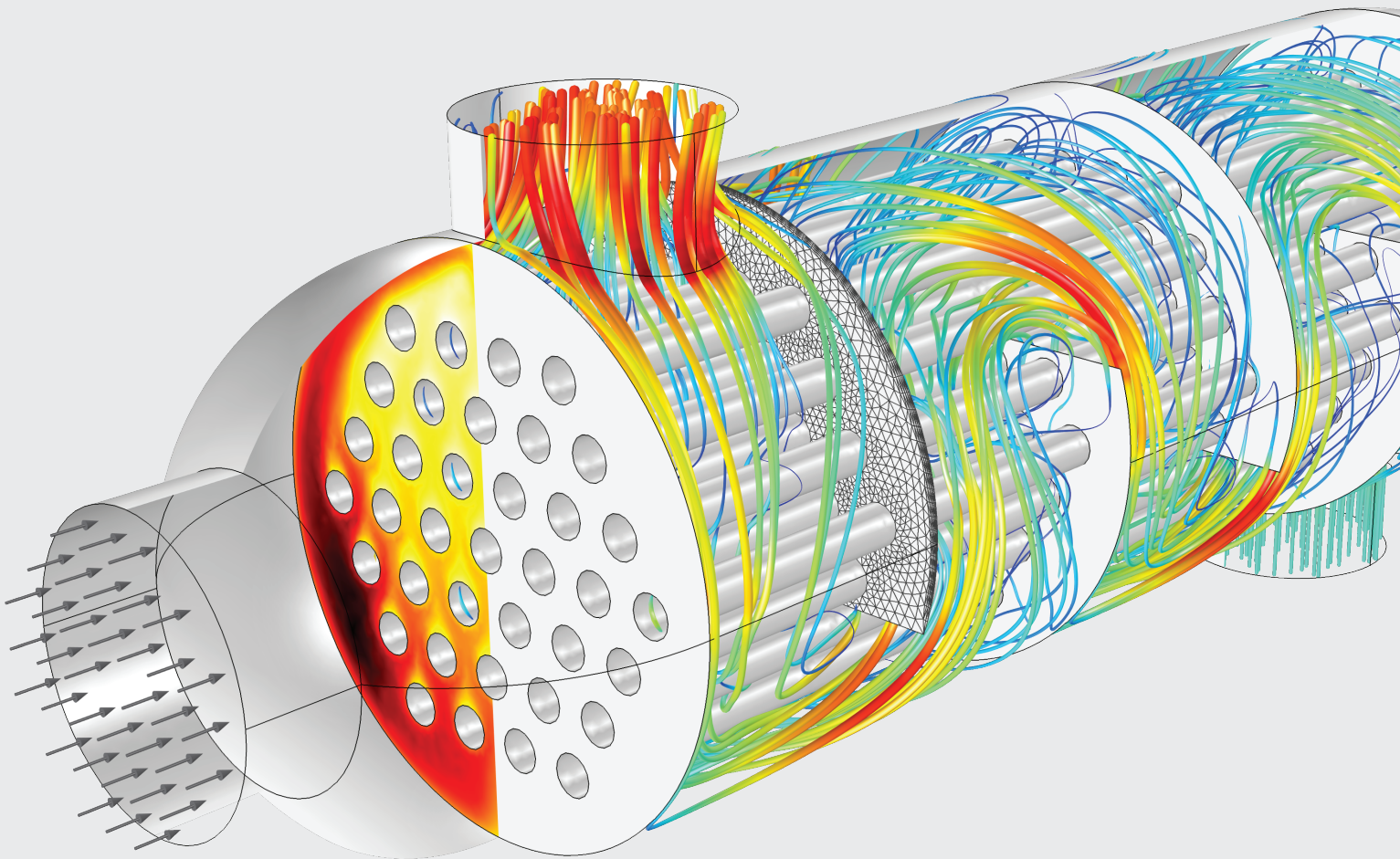


Основы постобработки и визуализации в COMSOL Multiphysics®



Основы постобработки и визуализации в COMSOL Multiphysics

Корпорации COMSOL AB принадлежат такие торговые марки, как COMSOL, COMSOL Multiphysics, Capture the Concept, COMSOL Desktop и LiveLink. Любые другие товарные знаки являются собственностью их владельцев. Корпорация COMSOL AB, ее дочерние компании и продукция не связаны, не утверждались, не финансировались и не поддерживались этими владельцами.
© 2014–2015.

Контактная информация

Подать запросы общего характера, обратиться в техническую поддержку, 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:

ВИДЕО

www.comsol.ru/search/?s=postprocessing&subset=video

БЛОГ

www.comsol.ru/search/?s=postprocessing&subset=blog

ФОРУМ

www.comsol.ru/community/forums/results-and-visualization/

БАЗА ЗНАНИЙ

www.comsol.ru/support/knowledgebase/

СОДЕРЖАНИЕ

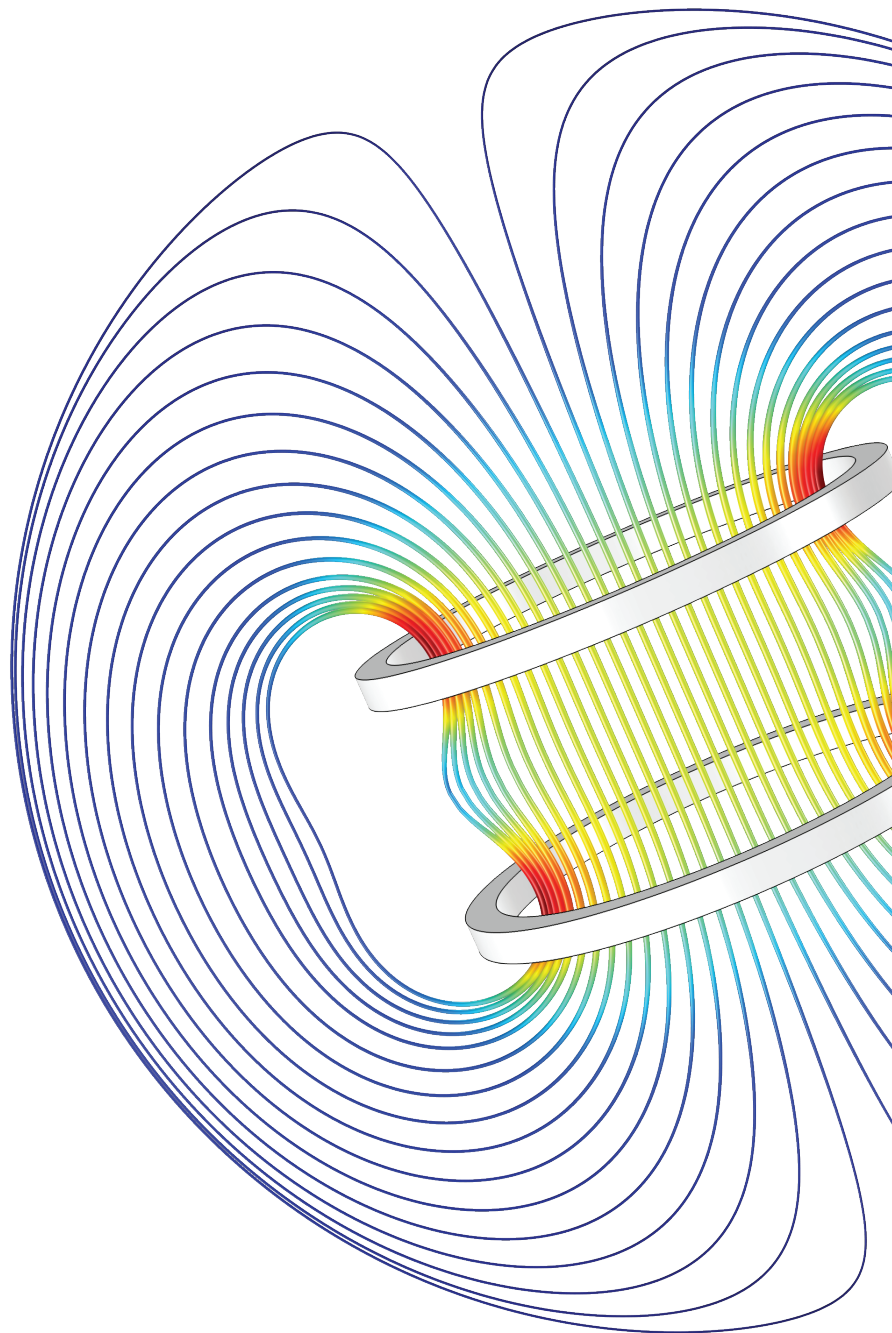
ВВЕДЕНИЕ	1
НАБОРЫ ДАННЫХ, ПРОИЗВОДНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ И ТАБЛИЦЫ	
▪ Решения	2
▪ Секущие точки и вычисления	3
▪ Таблицы	6
ТИПЫ ГРАФИКОВ	
▪ Выбор типа графика	8
▪ 3D-графики	8
▪ 2D-графики	15
▪ 1D-графики	21
ПРИМЕНЕНИЕ ПОСТОБРАБОТКИ ДЛЯ ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ	24
ЭКСПОРТ РЕЗУЛЬТАТОВ	
▪ Данные, таблицы и сетки	25
▪ Отчеты	27
СОВЕТЫ	
▪ Кнопки интерфейса	28
▪ Изменение структуры среды COMSOL Desktop	28
▪ Отображение сеток на поверхностных графиках	29
▪ Управление с помощью ползунка и интерактивное позиционирование	30
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	31

ВВЕДЕНИЕ

Ориентация, расцветка и размещение объекта, созданного с помощью компьютерного моделирования, способны помочь оценить геометрию, назначение и успешность продукта. Визуализация является крайне важным этапом процесса разработки продукта. Наглядное отображение моделируемых физических явлений позволяет понять, что на самом деле происходит внутри устройства или модели: теплопередача отмечается цветами, которые помогают нам представить ее распределение, точки разрушения конструкции отображаются в наглядном и удобном виде, траектории потоков жидкости становятся отслеживаемыми.

Средства постобработки и визуализации COMSOL Multiphysics® помогут вам значительно упростить задачи понимания полученных результатов, отслеживания явлений, происходящих в продукте, представить вашу работу коллегам, соавторам и заказчикам. Демонстрации, представленные в этом руководстве, помогут вам легче определять физические явления, представлять ваши открытия в наглядном и понятном виде, формулировать ваши идеи разработки и демонстрировать ограничения и задачи. Моделирование особенно полезно в том случае, если вам нужно проверить результат разработки перед изготовлением прототипа. Эти методы позволяют быстро понять, как изменение габаритов, материалов и других характеристик изделия повлияет на качество устройства.

Составляя этот материал, мы руководствовались пожеланиями пользователей COMSOL®, многие из которых хотели бы улучшить свои навыки использования средств постобработки и визуализации от COMSOL. Наша цель — предложить вам инструменты для решения ваших задач, предоставить вам новые возможности и вдохновить вас на демонстрацию возможностей вашего продукта новыми способами, помочь вам в изучении удивительного мира физических явлений, которые происходят на поверхности вашего продукта — или под ней.



КОЛЬЦА ГЕЛЬМГОЛЬЦА

Модель двух параллельных идентичных колец, расстояние между которыми равно радиусу кольца. Они расположены так, чтобы ток проходил через оба кольца в одном направлении. В результате между кольцами образуется однородное магнитное поле, основная составляющая которого параллельна осям двух колец.

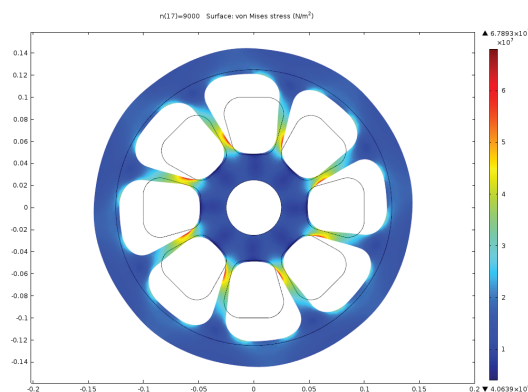
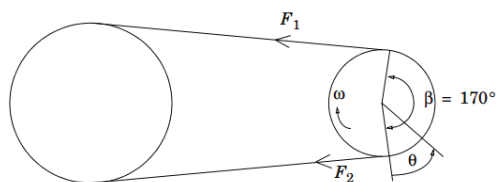
НАБОРЫ ДАННЫХ, ПРОИЗВОДНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ И ТАБЛИЦЫ

Ниже мы подробно рассмотрим методы пакета COMSOL®, которые применяются для создания визуальных материалов. Однако начнем мы с чисел — с данных, которые лежат в основе визуализаций. Эта глава посвящена наборам данных (Data Set), производным значениям и таблицам, которые применяются для построения конечных графиков.

РЕШЕНИЯ

Наборы данных решения соответствуют данным, которые сохраняются решателями. Они зависят от различных параметров — например, от выбранного решателя и от компонента, к которому применяется решение (для моделей с несколькими компонентами). Каждая решенная модель содержит по меньшей мере один набор данных решения.

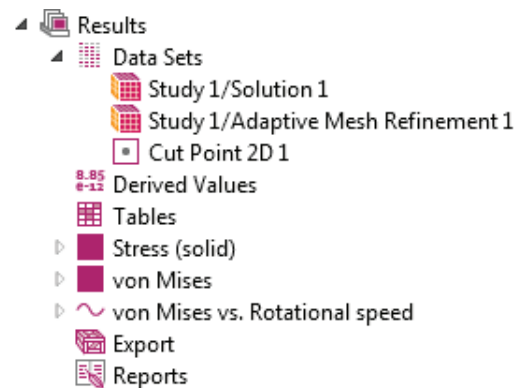
В качестве примера применения наборов данных, производных значений и таблиц рассмотрим модель, показывающую распределение напряжений в ведущем шкиве:



Решение этой модели было найдено с помощью кинестатического анализа: шкив «замораживается» в определенный момент времени, и его центр считается неподвижным. Мы можем анализировать распределение напряжений и деформацию при различных значениях скорости вращения (переменная n означает количество оборотов в минуту).

Откройте программный пакет COMSOL Multiphysics®, перейдите в раздел Библиотеки приложений (Application Libraries) и откройте модель *stresses in pulley* (напряжения в шкиве), выбрав пункт меню *File > Application Libraries > COMSOL Multiphysics > Structural Mechanics* (Файл > Библиотеки приложений > COMSOL Multiphysics > Механика конструкций).

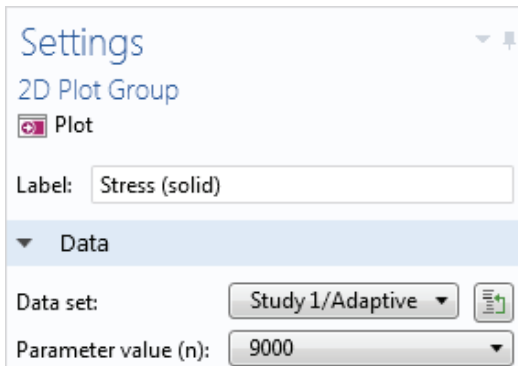
Узел Results (Результаты) для решенной модели показан на рис. 3.



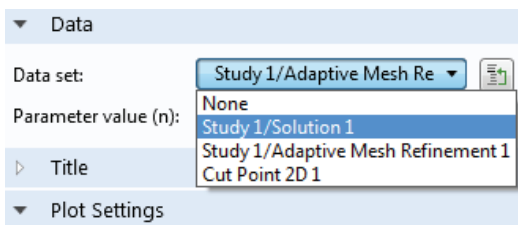
Два решения были созданы предварительно. Эти наборы результатов были получены в результате одного и того же исследования; Study 1/Adaptive Mesh Refinement 1 (Исследование 1/Адаптивное измельчение сетки 1) включает шаг исследования, в котором производится измельчение сетки в определенных областях модели, требующих повышенной точности. Если мы рассмотрим существующие группы графиков в узле Results (Результаты), то заметим, что они основаны на данных только исследования Study 1/Solution 1 (Исследование 1/Решение1) или Study 1/Adaptive Mesh Refinement 1 (Исследование 1/Адаптивное измельчение сетки 1).

СОВЕТ

Как мы увидим далее, дублирование решений — очень полезный прием, позволяющий переключаться между представлениями графика, например, для отображения результатов в различные моменты времени или в различных точках. (Дублируется только представление решения, но не базовые данные численных решателей, поэтому потребление памяти при этом не возрастает.)



На каждом из 2D-графиков показаны напряжения в шкиве для конкретного количества оборотов в минуту. Это количество задается в поле *Parameter value (n)* (*Значение параметра (n)*). Выберите набор данных Study 1/Solution 1 (Исследование 1/Решение 1) или Study 1/Adaptive Mesh Refinement 1 (Исследование 1/Адаптивное измельчение сетки 1) и щелкните Plot (Построить график), чтобы увидеть, как измельчение сетки влияет на результаты.



Посмотрим на некоторые другие наборы данных этой модели.

СЕКУЩИЕ ТОЧКИ И ВЫЧИСЛЕНИЯ

СЕКУЩИЕ ТОЧКИ

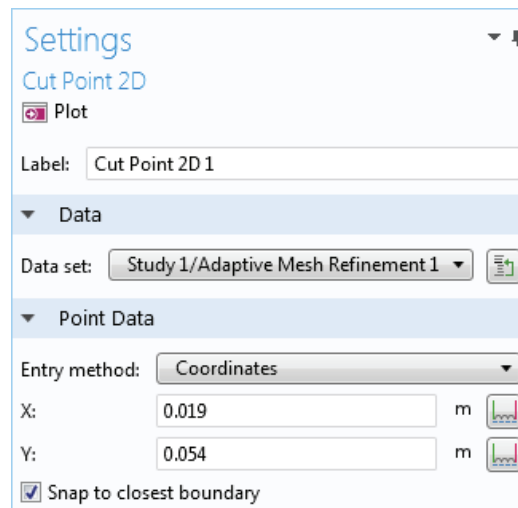
Секущие точки (Cut points) — это созданные в решении точки, которые не влияют на геометрию модели. Они формируют наборы данных, которые можно использовать для вычисления переменных в секущей точке. В

СОВЕТ

У секущих точек есть полезная возможность — Snap to closest boundary (Прикрепить к ближайшей границе). Если вы установите этот флажок, то секущая точка будет прикреплена к границе, ближайшей к выбранным координатам. Это удобно, если вы хотите создать секущую точку на геометрической границе модели.

этой модели мы составляем график напряжения в точке для различных скоростей вращения (об/мин) — например, чтобы понять, как скорость вращения влияет на напряжение.

Секущую точку можно поместить в любом месте модели. Координаты секущей точки можно изменить в разделе Settings (Настройки). В этой модели точка (0,0) расположена в центре шкива.



Выберите узел Cut Point 2D 1 (2D секущая точка 1), введите координаты, как показано на снимке экрана, и щелкните Plot (Построить график). Секущая точка отобразится в Графическом окне, в верхнем правом углу поперечного сечения шкива, на краю одной из прорезей (показана четверть шкива):

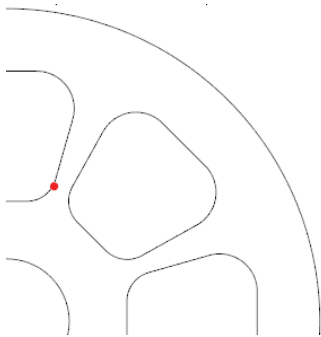
СЕКУЩИЕ ЛИНИИ И СЕКУЩИЕ ПЛОСКОСТИ

Секущие точки применяются для вычисления значений переменных в определенных точках. Аналогичным образом *секущие линии* можно использовать для вычисления значений переменных и для визуализации результатов вдоль некоторой линии. *Секущие плоскости* можно применять для визуализации графиков скалярного поля на поперечных сечениях в трех измерениях.

