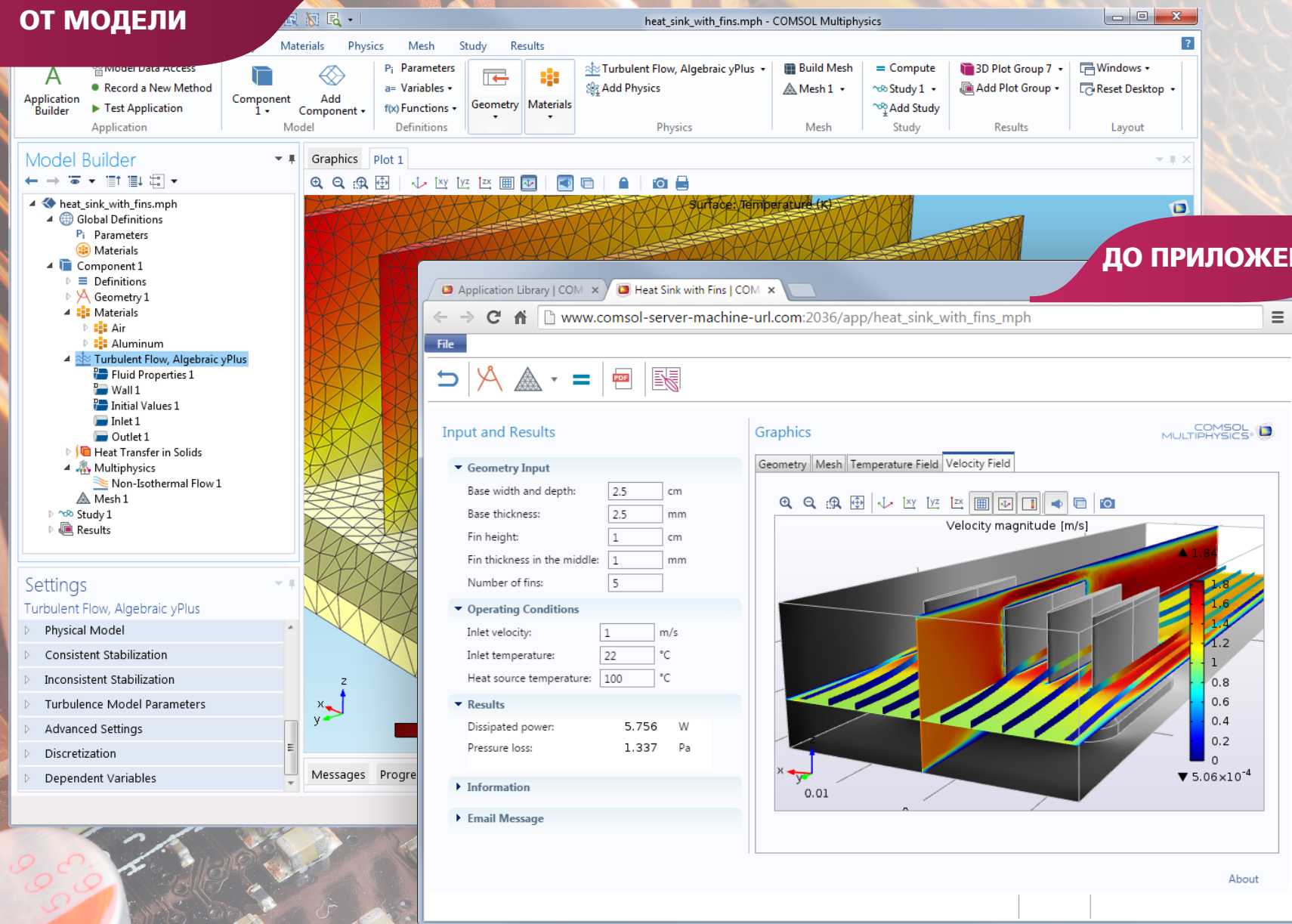


COMSOL  
MULTIPHYSICS®  
COMSOL  
SERVER™

## ОТ МОДЕЛИ



## ДО ПРИЛОЖЕНИЯ

## Моделирование для всех

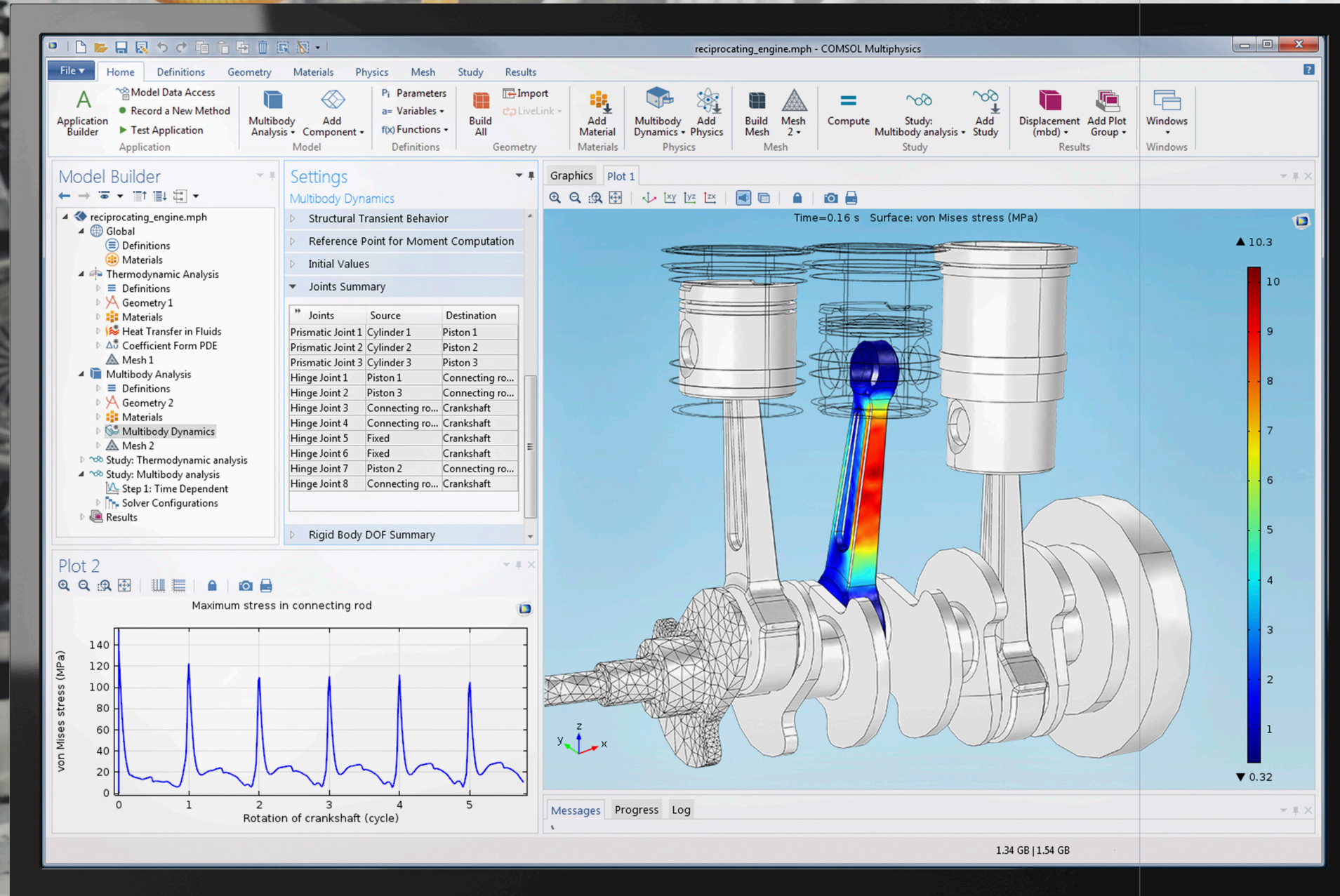
Программные приложения COMSOL® воплощают мечту о доступности моделирования для каждого. Идея проста — сделать возможным создание и запуск приложений для моделирования.

Именно для этого в программном пакете COMSOL Multiphysics® предусмотрена передовая среда моделирования и разработки приложений. В ней реализован комплексный подход к моделированию, обеспечивающий инженерам самые мощные вычислительные средства и готовые приложения на всех этапах разработки продукции. Широкий спектр возможностей моделирования стимулирует инновации и повышает продуктивность всех подразделений вашей компании: от этапа разработки до производства.

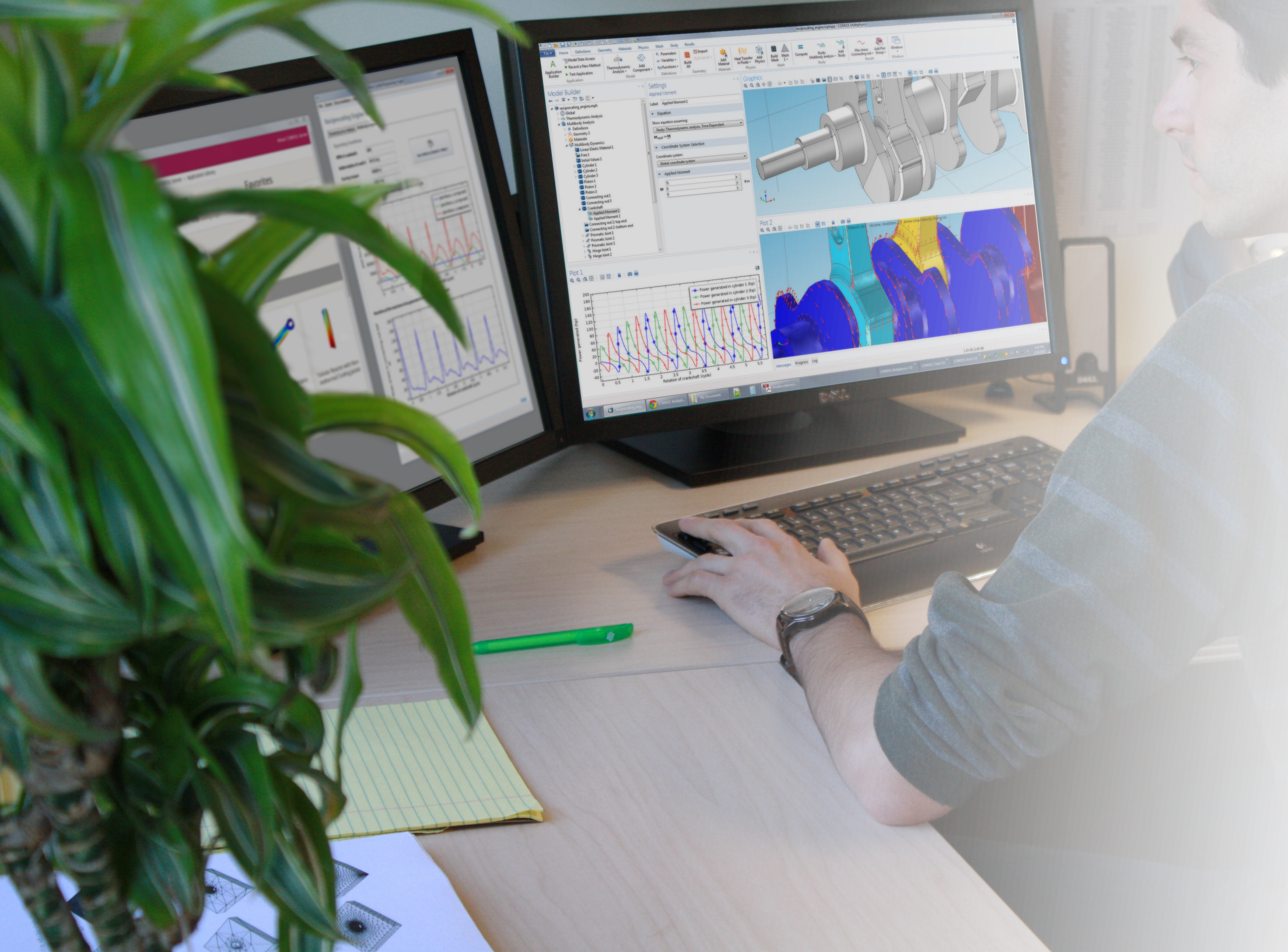
Хотите создать собственное приложение для моделирования? С COMSOL Multiphysics® и COMSOL Server™ это очень просто.

### СОДЕРЖАНИЕ

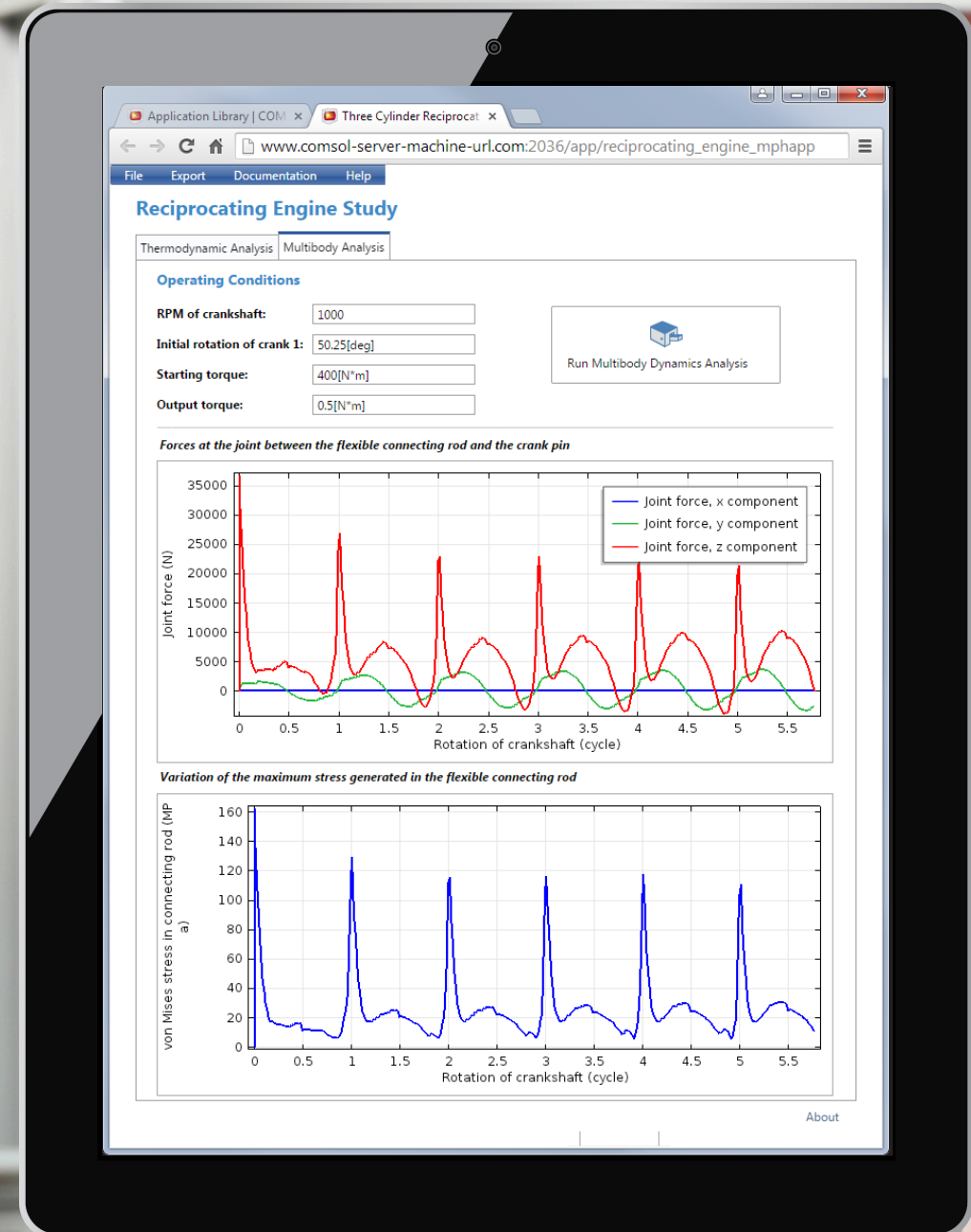
ПАКЕТ ПРОДУКТОВ	10
COMSOL MULTIPHYSICS	12
COMSOL SERVER	22
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ПРОДУКТЫ	
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА	24
МЕХАНИКА	38
ГИДРОДИНАМИКА	52
ХИМИЯ	64
МНОГОЦЕЛЕВЫЕ	74
ИНТЕГРАЦИЯ	80
ПОДДЕРЖКА ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ	93
ВАРИАНТЫ ЛИЦЕНЗИРОВАНИЯ	94



Как создать оптимальный проект и передать свой опыт моделирования коллегам?



С помощью мощных  
вычислительных средств.  
От модели к приложению



С помощью приложений для моделирования, которыми легко обмениваться. Где бы вы ни находились

## COMSOL Multiphysics®

## COMSOL Server™

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

AC/DC

Радиочастоты

Волновая оптика

Геометрическая оптика

MEMS

Плазма

Полупроводники

МЕХАНИКА

Теплопередача

Механика конструкций

Нелинейные конструкционные материалы

Геомеханика

Усталость материала

Динамика многотельных структур

Акустика

ГИДРОДИНАМИКА

Вычислительная гидродинамика

Миксер

Микрогидродинамика

Течения в пористых средах

Течение в трубопроводах

Молекулярные течения

ХИМИЯ

Разработка химических реакций

Аккумуляторы и топливные элементы

Электроосаждение

Коррозия

Электрохимия

МНОГОЦЕЛЕВЫЕ

Оптимизация

Библиотека материалов

Трассировка частиц

ИНТЕГРАЦИЯ

LiveLink™ for MATLAB®

Импорт данных из САПР

Импорт данных из ECAD

LiveLink™ for Inventor®

LiveLink™ for Revit®

LiveLink™ for PTC® Pro/ENGINEER®

File Import for CATIA® V5

LiveLink™ for Excel®

Проектирование

LiveLink™ for SOLIDWORKS®

LiveLink™ for AutoCAD®

LiveLink™ for PTC® Creo® Parametric™

LiveLink™ for Solid Edge®

## ЛИНЕЙКА ПРОДУКТОВ

COMSOL Multiphysics®	12
COMSOL Server™	22

### Электротехника

AC/DC	24
Радиочастоты	26
Волновая оптика	28
Геометрическая оптика	30
MEMS	32
Плазма	34
Полупроводники	36

### Механика

Теплопередача	38
Механика конструкций	40
Нелинейные конструкционные материалы	42
Геомеханика	44
Усталость материала	46
Динамика многотельных структур	48
Акустика	50

### Гидродинамика

Вычислительная гидродинамика	52
Миксер	54
Микрогидродинамика	56
Течения в пористых средах	58
Течения в трубопроводах	60
Молекулярные течения	62

### Химия

Разработка химических реакций	64
Аккумуляторы и топливные элементы	66
Электроосаждение	68
Коррозия	70
Электрохимия	72

### Многоцелевые

Оптимизация	74
Библиотека материалов	76
Трассировка частиц	78

### Интеграция

Импорт данных из САПР	80
File Import for CATIA® V5	80
Проектирование	82
LiveLink™ for SOLIDWORKS®	83
LiveLink™ for Inventor®	84
LiveLink™ for AutoCAD®	85
LiveLink™ for Revit®	86
LiveLink™ for PTC® Creo® Parametric™	87
LiveLink™ for PTC® Pro/ENGINEER®	88
LiveLink™ for Solid Edge®	89
Импорт данных из ECAD	90
LiveLink™ for MATLAB®	91
LiveLink™ for Excel®	92

## COMSOL Multiphysics®

Среда моделирования COMSOL Multiphysics® облегчает все стадии процесса моделирования: описание геометрических параметров системы, создание сетки, описание физических характеристик, решение и визуализацию результатов. Кроме того она служит платформой для модулей, расширяющих возможности базовых интерфейсов физик среды COMSOL Multiphysics, а также для создания приложений для моделирования.

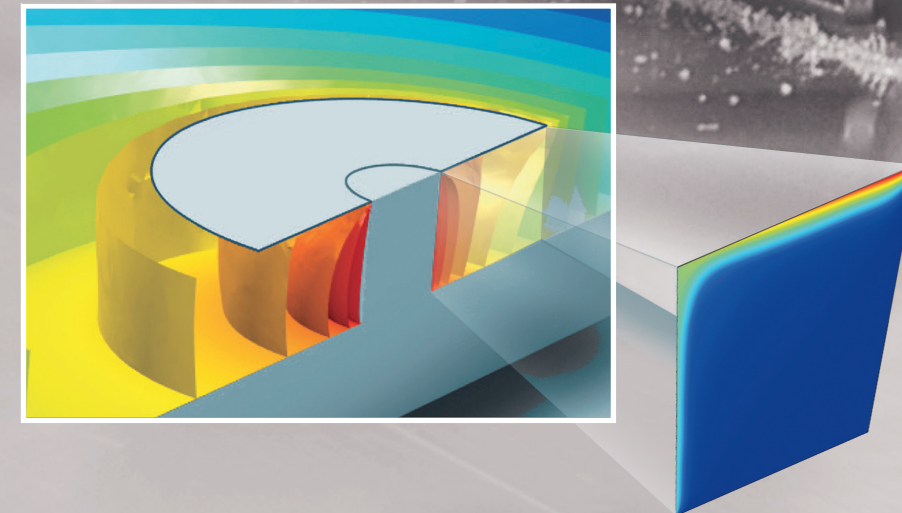
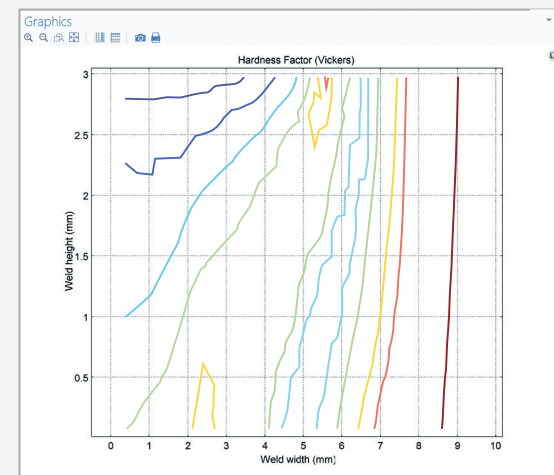
Настройка модели происходит быстро благодаря большому числу заранее определенных интерфейсов физик для различных областей применения: от гидродинамики и теплопередачи до механики конструкций и электростатики. Свойства материалов, характеристики источников и граничные условия могут зависеть от координат и времени либо выражаться функциями зависимых переменных. Интерфейсы физик можно свободно объединять, создавая новые мультифизические сочетания, а также использовать их совместно со специализированными модулями.

В качестве альтернативы самостоятельному написанию кода для моделирования пользовательский интерфейс COMSOL Multiphysics позволяет вам вводить собственные дифференциальные уравнения (как обыкновенные, так и в частных производных) и связывать их с другими интерфейсами физик. В сочетании с модулем Импорт данных из САПР или любым из продуктов LiveLink™ это позволяет работать с моделями САПР в одном из множества отраслевых форматов.

### СВАРКА

Сварка трением с перемешиванием — метод твердотельной сварки, разработанный и запатентованный Институтом сварки (The Welding Institute) в 1990-х годах. С момента изобретения этот метод приобрел широкую известность. Сегодня множество предприятий применяет эту технологию в производстве, особенно часто — для соединения деталей из алюминиевых сплавов.

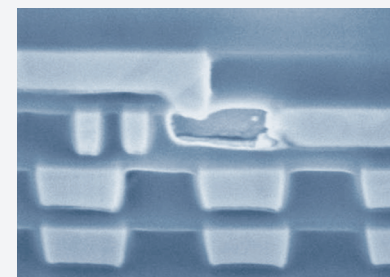
Модель отображает распределение температур с учетом процессов гидродинамики, трения и теплопередачи. На графике показаны значения показателя твердости, полученные путем моделирования.



Модель предоставлена доктором Paul Colegrove, Университет Кренфилда, Кренфилд, Великобритания. Изображения предоставлены Институтом сварки (The Welding Institute, TWI), Кембридж, Великобритания.

### КЛЮЧЕВЫЕ ОСОБЕННОСТИ

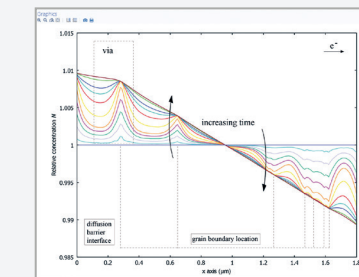
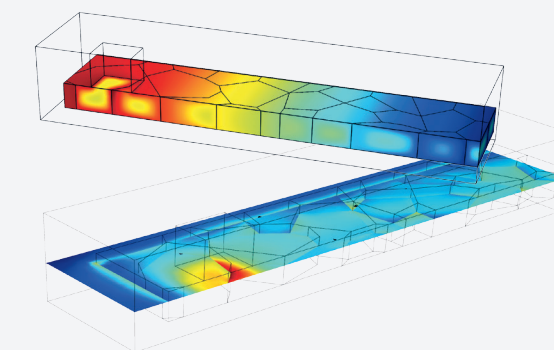
- Построитель моделей (Model Builder)
- Среда разработки приложений (Application Builder)
- Возможность экспорта анимаций, изображений и данных
- Построение сеток: автоматическое, объемное, для граничного слоя
- Интегрирование по границе и по объему
- Сопоставление компонентов, позволяющее связывать одномерные, двумерные и трехмерные компоненты моделей
- Базовые интерфейсы физик
- Быстрое преобразование Фурье (FFT)
- Импорт интерполяционных таблиц для одномерных, двумерных и трехмерных наборов данных
- Линейные и конечные элементы высшего порядка
- Импорт сеток
- Подвижные и деформируемые сетки
- Моделирование параметризованной геометрии
- Пользовательские интерфейсы с поддержкой дифференциальных уравнений, обыкновенных и в частных производных
- Пробы и графики проб
- Выражения, зависящие от координат и времени, для физических свойств и граничных условий
- Уникальные многоядерные решатели
- Задаваемые пользователем линейные и нелинейные материалы
- Средства визуализации: векторные диаграммы, контуры, графики, ленты, сечения, линии потока, поверхностные и объемные графики



### ЭЛЕКТРОНИКА

Модель, прогнозирующая выход из строя медного проводящего контура. Результаты моделирования обнаруживают высокую концентрацию вакансий и, как следствие, напряжения по Мизесу. На графике показан рост концентрации вакансий со временем. Пики соответствуют соединениям и границам зерен.

Модель предоставлена F. Sacho и V. Fiori, компания STMicroelectronics, Кроль, Франция.



## COMSOL DESKTOP®

Прикладная среда моделирования должна быть удобной для пользователей с любым опытом моделирования, а также достаточно функциональной и мощной для решения поставленных задач. Мы воплотили эти качества в комплексной среде COMSOL Desktop®.

Ее удобный интерфейс отражает архитектуру COMSOL Multiphysics и позволяет полностью управлять процессом моделирования. Интегрированный в среду и интуитивный рабочий процесс позволяет быстро создавать модели и приложения.

Компоновка рабочего стола COMSOL Desktop остается неизменной для всех физик и приложений. Это облегчает взаимодействие специалистов в различных дисциплинах и помогает им совместно разрабатывать более качественные модели с большей скоростью.

*«COMSOL Multiphysics® версии 5 предлагает широкий спектр интуитивных инструментов создания изображений, построения сеток, описания материалов, анализа методом конечных элементов, постобработки и графической визуализации. Поэтому продукт быстро завоевал популярность среди специалистов по мультифизическому моделированию».*

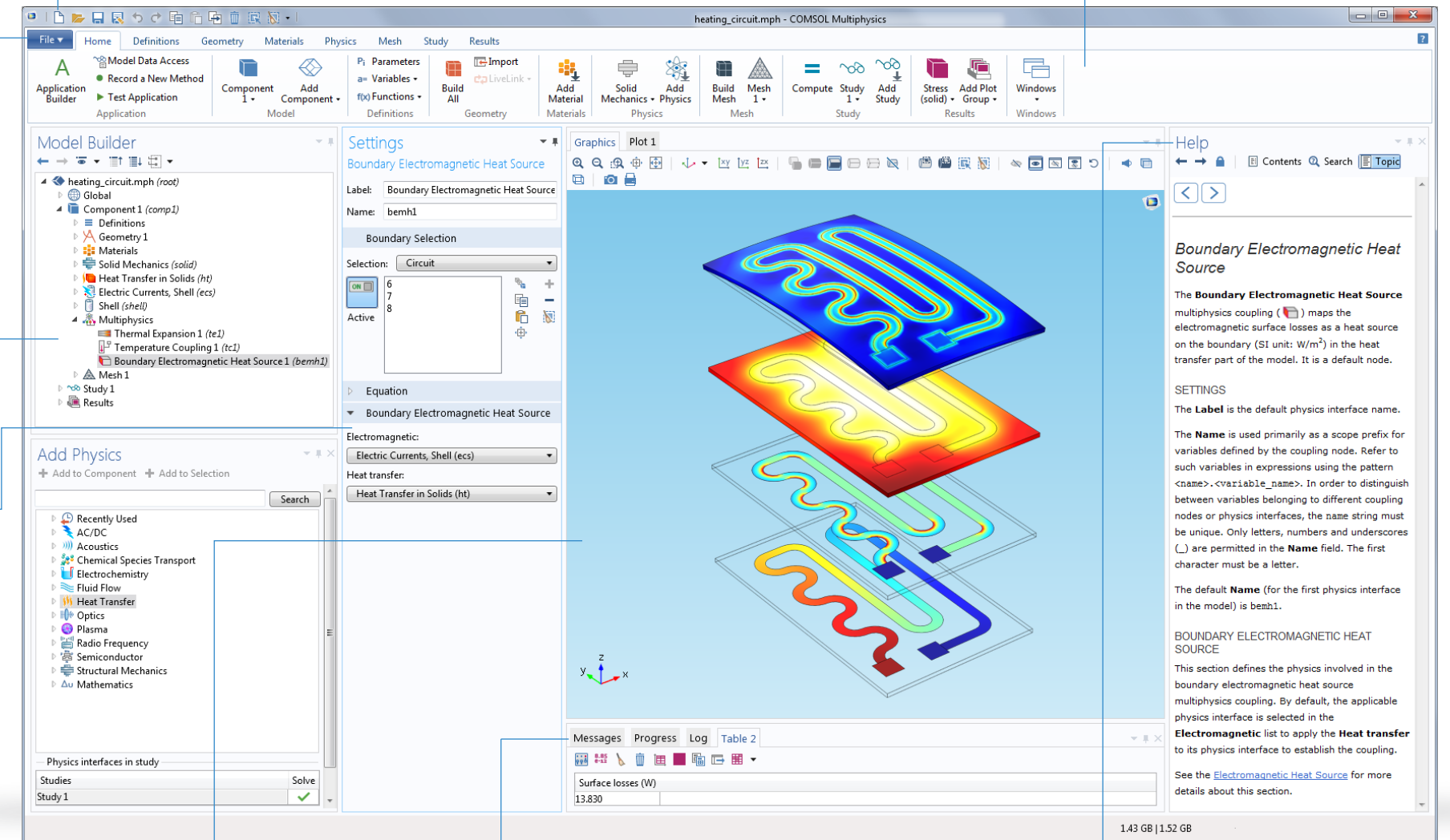
Билл Веттерлинг (Bill Vetterling), компания ZINK Imaging, Бедфорд, США.

**МАСТЕР СОЗДАНИЯ МОДЕЛЕЙ**  
Быстрая настройка модели в Мастере создания моделей путем выбора одного или нескольких интерфейсов физик.

**БИБЛИОТЕКИ ПРИЛОЖЕНИЙ**  
Библиотеки приложений содержат документированные примеры и приложения для моделирования из всех областей науки и техники.

**ПОСТРОИТЕЛЬ МОДЕЛЕЙ**  
Построитель моделей обеспечивает доступ ко всем параметрам модели.

**ПАРАМЕТРЫ (SETTINGS)**  
В окне Settings (Параметры) пользователь может с легкостью задать, проверить и изменить любые характеристики и свойства модели.



**ЛЕНТА**  
На вкладках ленты содержатся кнопки и раскрывающиеся списки, с помощью которых можно контролировать все этапы процесса моделирования.

**ОКНО ГРАФИКОВ**  
Сверхбыстрое отображение графиков, феноменальная визуализация, отображение нескольких графиков.

**ОКНО УВЕДОМЛЕНИЙ**  
В окнах уведомлений отображаются сообщения о ходе процесса моделирования: время, затраченное на поиск решения, ход решения, показатели сетки, журнал решателя и таблицы результатов (при наличии).

**ДИНАМИЧЕСКАЯ СПРАВКА**  
Справка поддерживает широкие возможности поиска и непрерывно обновляется при наличии Интернет-доступа к ресурсам Knowledge Base (База знаний) и Model Gallery (Галерея моделей).



## ПОСТРОИТЕЛЬ МОДЕЛЕЙ (MODEL BUILDER)

Процесс создания модели в COMSOL® совпадает с естественным ходом рассуждений — от идеи до реализации. Для управлять процессом моделирования предназначен Построитель моделей, который придает всем этапам процесса динамичную и логичную структуру.

Построение модели осуществляется путем перехода по ветвям дерева модели от определения параметров и создания геометрии до визуализации и результатов моделирования. Добавляя новые узлы, можно улучшать и усложнять модель, чтобы она описывала вашу разработку как можно точнее.

Построитель моделей обеспечивает мгновенный доступ ко всем параметрам модели. Любую функции можно изучать, уточнять и оптимизировать на всех этапах моделирования. Благодаря этой возможности Построитель моделей превращается в гибкий инструмент графического программирования для параметрического анализа, оптимизации и специализированных процедур моделирования.

*«COMSOL позволяет легко и просто объединять механизмы и изучать свойства их сочетаний. Это подлинная сила моделирования».*

Доктор Роберто Суарес-Ривера (Roberto Suarez-Rivera),  
компания Schlumberger, Солт-Лейк-Сити, США.

### ОПРЕДЕЛЕНИЯ (DEFINITIONS)

С легкостью управляйте параметрами, функциями, пробами и графиками.

### ГЕОМЕТРИЯ (GEOMETRY)

Используйте встроенные средства рисования или импортируйте файлы из САПР, чтобы создать геометрию в ветви Geometry.

### МАТЕРИАЛЫ (MATERIALS)

Укажите свойства материалов в ветви Materials (Материалы) с помощью выражений и функций или импортируйте материал из библиотеки.

### ФИЗИКА (PHYSICS)

Задайте физику и выберите материалы, граничные условия, нагрузки и источники.

### СЕТКА (MESH)

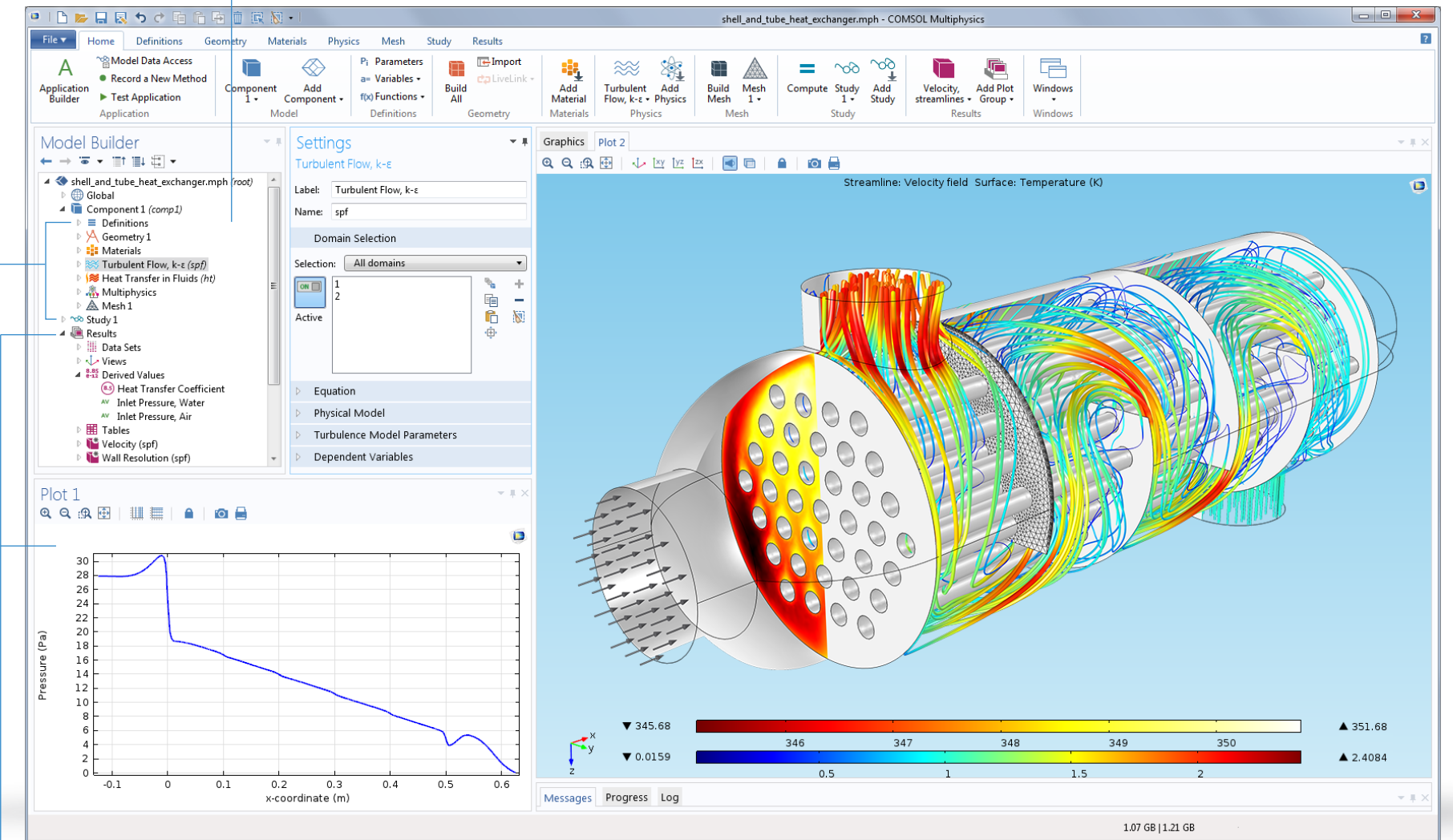
Автоматически создавайте и изменяйте сетку, чтобы получить оптимальное разрешение и упростить решение.

