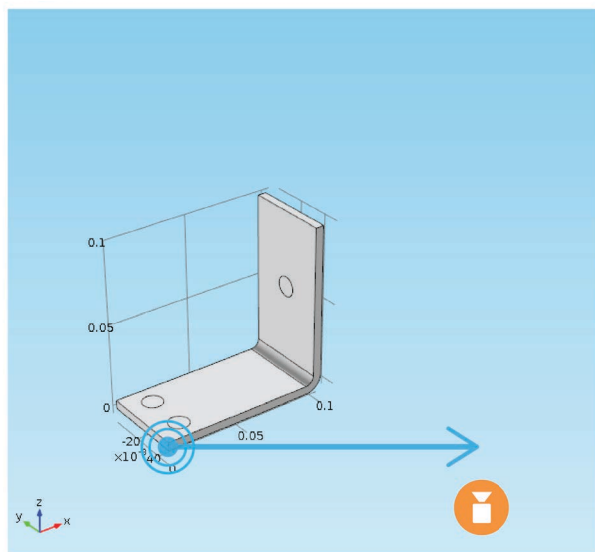
НАПРАВЛЕНИЕ

x	0.0525 m	x	0.075 m
y	-0.025 m	y	-0.075 m
z	0.0475 m	z	-0.175 m

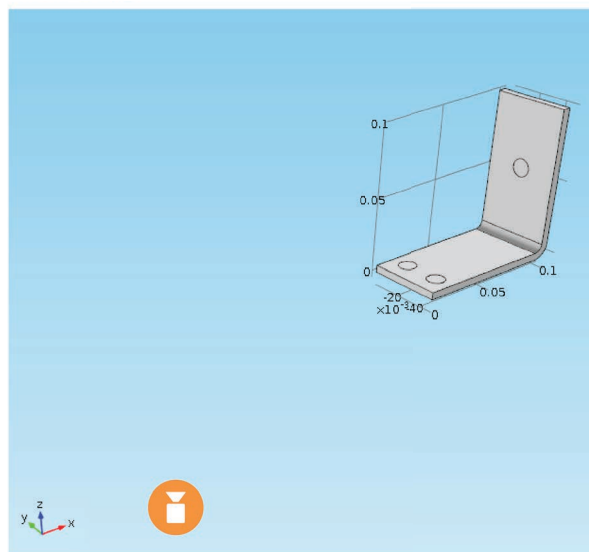
Зажмите правую кнопку мыши и потяните, удерживая клавишу Ctrl. Это сочетание перемещает камеру вверх, вниз, влево или вправо, не меняя ее ориентацию. Камера смещается относительно геометрии компонентов, так что вы увидите, что геометрия смещается в противоположном камере направлении (но в том же направлении, куда двигается мышь).

ДЕЙСТВИЕ Сдвинуть камеру вверх/вниз/вправо/влево.

Действие

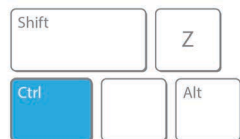


Результат



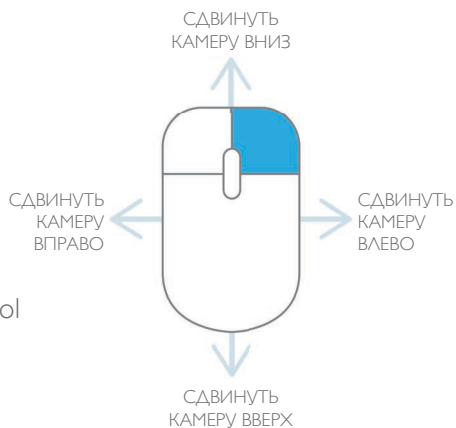
СОЧЕТАНИЕ

WINDOWS/LINUX



MAC

Используйте клавишу Control



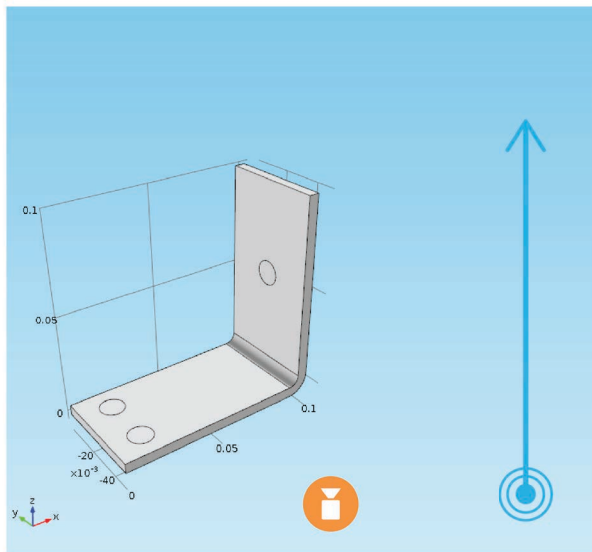
КАМЕРА

ПОЛОЖЕНИЕ	
Было	Стало
x -0.35 m	x -0.5 m
y -0.6 m	y -0.5 m
z 0.45 m	z 0.35 m
НАПРАВЛЕНИЕ	
x 0.06 m	x -0.2 m
y -0.04 m	y 0.07 m
z 0.04 m	z -0.06 m

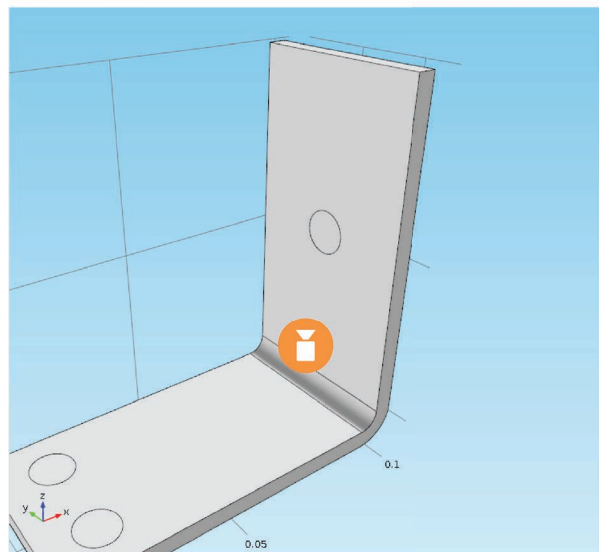
Зажмите колесо прокрутки и потяните, удерживая клавишу **Alt**. Последнее сочетание оставляет геометрию компонентов в центре видимой области и смещает камеру ближе или дальше к геометрии. В отличие от масштаба, это действие не зависит от положения указателя мыши и не меняет угол обзора камеры.

ДЕЙСТВИЕ Переместить камеру ближе к центру модели или дальше от него.

Действие



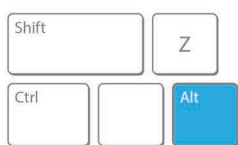
Результат



СОЧЕТАНИЕ

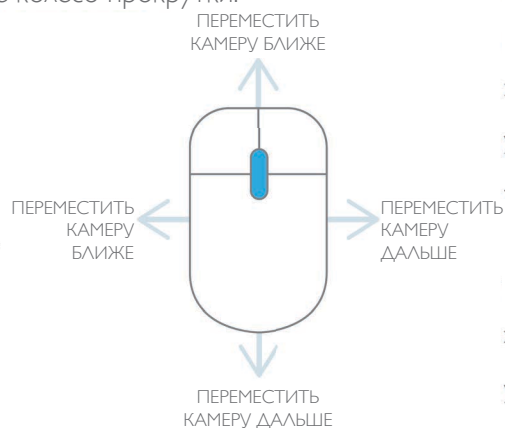
Щелкните и удерживайте колесо прокрутки.

WINDOWS/LINUX



MAC

Используйте клавишу Alt



КАМЕРА

Было

Стало

ПОЛОЖЕНИЕ

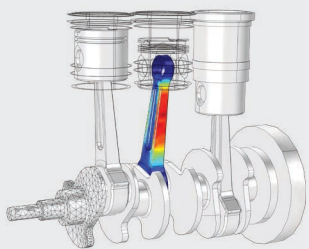
x	-0.1 m	x	-0.03 m
y	-0.25 m	y	-0.15 m
z	0.2 m	z	0.13 m

НАПРАВЛЕНИЕ

x	0.3 m	x	0.37 m
y	0.3 m	y	0.4 m
z	-0.2 m	z	-0.27 m

СОВЕТ

Геометрия поршневого двигателя с большим количеством изогнутых поверхностей хорошо подходит для опытов с освещением. Подробнее о создании рисунка с иллюстрации ниже рассказано на странице 29 в разделе *Советы и рекомендации для опытных пользователей*.



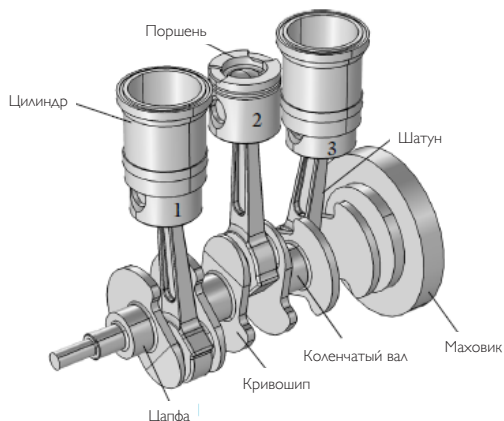
ОСВЕЩЕНИЕ И СЦЕНА

Освещение поможет вам подсветить области модели, которые сложно разглядеть, представляя вам новую точку зрения на визуализацию результатов. Эти мелкие штрихи могут показать ваше устройство в совершенно новом свете.

Чтобы поэкспериментировать с настройками освещения и сцены в COMSOL, мы воспользуемся моделью поршневого двигателя. Если у вас установлен модуль Multibody Dynamics (Динамика многотельных систем), эту модель вы найдете в меню *File > Application Libraries > Multibody Dynamics Module > Automotive and Aerospace (Файл > Библиотеки приложений > Модуль Динамика многотельных систем > Автомобильная и авиакосмическая промышленность)*. (Если в вашей библиотеке нет модели с готовыми решениями, загрузите ее через меню *File > Help > Update COMSOL Application Library (Файл > Справка > Обновить Библиотеку приложений COMSOL)*.) Показанные ниже методы применимы к любой геометрии, однако мы возьмем модель двигателя, на изгибах которой эффекты освещения будут особенно заметны.

Эта учебная модель рассчитывает динамику многотельных структур в трехцилиндровом поршневом двигателе и термодинамику воздушно-топливной смеси в цилиндрах. Результаты моделирования используются для расчета колебаний давления в камере сгорания, скорости вращения в оборотах в минуту, движения различных деталей сборки и выходной мощности цилиндров. Геометрия включает в себя маховик, коленчатый вал, цапфу, кривошип и поршень в каждом из трех цилиндров.

В этой модели два компонента. Мы будем работать со вторым компонентом — Multibody Analysis, анализом динамики многотельных структур.

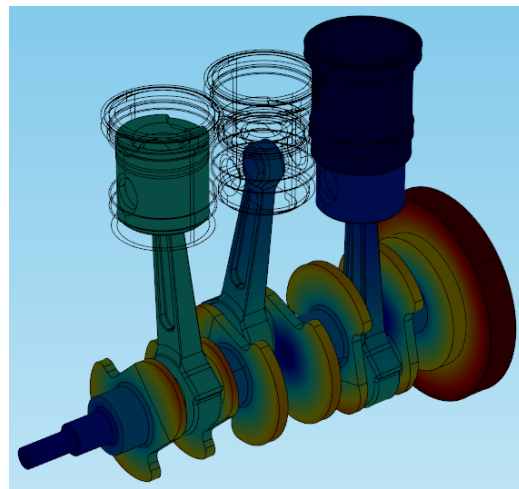


Чтобы создать для этой модели нужное освещение, нам понадобится несколько разнонаправленных источников света.

В узле Results (Результаты) разверните группу графиков Displacement (Смещение). Этот график показывает смещение разных деталей во время работы двигателя. Если вы развернете подузел Surface 1 (Поверхность 1), вы увидите деформацию. Эта деформация смещает видимую геометрию в положение двигателя на отметке времени 0,16 секунды, но оставляет контур исходного положения.

Перейдите к узлу View (Вид) группы графиков Displacement (Смещение). После ознакомления с уже существующими источниками света и узлом Hide Geometric Entities 1 (Скрыть геометрические объекты 1), который скрывает поршень среднего цилиндра, удалите Directional Lights (Направленные источники света) 1, 2 и 3.

Если вы вернетесь к графику смещения, вы увидите темный, неосвещенный двигатель, как на иллюстрации ниже. В узле View (Вид) геометрия должна быть серой.

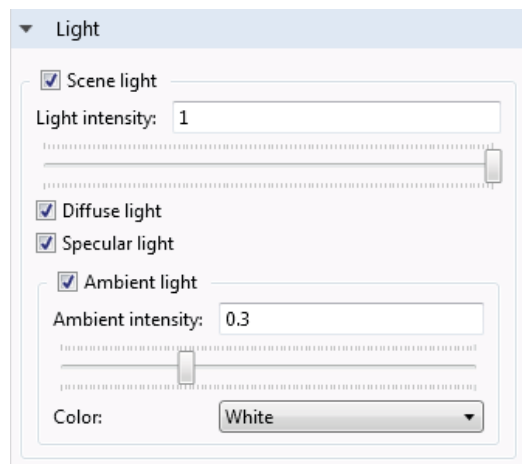


Щелкните правой кнопкой мыши View 2 (Вид 2) и выберите *Directional Light (Направленный источник света)*. В графическом окне появится новый источник света, изображаемый стрелкой внутри тетраэдра и направленный вдоль $(0,0,0)$.