ПРИМЕЧАНИЯ

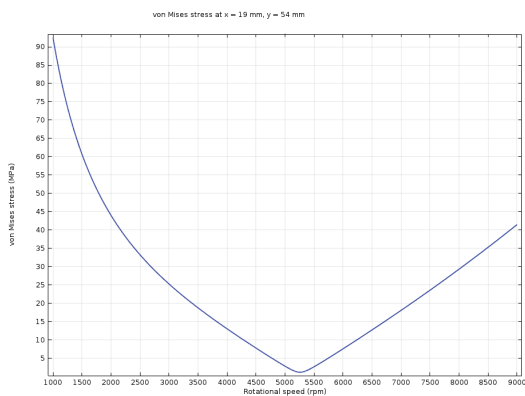
Все модели, упомянутые в этом руководстве, доступны пользователям программного обеспечения COMSOL® в Библиотеках приложений. Если вы еще не являетесь пользователем COMSOL, свяжитесь с нами. Наши контактные данные доступны на странице www.comsol.com/contact. Более подробная информация о возможностях физического моделирования COMSOL приводится на странице www.comsol.com/products.

В этом руководстве предполагается, 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). Если вам нужна конкретная модель, щелкните *Uncheck all* (Снять выделение) на следующем экране. Перейдите к требуемой модели (в нашем случае это *COMSOL Multiphysics > Structural Mechanics > Stresses in Pulley* (COMSOL Multiphysics > Механика конструкций > Напряжения в шкиве) и щелкните Download (Загрузить).



Позже мы воспользуемся этой точкой для создания других графиков. Пока взглянем на группу 1D-графиков под заголовком von Mises vs. Rotational speed (зависимость напряжений по Мизесу от скорости вращения) в узле Results (Результаты).

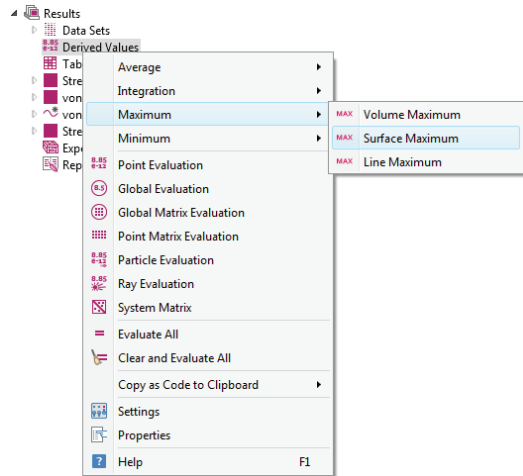
Выбран набор данных Cut Point 2D 1 (2D секущая точка 1), и результаты отображают зависимость напряжения от скорости вращения в точке с координатами (19, 54) в миллиметрах:



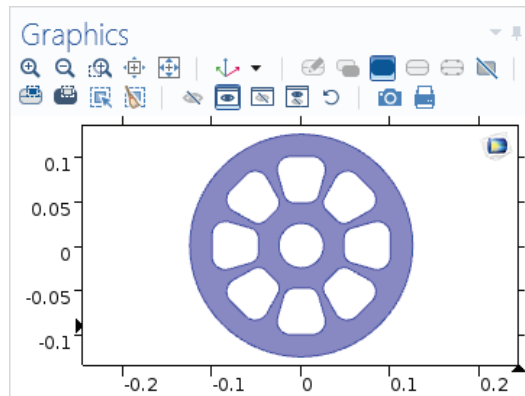
ПРОИЗВОДНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ

Мы рассмотрели все наборы данных, представленные в модели на данный момент. В этом разделе мы обсудим максимумы и минимумы, интегралы, вычисления в точке и по всей модели. Эти вычисления можно использовать для управления данными, на основе которых строятся конечные графики.

Щелкните правой кнопкой мыши пункт Derived Values (Производные значения) в узле Results (Результаты). Откроется список значений, которые можно вычислить. Найдем максимальное напряжение на поверхности поперечного сечения. Для этого выберите Maximum > Surface Maximum (Максимум > Максимум по поверхности).



Так мы сможем вычислить максимум выбранной переменной на поверхностной области. В окне настроек Surface Maximum (Максимум по поверхности) выберите набор данных Study 1/ Adaptive Mesh Refinement 1 (Исследование 1/ Адаптивное изменение сетки 1). Выберите область Domain 1 (Область 1); щелкните перекрестное сечение шкива в Графическом окне.



Убедитесь, что в разделе Expression (Выражение) приведено следующее выражение по умолчанию: *solid.disp* (смещение), а единица измерения — *m* (метры). Щелкните Evaluate (Вычислить) в верхней части окна настроек. Будет сформирована таблица, состоящая из двух столбцов. В ней отображается максимальное полное смещение для каждого значения скорости вращения.

ДРУГИЕ ПРОИЗВОДНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ

Для выбранной переменной можно вычислить и другие максимумы и минимумы — вдоль линии или по объему. Средние значения и интегралы вычисляются аналогично — с помощью пунктов меню, которое появляется при щелчке узла Derived Values (Производные значения) правой кнопкой мыши.

n	Total displacement (m)
1000.0	1.9710E-4
1500.0	1.3138E-4
2000.0	9.8501E-5
2500.0	7.8768E-5
3000.0	6.5617E-5
3500.0	5.6249E-5
4000.0	4.9274E-5
4500.0	4.3936E-5

Мы можем добавить в эту таблицу несколько переменных. Измените выражение на *solid.mises* (напряжение по Мизесу). Вы можете ввести новое выражение в прежнее поле или щелкнуть Replace Expression (Заменить выражение) и выбрать Model > Component 1 > Solid Mechanics > Stress > solid.mises — von Mises stress (Модель > Компонент 1 > Механика твердого тела > Напряжение > solid.mises – напряжение по Мизесу). Измените единицу измерения на МПа (МПа) и снова щелкните Evaluate (Вычислить).

В таблице Table 1 отобразятся другие значения максимального смещения и напряжения при различных значениях скорости вращения:

n	Total displacement (m)	von Mises stress (MPa)
1000	1.9747e-4	118.59537
1500	1.31622e-4	77.95324
2000	9.86841e-5	56.84325
2500	7.89141e-5	46.96765
3000	6.57395e-5	41.79199
3500	5.63524e-5	38.99445
4000	4.93637e-5	37.8144
4500	4.40156e-5	37.82925
5000	3.98716e-5	38.78548
5500	3.68582e-5	40.52172
6000	3.47066e-5	42.93041
6500	3.32461e-5	45.93708
7000	3.2417e-5	49.49379
7500	3.21782e-5	53.59183
8000	3.24929e-5	58.1668
8500	3.33241e-5	63.22718
9000	3.46367e-5	68.73563

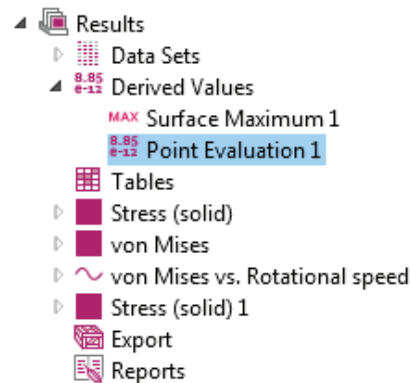
Та-дам! Мы получили наши данные.

ОБЪЕКТЫ POINT EVALUATION (ВЫЧИСЛЕНИЕ В ТОЧКЕ)

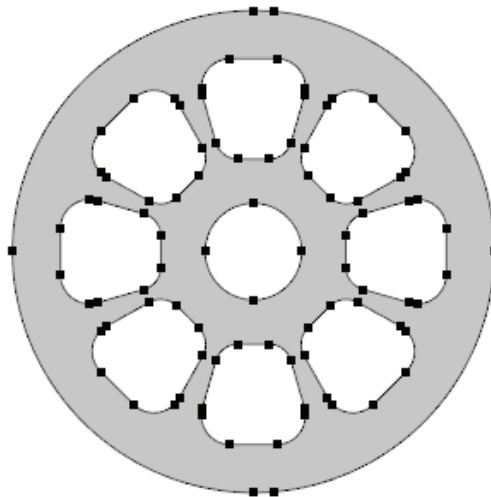
Теперь создадим объект Point Evaluation (Вычисление в точке). Вычисления в точке применяются для вычисления значения переменной или выражения в определенной точке (тогда как максимум, который мы только что рассчитывали, находился для некоторой

области). Вычисление также можно провести для нескольких точек — например, чтобы проанализировать деформацию (или другое явление) в нескольких узлах модели.

Щелкните правой кнопкой мыши пункт Derived Values (Производные значения) и выберите Point Evaluation (Вычисление в точке).



На перекрестном сечении шкива в Графическом окне отобразится набор точек. Эти точки нанесены на геометрию модели. Для вычисления в точке необходимо выбрать одну или несколько из этих точек. Выбрать произвольную точку, как в случае с секущими точками, не получится.



Чтобы выбрать необходимые точки, щелкните их в Графическом окне. Выберем две точки с двух сторон от центрального отверстия, слева и справа от (0,0).

При щелчке их названия (36 и 55) добавляются в список выбранных объектов. Измените выражение на *solid.mises*, а единицу измерения — на МПа (МПа). Щелкните Evaluate (Вычислить).

n	von Mises stress (MPa), Point: 36	von Mises stress (MPa), Point: 55
1000.0	15.366	16.445
1500.0	10.266	10.919
2000.0	7.7426	8.1338
2500.0	6.2755	6.4581
3000.0	5.3767	5.3677
3500.0	4.8563	4.6646
4000.0	4.6343	4.2770
4500.0	4.6695	4.1804
5000.0	4.9293	4.3541
5500.0	5.3808	4.7633
6000.0	5.9933	5.3657
6500.0	6.7414	6.1232
7000.0	7.6061	7.0075
7500.0	8.5741	7.9998
8000.0	9.6362	9.0875
8500.0	10.786	10.263
9000.0	12.020	11.521

Будет создана таблица Table 2, в которой отображаются напряжения в двух точках при каждом значении скорости вращения.

ВЫЧИСЛЕНИЕ ГЛОБАЛЬНЫХ ВЕЛИЧИН

При вращении шкив немного деформируется, поэтому его радиус на самом деле не является постоянной величиной. Как измерить диаметр, если он зависит от скорости вращения?

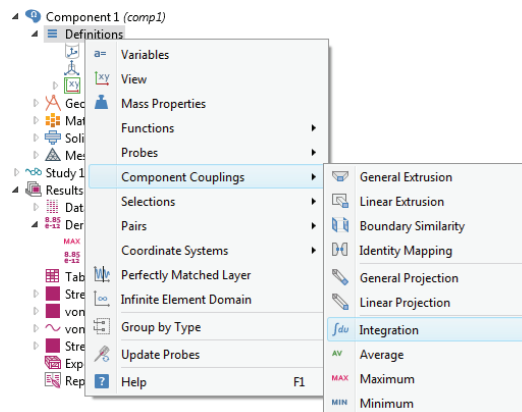
Создадим переменную, которая характеризует деформацию перекрестного сечения. Ее значение будет соответствовать изменению расстояния между двумя точками при различных значениях скорости вращения. Для этого мы воспользуемся возможностью вычисления глобальных величин.

Вначале создадим два узла интегрирования. Мы будем вычислять значение интеграла в точке, что позволит получить значение функции (которую мы определим далее) в этой точке.

Разверните компонент Component 1 и узел Definitions (Определения). Щелкните правой кнопкой мыши узел Definitions (Определения) и выберите *Component Couplings > Integration (Взаимосвязи компонентов > Интегрирование)*. Повторите эти действия дважды.

ПЕРЕМЕННЫЕ

В функции не обязательно оставлять переменную R . В этом случае мы воспользовались ей для описания диаметра. Выражение переменной $intop1(u) - intop2(u)$ также подошло бы — мы бы получили разность значений в двух точках.



Щелкните узел Integration 1 (Интегрирование 1). В разделе *Geometric entity level (Уровень геометрической сущности)* выберите *Point (Точка)*. Теперь в Графическом окне отобразятся все точки геометрии шкива, как ранее при создании вычисления в точке. Для этого вычисления мы вновь выберем самые далекие от центра точки слева и справа.

Выберите крайнюю правую точку (90) щелчком мыши.

Перейдите к узлу Integration 2 (Интегрирование 2) и вновь выберите уровень геометрической сущности *Point (Точка)*. В этот раз выберите крайнюю левую точку (1).

Теперь требуется создать переменную, значение которой мы будем отслеживать. Щелкните правой кнопкой мыши узел Definitions (Определения) еще раз и выберите *Variables (Переменные)*. В таблице Variables введите $diam$ в поле имени и $intop1(R+u) - intop2(-R+u)$ в поле выражения.

Значение переменной, которую мы только что создали, соответствует диаметру шкива при заданной скорости вращения. Имена $intop1$ и $intop2$ соответствуют операторам интегрирования. Обратите внимание: мы воспользовались значениями R и $-R$, чтобы учесть оба направления (влево и вправо от нуля).

Теперь щелкните правой кнопкой мыши Study 1 (Исследование 1) над узлом Results (Результаты) и выберите *Update Solution (Обновить решение)*. Эта модель уже была решена, поэтому требуется выполнить обновление результатов. Однако пакет COMSOL не требует полного повторения исследования. Вы можете добавить эту взаимосвязь компонентов, а затем изменить существующее решение так, чтобы ее учесть. (Эта возможность особенно полезна, если вы вспомнили о необходимости создать определенные переменные и взаимосвязи уже после того, как решили модель.)

Вернемся к узлу Results (Результаты). Щелкните правой кнопкой мыши пункт Derived Values (Производные значения) и выберите *Global Evaluation (Глобальное вычисление)*. В поле Expression (Выражение) введите $diam-2*R$. Это выражение соответствует разности между исходным диаметром ($2*R$) и новой переменной, которую мы только что создали. В результате мы получаем значение деформации в метрах.

Щелкните Evaluate (Вычислить). Появится таблица Table 3, содержащая значения деформации. Первые несколько строк (соответствующие значениям n менее 2500) будут отрицательными, что свидетельствует об уменьшении диаметра. При $n=2500$ результаты станут положительными и будут возрастать с увеличением скорости вращения.

На этом вычисление глобальных величин закончено.

ТАБЛИЦЫ

Мы уже почти закончили! Мы рассмотрели различные способы получения данных от решателей и их организации. В качестве заключения изучим несколько приемов эффективной работы с таблицами.

Возможно, вы уже заметили, что в результате вычислений, которые мы запускали, программа автоматически создавала таблицы. В таблицах хранится информация из наборов данных и производных значений. При работе с моделью шкива мы создали следующие таблицы:

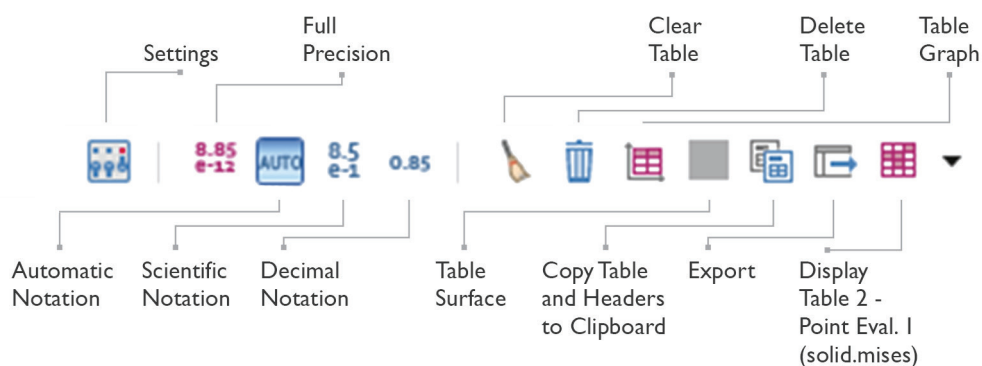
- Результаты, полученные с помощью секущей точки Cut Point 2D 1, когда мы составляли график зависимости напряжения в точке (19, 54) от скорости вращения

- Максимальное напряжение и смещение в поперечном сечении при различных значениях скорости. В таблице показано изменение расстояния между двумя точками. Данные были получены с помощью вычисления глобальных величин.

Рассмотрим кнопки интерфейса, позволяющие упростить работу с таблицами.

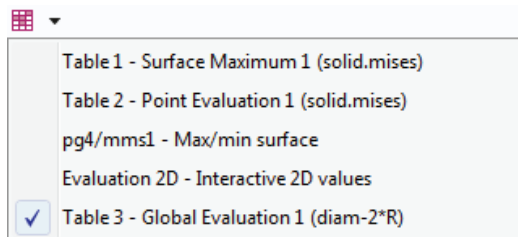
В верхней части любой таблицы, под ее заголовком, находятся следующие значки: Назначение некоторых из этих кнопок достаточно очевидно. Вот что делают остальные:

- Settings (Настройки): открыть окно настроек таблицы в центральном столбце.
- Full Precision (Полная точность): отображать в таблице полные значения (все десятичные разряды).
- Automatic Notation (Автоматический выбор представления): целые числа будут отображаться в нормальном представлении, десятичные дроби — в экспоненциальном.
- Scientific Notation (Экспоненциальное представление): отображать все значения в экспоненциальном представлении.
- Decimal notation (Десятичное представление): отображать все значения в десятичном представлении.
- Table Graph (График табличных данных): построить график на основе табличных данных (подробнее об этой функции ниже). Table Surface (График поверхности табличных данных):



построить график поверхности на основе табличных данных.

- Export (Экспорт): экспорт данных из таблицы в текстовый файл (.txt).
- Display (Отобразить): отобразить следующую таблицу из узла Tables (Таблицы). Щелкните значок стрелки, чтобы открыть список уже созданных таблиц. С его помощью можно переключаться между таблицами.

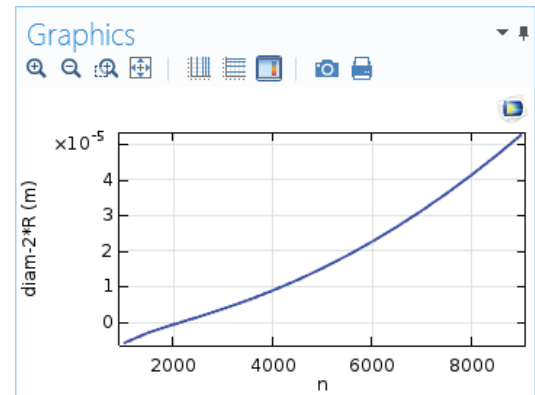


Последнее замечание: таблицы очень удобны для отслеживания результатов в определенное время или при определенном значении параметра — например, чтобы оценить, как решение меняется от начального значения к конечному. Также мы можем включить данные из таблицы в окончательный график. В качестве примера воспользуемся глобальным вычислением, которое мы создали в конце предыдущего раздела.

СОВЕТ

Также вы можете импортировать таблицы из файлов данных. Щелкните правой кнопкой мыши узел Tables (Таблицы) в разделе Results (Результаты) и выберите Table, а затем запустите функцию импорта, доступную в окне настроек, чтобы загрузить текстовый файл или файл данных. Это особенно удобно, если требуется сравнить результаты моделирования с экспериментальными данными.

Щелкните правой кнопкой мыши узел Results (Результаты) и выберите 1D Plot Group (Группа 1D-графиков). Щелкните правой кнопкой мыши новый узел, 1D Plot Group 5 (Группа 1D-графиков 5), и выберите Table Graph (График табличных данных). (Также вы можете щелкнуть значок Table Graph в окне таблицы.) В списке таблиц выберите Table 3 и щелкните Plot (Построить график).



n	diam-2*R (m)
1000.0	-5.8986E-6
1500.0	-2.8879E-6
2000.0	-6.4039E-7
2500.0	1.4997E-6
3000.0	3.7511E-6
3500.0	6.2074E-6
4000.0	8.9154E-6
4500.0	1.1901E-5

Вы получите таблицу и график, показывающие рост деформации с ростом скорости вращения.