### ИССЛЕДОВАНИЕ

Осуществляйте моделирование, настраивайте параметрические исследования и другие последовательности работы решателей.

### ДЕРЕВО МОДЕЛИ (MODEL TREE)

Дерево модели дает общее представление о модели, а также предоставляет все необходимые функции и инструменты для создания модели и обработки результатов.



### РЕЗУЛЬТАТЫ

Возможность получения и визуализации количественных результатов, проб и графиков схождения. Для одновременного отображения различных результатов можно использовать несколько окон графиков.

## СРЕДА РАЗРАБОТКИ ПРИЛОЖЕНИЙ

Среда разработки приложений входит в программный пакет COMSOL Multiphysics® для Windows®. Она содержит все необходимые инструменты для создания и запуска приложений для моделирования. С помощью этой среды можно преобразовать любую модель COMSOL Multiphysics в приложение с собственным интерфейсом.

Среда разработки приложений содержит два специализированных средства создания приложений: Form Editor (Редактор форм) и Method Editor (Редактор методов). Редактор форм позволяет создавать пользовательский интерфейс приложения путем перетаскивания различных компонентов формы включая поля ввода, графические окна и кнопки.

Редактор методов предназначен для реализации специализированных функций и расширения возможностей приложений для моделирования. Он представляет собой среду программирования, которая позволяет писать код на Java®, модифицируя структуру данных модели COMSOL Multiphysics®.

*«Среда разработки приложений — самое инновационное решение COMSOL на сегодняшний день. По нашим оценкам, создавая приложения для наших коллег, мы сокращаем время, затрачиваемое на выполнение расчетов для них, на 30–40 %. Благодаря этому работают более эффективно все — и мы, и наши коллеги».*

Массимо Бечис (Massimo Vecchis), компания Prusmian, Милан, Италия.

### ДЕРЕВО ПРИЛОЖЕНИЯ

В дереве приложения представлены формы, события, объявления, методы и библиотеки, используемые в приложении.

**РЕДАКТОР ФОРМ**  
Используйте компоненты формы (поля, области графиков, кнопки и другие) для создания пользовательского интерфейса приложения для моделирования.

**РЕДАКТОР МЕТОДОВ**  
Создавайте методы для действий, не входящих в стандартную функциональность узлов дерева модели.

Создавайте пользовательский интерфейс приложения путем перетаскивания объектов формы.

Пользователи имеют возможность создавать методы, которые содержат циклы for, обмениваются данными с процессами, отправляют из приложения сообщения и уведомления.

## ПРИЛОЖЕНИЯ COMSOL

Приложение COMSOL представляет собой модель с пользовательским интерфейсом, созданным с помощью среды разработки приложений. Приложения для моделирования можно запускать при наличии лицензии COMSOL Multiphysics или COMSOL Server™.

Если имеется лицензия COMSOL Multiphysics, то пользователю доступно несколько способов выполнения приложения в среде COMSOL Desktop. Функциональность создаваемого приложения можно проверять непосредственно в среде разработки, чтобы быстро оценивать правильность работы форм и методов. Готовое приложение можно запустить через меню File (Файл) среды COMSOL Desktop. Приложение можно защитить паролем.

При наличии лицензии COMSOL Server пользователи могут обмениваться приложениями, управлять ими и выполнять их с помощью распространенных веб-браузеров на множестве операционных систем и аппаратных платформ. Кроме того, приложения можно выполнять, подключившись к COMSOL Server™ с помощью простого в установке клиента COMSOL Client для Windows®.



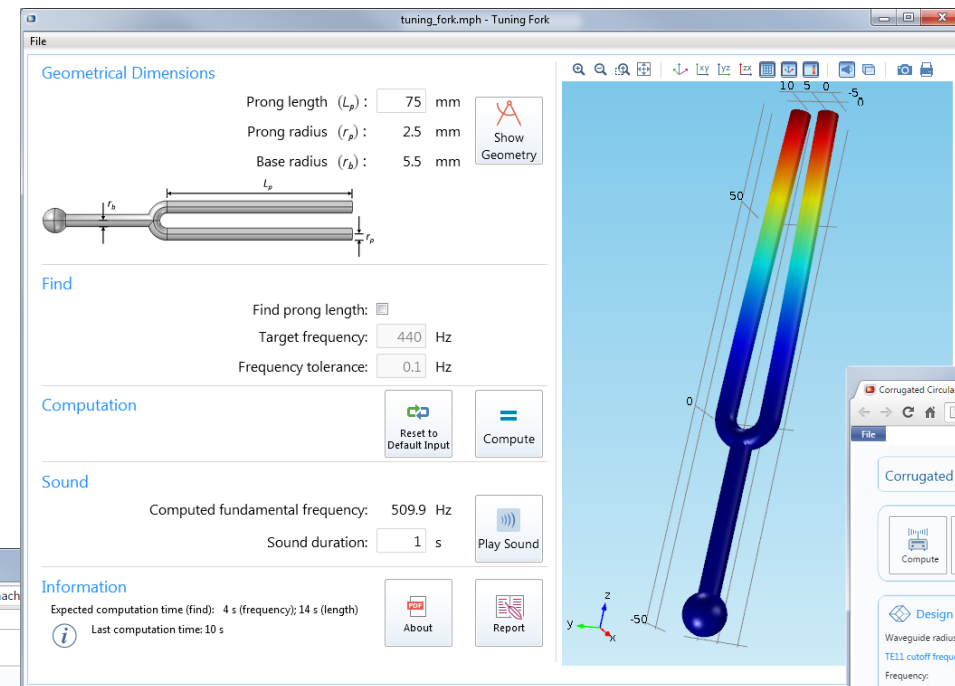
### ПУБЛИКАЦИЯ ПРИЛОЖЕНИЙ

Приложения, созданные в среде разработки приложений, можно передавать и использовать как в организации, так и за ее пределами с помощью COMSOL Server™.

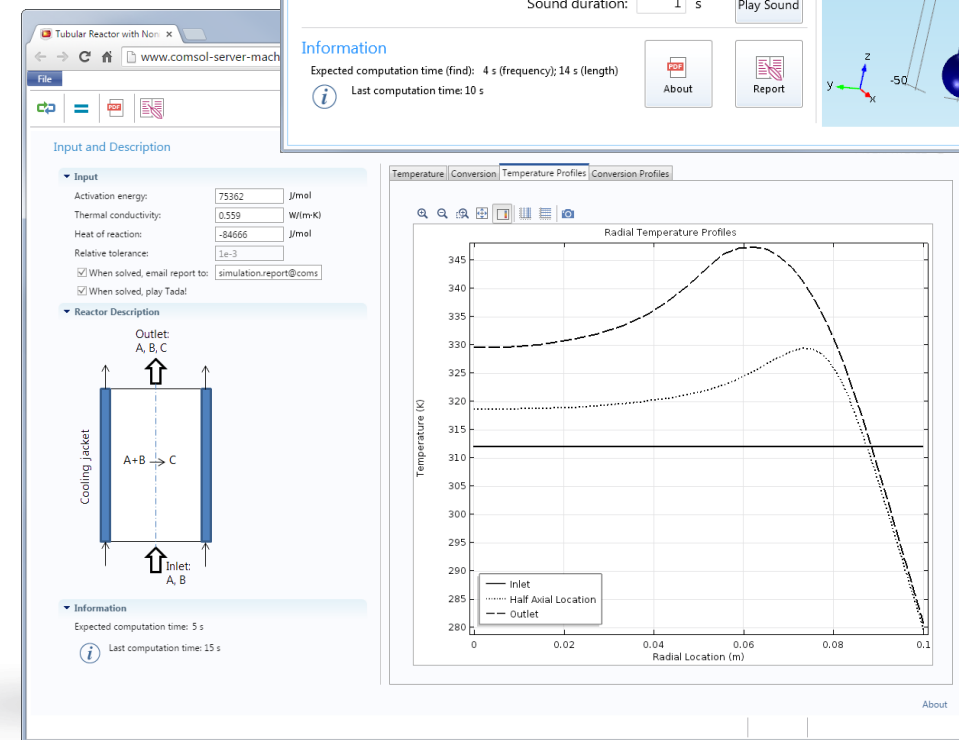
*«При наличии модели COMSOL создать приложение в Среде разработки приложений и передать его средствами COMSOL Server™ очень просто. Многие сотрудники APEI оценят преимущества такого подхода».*

Брайс Макферсон (Brice McPherson), компания APEI, Фейетвилл, США.

**ПРИЛОЖЕНИЕ КАМЕРТОН**  
 Данное приложение позволяет рассчитать моду основного колебания и резонансную частоту камертона, а также определить длину зубцов, необходимую для достижения заданной резонансной частоты.

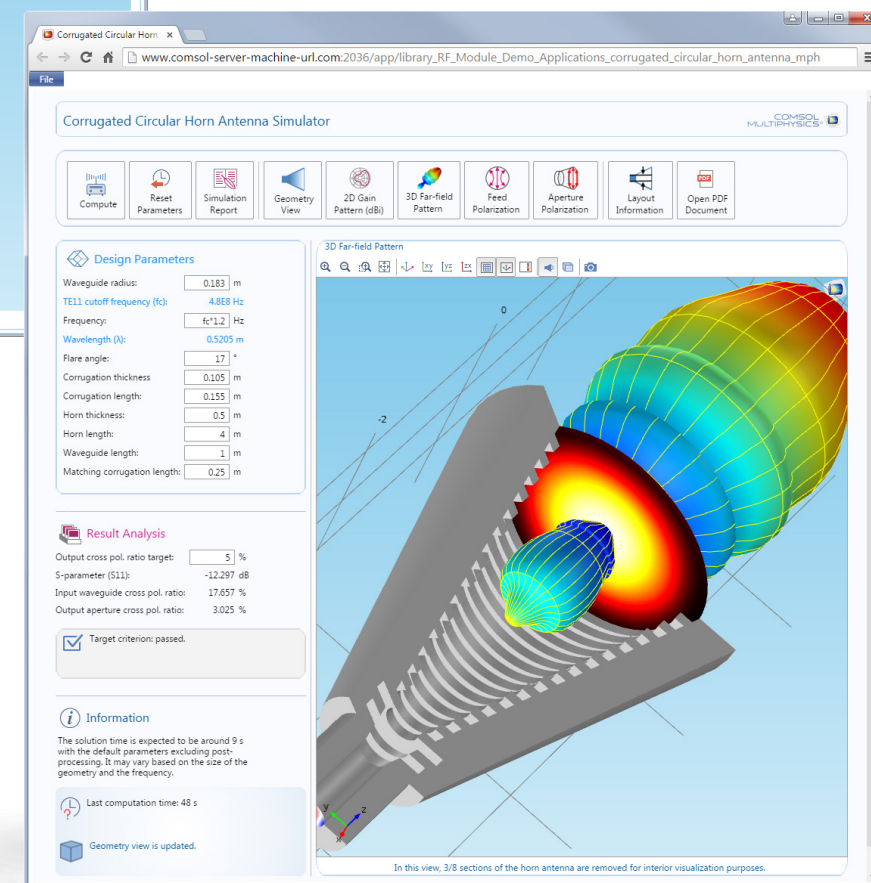


Демонстрационные приложения из библиотеки приложений



### ПРИЛОЖЕНИЕ-МОДЕЛЬ ТРУБЧАТОГО РЕАКТОРА

Данное приложение создано на основе модели кинетики реакции в трубчатом реакторе. Пользователь может изменять свойства реактора и граничные условия, чтобы анализировать температуру и профили преобразования в ходе экзотермической реакции.



### ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГАЗОСЕПАРАТОРА

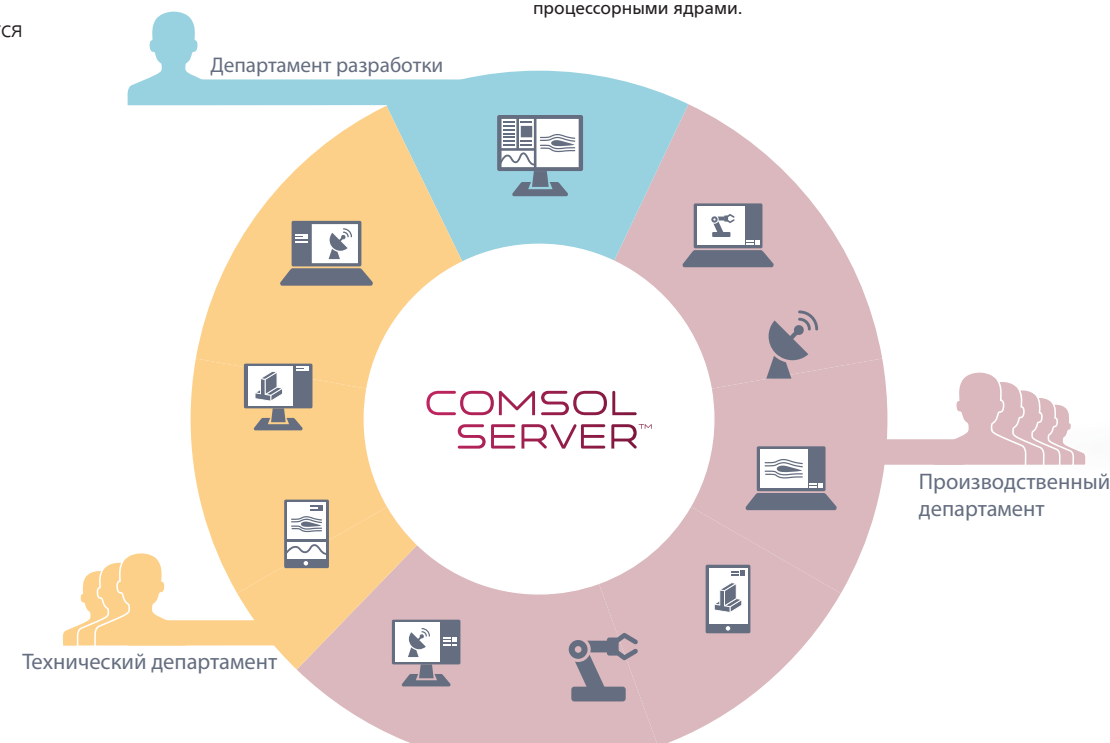
Это приложение рассчитывает встречное давление в сети трубопроводов, управляемой системой регуляторов массового расхода. Каждый регулятор подает определенный поток жидкости на один из трубопроводов. Регуляторы функционируют, только если встречное давление не превышает 760 мм рт. ст. Пользователи могут изменять габариты трубопровода, граничные условия и модель текучей среды для проведения расчета.

# COMSOL Server™

COMSOL Server™ — это система для запуска приложений COMSOL, управления их развертыванием, распространением и применением. После создания приложений для моделирования в Среде разработки приложений, входящей в пакет COMSOL Multiphysics®, сервер обеспечивает пользователям экономичное решение для управления применением этих приложений как внутри организации, так и вне ее — по всему миру.

Сервер может размещаться в инфраструктуре предприятия или в облачной среде, что позволяет отделам разработки и производства, а также другим пользователям совместно пользоваться приложениями. Приложения для моделирования могут запускаться в COMSOL Client for Windows®, а также в основных веб-браузерах Google Chrome™, Firefox®, Internet Explorer® и Safari®.

COMSOL Server также облегчает получение обновлений. Сразу после загрузки новой версии приложения на сервер, она мгновенно становится доступна всем пользователям.



## БИБЛИОТЕКА ПРИЛОЖЕНИЙ

Загружайте приложения и просматривайте список доступных для запуска приложений.

## МОНИТОРИНГ

Здесь содержатся сведения о времени запуска и работы приложения, потреблении ресурсов процессора и памяти, а также список запущенных сеансов приложений.

## БАЗА ДАННЫХ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ

Добавление пользователей и групп в базу данных пользователей на сервере.

## ПАРАМЕТРЫ

Управление административными параметрами и настройками сервера: язык, папки, отрисовка изображений, безопасность, сеансы и управление процессорными ядрами.

## ВЫПОЛНЯЕМЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложения могут выполняться в отдельных вкладках и окнах браузера.

The screenshot shows the COMSOL Server web interface. The browser address bar displays 'www.comsol-server-machine-url.com:2036/app-lib?sort=Name&filter=Public'. The page title is 'COMSOL Server > Application Library'. On the left, a navigation sidebar includes 'Application Library', 'Upload', 'Administration', 'Monitor', 'User Database', 'Preferences', and 'Your Settings'. The main content area is titled 'Library' and features a grid of application thumbnails. Each thumbnail includes a visual representation of the application (e.g., 'Decorative Plating', 'Gas Box Designer', 'Pull-in of an RF MEMS Switch', 'Static Field Modeling of a Halbach Rotor', 'Surface Reactions in a Biosensor', 'Thermal Bridges in Building Construction - 3D Structur ...', 'Tubular Reactor with Isothermal Cooling Jacket', and 'Tuning Fork') and a 'Launch' button. On the right side, there are sections for 'Running' (showing active sessions like 'Tuning Fork (2119)', 'Gas Box Designer (2129)', and 'Tubular Reactor with Isothermal Cooling Jacket (2131)') and 'Favorites' (listing saved applications like 'Tuning Fork', 'Static Field Modeling of a Halbach Rotor', etc.).

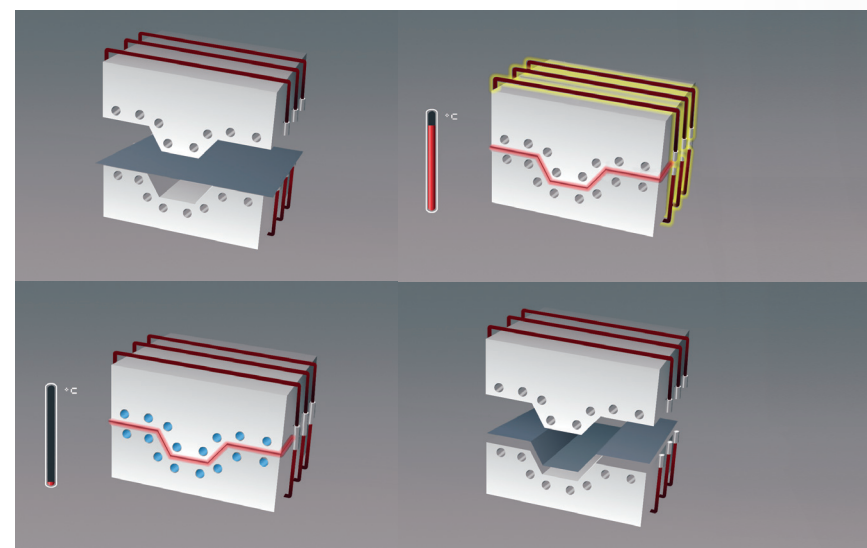
## ЗНАЧОК ПРИЛОЖЕНИЯ

Позволяет изменять приложение, просматривать общие сведения, добавлять приложение в избранное и запускать его.

## Модуль AC/DC

Предназначен для моделирования конденсаторов, катушек индуктивности, моторов и микросенсоров. Поведение этих устройств в основном определяется электромагнитными явлениями, однако другие виды явлений также играют определенную роль. К примеру, на электрические свойства материалов могут влиять тепловые эффекты. Кроме того, при проектировании генераторов необходимо в полной мере учитывать электромеханические деформации и возникающие в ходе работы вибрации.

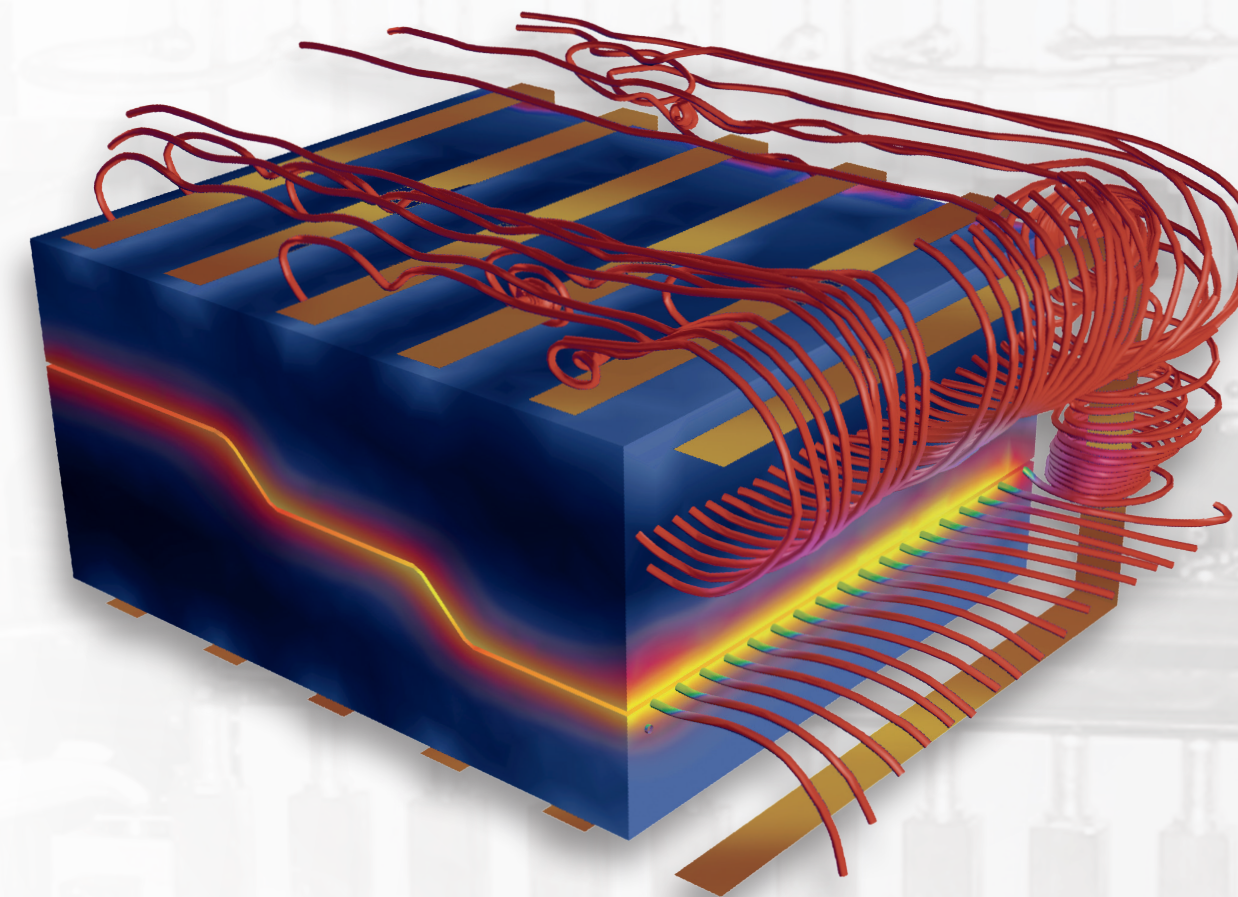
Модуль AC/DC позволяет анализировать электростатические, магнитостатические и электромагнитные квазистатические явления, а также воздействие внешних полей и явлений, относящихся к другим областям физики. Если вы проектируете электрические компоненты масштабной системы, то с помощью данного модуля сможете добавить элементы цепи из списков элементов SPICE. Модуль позволяет осуществлять моделирование смешанной системы, объединяя сложные и высокоточные модели.



### ПРОИЗВОДСТВО КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Лист композитного материала располагается на форме, которая сдвигает его с двух сторон. Для нагревания формы используются индукционные токи. После того как заготовка отвердеет, материал охлаждается водой, поступающей из труб, и извлекается из формы.

Модель и изображения предоставлены: José Feigenblum, компания RocTool, Ле-Бурже-дю-Лак, Франция.



### ИНДУКЦИОННЫЙ НАГРЕВ

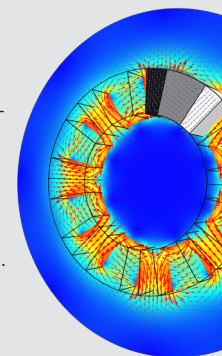
Модель показывает магнитный поток (линии потока) и распределение температур (желтая линия на графике) в аппарате для индукционной формовки и в композитном материале.

## КЛЮЧЕВЫЕ ОСОБЕННОСТИ

- Распределение переменных и постоянных токов, электромагнитных полей
- Биологический нагрев
- Катушки и соленоиды
- Сочетание элементов цепи SPICE и полей в одной модели
- Контактное сопротивление
- Электромагнитная совместимость (ЭМС) и интерференция (ЭМИ)
- Электромагнитная сила и момент
- Экранирование от электромагнитного поля
- Электромеханические деформации
- Датчики Холла
- Изоляционные материалы, конденсаторы и диэлектрики
- Моторы, генераторы и другие электромеханические устройства
- Нелинейные материалы
- Паразитная емкость и индуктивность
- Постоянные магниты и электромагниты
- Пористые материалы
- Резистивный и индукционный нагрев
- Сенсоры
- Сверхпроводники
- Трансформаторы и катушки индуктивности

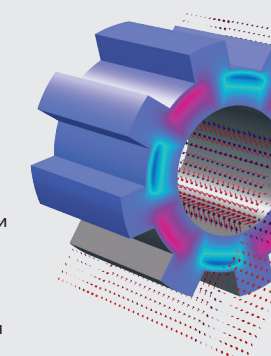
### РОТОР ХАЛБАХА

Модель ротора Халбаха, состоящего из 16 сегментов и 4 полюсных пар. На иллюстрации показано распределение плотности магнитного потока.



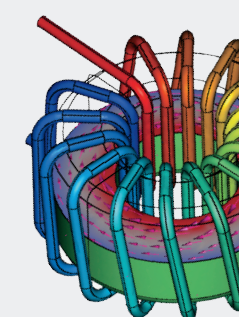
### ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

Статическая 3D-модель генератора с ротором из закаленной среднеуглеродистой стали — ферромагнитного материала с нелинейными свойствами (насыщение плотности магнитного потока). На иллюстрации показаны магнитные поля внутри и вне генератора.



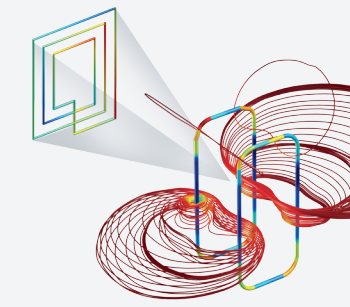
### КАТУШКА ИНДУКТИВНОСТИ

На модели представлена катушка индуктивности, состоящая из ферритового сердечника и обмотки. Рассчитывается индуктивность устройства. За счет разности потенциалов генерируется постоянный ток, он формирует магнитное поле. На иллюстрации показана плотность магнитного потока.



### МЕТКИ RFID

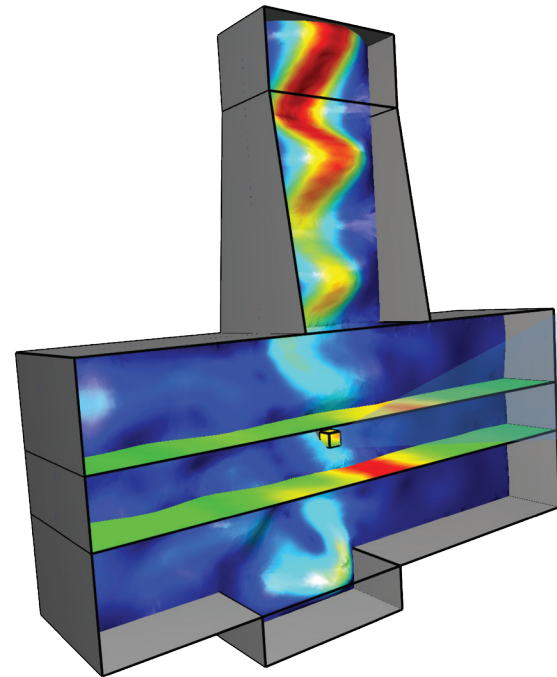
Система RFID состоит из метки (радиомаяка) с антенной в виде печатной платы (слева) и более крупной принимающей антенны (справа). Система генерирует электромагнитное поле, которое питает интегральную схему внутри метки. На иллюстрации показана плотность магнитного потока.



## Модуль Радиочастоты

При моделировании радиочастотных и микроволновых устройств следует рассчитать распространение электромагнитных волн в различных компонентах и вокруг них. Эти компоненты могут быть металлическими, диэлектрическими, гиромангнитными и даже метаматериалами с заданными свойствами. Модуль Радиочастоты предлагает инструменты для решения этой задачи. Он позволяет учитывать граничные условия на отверстиях и условия рассеивания, производить расчеты для комплекснозначных, зависящих от координаты, анизотропных моделей материалов и идеально согласованных слоев. Кроме того, модуль содержит лучшие из доступных решателей. С помощью данного модуля можно с легкостью создавать модели антенн, волноводных трактов и микроволновых компонентов.

Кроме того, он поддерживает расчет параметров рассеяния и анализ дальних зон полей. В сочетании с непревзойденными возможностями COMSOL Multiphysics в области моделирования других физических явлений (нагрева, обусловленного радиочастотным излучением, напряжений и деформации) вы получаете лучшее в отрасли решение для мультифизического моделирования электромагнитных волн.



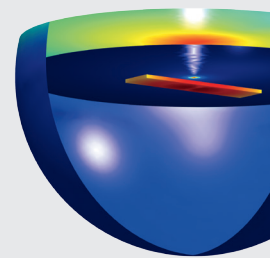
### ОБОГАЩЕНИЕ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

Частицы минералов, содержащиеся в рудах, избирательно нагреваются микроволновым излучением, которое вызывает локальное тепловое расширение и высвобождение этих частиц. Этот процесс требует значительно меньше энергии, чем стандартный метод измельчения руды и отделения полезных ископаемых. Модель позволяет рассчитать микроволны в электродах, объем которых достигает нескольких кубических метров, а также волны, нагревающие минеральные частицы размером в несколько десятков микрон.

Модель предоставлена Jan Przybyła, компания e2v, Челмсфорд, Великобритания.

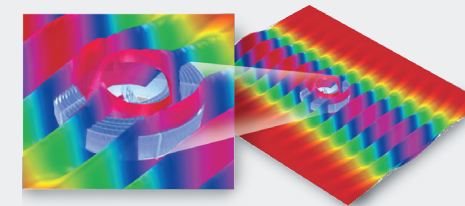
### НЕФТЕРАЗВЕДКА

Электромагнитная разведка с управляемым источником — распространенный метод нефтеразведки. В этой модели горизонтальная электрическая дипольная антенна с частотой излучения 1 Гц размещена на высоте в 150 м над уровнем моря. Приемники измеряют электромагнитное поле. Отраженная или направленная переданная энергия определяется сопротивлением резервуара.

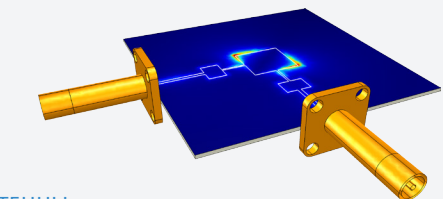


### МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Период электромагнитных метаматериалов значительно меньше длины электромагнитной волны, поэтому в узком диапазоне длин волн такой материал может быть «невидимым». В этой модели объект, расположенный в центре такой структуры, невидим для микроволнового излучения.



Модель предоставлена Cummer и Schurig, Дюкский университет, Дарем, США.



### АНТЕННЫ

Для стабильного питания патч-антенны используются два коаксиальных кабеля. Модель рассчитывает эффективность антенны и определяет оптимальную рабочую частоту: 6,3 ГГц.

## КЛЮЧЕВЫЕ ОСОБЕННОСТИ

- Антенны, волноводные тракты и полости
- Периодические массивы и структуры Блоха-Флоке
- Циркуляторы и направленные ответвители
- Высокоскоростные межкомпонентные соединения
- Метаматериалы
- Нагрев микроволнами и радиоволнами
- Микроволновые устройства
- Микроволновое спекание
- Нефтепоисковые исследования и электромагнитная разведка с управляемым источником (CSEM)
- Плазмоника
- Пористые материалы
- Разработка резонансных катушек
- Бионагрев радиоволнами и микроволнами
- Описание рассеянного поля для задач расчета твердости по Роквеллу и рассеяния
- Анализ параметров рассеяния антенн
- Термоструктурные эффекты в антеннах и волноводных трактах
- Линии высоковольтной передачи

## КЛЮЧЕВЫЕ ОСОБЕННОСТИ

- Волноводные ответвители
- Волоконные решетки Брэгга
- Волоконная оптика
- Генерация гармоник и смещение частот
- Интегральная оптика
- Лазеры и усилители
- Нагрев лазерным излучением
- Метаматериалы
- Нелинейная оптика
- Оптическая литография
- Оптическое рассеяние
- Оптические датчики
- Оптоэлектроника
- Фотонно-кристаллические волокна
- Фотонные приборы
- Разработка стержневых, плоских и дисковых лазеров
- Рассеяние на наночастицах
- Полупроводниковые лазеры
- Рассеяние на поверхности
- Фотоупругость
- Волноводные тракты

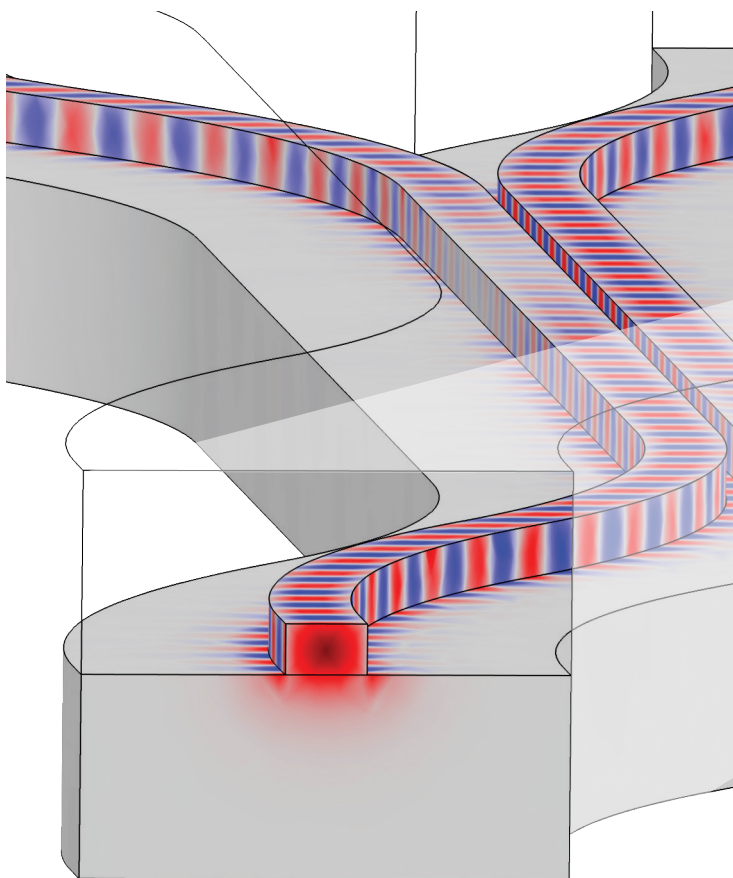
## Модуль Волновая оптика

Модуль содержит специализированные средства моделирования распространения электромагнитных волн в линейных и нелинейных оптических средах, позволяющие точно моделировать компоненты изделия и разрабатывать наиболее эффективные устройства. Инновационный метод, основанный на расчете огибающей пучка двухполупериодных волн, позволяет отказаться от использования традиционных методов приближения и выполнить непосредственную дискретизацию уравнений Максвелла. Это помогает более точно моделировать крупные оптические системы с размерами, намного превышающими длину волны, а также системы, в которых световые волны нельзя аппроксимировать лучами. Кроме того, в модуле доступны и стандартные средства моделирования двухполупериодных волн.

Он позволяет учитывать общий анизотропный показатель преломления, тензоры диэлектрической и магнитной проницаемости оптических сред, чтобы моделировать гиромангнитные материалы и метаматериалы с заданными свойствами. Для моделирования мод собственных частот, электромагнитных явлений на промежутке частот и интервале времени доступно несколько средств 2D- и 3D-моделирования.

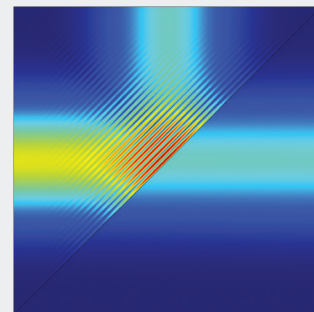
### НАПРАВЛЕННЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ РАЗВЕТВИТЕЛЬ

Модель направленного оптического разветвителя, состоящего из двух взаимодействующих волноводных трактов. Волновой тракт слева находится в возбужденном состоянии. Результаты моделирования показывают фотонную связь между трактами — на иллюстрации представлено электрическое поле.