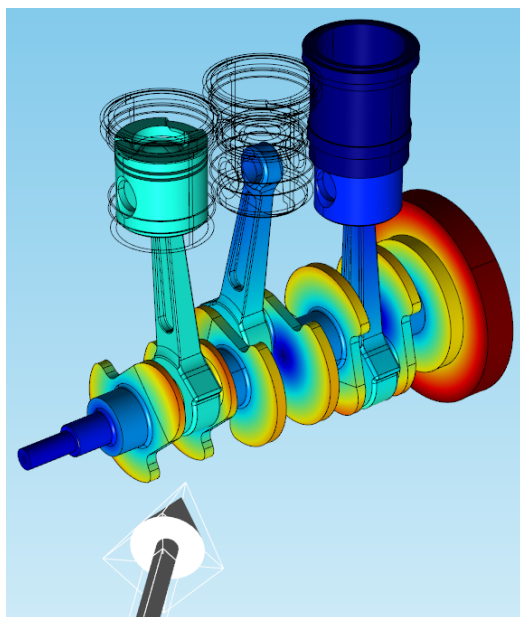
Положение **направленных источников света** задается их направлением; они ведут себя как лучи солнца, освещая все области модели на своем пути и останавливаясь на стенах и выступах. В отличие от зональных источников света, о которых мы поговорим позже, положение направленного источника света изменить нельзя.

Поиграйте с разными значениями координат на вкладке Direction (Направление) настроек источника света. Когда вы поймете, как освещение меняется с изменением координат, создайте второй направленный источник света. Мы подсветим несколько областей двигателя.

Нам также понадобится один источник света, чтобы ярким пятном осветить всю сцену. Позже мы добавим третий источник для верхней стороны и боков, и еще один, чтобы подчеркнуть изогнутые поверхности.



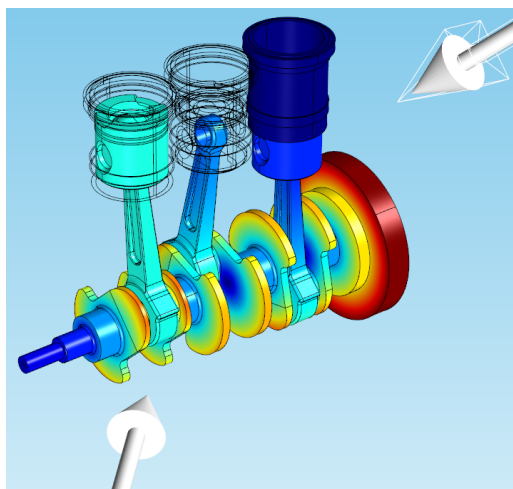
Задайте координаты направления для первого источника $(3,3,0)$ и интенсивность освещения, равную $0,75$. Этот источник осветит большую часть геометрии.



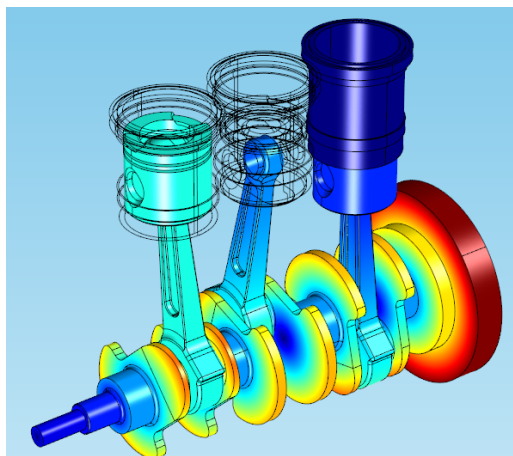
СОВЕТ

При редактировании освещения уже созданной модели мы рекомендуем не использовать более одного источника света одновременно. Такой подход позволит наглядно увидеть, какие эффекты вызывает добавление к сцене того или иного источника света. Вы можете также раскрыть вкладку Light (Свет) в настройках основного узла View (Вид), чтобы изменить интенсивность фонового освещения и всего освещения сцены. Работая в узле View (Вид), вы заметите, что все источники света изображены стрелками, а редактируемый в данный момент источник — стрелкой в тетраэдре.

На втором источнике света мы проверим, что будет, если изменить координаты — попробуйте осветить верхнюю, нижнюю или боковую стороны двигателя. Для иллюстрации ниже мы использовали координаты $(-0,5,1,-1)$.

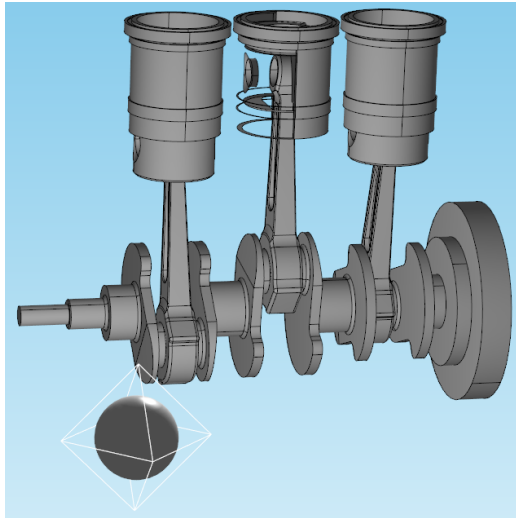


Когда вы нашли удовлетворительное положение для источников освещения, добавьте третий направленный источник света. Его мы используем для изогнутых поверхностей: Координаты третьего источника на иллюстрации ниже $(1,1,1)$, но вы можете выбрать для него позицию на свое усмотрение.

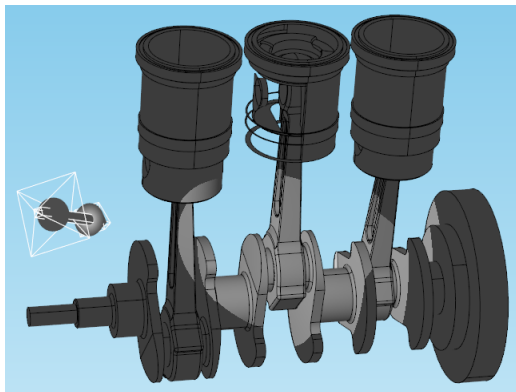


Направленные источники света, которые мы добавляли, используются чаще всего, но в COMSOL включены еще несколько типов источников света. Если вы снова щелкнете правой кнопкой мыши узел View 2 (Вид 2), вы можете добавить точечный, зональный или лобовой источник света.

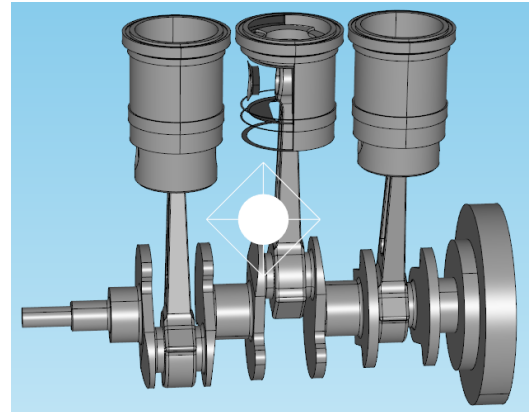
Точечный источник света похож на лампочку: он светит во всех направлениях, и вы можете изменять его положение. Этот точечный источник расположен в точке $(-0,25, -0,5, -0,25)$:



Зональный источник света похож на фонарик: пользователь задает и его направление, и его положение. Этот зональный источник света расположен в точке $(-0,28, -0,33, 0)$ и направлен вдоль вектора $(1,1,-0,75)$:



Лобовой источник света направлен от положения камеры и жестко привязан к системе координат камеры, так что вы не можете изменить ни его положение, ни его направление.



На этом обзор доступных в COMSOL инструментов управления камерой и освещением завершен. При помощи этих инструментов вы сможете выделить самые важные области ваших графиков и подготовить информативные визуальные отчеты, которые позволят получить подробное представление о происходящих в вашей модели процессах.

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ГРАФИКИ ДЛЯ ОТДЕЛЬНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

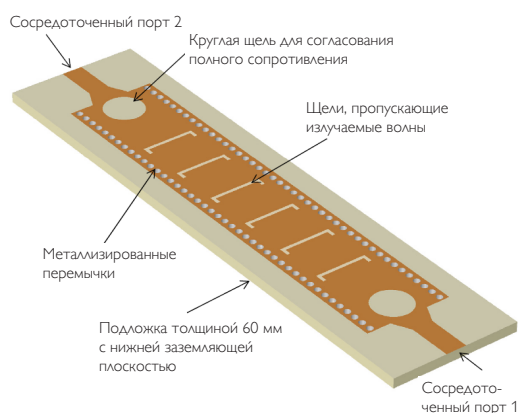
Некоторые виды графиков особенно полезны для отдельных физических задач, так что они чаще всего используются с теми модулями расширения программного пакета COMSOL, которые относятся к этой физической задаче. Сделаем небольшое отступление и посмотрим, какие графики нужны для отдельных физических задач.

ГРАФИКИ В ДАЛЬНОЙ ЗОНЕ

В задачах радиочастотного диапазона моделируется излучение и поглощение электромагнитных волн высокой частоты. Моделирование можно использовать для проектирования различных радиочастотных устройств, и один из наиболее часто принимаемых во внимание инженерами показателей качества — диаграмма направленности излучения. В контексте радиочастотного и микроволнового оборудования моделирование может быть применено относительно таких устройств, как антенны.

Рассмотрим учебную модель радиочастотного устройства, для которого нам нужно узнать диаграмму направленности излучения.

Ниже показана модель интегрированного в подложку волновода, который применяется в конструкции антенн. Волны излучаются из щелей вверху и формируют поток, направление которого регулируется рабочей частотой.



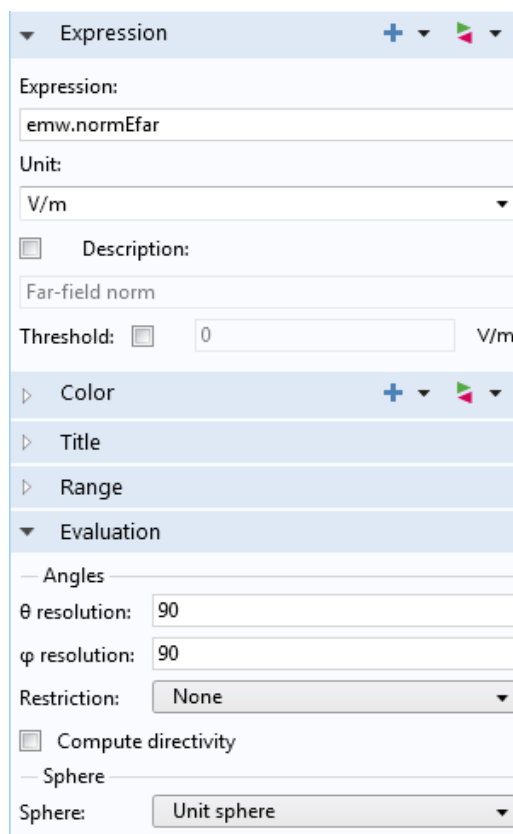
В этой модели, доступной в меню *File > Application Libraries > RF Module > Antennas* (Файл > Библиотеки приложений > Модуль Радиочастоты > Антенны), если у вас установлен модуль RF (Радиочастоты), вычисления в дальней зоне применяются для расчета распределения электромагнитного поля на значительном удалении от волновода.

Графики в дальней зоне применяются для отображения глобальных переменных в дальней зоне электромагнитных полей или полей давления, так что те инструменты визуализации, которые мы используем для волновода, также подойдут для многих задач радиофизики и акустики.

На графике в дальней зоне переменная строится для определенного диапазона углов (Θ и ϕ в настройках ниже), и в каждой расчетной точке исходная сферическая поверхность деформируется в радиальном направлении, создавая поверхность графика.

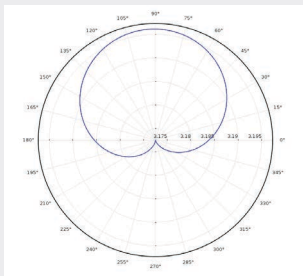
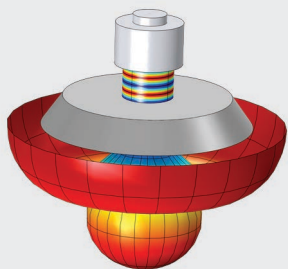
Преимущество графиков в дальней зоне состоит в том, что деформированная сфера не относится к геометрии модели, так что число построенных направлений не связано с дискретизацией области определения решения. Форма деформированной сферы зависит от указанного выражения для расчетных точек.

Настройки графика в дальней зоне для модели волновода приведены ниже.