ТИПЫ ГРАФИКОВ

Итак, у нас есть данные, и мы освоили несколько способов работы с ними. Теперь переходим к самому интересному — к визуализации результатов.

ВЫБОР ТИПА ГРАФИКА

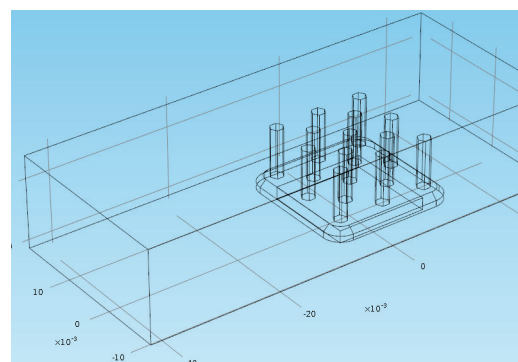
Программное обеспечение COMSOL® отличается высокой гибкостью — оно позволяет, например, создать 3D-график на основе 2D-модели. Объемные графики являются очень мощным инструментом углубленного анализа физических процессов в вашем устройстве. Когда следует применять эту возможность? В каких случаях она наиболее полезна? Иногда выбор лучшего графика для визуализации ваших результатов совсем не очевиден. Перед тем, как перейти к этому вопросу, рассмотрим основы создания графиков. Дальше будет интереснее.

Начнем с типа графиков, позволяющих наиболее наглядно отобразить реальный объект: с трехмерных графиков. Уменьшение размерности графика — достаточно наглядный процесс: 2D- и 1D-графики часто являются простыми поперечными сечениями 3D-графиков. Поэтому большую часть методов создания графиков мы будем рассматривать на трехмерной модели.

3D-ГРАФИКИ

В качестве примера рассмотрим алюминиевый радиатор, применяемый для охлаждения компонентов в электрических цепях. Если у вас установлен модуль Heat Transfer (Теплопередача) или CFD (Вычислительная гидродинамика), то эта модель доступна в Библиотеках приложений: *File > Application Libraries > Heat Transfer Module > Tutorial Models (Файл > Библиотеки приложений > Модуль Теплопередача > Учебные модели), Forced and Natural Convection (Вынужденная и свободная конвекция) или File > Application Libraries > CFD Module > Non-Isothermal Flow (Файл > Библиотеки приложений > Модуль Вычислительная гидродинамика > Неизотермический поток).* В этом каталоге также находится документация к модели, включающая описание этапов моделирования.

В этой модели происходит множество физических процессов — это одна из причин, по которым она будет хорошим примером! Эта модель служит для исследования потоков жидкости и теплопередачи. Алюминиевый радиатор из нескольких ребер охлаждения прикреплен к подложке из кремниевого стекла. Он расположен внутри прямоугольной прорези с входным и выходным отверстием для потока воздуха. Изначально через основу радиатора проходит тепловой поток мощностью 1 Вт. Этот поток генерируется внешним источником тепла.



Модель анализирует явления теплопроводности и конвекции, а также температурные поля на поверхностях.

Чтобы открыть график температуры, разверните узел Results (Результаты) и щелкните группу графиков Temperature (ht). Однако мы собираемся построить график самостоятельно, поэтому готовый график можно удалить. Щелкните его правой кнопкой мыши и выберите *Delete (Удалить)*. Давайте также удалим группу графиков Velocity (spf) — позднее мы восстановим и ее.

Еще один фрагмент, который мы удалим, а после восстановим, — представление. В окончательных результатах отображается не вся геометрия — часть прямоугольного канала скрыта. Как мы увидим далее, скрытие таких сущностей очень полезно при визуализации внутренней части модели.

Пока давайте восстановим представление, чтобы геометрия отображалась полностью, и познакомимся с возможностями скрытия

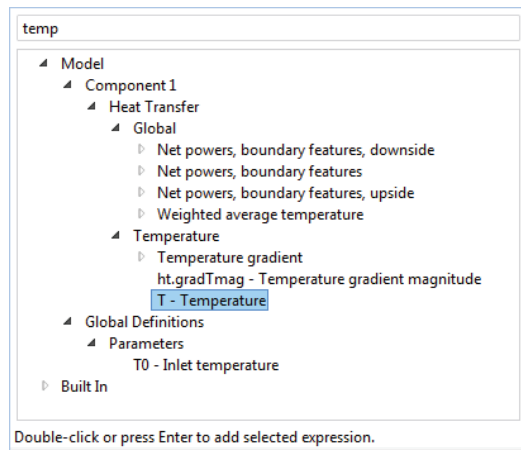
компонентов. Разверните *Component 1 > Definitions > View 1 (Компонент 1 > Определения > Представление 1)* и удалите узел *Hide Geometric Entities 1 (Скрыть геометрические сущности 1)*.

ГРАФИКИ ПОВЕРХНОСТИ

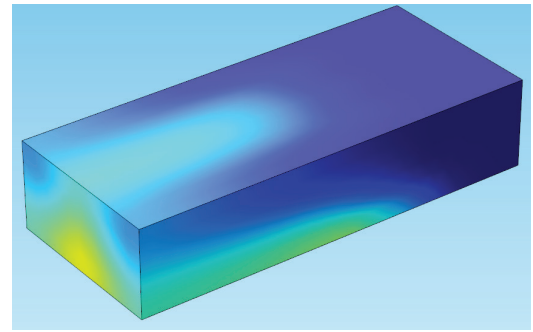
Первый график, который мы создадим на основе геометрии радиатора, — график поверхности, показывающий изменение температуры в канале. Щелкните правой кнопкой мыши узел *Results (Результаты)* и выберите *3D Plot Group (Группа 3D-графиков)*. Щелкните новый узел правой кнопкой мыши и выберите *Surface (График поверхности)*.

В поле уже будет содержаться выражение (температура), график которого мы хотим составить. Если бы его требовалось добавить, мы могли бы найти его, щелкнув *Replace Expression (Заменить выражение)* и выбрав *Model > Component 1 > Heat Transfer > T — Temperature (Модель > Компонент 1 > Теплопередача > T — температура)*.

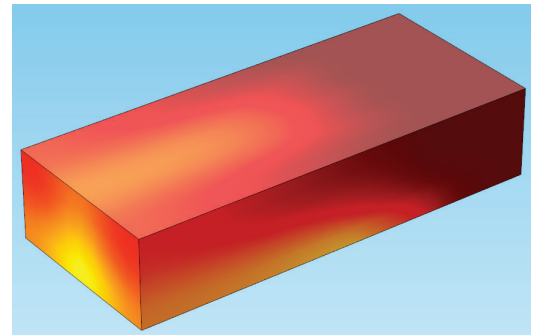
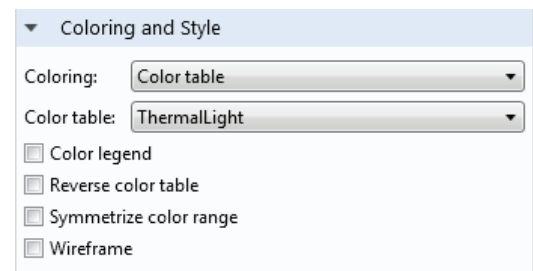
Если вы не помните, где находится нужное вам выражение, воспользуйтесь поиском. Введите ключевое слово в поле в верхней части окна выражения:



Щелкните *Plot (Построить график)*. Мы получили некоторую поверхность, и она, прямо скажем, совсем не похожа на те результаты, которые мы хотим получить! Будем изменять настройки нашего представления и графика, пока не добьемся нужного результата. Одна из причин, по которым воздушный резервуар теперь выглядит совсем не похоже на те результаты, которые мы наблюдали раньше, заключается в том, что в качестве цветовой схемы по умолчанию выбрана *Rainbow (Радуга)*.



Мы можем изменить этот параметр в окне настроек *Surface (Поверхность)* на вкладке *Coloring and Style (Цвета и стиль)*. В раскрывающемся списке измените цветовую таблицу с *Rainbow* на *ThermalLight*.



Теперь результат выглядит немного лучше! Однако мы по-прежнему не видим, что происходит внутри канала. Помните, мы удалили узел *Hide Geometric Entities (Скрыть геометрические сущности)* из представления *View 1*? Вернемся к нему на минуту.

ПЛАЩ-НЕВИДИМКА: СКРЫТИЕ СУЩНОСТЕЙ

Иногда бывает очень удобно скрыть определенные части геометрии, чтобы увидеть, что происходит внутри, — особенно в том случае, если модель обладает сложной геометрией с окружающим слоем воздуха, как в случае с радиатором. Большую часть времени при настройке результатов вам не потребуется видеть

СОВЕТ

Еще один способ открыть узел представления, который применяется к определенной группе графиков, — выбрать группу графиков (например, *3D Plot Group 1*) и перейти на вкладку *Plot Settings (Настройки графика)*. В поле *View (Представление)* можно изменить представление, которое применяется к группе графиков, или перейти непосредственно к представлению, щелкнув кнопку справа от раскрывающегося списка.

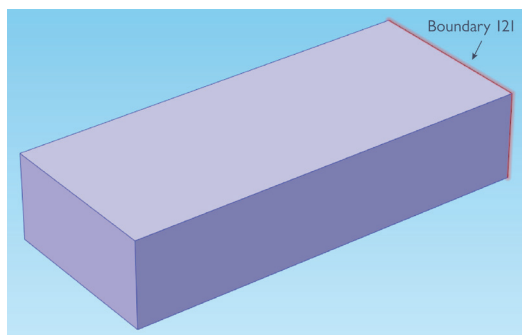
воздушную оболочку. В других случаях вам может потребоваться рассмотреть внутреннюю часть устройства, скрытую под дополнительными геометрическими компонентами. Прием, которым мы сейчас воспользуемся, часто оказывается очень полезным при постобработке.

Вернитесь к узлу в представлении View 1 и щелкните узел *Hide Geometric Entities* (*Скрыть геометрические сущности*). В окне настроек, в разделе *Geometric entity level* (*Уровень геометрической сущности*), *Boundary* (*Граница*). (Кроме того, вы можете скрывать отдельные точки, ребра и области.)

Выберите три грани канала, которые заслоняют радиатор (границы 1, 2 и 4). При наведении курсора мыши они становятся красными. Выбранные грани принимают фиолетовый цвет. (Чтобы выбрать грань, щелкните ее.)

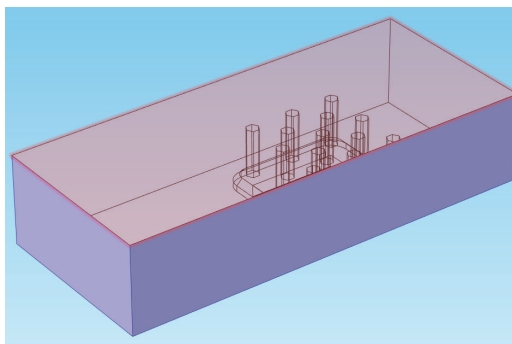
Теперь добавим к выделению границу 121, которая находится на входном отверстии канала. Чтобы сделать это, поверните радиатор так, чтобы грань была видимой, или удерживайте курсор мыши на области и прокручивайте колесико, пока края грани на рисунке не станут красными. Затем щелкните левой кнопкой мыши, чтобы выбрать границу.

В случае простой геометрии, как в нашем примере, повернуть модель и выбрать грань на противоположной стороне достаточно просто. Однако при работе со сложными геометриями или в случае граней, перекрываемых другими гранями и недоступных извне модели, прокрутка колесика мыши (или применение клавиш управления курсором, если на вашей мыши нет колесика прокрутки) позволяет значительно проще переключаться между сущностями. Этот прием также полезен в том случае, если вы не хотите менять положение модели.

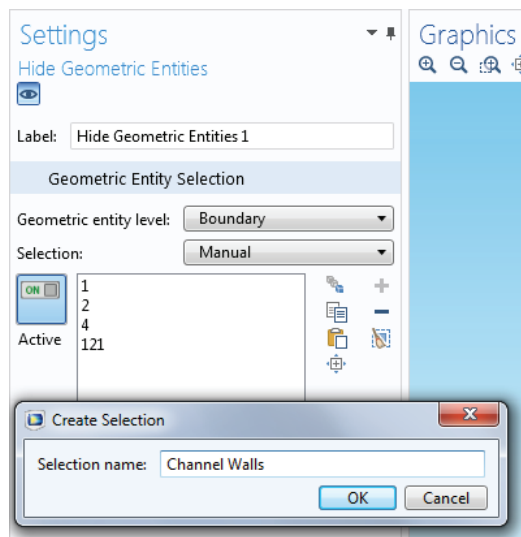


СУЩНОСТИ И ОБЪЕКТЫ

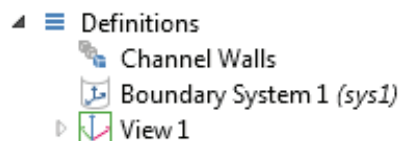
На вкладке также доступен флажок *Hide Geometric Objects* (*Скрыть геометрические объекты*). Он позволяет скрыть объекты, сформированные геометрией. Скрытие геометрических объектов доступно только для определенных узлов, например, *View and Definitions* (*Представление и определения*). Действия, скрывающие геометрические объекты, недоступны на узлах *Materials* (*Материалы*), *Physics* (*Физики*), *Mesh* (*Сетка*) и *Results* (*Результаты*). Поэтому флажок *Hide Geometric Entities* (*Скрыть геометрические сущности*) является предпочтительным вариантом в том случае, если вы не работаете с ветвью *Geometry* (*Геометрия*) дерева модели.



Если для модели вам потребуется выбирать один и тот же набор компонентов несколько раз или тщательно выбирать множество сущностей, нажмите кнопку *Create Selection* (*Создать выделение*) справа от списка.

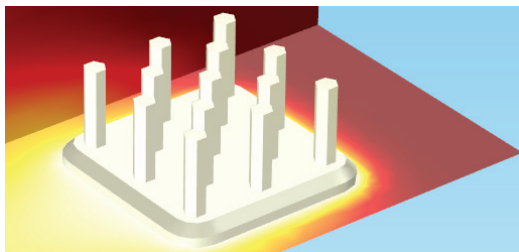
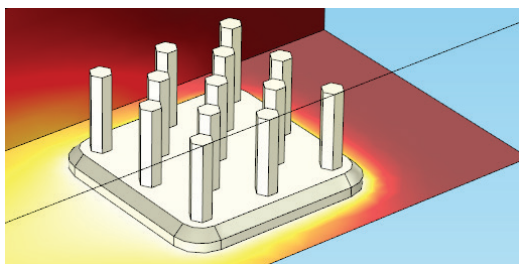


Здесь вы можете задать выделение и присвоить ему имя. Оно появится в виде нового узла в списке Definitions (Определения):



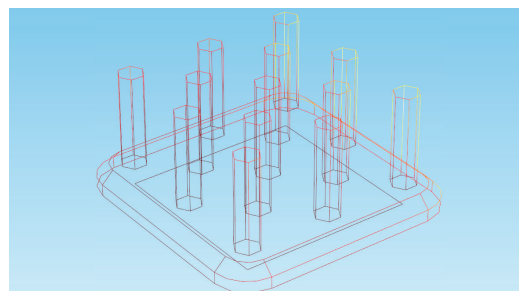
В узле Results (Результаты) новая группа будет отображаться как доступный вариант при создании выделений сущностей одного типа. Так вам не потребуется повторно выбирать все эти сущности при необходимости.

Вернемся к группе графиков 3D Plot Group 5 (Группа 3D-графиков 5). Теперь вы видите внутреннюю часть канала. Давайте уберем часть этих линий. На вкладке Plot Settings (Настройки графика) снимите флажок *Plot data set edges box* (Строить график на основе набора данных для ребер коробки) и щелкните Plot (Построить график). Теперь мы видим только поверхность и геометрию, без линий.



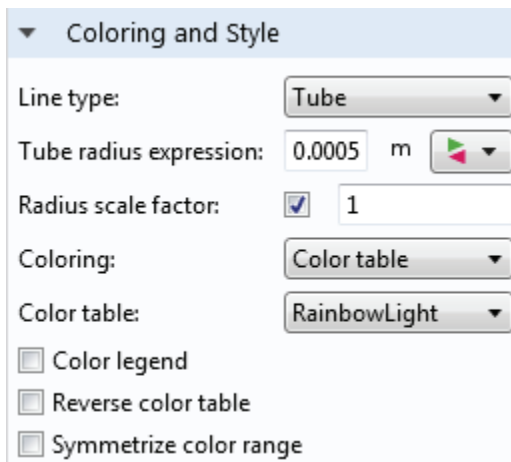
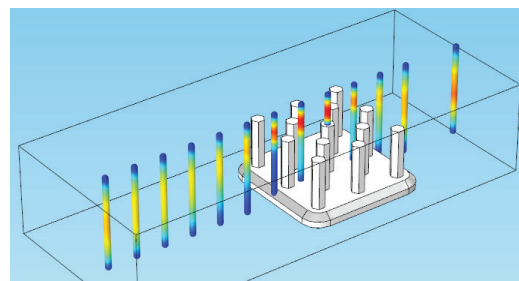
ЛИНЕЙНЫЕ ГРАФИКИ

Только что мы отменили построение графика на основе набора данных для геометрических ребер радиатора. Для лучшего отображения результатов мы можем добавить линейный график. Линейные графики применяются для отображения количественных величин на ребрах. На следующем линейном графике показана температура на ребрах области радиатора:



Также линейные графики можно использовать для отображения результатов на нескольких участках модели. На вкладке Coloring and Style (Цвета и стиль) в окне настроек линейного графика можно изменить его стиль, выбрав значение Tube (Трубка) или Line (Линия) и указав радиус вручную.

Ниже приводится график, построенный вдоль центральной линии канала радиатора. На нем показана скорость потока воздуха от входного отверстия к выходному:



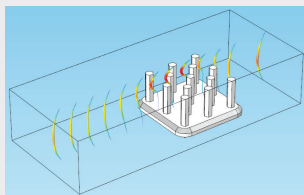
Эти результаты были получены с помощью решения Cut Line 3D (3D секущая линия).

СТРЕЛОЧНЫЕ ГРАФИКИ

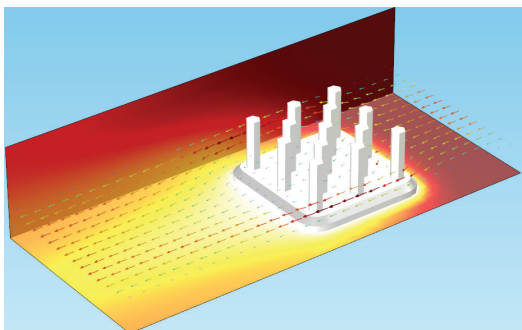
Теперь добавим к рисунку стрелочный график. Щелкните правой кнопкой мыши группу 3D Plot Group 5 (Группа 3D-графиков 5) и выберите *Arrow Volume* (Объем стрелки). Программа

ДЕФОРМАЦИИ

На линейном графике ниже показаны деформация и выражение для радиуса. Пример применения деформаций приводится на стр. 18.