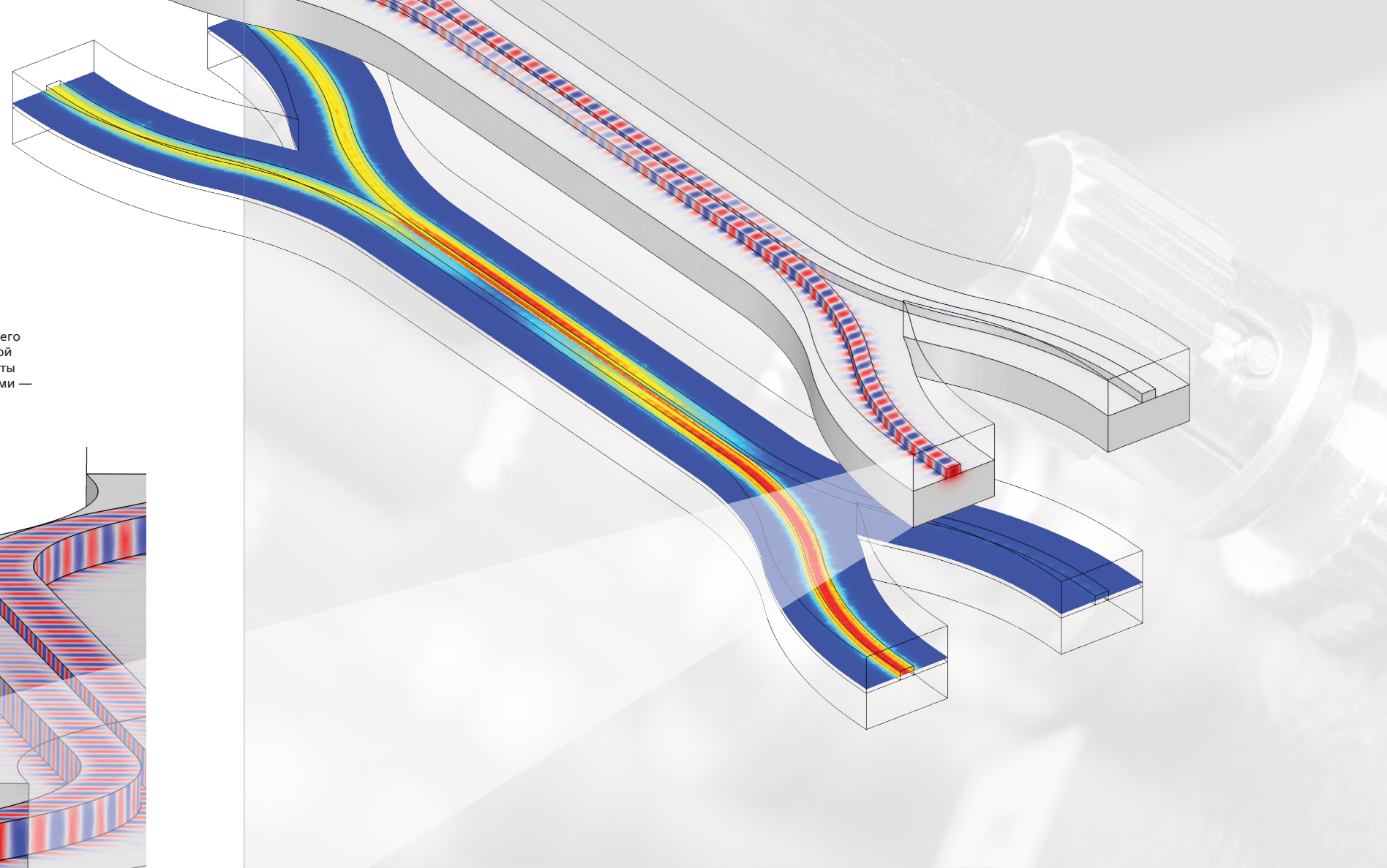
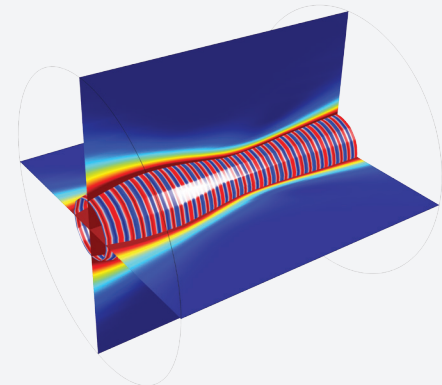
### СВЕТОДЕЛИТЕЛЬНАЯ ПЛАСТИНА

Светоделительная пластина применяется для разделения светового луча на два. Один из способов изготовления такой пластины — нанесение тонкого слоя металла между двумя стеклянными призмами. На этом слое луч немного ослабляется и разделяется на два направления. Тонкий металлический слой вносится в модель в виде переходного граничного условия, чтобы уменьшить требования к оперативной памяти. Кроме того, можно рассчитать потери на слое металла.



### САМОФУКУСИРОВКА

Гауссов пучок падает на оптическое стекло BK-7. Показатель преломления этого материала зависит от интенсивности излучения. Он достигает максимальной величины в центре луча. Этот профиль показателя преломления противодействует эффектам дифракции и приводит к фокусировке луча. Учет самофокусировки важен при разработке высокоомощных лазерных систем.



**КЛЮЧЕВЫЕ ОСОБЕННОСТИ**

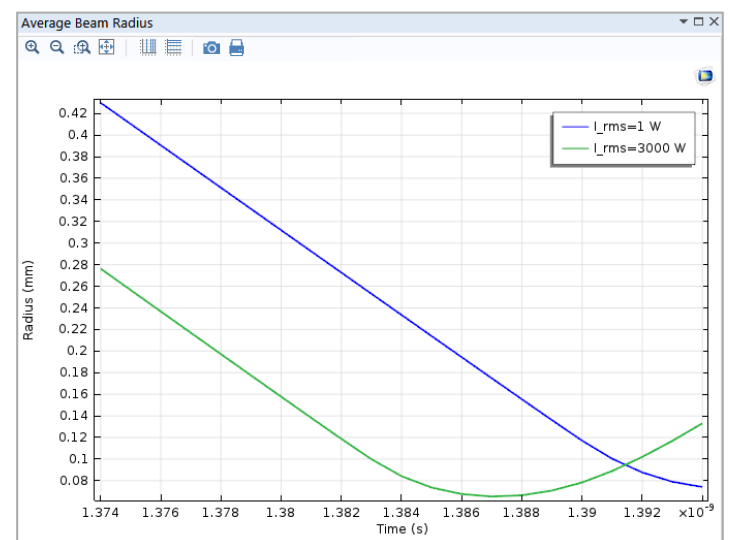
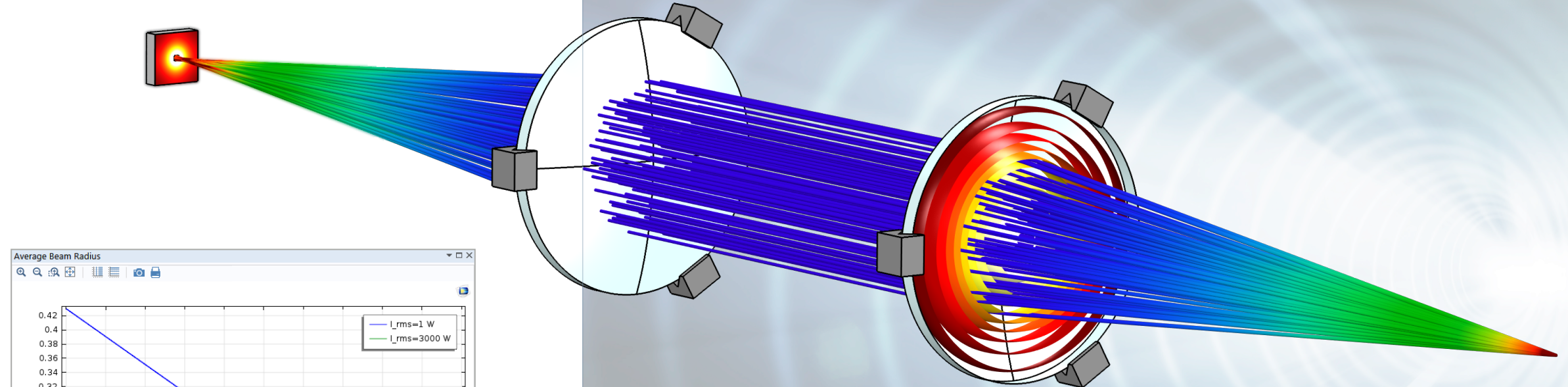
- Поглощающие среды
- Антибликовые покрытия
- Фотокамеры
- Визуализация каустических поверхностей
- Поправки для сильно поглощающих сред
- Диэлектрические пленки
- Дифракционные решетки
- Интерферометры
- Расчет интенсивности
- Рассеянное и зеркальное отражение
- Лазеры
- Системы линз
- Монохроматоры
- Матрицы Мюллера
- Расчет длины оптического пути
- Поляризаторы и ослабители излучения
- Сложный свет
- Построение хода лучей в дифференцированных средах
- Самосогласованное моделирование нагрева лучами
- Аккумуляция солнечной энергии
- Точечные диаграммы
- Параметры Стокса
- Тепловое линзирование
- Неполаризованное и частично когерентное излучение

**Модуль Геометрическая оптика**

Модуль позволяет моделировать распространение электромагнитных волн в системах, самые малые геометрические компоненты которых значительно превышают по размеру длину световой волны. Электромагнитные волны определяются как лучи, способные проходить сквозь однородные и дифференцированные среды. Можно рассчитывать траектории лучей на большие расстояния, при этом затраты на вычисления будут низкими, поскольку не нужно выражать длину волны с помощью конечно-элементной сетки.

На границах различных сред лучи могут отражаться и преломляться. Модуль содержит множество граничных условий, включая сочетания зеркального и рассеянного отражения. Луч может брать свое начало в областях, на границах или на регулярной сетке точек. Доступны особые функции для моделирования солнечного излучения, а также лучей, отраженных от освещенной поверхности или преломленных ей.

Специализированные средства постобработки поддерживают множество способов анализа траектории лучей, оценки выражений на множестве лучей и даже визуализации интерференционных картин. Модуль содержит множество настроек специализированных интерфейсов физик, включая необязательные переменные для расчета интенсивности лучей через параметры Стокса. С их помощью можно моделировать поляризованное, частично когерентное и непolarизованное излучение.

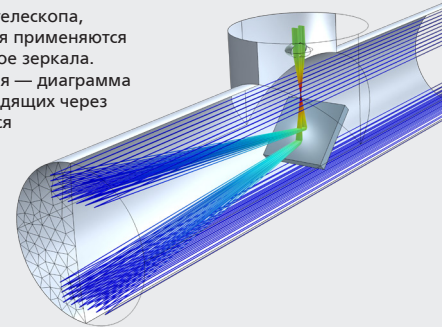


**ТЕРМОИНДУЦИРОВАННОЕ СМЕЩЕНИЕ ФОКАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ**

Модель промышленного лазера высокой мощности на основе оптоволокна. Пользователь имеет возможность анализировать нагрев линзы, который приводит к деформации линзы и изменению индекса преломления материала и, как следствие, к отклонению солнечных лучей.

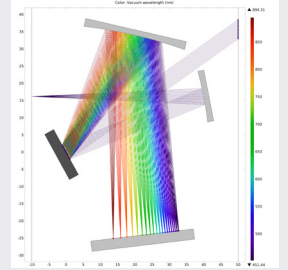
**НЬЮТОНОВСКИЙ ТЕЛЕСКОП**

Модель ньютоновского телескопа, в котором для отражения применяются параболическое и плоское зеркала. Результат моделирования — диаграмма траектории лучей, проходящих через телескоп и отражающихся в фокальную плоскость.



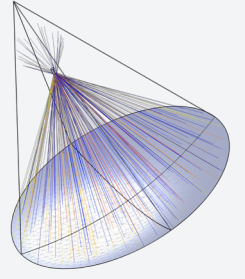
**МОНОХРОМАТОР ЧЕРНИ-ТЕРНЕРА**

Монохроматор Черни-Тернера разделяет полихроматический свет на монохроматические лучи. Результаты моделирования показывают траектории и длины волн оптического сигнала.



**СОЛНЕЧНАЯ ТАРЕЛКА**

Параболическая солнечная тарелка улавливает излучение Солнца и преобразует его в электрическую энергию. Результат моделирования — диаграмма траектории солнечных лучей, отражающихся от тарелки и сходящихся на приемнике.

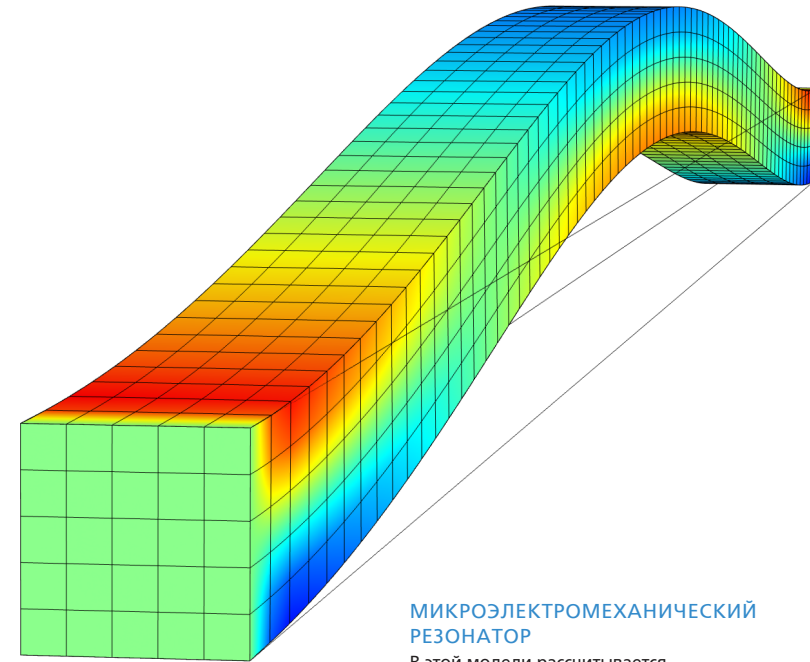




## Модуль MEMS

Разработка и моделирование микроэлектромеханических систем — уникальная техническая дисциплина. При проектировании миниатюрных датчиков и приводов необходимо учитывать физические явления различных типов. Модуль MEMS предлагает средства решения этих задач — методы учета электромагнитных, тепловых и жидкостных взаимодействий в структурах. Кроме того, он позволяет моделировать множества явлений затухания: затухание в тонких слоях газа, анизотропные потери в твердых материалах и пьезоматериалах, термоэластическое затухание и затухание в узлах крепления. Идеально согласованные слои — современный способ гашения эластических вибраций и волн.

Лучшие в своем классе средства моделирования пьезоэлектрических и пьезорезистивных явлений позволяют создавать модели с любыми сочетаниями композитных пьезоэластических диэлектриков. Кроме того, с их помощью можно анализировать стационарные и временные домены, анализировать связанные собственные частоты, параметры, квазистатической и частотной отклик. Получить параметры, характеризующие емкость, электрический импеданс и комплексную проводимость сложных систем так же просто, как подключить модель к электрической цепи. Цепи можно создавать вручную, с помощью интерфейса Electrical Circuit (Электрические цепи), или импортировать непосредственно из списка SPICE. Модуль расширяет базовые возможности COMSOL Multiphysics, позволяя учесть практически любое явление механики, проявляющееся в микромасштабах.

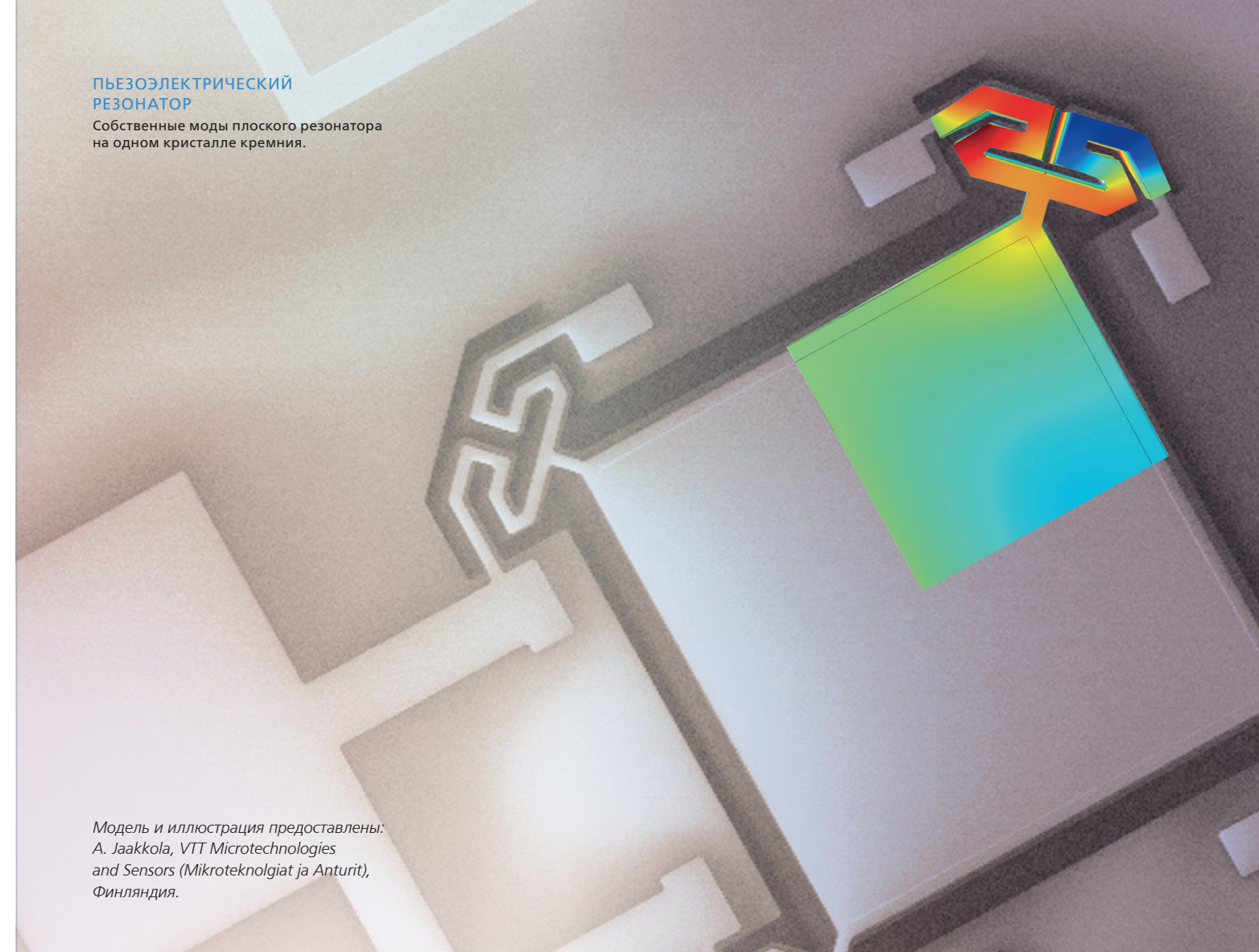


### МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ РЕЗОНАТОР

В этой модели рассчитывается термоэластическое затухание, возникающее при циклическом нагружении материала. Результаты моделирования показывают форму моды и соответствующее распределение температур в луче при работе резонатора на собственной частоте (63,3 кГц). Рассчитанный показатель качества составляет 10700.

### ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАТОР

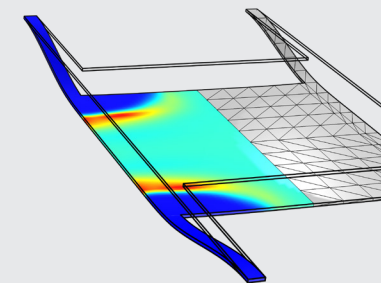
Собственные моды плоского резонатора на одном кристалле кремния.



Модель и иллюстрация предоставлены: A. Jaakkola, VTT Microtechnologies and Sensors (Mikroteknolgiat ja Anturit), Финляндия.

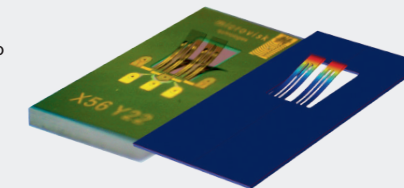
### АНАЛИЗ АКТИВАЦИИ РЧ МЭМС ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ

Модель тонкого микроэлектромеханического моста через диэлектрический слой. Результат моделирования показывает контактную силу и смещение при активации устройства.



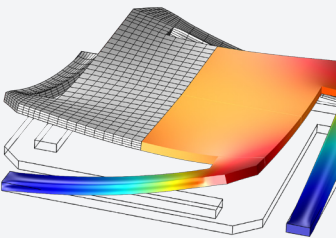
### РЕЛЕ И ДАТЧИКИ

Температурное реле с двумя переключателями активируется путем теплового расширения. Для конечной деформированной формы рассчитан профиль температур. По отклонению микроскопических кантилеверов измеряется относительная вискоэластичность, меняющаяся по мере сгущения крови.



### ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННОЕ МИКРОЗЕРКАЛО

Управление активацией этого предварительно напряженного плоского микрозеркала осуществляется электростатическим способом. Результаты параметрического исследования отражают влияние предварительного напряжения на смещение.



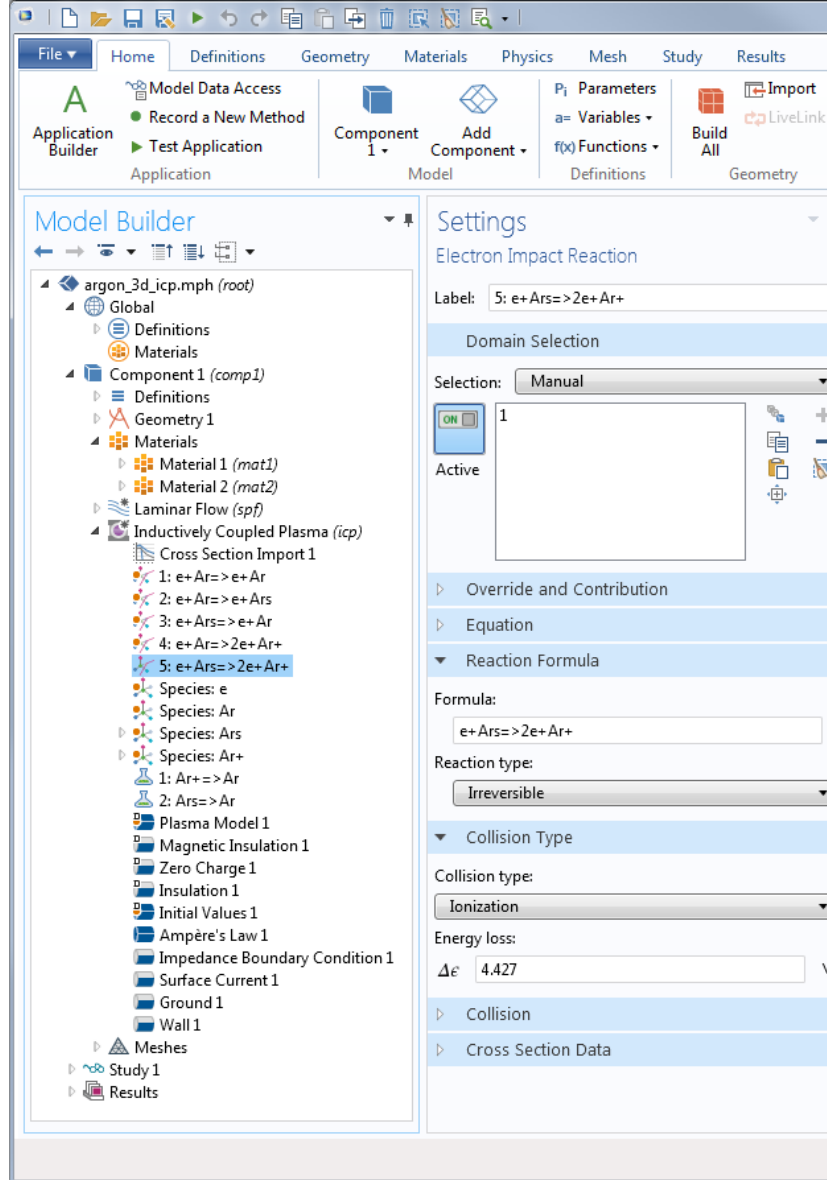
## КЛЮЧЕВЫЕ ОСОБЕННОСТИ

- Акселерометры
- Приводы
- Затухание в точках крепления
- Резонаторы на объемных акустических волнах
- Консольные балки
- Взаимодействие конструкции с текучей средой (FSI)
- Коэффициенты потерь
- Микроэлектромеханические конденсаторы
- Микроэлектромеханические гироскопы
- Микроэлектромеханические резонаторы
- Микроэлектромеханические тепловые устройства
- Пьезоэлектрические устройства
- Пьезорезистивные устройства
- Радиочастотные микроэлектромеханические устройства
- Датчики
- Структурные контакты и трение
- Резонаторы на плоских акустических волнах
- Термоэластическое затухание
- Затухание в тонких слоях газа

## Модуль Плазма

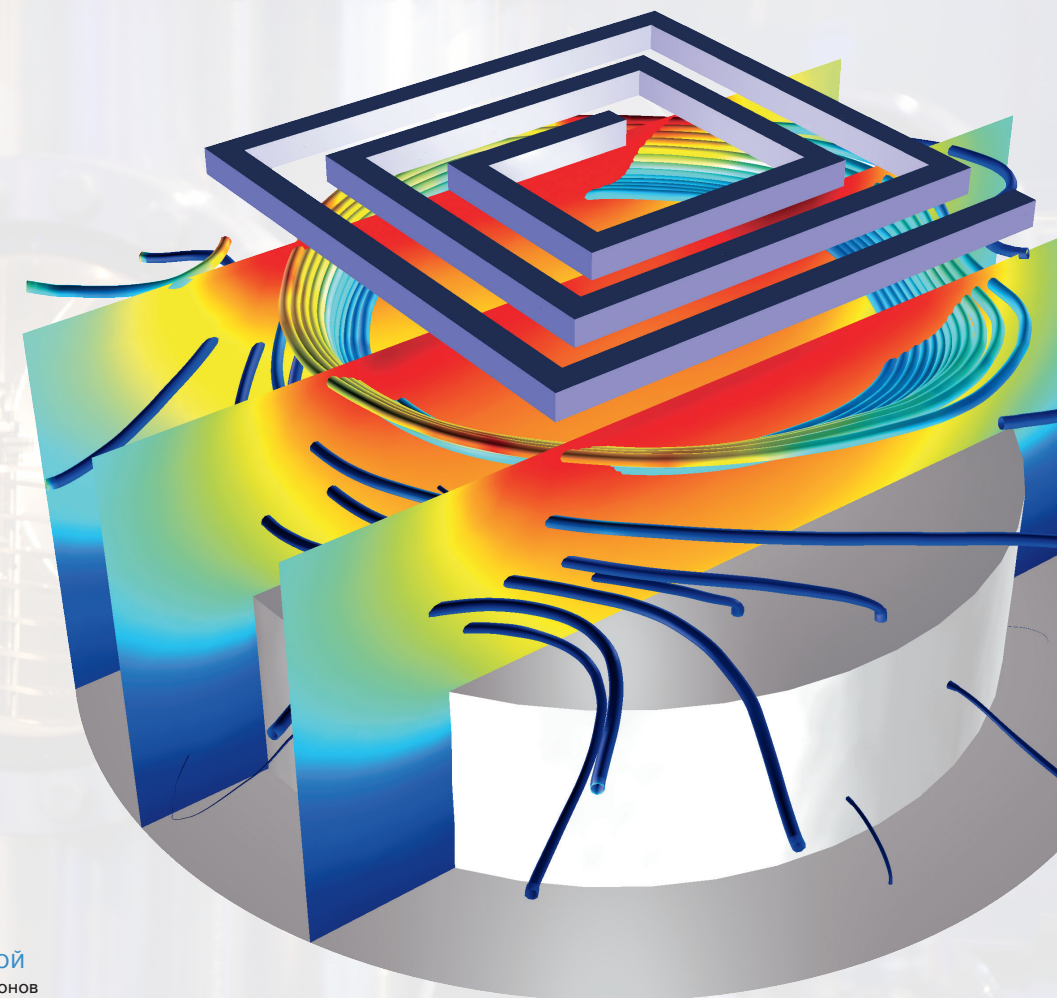
При моделировании низкотемпературной плазмы важно учитывать механику текучих сред, особенности реакций, физическую кинетику, теплопередачу, перенос массы и электромагнитные явления. Модуль Плазма — специализированное средство моделирования равновесных и неравновесных разрядов, влияние которых важно учитывать во множестве технических дисциплин. Он содержит специализированные интерфейсы для моделирования наиболее распространенных плазменных реакторов, в числе которых индуктивно связанная плазма (ИСП), разряды при подаче напряжения постоянного тока, тепловые разряды (микроволновая плазма) и емкостно связанная плазма (ЕСП).

Моделирование взаимодействия плазмы и внешней цепи очень важно для понимания характеристик разряда в целом. Модуль Плазма позволяет добавлять элементы цепи напрямую или импортировать их в модель из существующего списка SPICE. Химия плазмы задается путем загрузки наборов сечений столкновения из файла или добавлением реакций и видов через Model Builder. Интерфейс физик автоматически учитывает сложную взаимосвязь различных физических явлений, наблюдаемую в плазме. Модуль предназначен для исследователей, инженеров и экспериментаторов, работа которых связана с физикой плазмы.



### 3D-МОДЕЛЬ РЕАКТОРА С ИНДУКТИВНО СВЯЗАННОЙ ПЛАЗМОЙ

На графике показана средняя энергия электронов (сечения) и текущая плотность электронов (линии потока) в реакторе с индуктивно связанной плазмой.



## КЛЮЧЕВЫЕ ОСОБЕННОСТИ

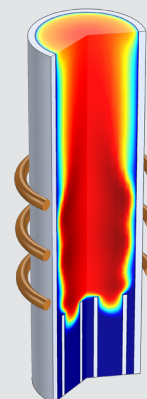
- Емкостно связанная плазма (ЕСП)
- Газофазное осаждение, в т. ч. плазмохимическое
- Разряды постоянного тока
- Диэлектрические барьерные разряды
- Циклотронные резонансные источники
- Вытравливание
- Разложение взрывоопасных газов
- Источники ИСП\*
- Индуктивно связанная плазма (ИСП)\*\*
- Ионные источники
- Обработка материалов
- Микроволновая плазма\*\*
- Генерирование озона
- Химия плазмы
- Плазменные дисплеи
- Источники плазмы
- Системы питания
- Обработка полупроводниковых материалов
- Двигатели

\* В сочетании с модулем AC/DC

\*\* В сочетании с модулем Радиочастоты

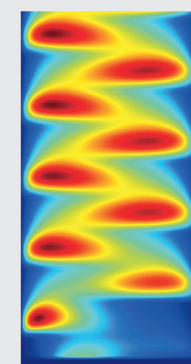
### ФАКЕЛ ИНДУКТИВНО СВЯЗАННОЙ ПЛАЗМЫ

Модель факела индуктивно-связанной плазмы в условиях атмосферного давления. В результате моделирования были определены электрические и тепловые параметры факела.



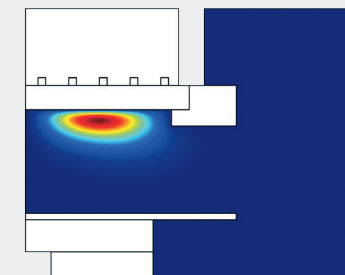
### ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ БАРЬЕРНЫЙ РАЗРЯД

Возбужденные атомы аргона могут спонтанно переходить в основное состояние, испуская фотон ультрафиолетового диапазона. На графике справа показана концентрация возбужденных атомов аргона при диэлектрическом барьерном разряде.



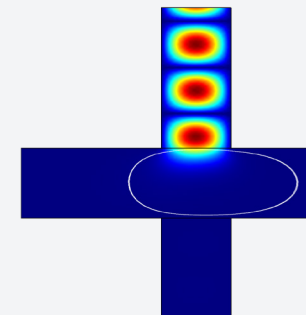
### ИНДУКТИВНО-СВЯЗАННАЯ ПЛАЗМА

На графике показано распределение мощности в ИСП-реакторе GEC на основе аргона. Из-за спин-эффекта распределение ориентировано по направлению к верхней части реактора.



### РАЗРЯД ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОПЕРЕЧНОЙ МОДЫ

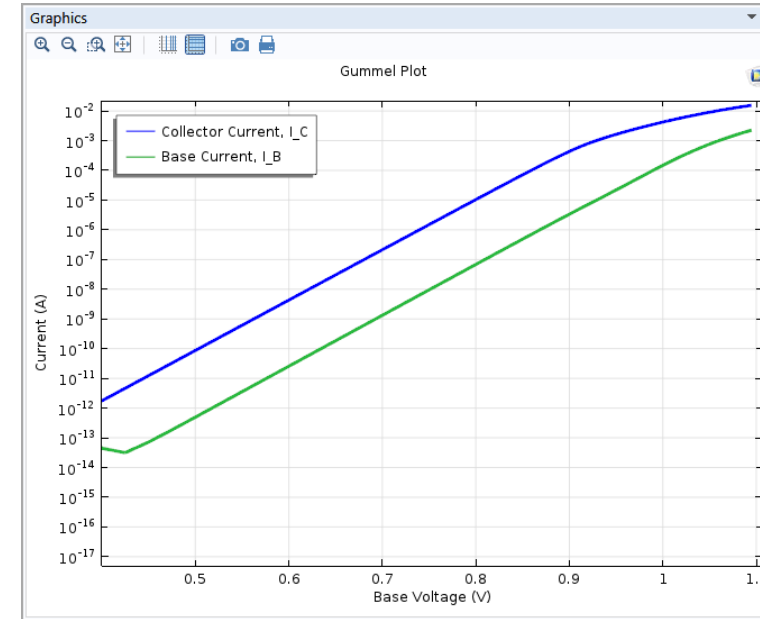
Цвет поверхности отражает величину высокочастотного электрического поля, распространяющегося по волноводному тракту в плазму. Контур показывает области, в которых плотность электронов равна критической плотности плазмы.



## Модуль Полупроводники

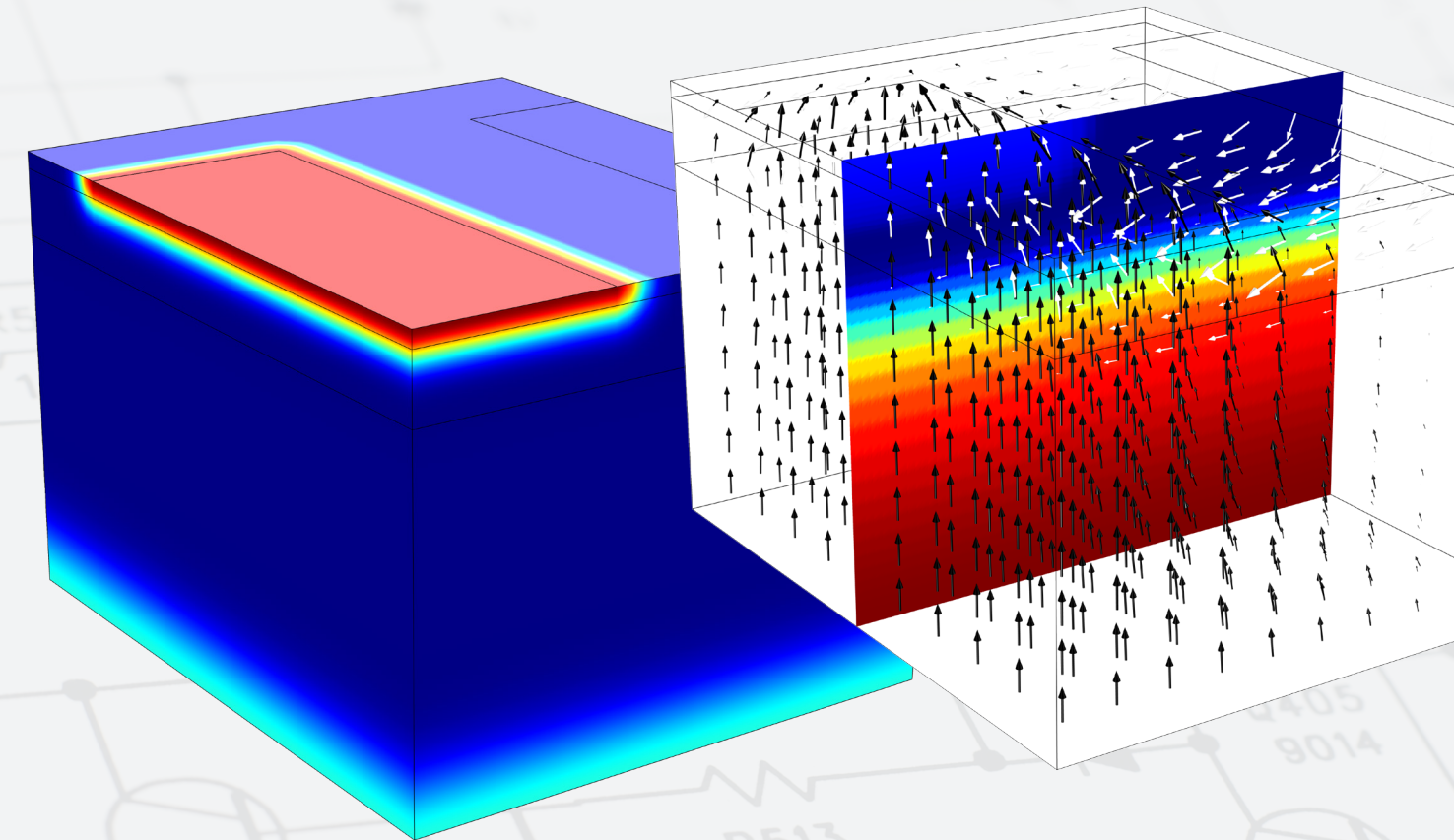
Модуль позволяет подробно анализировать работу полупроводниковых устройств на базовом физическом уровне. В его основе лежат уравнения смещения диффузии, а также изотермические и неизотермические модели переноса. Простой и мощный интерфейс позволяет с легкостью настраивать профили распределения примесей, физические параметры и граничные условия.