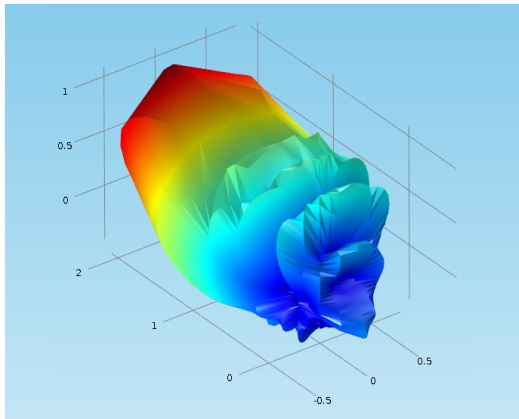


АКУСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

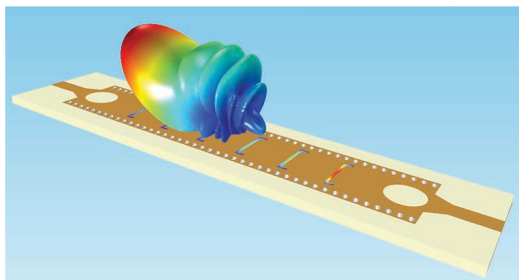
Таким же методом можно воспользоваться при акустическом моделировании, чтобы визуализировать давление звука вдали от моделируемого объекта. На примере ниже показаны уровни давления звука в дальней зоне вокруг грибовидного пьезоэлектрического преобразователя. Такие устройства, например, используются в сонарных системах для генерации низкочастотных звуковых волн высокой мощности.



В этой модели волновода мы можем построить график нормы поля дальней зоны, $emw.normEfar$. График, приведенный ниже, увеличен, чтобы были лучше видны детали; на нем показана норма электрического поля в дальней зоне для рабочей частоты в 12,25 ГГц.



Увеличив угловое разрешение, вы получите более гладкую и четкую картину поля в дальней зоне. На иллюстрации ниже волновод смещен вниз жестким параллельным переносом, чтобы мы могли увидеть диаграмму направленности излучения в дальней зоне целиком.



Максимальное разрешение по переменным Θ и ϕ — 180 (как показано выше). Как можно ожидать, чем выше разрешение, тем сложнее в вычислительном отношении становится задача постобработки.

ТРАССИРОВКА ЧАСТИЦ

Модуль Трассировка частиц используется для решения набора обыкновенных дифференциальных уравнений движения различных частиц. На движение частиц оказывают влияние различные внешние силы, такие как сила действия электромагнитного поля, сила сопротивления и диэлектрофоретическая сила. Различные способы позволяют учесть взаимодействия частиц с границами, с другими частицами и с полем. Интерфейсы физик полезны в моделировании самых различных задач, например переноса ионов в электромагнитных полях, движения планет или разделения живых клеток

в микрогидродинамических системах. Мы покажем некоторые методы постобработки с помощью модуля Трассировка частиц на примере модели статического смесителя.

Если у вас установлен модуль Трассировка частиц, откройте учебную модель в меню Application Libraries > Particle Tracing Module > Fluid Flow > laminar mixer particle (Библиотеки приложений > Модуль Трассировка частиц > Поток текучей среды > Ламинарный смеситель, частицы). Геометрия задана каналом с рядом закрепленных лопастей, изогнутых в разные стороны. В этом примере мы оцениваем характеристики смесителя, вычисляя траектории твердых частиц, переносимых потоком воды через лопасти смесителя.

Мы начнем с некоторых графиков, которые включены в эту учебную модель. Щелкните группу 3d-графиков под названием Particle Trajectories (prt) (Траектории частиц). Этот график изображает траектории частиц до выбранного момента времени, а цветом показана скорость сдвига в текущих положениях частиц.

Параметры этого графика можно с легкостью откорректировать, благодаря чему становится возможной визуализация продвижения частиц в различные моменты времени. Ряд иллюстраций ниже показывает траектории в три момента времени: $t = 1$ с (вверху), $t = 1,6$ с (в центре) и $t = 3$ с (внизу), где выражение для цвета заменено на $spf.U$, чтобы показать величину скорости частиц. Чтобы вручную настроить диапазон цветовой шкалы, разверните вкладку Range (Диапазон) в настройках подэзла Color Expression 1 (Выражение для цвета 1).

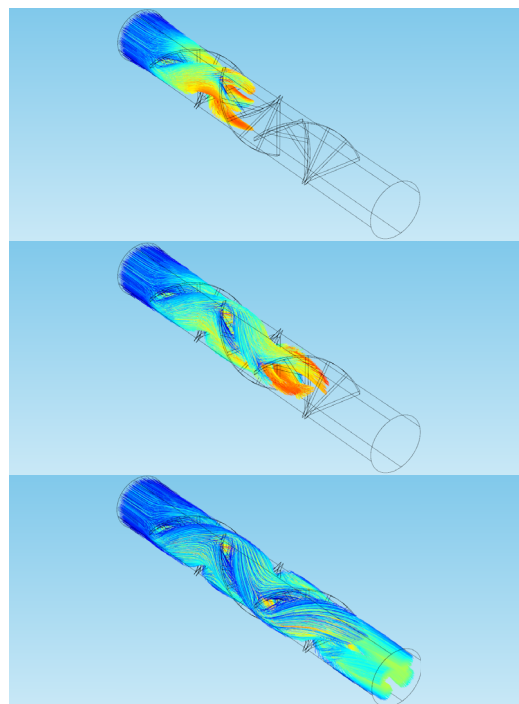
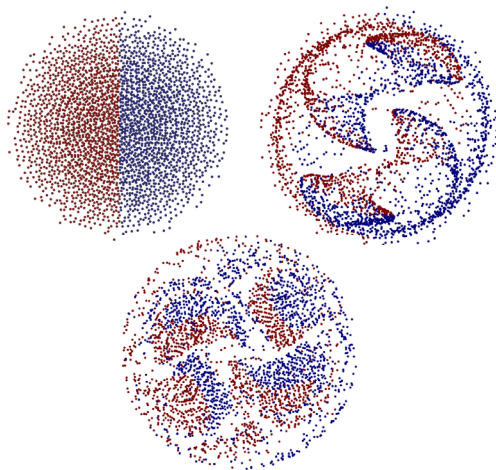


График траекторий частиц дает более реалистичное представление о перемешивании текучей среды, чем график линий тока. Графики линий тока используют для визуализации векторных величин, строя касательные к кривым мгновенного векторного поля (краткое описание графиков линий тока приведено в разделе Типы графиков руководства [Основы постобработки и визуализации в COMSOL Multiphysics](#)). Трассировка частиц для интерфейса физик Fluid Flow (Поток текучей среды), напротив, рассматривает частицы как отдельные объекты, а не как непрерывное поле, и решает набор обыкновенных дифференциальных уравнений для каждой частицы, точно учитывая инерцию частиц.

Другой полезный метод для визуализации смешивания частиц — фазовый портрет. На фазовом портрете каждая частица изображается цветной точкой со своими координатами в заданном пользователем фазовом пространстве. Например, двумя осями координат могут быть две координаты положения частицы, либо же вдоль одной оси можно отложить положение частицы, а вдоль второй — ее скорость.

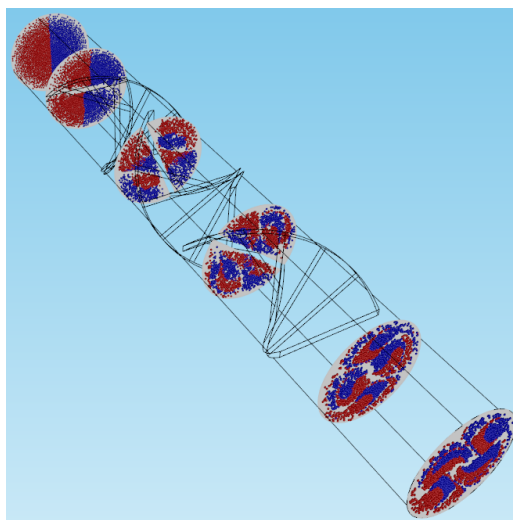
Щелкните группу двумерных графиков 2D Plot Group 5, в которой есть график Phase Portrait 1 (Фазовый портрет 1). В этом примере в качестве двух координат фазового портрета выбраны две поперечных координаты положения частицы.

Значение времени можно настроить на вкладке Data (Данные) окна настроек Phase Portrait (фазового портрета). Ниже показаны три фазовых портрета в моменты времени $t = 0$ с (слева), $t = 1$ с (в центре) и $t = 4,2$ с (справа). Цветом обозначено начальное положение каждой частицы. В конечный момент времени мы все еще видим отдельные участки, состоящие только из красных или только из синих частиц. Это указывает на то, что текучая среда еще не перемешана до конца.



Основной недостаток фазового портрета в том, что на нем строятся положения частиц в фазовом пространстве в определенный момент времени, а не в определенной точке вдоль оси смесителя. Для того, чтобы лучше оценить перемешивание в определенных точках геометрии смесителя, стоит использовать карту Пуанкаре. Этот график показывает координаты, в которых частицы пересекают одну или несколько поверхностей, определенных в наборе данных Cut Plane (Секущая плоскость).

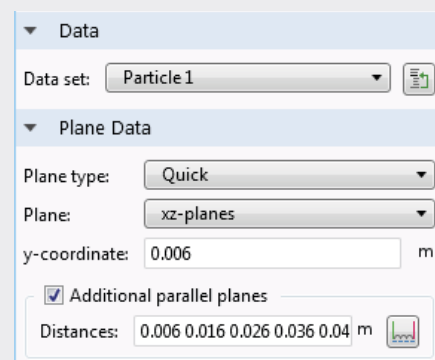
Щелкните группу 3d-графиков 3D Plot Group 4. На этом графике мы видим группы частиц на разных плоскостях после смешивания, и мы можем заметить, что даже в выходном канале частицы не полностью перемешаны. Эта карта Пуанкаре построена на плоскостях на отметках 0,006, 0,016, 0,026, 0,036 и 0,042 м вдоль оси y .



На этом мы заканчиваем раздел о специализированных графиках для определенных физических задач.

СЕКУЩИЕ ПЛОСКОСТИ

Чтобы построить график на секущей плоскости, мы используем наборы данных Cut Plane (Секущая плоскость), которые создаются из трехмерных наборов данных и могут быть визуализированы как группы 2d- или 3d-графиков. Из плоскости сечения можно создать несколько параллельных плоскостей. Установите флажок в поле *Additional parallel planes* (Добавочные параллельные плоскости) и выберите расстояние или диапазон сдвигов дополнительных плоскостей, как показано на иллюстрации справа.



СОВЕТЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ОПЫТНЫХ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ

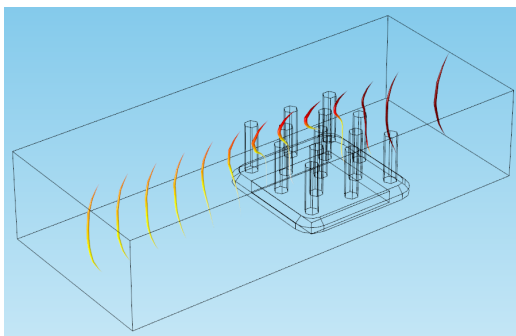
ИДЕИ ДЛЯ ЭФФЕКТНЫХ ВИЗУАЛИЗАЦИЙ

В этой секции мы предложим вам различные способы для создания уникальных визуализаций. Мы продемонстрируем примеры методов, которые помогут вам посмотреть на ваши результаты свежим взглядом. Речь пойдет о деформациях, секущих плоскостях, различных комбинациях графиков и расширенных методах управления камерой.

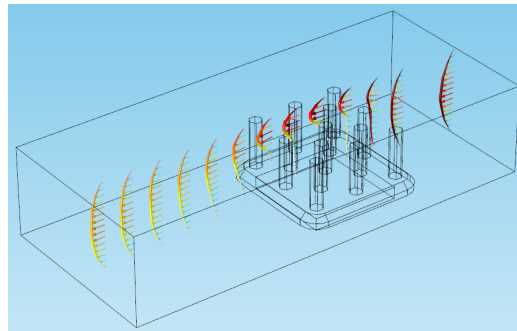
СЕКУЩИЕ ПЛОСКОСТИ И ЛИНИИ

В руководстве [Основы постобработки и визуализации в COMSOL Multiphysics](#) мы кратко описали, как использовать секущие плоскости (и, по аналогии, секущие линии), чтобы отобразить результаты на плоскости или линии, проходящей через геометрию модели. В COMSOL эти графики можно объединить, значительно улучшая и упрощая представление результатов.

В прошлый раз мы создали линейный график, который проходил через модель радиатора вдоль оси x и показывал температуру воздуха и скорость потока в канале. Линейный график, показанный ниже, деформирован в соответствии с полем скоростей (u, v, w), величина которого также управляет радиусом трубок.

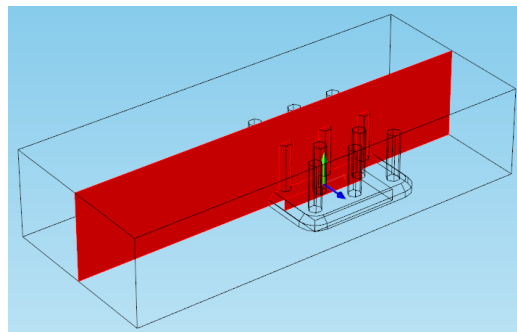


Мы также можем добавить к деформированным линиям стрелочный график, чтобы отобразить поле скоростей. Цвет стрелок на графике ниже зависит от величины скорости, $spf.U$.