построит график, состоящий из стрелок, которые описывают векторное поле скоростей воздушного потока через канал и вокруг радиатора. Длина стрелок характеризует модуль вектора скорости:

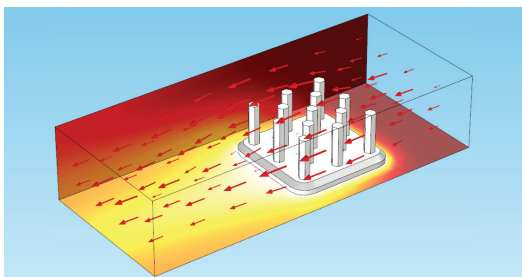


скорость максимальна над радиатором и в верхней части заполненной воздухом области и снижается у нижней плоскости и у основания радиатора. Однако ваш первый стрелочный график не будет похож на приведенный выше. Чтобы получить тот же результат, вам потребуется добавить дополнительные стрелки и уменьшить их так, чтобы они не закрывали геометрию модели.

Взгляните на вкладку Arrow Positioning (Расположение стрелок). На ней доступны списки для точек вдоль осей x , y и z . Это означает, что мы можем изменить количество стрелок вдоль каждой из осей.

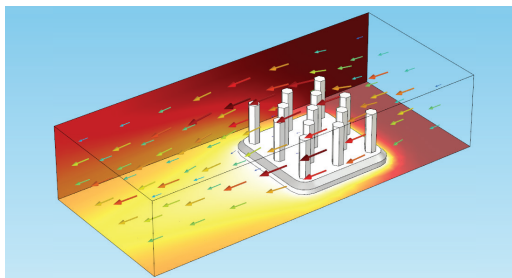
Выбор количества стрелок определяется задачей. Измените количество точек вдоль оси x на 8, вдоль оси y — на 4, вдоль оси z — на 4. (Реальный график, конечно, потребует добавления большего количества стрелок, но в учебных целях мы ограничимся более общей картиной.)

Мы можем изменить размер стрелок, указав новый коэффициент масштабирования на вкладке Coloring and Style (Цвета и стиль). Установите флажок *Scale factor (Коэффициент масштабирования)* и увеличьте значение коэффициента до 0,05 (это также намного больше, чем потребовалось бы для визуализации физики на практике).



Теперь наш график выглядит довольно симпатично. Чтобы немного лучше представить распределение скоростей, добавим к нашему стрелочному графику цветовой диапазон.

Щелкните правой кнопкой мыши пункт Arrow Volume 1 и выберите *Color Expression (Цветовое выражение)*. Щелкните *Replace Expression (Заменить выражение)*, выберите *Model > Component 1 > Laminar Flow > spf.U — Velocity magnitude (Модель > Компонент 1 > Ламинарный поток > spf.U — модуль скорости)* и щелкните *Plot (Построить график)*.



Теперь на нашем стрелочном графике отображается изменение скорости воздушного потока на входе и выходе из канала. Установите флажок *Color legend (Цветные условные обозначения)* на вкладке Coloring and Style. Появится описание условных обозначений для областей с минимальной (синий цвет) и максимальной (красный цвет) скоростью потока.

Мы рассмотрели пример объемного стрелочного графика. Поверхностные стрелочные и линейные стрелочные графики также можно использовать для визуализации векторных величин в виде стрелок на плоских поверхностях или на линиях соответственно.

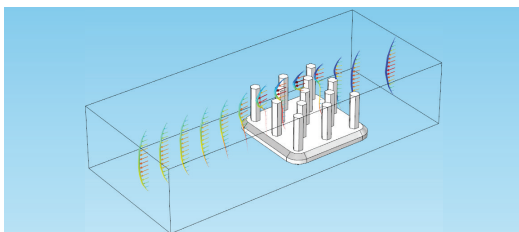
СОВЕТ

Если вам требуется добавить только один слой стрелок в направлении оси z , иногда удобно изменить метод ввода. Измените значение *Number of points (Количество точек)* на *Coordinates (Координаты)*. Так вы сможете ограничить количество точек для стрелок в направлении оси z всего одной, а также указать положение этой стрелки на оси z . Попробуйте ввести в поле координат значение 5[mm] и посмотрите, что получится.

СОВЕТ

На контурном графике щелкните Results (Результаты), чтобы открыть таблицу значений температуры в точках, выбранных щелчком. Также вы можете установить флажок *Level labels (Метки уровней)* в настройках контурного графика на вкладке Coloring and Style (Цвета и стиль), чтобы программа отображала данные для каждого отмеченного контуром уровня.

На следующем рисунке показаны линии стрелок (а также обычный искаженный линейный график), построенные на секущей линии.



КОНТУРНЫЕ ГРАФИКИ

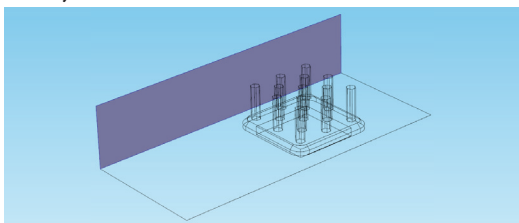
Добавим на заднюю стенку канала контурный график. Контурные графики полезны в том случае, если требуется быстро определить, не приближается ли устройство к предельным эксплуатационным характеристикам, не угрожает ли ему поломка. Они позволяют быстро выяснить точную температуру в течение фазового перехода или узнать, не приближается ли механическая структура к напряжению текучести.

Ранее мы уже упоминали прием дублирования решений. Чтобы создать контурный график, нам нужно добавить новое решение, чтобы контуры не отображались на всей модели.

Разверните узел Data Sets (Наборы данных), щелкните правой кнопкой мыши пункт Study 1/ Solution 1 (Исследование 1/Решение 1) и выберите *Duplicate* (Дублировать). В списке наборов данных (Data Sets) появится новое решение — Study 1/ Solution 1 (2) (Исследование 1/Решение 1 (2)). Щелкните новое решение правой кнопкой мыши и выберите *Selection* (Выбор).

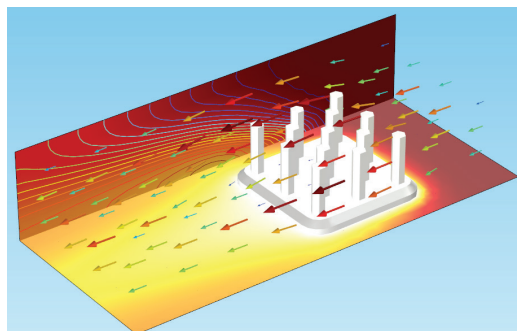
Эта возможность похожа на скрытие геометрических сущностей, которым мы ранее воспользовались в узле View (Отображение), чтобы увидеть внутреннюю часть модели. Выделения в решении позволяют выбирать отображаемые компоненты модели: при использовании модели в качестве набора данных для построения графиков результатов будут применяться только выбранные компоненты модели.

Установите уровень геометрической сущности *Boundary* (Граница) и выберите только заднюю стенку канала.

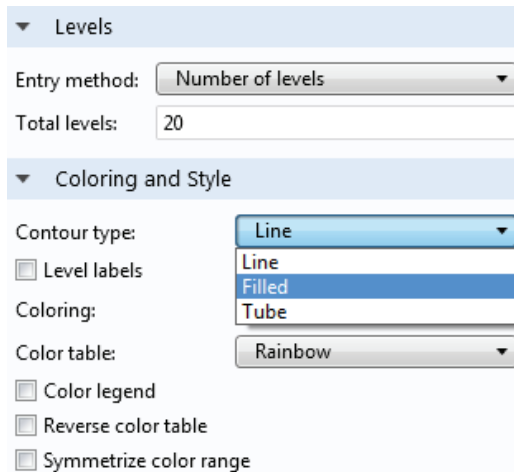


Теперь щелкните правой кнопкой мыши элемент 3D Plot Group 5 (Группа 3D-графиков 5) и выберите *Contour* (Контур). Будет построен контурный график. Убедитесь, что в качестве набора данных в настройках графика выбрано решение Study 1/Solution 1 (2) (Исследование 1/Решение 1 (2)).

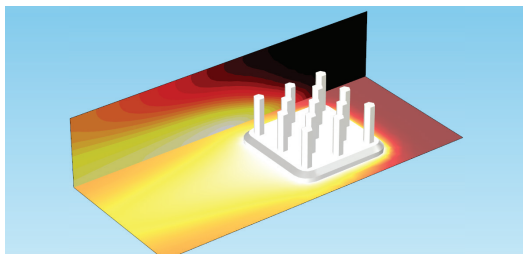
Измените выражение на T (введите символ в поле), если установлено другое значение. Щелкните Plot (Построить график). Будет построен контурный график, показывающий зависимость температуры от точки в канале.



Программа поддерживает не только линейные контуры: мы можем включить плавный переход между ними, чтобы пространство между всеми уровнями было заполнено. Посмотрим, какие настройки доступны на вкладках Levels (Уровни) и Coloring and Style (Цвета и стиль) в окне настроек контурного графика.



Измените тип контура с Lines (Линии) на Filled (С заполнением), как показано на снимке экрана, и отключите стрелочный график: щелкните правой кнопкой мыши его узел и выберите *Disable* (Отключить). Вот что мы получим в результате:

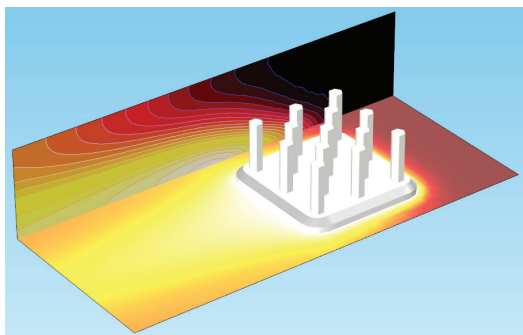


Тип контура *Tubes (Трубки)* позволяет вам вместо обычных линий управлять радиусом трехмерной трубки для отображения линий контуров.

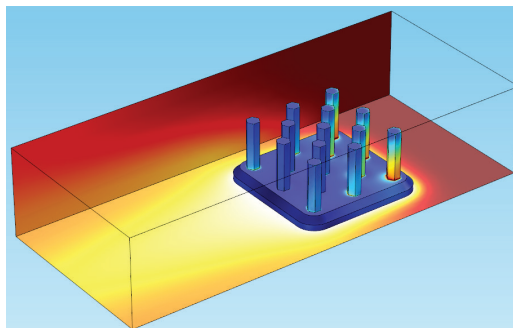
Помните, что в этой области одновременно отображаются два графика (исходная поверхность и контуры). В этом случае они не взаимодействуют между собой, поскольку для них выбрана одна и та же цветовая схема. В других случаях это может привести к затруднениям. Проверьте, получится ли у вас модифицировать результаты так, чтобы график поверхности не включал заднюю стенку.

Теперь немного проще понять, что происходит: контурные слои отображают изменение перепадов температур на задней стенке. Максимальная температура на ней достигается рядом с радиатором. Контуры уже очень гладкие (попробуйте измельчить сетку, чтобы добиться максимально гладких результатов). Давайте вернем линии, чтобы получить наиболее полное представление о перепадах температур.

Дублируйте контурный график, который вы только что создали, и включите для него отображение линий вместо заполненных уровней. Подберите цвета и настройки так, чтобы ваш результат был похож на этот рисунок:



Воспользуйтесь тем, что вы узнали о скрытых сущностях и о способах применения нескольких поверхностей, чтобы получить похожий результат.



ГРАФИКИ СЕЧЕНИЯ

Ранее мы добавили к модели поверхностный, стрелочный и контурный график. Теперь мы попробуем кое-что новое.

График скорости, который мы ранее удалили, содержал так называемый график сечения. На графиках сечения отображаются плоскости поперечного сечения, на которых наглядно представляется зависимость переменной от координаты. К примеру, в этой модели мы можем добавить график сечения для отображения изменения температуры в плоскостях на различном расстоянии от радиатора или скорости воздуха, движущегося через канал.

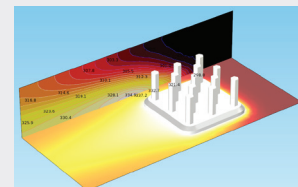
Давайте создадим график сечения для скорости. Чтобы не загромождать модель, мы не будем добавлять его к предыдущим графикам, а создадим новую группу графиков. Щелкните правой кнопкой мыши узел *Results (Результаты)* и добавьте новую группу 3D-графиков (3D plot group). Щелкните новый узел правой кнопкой мыши и выберите *Slice (Сечение)*.

В качестве выражения для графика будет автоматически выбрана температура. Если мы нажмем кнопку *Plot (Построить график)*, то увидим ряд графиков сечения, на которых будет показана относительно низкая изначальная температура на входном отверстии, повышающаяся с приближением к радиатору и вновь падающая при приближении к выходному отверстию.

Ранее мы строили стрелочный график скорости. Построим еще один график модуля скорости. Нам нужно выбрать следующее выражение: *Model > Component 1 > Laminar Flow > spf.U — Velocity magnitude (Модель > Компонент 1 > Ламинарный поток > spf.U — модуль скорости)*.

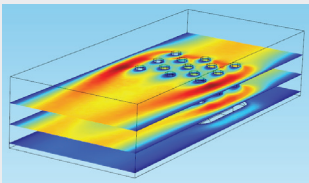
ПРИМЕЧАНИЕ О ВАРИАНТАХ ОТОБРАЖЕНИЯ

Приведенные здесь результаты были получены с помощью измельченной сетки и высокопроизводительного компьютера, поэтому ваше изображение может отличаться от показанного. Кроме того, мы добавили линейный график для отображения некоторых границ набора данных.



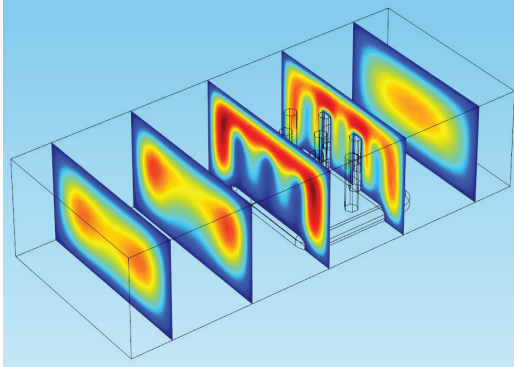
ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ СЕЧЕНИЙ

Здесь показаны графики сечений, расположенные в плоскостях yz вдоль оси x . Изменить их ориентацию можно на вкладке Plane Data (Данные по плоскости). Попробуйте создать при помощи инструментов позиционирования плоскости такой график:



Дополнительные советы по позиционированию графиков сечения приведены на стр. 28, в разделе Советы.

Будет создан график сечения, показывающий скорость воздушного потока внутри канала на различных перекрестных сечениях.



ЛИНИИ ТОКА

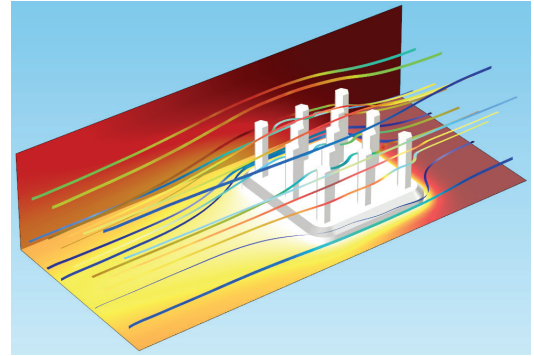
График линий тока для векторного поля состоит из линий, касательная к которым в каждой точке совпадает с направлением мгновенного значения вектора в этой точке. Эти графики часто используют для отображения потоков в текучих средах. В модели радиатора линии тока помогут наглядно представить поток воздуха через канал.

Сбросьте настройки графика температуры. Останется только одна поверхность, показывающая общую температуру радиатора и канала на одном графике, без контурных линий. Щелкните узел графика правой кнопкой мыши и выберите *Streamline* (Линия тока). В качестве выражения выберите *Replace Expression > Model > Component 1 > Laminar Flow > u, v, w — Velocity field* (Заменить выражение > Модель > Компонент 1 > Ламинарный поток > u, v, w — поле скоростей).

На вкладке Streamline Positioning (Расположение линий тока) измените расположение на *Magnitude controlled* (В зависимости от модуля). На вкладке Coloring and Style (Цвета и стиль) выберите тип линий *Ribbon* (Лента). Щелкните Plot (Построить график). Появится ряд линий, отображающих векторное поле скоростей воздушного потока через радиатор. Попробуйте несколько различных значений ширины ленты и расстояний между ними. Выберите такое расположение линий тока, которое вам больше всего нравится.

Результат нашей первой попытки заставляет немного напрягать зрение — весь график красного цвета. Щелкните правой кнопкой мыши узел Streamline 1 (Линия тока 1) и добавьте выражение для цвета. Это позволит не только улучшить внешний вид графика, но и сделать его более информативным: цвет будет отражать модуль скорости. Перейдите к пункту меню *Replace Expression > Model > Component 1 >*

Laminar Flow (Заменить выражение > Модель > Компонент 1 > Ламинарный поток) и выберите *spf.U — Velocity magnitude (spf.U — модуль скорости)*. Щелкните Plot (Построить график).



ИЗОПОВЕРХНОСТИ

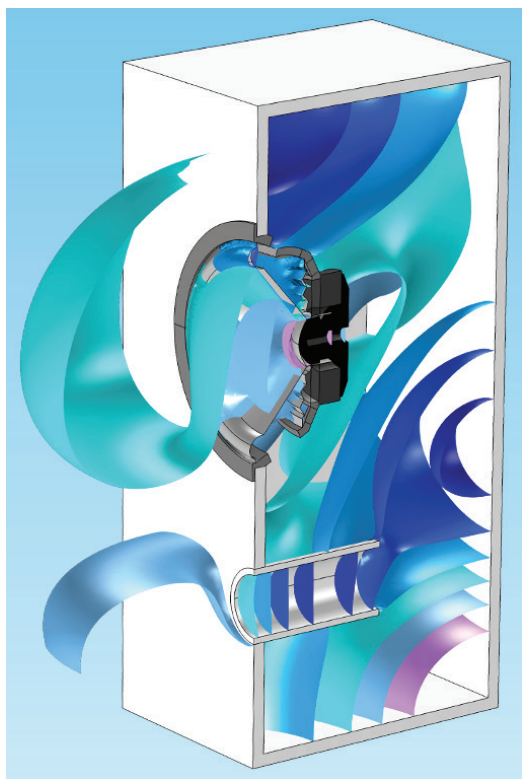
Изоповерхностные графики применяются для отображения количественных величин в виде ряда цветных поверхностей, на которых значение величины является постоянным. Они хорошо подходят для визуализации скалярных полей: например, температуры, концентрации химических веществ, электрического потенциала или давления. Рассмотрим пример. Пусть нам требуется определить уровни акустического давления внутри динамика.

Если у вас установлен модуль Acoustics (Акустика), откройте Библиотеки приложений COMSOL и выберите *Acoustics Module > Electroacoustic Transducers > vented loudspeaker enclosure* (модуль Акустика > Электроакустические преобразователи > корпус акустической системы с отверстием), чтобы изучить этот пример на практике.

Модель позволяет исследовать зависимость чувствительности электродинамического громкоговорителя акустической системы от устройства ее корпуса. Громкоговоритель размещен в корпусе с отверстием. Он состоит из магнита, звуковой катушки, конуса и других деталей. Движимая воздушная область окружена идеально согласованным слоем, который поглощает исходящие волны и минимизирует отражения, чтобы предоставить возможность моделирования бесконечной области. При решении модели вычисляется распределение звукового давления на различных частотах, локальные напряжения и растяжения в подвижных частях, а также деформации структур.

Щелкните группу графиков Acoustic Pressure (Акустическое давление) в узле Results

(Результаты). В числе других графиков он содержит узел изоповерхности.



Ваш график изоповерхностей может немного отличаться от показанного выше, потому что мы изменили диапазон цветов.

Изоповерхностями показаны поверхности постоянного давления внутри корпуса и вне конуса громкоговорителя. Мы можем наблюдать звуковые волны, исходящие из динамика.