Модуль поддерживает модели полупроводниковых и изолирующих материалов, детальное моделирование ловушек в доменах, а также множество механизмов рекомбинации. Продукт содержит несколько моделей мобильности. Готовые модели можно объединять друг с другом, а также с пользовательскими моделями мобильности. Оптическими переходами управляет функция, которую можно использовать совместно с оптическим моделированием распространяющейся электромагнитной волны или же отдельно. Модуль позволяет моделировать такие явления, как электролюминесценция, поглощение света, спонтанное и вынужденное излучение, фотогенерация носителей. Он поддерживает моделирование широкого спектра граничных условий: для затворов металлических контактов (с барьерами Шоттки и гальваническими), ловушек на поверхности и туннелирования по Фаулеру-Нордхайму.



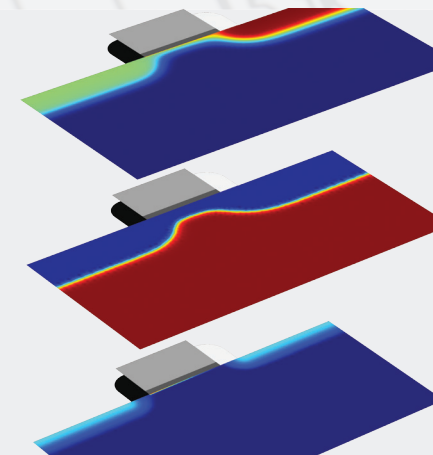
### 3D-АНАЛИЗ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

Моделируется работа устройства в режиме с общим эмиттером. На иллюстрации показано: график числа Гуммеля, общая концентрация примеси и текущая плотность при токе базы 2 мА и напряжении коллектор-эмиттер 1,5 В.



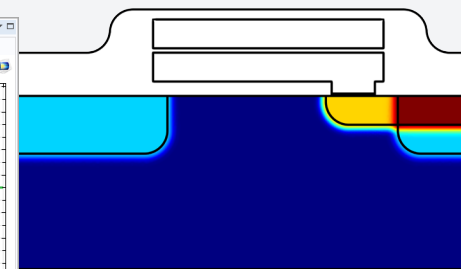
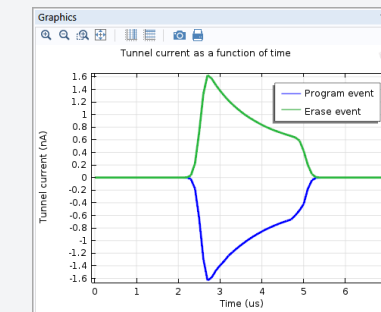
### РАЗРАБОТКА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ УСТРОЙСТВ

2D-модель МОП-транзистора. Результаты моделирования показывают работу транзистора, когда приложенное напряжение затвора включает устройство. Затем определяется ток насыщения. Сверху вниз: электрический потенциал, плотность дырок, плотность электронов.



### ПРОГРАММИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВА EEPROM С ПЛАВАЮЩИМ ЗАТВОРОМ

Модель рассчитывает характеристики тока и заряда электрически перепрограммируемого ПЗУ с плавающим затвором. Показана зависимость туннельного тока от времени в ходе операций записи и стирания.



## КЛЮЧЕВЫЕ ОСОБЕННОСТИ

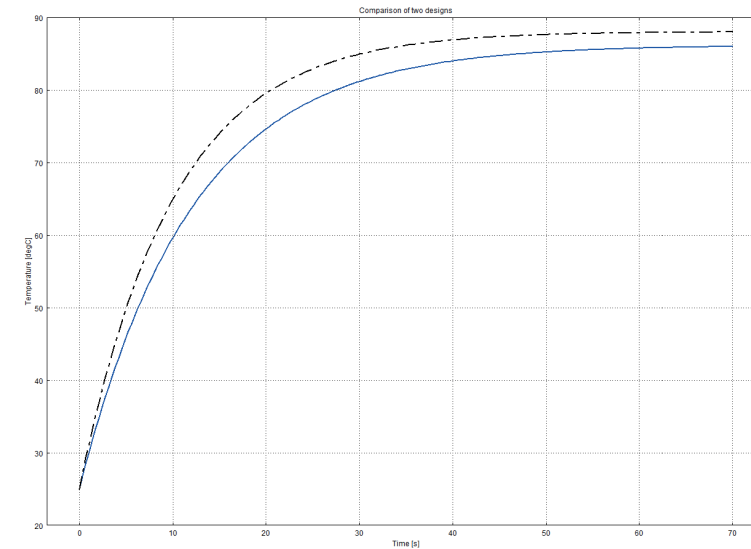
- Биполярные транзисторы
- Объемные лазеры
- Схемы EEPROM
- Светодиоды
- МОП-транзисторы
- Полевые транзисторы с барьером Шоттки
- Полупроводниковые диоды
- P-N-переходы
- Диоды Шоттки
- Фотоэлементы
- Поверхностные и объемные ловушки
- Тиристоры

## Модуль Теплопередача

При разработке практически любого процесса или изделия необходимо учитывать тепловые эффекты. Модуль Теплопередача позволяет моделировать теплопередачу через кондуктивный и конвективный теплообмен, а также излучение. Эти явления можно моделировать совместно с другими физическими явлениями.

Модуль содержит интерфейсы физик, позволяющие изучать свободную и вынужденную конвекцию, моделировать процессы и фазовые переходы, исследовать лучевую теплопередачу в прозрачных и частично прозрачных средах, а также оценивать взаимное влияние этих эффектов. Кроме того, с его помощью можно описывать эффекты конвекции и излучения, контактное сопротивление и теплопередачу в тонких структурах (оболочках, пленках, трещинах и стержнях). Пользователи могут создавать модели любой сложности с полным учетом всех факторов. Также доступны специальные функции для специалистов, исследующих нагрев биологических тканей.

Поскольку все свойства материалов зависят от температуры, тепловая модель может стать важным дополнением любой физической модели. Кроме того, COMSOL позволяет добавлять в тепловую модель источники любой другой природы.



### ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ДАТЧИК

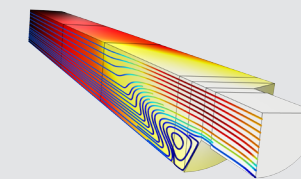
Вверху: график зависимости температуры от времени отклика для двух конструкций крышки датчика. Справа: фотография и график распределения температуры по результатам моделирования в датчике температуры и на чувствительном элементе внутри крышки. Также показан рентгеновский снимок устройства.



Модель предоставлена: Martin Šiš, корпорация Continental, Френштат, Чехия.

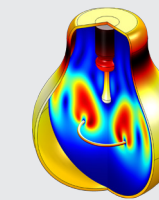
## КЛЮЧЕВЫЕ ОСОБЕННОСТИ

- Анизотропная теплопередача в композитных структурах
- Нагрев биологических материалов и некроз тканей
- Литье и термообработка
- Сопряженная теплопередача
- Дисковые тормозы
- Сушка, в т. ч. замораживанием
- Обработка пищевых продуктов и стерилизация
- Сварка трением с перемешиванием
- Разработка котлов и форсунок
- Тепло- и влагоперенос
- Радиаторы отопителей и охлаждающие ребра
- Теплопередача в пористых средах
- Сварка и нагрев лазером
- Термическая обработка материалов
- Силовая электроника и электронное охлаждение
- Теплопередача излучением
- Резистивный и индукционный нагрев
- Термоконтакты и трение
- Тепловые характеристики конструкций
- Термоэлектрический эффект



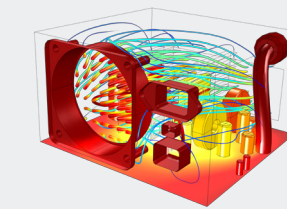
### НЕПРЕРЫВНОЕ ЛИТЬЕ

Моделирование процессов теплопередачи и потоков между жидкой и твердой фазой в ходе непрерывного литья, включая фазовый переход от расплавленного состояния к твердому.



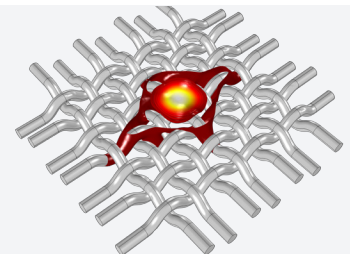
### ЛАМПА НАКАЛИВАНИЯ

Распределение температур в результате естественной конвекции в лампе накаливания.



### ОХЛАЖДЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ

Моделирование тепловых характеристик блока питания компьютера в закрытом корпусе.



### УГЛЕРОДНОЕ ВОЛОКНО

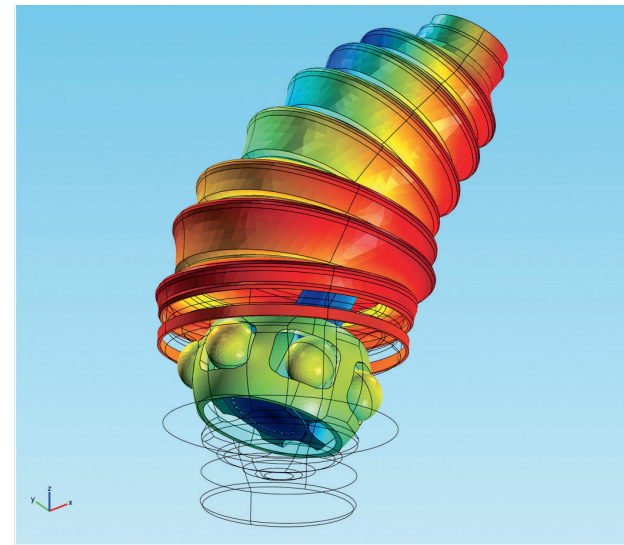
Анализ теплопередачи в анизотропных для тепла углеродных волокнах.

## Модуль Механика конструкций

Модуль предназначен для анализа компонентов и подсистем, для которых необходимо оценить деформацию под нагрузкой. Он содержит средства моделирования листов, каркасов, мембран, балок и ферм.

Модуль позволяет выполнять множество различных типов анализа: стационарный, с зависимостью от времени, квазистатический, анализ частотных характеристик, собственных мод и продольных изгибов. С помощью его интерфейсов можно анализировать масштабные деформации с геометрической нелинейностью и механическими контактами. Доступны готовые мультифизические взаимодействия для учета теплопередачи, акустических, гидродинамических и электростатических эффектов. Это позволяет с легкостью создавать системы, где имеются пьезоэлектрические материалы, наблюдается взаимодействие конструкции с текучей средой и температурные деформации.

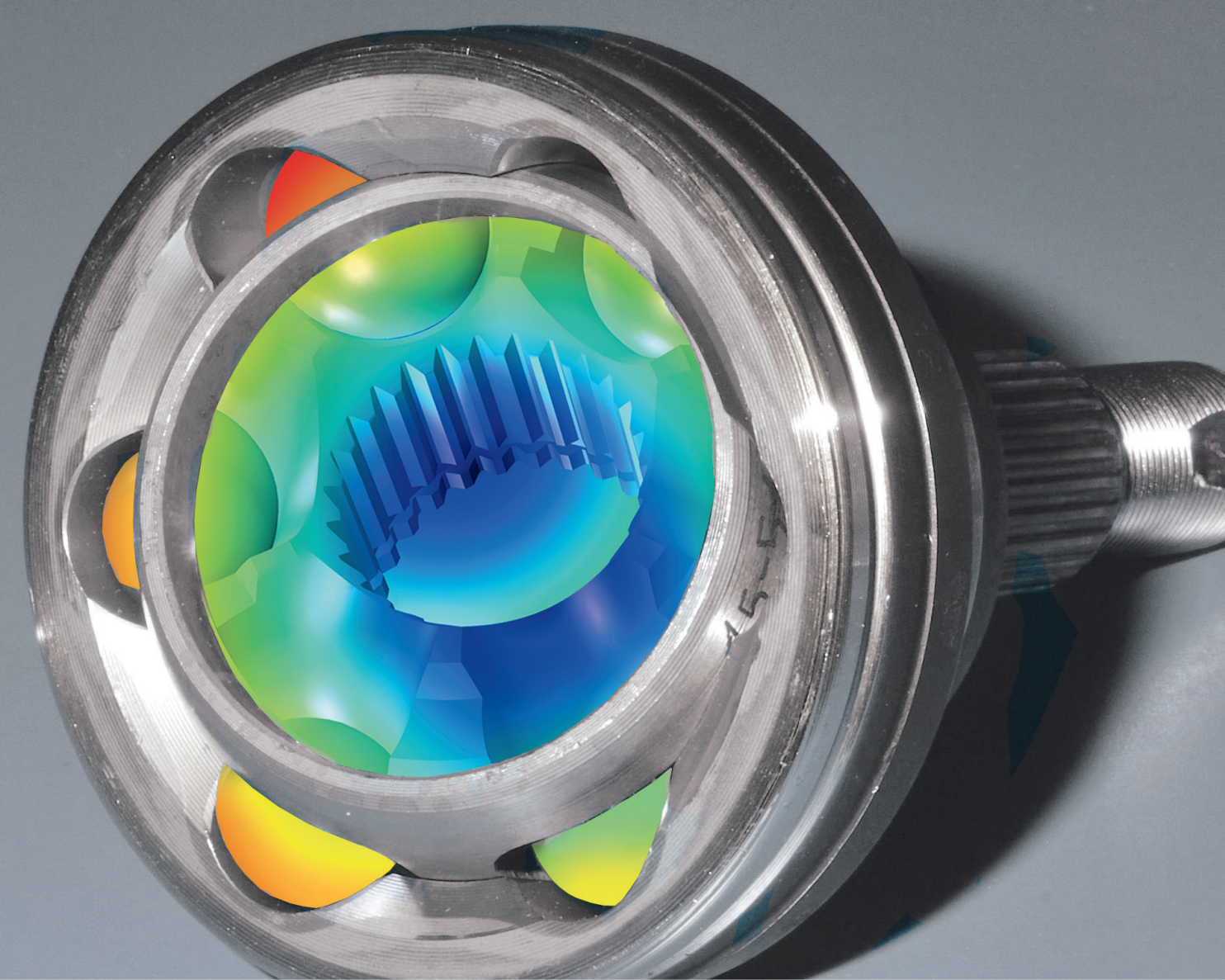
Для модуля Structural Mechanics (Механика конструкций) доступно четыре дополнительных модуля: Nonlinear Structural Materials (Нелинейные конструкционные материалы), Geomechanics (Геомеханика), Fatigue (Усталость) и Multibody Dynamics (Динамика многих тел). Модуль механики конструкций взаимодействует с COMSOL Multiphysics и другими специализированными модулями, давая возможность применять анализ конструкций к мультифизическим явлениям.



### ШАРНИР ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ПОСТОЯННОЙ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ

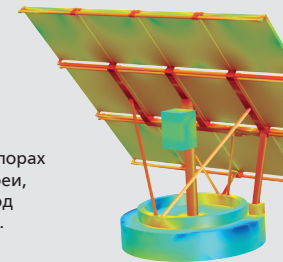
Показаны напряжения по Мизесу и деформации в подшипниках, корпусе и резиновой прокладке шарнира для передачи постоянной частоты вращения.

Модель предоставлена: Fabio Gatelli, Metelli S.p.A., Колонья, Италия.



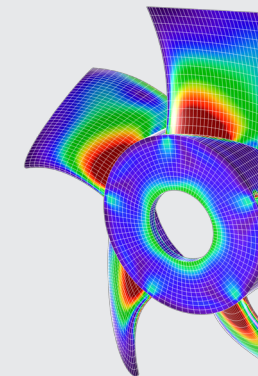
### ПАНЕЛЬ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ

Напряжения в опорах солнечной батареи, возникающие под действием ветра.



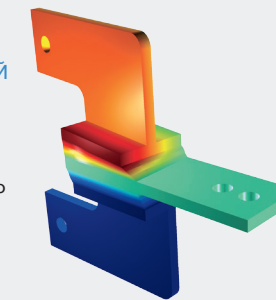
### БЛОК ВЕНТИЛЯТОРОВ

Анализ колебаний в блоке вентиляторов с применением нестандартных сеток с подвешенными узлами. Во всех доменах применяются сетки с селективным, сочетающие шестиугольные и треугольные ячейки.



### АМОРТИЗИРУЮЩИЙ ЭЛЕМЕНТ

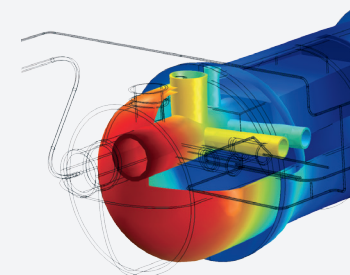
Анализ конструкции вязкоэластичного амортизирующего элемента, применяемого для стабилизации высотных зданий. Смещение показано цветом и деформацией формы.



### ОТБОЙНИК

Деформации отбойника, применяемого в нефтепереработке.

Модель предоставлена: Stig Sandström, SSM Engineering, Швеция.



## КЛЮЧЕВЫЕ ОСОБЕННОСТИ

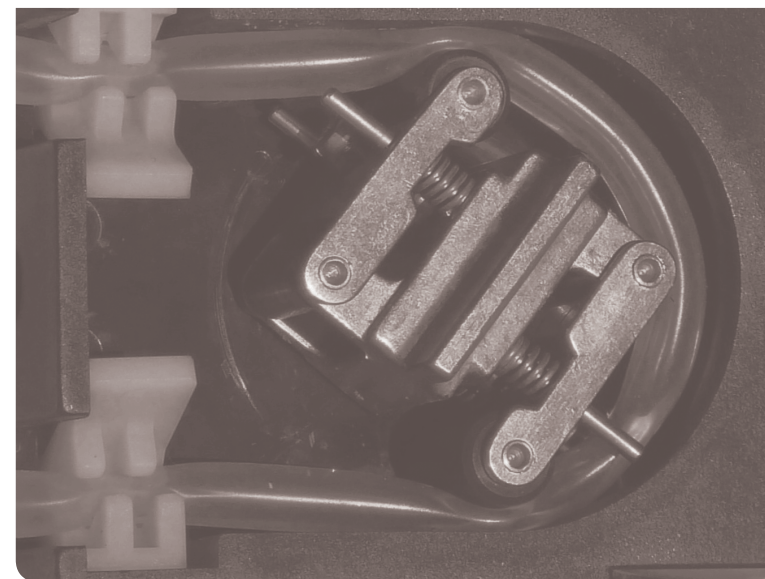
- Предварительное натяжение осей
- Продольный прогиб и поведение после потери устойчивости
- Встроенные соединения объемов конструкции, каркасов и балок
- Центробежные силы, силы Кориолиса и Эйлера
- Соприкосновение и трение
- Динамический анализ предварительно напряженных конструкций
- Упругие волны
- Балки Эйлера и Тимошенко
- Взаимодействие конструкции с текучей средой (FSI)
- Геометрическая нелинейность
- Гигроскопическое вздутие
- Элементы бесконечной длины, идеально согласованные слои (PML) и слабоотражающие границы
- Большие деформации
- Смазка и эластогидродинамика\*
- Метод нормальных волн
- Периодические граничные условия
- Пьезоэлектрические устройства
- Жесткие области
- Пружины и поглотители колебаний
- Фотоупругость
- Структурные контакты и трение
- Вибрации конструкций
- Тепловое напряжение
- Вязкоэластичность
- Провода и кабели

\* В сочетании с модулем Вычислительная гидродинамика

## Модуль Нелинейные конструкционные материалы

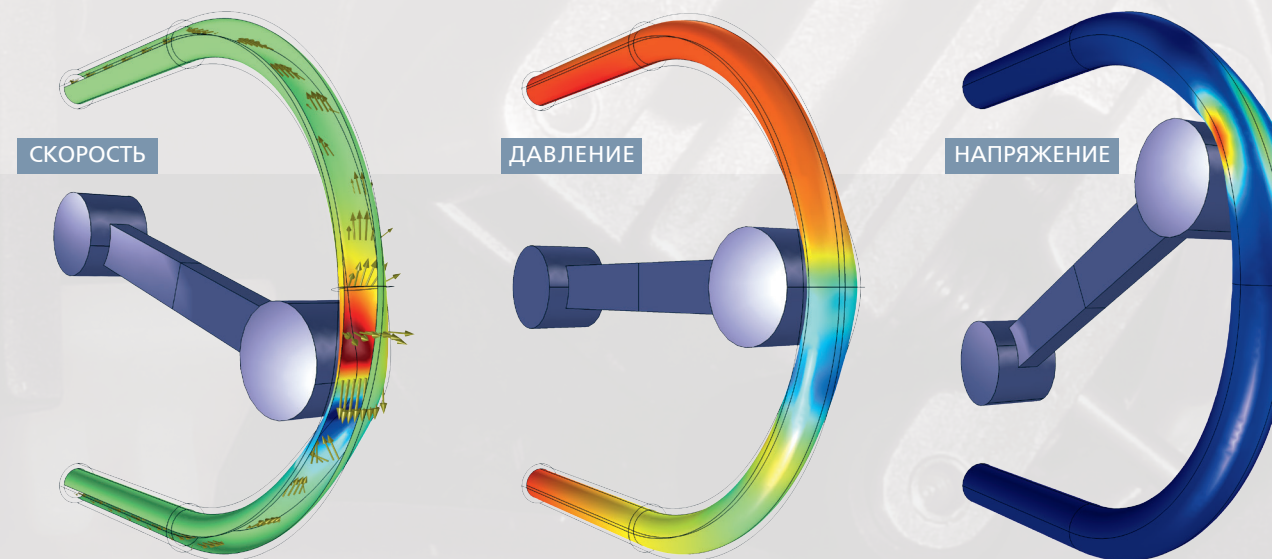
Модуль Нелинейные конструкционные материалы расширяет возможности модулей Механика конструкций и MEMS нелинейными моделями материалов. При большой механической нагрузке конструкции нельзя применять линейные модели ввиду нелинейности определенных свойств материалов. То же самое происходит при определенных условиях работы, например, при высоких температурах.

Модуль содержит модели эластопластических, вязкопластических, долговременно нагруженных, нелинейных эластичных и гиперупругих материалов, позволяет моделировать деформации пластика при больших нагрузках и учитывать нелинейность эластичных материалов. С помощью пользовательского интерфейса можно с легкостью создавать модели материалов, основанные на инвариантах деформации, законах течения и ползучести на базе встроенных материальных уравнений. Модели материалов можно сочетать, чтобы учитывать мультифизические эффекты. Этот подход иллюстрируется учебными моделями, учитывающими эффекты ползучести и эластопластичности, ползучести при тепловом воздействии и вязкопластичности.



### ПЕРЕКАЧКА

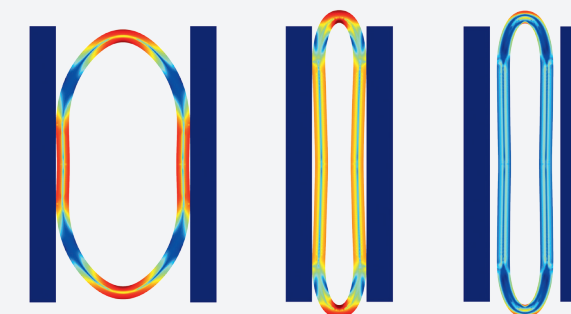
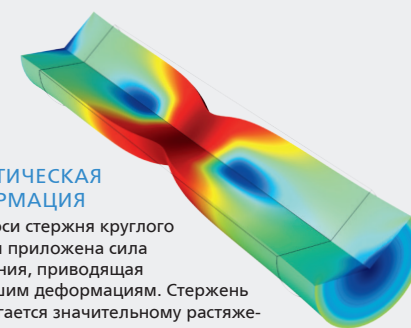
В этой модели шлангового насоса рассматривается взаимодействие жидкости и конструкции, возникающие при зажиме валом стенки шланга, а также возникающее давление потока жидкости в шланге. Модель учитывает масштабные деформации, контактные и гиперэластические взаимодействия материала шланга с применением модели Арруда-Бойс для материала. На иллюстрации показаны напряжения по Мизесу, давление жидкости, направление и модуль скорости в три момента времени.



Моделированные изображения предоставлены: Nagi Elabbasi, компания Veryst Engineering, Нидхем, США. Подробное описание: [comsol.com/papers/11574](http://comsol.com/papers/11574). Автор фотографии шлангового насоса: Andy Dingley.

### ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ

Вдоль оси стержня круглого сечения приложена сила натяжения, приводящая к большим деформациям. Стержень подвергается значительному растяжению и сужается в поперечном сечении.



### ОБЖАТИЕ

Модель демонстрирует напряжения по Мизесу, возникающие при уплотнении трубы. Для данной модели материала в ходе нагружения возникают значительные эластопластические деформации.

## КЛЮЧЕВЫЕ ОСОБЕННОСТИ

- Вязкопластичность по Ананду
- Биомеханика
- Модели ползучести материалов
  - Модель Кобла (Coble)
  - Девиаторная
  - Модель Гарофало (Garofalo)
  - Модель Набарро-Херринг (Nabarro-Herring)
  - Модель Нортон (Norton)
  - Модель Нортон-Бейли (Norton-Bailey)
- Эластомеры
- Эластопластичность
- Модели гиперупругих материалов
  - Модель Арруда-Бойс (Arruda-Boyce)
  - Модель Блатц-Ко (Blatz-Ko)
  - Модель Гао (Gao)
  - Модель Гента (Gent)
  - Модель Муни-Ривлина (Mooney-Rivlin)
  - Модель Мурнагхана (Murnaghan)
  - Модель Венант-Киркхофф (Venant-Kirchhoff)
  - Модель Сторакерса (Storakers)
  - Модель Варга (Varga)
  - Модель Йео (Yeoh)
- Законы изотропного, кинематического и идеально пластического упрочнения
- Пластичность при больших деформациях и нагрузках
- Нелинейные модели упругости
  - Билинейная упругость
  - На основе данных вдоль оси
  - Модель Рамберга-Осгуда (Ramberg-Osgood)
  - Степенная зависимость
- Полимеры
- Резина
- Пластичность, зависящая от температуры
- Пластичность по Треска, Мизесу и ортотропная пластичность по Хиллу
- Определяемые пользователем ползучесть, гиперэластичность, нелинейная эластичность и пластичность

## Модуль Геомеханика

Модуль Геомеханика — специализированное дополнение модуля Механика конструкций, предназначенное для моделирования геотехнических систем: туннелей, раскопов, устойчивости склонов и подпорных сооружений. Он содержит специализированные модели материалов для анализа деформации, ползучести, пластичности, оседания почв и каменных пород, а также их взаимодействия с бетоном и искусственными структурами. Доступно множество моделей материалов для почв: Cam-Clay, Drucker-Prager, Mohr-Coulomb, Matsuoka-Nakai и Lade-Duncan. Модуль содержит и другие модели эластичных материалов, например, модель Рамберга-Осгуда (Ramberg-Osgood), а также модели на основе гиперболической зависимости: модель Дункана-Ченга (Duncan-Chang), Дункана-Селига (Duncan-Selig) и Хардина-Дрневича (Hardin-Drnevich).

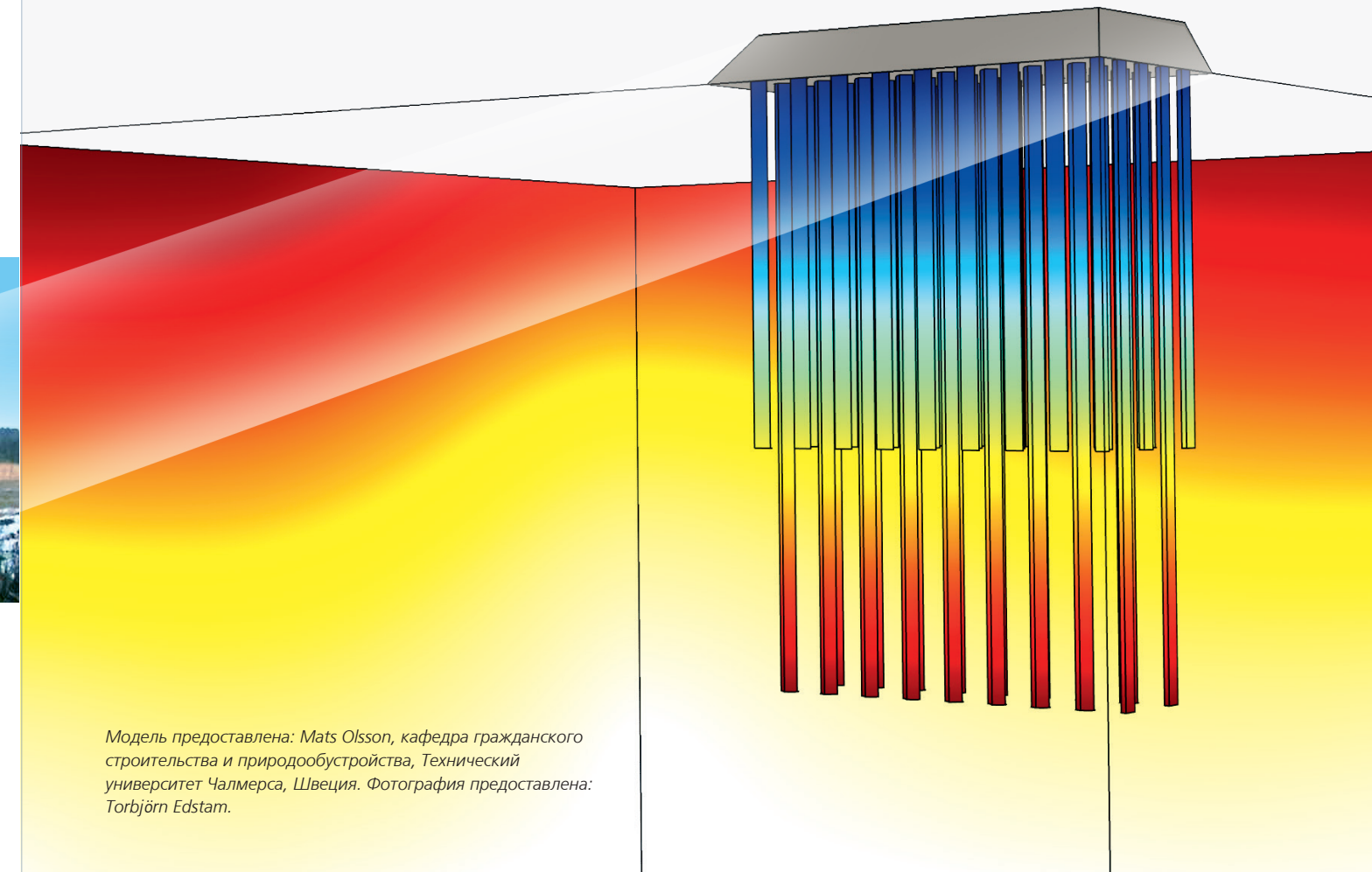
Пользователи могут расширять встроенные модели пластичности собственными функциями текучести, которые легко добавлять с помощью универсального интерфейса COMSOL Multiphysics. Определения материалов можно дополнить зависимостями вычисляемого поля температур и другими полевыми характеристиками.

Модуль включает и другие мощные средства моделирования бетона и скальных пород. Доступны модели Вильяма-Варнке (William-Warnke), Бреслера-Пистера (Bresler-Pister), Оттосена (Ottosen) и Хоека-Брауна (Hoek-Brown). Их можно дополнить и расширить для применения к более широкому классу хрупких материалов. В модуль Геомеханика можно с легкостью добавлять результаты анализа из других модулей, например, результаты анализа потоков в пористых средах, пороупругости и переноса из модуля Течения в пористых средах.



### УСАДКА ДАМБ

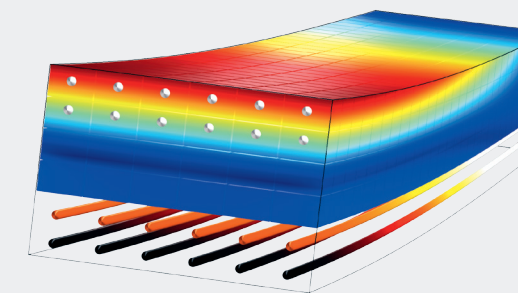
Долгосрочная усадка глиняных формаций — сложная проблема во многих областях, например, в строительстве и проектировании дорог и железнодорожных путей, в которых применяются опоры из известкового вяжущего материала. Чтобы оценить множество параметров, в числе которых деформационные свойства опор и прилегающей глины, была создана экспериментальная площадка. Модель показывает вертикальные напряжения опор и смещение окружающей среды (график ограничивающей поверхности на фоне).



Модель предоставлена: Mats Olsson, кафедра гражданского строительства и природообустройства, Технический университет Чалмерса, Швеция. Фотография предоставлена: Torbjörn Edstam.

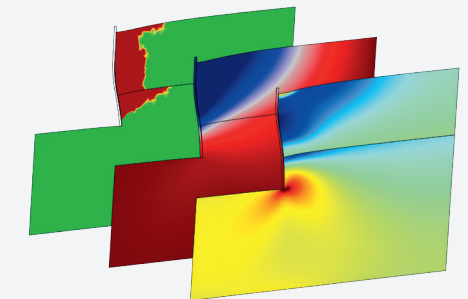
### СТРОИТЕЛЬНЫЕ РАБОТЫ

Модель демонстрирует передачу сил от бетонной балки к стальной арматуре при разрыве в результате растяжения. Показаны напряжения по Мизесу в бетоне и осевые напряжения в арматуре.



### РАСКОПКИ

Модель раскопок почвы позволяет рассчитать горизонтальные напряжения, деформацию и области пластичности. Расчеты проводились на основе модели почвы Дрюкера-Прейджера (Drucker-Prager).



## КЛЮЧЕВЫЕ ОСОБЕННОСТИ

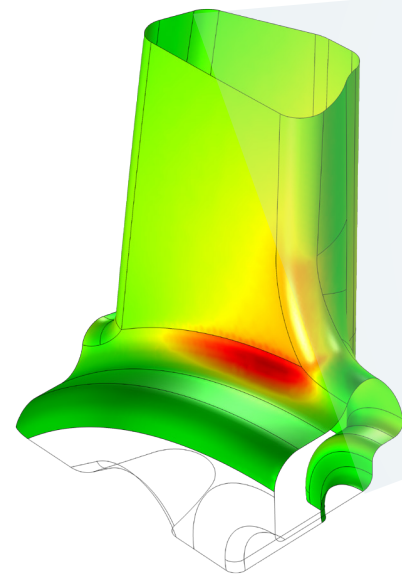
- Модели бетона по Бреслеру-Пистеру (Bresler-Pister) и Оттосену (Ottosen)
- Составляющие бетона и хрупкие материалы
- Ползучесть
- Модели почвы по Дрюкеру-Прейджеру (Drucker-Prager) и Мору-Кулону (Mohr-Coulomb)
- Вязкие материалы и насыщенные почвы
- Насыпи
- Раскопы
- Фундаменты
- Модель скалистых пород по Хоеку-Брауну (Hoek-Brown)
- Подели почв по Матсуока-Накай (Matsuoka-Nakai) и Лейд-Дункану (Lade-Duncan)
- Модифицированная модель почвы Кема-Клея (Cam-Clay)
- Системы с отработанным ядерным топливом
- Модели почв по Рэмбергу-Осгуду (Ramberg-Osgood) и Дункан-Ченгу (Duncan-Chang)
- Подпорные стены и укрепления
- Дороги
- Плиты
- Устойчивость склонов
- Моделирование почв и скалистых пород
- Туннели
- Пользовательские модели почв, скалистых пород и бетона
- Модель бетона по Вильяму-Варнке (William-Warnke)

## Модуль Усталость материала

В результате циклического нагружения материала его усталость может привести к слою компонентов при нагрузках ниже статического предела. Модуль Усталость материала платформы COMSOL Multiphysics, дополнение модуля Механика конструкций, позволяет осуществлять усталостный анализ в виртуальной среде.

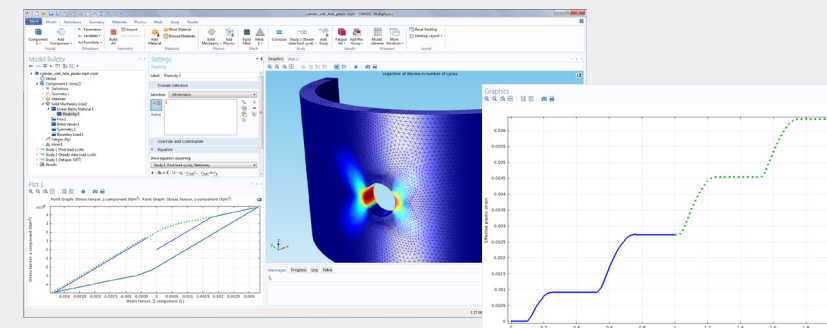
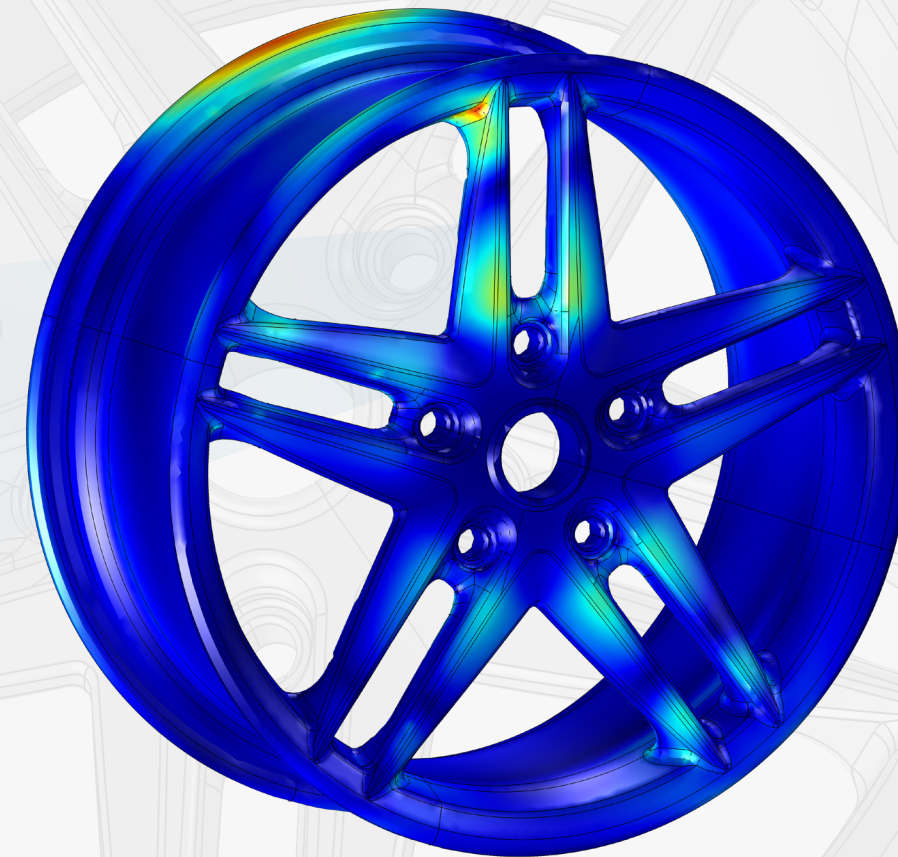
С помощью моделей устойчивости к напряжениям и растяжениям можно оценивать усталостные эффекты в конструкциях при повторном нагружении. Доступны модели напряжений и растяжений, применимые к случаю непропорциональной нагрузки. Они позволяют оценить усталость при высоких и низких частотах нагружения. Чтобы оценить тепловую усталость в конструкциях из нелинейных материалов, можно применять методы на основе энергии и напряжения. Для переменных нагрузок можно рассчитать суммарные повреждения на основе истории нагрузок и предела усталости.