Возможно, вам непросто заметить, что происходит вблизи ребер радиатора, поскольку там очень много линий. Давайте создадим новый набор данных для графика в разрезе — поперечного сечения радиатора и канала, в котором лучше будет видна область вблизи ребер.

Щелкните правой кнопкой мыши узел Data Sets (Наборы данных) и добавьте секущую плоскость. На вкладке Plane Data (Данные плоскости), задайте в поле Plane (Плоскость) вариант xz -плоскостей. Щелкните Plot (Построить). С координатами по умолчанию это действие построит плоскость, проходящую через центр канала и радиатора.



Теперь щелкните узел Data Sets (Наборы данных) и выберите *Cut Line 2D (Двухмерная секущая линия)*. В качестве набора данных укажите только что созданную секущую плоскость (Cut Plane 1). Задайте координаты точки Point 2, равные $(1, 0)$. Установите флажок в поле *Additional parallel lines (Добавочные параллельные линии)*.

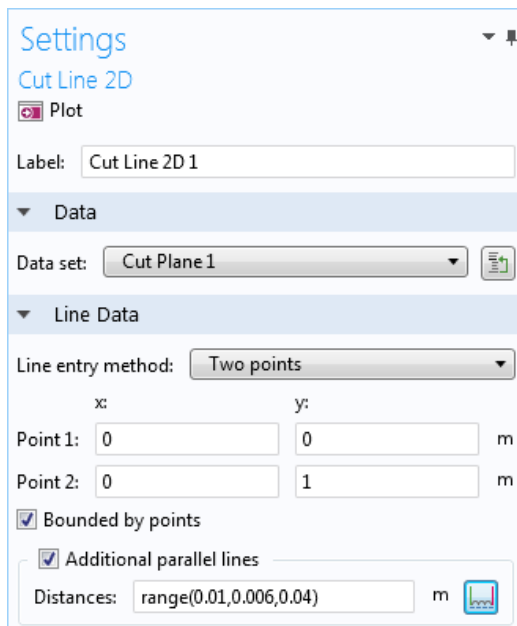
СПРАВКА

В разделе [Наборы данных, производные значения и таблицы](#) руководства [Основы постобработки и визуализации в COMSOL Multiphysics](#) описаны секущие точки, секущие линии и секущие плоскости.

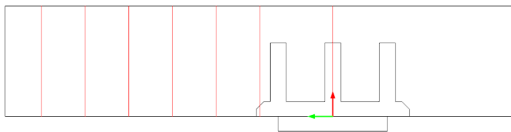
Здесь мы укажем диапазон значений для создания ряда вертикальных секущих линий, лежащих в новой плоскости. Нажмите кнопку Range (Диапазон) рядом с полем *Distances (Расстояния)*, чтобы открыть диалоговое окно ввода диапазона. Введите следующие значения:

- Start (Начало): 0,01
- Step (Шаг): 0,006 (создавать линии через каждые 6 мм от начальной точки)
- Stop (Конец): 0,04

Щелкните Add (Добавить), и диапазон будет добавлен в поле *Distances (Расстояния)*.



Щелкните Plot (Построить), чтобы отобразить секущие линии на разрезе, созданном секущей плоскостью.



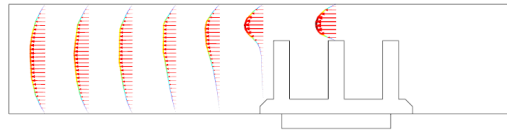
Теперь добавим новую группу двумерных графиков к узлу Results (Результаты), используя набор данных с плоскости Cut Plane 1. Добавим линейный график и стрелочный график.

В **линейном графике** воспользуйтесь набором данных Cut Line 2D 1 (решение вдоль только что созданной секущей линии) и постройте выражение $spf.U$ (величину скорости). Задайте тип линии *Tube (Трубка)* и задайте выражение для радиуса трубки, $spf.U$.

Добавьте к этому графику деформацию, установив координату *х* равной компоненте *u*, а координату *у* равной компоненте *v* (компоненты поля скоростей).

В **стрелочном графике** задайте набор данных Cut Line 2D 1 (Двухмерная секущая линия 1) и масштабный коэффициент, равный 0,025; в качестве выражения должно быть автоматически подставлено поле скоростей.

Щелкните Plot (Построить). Мы получили двумерное поперечное сечение, эквивалентное исходному трехмерному графику.



Хотя на трехмерном графике некоторые детали решения могут быть видны лучше, на этом графике гораздо проще увидеть, как поток воздуха вдоль заданной плоскости меняется при прохождении через радиатор.

ДЕФОРМАЦИИ ДЛЯ НАЛОЖЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

Мы еще не затрагивали тему использования деформации для сравнения результатов в пределах одного графика. Она позволяет одновременно оценить несколько разных величин. Мы используем несколько разных графиков, показывающих две и более величины.

Приведем для иллюстрации трехмерный пример. Если у вас установлен модуль Heat Transfer (Теплопередача), откройте модель нагревательного контура из меню *File > Application Libraries > Heat Transfer Module > Power Electronics and Electronic Cooling (Файл > Библиотеки приложений > Модуль Теплопередача > Силовая электроника и охлаждение электронных приборов)*.

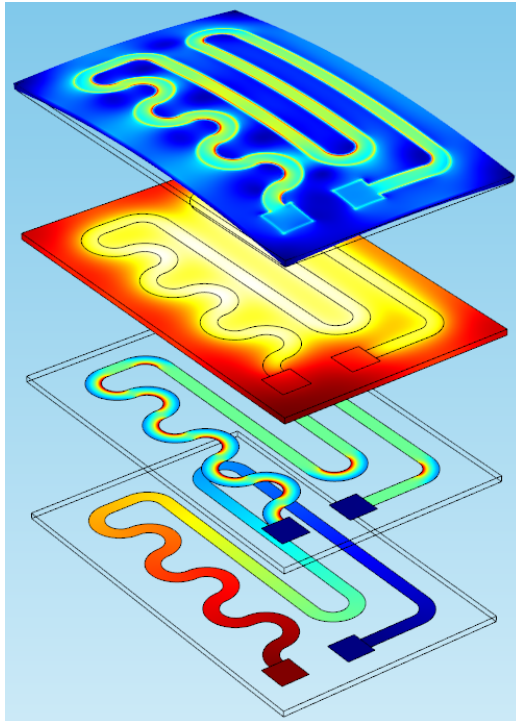
Нагревательные контуры все шире применяются в разных сферах, особенно в промышленном производстве. Это устройство включает в себя слой электрического сопротивления на стеклянной подложке, который испытывает джоулев нагрев при приложении электрического напряжения. В решении модели есть графики, показывающие механическое напряжение, изоповерхности температуры, температуру, электрический потенциал и поверхностные потери в нагревательном контуре.

Допустим, что мы хотим визуализировать несколько результатов одновременно, выстраивая данные в один массив. Для создания массива мы можем использовать существующие группы графиков.

СТРЕЛОЧНЫЕ ГРАФИКИ

Точно так же, как стрелочный график скалярного поля отображает векторную величину с помощью стрелок на плоской поверхности, стрелочный линейный график использует для показа величины стрелки на линиях.

Новая группа графиков будет включать в себя поверхности из групп графиков Stress (solid), Temperature (ht), Electric Potential (ecs) и Surface Losses, разделенные пробелами шириной 50 мм вдоль оси z:



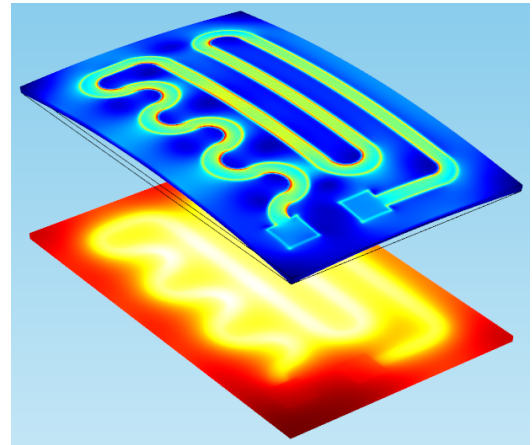
Для начала раскройте узел Stress (solid) и взгляните на заданную там деформацию, которая искривляет геометрию объекта в соответствии с полем смещения.

Создайте новую группу 3d-графиков. Щелкните правой кнопкой мыши график скалярного поля в группе Stress (solid) и выберите *Copy* (Копировать). (Деформация, как подузел этого узла, также будет скопирована.) Щелкните правой кнопкой мыши вашу новую группу графиков и выберите *Paste Surface* (Вставить поверхность).

Таким же образом скопируйте поверхности из узла Temperature (ht). Когда вы вставите ее в вашу новую группу графиков, не спешите добавлять новую деформацию. Сначала на вкладке Title (Заголовок) измените тип заголовка на *None* (Нет), а на вкладке Coloring and Style (Цвета и стиль) снимите флажок в поле *Color legend* (Цветовые условные обозначения) (это делается для того, чтобы при копировании областей не сливать в один график несколько заголовков и условных обозначений, которые заполнят ваше графическое окно).

Теперь добавьте деформацию к графику температуры. На иллюстрации ниже график смещен вниз на -50 мм в направлении оси z. Задайте масштабный коэффициент, равный 1, и установите компоненты x и y, равные нулю.

Массив графиков сначала будет выглядеть размытым:



Мы добавим к поверхности температуры линейный график, который поможет нам различать разные области устройства.

Перейдите к узлу Data Sets (Наборы данных) и продублируйте решение Study 1/Solution 1 (1). Появится набор данных под названием Study 1/Solution 1 (3). Добавьте выделение, которое будет включать все грани графика (выберите *Edge* (границы) в поле геометрических объектов, а затем выберите *All edges* (Все грани) в поле выделения).

Теперь добавьте к вашей группе 3d-графиков линейный график с набором данных Study 1/Solution 1 (3). Задайте выражение, равное 1, и равномерно черный цвет.

Вы не заметите никаких изменений, потому что ваш график не содержит деформаций, добавленных к графику температуры, так что он точно совпадает с линиями поверхности механического напряжения.

Скопируйте узел деформации из поверхности температуры и вставьте его в линейный график, чтобы сместить грани графика. Щелкните Plot (Построить).

Есть несколько способов завершить построение этого массива, но обычно проще продублировать уже существующие поверхности, чем копировать все данные из других групп графиков. Создайте еще два графика поверхности: один для электрического потенциала и один для поверхностных потерь. В таблице ниже приведены выражения и деформации, которые мы использовали для построения, но вы можете изменить в соответствии со своими предпочтениями:

График	Выражение	Деформация
Поверхностные потери	ecs.Qsh	-100
Электрический потенциал	V	-150

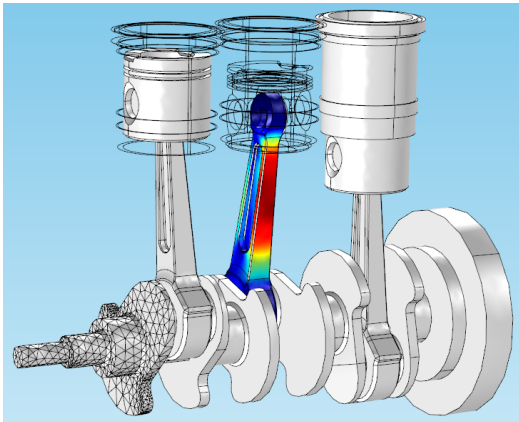
СДВИГИ

К каждому графику поверхности вы можете применить только одну деформацию. Поэтому график, содержащий деформацию смещения в контуре, мы не можем сдвинуть вдоль оси z. Все остальные поверхности мы сдвигаем вдоль оси z при помощи деформаций.

КОМБИНИРОВАНИЕ ГРАФИКОВ

В руководстве [Основы постобработки и визуализации в COMSOL Multiphysics](#) мы изучили примеры одновременного построения нескольких поверхностей на модели. Для эффектной визуализации вы, возможно, захотите отобразить три, четыре, или пять поверхностей на вашей геометрии. Но как при этом сделать визуализацию понятной и читаемой?

Изображение поршневого двигателя, которое мы видели в разделе *Инструменты визуализации*, — это комбинация графиков поверхности, линейных графиков, деформаций, каркасных изображений и разных цветовых схем.



Только одна поверхность на этой иллюстрации — один из шатунов двигателя — раскрашена. Остальные области двигателя переданы в оттенках серого, с сеткой на одной из областей.