2D-ГРАФИКИ

Перейдем к немного другой теме: рассмотрим несколько типов двумерных графиков. Все типы графиков, которые мы изучали на примере трехмерной модели радиатора, можно строить и в двух измерениях, а графики, которые мы рассмотрим сейчас, могут быть и трехмерными.

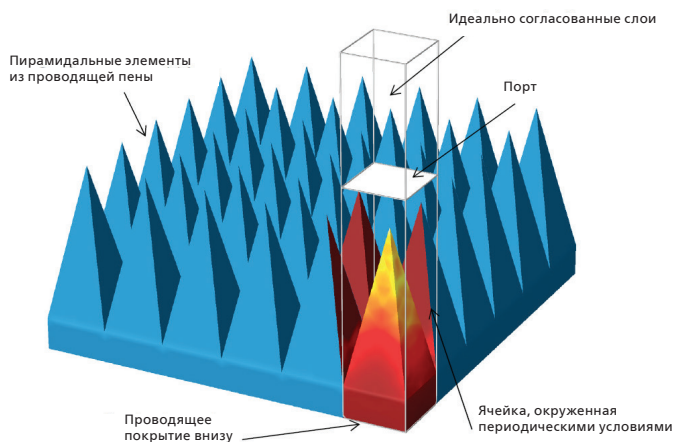
В ходе этой демонстрации мы воспользуемся моделью пирамидального поглотителя, который применяется для поглощения излучения микроволнового диапазона в безэховой камере. Если у вас установлен модуль RF (Радиочастоты), то эта модель находится в разделе *File > Application Libraries > RF Module > Passive Devices* (Файл > Библиотеки приложений > Модуль Радиочастоты > Пассивные устройства).

БЕЗЭХОВАЯ КАМЕРА

Безэховая камера служит для поглощения шумов и электромагнитных излучений. Она изолирована от внешних источников таких колебаний. Стены камеры выложены абсорбирующим материалом таким образом, чтобы он поглощал максимальную долю излучения (в этом случае) по максимуму возможных направлений. Безэховые камеры часто применяются для испытания радаров и антенн, для выявления электромагнитных помех.

Модель пирамидального поглотителя является трехмерной, но для визуализации мы создадим несколько полезных 2D-графиков. Геометрия включает одну пирамидальную элементарную ячейку, окруженную следующими компонентами:

- Прямоугольная область, заполненная воздухом
- Идеально согласованные слои в верхней части воздушной области. Они формируют границу, которая блокирует внутреннее излучение обратно в моделируемую область
- Идеальный проводник под пирамидальной областью. Он соответствует проводящему покрытию на стенке камеры



СЕКУЩИЕ ПЛОСКОСТИ

Процессы создания поверхностных, стрелочных и контурных графиков в двумерном и трехмерном режиме одинаковы. Однако для создания 2D-графика при работе с трехмерной поверхностью нам потребуется плоская поверхность, на которой будет строиться график. Мы создадим такую поверхность, определив секущую плоскость, — аналогично секущим точкам, которыми мы воспользовались при

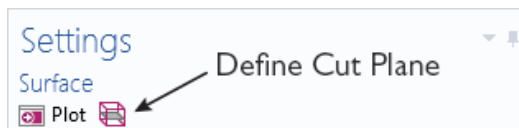
работе с моделью шкива. Инструмент «секущая плоскость» создает плоскость на основе поперечного сечения объемной модели. С его помощью вы можете составить график результатов так же, как в случае двумерного решения.

ПОНИЖЕНИЕ РАЗМЕРНОСТИ

Ранее мы создали 2D-график, воспользовавшись секущей плоскостью для модели пирамидального поглотителя. Аналогичным образом с помощью секущих линий и точек можно создавать 1D-графики. При этом формируется набор данных в выбранной точке (при изменении параметра — например, времени) или вдоль линии.

Щелкните правой кнопкой мыши Results (Результаты), добавьте объект 2D Plot Group (Группа 2D-графиков) и добавьте поверхность к группе графиков. В поле выражения будет автоматически подставлена переменная, соответствующая норме электрического поля. Именно для нее мы хотим построить график. Но если вы попытаетесь построить график этой поверхности, то увидите только пустую белую область.

Обратите внимание на верхнюю часть окна настроек Surface (Поверхность). Рядом с кнопкой Plot (Построить график) появилась новая кнопка:



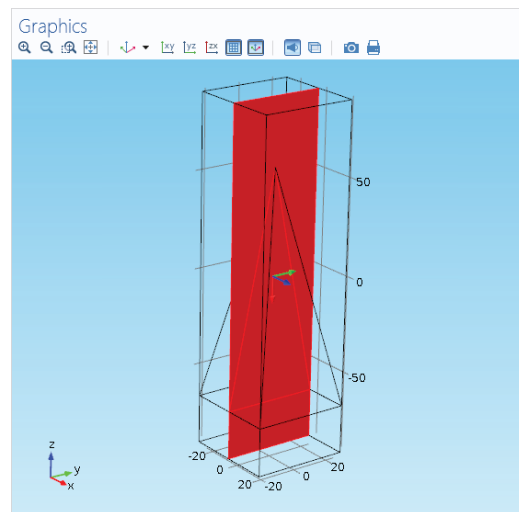
Мы еще не определили плоскость, и COMSOL ждет от нас именно этого. Щелкните новую кнопку, чтобы создать секущую плоскость. Эта кнопка позволяет сделать именно то, что нам сейчас нужно.

Мы изменим ориентацию плоскости с помощью настроек для этого набора данных, *Cut Plane 1* (Секущая плоскость 1), который теперь находится в узле Results (Результаты).

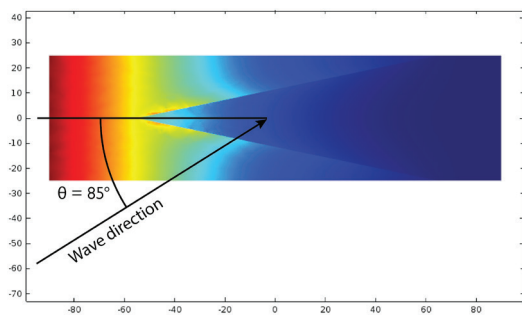
Мы хотим построить визуализацию электрического поля в различных частях пирамиды. В настройках измените значение в поле *Plane entry method* (Метод задания плоскости) на *Point and normal* (Точка и нормаль) вместо исходного, *Three points* (Три точки). Новую плоскость нужно настроить так, чтобы она включала точку $(0,0,0)$ и была перпендикулярна

вектору $(1,0,0)$. В результате будет создано вертикальное сечение, проходящее через центр пирамиды:

Если вы щелкнете Plot (Построить график), то секущая плоскость отобразится красным цветом в геометрии модели в Графическом окне. Вектор нормали к плоскости будет показан синей стрелкой.

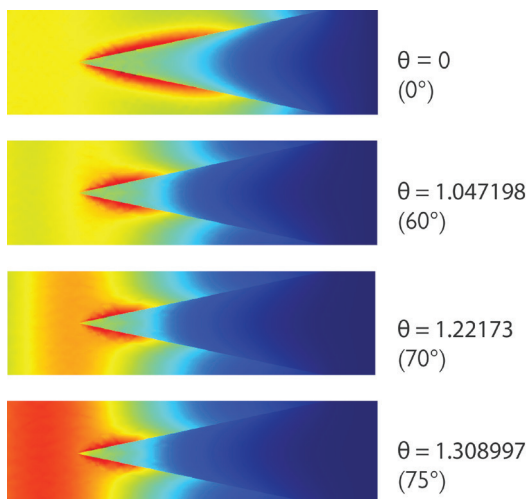


Переключитесь обратно к узлу Surface (Поверхность) в группе графиков 2D Plot Group 3 (Группа 2D-графиков 3) и убедитесь, что выбран набор данных *Cut Plane 1* (Секущая плоскость 1), затем щелкните Plot (Построить график). Мы получим следующую картину:



Этот поверхностный график строится для выбранного угла наклона $\theta = 1,48353$ (85 градусов), что составляет максимально допустимый угол наклона (максимальный угол падения волны) применительно к этой пирамидальной элементарной ячейке.

Изменяя величину в поле *Parameter value (theta)* (Значение параметра (theta)) на вкладке Data (Данные), мы можем построить график результатов для других углов наклона (после каждого изменения значения нажимайте кнопку Plot):



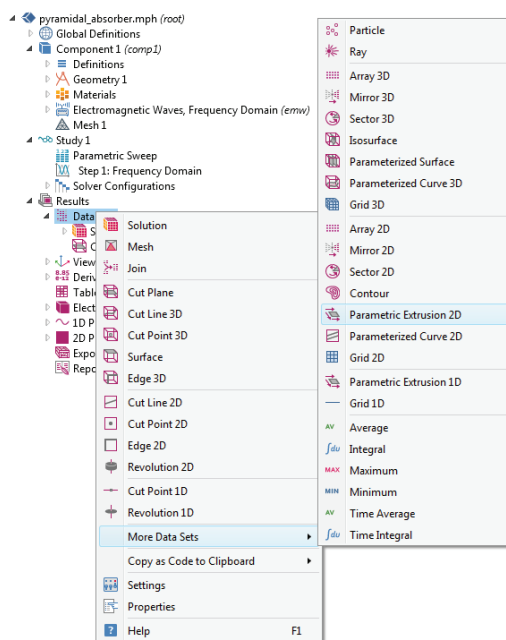
ПЕРИОДИЧЕСКИЕ РЕШЕТКИ

Эти графики показывают нам зависимость электрического поля от угла наклона. Но чтобы увидеть ее, нам нужно нажимать кнопку Plot (Построить график) для каждого нового значения параметра. Кроме того, мы не можем визуализировать больше одного графика за раз. Что, если мы хотим создать ряд графиков, чтобы сравнить их между собой? Визуализировать результаты для различных значений параметра можно с помощью периодической решетки.

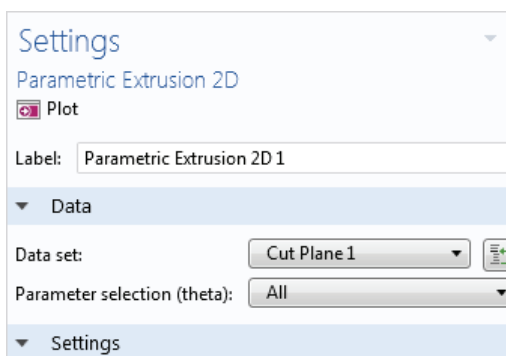
Мы изучим эту возможность на примере модели пирамидального поглотителя, создав

параметрическое расширение. Параметрическое расширение позволяет расширить набор данных, используя параметр (в нашем случае — угол наклона) в качестве величины для графика.

Щелкните правой кнопкой мыши узел Data Sets (Наборы данных) и добавьте параметрическое расширение — выберите *More Data Sets > Parametric Extrusion 2D (Другие наборы данных > Двумерное параметрическое расширение)*:



Будет создан график для выбранного решения, отображающий выбранные значения параметра θ . COMSOL автоматически выбрал *Cut Plane 1 (Секущая плоскость 1)* в качестве решения, которое следует использовать:



Щелкните Plot (Построить график). В Графическом окне появится ряд плоскостей сечения (расширение).

На каждой плоскости сечения мы построим график электрического поля для различных значений θ . Добавьте группу 3D-графиков в узел

ОРИЕНТАЦИЯ

При построении параметрического расширения вне зависимости от исходной ориентации секущей плоскости создаются горизонтальные слои.

Results (Результаты). В качестве набора данных выберите Parametric Extrusion 2D 1 (Двумерное параметрическое расширение 1). Затем добавьте поверхность к этой группе графиков и щелкните Plot (Построить график). В поле выражения будет автоматически внесена норма электрического поля.

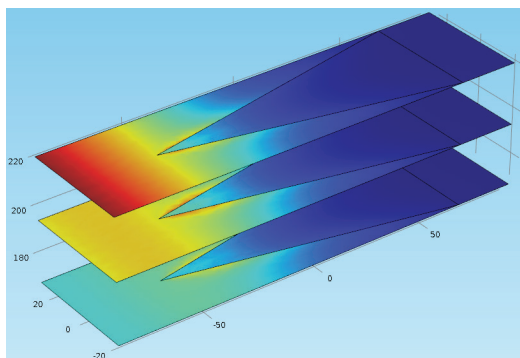
Картинка стала немного загроможденной! Чтобы лучше понять, что происходит в пирамидальной элементарной ячейке, давайте вернемся к элементу Parametric Extrusion 2D 1 (Двумерное параметрическое расширение 1) и уменьшим количество отображаемых величин.

СОВЕТ


Если вы попробовали построить график для другой переменной и хотели бы вернуться к графику электрического поля, выберите *Replace Expression > Electromagnetic Waves, Frequency Domain > Electric > Electric field norm (emw.normE)* (Заменить выражение > Электромагнитные волны, частотная область > Электрические > Норма электрического поля (emw.normE)) или просто введите *emw.normE* в поле для выражения, чтобы вновь построить график этой величины.

В окне Parametric Extrusion 2D settings window (Окно настройки двумерного параметрического расширения) для настройки *Parameter selection (theta)* (Выбор параметра (тета)) установите значение *From list (Из списка)*. Чтобы выбрать несколько значений, при щелчке удерживайте клавишу Ctrl. Прокрутите список и выберите следующие значения: 1,134464, 1,308997 и 1,48353 (они соответствуют 65, 75 и 85 градусам). Мы будем изучать наибольшие углы наклона, при которых электрическое поле претерпевает максимальные изменения. На вкладке Settings (Настройки) установите флажок *Level scale factor (Коэффициент масштабирования уровней)* и введите 150.

Вернитесь к группе графиков 3D Plot Group 4 (Группа 3D-графиков 4) и щелкните Plot (Построить график).



СОВЕТ

Представление также можно изменить, нажав кнопку Zoom Extents (Масштаб сцены)  на панели инструментов Графического окна. При этом масштаб содержимого Графического окна изменится так, чтобы большую его часть занимал выбранный график.

Мы создали параметрическое расширение! На различных плоскостях показано электрическое поле в пирамидальной элементарной ячейке для выбранных значений θ .

Теперь мы изменим положение секущих плоскостей, которые хотим добавить на 2D-график, чтобы они отображались в ряд. Добавьте группу 2D-графиков (2D plot group) в узел Results (Результаты). Из группы графиков 2D Plot Group 5 (Группа 2D-графиков 5) перейдите к соответствующему представлению (View 2D 5). Разверните представление View 2D 5 и щелкните узел Axis (Ось).

Эти настройки определяют диапазоны величин, соответствующих осям x и y в Графическом окне. Этому графику нужно немного больше свободного пространства. Измените величины *y-minimum* и *y-maximum coordinates* (максимальные и минимальные координаты по оси y) на -150, 150.

Добавьте в группу графиков 2D Plot Group 5 (Группа 2D-графиков 5) поверхность и измените набор данных на *Cut Plane 1 (Секущая плоскость 1)*. Для этой первой поверхности укажите значение тета 1,22173 (70 градусов). Щелкните Plot (Построить график). Появится уже знакомая нам поверхность.

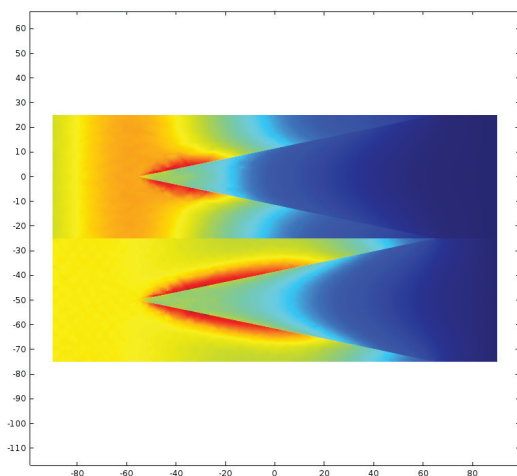
Создайте копию поверхности Surface 1. Удалите заголовок: установите для параметра Title type (Тип заголовка) значение *None (Нет)*. Этот параметр находится на вкладке Title (Заголовок). (При таком значении настройки заголовки не будут добавляться к каждой поверхности в группе графиков.) В этот раз укажите для параметра значение 0. Щелкните Plot (Построить график).

Вторая поверхность будет построена поверх первой, и наши прежние результаты будут скрыты. Чтобы эти результаты отображались рядом, нам нужно добавить деформацию.

Щелкните правой кнопкой мыши Surface 2 (Поверхность 2) и выберите *Deformation (Деформация)*. Нам нужно подвинуть второй график на ширину единичной ячейки, которая составляет 50 мм. Измените значение параметра *y-component* (элемент на оси y) на -50, установите для коэффициента масштабирования значение 1, затем щелкните Plot (Построить график).

ССЫЛКА

Чтобы узнать, как переключиться от группы графиков к ее представлению, откройте стр. 9.



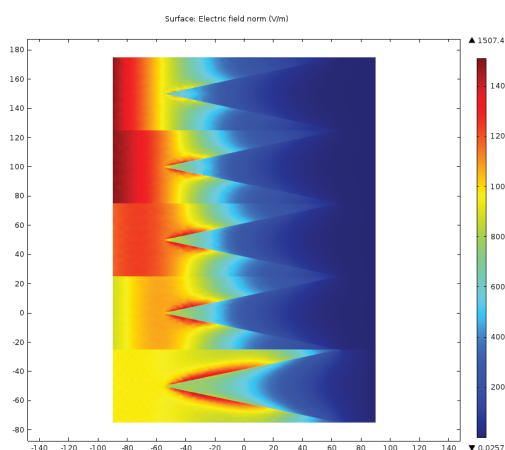
Чтобы узнать, что ширина ячейки составляет 50 мм, можно посмотреть ее ширину по оси y или открыть узел Geometry (Геометрия) — в нем приведены исходные измерения, которые использовались при создании модели.

Результат выглядит отлично! Чтобы завершить решетку, добавим еще несколько поверхностей.

Сделайте три копии поверхности Surface 2. Используйте следующие настройки:

Узел	Значение параметра (θ)	Деформация (y-comp)
Surface 3	1.308997 (75°)	50
Surface 4	1.396263 (80°)	100
Surface 5	1.48353 (85°)	150

Перейдите к узлу 2D Plot Group 5 (Группа 2D-графиков 5), снимите флажок *Plot data set edges* (Строить график для границ набора данных) на вкладке Plot Settings (Настройки графика) и нажмите Plot (Построить график).



Теперь мы можем наблюдать эволюцию электрического поля для выбранных нами значений.

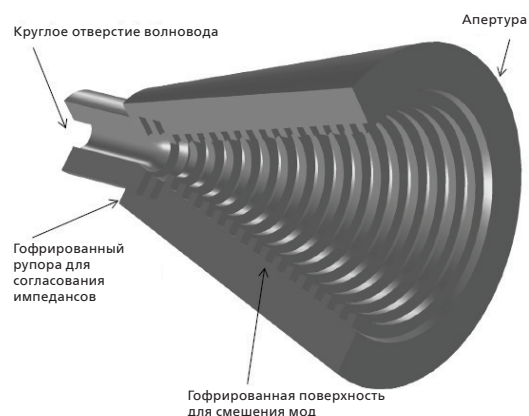
ПОВОРОТЫ И ОТРАЖЕНИЯ

В некоторых случаях моделирование всей геометрии объекта не требуется. В случаях осесимметричной геометрии можно использовать осесимметричную модель. При этом моделируется только половина поперечного сечения, что позволяет упростить геометрические и граничные условия, а также ускорить вычисления.

Но после решения модели бывает полезно создать визуализацию всего объекта. Нам удобнее всего работать с результатами, представленными в трехмерном виде.