Для твердых тел, листов, каркасов, систем нескольких тел, приложений, включающих тепловое напряжение и деформации, и даже для пьезоэлектрических устройств можно моделировать циклы усталостной нагрузки. Кроме того, модуль позволяет оценивать усталость для доменов, границ, линий и точек, что повышает эффективность вычислений при оценке усталости под поверхностью или на ней.



### АНАЛИЗ МНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ КОЛЕСА АВТОМОБИЛЯ

Анализ усталости в результате высокочастотного нагружения автомобильного колеса с десятью спицами. Максимальный уровень напряжения отмечается в шейке, соединяющей спицу и обод. Результаты моделирования показывают распределение напряжений по Мизесу во всем колесе (справа вверху) и коэффициент усталостной эффективности шейки по критерию Финдли (вверху).



### АНАЛИЗ МАЛОЦИКЛОВОЙ ЭЛАСТОПЛАСТИЧНОЙ УСТАЛОСТИ

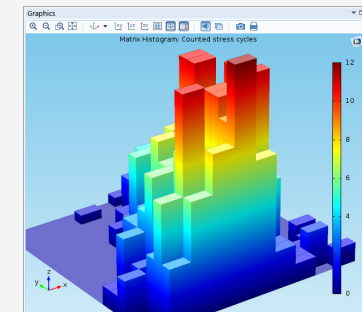
Модель малоцикловой усталости при напряжении, возникшем в результате пластической деформации вблизи отверстия в цилиндре. На иллюстрациях (слева направо) показаны: зависимость деформации от напряжения для двух последних циклов нагрузки, зависимость формы поверхности от времени (логарифмическая шкала), итоговая кривая пластической деформации.

## КЛЮЧЕВЫЕ ОСОБЕННОСТИ

- Анализ накопленного повреждения
  - Линейный закон разрушения Палмгрена-Майнера (Palmgren-Miner)
  - Метод дождевого потока
- Расчет усталости при энергетическом подходе
  - Критерий Дарво (Darveaux)
  - Критерий Морроу (Morrow)
- Расчет коэффициента усталостной эффективности
- Многоцикловая усталость
- Малоцикловая усталость
- Усталость при напряжениях
  - Критерий Фатем-Соси (Fatemi-Socie)
  - Поправка среднего напряжения
  - Приближение Нотча (Notch)
  - Критерий Смита-Ватсона-Топпера (SWT)
  - Критерий Ванга-Брауна (Wang-Brown)
- Поведение при деформациях
  - Критерий диаграммы E-N
  - Критерий Коффина-Мэнсона (Coffin-Manson)
  - Объединенный критерий Баскина (Basquin) и Коффина-Мэнсона (Coffin-Manson)
- Усталость из-за напряжений
  - Критерий Финдли (Findley)
  - Критерий Матаке (Matake)
  - Критерий нормальных напряжений
- Поведение при напряжениях
  - Критерий диаграммы S-N
  - Критерий Баскина (Basquin)
  - Критерий приближения диаграммы S-N

### АНАЛИЗ УСТАЛОСТНОЙ КРИВОЙ

Нагруженная балка с продольной прорезью подвергается непропорциональной нагрузке со случайным значением. Проводится анализ усталостной кривой, распределение нагрузок в точке высочайшего значения усталости вычисляется и преобразуется в гистограмму дождевого потока.

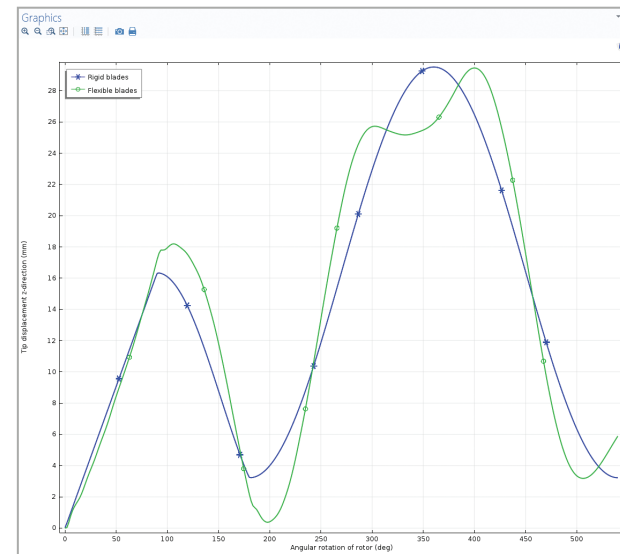




## Модуль Динамика многотельных структур

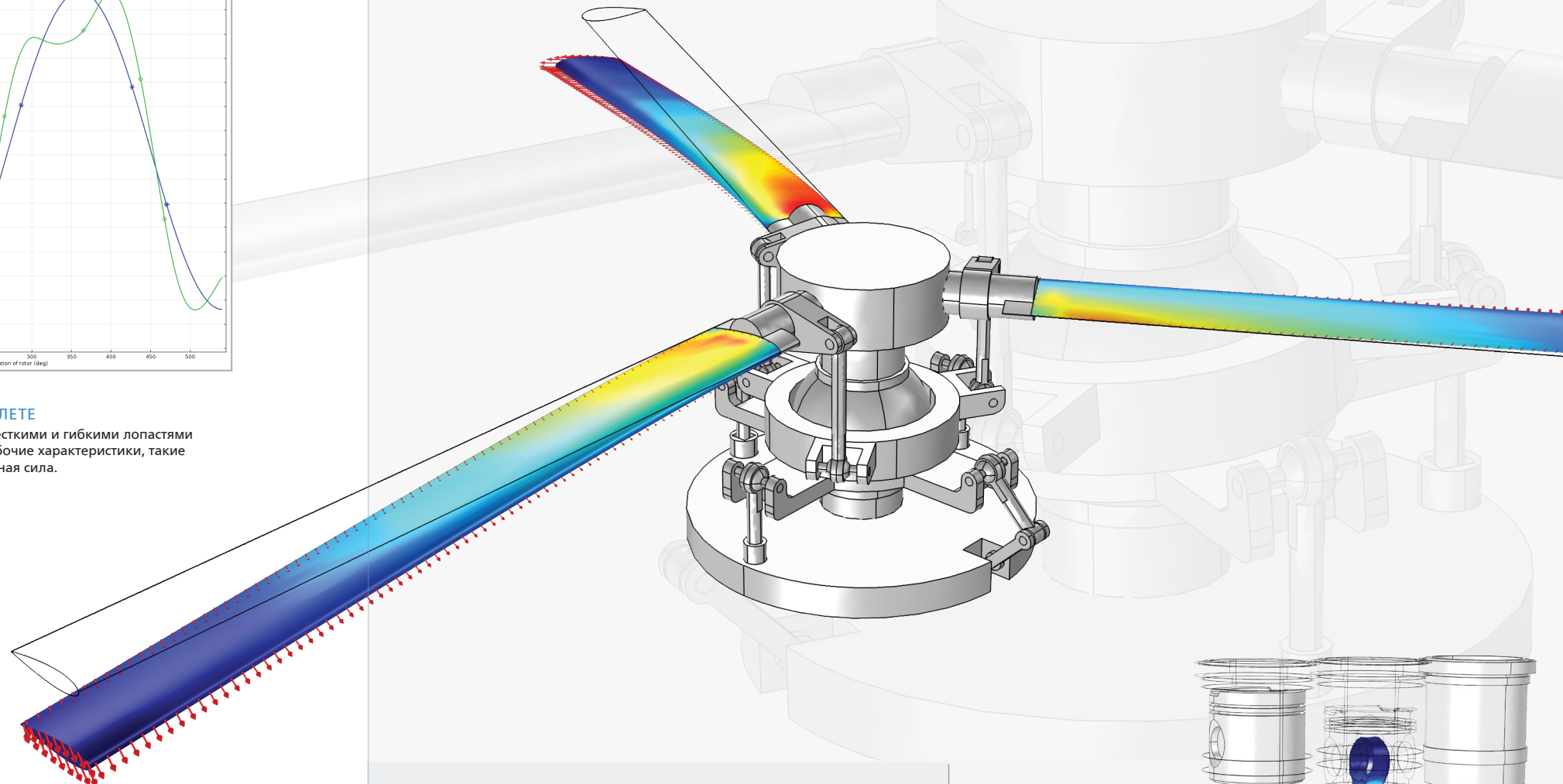
Модуль Динамика многотельных структур — это модуль расширения модуля Механика конструкций, который содержит целый ряд инструментов для разработки и оптимизации механических систем, состоящих из нескольких элементов, с помощью метода конечных элементов. Он позволяет моделировать смешанные системы упругих и жестких тел, при этом каждое из тел может совершать существенные линейные или вращательные перемещения. Подвижность элементов можно ограничивать, накладывая условия на вращательное и поступательное движение соединений.

По умолчанию все тела в модели многотельной структуры являются упругими. Чтобы сделать тело жестким, для него необходимо задать свойство Rigid Domain (Жесткая область). Границы и фрагменты границ упругих тел также можно сделать жесткими. При совместном применении модулей Динамика многотельных структур и Нелинейные конструкционные материалы можно задать нелинейные свойства материалов. Модуль позволяет анализировать динамику многих тел для переходных процессов, анализ в частотной области, анализ собственных частот, а также стационарных режимов. Соединениям можно поставить в соответствие линейные и (или) торсионные пружины с амортизирующими свойствами, приложенные силы и моменты, а также законы движения как функции времени. Кроме того, для соединений можно задать характеристики трения — для моделирования потерь или с целью стабилизации системы.



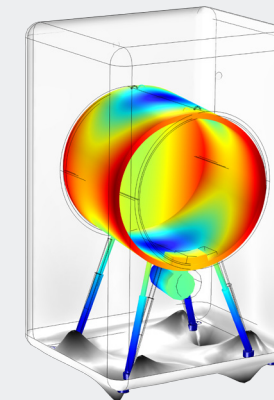
### АВТОМАТ ПЕРЕКОСА В ВЕРТОЛЕТЕ

Имитация переходных режимов с жесткими и гибкими лопастями позволяет исследовать полезные рабочие характеристики, такие как деформация лопастей и подъемная сила.



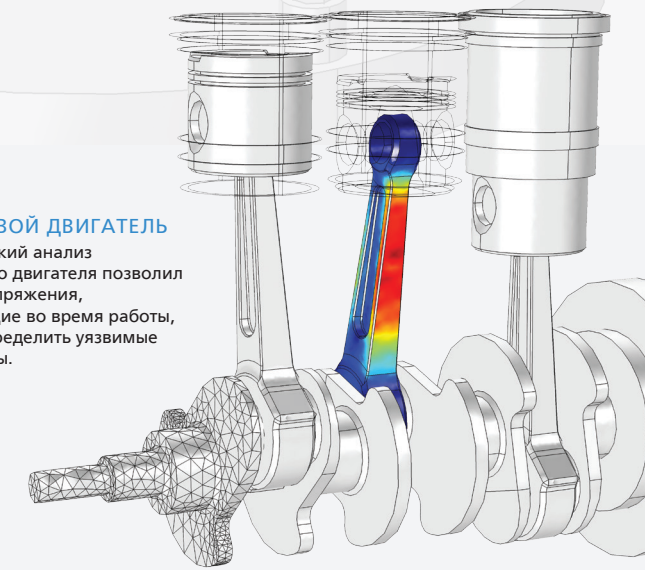
### ВИБРАЦИЯ В СТИРАЛЬНОЙ МАШИНЕ

Моделирование многотельной системы применительно к компактной стиральной машине с горизонтально размещенным барабаном. Для расчета собственных частот и форм колебаний всего устройства применяется анализ собственных частот. Вибрации пола во время цикла вращения определяются с помощью методов анализа переходных процессов.



### ПОРШНЕВОЙ ДВИГАТЕЛЬ

Динамический анализ поршневого двигателя позволил изучить напряжения, возникающие во время работы, и затем определить уязвимые компоненты.



## КЛЮЧЕВЫЕ ОСОБЕННОСТИ

- Область применения
  - Автомобильная и аэрокосмическая промышленность
  - Биомеханика
  - Биомедицинские приборы
  - Механизмы и робототехника
  - Динамика транспортных средств и двигателей
- Соединения
  - Шаровое
  - Цилиндрическое
  - Дистанционный шарнир
  - Неподвижное соединение
  - Шарнирное
  - Планарное
  - Призматическое
  - Упрощенное пазовое
  - Винтовое
  - Пазовое
  - Карданный шарнир
- Элементы конструкций
  - Твердые и эластичные тела, оболочки и балки
  - Твердые тела с нелинейными свойствами, пьезоэлектрические системы

## ВОЗМОЖНОСТИ

- Согласованная инициализация модели для анализа переходных процессов
  - Учет в многотельных системах явлений иной физической природы
  - Собственные моды гибких многотельных систем
  - Усталостный анализ важнейших гибких тел\*
  - Силы и моменты сил противодействия в соединениях
  - Относительные смещения и повороты двух компонентов, а также их скорости
  - Анализ статических конструкций и переходных процессов, а также частотный анализ
  - Напряжения и деформации в гибких телах
- \* В сочетании с модулем Fatigue (Усталость)

## Модуль Акустика

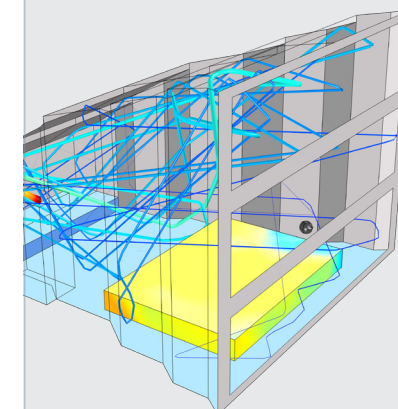
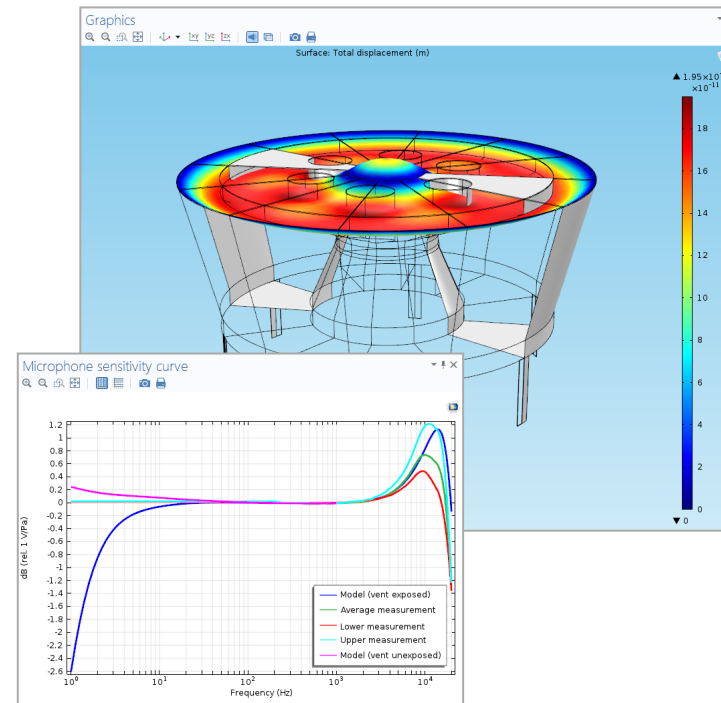
Модуль Акустика — передовое решение для моделирования акустических явлений. Он предназначен для специалистов, которые работают с устройствами, испускающими, измеряющими и использующими акустические волны. Область применения включает динамики, микрофоны, слуховые аппараты и эхолоты. Модуль может применяться в областях управления шумом: проектирование заглушек, звуковые барьеры, рассеиватели и поглотители, а также проектирование акустики в строениях и помещениях.

Удобные интерфейсы физик позволяют с легкостью моделировать распространение акустических волн в воздухе, воде и других жидкостях. С помощью средств моделирования термовязкостных явлений акустики можно создавать высокоточные модели миниатюрных динамиков и микрофонов мобильных устройств. Специализированные пьезоакустические интерфейсы дают возможность моделировать распространение акустических волн в подвижной жидкой среде, и интерфейсы отслеживания хода лучей и акустической диффузии — акустические явления в больших помещениях. Кроме того, модуль позволяет создавать модели колебаний и упругих волн в твердых телах, пьезоэлектрических материалах и пороупругих структурах. Широкий спектр готовых, удобных в применении мультифизических взаимодействий позволяет моделировать взаимодействие акустической среды с твердыми и пористыми средами, оболочками и пьезоэлектрическими устройствами, что значительно расширяет возможности платформы в области прогнозирования.

### КОНДЕНСАТОРНЫЙ МИКРОФОН V&K 4134

Электромеханическая акустическая модель микрофона, чувствительного к давлению, для средних и высоких уровней громкости и измерения параметров соединения. Результаты показывают уровень чувствительности и деформацию мембраны.

Геометрические, характеристики, параметры материалов и изображения предоставлены компанией Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement A/S, Нэрум, Дания.

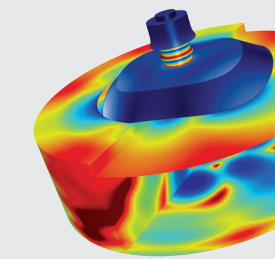


### КОНЦЕРТНЫЙ ЗАЛ

Модель небольшого концертного зала, в которой применяется геометрическая акустика для определения звукового давления и реакции на импульс.

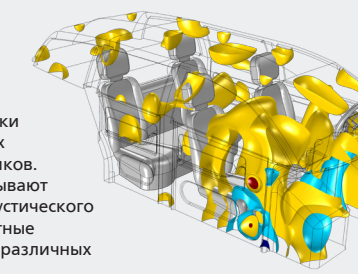
### ЭХОЛОКАТОР

Для генерации низкочастотных звуков высокой мощности применяется пьезоэлектрический преобразователь типа Topriiz. Модель показывает распределение напряжения в пьезокерамических кольцах, деформацию тяжелых наконечников и поле давлений внутри преобразователя.



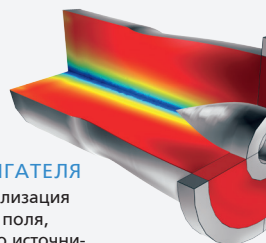
### САЛОН СЕДАНА

Модель акустики в салоне седана, содержащая звуковые источники в типичных местах установки динамиков. Результаты показывают итоговое поле акустического давления и частотные характеристики в различных точках салона.



### КАНАЛ ДВИГАТЕЛЯ

Расчет и визуализация акустического поля, генерируемого источником шума на границе, в модели канала авиационного двигателя.



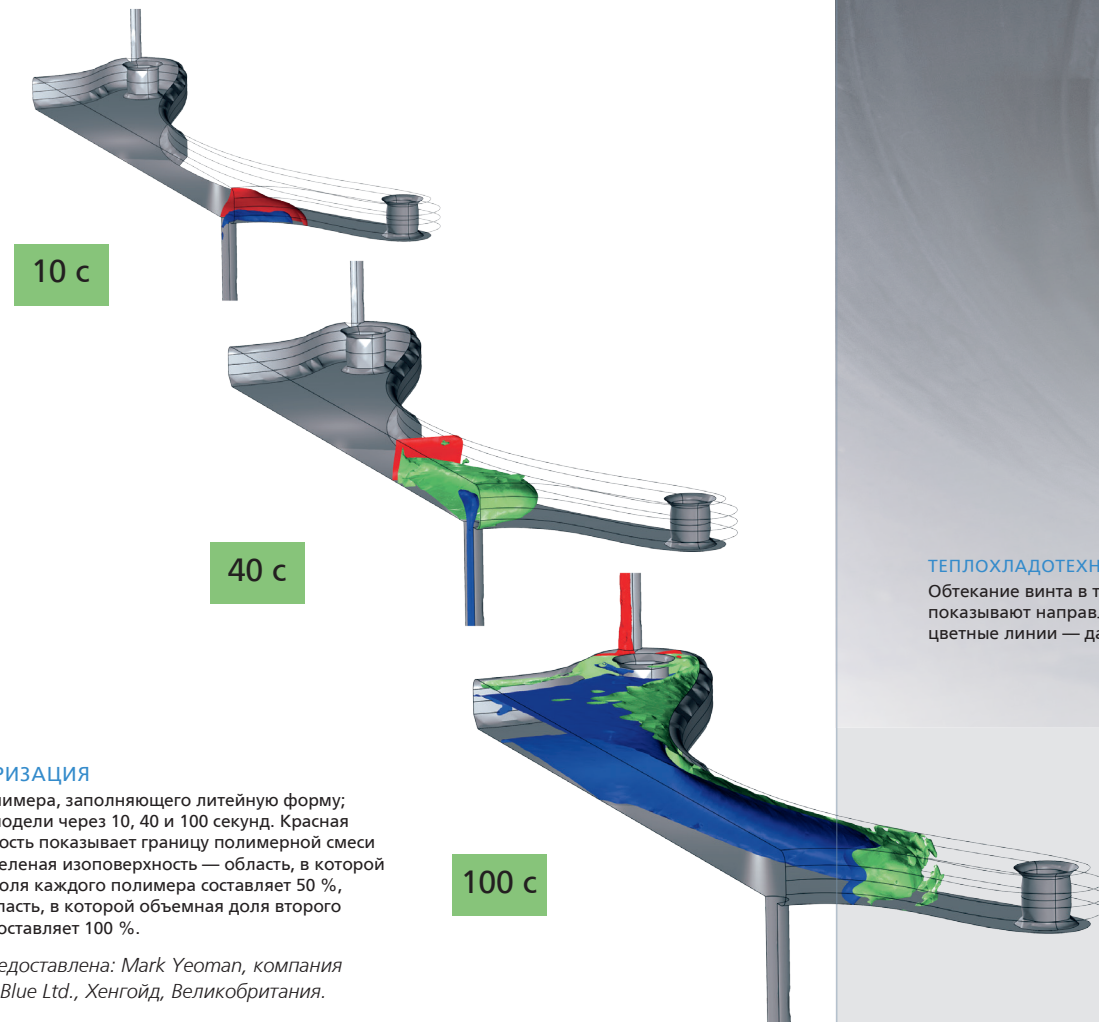
## КЛЮЧЕВЫЕ ОСОБЕННОСТИ

- Уравнение акустической диффузии
- Акустическое взаимодействие с конструкцией
- Упругие волны
- Электроакустические преобразователи и динамики
- Слуховые аппараты
- Линеаризованные уравнения Эйлера
- Линеаризованные уравнения Навье-Стокса
- Линеаризованное потенциальное течение
- Громкоговорители и микрофоны
- Акустические датчики микроэлектромеханических систем
- Микрофоны микроэлектромеханических систем
- Шум и вибрация от оборудования
- Материалы, снижающие шум, и изоляция
- Пьезоакустика
- Пороупругие волны
- Отслеживание хода лучей
- Реактивные и поглощающие глушители
- Акустика помещений
- Гидроакустические устройства
- Вибрации конструкций
- Термоакустика

## Модуль Вычислительная гидродинамика

Модуль Вычислительная гидродинамика платформы COMSOL — передовое средство моделирования сложных потоков жидкости. Он позволяет создавать сложные модели турбулентности, сочетающие сжимаемые и несжимаемые потоки, а также моделировать тепловой и массовый перенос. Важной особенностью модуля CFD является возможность точно моделировать мультифизические характеристики потока, например, сопряженную теплопередачу с неизоэтермическим потоком, взаимодействия конструкции с текучей средой, а также течения неньютоновской жидкости с вязким рассеянием и жидкости с вязкостью, зависящей от концентрации. Средства моделирования течений в пористых средах позволяют учитывать влияние изотропных и неаизотропных сред, а также с легкостью моделировать естественное течение и пористые области. Кроме того, доступны средства моделирования перемешивающих устройств с вращающимися деталями.

Специализированный интерфейс моделирования взаимодействующих потоков помогает создавать модели переноса и химических реакций в слабых и концентрированных растворах. Интерфейсы модуля для дисперсных двухфазных потоков включают смешанные и эйлеровские модели взвесей тонких частиц и модель потоков с пузырьками газа для расчета параметров макроскопических потоков газов. Для моделирования поверхностей взаимодействия двухфазных потоков доступны формулы на основе методов функции уровня и фазового поля.



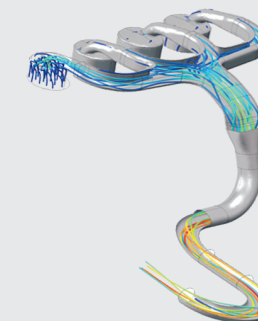
### ПОЛИМЕРИЗАЦИЯ

Модель полимера, заполняющего литейную форму; состояние модели через 10, 40 и 100 секунд. Красная изоповерхность показывает границу полимерной смеси и воздуха, зеленая изоповерхность — область, в которой объемная доля каждого полимера составляет 50 %, синяя — область, в которой объемная доля второго полимера составляет 100 %.

Модель предоставлена: Mark Yeoman, компания Continuum Blue Ltd., Хенгфорд, Великобритания.

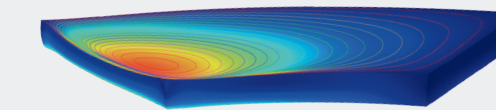
### ТЕПЛОХЛАДОТЕХНИКА

Обтекание винта в трубопроводе. Линии потока показывают направление и величину потока, цветные линии — давление на лопасти винта.



### КОЛЛЕКТОР ВЫХЛОПНОЙ СИСТЕМЫ

Поток из двигателя автомобиля через коллектор выпускной системы.

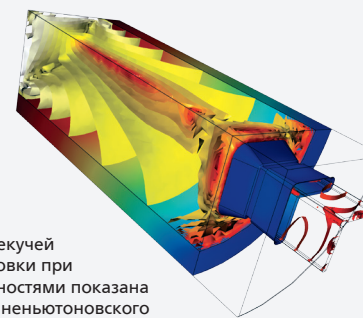


### ПЛЕНКА СМАЗОЧНОГО МАСЛА

В механизмах с вращающимися деталями с высокой тяги нагрузки применяются наклонные колодки с упорными подшипниками. На иллюстрации показаны контуры распределения давления смазочного моторного масла, упругая деформация (не в масштабе) и эффективное напряжение.

### ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Взаимодействие конструкции с текучей средой в процессе литья и прессовки при экструзии алюминия. Изоповерхностями показана динамическая вязкость в потоке неньютоновского жидкого алюминия.



## КЛЮЧЕВЫЕ ОСОБЕННОСТИ

- Сопряженная теплопередача
- Фильтры (в т. ч. циклонные) и сепарационные установки
- Электронное охлаждение
- Вентиляторы, решетки, сетки и насосы
- Потоки вокруг транспортных средств и строений
- Потоки в трубопроводах, клапанах, соединениях, соплах
- Псевдооживленные слои и аэрозоли
- Взаимодействие конструкции с текучей средой (FSI)\*
- Потоки с пузырьками газа
- Радиаторы отопителей и охлаждающие ребра
- Потоки с большими числами М
- Смазка и эластогидродинамика
- Медицинские и биофизические приложения, например, потоки в кровеносных сосудах
- Перемешивающие устройства
- Неаизотермические потоки
- Потоки неньютоновских жидкостей
- Полимерные и вязкоэластичные потоки
- Течения в пористых средах
- Реагирующие потоки\*\*
- Осаждение, эмульсии и суспензии
- Турбулентные потоки

\* В сочетании с модулем Механика конструкций или MEMS

\*\* В сочетании с модулем Разработка химических реакций

## Модуль Миксер

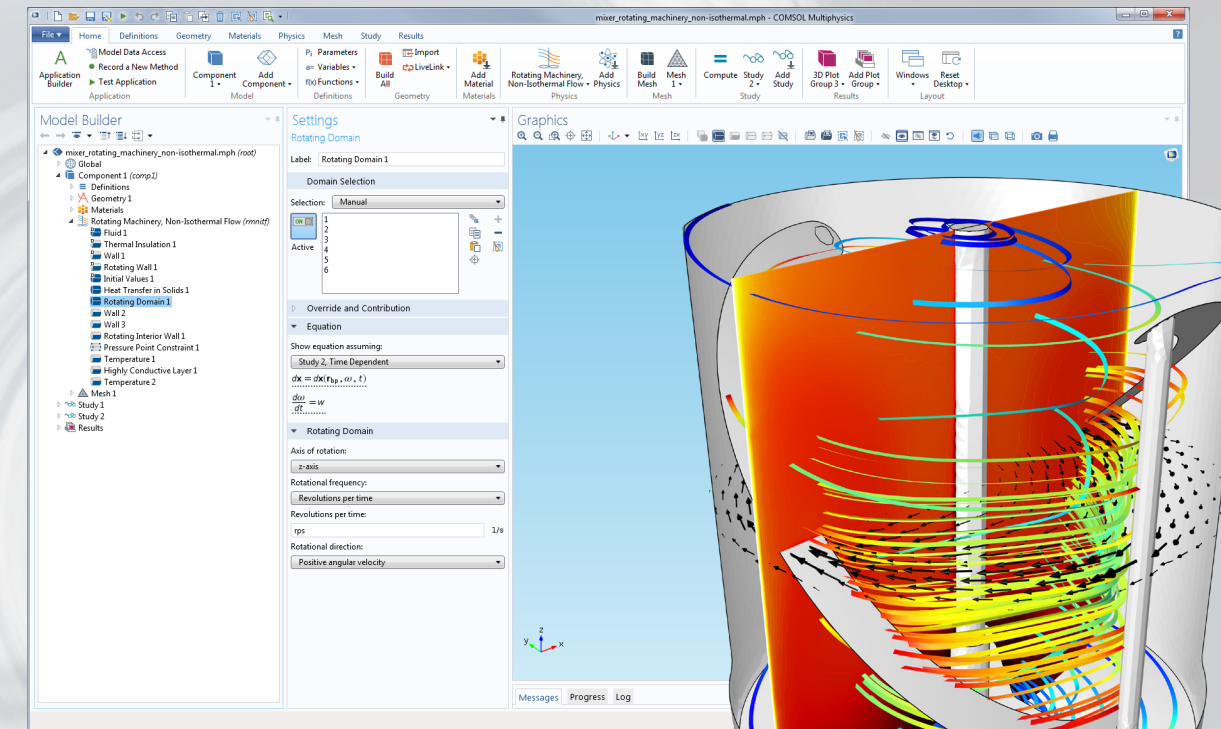
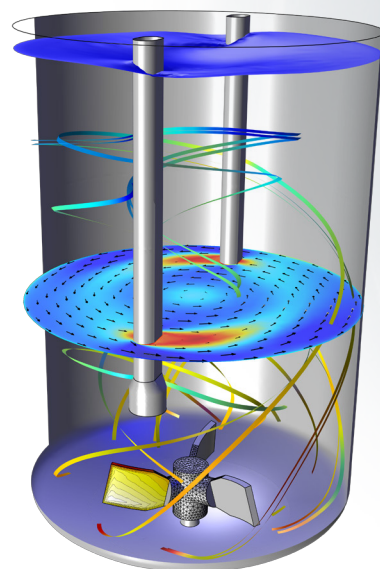
Миксер — это модуль расширения модуля Вычислительная гидродинамика, предназначенный для анализа работы смесителей жидкостей и смесительных реакторов. Он содержит ряд интерфейсов физик, основанных на законах сохранения момента, массы и энергии, а также материального баланса компонентов жидкости. Область его применения — ламинарные и турбулентные потоки, несжимаемые и слабо сжимаемые потоки, а также неньютоновские потоки. Имеются также дополнительные интерфейсы физик, позволяющие описывать влияние температуры, реагирующих веществ, а также свободных поверхностей.

Исследование существенно нестационарного потока при воздействии вращающегося оборудования учитывает движение геометрических частей относительно друг друга, при этом наиболее точно моделируются процессы перемешивания. COMSOL определяет область моделирования, которая включает в себя мешалку или ротор, а также другую, внешнюю, область, где находятся стенки, перегородки и т. п. После этого применяется метод скользящей сетки, чтобы учесть интеграцию этих двух областей.

В модуле Mixer (Миксер) также имеется функция «замороженного» ротора для моделирования циркуляционных потоков. Она позволяет значительно сэкономить вычислительные ресурсы при моделировании квазистационарных состояний. Аппроксимацию с «замороженным» ротором целесообразно использовать для смесителей без перегородок, труб или иных помех, а также при вращении всей системы, например, при центробежном разделении.

### ТУРБУЛЕНТНЫЙ СМЕСИТЕЛЬ СО СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Моделирование турбулентного смесителя с двумя стержнями и крыльчаткой с тремя лопастями. Синяя поверхность вверху показывает деформацию свободной поверхности. Для передней лопасти определены контуры давления. Центральный разрез и ленты иллюстрируют величину поля потока.



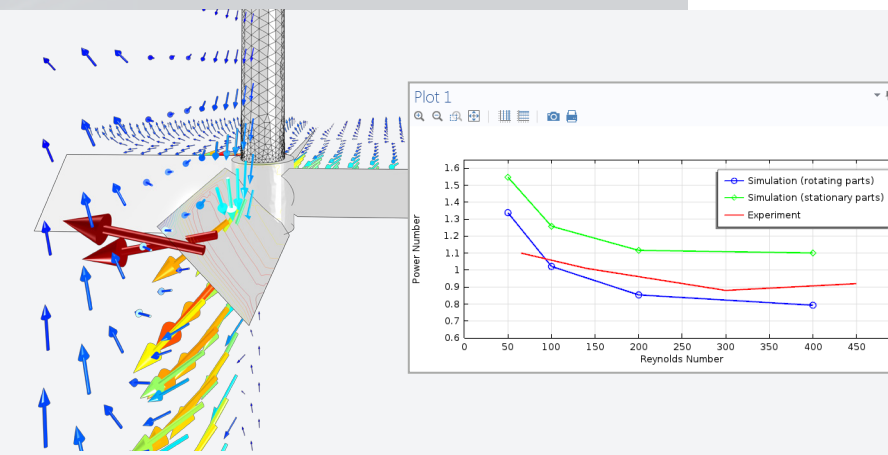
### НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЕ СМЕШИВАНИЕ

Моделирование порционного реактора с винтовой ленточной мешалкой, учитывающее зависимость свойств жидкости от температуры и теплопередачи в твердых телах. Показано распределение температур в смесителе, линиями потока и стрелками обозначена скорость.

### СМЕШИВАНИЕ НЕНЬЮТОНОВСКИХ ЖИДКОСТЕЙ

Функция «замороженного» ротора применяется при моделировании смешивания неньютоновских жидкостей. Стрелками показано направление и величина потока вокруг крыльчатки (слева).

Число мощности, на основании которого рассчитывалось потребление энергии крыльчаткой, вычислялось для четырех значений числа Рейнольдса (справа).