На итоговом графике есть

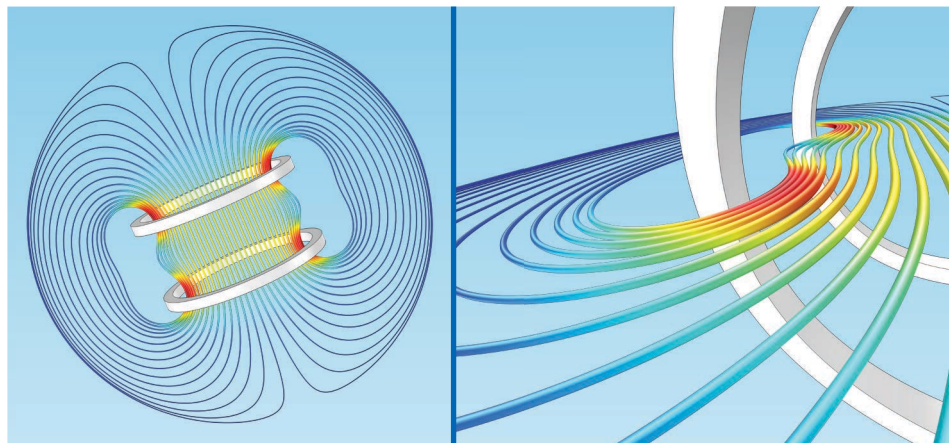
- График скалярного поля, исключаящий средний поршень, средний цилиндр и левый цилиндр. Цветовая схема — однородный светлый металлический серый цвет. К поверхности применена деформация с компонентами (u, v, w) , которая повторяется на остальных графиках и показывает положение в момент времени $t = 0,16$ с.
- График скалярного поля, содержащий данные только о среднем шатуне. Этот график показывает напряжение по Мизесу.
- Линейный график, показывающий все ребра из набора данных. К этому графику не применена деформация, так что он показывает исходное положение двигателя.
- График скалярного поля, содержащий данные только о самом левом кривошипе, цапфе и головке шатуна, к которому применено каркасное отображение с черным цветом, чтобы показать ребра элементов сетки.

ПРИМЕРЫ РАСШИРЕННОГО УПРАВЛЕНИЯ НАСТРОЙКАМИ КАМЕРЫ

Камера может помочь вам найти интересную точку зрения на модель. Хотите ли вы поближе взглянуть на сетку, увидеть пересечение двух поверхностей или подробно изучить границу, такие кадры проливают новый свет на вашу визуализацию и позволяют вам взглянуть на модель изнутри.

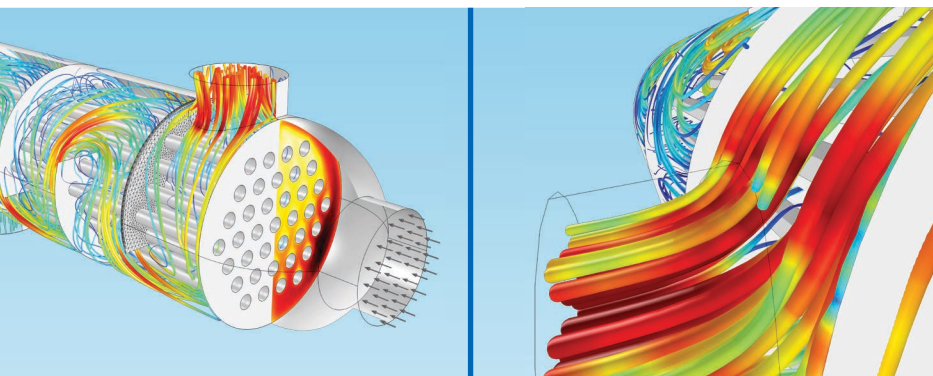
Следующие примеры, созданные с помощью ряда поворотов и приближений, показывают различные ракурсы.

На иллюстрации ниже модель колец Гельмгольца с линиями тока, показывающими магнитное поле. Такой кадр был создан с помощью изменения панорамы, наклона, масштаба и расстояния камеры и сдвига камеры в плоскости (сочетания клавиш 3–6 из раздела *Инструменты визуализации*).

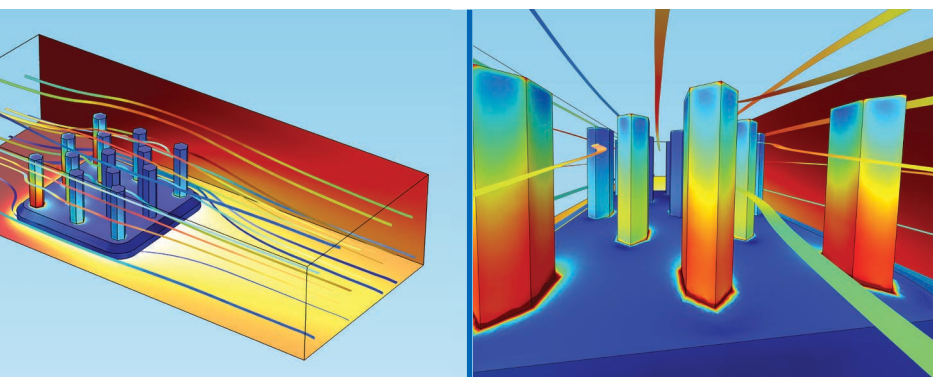


КАРКАСНЫЙ РЕНДЕРИНГ

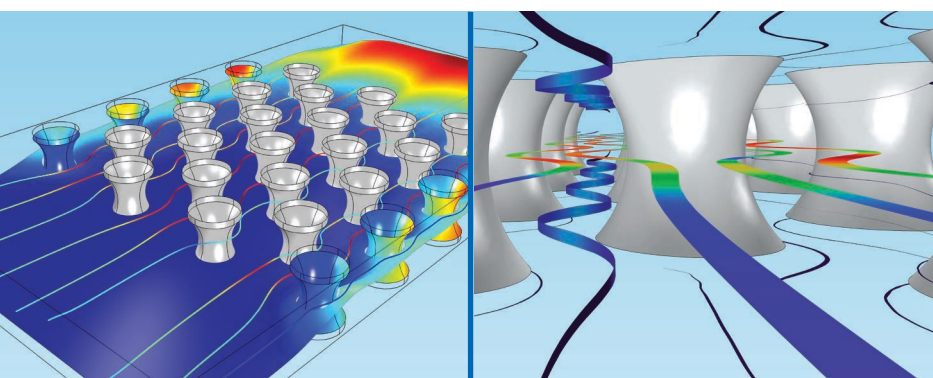
Чтобы показать на графике элементы сетки, добавьте к группе графиков новую поверхность и залейте ее однородным черным цветом. В настройках поверхности установите флажок в поле *Wireframe (Каркас)* на вкладке *Coloring and Style (Цвета и стиль)*. Такой прием обычно используется для наложения сетки на поверхность другого цвета.



Вверху вы видите кожухотрубный теплообменник с линиями тока текучей среды. На этой иллюстрации есть график линий тока, график поверхности, стрелочный график и каркасная сетка. Кадр справа был создан с помощью ряда вращений и приближений.



Кадр вверху снят с р, расположенной между ребрами радиатора, и показывает поверхности и линии тока. Чтобы достичь такого ракурса, камеру пришлось спустить к основанию ребер, и придвинуть, а также приблизить кадр, используя масштабирование щелчком колеса прокрутки.



Вверху вы видите ножки биодатчика и изображение скорости текучей среды. Для такого кадра камеру нужно повернуть и придвинуть, а также приблизить кадр.

АНИМАЦИЯ

Один из последних методов, которых мы здесь коснемся, связан с экспортом результатов. Их можно экспортировать в виде графиков, таблиц, анимаций и отчетов. Некоторые методы экспорта данных и создания результатов обсуждались в разделе *Экспорт результатов* руководства *Основы постобработки и визуализации в COMSOL Multiphysics*. В этом разделе мы поговорим об анимации.

Воспользуемся моделью ламинарного смесителя, хотя эту технику можно применять к любым моделям и исследованиям с временной зависимостью. Щелкните правой кнопкой мыши узел Export (Экспорт) под всеми группами графиков в узле Results (Результаты) и выберите *Animation > Play (Анимация > Воспроизвести)*. Проигрыватель создает интерактивную анимацию непосредственно в среде COMSOL Desktop®. На вкладке Scene (Сцена) выберите *Particle Trajectories (fpt) (Траектории частиц)* в качестве предмета анимации.

При нажатии кнопки Play (Воспроизвести) в панели инструментов графического окна, вы увидите траектории частиц, появляющиеся во входном канале и двигающиеся через смеситель к выходному каналу. В настройках проигрывателя вы можете изменить число кадров и скорость анимации.

▼ Scene

Subject: Particle Trajectories (fpt)

▼ Target

Target: Player

▼ Animation Editing

Sequence type: Stored solutions

Loop over: Time

Time selection: All

▼ Frames

Frame selection: Number of frames

Number of frames: 25

Frame number: 9

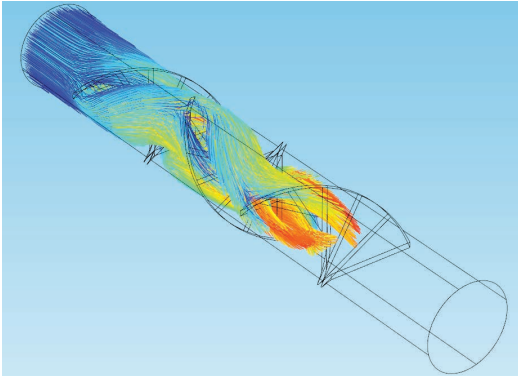
Time: 1.6

▼ Playing

Display each frame for: 0.1 s

Repeat

Вот снимок в процессе:

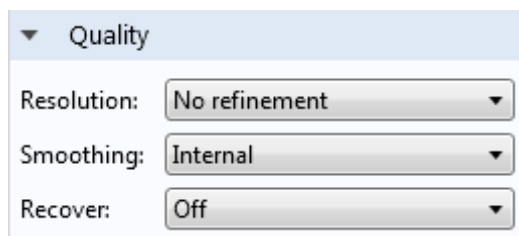


Снова щелкните правой кнопкой мыши узел Export (Экспорт) и выберите *Animation > File* (Анимация > В файл). Здесь вы можете экспортировать видео или сохранить последовательность изображений в файл — прекрасный вариант для того, чтобы быстро проецировать результат вашей работы в презентации или на веб-сайте.

Снова выберите *Particle Trajectories (fpt)* (Траектории частиц) в качестве предмета анимации, введите имя файла в поле *Filename* (Имя файла) на вкладке Output (Вывод) и настройте показ анимации в соответствии со своими предпочтениями. Затем щелкните Export (Экспортировать) в верхней части окна настроек, чтобы записать видео. Файл можно просмотреть в браузере или проигрывателе, поддерживающих формат GIF.

ОТРИСОВКА И СГЛАЖИВАНИЕ

Если вы щелкнете любой узел графика из тех, которые мы строили в этом руководстве, вы увидите раздел Quality (Качество) в нижней части окна настроек, под вкладкой Coloring and Style (Цвета и стили). На вкладке Quality (Качество) вы можете настроить разрешение графиков, сделать их непрерывными с помощью сглаживания и включить точное восстановление производных.



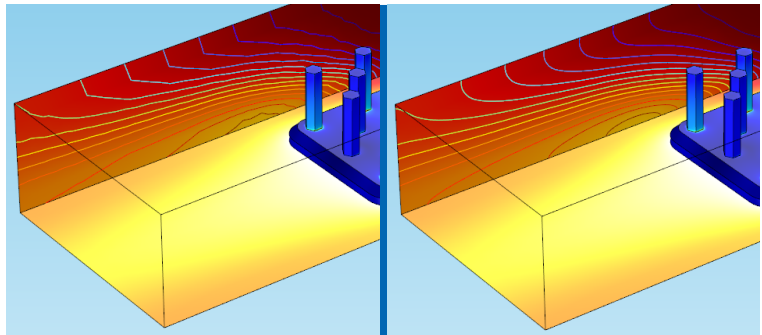
ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ СЕТКИ

Когда мы изучали модель радиатора в руководстве [Основы постобработки и визуализации](#) в COMSOL Multiphysics, мы отображали изменение

температуры на задней границе воздушной области с помощью контурного графика. В том примере для сглаживания изображений мы применяли мелкую сетку, а также производили ее измельчение.

По умолчанию для графика выбрана настройка разрешения *Normal* (Нормальное). Любое разрешение выше уровня *No refinement* (Без измельчения) будет означать, что элементы сетки во время отрисовки можно разбивать на более мелкие части.

Обратите внимание на разницу между контурами без измельчения (слева) и с высоким измельчением (справа) на иллюстрации ниже:



Увеличение разрешения хорошо работает в случаях, когда для увеличения точности непрерывного решения модели не нужна более мелкая сетка. С высокими значениями измельчения отображаемое поле отрисовывается по большему числу точек в каждом элементе сетки, что улучшает отображение гладких полей.

В таких случаях, как в этом примере с сопряженной теплопередачей, измельчение работает хорошо; измельчение отображения непрерывного распределения температуры не влияет на корректную отрисовку результатов.

Если же, с другой стороны, отображаемая величина быстро меняется или даже имеет разрыв внутри элемента сетки, измельчение сетки, вероятно, приведет к появлению всплесков и колебаний. Поэтому до проведения измельчения нужно изучить отрисовку вашего решения и найти такие настройки, которые улучшают визуализацию, не меняя поведения отображаемой величины.

Например, во многих задачах механики конструкций важно с высокой точностью изучить уровни механических напряжений: здесь измельчение может исказить данные и скрыть от вас важную информацию, например об области, где напряжение или деформация механического компонента превышает его предел прочности или резко меняется.

Измельчение может также оказаться не самым подходящим выбором, если график отображает комбинацию разных скалярных полей.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ

Восстановление — это алгоритм на полиномиальных функциях, который воспроизводит значение поля с известными значениями производных (например, потоков или напряжений) и имеет лучшую теоретическую сходимость, чем сглаживание. Дополнительная информация о настройках восстановления приведена в разделе *Результаты и Анализ* руководства COMSOL Multiphysics Reference Manual из документации COMSOL.