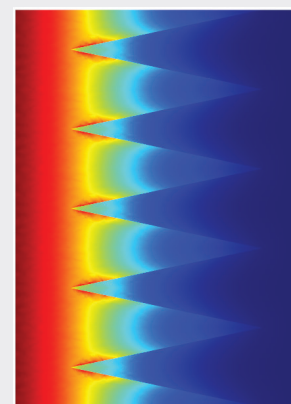
В качестве примера рассмотрим осесимметричную антенну. Если у вас установлен модуль RF (Радиочастоты), откройте *File > Application Libraries > RF Module > Antennas* (Файл > Библиотеки приложений > Модуль Радиочастоты > Антенны) и откройте модель *corrugated circular horn antenna* (гофрированная коническая рупорная антенна).

В этой модели анализируются поперечная электрическая и поперечная магнитная моды излучения рупорной антенны. Сочетание поперечной электрической и магнитной мод, генерируемых внутренней гофрированной поверхностью рупора, дает линейную поляризацию на отверстии антенны. Результаты моделирования показывают электрическое поле и вид излучения вокруг антенны.

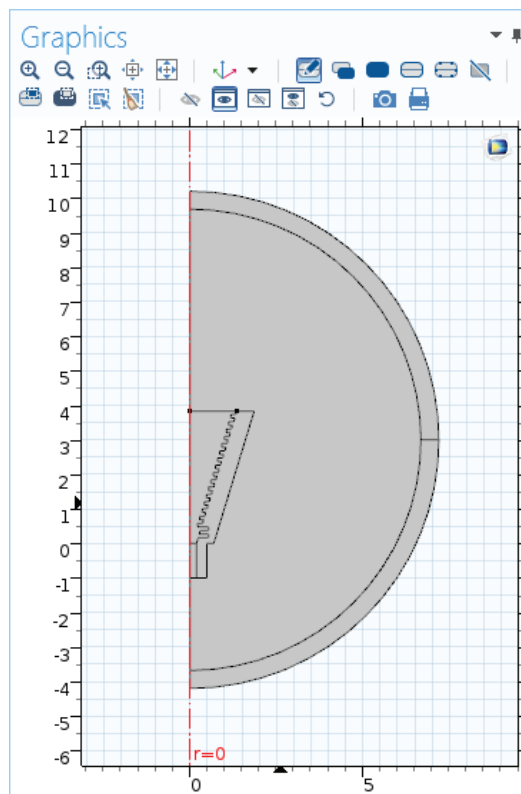


ПЕРИОДИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ

Чтобы создать хорошее изображение периодической структуры, попробуйте указать для всех значений параметров периодической решетки (такой, как эта) одну и ту же величину. Например, при построении рисунка ниже для всех поверхностей было выбрано значение $\theta = 1,396236$ (75 градусов):



Геометрия модели, как вы видите ниже, разрабатывалась в двух измерениях.



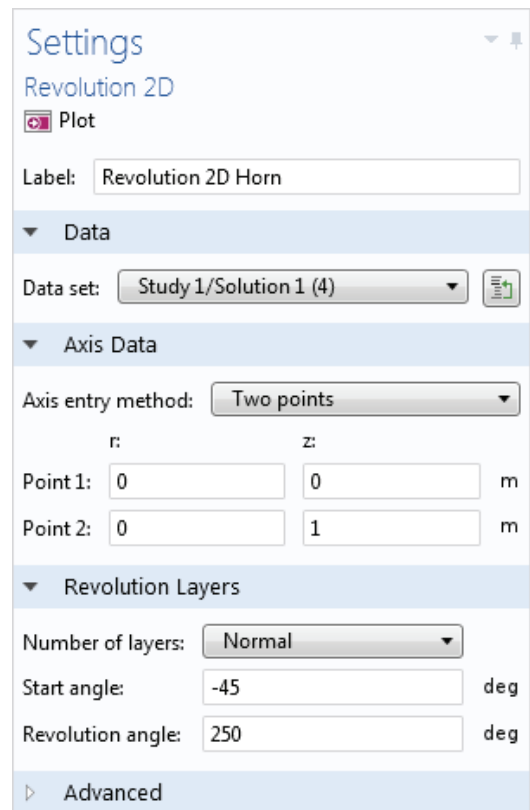
В некоторых из существующих наборов данных применяются повороты двумерных геометрий для лучшего описания процессов в трехмерном устройстве. Просмотрите решения в узле Data Sets (Наборы данных).

Study 1/Solution 1 (1) (Исследование 1/Решение 1 (1)) и Revolution 2D 1 (2D-поворот 1) содержат полную геометрию. Повороты для Study 1/Solution 1 (2) и (3) (Исследование 1/Решение 1 (2) и (3)) содержат только волноводный облучатель и отверстие соответственно, поэтому графики для них выглядят как круги, соответствующие двум отверстиям. Далее эта особенность сыграет важную роль.

Решение Study 1/Solution 1 (4) (Исследование 1/Решение 1 (4)) содержит геометрию самого рупора. Откройте геометрию Revolution 2D Horn (2D-поворот рупора), как показано ниже.

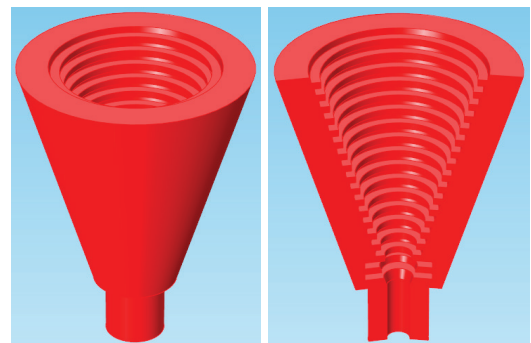
ССЫЛКА

Инструкции по добавлению выделенных элементов к решению приведены на стр. 12.



В разделах Axis Data (Данные об осях) и Revolution Layers (Слои поворота) содержатся данные, которые определяют степень поворота и ось вращения. По умолчанию решение поворачивается на 250 градусов вокруг оси z.

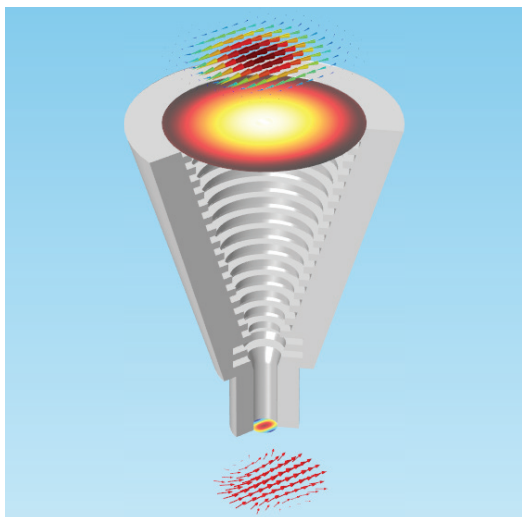
Укажите значения параметров Start angle (Начальный угол) и Revolution angle (Угол поворота), затем нажмите Plot (Построить график), чтобы увидеть, как изменится поворот:



Начальный угол: 0
Угол поворота: 360

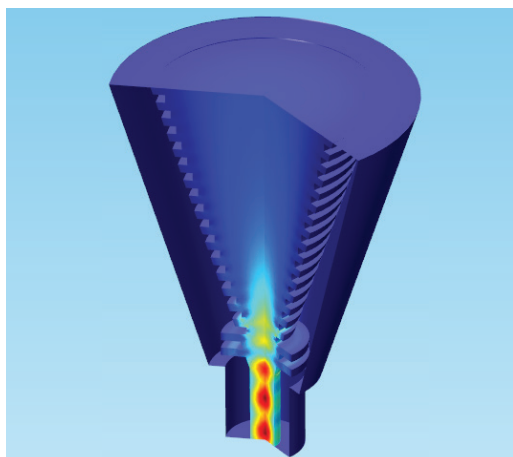
Начальный угол: -45
Угол поворота: 200

На этой группе графиков показано электрическое поле, преобразованное в ортогональные координаты (модель создавалась в цилиндрических координатах). Норма строится на объектах кругового вращения, которые мы видели раньше. Они соответствуют отверстию антенны и волновода. Стрелки на стрелочных графиках направлены вверх и вниз для большей наглядности. Они отражают направление и напряженность электрического поля.

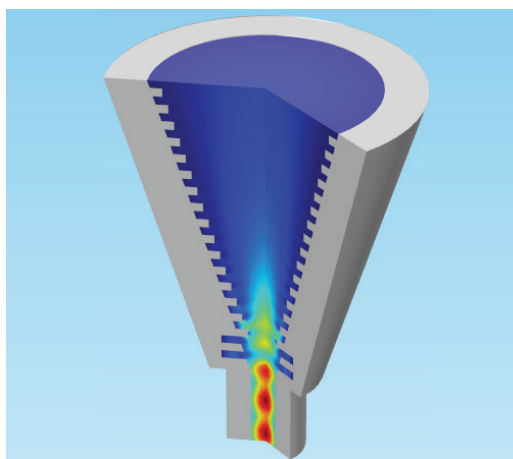


В узле Results (Результаты) создайте новый набор данных решения, Study 1/Solution 1 (5) (Исследование 1/Решение 1 (5)). Добавьте набор выбранных объектов, содержащий области 3, 4 и 6 (рупор, облучатель и отверстие). Правой кнопкой мыши щелкните Data Sets (Наборы данных) и выберите *Revolution 2D* (2D-поворот). В качестве набора данных выберите Study 1/Solution 1 (5) (Исследование 1/Решение 1 (5)). Укажите для параметра Start Angle (Начальный угол) значение -90 градусов, для параметра Revolution Angle (Угол поворота) значение в 225 градусов.

Теперь добавьте созданную группу 3D-графиков в узел Results (Результаты) и выберите *None* (Нет) в качестве набора данных. Добавьте поверхностный график, который будет строиться на основе только что созданного нами набора двумерных данных. Программа автоматически построит график нормы электрического поля:



Чтобы получить более интересную картинку, попробуйте воспользоваться поверхностями, которые строятся на основе наборов данных *Revolution 2D Aperture* (2D-поворот отверстия) и *Revolution 2D Horn* (2D-поворот рупора). На рисунке ниже поверхностный график для отверстия смещен вверх на 0,001 метра.



СОВЕТ

Для определенных геометрий бывает полезно зеркально отразить данные графика — например, в случае модели трубопровода, для которой моделируется только половина геометрии. Чтобы добавить набор данных зеркального отражения, щелкните правой кнопкой мыши узел Data Sets (Наборы данных) и выберите *Mirror 2D* (2D зеркальное отображение) или *Mirror 3D* (3D зеркальное отображение) в зависимости от размерности вашей геометрии.

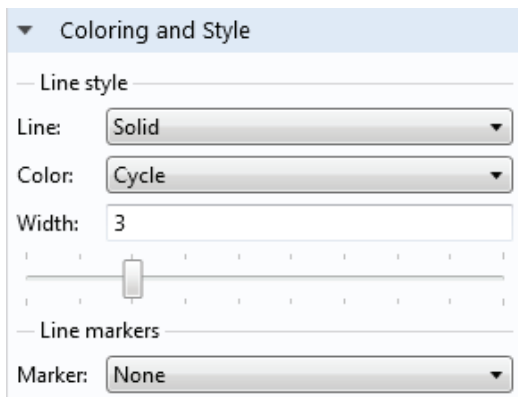
1D-ГРАФИКИ

Работа с 1D-графиками немного отличается от 2D- и 3D-графиков. Чаще всего 1D-графики применяются в тех случаях, когда они являются более наглядными, чем поверхностные графики, или если геометрия модели плохо подходит для построения 2D-графиков.

1D-графики обладают рядом уникальных особенностей. Например, значение стиля линии и цветов для 1D-графика иное, чем для 2D- и 3D-графиков, потому что форма линии обычно означает изменение переменной, тогда как в 2D- и 3D-графиках для этого используется изменение цвета на поверхности.

Вкратце рассмотрим стили 1D-графиков. Откройте модель *shallow water equations* (уравнения мелкой воды), выбрав пункт меню *File > Application Libraries > COMSOL Multiphysics > Equation Based* (Файл > Библиотеки приложений > COMSOL Multiphysics > На основе уравнений). В этой модели анализируется установление волн над неровной поверхностью (например, озера или пруда) при малом уровне воды. Форма волны моделируется как функция времени.

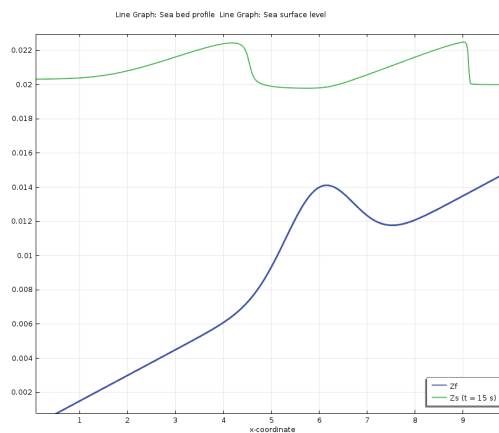
Разверните группу графиков 1D Plot Group 1 (Группа 1D-графиков 1) в узле Results (Результаты). Щелкните Line Graph 1 (Линейный график 1) и Line Graph 2 (Линейный график 2), взгляните на настройки. Попробуйте различные значения полей вкладки Coloring and Style (Цвета и стиль). Эти параметры позволяют изменять толщину линий графика:



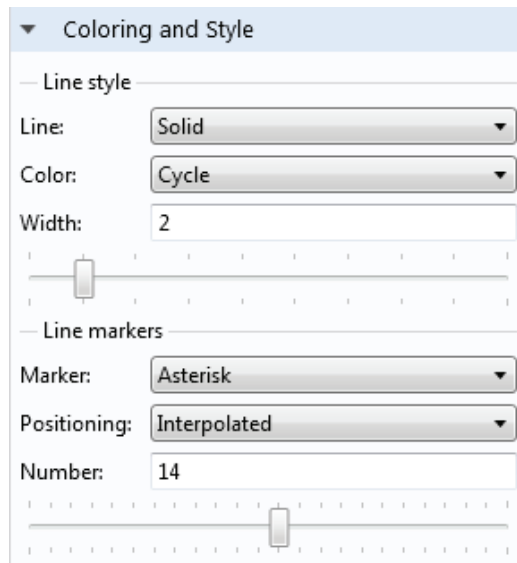
Line Graph 2 (Линейный график 2) содержит линейные графики для состояний модели в различные моменты времени. Откройте настройки и уменьшите количество значений параметра

в списке Selection (Выбор). Выберите значение 15 в качестве единственного момента времени (в секундах). Щелкните Plot (Построить график).

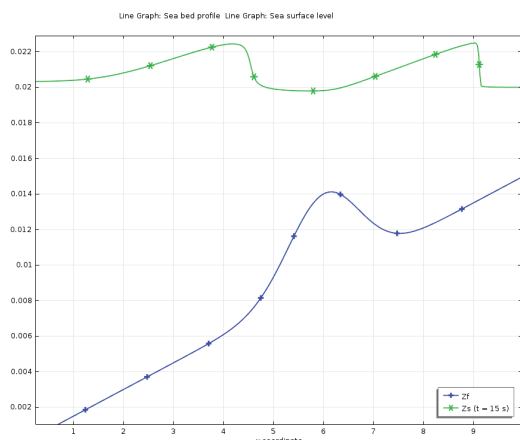
На рисунке ниже показаны графики Line Graph 1 и 2 из группы 1D Plot Group 1. Для графика Line Graph 1 установлена ширина линии 3, для графика Line Graph 2 — ширина линии 2.



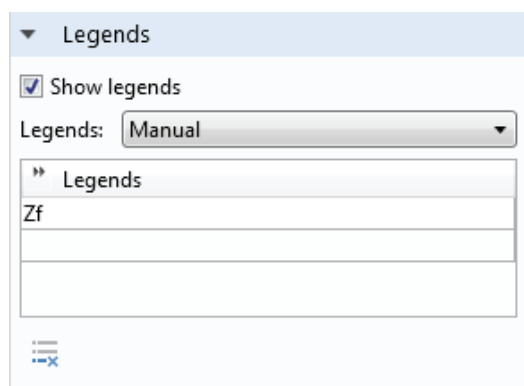
Чтобы добавить индикаторы для равномерно расположенных результатов измерений на интервалах вдоль линейного графика, измените значение в поле Marker (Маркер) и выберите настройки стиля и количества маркеров:



На следующем рисунке показаны графики Line Graph 1 и 2. Для графика Line Graph 1 в настройках были добавлены 12 маркера в форме символа «плюс», для графика Line Graph 2 — 14 маркеров в форме звездочки.



Еще одна возможность, применимая только к группам 1D-графиков, — средства управления метками. Выражения для осей x и y можно изменить на соответствующих осях, а текст в рамке условных обозначений — на вкладке Legends (Условные обозначения).

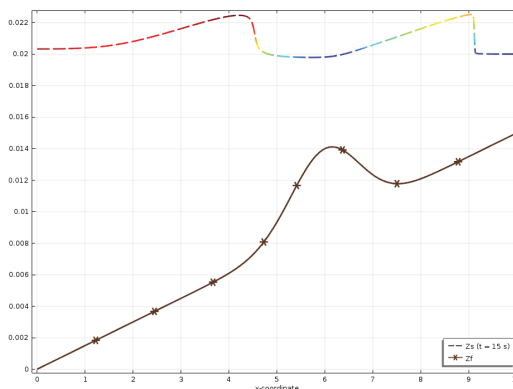
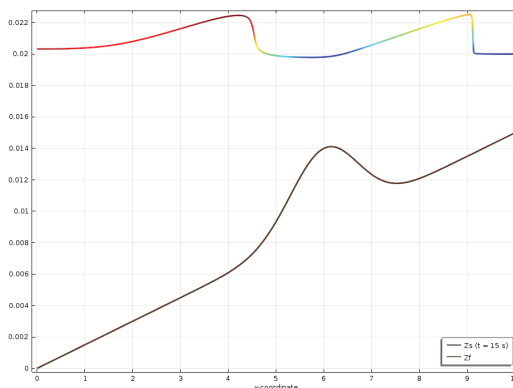


Чтобы изменить расположение рамки с условными обозначениями, перейдите к узлу группы графиков (например, 1D Plot Group 1) и разверните вкладку Legend (Условные обозначения). Рамку можно разместить сверху, посередине или снизу графика, в правой, левой или средней части сетки.

Ниже приводятся примеры нескольких других сочетаний настроек для двух линейных графиков этой группы графиков, включая различные цвета, стили и маркеры. Также для них применялись цветовые выражения:

ЦИКЛИЧЕСКОЕ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ МЕЖДУ ЦВЕТАМИ

При значении *Cycle* (Циклическое переключение) для настройки цвета линии программа будет окрашивать линии графиков в цвета из набора доступных (в нашем случае это синий и зеленый цвет), циклически между ними переключаясь. Это позволяет сделать множество линий графиков в общей группе графиков более наглядными.



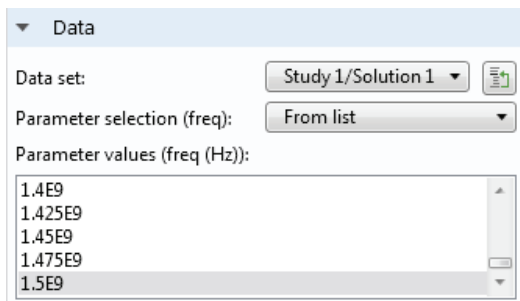
ПОЛЯРНЫЕ ГРАФИКИ

Особой разновидностью 1D-графиков являются полярные графики. Группы полярных графиков позволяют создать графики в полярных координатах: радиус r и угол θ . Такие графики особенно полезны для визуализации электромагнитных и акустических задач — например, распределения звука, исходящего из громкоговорителя, или диапазона сигнала антенны. В полярных графиках отображаются количественные величины, характеризуемые направлением и расстоянием относительно определенной точки.