## КЛЮЧЕВЫЕ ОСОБЕННОСТИ

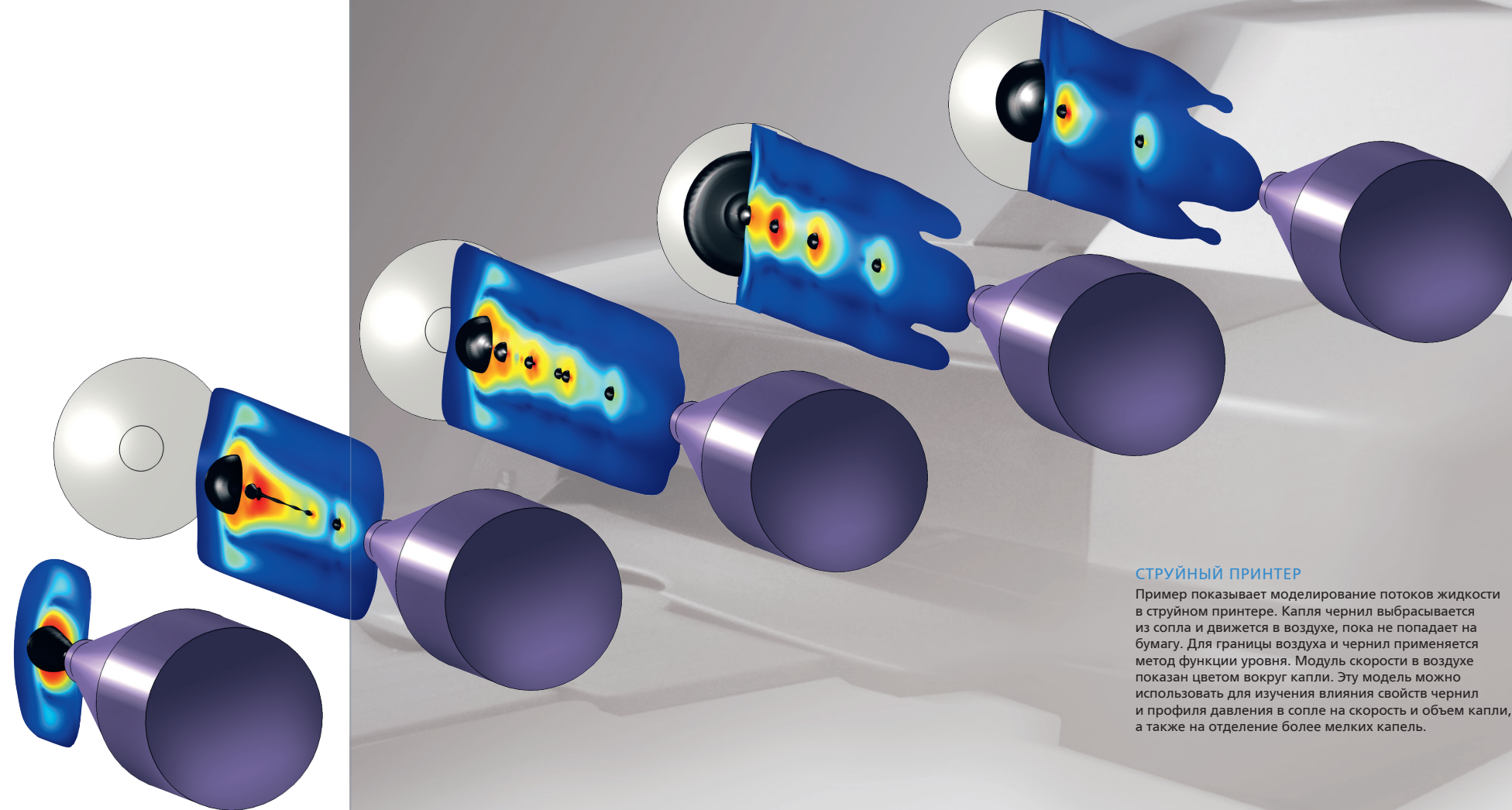
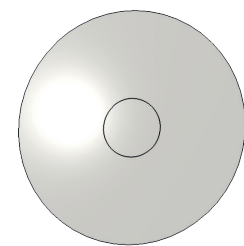
- 2D- и 3D-анализ стационарных и нестационарных потоков
- Порционные реакторы с перемешиванием
- Реакторы с непрерывным перемешиванием
- Смешение жидкостей и химическое смешение
- Свободная поверхность жидкости с учетом сил поверхностного натяжения и углов контакта
- Ламинарные, турбулентные, несжимаемые и слабо сжимаемые потоки
- Смешение концентрированных компонентов
- Неизотермические потоки
- Неньютоновские потоки
- Оптимизация конструкций сосудов, перегородок и крыльчатки
- Готовые библиотеки коэффициентов поверхностного натяжения
- Реагирующие потоки
- Потоки в смесителях с вращающимися деталями
- Метод скользящей сетки, позволяющий полностью описать вращение и приближение «замороженного» ротора при моделировании вращающейся крыльчатки
- Турбулентный поток, включая модель k-ипсилон, модель k-омега, модель k-ипсилон для малых значений числа Рейнольдса и модель Спаларта-Аллмараса

## Модуль Микрогидродинамика

Модуль содержит удобные инструменты для изучения микрогидродинамических устройств. В число важных областей его применения входит моделирование работы лабораторий на чипе, цифровой микрогидродинамики, электрокинетических и магнитокинетических устройств, а также сопел для распыления краски.

Модуль содержит расширенные интерфейсы для моделирования однофазных и двухфазных потоков, включающие методы функций уровня, фазового пространства и подвижной сетки. С их помощью можно моделировать силы поверхностного натяжения, капиллярные силы и эффекты Марангони.

Общие функции мультифизического моделирования COMSOL позволяют с легкостью создавать модели, объединяющие электрокинетические и магнитодинамические эффекты, включая такие явления, как электрофорез, диэлектрофорез, электроосмос и электрохимическое смачивание. Также модуль содержит средства моделирования процессов, происходящих в устройствах «лаборатория на чипе»: химической диффузии и реакции разбавленных веществ. С помощью интерфейса потоков со скольжением фаз можно моделировать газовые потоки в микроструктурах.



### СТРУЙНЫЙ ПРИНТЕР

Пример показывает моделирование потоков жидкости в струйном принтере. Капля чернил выбрасывается из сопла и движется в воздухе, пока не попадает на бумагу. Для границы воздуха и чернил применяется метод функции уровня. Модуль скорости в воздухе показан цветом вокруг капли. Эту модель можно использовать для изучения влияния свойств чернил и профиля давления в сопле на скорость и объем капли, а также на отделение более мелких капель.

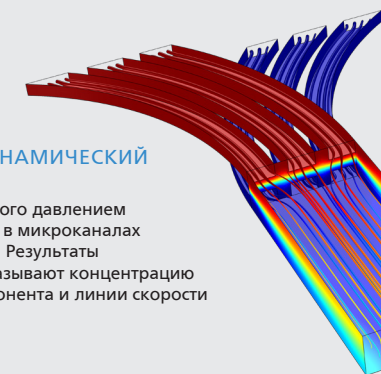
## КЛЮЧЕВЫЕ ОСОБЕННОСТИ

- Капиллярные силы
- Химические и биохимические датчики
- Диэлектрофорез (DEP)
- Цепочки ДНК и лаборатории на чипах
- Электрокоалесценция
- Электрокинетические потоки
- Электроосмос
- Электрофорез
- Электрохимическое смачивание
- Взаимодействие конструкции с текучей средой (FSI)\*
- Сопла для распыления краски
- Магнитофорез
- Эффекты Марангони
- Системы полного микроанализа
- Микрореакторы, микронасосы и микросмесители
- Течения в пористых средах
- Течения со скольжением фаз
- Статические смесители
- Эффекты поверхностного натяжения
- Двухфазные потоки

\* В сочетании с модулем Механика конструкций или MEMS

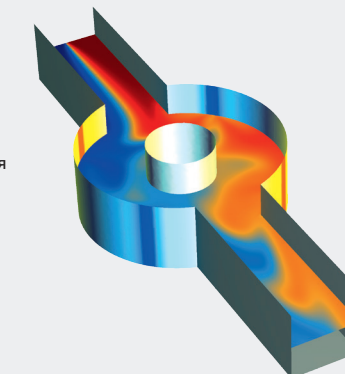
### МИКРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ СМЕСИТЕЛЬ

Модель инициируемого давлением ламинарного потока в микроканалах смесителя ламеллей. Результаты моделирования показывают концентрацию растворенного компонента и линии скорости в смесителе.



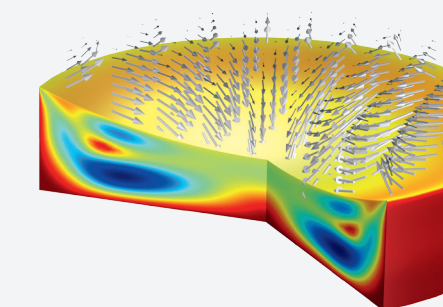
### ЭЛЕКТРООСМОС

В биохимических микроработориях часто смешиваются потоки различных жидкостей. В этой модели для смешивания жидкостей применяется явление электроосмоса. В системе прилагается электрическое поле, изменяющееся во времени. Результирующий электроосмос отклоняет параллельные линии потоков и изменяет распределение концентрации в высокоупорядоченном ламинарном потоке.



### ЭЛЕКТРОСМАЧИВАНИЕ

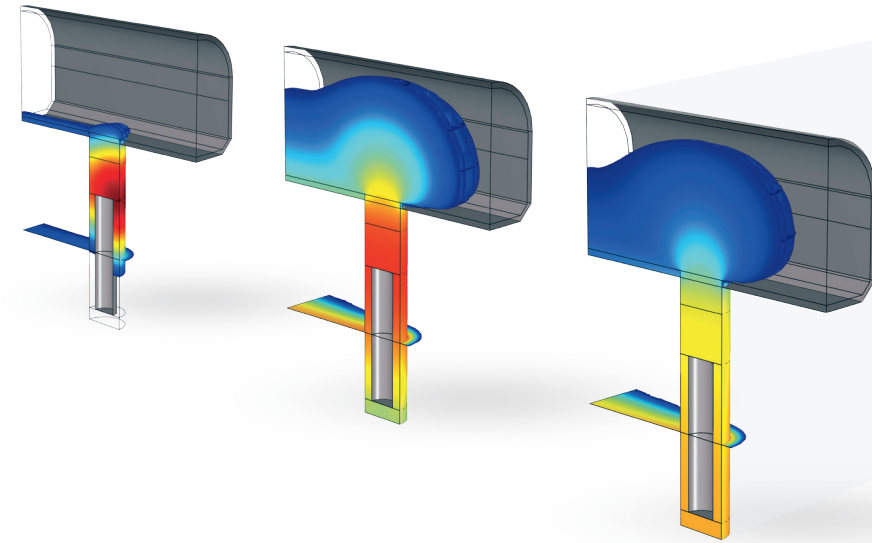
Моделирование жидкой линзы с переменным фокусом в миниатюрной камере при переходе между фокусными расстояниями. Линза представляет собой контактную поверхность двух жидкостей: поле скоростей для нижней фазы обозначено цветами, поле верхней фазы показано стрелками.



## Модуль Течения в пористых средах

Данный модуль предназначен для изучения геофизических явлений и процессов в окружающей среде. Он позволяет моделировать потоки подземных вод, распространение загрязнения в почве, потоки нефти и газа в пористых средах. Для описания нелинейных потоков в пористых средах с переменным насыщением применяется уравнение Ричардса. Кроме того, пользователю доступен интерфейс закона Дарси (для медленных потоков) и интерфейс уравнений Бринкмана (для случаев, когда пренебречь сдвигом слоев невозможно). Свободные ламинарные потоки Навье-Стокса можно с легкостью сочетать с потоками в пористых средах; кроме того, можно добавлять потоки в тонких трещинах. Модуль также позволяет моделировать перенос растворенных веществ в свободных, насыщенных и частично насыщенных пористых средах.

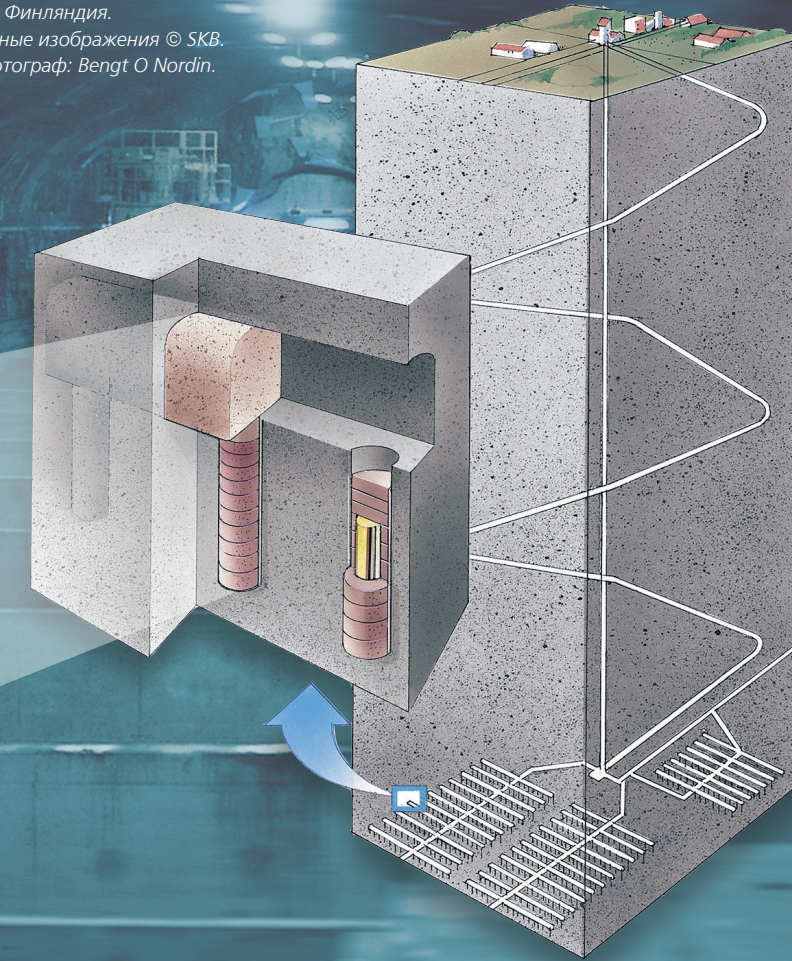
Для моделирования теплопередачи доступны фоновые геоизотермы, а также автоматизированный расчет эффективных тепловых свойств многокомпонентных систем, в том числе моделирование теплопередачи в твердых, жидких и пористых средах и в трещинах. Очень мощный интерфейс для работы с пористостью предназначен для моделирования уплотнения и осадки. Модуль Течения в пористых средах можно сочетать с другими интерфейсами физик COMSOL Multiphysics для моделирования геофизических явлений и процессов в окружающей среде, например, для анализа кинетики химических реакций и электромагнитных эффектов.



### ЗАХОРОНЕНИЕ ЯДЕРНЫХ ОТХОДОВ

Современные хранилища ядерных отходов рассчитаны на сотни тысяч лет хранения отработанных топливных стержней. Для анализа таких систем широко используются методы моделирования. В этой модели рассматривается гипотетическая ситуация нарушения целостности емкости с пучком ТВС, а также утечка вещества через трещину в прилегающую горную породу и засыпку туннеля над ней. Показано распределение концентрации через 20, 200 и 2000 лет.

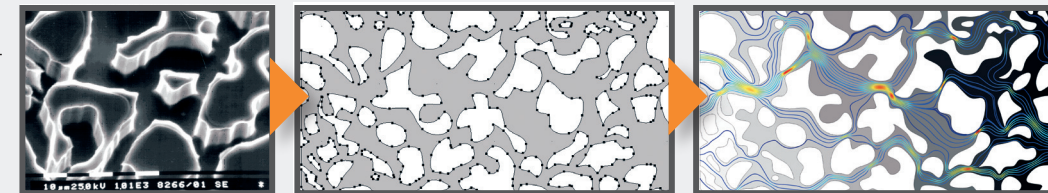
Автор модели: Veli-Matti Pulkkanen, Исследовательский центр VTT, Финляндия.  
Авторские права на приложенные изображения © SKB.  
Иллюстратор: Jan M Rojmar Фотограф: Bengt O Nordin.



### ТЕЧЕНИЯ В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

Эту геометрическую структуру, созданную на основе результатов работы электронно-сканирующего микроскопа, можно импортировать в COMSOL для расчета распределений скорости и давления.

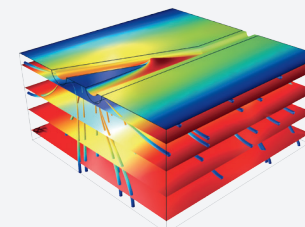
Модель предоставлена: Arturo Keller, Калифорнийский университет, Санта-Барбара, США.



### МЕХАНИКА ПЛАСТА

Эта 3D-модель анализирует уплотнения нефтяного пласта, вызванные выкачиванием нефти, и возможное обрушение на стыке «открытой» многоствольной скважины.

Идея модели: автор модели — Roberto Suarez-Rivera, компания Schlumberger, Солт-Лейк-Сити, США.



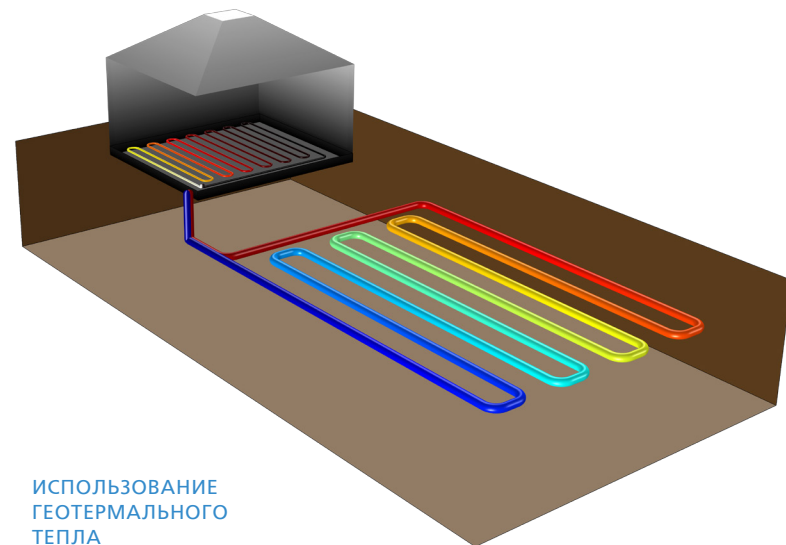
## КЛЮЧЕВЫЕ ОСОБЕННОСТИ

- Анализ эстуариев и прибрежных полос — течение, адвекция и диффузия
- Хранение газа, рекультивация земель и изоляция
- Моделирование грунтовых вод и геотермальных систем
- Теплопередача в твердых телах, жидкостях и пористых средах
- Импорт цифровой модели рельефа в формате файлов DEM
- Механическое и гравитационное осушение пористых и волокнистых материалов
- Анализ возможностей нефтедобычи
- Анализ шлейфов загрязнения в подповерхностных и верхних слоях грунта, а также в атмосфере
- Анализ пористого уплотнения и оседания
- Анализ пористого напряжения и обрушения
- Перенос радиоактивного вещества через горную породу
- Потоки в насыщенных и ненасыщенных пористых средах
- Мелководные течения и перенос осадков
- Однофазные и двухфазные потоки в пористых средах
- Анализ уровня грунтовых вод и проникновения в них солей
- Анализ напора в скважине

## Модуль Течения в трубопроводах

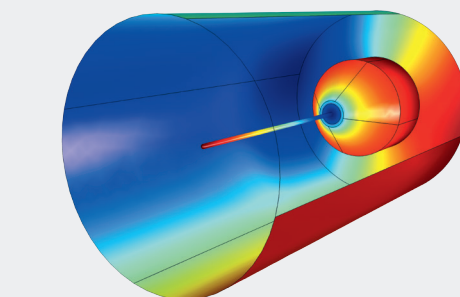
Данный модуль предназначен для моделирования потоков жидкости, теплопередачи, переноса массы, гидравлических переходных процессов, а также акустических явлений в системах труб и каналов. В результате моделирования течений в трубопроводах можно вычислить скорости потоков, концентрации веществ и температуры, а также проанализировать химические реакции в трубах и каналах. С помощью данного модуля можно анализировать системы труб и каналов, длина которых достаточно велика, чтобы системы можно было рассматривать в одномерном приближении. Доступны автоматические средства сопоставления сечений течения в трубопроводе с трехмерными областями течения.

Модуль подходит для разработки и оптимизации сложных систем охлаждения в турбинах, вентиляционных систем в зданиях, геотермальных обогревательных систем, радиаторов, систем трубопроводов в химических реакциях, а также промышленных нефтяных, газовых и минеральных трубопроводов. Для создания моделей доступны готовые компоненты: изгибы, вентили, Т-образные соединения, сужения, расширения и насосы. Имеется также специализированный интерфейс для анализа гидравлического удара с зависимостью от времени. Чтобы создать модель неоднородного массобмена, можно комбинировать модуль Течения в трубопроводах с модулем Вычислительная гидродинамика либо иным модулем, позволяющим анализировать неоднородный перенос. Кроме того, можно изучать распространение акустических волн в трубопроводах, используя модуль Течения в трубопроводах совместно с модулем Акустика.



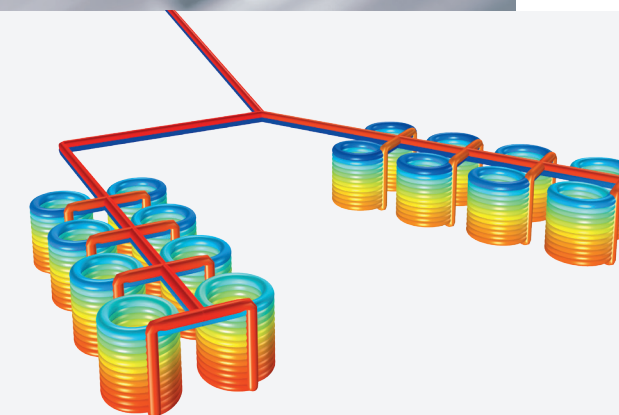
### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕОТЕРМАЛЬНОГО ТЕПЛА

Геотермальное тепло — экологичный и энергоэффективный способ отопления жилых домов. В этой модели анализируются тепловые характеристики системы труб в подпахотном слое почвы.



### МИКРОФОНЫ

Для анализа переходных процессов в двух областях скалярной акустики используется зонд с подключенным микрофоном. В результате моделирования рассчитано давление на наконечнике зонда и диафрагме микрофона.



### ГЕОТЕРМАЛЬНЫЙ НАГРЕВ

В системах геотермального нагрева могут использоваться пруды и озера в роли накопителей тепла. В этом примере жидкость циркулирует по замкнутой подводной системе трубопроводов из полиэтилена.

## КЛЮЧЕВЫЕ ОСОБЕННОСТИ

- Системы охлаждения
- Геотермальные системы
- Радиаторы отопителей и охлаждающие ребра
- Теплопередача между трубопроводами и окружающей средой
- Гидравлика и гидравлический удар
- Смазка
- Перенос массы и химические реакции в трубопроводах
- Неизотермические потоки в трубах
- Трубопроводные системы нефтеперерабатывающих заводов
- Расчет падения давления в трубах и каналах
- Обогрев пола с помощью излучателя
- Системы вентиляции и кондиционирования воздуха

## Модуль Молекулярные течения

Данный модуль позволяет разрабатывать и моделировать системы с потоками газа низкого давления в вакуумных системах. В условиях, когда средняя длина свободного пробега молекул газа становится сопоставимой с масштабами длины потока, необходимо учитывать кинетические эффекты. В этом случае стандартные методы моделирования жидкостей не дают достоверный результат.

В модуле Молекулярные течения используется быстрый метод угловых коэффициентов для моделирования свободно-молекулярных течений. Он позволяет моделировать изотермические и не изотермические молекулярные течения, учитывать вклад в тепловой поток от молекул газа. Кроме того, в модуле используется метод дискретных скоростей для моделирования переходных течений

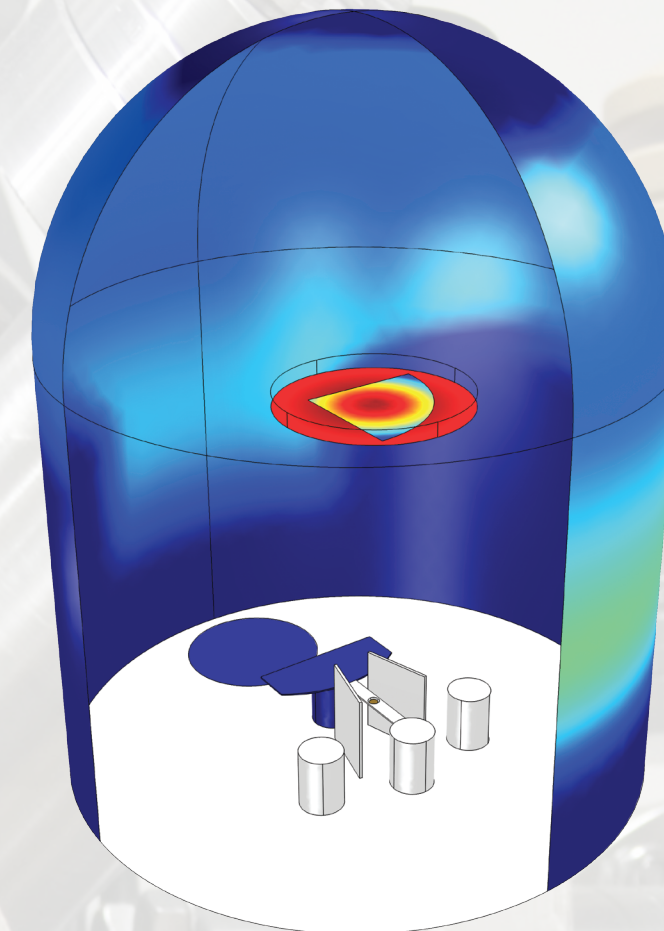
Данный модуль идеально подходит для моделирования вакуумных систем, включая системы, используемые при производстве полупроводников, в ускорителях частиц и масс-спектрометрах. Кроме того, его можно использовать для приложений с каналами малых размеров.

Моделирование с применением средств задания адсорбции (либо десорбции) и осаждения позволяет анализировать такие процессы, как закачка жидкости в резервуары и осаждение пленок. Пользователю достаточно задать сетки только для поверхностей, что значительно упрощает создание сеток для сложных геометрий САПР. Также имеется возможность установить среднюю плотность в любой точке потока.

ТИП ПОТОКА	ЧИСЛО КНУДСЕНА
Безразрывный поток	$Kn < 0,01$
Поток со скольжением фаз	$0,01 < Kn < 0,1$
Переходный поток	$0,1 < Kn < 10$
Свободно-молекулярный поток	$Kn > 10$

Количественной мерой режима течения является число Кнудсена ( $Kn$ ) — отношение средней длины свободного пробега молекулы к геометрическому размеру потока газа.

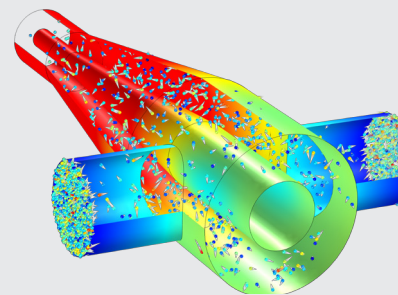
Для моделирования потоков со скольжением фаз и безразрывных потоков применяются модули Микрогидродинамика и Вычислительная гидродинамика. Модуль Молекулярные течения предназначен для точного моделирования свободно-молекулярного потока и переходных режимов течения.



### ОСАЖДЕНИЕ ПЛЕНКИ

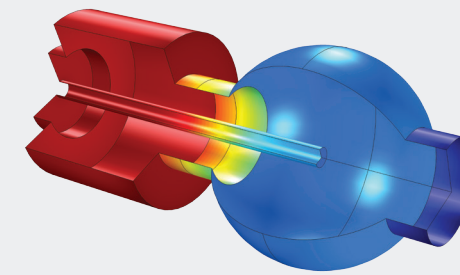
Показана толщина пленки золота, образованной путем испарения, на образце и внутренней поверхности камеры испарителя. В ходе моделирования переходного процесса вычисляется толщина пленки в зависимости от времени.

**РАДИО-ЧАСТОТНЫЙ ОТВЕТВИТЕЛЬ**  
Данная модель вычисляет вероятность передачи через радиочастотный ответвитель.



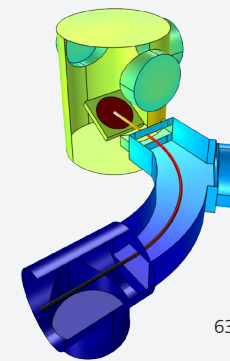
### ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА С ЗАГРУЗОЧНЫМ ШЛЮЗОМ

Динамическая модель адсорбции и десорбции воды в вакуумной системе при низких давлениях. После открытия вентиля загрузочного шлюза в систему поступает вода. Моделируется последующий перенос и откачка воды.



### ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ

В процессе имплантации ионов молекулы газа, истекающие из образца, взаимодействуют с потоком ионов, образуя нежелательные молекулы. Модель вычисляет среднее число истекающих из образца молекул на пути потока ионов. Чем меньше это число, тем более качественной считается система.



## КЛЮЧЕВЫЕ ОСОБЕННОСТИ

- Масс-спектрометры
- Системы обработки материалов
- Потoki в нанопорах
- Ускорители частиц
- Системы обработки полупроводниковых материалов
- Вакуумные системы



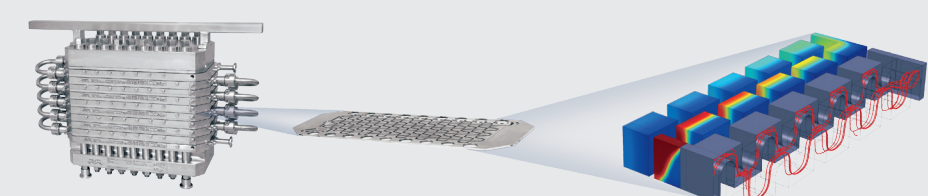
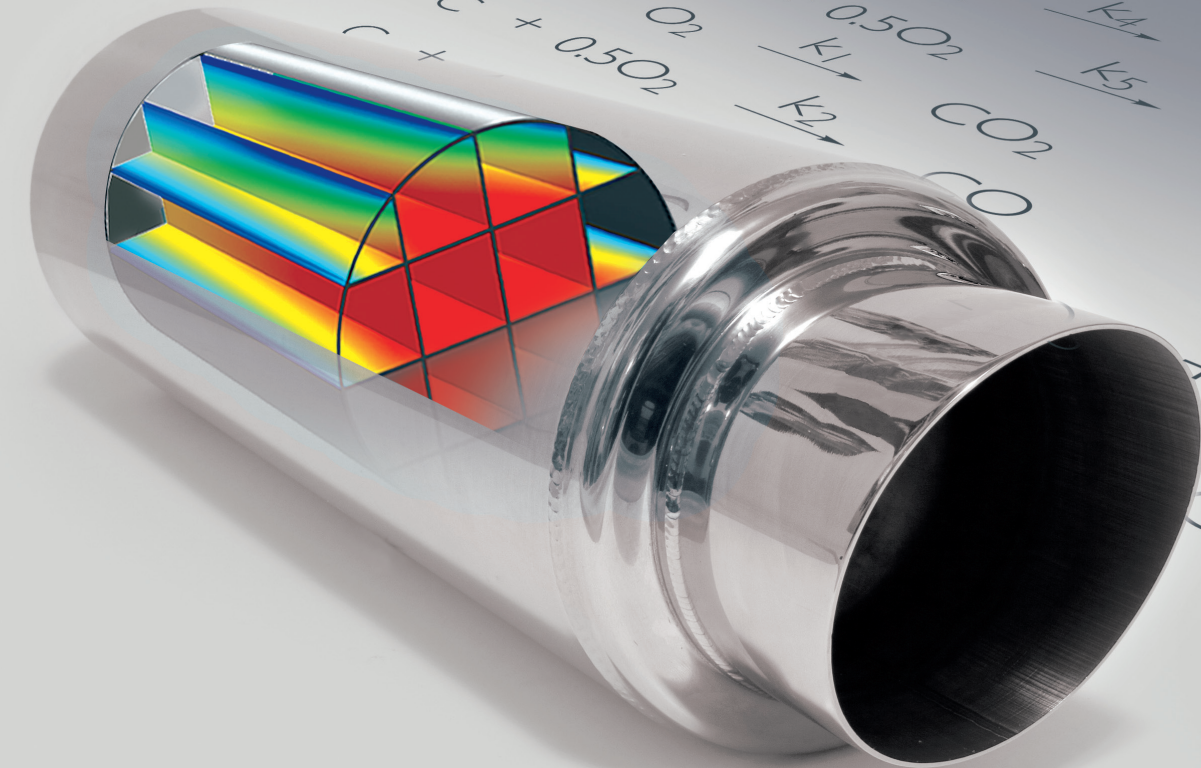
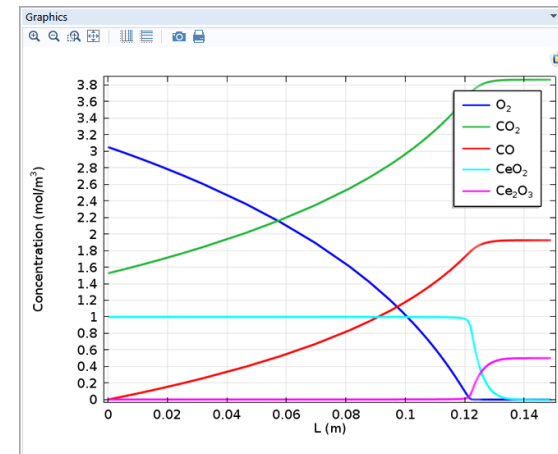
## Модуль Разработка химических реакций

Модуль Разработка химических реакций предназначен для моделирования реакторов, систем фильтрации и сепарации, а также другого оборудования химической отрасли и связанных дисциплин. Он позволяет с легкостью учитывать взаимодействие потоков жидкости и переноса массы и энергии в моделях кинетики химических реакций. Вначале используются формулы реакций для создания моделей реагирующих систем. Затем определяется равновесное распределение материалов и энергии в таких системах. Модуль позволяет моделировать системы, в которых состав и температура зависят от времени и (или) координат.

Функции модуля можно с легкостью объединить с возможностями COMSOL Multiphysics, чтобы создавать модели составных систем и проводить моделирование на основе реакций. Это позволяет добавлять произвольные выражения, функции и условия источника в отношении свойств материалов, переноса и кинетических уравнений реакции. Кроме того, благодаря функции импорта файлов CHEMKIN® из интерфейса Thermodynamics (Термодинамика), можно использовать широкий спектр данных о термодинамических и физических свойствах.

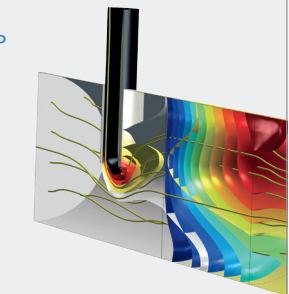
### ФИЛЬТР ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

На стенках системы фильтрации в дизельном двигателе образуется слой сажи, который окисляется в результате каталитических и некаталитических реакций в объеме камеры и на движущейся поверхности. Все реакции зависят от переноса температуры и материалов. На графике показана концентрация монооксида углерода, диоксида углерода и церистой присадки вдоль длины модуля фильтра, что позволяет понять особенности кинетики химических реакций.



**АНОДНЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РЕАКТОР**  
Показаны линии потока и концентрации в анодном электрическом реакторе. Один образец вещества размещается в передней части реактора, другой — в середине.

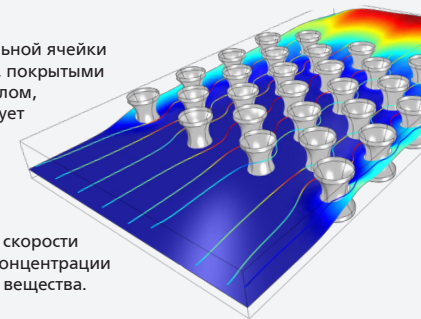
Иллюстрация предоставлена: авторские права на фотографии реактора принадлежат © Alfa Laval AB, Тумба, Швеция.



**ПОРИСТЫЙ РЕАКТОР**  
Через два входных отверстия в реактор подаются два образца, затем они вступают в реакцию в пористой части реактора. Линиями показан поток и изоповерхности концентрации реагентов и конечных веществ.

### БИОДАТЧИК

Модель измерительной ячейки с микростолбцами, покрытыми активным материалом, который способствует адсорбции анализируемого вещества. Результаты моделирования показывают линии скорости и распределение концентрации адсорбированного вещества.



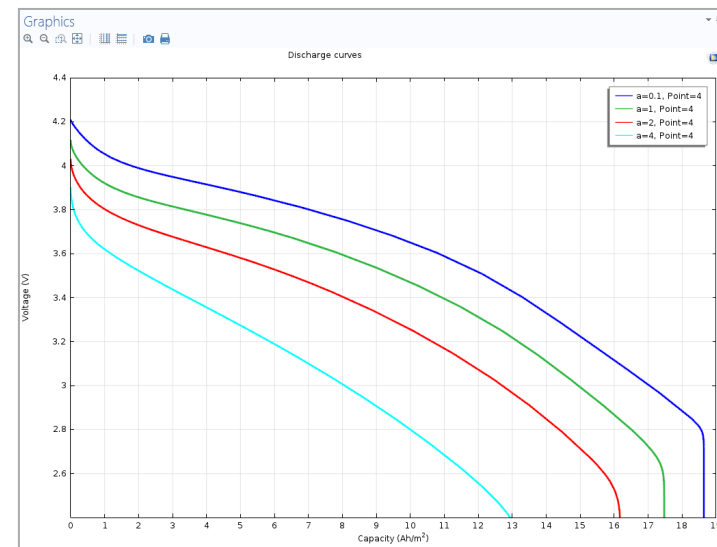
## КЛЮЧЕВЫЕ ОСОБЕННОСТИ

- Адсорбция, абсорбция и отложение веществ
- Реакторы циклического действия, с пульсирующим потоком и корпусные
- Биохимия и пищевые технологии
- Каталитические конвертеры и преобразователи
- Хроматография и электрофорез
- Циклоны, сепараторы, скрубберы и выщелачивающие агрегаты
- Обработка выхлопных газов и снижение уровня вредных выбросов
- Устройства для ферментации и кристаллизации
- Фильтрация и осаждение
- Ламинарные и турбулентные потоки
- Микрогидравлические устройства и устройства типа «лаборатория на чипе»
- Микрокомпонентный и мембранный перенос
- Фармацевтический синтез
- Производство пластмасс и полимеров
- Предварительные камеры сгорания и двигатели внутреннего сгорания
- Реакторы со слоем насадки
- Моделирование кинетики реакций
- Расчет размеров и оптимизация реактора
- Обработка полупроводников и химическое осаждение из паровой фазы
- Поверхностная кинетика
- Перенос молекул путем диффузии, конвекции и миграции ионов

## Модуль Аккумуляторы и топливные элементы

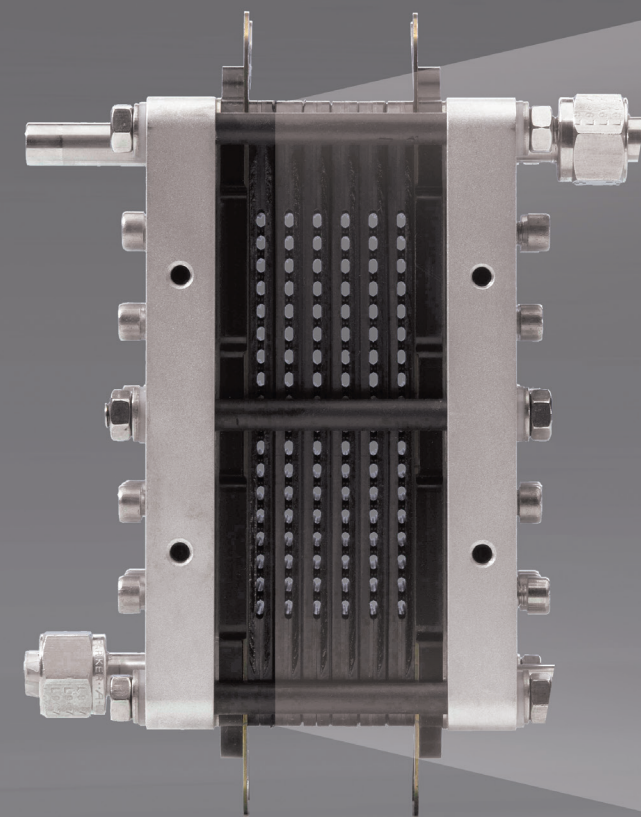
Данный модуль позволяет с легкостью моделировать базовые электрохимические свойства в электродах и электролитах литий-ионных и никель-металлгидридных аккумуляторов, твердооксидных топливных элементов и топливных элементов с мембраной протонного обмена. Он дает возможность быстро и точно исследовать их характеристики при использовании различных материалов, форм и в разных рабочих условиях.