Эти поля могут быть разного происхождения и представляться по-разному, и тогда увеличение частоты дискретизации вызовет искусственные биения. Если вместо интересующих вас разрывов (например, в фазовых переходах материалов) вы видите плавный переход — значит, визуализация скрывает от вашего взгляда важные детали. В таких случаях задайте уровень измельчения *None (Нет)*.

СГЛАЖИВАНИЕ

Варианты в выпадающем списке Smoothing (Сглаживание) накладывают условие непрерывности на разрывные данные. Как и измельчение, это полезно, когда вы уверены, что ваше решение должно быть гладким, но выбранная дискретизация, сетка или модель вносит разрывы в результаты моделирования.

Вариант по умолчанию сглаживает величины везде, кроме границ областей, где часты резкие переходы от одного материала к другому или от одной физики к другой.

ПОСТОБРАБОТКА НИЗКОРАЗМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ

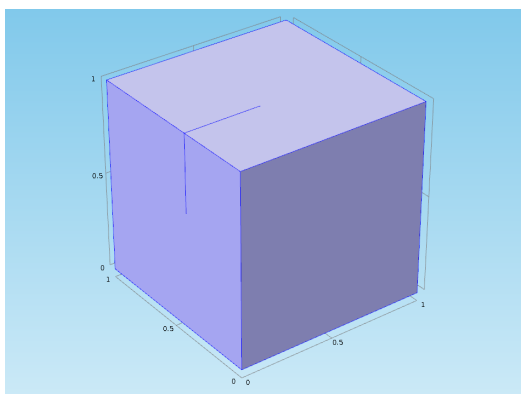
Во время постобработки модели с тонкими стенками, смоделированными с помощью поверхностей, или со слоями с присвоенной математической толщиной (без соответствия в геометрии) вы заметите, что иногда будете получать разные результаты при построении графиков на разных объектах. Поэтому этап, который мы называем *постобработкой низкоразмерных объектов*, требует повышенного внимания.

ПОВТОРЕНИЕ ТЕРМИНОЛОГИИ

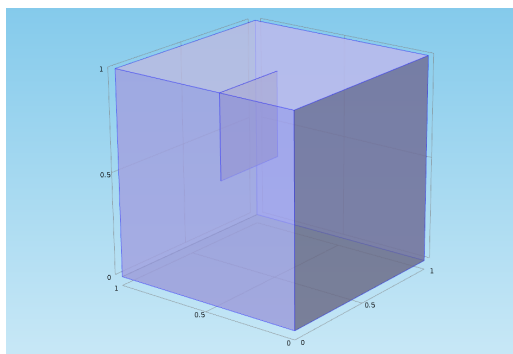
Давайте вспомним некоторые термины. В пакете COMSOL геометрические объекты делятся на:

- *Ребра* — кривые и прямые линии в геометрии модели.
- *Точки* — пересечения двух или более ребер, на каждом пересечении создается точка. *Секущие точки* — точки, изначально не заданные в геометрии, созданные для целей постобработки.
- *Границы* — поверхности, со всех сторон окруженные ребрами. Когда эти поверхности охватывают целую область, внутренние поверхности тоже называются границами.
- *Области* — объемы, ограниченные границами.

Например, в геометрии куба на иллюстрации ниже все внешние стенки — границы:



Однако, внутренняя поверхность, отходящая от двух стенок, тоже считается границей, хоть и не разделяет разные области.



При выполнении постобработки в узле Results (Результаты) применяются такие правила:

- *Объемные графики* отображают результаты на областях
- *Графики поверхности* отображают результаты на границах
- *Линейные графики* отображают результаты на ребрах

Для некоторых типов графиков важно, на каком геометрическом объекте они отображаются. Например, стрелочные графики бывают и линейными, и поверхностными, и объемными — в зависимости от геометрического объекта. Графики линий тока можно добавлять и в двумерные, и в трехмерные группы графиков, но в трех измерениях они отображают результат на областях, а в двух измерениях — на границах. Графики для отображения сетки в то же время очень общие (подойдут для любой группы графиков, кроме полярных), а одномерные графики включают в себя несколько типов графиков специально для одного измерения.

Эта терминология особенно важна для понимания этого последнего раздела руководства.

СВОЙСТВА ТОНКОГО СЛОЯ

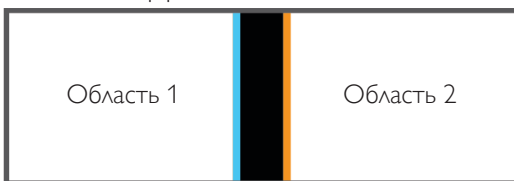
В пакете COMSOL «тонким слоем» называется поверхность, у которой математически, а не с помощью сетки задана реальная толщина. Тонкие слои считаются границами, а окружающие их части модели — областями.

Преимущества такого подхода — особенно в мультифизическом моделировании — в снижении времени вычисления, поскольку что тонкий трехмерный слой не надо покрывать сеткой.

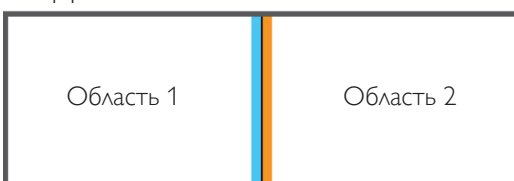
Постобработка низкоразмерных объектов — мощный инструмент для анализа результатов моделирования на одной или на обеих сторонах тонкого слоя и решения задач электродинамики, механики, гидродинамики и химии. В этом разделе мы обсудим несколько методов, которые применяются в COMSOL для корректной постобработки таких случаев и предотвращения ошибок.

Когда мы моделируем трехмерную стенку с помощью двумерного слоя, COMSOL считает тонкий слой границей, прилегающей ко всем областям, которые находятся в контакте со стенкой.

СХЕМА МОДЕЛИ



МОДЕЛЬ С ТОНКИМ СЛОЕМ В COMSOL



ОБОЗНАЧЕНИЯ

- Сторона, касающаяся области 1
- Сторона, касающаяся области 2
- Стенка

Если такая граница касается двух областей, на ней можно построить результаты моделирования для любой из них, либо же построить новую величину, зависящую от двух результатов.

Когда вы строите на тонком слое графики области, COMSOL обрабатывает результаты немного по-разному в зависимости от типа используемого графика:

- Когда для отображения результатов на границе применяется график области, COMSOL, как правило, показывает среднее значение результатов из обеих областей, используя информацию о пограничном слое, близком к стенке, если такая информация задана в решателе.
- Когда применяется график области, которая попадает на границу, COMSOL показывает результаты с одной из областей в зависимости от положения графика. При этом выбирается та область, в которую попадает график.

Второй случай существует потому, что графики областей (например, трехмерные графики сечения) по определению оказываются на одной из сторон геометрии тонкого слоя. Даже точки, которые должны были бы оказаться точно на границе, будут лежать по одну из сторон, так как это невозможно выразить при помощи численных расчетов. Поэтому графики областей покажут результаты, принадлежащие одной из сторон тонкого слоя, а не их комбинацию.

Из-за таких различий результаты могут выглядеть по-разному на графиках разного типа.

Если же граница не разделяет две разных области, то эта граница может касаться одной и той же области на обеих сторонах:

СХЕМА МОДЕЛИ



МОДЕЛЬ COMSOL



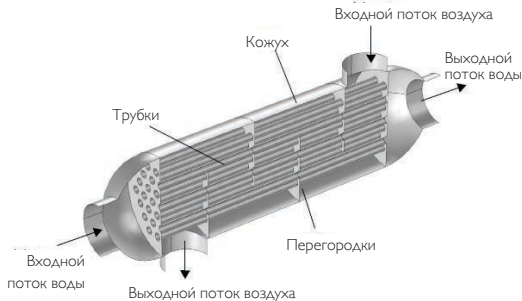
ОБОЗНАЧЕНИЯ

- Сторона, касающаяся области 2
- Стенка

ПРИМЕР. ТЕПЛООБМЕННИК

Рассмотрим модель теплообменника, в которой внутренние стенки, заданные с помощью тонких слоев, используются для моделирования задач теплопередачи и гидродинамики. Модель кожухотрубного теплообменника можно найти в меню *File > Application Libraries > Heat Transfer Module > Heat Exchangers* (Файл > Библиотеки приложений > Модуль Теплопередача > Теплообменники), если у вас установлен модуль Heat Transfer (Теплопередача).

Геометрия теплообменника состоит из ряда трубок, по которым течет вода, и кожуха, в котором циркулирует воздух. У воды и воздуха на входе разные температуры, но, протекая рядом, две текучих среды передают тепло и достигают равновесной температуры. Такие теплообменники часто используются в химических реакторах и других промышленных установках.

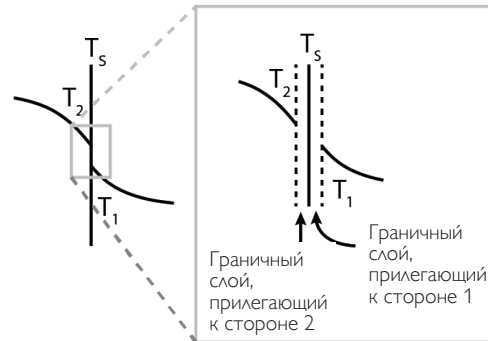


Физическая модель, заданная в Построителе моделей, состоит из интерфейса физики теплопередачи, интерфейса физики турбулентного потока и мультифизической связи, отвечающей за неизоэнтальпический поток.

В задаче теплопередачи условие тонкого слоя используется, чтобы определить термические и геометрические свойства всех стенок, а толщина 5 мм задается математически. Стенки считаются теплопроводящими.

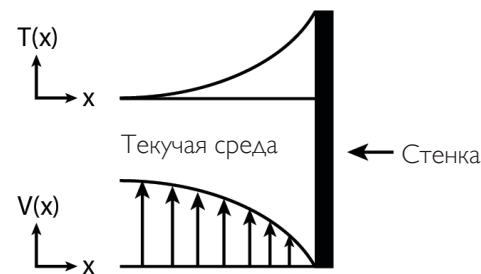
Для стенок, разделяющих две области, решение будет рассчитано отдельно в каждой области, отдельно в граничных слоях, прилегающих к стенке, и на границе между областями и граничными слоями.

Температуры двух областей на иллюстрации ниже обозначены как T_1 и T_2 .



Граничные слои, характеризующиеся большим градиентом температуры, описываются математически с помощью функций стенки.

ГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ



Выражение для температуры поверхности стенки — $ht.T_{wall}$. Температура на двух сторонах стенки считается одинаковой, поскольку в этих задачах стенки принимаются столь тонкими и теплопроводящими, что градиент температуры в стенках пренебрежимо мал по сравнению с градиентом температуры в граничном слое.

Когда в дело включается текучая среда, применяется граничное условие тонкого слоя под названием «внутренняя стенка». С его помощью можно смоделировать тонкую область с большими градиентами интересующих нас величин вблизи неподвижной стенки, хотя свойства потока в этой тонкой области могут резко меняться.

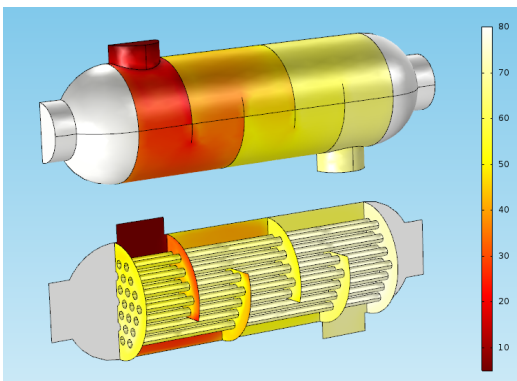
В этой модели условие внутренней стенки применяется к турбулентному потоку, что позволяет учесть разрывы скорости, давления и переменных турбулентности, встречающиеся на тонком слое. Программный пакет будет искать решение для скорости текучей среды в каждой области и воспользуется функциями стенки, чтобы учесть появление граничного слоя вблизи внутренних стенок, так же как и в задачах теплопередачи.

СПРАВКА

Дополнительная информация о переменных температуры и вычислениях на границе приведена в подразделе Boundary Wall Temperature (Температура стенки на границе) раздела Heat Transfer Modeling (Моделирование теплопередачи) руководства пользователя модуля Heat Transfer (Теплопередача) из документации COMSOL.

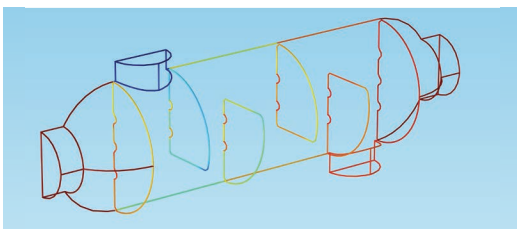
НАРУШЕНИЯ НЕПРЕРЫВНОСТИ ОПЕРАТОРЫ UP (ВЕРХ) И DOWN (НИЗ)

Мы сразу заметим все нарушения непрерывности, если построим график температуры на всех границах геометрической модели теплообменника — график, соответствующий по умолчанию решению этой модели. Температура, по-видимому, резко изменяется на границах между некоторыми стенками, а области вблизи входного и выходного каналов, где проходит горячая вода, заметно теплее по сравнению с соседними границами, контактирующими с воздухом.