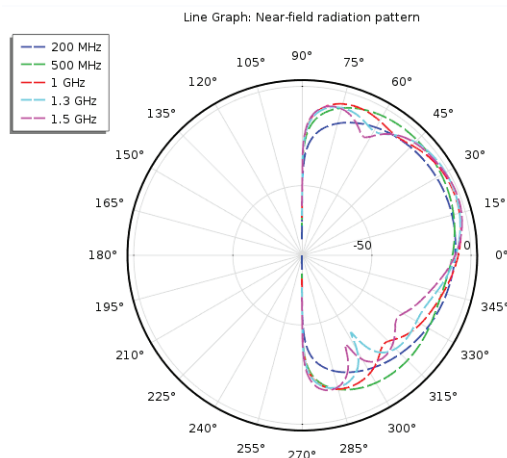
В качестве демонстрации рассмотрим радиочастотную задачу. Если у вас установлен модуль RF (Радиочастоты), откройте *File > Application Libraries > RF Module > Antennas* (Файл > Библиотеки приложений > Модуль Радиочастоты > Антенны) и откройте модель *conical antenna* (коническая антенна). В этой модели исследуется зависимость импеданса антенны и направленности электрического поля вокруг антенны от частоты излучения.

Взгляните на группу графиков Polar Plot Group 6 (Группа полярных графиков 6). В ней содержится линейный график, в котором используется выражение $10 \cdot \log_{10}(etw.nPoav)$. Это график направленности излучения в ближней зоне в логарифмическом масштабе.

Щелкните группу графиков Polar Plot Group 6 (Группа полярных графиков 6) и измените значение настройки *Parameter selection (freq)* (Выбор параметра (частота)) на *From list* (Из списка). В списке выберите следующие частоты: $2e8$, $5e8$, $10e8$, $1,3e9$, $1,5e9$. Прокручивайте список с помощью полосы прокрутки и удерживайте клавишу Ctrl при щелчке, чтобы выбрать несколько значений.



Щелкните Plot (Построить график). Будет построен график направленности излучения в ближней зоне для выбранных рабочих частот. На нем отображается как диапазон излучения, так и его зависимость от частоты. Модель является осесимметричной, поэтому мы видим только половину графика:



Готово! Мы научились создавать 1D-, 2D- и 3D-графики, рассмотрели множество настроек графиков, применяемых в программном обеспечении COMSOL® для решения задач постобработки. Надеемся, вы сможете достаточно уверенно работать с различными типами графиков, которые мы обсудили. Если объем информации кажется слишком большим, не беспокойтесь, мы повторим часть материала при изучении других приемов. Теперь рассмотрим некоторые другие средства визуализации.

ПРИМЕНЕНИЕ ПОСТОБРАБОТКИ ДЛЯ ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ

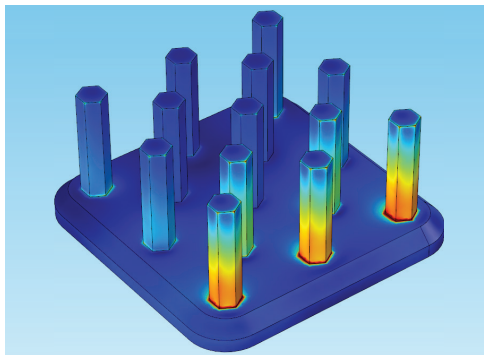
Ранее мы обсудили лучшие способы размещения элементов модели. Теперь вкратце рассмотрим, как средства постобработки могут помочь разработчику или инженеру принимать оптимальные решения в процессе разработки. Методы, приведенные в этом руководстве, не просто позволяют создать ясную и красивую картинку. Мы старались подсказать способы применения постобработки, которые помогут вам в интерпретации физических явлений, происходящих в модели.

Ненадолго вернемся к модели радиатора. Когда мы строили первую поверхность, отображающую температуру в радиаторе и в канале, радиатор был почти полностью окрашен в белый цвет. Это было рационально, потому что он, конечно же, является самым горячим геометрическим компонентом. Но что, если бы нам требовалось построить график температуры без учета окружения радиатора? Что, если бы мы хотели понять, какова относительная температура различных участков самого радиатора?

Создайте для радиатора группу 3D-графиков, содержащую следующие графики:

- Линейный график, включающий только края радиатора. Чтобы его добавить, проще всего очистить выделение в настройках графика и воспользоваться инструментом Select Box (Выбрать прямоугольную область).
- Поверхностный график, содержащий только радиатор, но не окружающий его канал; чтобы построить график модуля плотности потока энергии, введите $ht.tefluxMag$ в поле Expression (Выражение) или добавьте это выражение с помощью меню *Replace Expression > Model > Component 1 > Heat Transfer in Solids > Domain Fluxes* (Заменить выражение > Модель > Компонент 1 > Теплопередача в твердых телах > Поток в областях).

Новый график позволил выявить особенности, которые не были видны на прежней поверхности: передача энергии на ребрах радиатора, ближайших к входному отверстию канала (на предыдущем изображении они повернуты к зрителю), происходит намного быстрее, чем на ребрах ближе к выходному отверстию. Похоже, что некоторые ребра

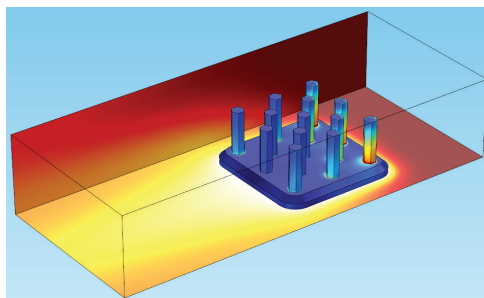


радиатора почти не участвуют в процессе теплопередачи; возможно, для экономии денег и материала их можно убрать из конструкции.

Если мы посмотрим на рисунок еще раз, то заметим, что верхние части ребер также практически не участвуют в процессе теплопередачи. Может быть, для экономии материала ребра можно укоротить? Графики, которые строятся при постобработке, помогают найти ответы на такие вопросы.

Если нам потребуется вновь включить отображение всей геометрии, мы можем с легкостью объединить этот график с предыдущим графиком температурной поверхности, чтобы получить еще более интересную картинку. На снимке экрана ниже показаны:

- Линейный и поверхностный график, которые мы только что создали
- Поверхностный график температуры канала (только для задней и нижней стенки)
- Линейный график для воздушной области (построены все линии, образующие канал)



ССЫЛКА

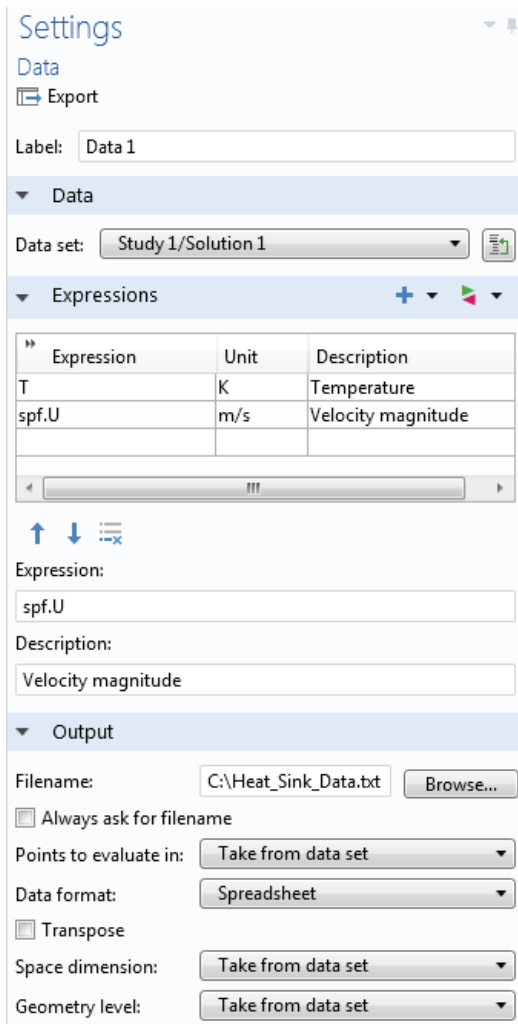
Способы создания поверхностных и линейных графиков приводятся на стр. 8, в главе Plot Types (Типы графиков).

ЭКСПОРТ РЕЗУЛЬТАТОВ

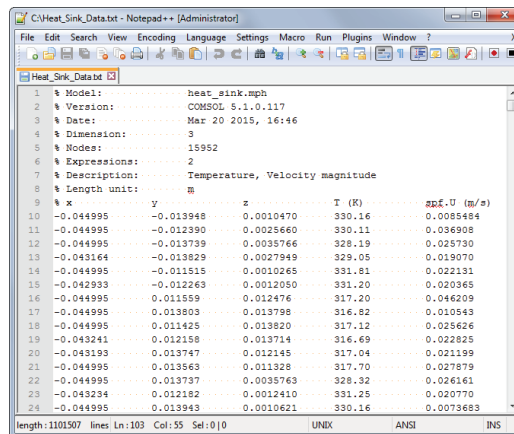
Одна из последних возможностей программного обеспечения COMSOL®, которые мы рассмотрим в этом руководстве, — экспорт результатов. Поддерживается экспорт результатов в виде отчетов, таблиц, графиков и даже файлов анимации.

ДАННЫЕ, ТАБЛИЦЫ И СЕТКИ

Щелкните правой кнопкой узел Экспорт (Экспорт) любой модели (в качестве примера мы рассмотрим модель радиатора) и выберите *Data (Данные)*. В настройках нового узла Data 1 (Данные 1) содержатся поля, позволяющие выбрать набор данных для экспорта, таблица для добавления выражений (далее мы экспортируем данные о температуре радиатора и о скорости воздушного потока), а также настройки вывода, такие как имя и формат файла:

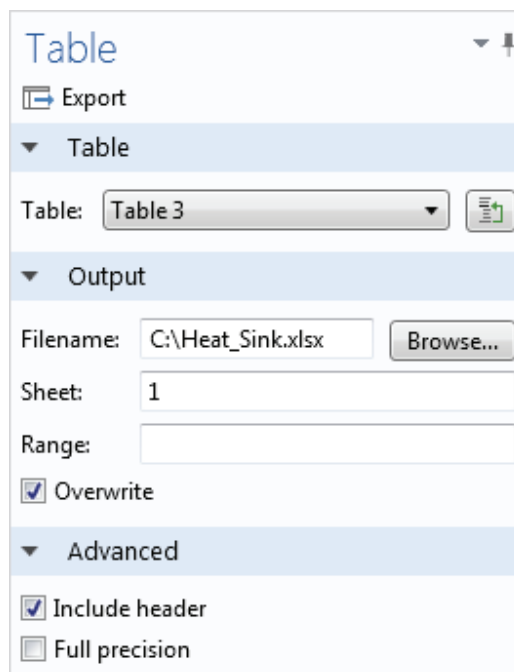


Добавьте необходимые выражения и щелкните Export (Экспортировать). Перейдите в каталог, в котором вы сохранили текстовый файл, и откройте этот файл. В нем будут содержаться выбранные данные. Отчет удобнее всего просматривать в текстовом редакторе:



Также с помощью узла Export (Экспорт) вы можете экспортировать таблицы, сетки, графики и изображения.

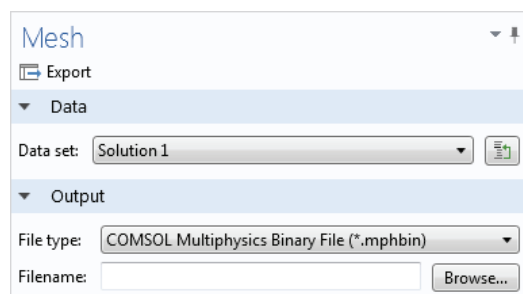
Поддерживается экспорт таблиц в различных форматах, включая электронные таблицы Microsoft Excel®:



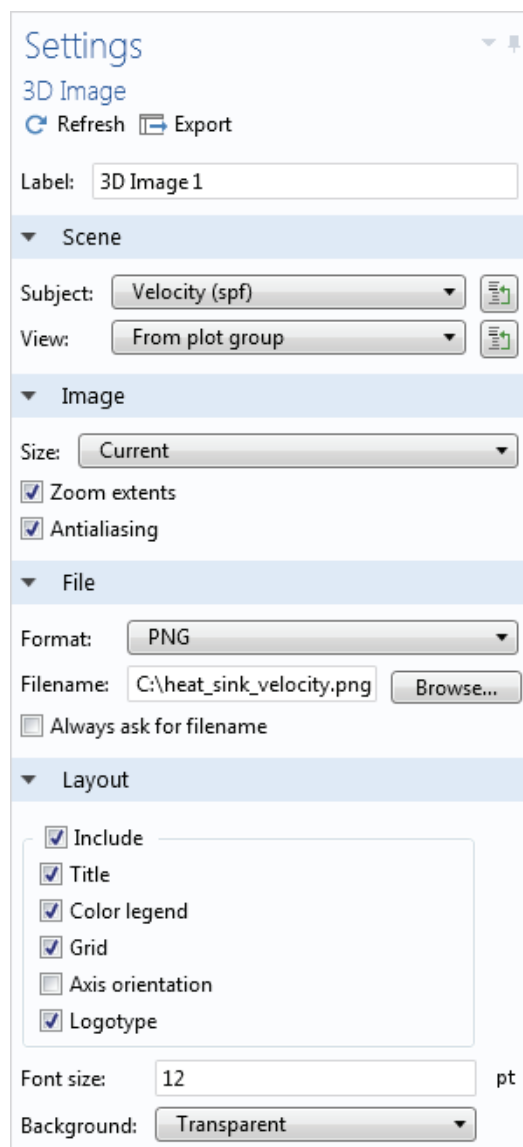
СОВЕТ

При выборе точности необходимо руководствоваться особенностями экспортируемой физической величины. При экспорте данных о таких высоких температурах достаточно двух чисел после запятой. Но если бы мы экспортировали, например, информацию о смещениях в микро-электромеханическом устройстве, в котором характерный масштаб расстояний составляет один микрон, то следовало бы указать шесть десятичных разрядов. На вкладке Advanced (Дополнительно) в окне настроек узла Data (Данные) можно включить полную точность.

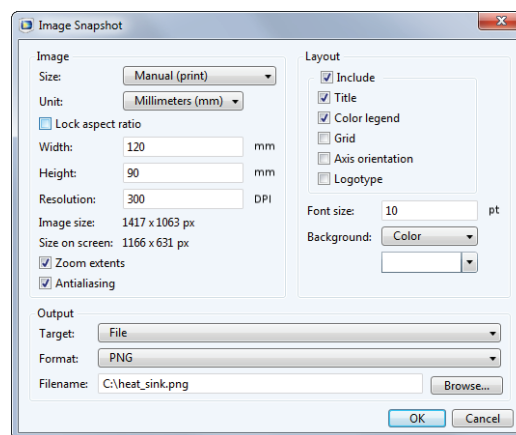
Сетку можно экспортировать в новом формате COMSOL Multiphysics® — в виде двоичного файла. Такой файл впоследствии можно будет импортировать в другие модели:



Из групп графиков также можно экспортировать изображения. В настройках вы можете выбрать график для экспорта, отображаемое представление и созданные метки:

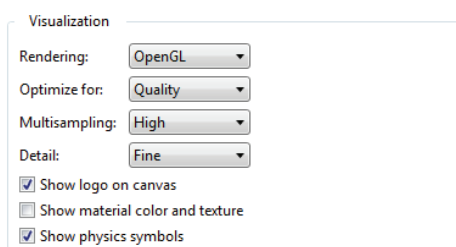


Если вы хотите экспортировать изображение именно в том виде, как оно отображается в Графическом окне, проще всего воспользоваться кнопкой Image Snapshot (Снимок изображения) на панели инструментов Графического окна. Появится окно, в котором вы сможете выбрать добавляемые компоненты, а также размер и тип файла:



Если для настройки Size (Размер) вы выберете значение *Current* (Текущий), то изображение будет экспортировано в точности так, как оно отображается на экране. Доступны также две разновидности значения *Manual* (Задать вручную), позволяющие управлять размерами изображения. С помощью этих настроек вы можете экспортировать изображение в разрешении, подходящем для печати или для добавления на веб-сайт.

Чтобы изменить настройки рендеринга изображений, экспортируемых из Графического окна, выберите пункт меню *File > Preferences* (Файл > Настройки). В разделах Graphics (Графика) и Plot Windows (Окна графиков) вы можете изменить настройки визуализации, используемые при построении графиков.

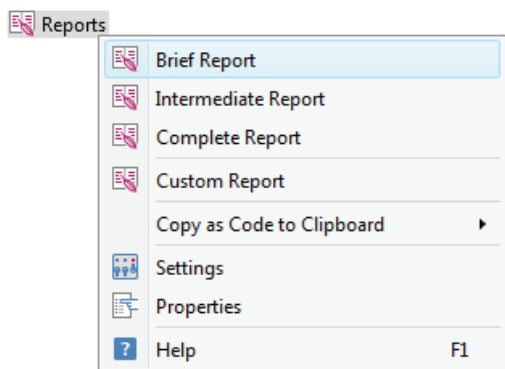


ОТЧЕТЫ

Экспорт результатов — отличный способ объединить всю информацию, полученную с помощью моделирования, чтобы представить ваши результаты в удобном виде коллеге или объяснить особенности работы с моделью другому человеку.

Щелкните правой кнопкой мыши узел Reports (Отчеты). С помощью этого меню вы можете создавать краткие, промежуточные и полные отчеты, а также отчеты, соответствующие вашим собственным настройкам.

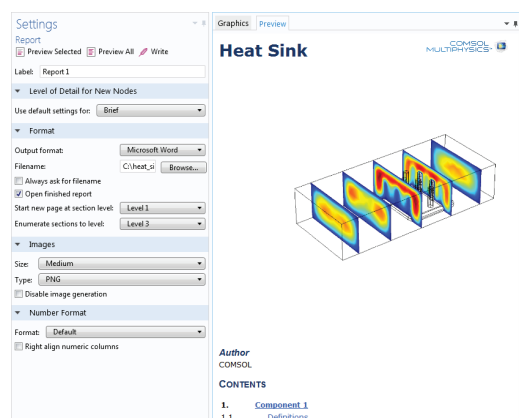
- Полные отчеты (пункт меню Complete Report) содержат всю информацию о модели, включая подробные сведения об интерфейсах физик и об уравнениях, на которых они основаны. Они очень полезны при устранении неполадок.
- Промежуточные отчеты (пункт меню Intermediate Report) содержат настройки и переменные физик, которые используются в модели, а также сведения об исследовании, результатах и графиках.
- В кратких отчетах (пункт меню Brief Report) приводятся общие сведения о модели, включая графики и результаты, однако информация о переменных и о физиках в них отсутствует.
- Выбрав пункт меню Custom Report (Пользовательский отчет), вы сможете настроить содержимое отчета.