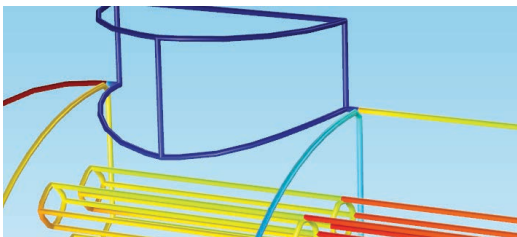


Таких разрывов и следует ожидать от модели, поскольку у теплопроводящих стенок нет физической толщины, в которой температура могла бы изменяться плавно. По этой причине видимого перехода от одной границы к другой на графике температуры нет.

Чтобы увидеть подобные нарушения непрерывности на соседних областях, можно построить трехмерный линейный график, отображающий температуру вдоль ребер геометрической модели:



На пересечении некоторых ребер мы видим явные изменения температуры. Если приблизить эти области, можно легко заметить, как меняется температура от ребра к ребру.



Как мы уже упоминали раньше, COMSOL может рассчитать значения величины на одной из сторон геометрической границы. При работе с тонкими слоями можно явным образом задать вывод результатов для одной из двух областей — в зависимости от того, рендеринг какой из сторон требуется выполнить.

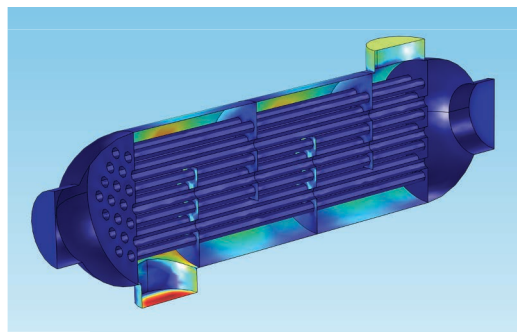
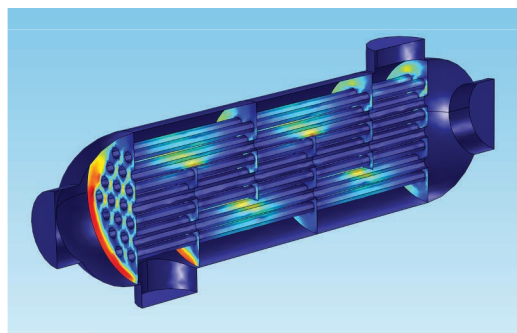
Если вы строите график на границе (например, график поверхности), а не график области, мы рекомендуем использовать операторы Up (Верх) и Down (Низ).

Эти выражения имеют вид $up(expression)$ и $down(expression)$: $up(T)$, например, выберет значения температуры из граничного слоя, прилегающего к верхней стороне стенки.

Если у границы есть верхняя сторона, выражение $up(expression)$ может быть вычислено. Если у границы нет верхней стороны, например если стенка касается только одной области, оператор вернет нулевое значение.

Предположим, мы нужно построить график скорости потока текучей среды, которая будет разной на двух сторонах стенки.

Выражения $up(sp.f.U)$ и $down(sp.f.U)$ построят график на верхней и нижней стороне стенки соответственно. Графики, соответствующие выражениям $up(sp.f.U)$ (на иллюстрации вверху) и $down(sp.f.U)$ (на иллюстрации внизу) приведены ниже:



Операторы Up (Верх) и Down (Низ) работают на геометрических объектах размерности на единицу ниже, чем размерность самой модели. Например, в трехмерной модели $up(expression)$ и $down(expression)$ могут быть построены только на двумерных объектах, то есть на границах.

Это означает, например, что COMSOL сможет построить выражение $up(sp.f.U)$ на графике поверхности, но вернет ошибку, если попробоваться построить то же выражение на графике области (к примеру, на трехмерном графике сечения), потому что размерность области равна размерности модели.

ОПЕРАТОР SIDE (СТОРОНА)

Еще одно выражение, которое используется так же, как операторы Up (Верх) и Down (Низ), — это оператор Side (Сторона). Это более гибкий и точный оператор, который можно применять и к объектам гораздо меньшей размерности, чем размерность модели. Например, вы можете извлечь значения из двух соседних областей для точки, которая лежит на пересечении четырех областей. Это можно использовать, к примеру, при интегрировании поверхностных токов на трехмерной границе.

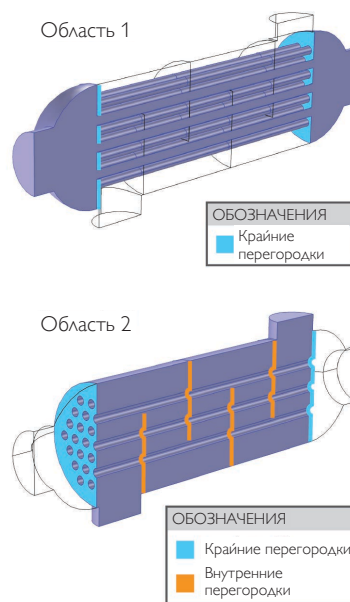
Различные варианты оператора $side(m, expression)$ вернут данные из объекта размерности n , прилегающие к области m , для построения объекта размерности $n-1$. Поэтому для правильного использования оператора Side (Сторона) могут понадобиться метки областей. Например, если выбранная граница прилегает к области 2, но не к области 1, выражение $side(2, expression)$ построит данные в области 2 вблизи выбранной границы, а выражение $side(1, expression)$ вернет ошибку.

Например, график скалярного поля скалярного поля для построения выражения $side(1, T)$ отобразит на границе температуру с той стороны границы, которая прилегает к области 1. Если граница не прилегает к области 1, $side(1, T)$ вернет ошибку.

Графики строятся таким же образом, если поверхность прилегает к области обеими сторонами; оператор Side (Сторона) в таком случае вернет среднее значений с верхней и с нижней стороны.

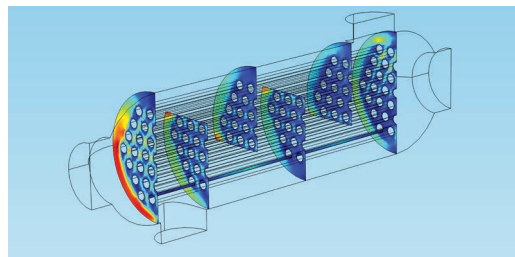
Мы можем продемонстрировать это на графиках, построенных на крайних перегородках кожухотрубного теплообменника. Крайние перегородки касаются и области 1, и области 2.

Внутренние перегородки, напротив, обеими сторонами касаются области 2:

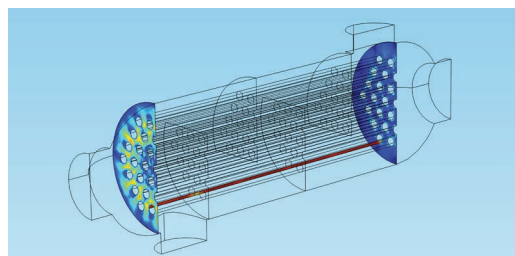


Стоит обратить внимание на случай, когда выделение в наборе данных включает комбинацию границ, прилегающих к разным областям. Если мы попробуем построить график скорости текучей среды на всех перегородках с помощью выражения $side(2, sp.f.U)$ на выделении, включающем все шесть перегородок, мы увидим все перегородки, как и следовало ожидать.

Ниже показан график скорости в граничном слое, прилегающем к воздушной области:

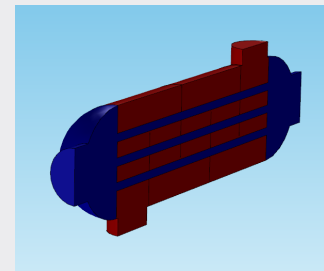


Однако, если мы попробуем построить выражение $side(1, sp.f.U)$, то мы увидим лишь перегородки, касающиеся области 1. Ниже показан график скорости в граничном слое, прилегающем к водной области, построенный с помощью выражения $side(1, sp.f.U)$:



ИНДЕКСЫ ОБЪЕКТА

COMSOL может указать на графиках индексы объектов, например, областей. На иллюстрации ниже на трехмерном графике построено выражение dom , и две области покрашены в синий и красный цвета.

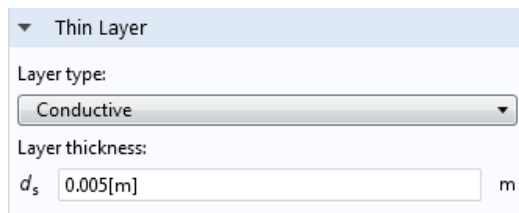


Поскольку внутренние перегородки прилегают только к области 2, они не показаны на графике. К обеим областям прилегают только две крайние перегородки, так что только для них есть данные, относящиеся к области 1.

Вы заметите походящий эффект, если будете строить выражения типа $side(m, expression)$ на трехмерных линейных графиках на нескольких выделенных ребрах геометрии: в зависимости от того, какие величины вы строите и на каких ребрах, некоторые ребра могут пропадать. А при попытке построить график на ребрах, не прилегающих к заданной области, возможно появление сообщения об ошибке.

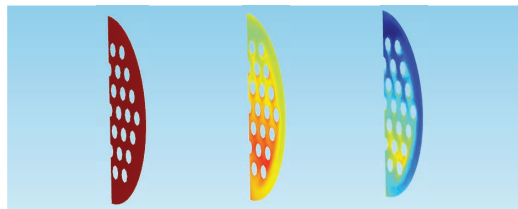
В зависимости от того, что происходит на двух сторонах границы, мы можем также обнаружить разницу в величинах температуры по две стороны границы. Для слоя с повышенной проводимостью, например для этих стенок, градиент будет практически нулевым, поскольку тепло быстро рассеивается сквозь тонкий слой. В слое, сделанном из теплоизолирующего материала, напротив, будет заметна разница между температурами на двух сторонах стенки.

Эти граничные условия задаются в окне Settings (Настройки) узла Thin Layer (Тонкий слой):

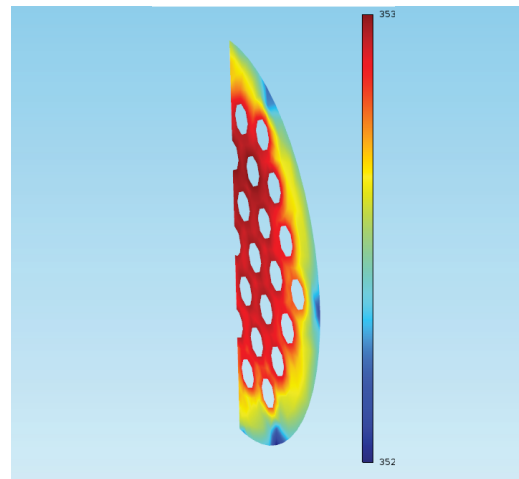


ПРИМЕР. ГРАФИКИ НА ПЕРЕГОРОДКАХ

На иллюстрации ниже приведен график поверхности на одной из крайних перегородок (граница 334 в нашей модели), показывающий температуру на стороне, прилегающей к области 1 (слева); среднее двух температур, то есть выражение T (в центре); температуру на стороне, прилегающей к области 2 (справа). Наследование стилей позволяет сохранить одну и ту же цветовую схему во всех графиках. (Заметим, что температура стенки, $ht.Twall$ здесь не показана.)



Но здесь нужно обратить внимание на один аспект. График температуры в области 1 выглядит почти однородным — это не ошибка, просто оттенки цветов, соответствующие этим температурам, очень похожи друг на друга, а значения температуры на других графиках варьируются гораздо сильнее. Если мы отключим остальные графики и взглянем на первый график отдельно (данные для него берутся из области 1), мы увидим ярко выраженный градиент температуры:

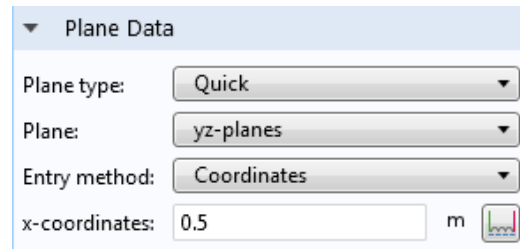


СРАВНЕНИЕ ГРАФИКОВ ОБЛАСТЕЙ И ГРАНИЦ

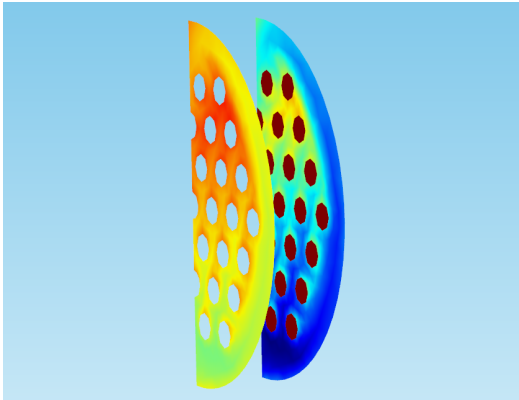
Операторы *Side* (Сторона), *Up* (Верх) и *Down* (Низ) — мощные инструменты, которые при правильном использовании могут многое рассказать о физическом поведении системы. Мы обсудили разницу между этими двумя методами, теперь сравним их поэтапно.