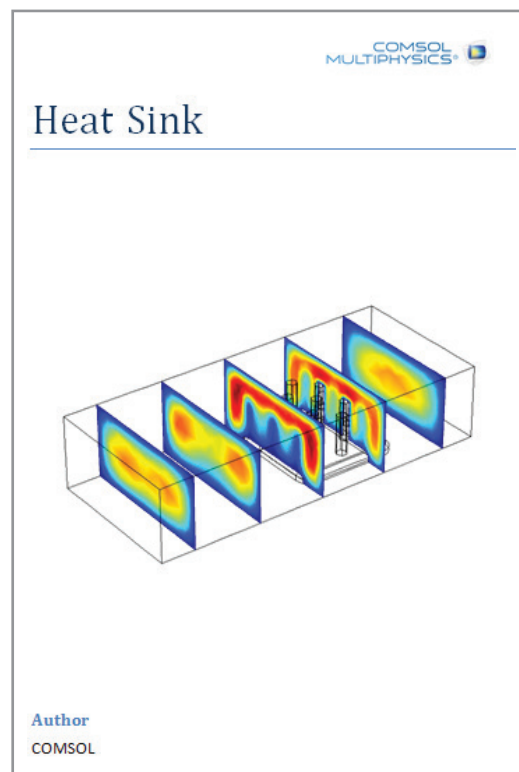
Выберите любой тип отчета из раскрывающегося списка, показанного выше, чтобы создать узел, в котором вы сможете удалять и добавлять содержимое отчета. Щелкните новый узел правой кнопкой мыши и выберите Section (Раздел).

Откроется список подузлов данного узла. С его помощью вы сможете управлять содержимым отчета: добавлять и удалять информацию о геометрии, сетках, решателях, исследовании и результатах.

Поддерживается экспорт отчета в формате HTML и Microsoft® Word. Если вы щелкнете кнопку Preview All (Предварительный просмотр всего содержимого) в верхней части окна настроек, то программа отобразит геометрию, сетку, решения и графики, которые вы создали, в режиме циклического переключения между элементами Графического окна. Когда процесс будет завершен, в окне отобразится предварительный вид отчета.



Щелкните Write (Сохранить), чтобы создать отчет.

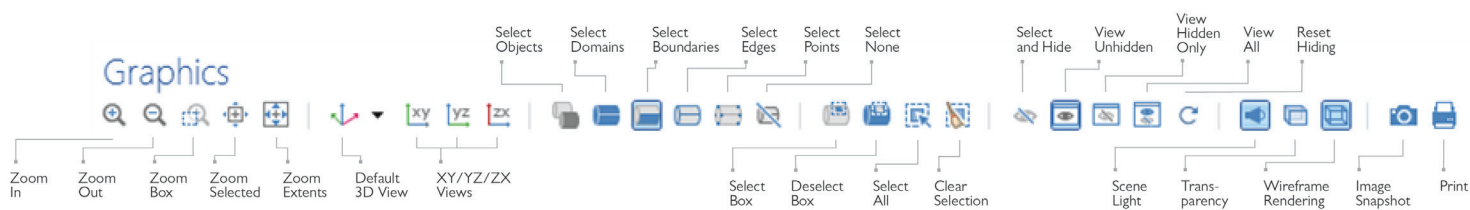


СОВЕТЫ

Кнопки интерфейса

При работе с графиками бывают полезны не только методы, которые мы рассмотрели, но и несколько кнопок интерфейса, о которых мы пока не говорили. Многие из этих кнопок расположены в верхней части Графического окна.

На панели инструментов находятся кнопки, позволяющие изменить масштаб и ориентацию отображаемой области, управлять выделением, прозрачностью и освещением. Некоторыми из этих кнопок, например, Zoom Extents (Масштаб сцены), мы уже пользовались. Вот что делают остальные:



- **Zoom Box (Масштабировать прямоугольную область):** выделить мышью прямоугольную область с подсветкой геометрии и масштабироваться на ней
- **Zoom Selected (Масштабировать выбранные компоненты):** масштабирование на выбранном геометрическом компоненте
- **Go to Default 3D View (Переключиться к 3D-виду по умолчанию):** разместить модель в соответствии с 3D-видом по умолчанию
- **XY, YZ, and ZX Views (Представления XY, YZ и ZX):** переключиться к виду плоскости xy , yz или zx
- **Инструменты выделения и скрытия:** они аналогичны функции Hide Geometric Entities (Скрыть геометрические сущности) для узлов View (Просмотр). С помощью средств выделения можно выбрать или скрыть сущности, переключившись к дочернему узлу узла Component

СОВЕТ

Чтобы переименовать узел вручную, щелкните его правой кнопкой мыши, выберите *Rename (Переименовать)* и введите новое имя. Переименование — хороший способ упорядочить наборы данных и группы графиков, особенно при наличии множества решений с выделениями или множества графиков в одной группе.

(Компонент). Эти инструменты создают узел Hide Geometric Objects (Скрыть геометрические объекты), который не применяется к узлу Results (Результаты)

- **Scene Light (Освещение):** включить или выключить освещение геометрии
- **Transparency (Прозрачность):** включить прозрачность геометрии модели
- **Image Snapshot (Снимок изображения):** открыть диалоговое окно экспорта текущего представления в Графическом окне в формате изображения
- **Print (Печать):** открыть диалоговое окно печати текущего представления

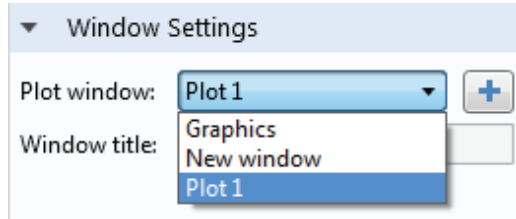
Изменение структуры среды COMSOL Desktop®

Среда COMSOL Desktop® отличается высокой гибкостью: пользователь может легко изменить ее структуру. Чтобы построить графики

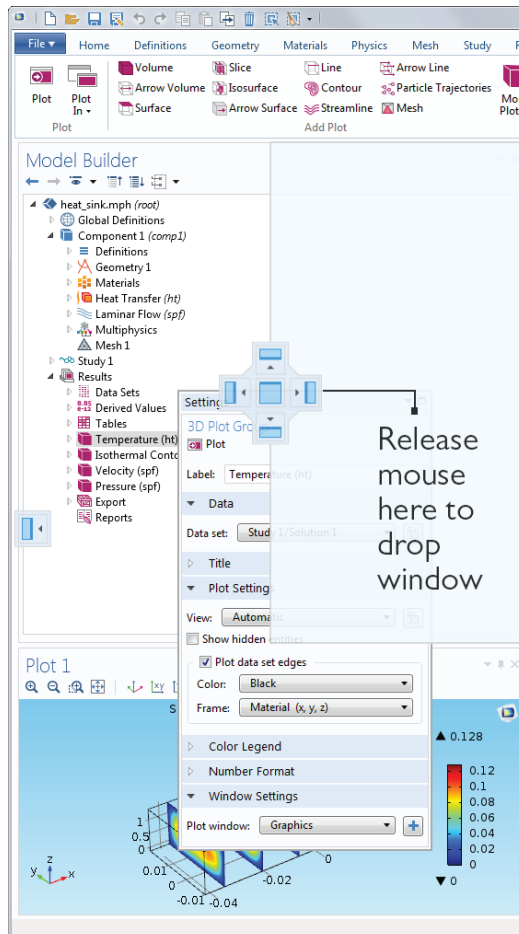
ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ СЕТКИ

Если для повышения точности результатов требуется сделать сетку мельче в определенных областях, то вы можете воспользоваться функцией COMSOL®, которая называется Adaptive Mesh Refinement (Адаптивное измельчение сетки).

в нескольких окнах, воспользуйтесь вкладкой Window Settings (Настройки окна) в узле Plot Group (Группа графиков). С помощью этих настроек также можно переименовывать окна.



Окна можно перетаскивать в различные области рабочего стола. Так вы можете с легкостью просматривать несколько графиков сразу и сравнивать их между собой.



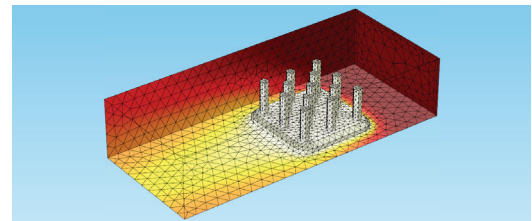
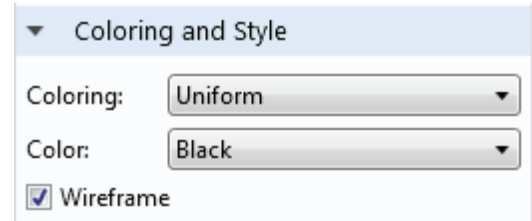
Отпустите курсор мыши, перетащив окно на бежево-белую область. Этой областью отмечено новое положение окна, которое при перетаскивании затенено.

Отображение сеток на поверхностных графиках

Отображение сетки модели бывает полезным, если при анализе результатов вам нужно знать, насколько высоким является измельчение в определенных областях — например, чтобы выяснить, требуется ли улучшить измельчение, чтобы повысить точность моделирования в областях с быстрым изменением характеристик.

Вернемся к исходному поверхностному графику температуры, который мы строили для радиатора изначально. Добавьте к группе графиков вторую поверхность и установите в настройках равномерно черный цвет. В этом случае выражение не имеет значения, потому что мы строим изображение элементов, а не график результатов.

Установите флажок Wireframe (Каркасная сетка) на вкладке Coloring and Style (Цвета и стиль), затем щелкните Plot (Построить график).



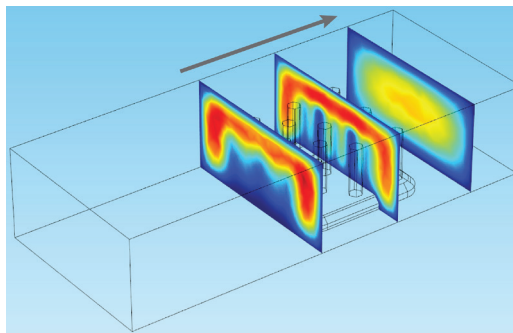
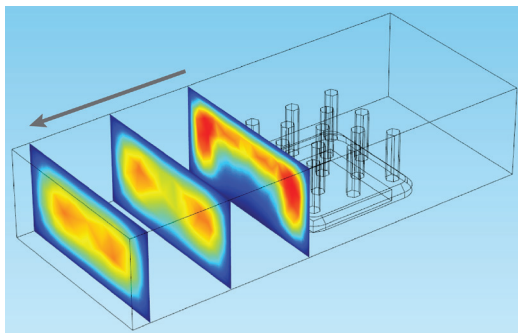
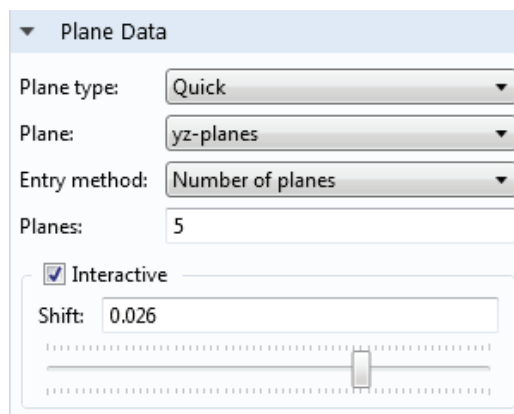
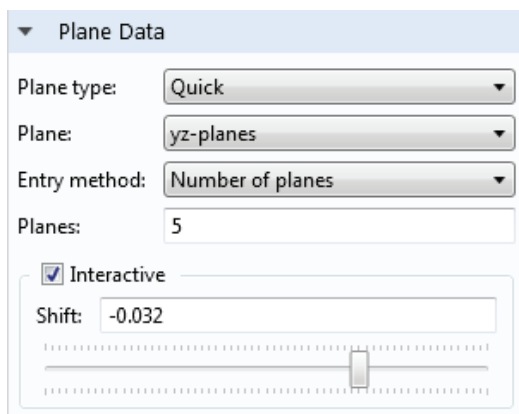
Теперь мы видим, что точность сетки максимальна на радиаторе и ребрах, однако понижается на стенках канала. Если мы отключим поверхность температуры, то увидим только линии каркасной сетки. Каркасные поверхности, как и другие типы графиков, можно строить на основе различных наборов данных, изменяя при этом настройки цветов и стиля по желанию.

УПРАВЛЕНИЕ С ПОМОЩЬЮ ПОЛЗУНКА И ИНТЕРАКТИВНОЕ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ

Для некоторых типов графиков удобнее позиционировать результаты с помощью мыши, чем изменять координаты и настройки. В некоторых случаях возможно интерактивное управление позиционированием графика.

Откройте ранее созданный график, показывающий скорость воздушного потока в канале радиатора. На вкладке Plane Data (Данные по плоскости) установите флажок *Interactive* (Интерактивное управление). Эта возможность позволяет изменять положение плоскостей графика с помощью ползунка. Расстояние между плоскостями отображается в поле *Shift* (Смещение).

При смещении ползунка плоскости в Графическом окне будут передвигаться и иногда даже исчезать, выходя за видимые границы геометрии при достаточно большой величине смещения.



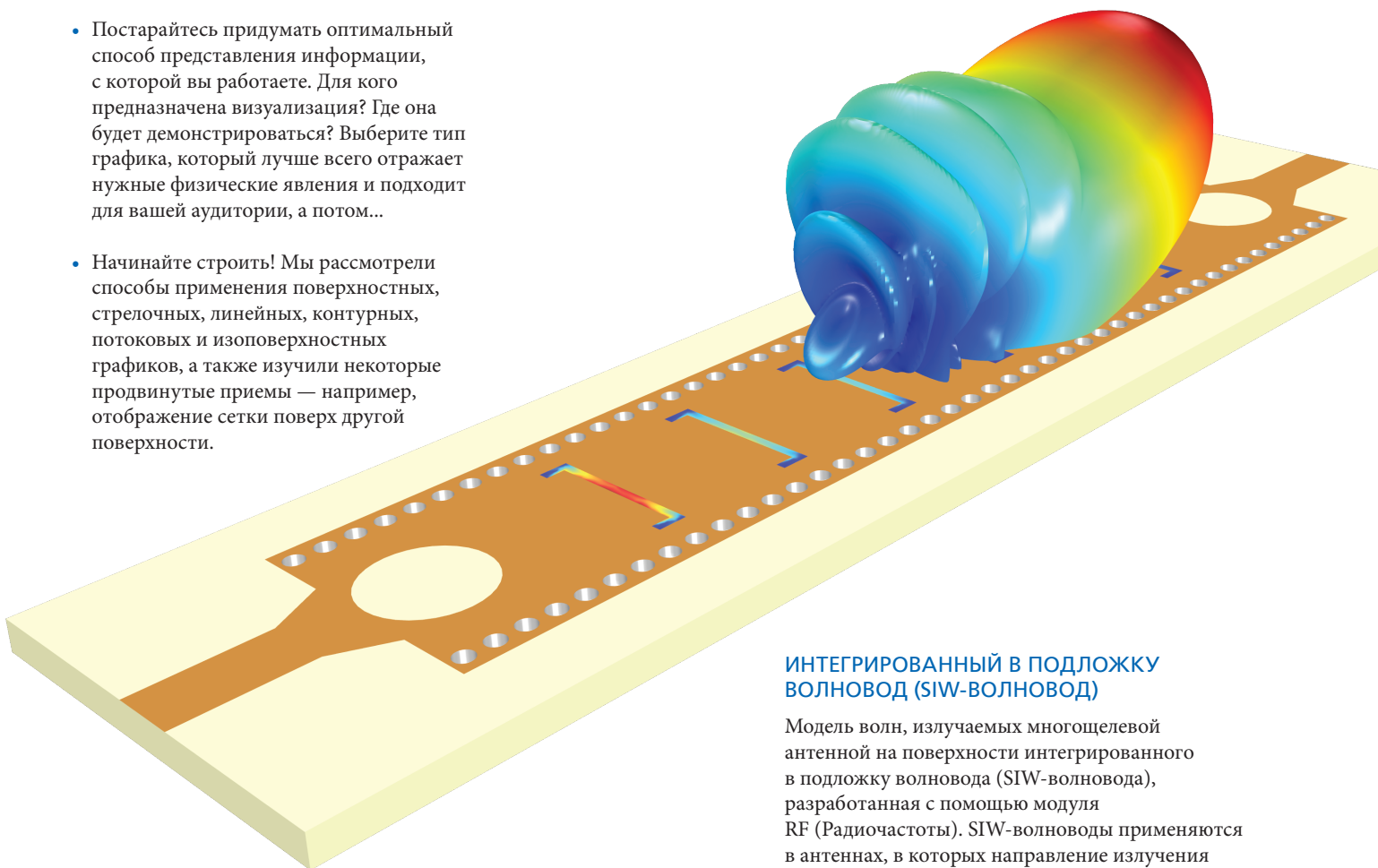
ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках этого руководства мы рассмотрели основные приемы постобработки данных, а также некоторые продвинутые методы, которые помогут вам представлять результаты в более наглядном виде. Вкратце повторим изученный материал:

- Начните с наборов данных и вычислений, чтобы понять особенности физических явлений, происходящих в вашем устройстве. Эти инструменты отлично подходят для вычисления максимумов, минимумов и значений в конкретных областях вашей модели. Если вы создали модель лишь для фрагмента объекта, то отобразить весь объект можно с помощью отражений и поворотов.
- Постарайтесь придумать оптимальный способ представления информации, с которой вы работаете. Для кого предназначена визуализация? Где она будет демонстрироваться? Выберите тип графика, который лучше всего отражает нужные физические явления и подходит для вашей аудитории, а потом...
- Начинайте строить! Мы рассмотрели способы применения поверхностных, стрелочных, линейных, контурных, потоковых и изоповерхностных графиков, а также изучили некоторые продвинутые приемы — например, отображение сетки поверх другой поверхности.

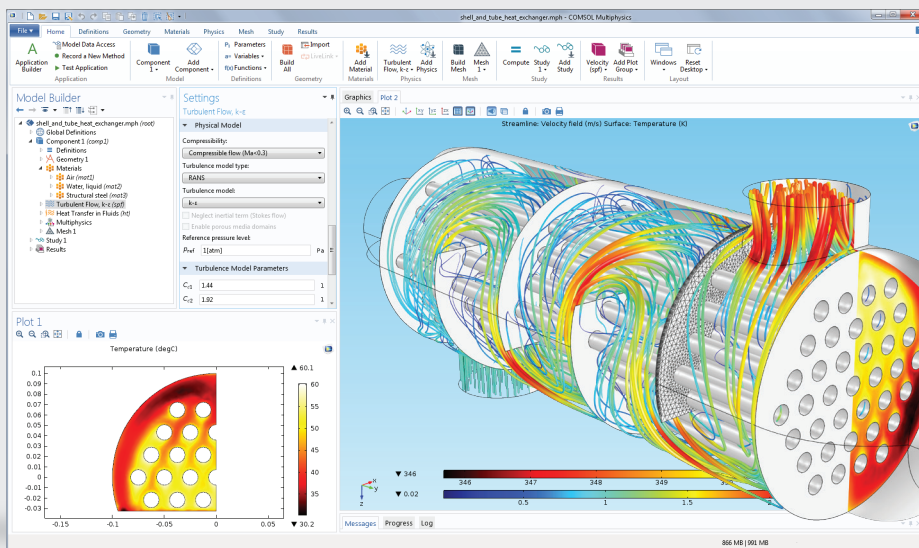
- Инструменты экспорта помогут вам поделиться результатами вашей работы с коллегами, соавторами и заказчиками.

Постобработка позволит вам лучше понимать и интерпретировать вашу модель, принимать обоснованные решения в ходе разработки и демонстрировать результаты другим. Экспериментируйте с представленными методами, чтобы понять их возможности! Мы надеемся, что благодаря этому руководству ваши модели — и стоящие за ними идеи — «оживут» и станут нагляднее.



ИНТЕГРИРОВАННЫЙ В ПОДЛОЖКУ ВОЛНОВОД (SIW-ВОЛНОВОД)

Модель волн, излучаемых многослойной антенной на поверхности интегрированного в подложку волновода (SIW-волновода), разработанная с помощью модуля RF (Радиочастоты). SIW-волноводы применяются в антеннах, в которых направление излучения волн можно контролировать, изменяя рабочую частоту. Результаты отображаются в виде диаграммы излучения в дальней зоне.



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 устройства.