Вернемся к графику скалярного поля на одной перегородке, в котором выражение T означало среднее двух температур по обе стороны перегородки.

Допустим, мы добавили диаграмму сечения в плоскости yz — обратите внимание, что это трехмерный график — расположенную в точке хна перегородке, $x = 0,5$.

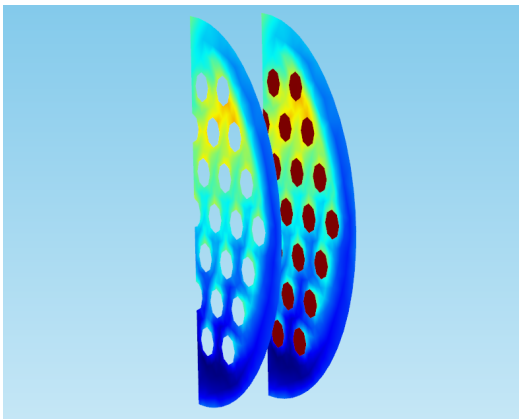


Как мы обсуждали раньше, программный пакет выбирает, данные с какой стороны использовать для графика. Благодаря наследованию стилей у нас будет единая цветовая шкала для двух графиков, так что мы можем сравнить график поверхности и график сечения:



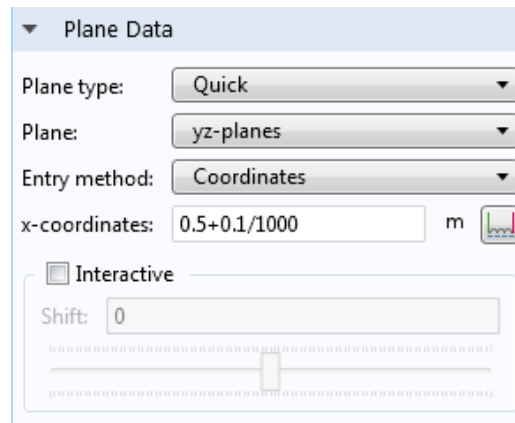
Графики различаются: трехмерная диаграмма сечения показывает температуру с одной стороны, а двумерный график скалярного поля показывает среднее значение.

Мы не можем использовать операторы *Up* (Верх) и *Down* (Низ) для построения графика сечения, потому что это трехмерный график; если же мы заменим выражение в графике скалярного поля с T на $side(2,T)$, мы увидим два очень похожих результата, за исключением сечений труб:



Исходя из этого, графика сечений показывает результаты с той стороны перегородки, которая граничит с областью 2. Поскольку область включает в себя не только перегородку, но и трубы, мы можем увидеть температуру в поперечном сечении труб на уровне перегородки (темно-красные области, которые гораздо горячее самой перегородки).

Что если мы немного сдвинем график сечения, чтобы он показывал вторую сторону? Если вы работаете с нашей моделью, сдвиньте координату x плоскости диаграммы чуть дальше, чем $x = 0,5$.



Измените график скалярного поля таким образом, чтобы он показывал результаты для стороны $side(1,T)$, и вы снова увидите два похожих графика:

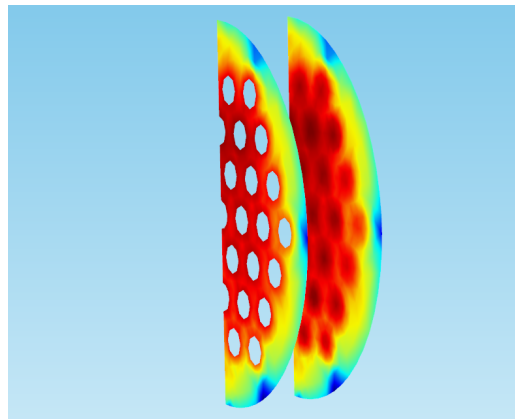


График сечения снова соответствует графику поверхности, но теперь мы обратим внимание на другую сторону стенки.

СПРАВКА

График сечения (справа) была смещена при помощи жесткой деформации, благодаря чему мы сможем увидеть оба графика сразу. Подробнее об использовании деформаций можно узнать в разделе *Деформации, выражения для высот и масштабирование*. Подробнее о создании графика сечения можно узнать в разделе *Типы графиков* руководства *Основы постобработки и визуализации в COMSOL Multiphysics*.

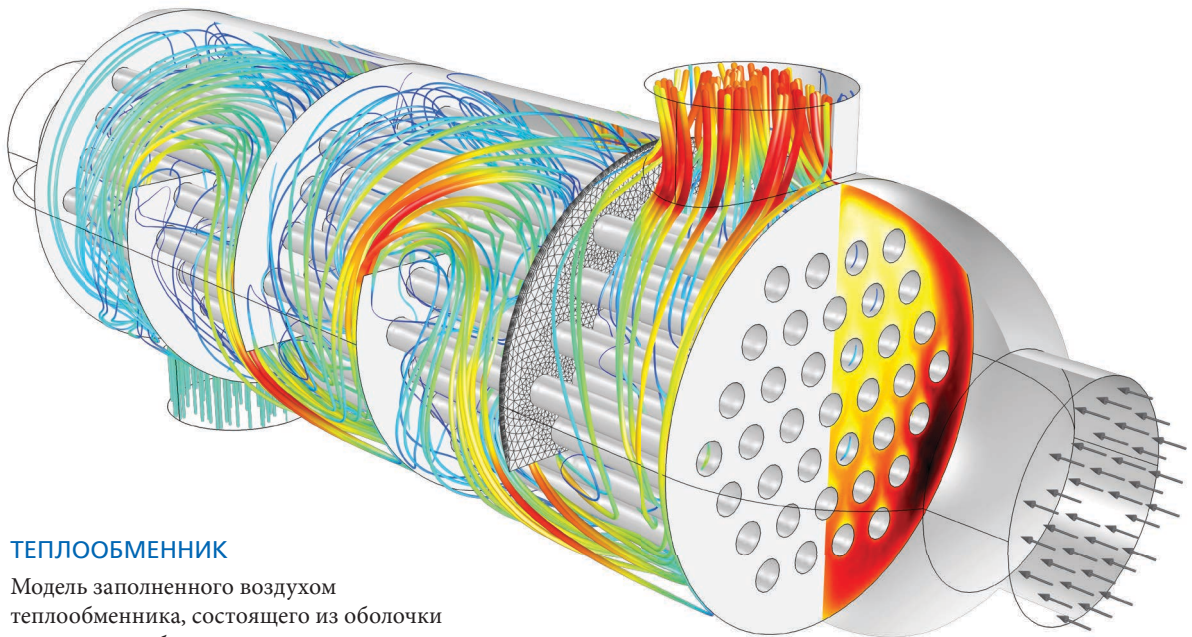
РЕЗЮМЕ

Мы обсудили несколько примеров использования модели с тонкими слоями и разобрались в отличиях между операторами, которые нужны для постобработки результатов с одной стороны стенки. Вкратце повторим изученный материал:

- Операторы *Up (Верх)* и *Down (Низ)* могут применяться для показа результатов с одной стороны геометрического объекта, чья размерность на единицу ниже размерности модели и у которого есть верхняя и нижняя стороны.
- Оператор *Side (Сторона)* может применяться к объектам любой размерности ниже размерности модели. Это выражение строит на объектах размерности график n на основе данных из указанного прилегающего объекта размерности $n+1$.

Напомним, что неожиданные нарушения непрерывности могут появиться на графике при постобработке низкоразмерных объектов по нескольким причинам.

- Среднее значение температур с каждой стороны границы может резко меняться от одной границы к другой, поэтому на соседних границах могут появляться разрывы.
- Так как трехмерные графики «выбирают», сторону, данные с которой будут использоваться для построения, соседние области могут также иметь видимые разрывы, если они используют данные с разных сторон.
- Когда вы просматриваете комбинацию графиков областей и график скалярного поля между ними могут обнаруживаться заметные различия. По умолчанию графики скалярного поля показывают среднее значение, поэтому они, скорее всего, будут отличаться от графиков областей.



ТЕПЛООБМЕННИК

Модель заполненного воздухом теплообменника, состоящего из оболочки и системы трубок, в которых течет вода. Моделирование позволяет определить скорость потока, распределение температуры и давление внутри емкости.

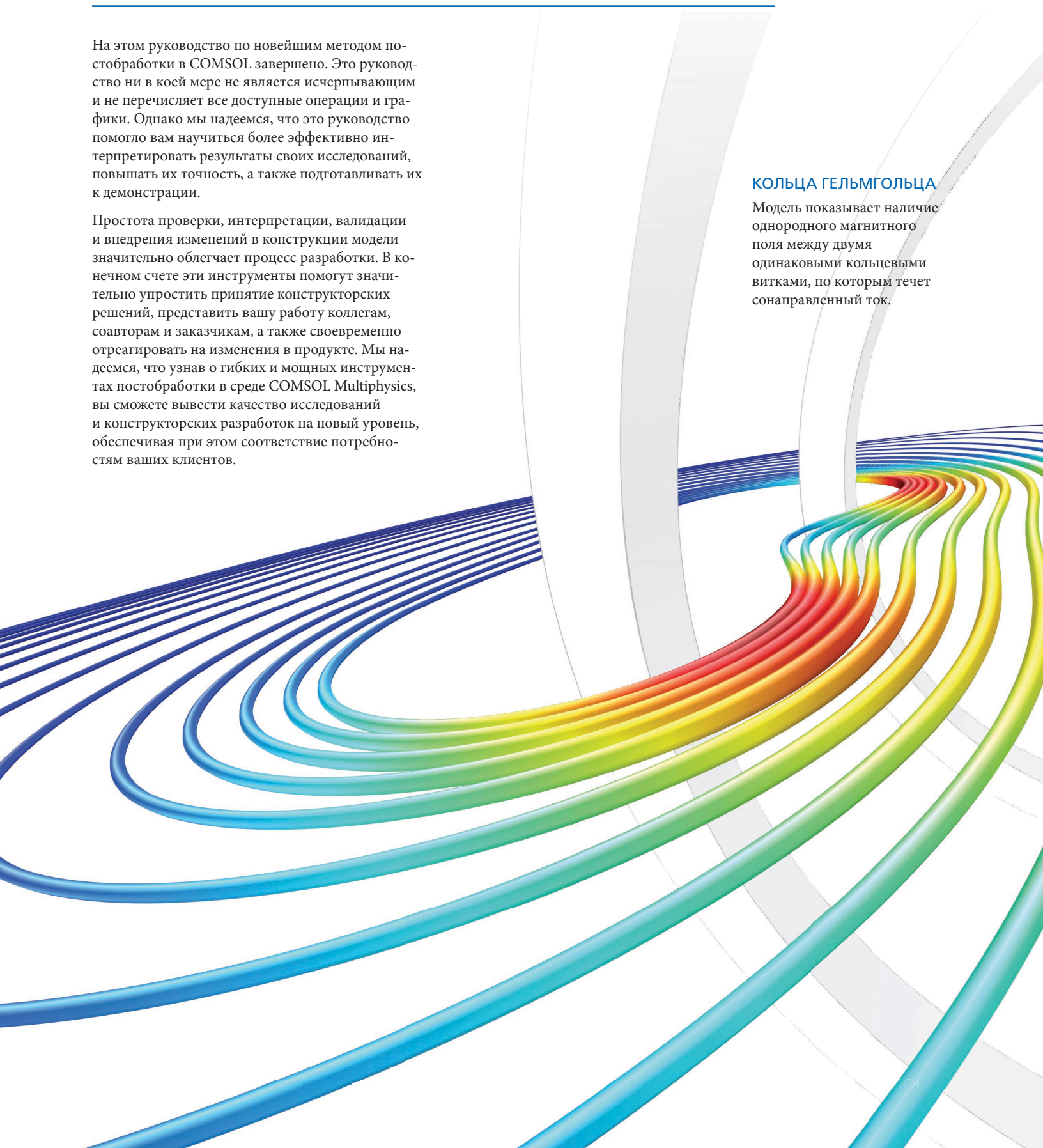
ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На этом руководство по новейшим методам постобработки в COMSOL завершено. Это руководство ни в коей мере не является исчерпывающим и не перечисляет все доступные операции и графики. Однако мы надеемся, что это руководство помогло вам научиться более эффективно интерпретировать результаты своих исследований, повышать их точность, а также подготавливать их к демонстрации.

Простота проверки, интерпретации, валидации и внедрения изменений в конструкции модели значительно облегчает процесс разработки. В конечном счете эти инструменты помогут значительно упростить принятие конструкторских решений, представить вашу работу коллегам, соавторам и заказчикам, а также своевременно отреагировать на изменения в продукте. Мы надеемся, что узнав о гибких и мощных инструментах постобработки в среде COMSOL Multiphysics, вы сможете вывести качество исследований и конструкторских разработок на новый уровень, обеспечивая при этом соответствие потребностям ваших клиентов.

КОЛЬЦА ГЕЛЬМГОЛЬЦА

Модель показывает наличие однородного магнитного поля между двумя одинаковыми кольцевыми витками, по которым течет сонаправленный ток.



ОХЛАЖДЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ

Моделирование тепловых характеристик блока питания компьютера в закрытом корпусе. Вытяжной вентилятор и решетка радиатора создают поток воздуха в замкнутом пространстве, ослабляющий нагрев.