Модуль содержит специализированные интерфейсы для изучения первичного, вторичного и третичного распределения тока в электрохимических элементах. Благодаря учету реакций на электродах в сочетании с явлениями переноса в элементе, можно в полной мере описать кинетику электродов, включая активационное и концентрационное перенапряжение. Элемент может содержать твердотельные или пористые электроды с электролитами низкой или высокой концентрации. Более того, COMSOL Multiphysics позволяет одновременно учитывать влияние электрохимических реакций и переноса массы в аккумуляторах и топливных элементах, а также другие явления, например, излучение от поверхности к поверхности или турбулентные потоки.



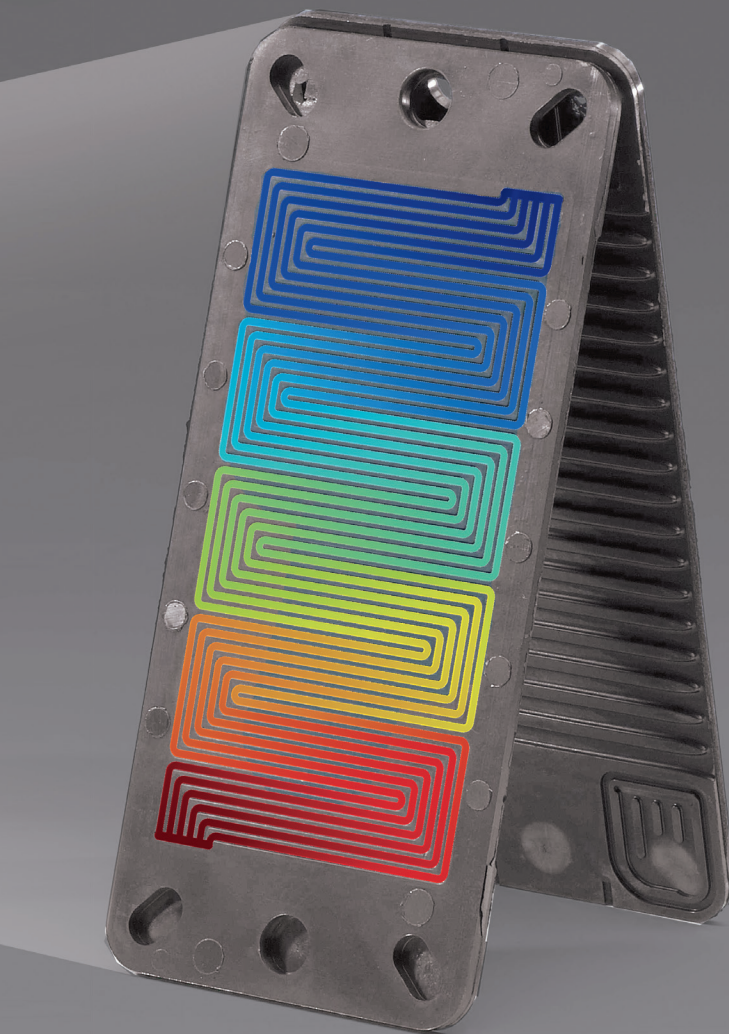
### ЛИТИЙ-ИОННЫЙ АККУМУЛЯТОР

Кривые разряда для различных токов разряда в литий-ионном аккумуляторе. Кривые соответствуют полному разряду за 10 часов ( $a = 0,1$ ), 1 час ( $a = 1$ ), 30 минут ( $a = 2$ ), 15 минут ( $a = 4$ ).



ТОПЛИВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ НА ОСНОВЕ ПРОТОНООБМЕННОЙ МЕМБРАНЫ  
Модель показывает концентрацию водорода в каналах биполярной пластины с учетом краевых эффектов.

Модель предоставлена: Christian Siegel, Center for Fuel Cell Technology (ZBT GmbH), Дуйсбург, Германия.



### ТВЕРДООКСИДНЫЙ ТОПЛИВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ

Распределение плотности тока в твердооксидном топливном элементе. Модель учитывает сохранение массы на аноде и катоде, сохранение момента импульса в газовых каналах, поток газа в пористом электроде, баланс потока ионов оксида и баланс потока электронов.

### АККУМУЛЯТОРНАЯ БАТАРЕЯ

На иллюстрации показано распределение температур в каналах охлаждения и аккумуляторах автомобильной аккумуляторной батареи. Модель подробно описывает электрохимические параметры батарей и позволяет провести температурный анализ аккумуляторов и компонентов батареи, а также изучить поток жидкости в каналах системы охлаждения.

## КЛЮЧЕВЫЕ ОСОБЕННОСТИ

- Топливные элементы
  - Щелочные
  - Метаноловые
  - На расплавленных карбонатах
  - С протонообменной мембраной
- Аккумуляторы
  - Свинцово-кислотные
  - Литий-ионные
  - Никель-гидридные
- Проточные аккумуляторы
  - Свинцовые
  - Ванадиевые

## ВОЗМОЖНОСТИ

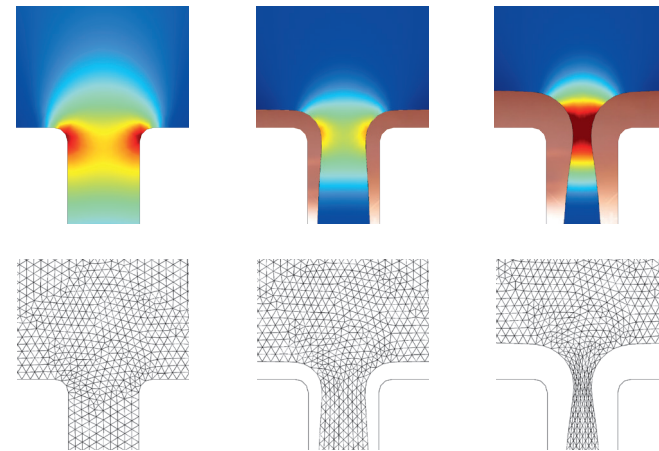
- Механизмы старения в результате структурных, тепловых и химических взаимодействий
- Углубленный электрохимический анализ элементов
- Полный анализ переходных систем, включая емкость двойного слоя
- Готовые средства анализа кинетики электродов и старения методами импеданс-спектроскопии
- Распределение первичных, вторичных и третичных токов
- Короткое замыкание в батареях
- Регулирование температуры
- Потери тепла в батареях

# Модуль Электроосаждение

Моделирование и имитация — малозатратные методы, позволяющие изучать, оптимизировать и контролировать процессы электроосаждения. Типовая имитация показывает распределение тока по поверхности электродов, а также толщину и состав осаждаемого слоя. Моделирование используется для изучения таких важных параметров, как геометрия ванн, состав электролита, кинетика реакций на электродах, рабочие значения тока и напряжения, а также влияние температуры.

Модуль Электроосаждение позволяет применить возможности COMSOL Multiphysics для моделирования процессов электроосаждения. Доступны удобные интерфейсы физик для моделирования первичного, вторичного и третичного распределения тока, а точные геометрические представления формирования слоя электроосаждения вносятся в виде параметров модели. С помощью данного модуля можно также моделировать форму электрода с подвижными границами.

Модуль Электроосаждение имеет множество сфер применения: осаждение металлов на деталях электрического и электронного оборудования; защита от коррозии и износа; нанесение декоративных покрытий; электроформовка деталей малой толщины и сложной формы, а также электровосстановление.



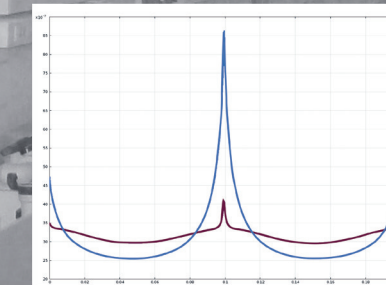
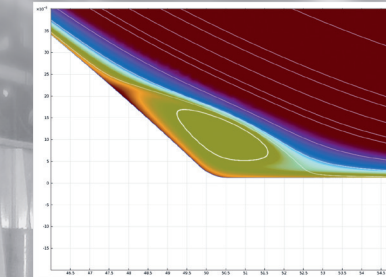
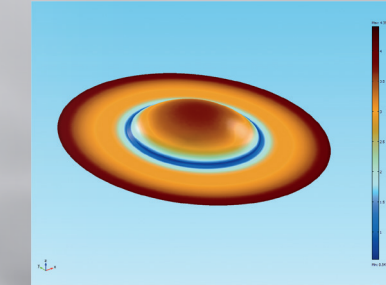
### ЭЛЕКТРООСАЖДЕНИЕ

Модель демонстрирует влияние подвижной границы на электроосаждение меди в печатных платах. Модель является динамической, результаты моделирования показывают сужение устья канала ввиду неоднородного отложения меди.

### ЭЛЕКТРООСАЖДЕНИЕ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

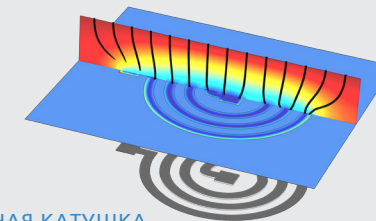
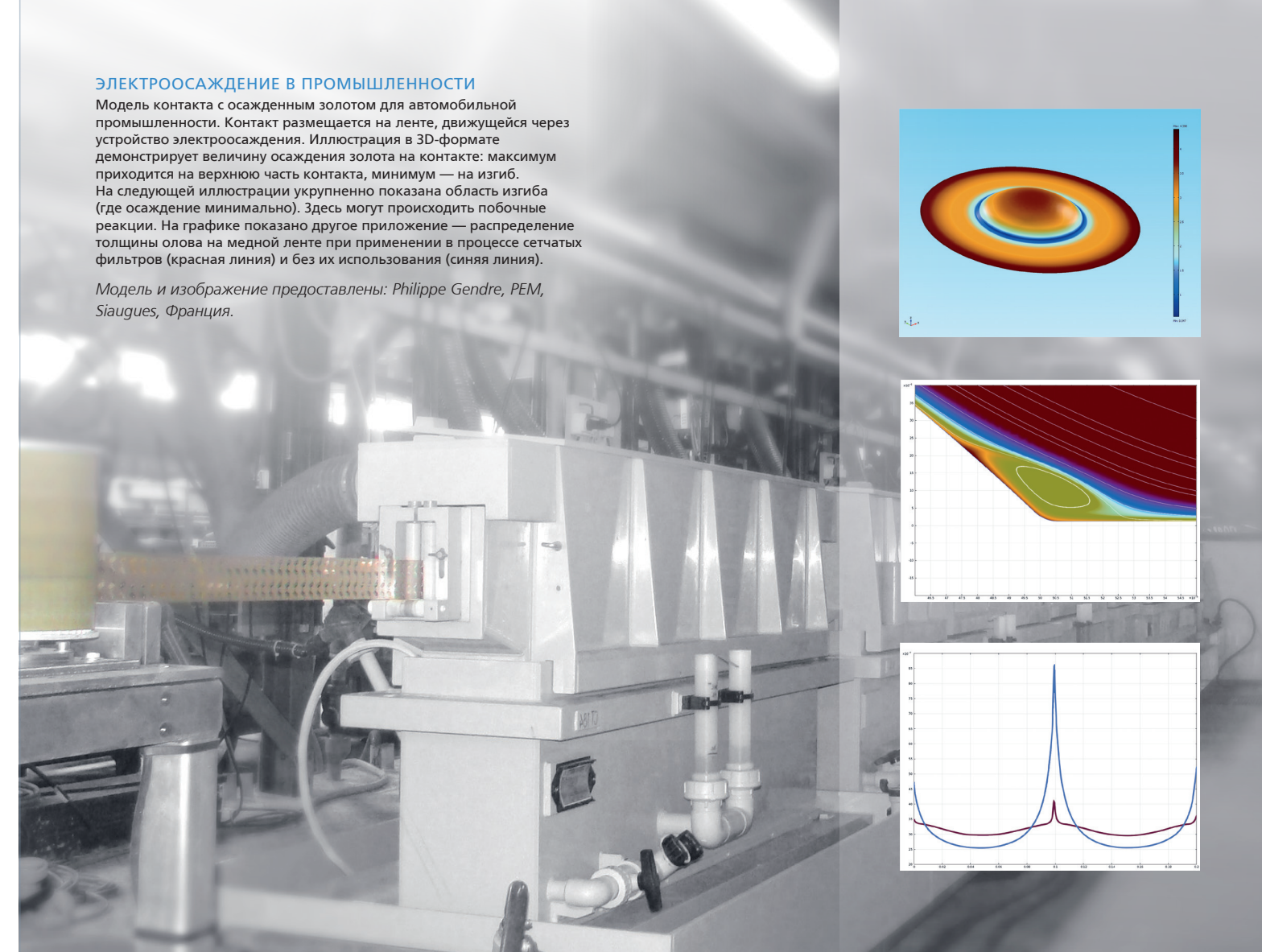
Модель контакта с осажденным золотом для автомобильной промышленности. Контакт размещается на ленте, движущейся через устройство электроосаждения. Иллюстрация в 3D-формате демонстрирует величину осаждения золота на контакте: максимум приходится на верхнюю часть контакта, минимум — на изгиб. На следующей иллюстрации укрупненно показана область изгиба (где осаждение минимально). Здесь могут происходить побочные реакции. На графике показано другое приложение — распределение толщины олова на медной ленте при применении в процессе сетчатых фильтров (красная линия) и без их использования (синяя линия).

Модель и изображение предоставлены: Philippe Gendre, PEM, Siaugues, Франция.



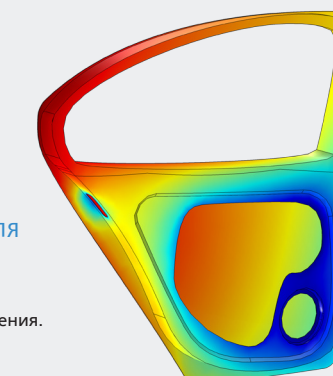
### КЛЮЧЕВЫЕ ОСОБЕННОСТИ

- Анодирование
- Электроосаждение хрома
- Хромирование
- Защита от коррозии
- Нанесение покрытия электроосаждением
- Электрохимическая обработка
- Нанесение покрытия электроосаждением
- Электролитическое окрашивание
- Электроосаждение в горнодобывающей промышленности
- Электроосаждение в производстве печатных плат
- Гальванопластика
- Гальванопокрытие
- Функциональное гальванопокрытие
- Износостойкие покрытия



### ИНДУКЦИОННАЯ КАТУШКА

Модель электроосаждения на индукционной катушке с применением тонкой фоторезистивной маски.

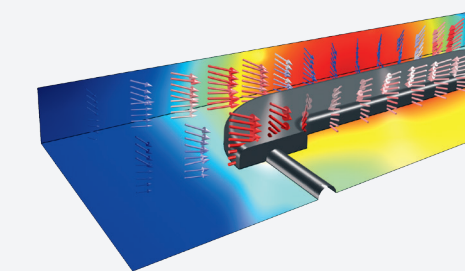


### ДВЕРЬ АВТОМОБИЛЯ

Расчет толщины слоя краски, нанесенной на дверь автомобиля методом электроосаждения.

### НАНЕСЕНИЕ ДЕКОРАТИВНЫХ ПОКРЫТИЙ

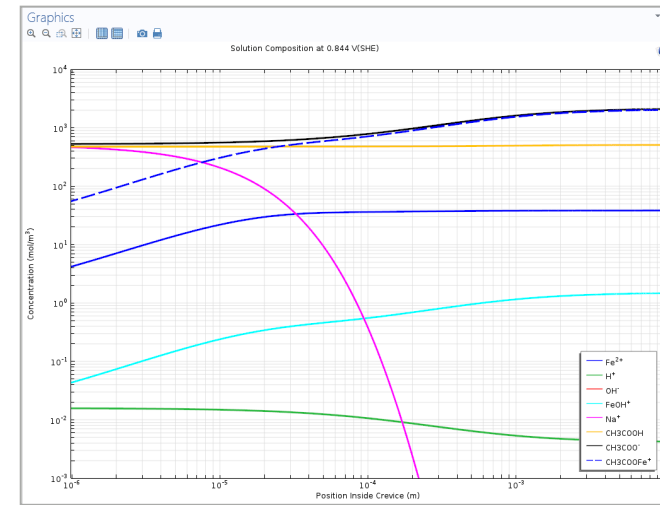
В этом примере моделируется плоский растворимый анод. В роли катода выступает мебельная фурнитура, на которую методом электроосаждения наносится декоративный узор. На иллюстрации показана толщина нанесенного на катод слоя и узор, полученный растворением анодной поверхности. При построении модели предполагалось, что распределение вторичного тока для анода и катода соответствует модели электродной кинетики Батлера-Волмера.



## Модуль Коррозия

Данный модуль предназначен для моделирования электрохимических процессов коррозии и средств защиты металлических структур от коррозии. С помощью готовых интерфейсов физик пользователи могут создавать одномерные, двумерные и трехмерные модели, чтобы изучать явления коррозии и других реакций в электролитах и на металлических поверхностях. При расчете моделей учитывается перенос ионов и нейтральных молекул раствора, токи проводимости в металлической структуре и другие явления, например, потоки жидкости и теплопередача.

Модуль позволяет анализировать процессы коррозии, находить способы избежать ее появления, а также разрабатывать и оптимизировать средства защиты от коррозии. Моделирование можно осуществлять в микромасштабах (например, при щелевой и точечной коррозии, когда локальные концентрации веществ существенно влияют на реакции переноса заряда), и в более крупных масштабах (например, для анализа размещения протекторных анодов на конструкции). В некоторых случаях требуется выполнить моделирование в двух масштабах одновременно, и это также можно осуществить в модуле Коррозия.

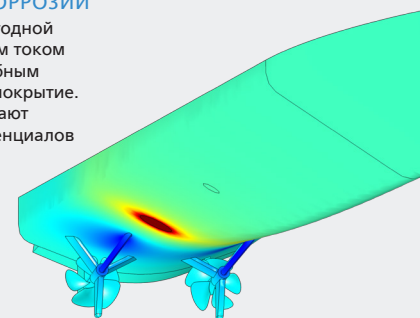


### ЩЕЛЕВАЯ КОРРОЗИЯ

Показано распределение концентрации железа в щели, заполненной раствором уксусной кислоты и ацетата натрия при 0,844 В (стандартный водородный электрод).

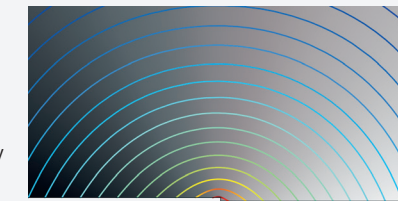
### ОСЛАБЛЕНИЕ КОРРОЗИИ

Моделирование катодной защиты наложенным током корпуса судна с гребным винтом, имеющим покрытие. Результаты показывают распределение потенциалов в электролите.

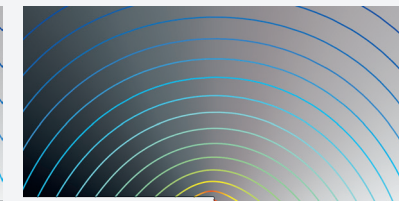


### ГАЛЬВАНИЧЕСКАЯ КОРРОЗИЯ

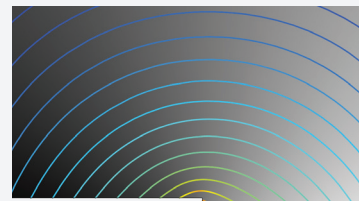
Коррозия магниевого сплава (AE44), соединенного с мягкой сталью в водном растворе соли. Учитывается удаление материала электрода, поскольку этот процесс важен в таких моделях.



t=0 часов



t=28 часов



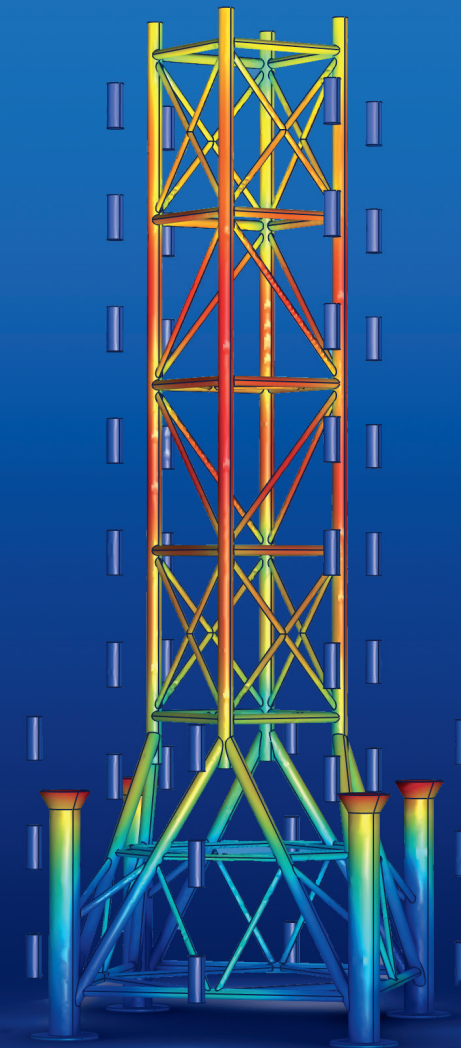
t=72 часа

## КЛЮЧЕВЫЕ ОСОБЕННОСТИ

- Анодная защита
- Коррозия в атмосфере
- Уравнение Батлера-Волмера
- Катодная защита
- Коррозия
- Защита от коррозии
- Щелевая коррозия
- Гальваническая коррозия
- Катодная защита наведенным током (ICCP)
- Уравнение Нернста-Планка
- Пассивация
- Точечная коррозия
- Распределение первичных токов
- Распределение вторичных токов
- Уравнение Тафеля
- Распределение третичных токов

### ЗАЩИТА ОТ КОРРОЗИИ

Буровая вышка, погруженная в морскую воду, защищена с помощью 40 протекторных алюминиевых анодов. В ходе предварительного моделирования было определено оптимальное размещение анодов для максимальной защиты от коррозии. На иллюстрации показан потенциал в электролите на поверхности структуры.

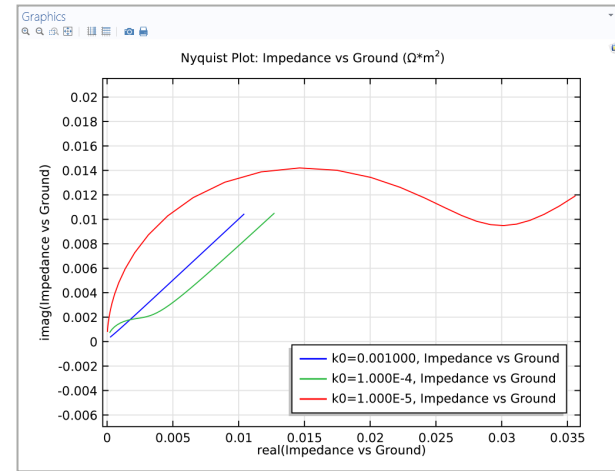


## Модуль Электрохимия

Данный модуль расширяет возможности разработки, исследования и оптимизации электрохимических систем посредством точного моделирования. Он будет полезен для исследователей, занятых в лабораториях, и инженеров-электрохимиков, работающих на производстве. Функции моделирования механизмов электрохимических реакций, массобмена и распределения плотности тока позволяют создавать эффективные модели для приложений электролиза, электродиализа, электроанализа, электрохимических датчиков и биоэлектрохимии.

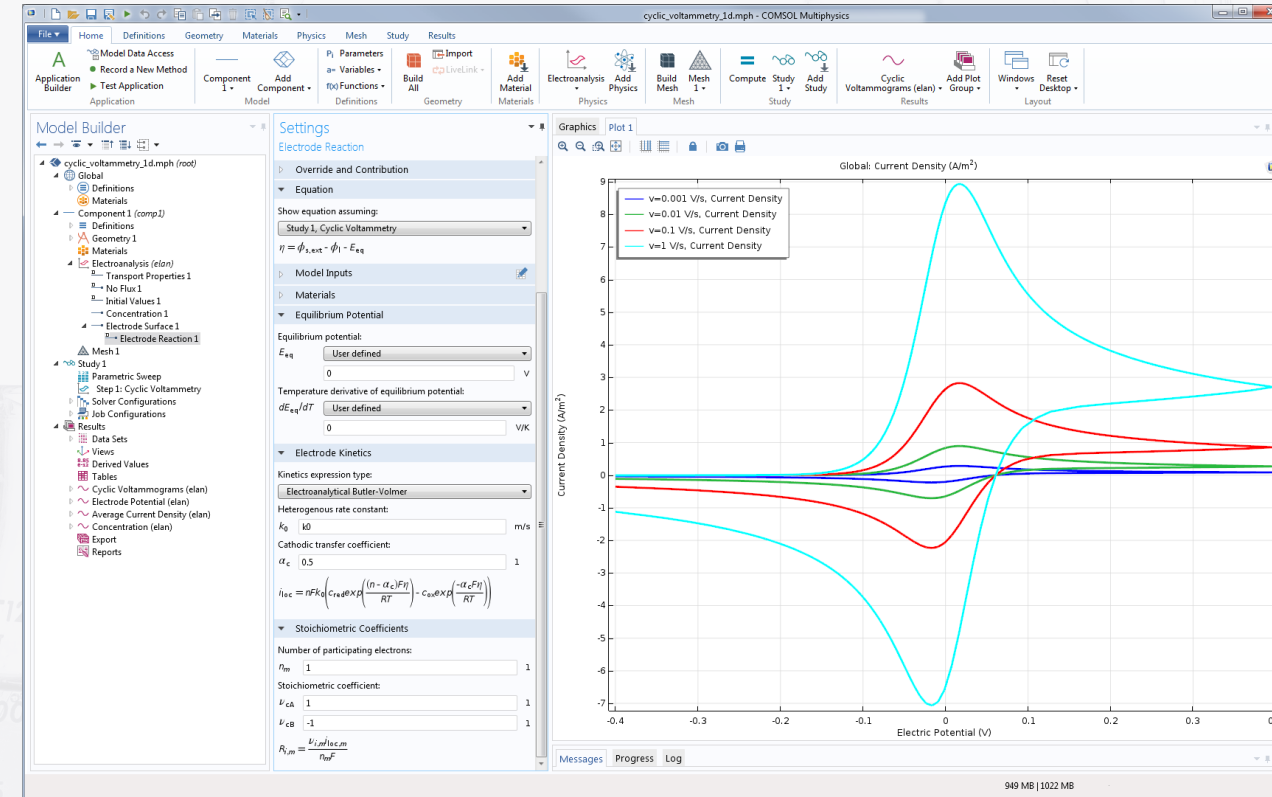
С помощью специальных интерфейсов модуля Электрохимия можно задавать характеристики вольтамперометрии, потенциометрии, электрохимического импеданса и кулонометрии. Объединив результаты опытов и моделирования, можно определить такие свойства, как плотность обменного тока, коэффициенты переноса заряда, области активной поверхности, коэффициенты диффузии и механизмы реакции.

В модуле Электрохимия реализованы уравнения Нернста-Планка и Батлера-Волмера, что позволяет моделировать системы с первичным, вторичным и третичным распределением тока. С помощью модуля Электрохимия можно решать широкий спектр прикладных задач. Это возможно благодаря наличию интерфейсов для электрических токов, течений в свободных пористых средах, теплопередачи, поверхностных гомогенных химических реакций, переноса материалов в растворах и пористых средах.



### ИМПЕДАНСНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ

Электрохимическая импедансная спектроскопия (EIS) — распространенный метод электрохимического анализа. В ходе моделирования менялась частота переменной части электродного потенциала и регистрировалась плотность потока электродного тока. Результаты позволяют проанализировать параметры взаимодействия электрода и электролита, а также свойства массобмена на электролите.

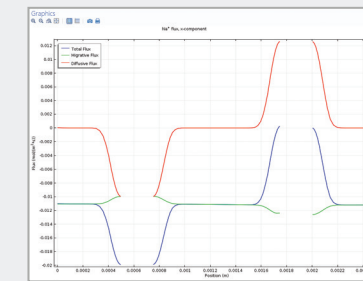


### ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Циклическая вольтамперометрия — распространенный метод электрохимического анализа. В ходе моделирования изменяется в широких пределах потенциал на рабочем электроде, при этом регистрируется значение тока. График характеризует реактивность и параметры массобмена в электролите.

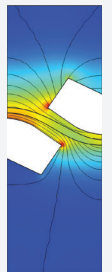
### ЭЛЕКТРОДИАЛИЗ

Моделирование переноса поваренной соли из разбавленного водного раствора в другой, концентрированный поток. Этот процесс используется для опреснения технологических потоков, обработки продуктов питания и соков, в биомедицинских системах.



### ЩЕЛОЧНО-ХЛОРНАЯ МЕМБРАННАЯ ЯЧЕЙКА

Современные технологии разработки мембранных ячеек позволяют улучшить внутреннюю конвекцию и снизить активные потери. Качественные мембраны значительно повышают плотность тока при малом увеличении напряжения в ячейке. При разработке современной мембранной ячейки важно учитывать распределение плотности тока на электродных поверхностях. Эта модель описывает распределение плотности токов в практическом размещении анодов и катодов в щелочно-хлорной мембранной ячейке.



## КЛЮЧЕВЫЕ ОСОБЕННОСТИ

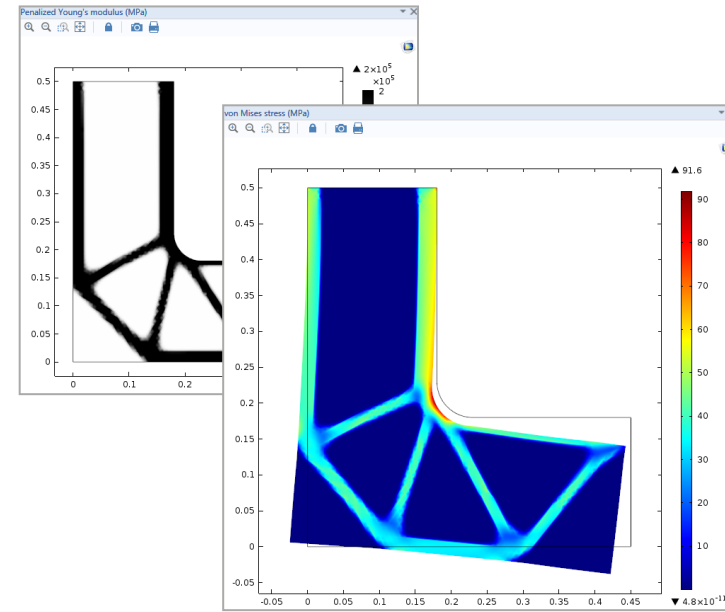
- Биоэлектрохимия
- Электролиз хлора и щелочей
- Контроль электрохимических реакций в биомедицинских имплантатах
- Опреснение морской воды
- Электроанализ
- Электрохимические датчики
- Электродиализ
- Электролиз
- Электролитическая очистка отходов
- Датчики газа
- Датчики глюкозы
- Производство водорода и кислорода
- Контроль pH жидких пищевых продуктов
- Производство сверхчистой воды

## Модуль Оптимизация

В любой технической дисциплине, получив модель изделия или процесса, специалист захочет заняться его дальнейшим совершенствованием. Модуль Оптимизация можно использовать в сочетании со всеми продуктами семейства COMSOL Multiphysics: это многоцелевой интерфейс для поиска оптимальных решений технических задач. Любые исходные параметры модели (геометрические характеристики, свойства и распределение материалов) можно рассматривать как переменные, а любой результат моделирования — как критерий отбора.

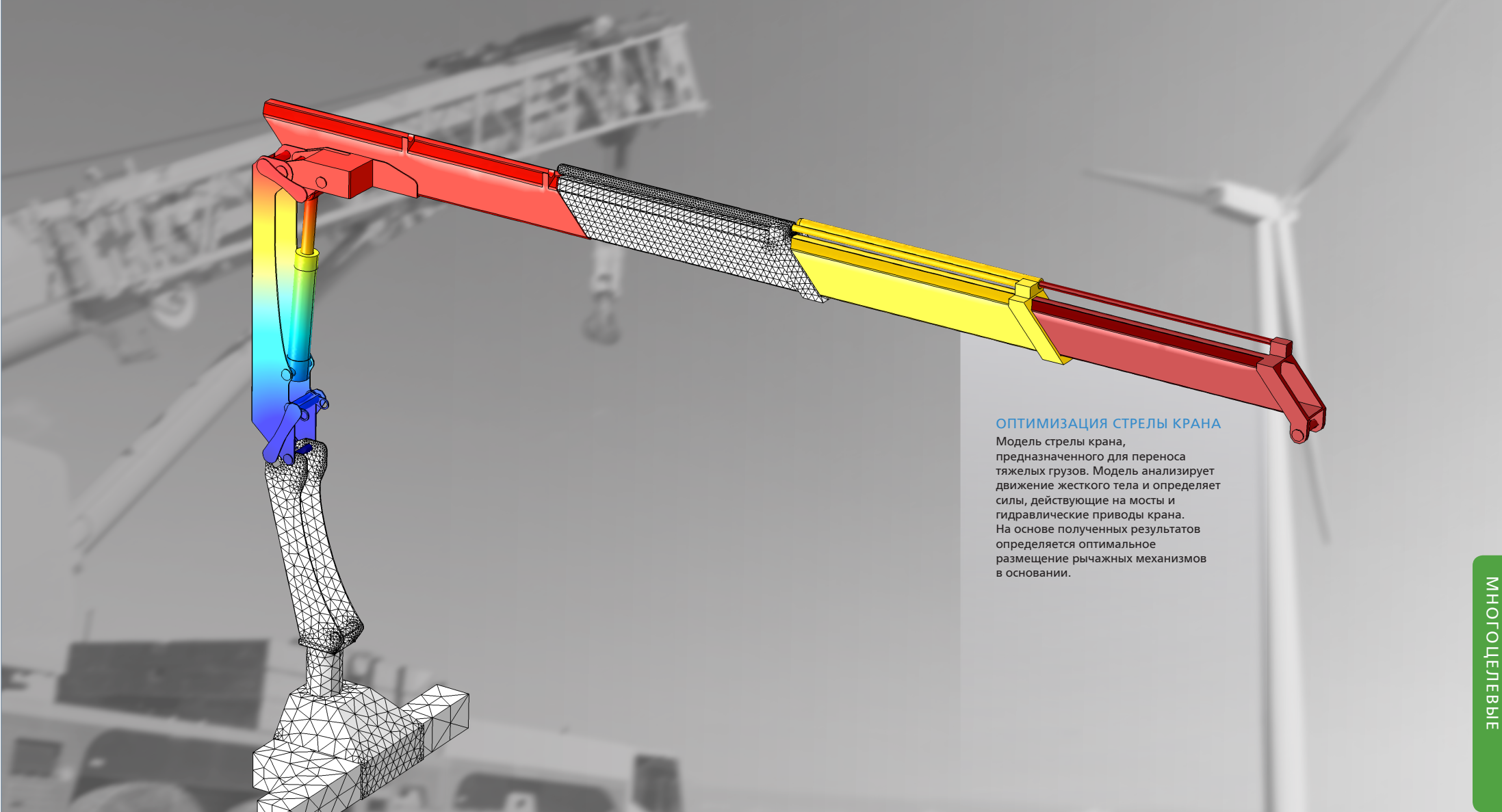
Для решения широкого спектра задач оптимизации доступны методы как на основе производных, так и без применения производных. Модуль поддерживает следующие методы на основе производных: SNOPT, метод подвижных асимптот (MMA) и метод Левенберга-Марквардта. Имеются методы оптимизации, не основанные на производных: координатный поиск, симплексный алгоритм Нелдера-Мида, граничная оптимизация квадратичной аппроксимацией (BOBYQA) и условная оптимизация линейной аппроксимацией (COBYLA).

Модуль Оптимизация позволяет решать задачи оптимизации формы, размера и топологии, обратные задачи (например, оценку параметров), а также стационарные и динамические задачи. Многопрофильный интерфейс этого модуля можно использовать в сочетании с любыми продуктами COMSOL.



### ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ

Модель SIMP (модель твердого изотропного материала с ограничениями) применяется для оптимизации топологии конструкции — минимизации массы при минимальной допустимой жесткости в 40 % (значение было получено в результате анализа твердого тела). Это позволяет снизить массу и стоимость конструкции, сохраняя необходимую устойчивость к нагрузкам, а значит, способствуя эффективному расходу материалов.

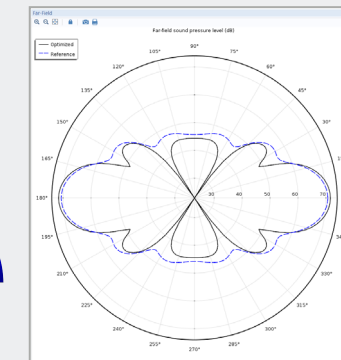
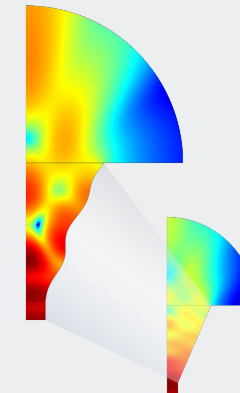


### ОПТИМИЗАЦИЯ СТРЕЛЫ КРАНА

Модель стрелы крана, предназначенного для переноса тяжелых грузов. Модель анализирует движение жесткого тела и определяет силы, действующие на мосты и гидравлические приводы крана. На основе полученных результатов определяется оптимальное размещение рычажных механизмов в основании.

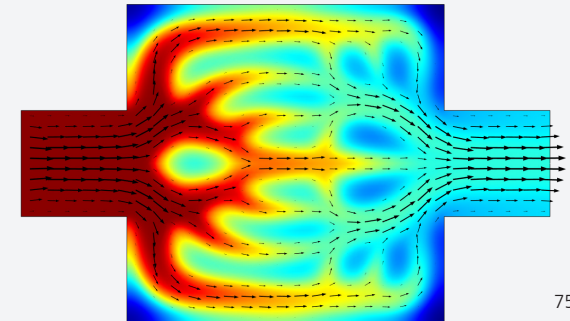
### ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМЫ РУПORA

Рупор изначально имел форму осесимметричного конуса с прямой образующей. Эта конструкция была оптимизирована по уровню звукового давления в дальней зоне. На иллюстрации показана новая форма внутренней границы и оптимизированное звуковое давление в дальней зоне по сравнению с исходной формой.



### ОПТИМИЗАЦИЯ УСТРОЙСТВА РЕАКТОРА

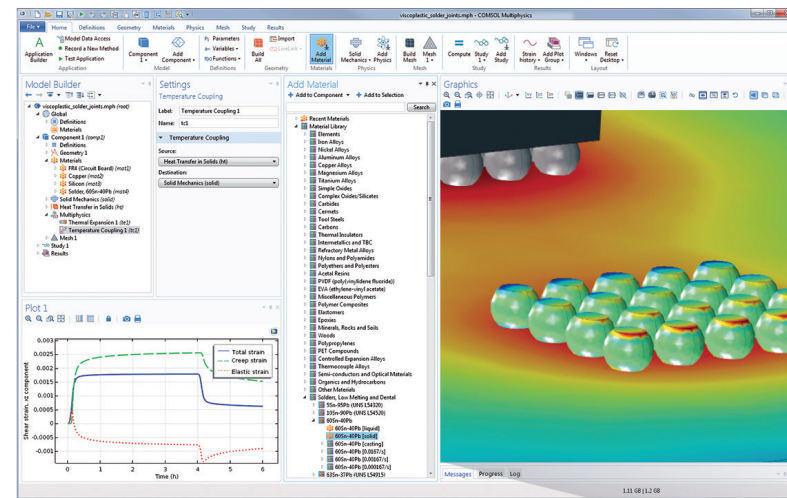
В модели вычисляется оптимальное распределение катализатора, чтобы достичь максимальной скорости реакции при заданной разности полных давлений на нижней плоскости.



## Библиотека материалов

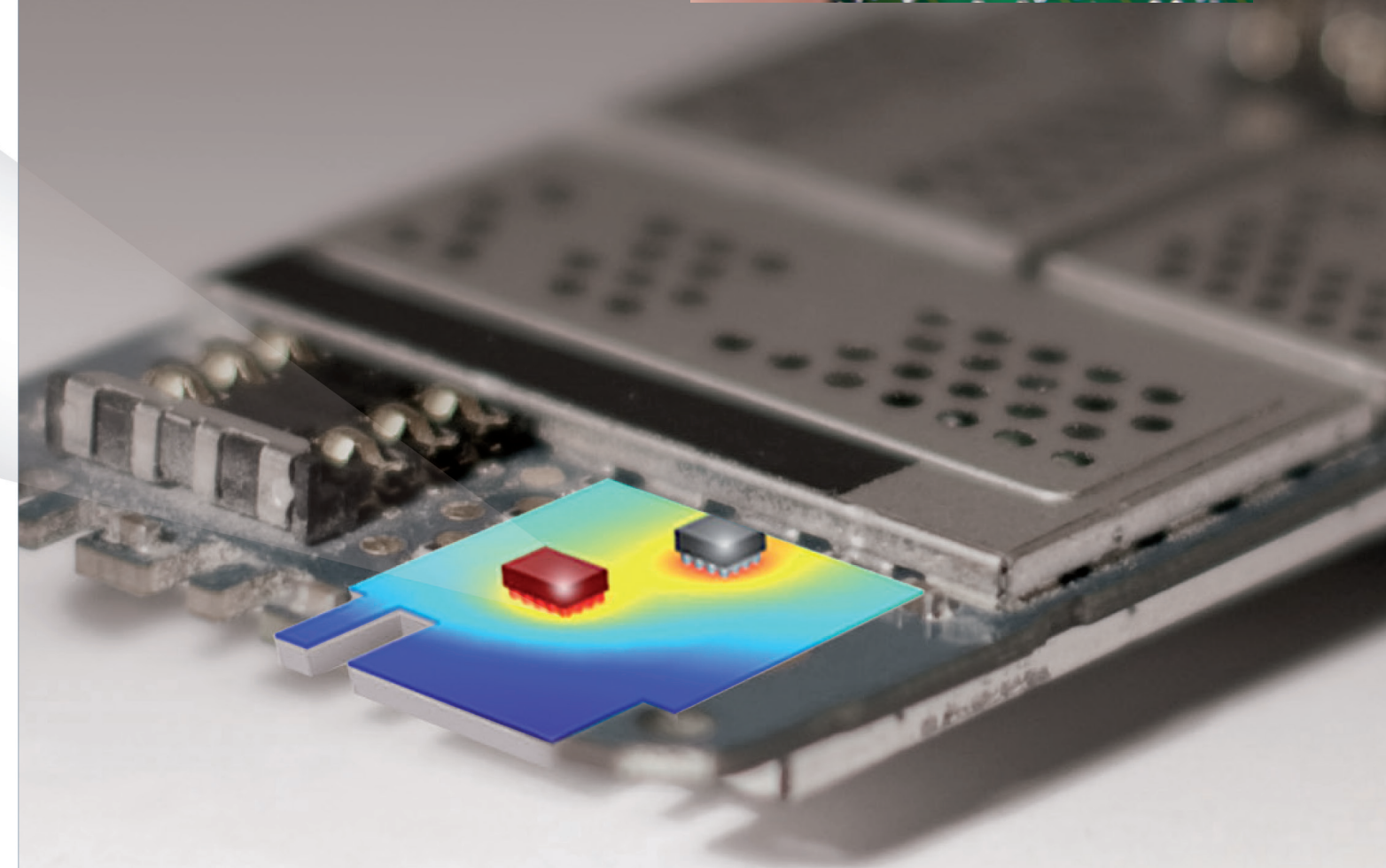
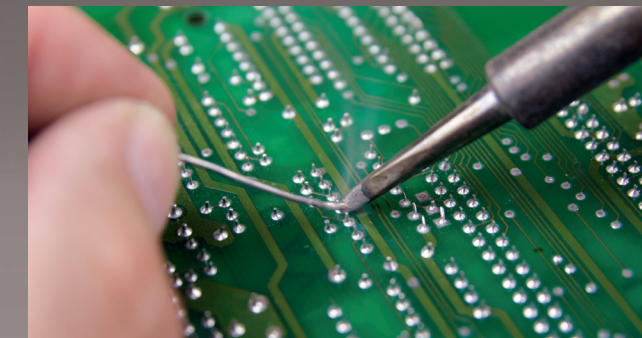
COMSOL Multiphysics позволяет полностью контролировать определения и использование свойств материалов в построителе моделей и браузере материалов. Браузер материалов позволяет централизованно управлять всеми материалами, входящими в состав модели, и расширяется за счет библиотеки материалов.

Библиотека содержит данные по 2700 материалам, включая химические элементы, минералы, металлические сплавы, теплоизоляционные, полупроводниковые и пьезоэлектрические материалы. Для каждого материала представлены функциональные зависимости свойств — до 31 основного свойства, зависящих от определенной переменной (обычно от температуры). Определения функций можно проверять, дополнять и изменять, а также строить для них графики. Также их можно использовать для моделирования сочетаний любых физических параметров, которые также зависят от переменной функции свойства в мультифизическом моделировании.



### СПАЙКИ

В этом примере изучается вязкопластичная ползучесть в спайках при тепловой нагрузке в процессе монтажа двух микросхем на печатной плате сотового телефона. Печатная плата состоит из двух слоев: тонкого слоя меди и более толстого слоя материала FR4. Микросхемы изготовлены из кремния. Зависящие от температуры свойства материалов модели взяты из библиотеки материалов. На графике хорошо видна пластическая деформация, возникающая примерно через 40 секунд нагрузки. На иллюстрации, полученной в результате моделирования, показано распределение температур в печатной плате и пластическая деформация спаек.



## ДОСТУПНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

- Ацеталь, поливинилиденфторид и этиленвинилацетат
- Сплавы алюминия и меди
- Карбиды, металлокерамика и инструментальные стали
- Углеродные материалы и теплоизоляция
- Чугун и формовочные материалы
- Сплавы с заданным тепловым расширением и сплавы для термопар
- Эластомеры и эпоксидные смолы
- Простые вещества
- Сплавы железа и никеля
- Стекло, метглас, нитриды и соединения бериллия
- Интерметаллические соединения, теплозащитные покрытия и тугоплавкие металлы
- Композитные материалы с металлическими и керамическими матрицами
- Сплавы магния и титана
- Минералы, скальный грунт, мягкие грунты и древесина
- Полимеры и полимерные композитные материалы
- Оксиды
- Полиамиды и полиэфиры
- Полипропилены и полиэтилены
- Сплавы с высоким сопротивлением и магнитные сплавы
- Соли, топливные элементы, аккумуляторные батареи и электрокерамика
- Полупроводники, оптические и прочие материалы
- Силициды и бориды
- Припои, стоматологические сплавы и сплавы кобальта

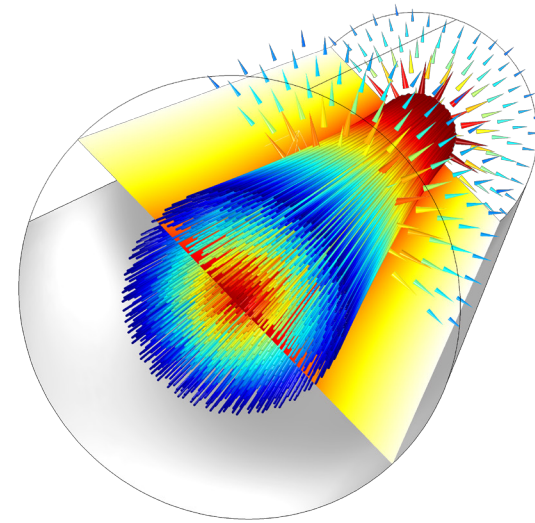
## Модуль Трассировка частиц

Данный модуль расширяет функциональность среды COMSOL Multiphysics для расчета траектории частиц в жидкости или электромагнитном поле, включая взаимодействие частиц между собой, с текущей средой или полем. Модуль легко интегрируется с любым специализированным модулем для расчета полей, управляющих движением частиц, что позволяет применять дополнительные средства моделирования.

Пользователь может добавлять встроенные уравнения для массы и температуры частиц, чтобы учесть массовый и энергетический обмен между частицами и средой. С помощью вспомогательных переменных определяются другие количественные параметры, например, спин частиц. Пользователь может задавать выражения для граничных условий, изменяющих поведение частиц; например, частица может прекратить движение, исчезнуть, отразиться (поддерживается зеркальное и диффузное отражение) или изменить траекторию. Имеется возможность сделать взаимодействие частицы и стены условным, задав логическое выражение или указав вероятность прилипания. В расчет можно включить эмиссию вторичных частиц, причем эмиссия может зависеть от скорости и энергии падающей частицы. Частицы могут иметь конечную массу или нулевую массу. Движение управляется законами классической механики (описываемой законами Ньютона, лагранжианом или гамильтонианом). Частицы могут испускаться из любого элемента сетки, а излучение можно описывать равномерным распределением, вспомогательной сеткой или пользовательским выражением. Можно также модифицировать базовые математические параметры для создания специализированных моделей.

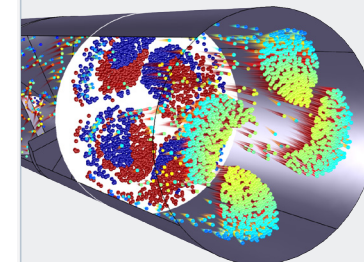
### КАМЕРА ХОГФ

Модуль Трассировка частиц позволяет задавать источники частиц множеством способов. Частицы могут испускаться с поверхности впуска или из определенной области. Их начальное положение задается конечноэлементной сеткой или пользовательской функцией плотности. Кроме того, источниками частиц могут служить узлы обычной сетки точек. Доступно также множество способов задания начального значения скорости: пользовательское выражение, заданная нормальная скорость и распределение Максвелла. Область испускания частиц можно ограничить конусом, сферой или полусферой. В этом примере лучи частиц, поступающие в камеру ХОГФ, заданы в виде набора точек, испускающих конусы частиц. Цветом траектории обозначена скорость частиц. Изначально частицы движутся по траекториям, близким к линейным (в соответствии с начальными векторами скорости). Постепенно они теряют момент импульса, и на них все больше влияет сила сопротивления со стороны поля.



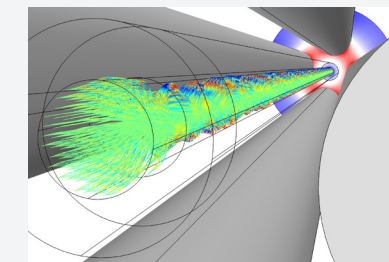
### ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЧАСТИЦЫ С ПОЛЕМ

Для моделирования луча электронов, отклоняющегося ввиду собственного пространственного заряда, используется интерфейс Charged Particle Tracing (Трассировка заряженных частиц). Итеративная процедура позволяет осуществлять самосогласованный расчет траекторий частиц и потенциала луча. На этом изображении цветом обозначено радиальное отклонение каждой частицы от начальной позиции, график показывает потенциал луча, а векторное поле представляет действующую на электрон силу, обусловленную потенциалом луча.



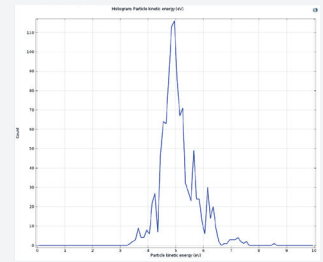
### ЛАМИНАРНЫЙ СМЕСИТЕЛЬ

В статических смесителях жидкость прокачивается через трубу, в которой размещены неподвижные лопасти, обеспечивающие смешение при малых потерях давления. В этом примере траектории частиц с «хвостами» показывают скорость частиц в выбранные моменты времени. Сечения Пуанкаре (выделены красным и синим) показывают распределение частиц в различных поперечных сечениях смесителя. Движение диспергированной фазы определяется в большей степени конвекцией, нежели диффузией, поэтому эффективность смесителя проще всего оценить с помощью трассировки частиц.



### МАССОВАЯ СПЕКТРОМЕТРИЯ

Моделируются траектории ионов в квадрупольном масс-спектрометре. Электрические поля, воздействующие на ионы, имеют компоненты постоянного и переменного тока, сочетание которых является базовой характеристикой спектрометра. На графике показана функция распределения энергии ионов на приемнике спектрометра.



## КЛЮЧЕВЫЕ ОСОБЕННОСТИ

- Акустофорез
- Динамика аэрозолей
- Физика лучей
- Броуновское движение
- Классическая механика
- Диэлектрофорез и магнитофорез
- Электрическая тяга
- Эрозия
- Вытравливание
- Визуализация потока текучей среды
- Взаимодействие частиц с жидкостью
- Геометрическая оптика в непрерывных средах
- Визуализация функции распределения ионной энергии
- Спектрометрия подвижности ионов
- Ионная оптика
- Массовая спектрометрия
- Смесители
- Мультипликация
- Ускорители частиц
- Динамика разреженного газа
- Вторичная эмиссия
- Аэрозоли
- Разделение и фильтрация



## Модуль Импорт данных из САПР

С помощью модулей COMSOL, осуществляющих поддержку форматов САПР, инженеры смогут с легкостью обмениваться данными. Модуль Импорт данных из САПР позволяет открывать файлы САПР любых распространенных форматов непосредственно в COMSOL Desktop для использования в мультифизических моделях. Модуль содержит встроенный геометрический обработчик Parasolid®, что позволяет осуществлять сложные геометрические операции над сложными САПР-моделями в интерфейсе COMSOL Desktop®. Интерактивная функция восстановления обеспечивает корректность моделируемых структур с математической точки зрения. Кроме того, она позволяет удалять из модели закругления, малые грани, выступы и короткие ребра.

## Продукты LiveLink™ для САПР

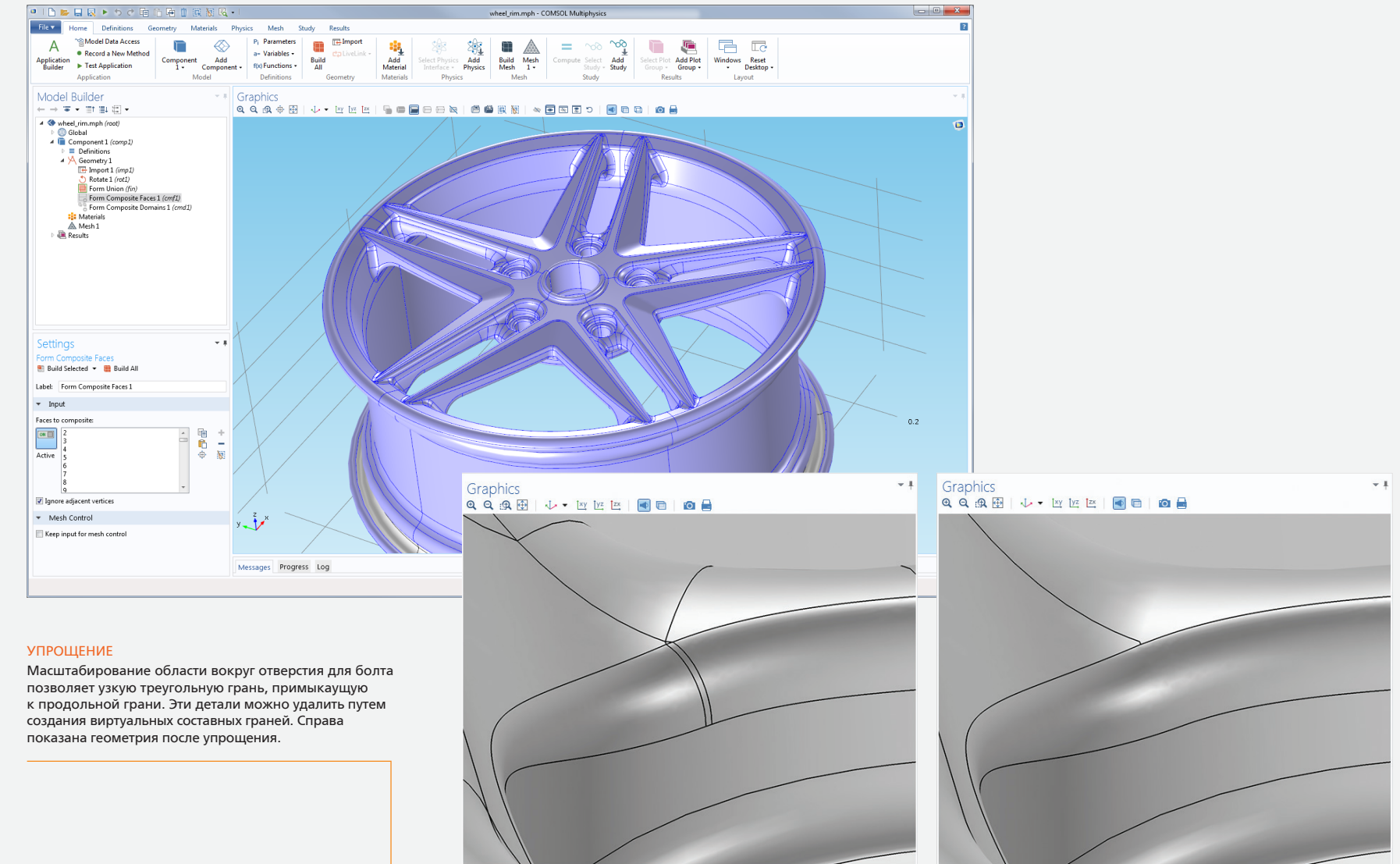
Все возможности модуля Импорт данных из САПР также доступны в продуктах LiveLink для CAD-систем SOLIDWORKS®, Autodesk® Inventor®, Autodesk® AutoCAD®, Autodesk® Revit®, PTC® Creo® Parametric™, PTC® Pro/ENGINEER® и Solid Edge®. Все эти продукты обеспечивают гладкую интеграцию проектов САПР в мультифизические модели. Данные продукты позволяют автоматически отразить изменения проекта САПР или BIM в геометрии модели COMSOL Multiphysics с сохранением всех физических параметров. В результате пользователь сможет проводить моделирование, изменяя геометрические параметры в заданных пределах и оптимизируя конструкции непосредственно в среде COMSOL Multiphysics.



### ПОДДЕРЖИВАЕМЫЕ ФОРМАТЫ ФАЙЛОВ САПР

ACIS® (.sat, .sab, .asat, .asab)  
AutoCAD® (.dwg, .dxf)  
CATIA® V5 (.CATPart, .CATProduct) \*  
PTC® Creo® Parametric™ (.prt, .asm)  
IGES (.iges, .igs)  
Inventor® (.ipt, .iam)  
NX® (.prt)  
Parasolid® (.x\_t, .xmt\_txt, .x\_b, .xmt\_bin)  
PTC® Creo® Parametric™ (.prt, .asm)  
PTC® Pro/ENGINEER® (.prt, .asm)  
Revit® и Revit® Architecture (.rvt)  
SOLIDWORKS® (.sldprt, .sldasm)  
STEP (.step, .stp)  
STL (.stl)  
VRML, v1 (.vrm, .wrl)

\* Необходим модуль File Import for CATIA® V5.



### УПРОЩЕНИЕ

Масштабирование области вокруг отверстия для болта позволяет узкую треугольную грань, примыкающую к продольной грани. Эти детали можно удалить путем создания виртуальных составных граней. Справа показана геометрия после упрощения.

# Модуль Проектирование

Данный модуль расширяет функциональность геометрического моделирования за счет дополнительных инструментов для создания геометрических элементов и импорта файлов САПР в различных форматах. Поддерживается создание выпуклых объектов на основе профилей поперечного сечения и выполнение таких операций, как скругление, фаска, срединная поверхность и утолщение. Например, при использовании инструмента развертки можно создавать геометрические элементы из срезов и контуров, например изображений МРТ.

Модуль Проектирование позволяет не только импортировать файлы распространенных форматов САПР, но и автоматически восстанавливать и модифицировать импортированные проекты в интерактивном режиме. Инструмент для закрывания поверхностей значительно облегчает создание объемов, заполненных жидкостью, внутри импортированных твердых объектов.

В основе модуля проектирования лежит надежное параметрическое ядро для создания геометрических элементов в приложении COMSOL Multiphysics®, а также ядро геометрического моделирования Parasolid®, ставшее отраслевым стандартом. Таким образом, модуль позволяет редактировать проекты и создавать их с нуля, а также передавать данные в другие инструменты.

Модуль Проектирование поддерживает все возможности модуля Импорт данных из САПР.

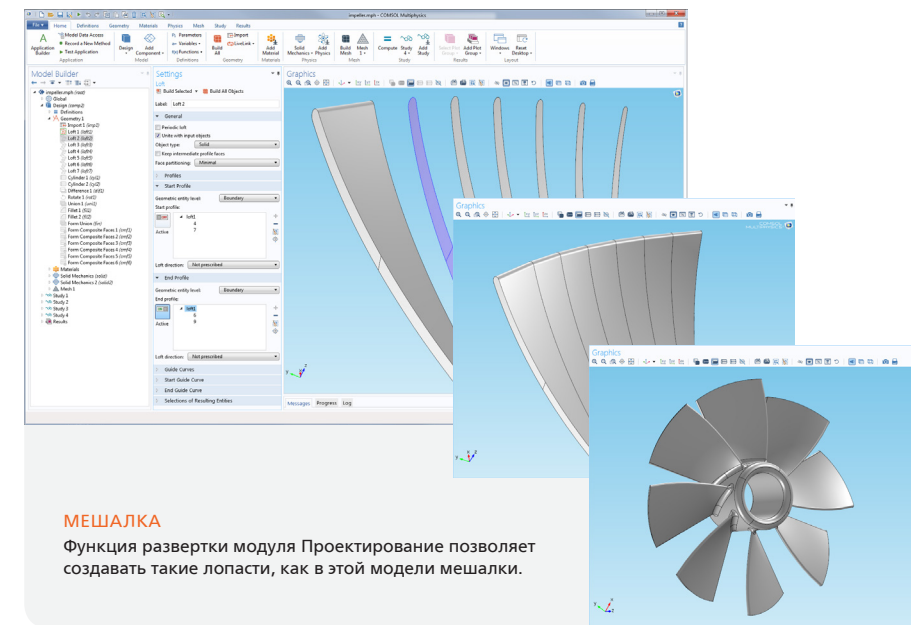


## ПОДДЕРЖИВАЕМЫЕ ФОРМАТЫ ФАЙЛОВ САПР

См. раздел «Модуль Импорт данных из САПР»

## ПОДДЕРЖИВАЕМЫЕ ОПЕРАЦИИ

- Восстановление и упрощение геометрии
- Закрывание поверхностей
- Развертка
- 3D-скругление
- 3D-фаска
- Утолщение
- Срединная поверхность

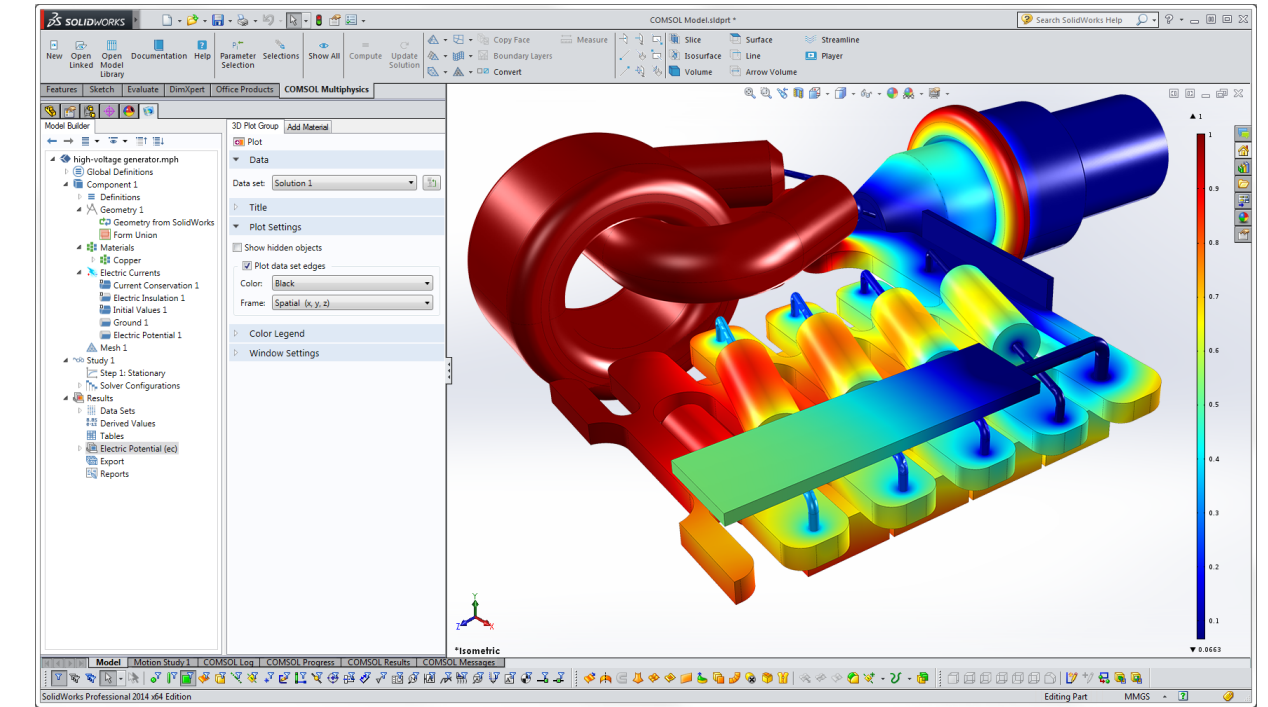


## МЕШАЛКА

Функция развертки модуля Проектирование позволяет создавать такие лопасти, как в этой модели мешалки.

# LiveLink™ for SOLIDWORKS®

**ИНТЕРФЕЙС ONE WINDOW**  
Интерфейс LiveLink™ для САПР SOLIDWORKS® был дополнен интерфейсом One Window, с помощью которого пользователи SOLIDWORKS® могут проводить мультифизический анализ, не выходя из САПР. В интерфейсе One Window доступны все средства моделирования COMSOL Multiphysics. Среда обменивается данными об изменениях геометрии модели в реальном времени.



## ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ГЕНЕРАТОР

Модель электромагнитного поля в высоковольтном генераторе рентгеновского устройства. Проект создан в САПР SOLIDWORKS® и передан в среду COMSOL через интерфейс LiveLink™. Здесь пользователь может выбирать различные компоненты, определять физические свойства и запускать расчеты для модели.

Модель предоставлена компанией Comet AG, Фламатт, Швейцария.

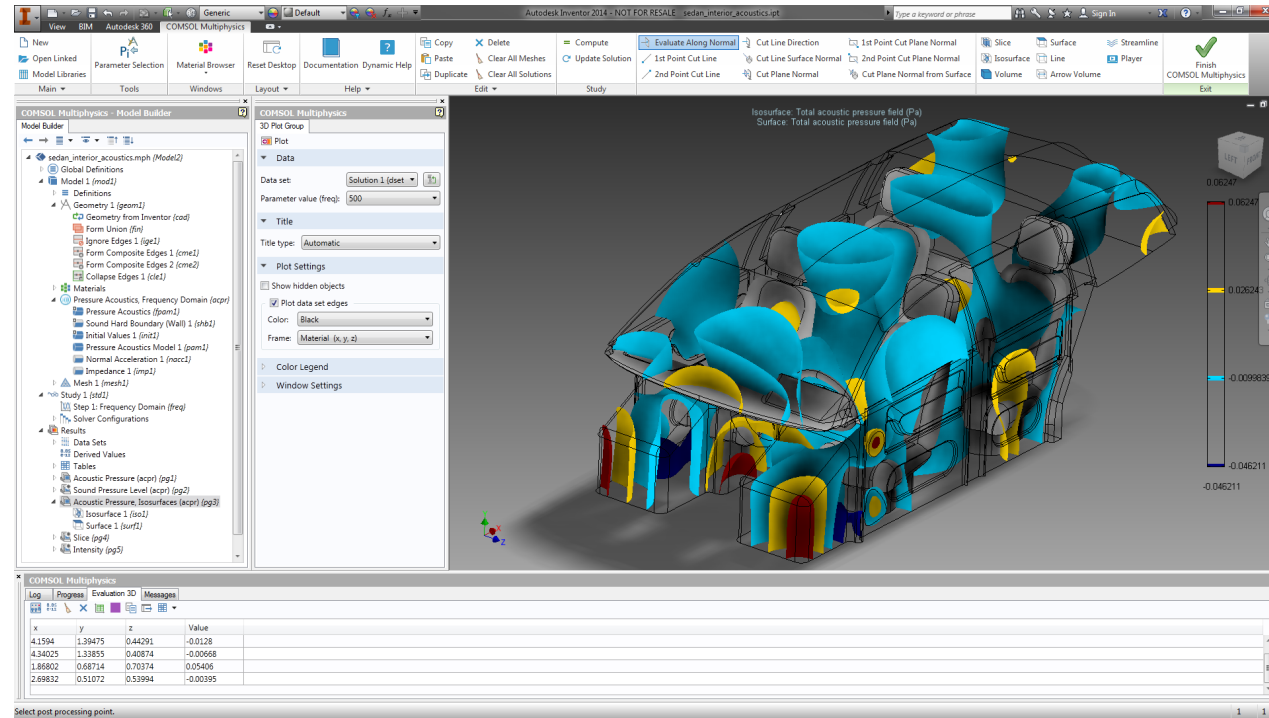


SolidWorks является зарегистрированной торговой маркой компании Dassault Systèmes SolidWorks Corp.

## LiveLink™ for Inventor®

### ИНТЕРФЕЙС ONE WINDOW

Интерфейс LiveLink™ для САПР Autodesk® Inventor® дополнен интерфейсом One Window, с помощью которого пользователи Autodesk® Inventor® могут проводить мультифизический анализ, не выходя из САПР. В интерфейсе One Window доступны все средства моделирования COMSOL Multiphysics. Среда обменивается данными об изменениях геометрии модели в реальном времени.



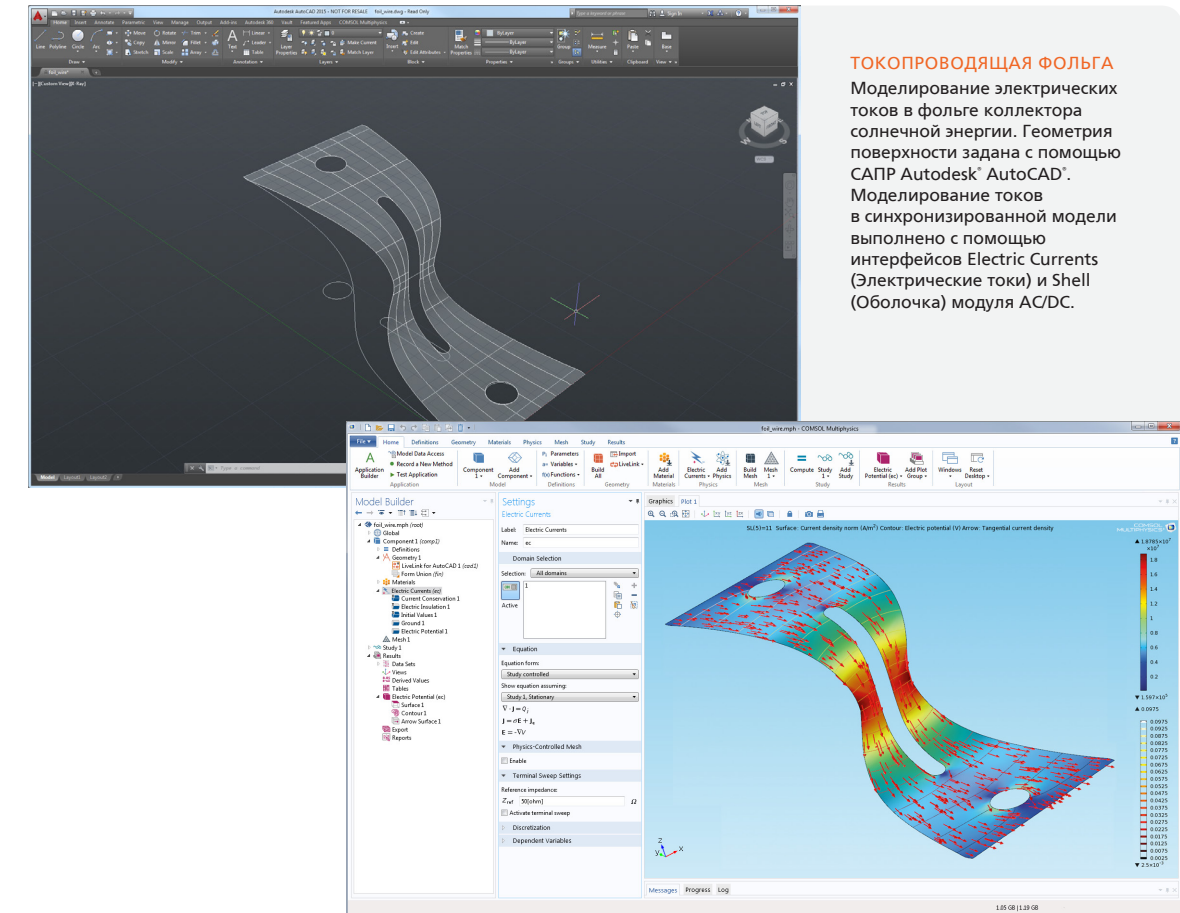
### АКУСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

В результате моделирования получены изоповерхности акустического давления в салоне машины. Геометрия была создана в САПР Autodesk® Inventor®, модель создана и запущена в COMSOL Multiphysics®.

Powered by  
**PARASOLID** **SPATIAL** **AUTODESK**  
Authorized Developer

Autodesk и Inventor являются зарегистрированными торговыми марками или торговыми марками компании Autodesk, Inc. и (или) ее дочерних компаний и (или) ее аффилированных компаний в США и (или) других странах.

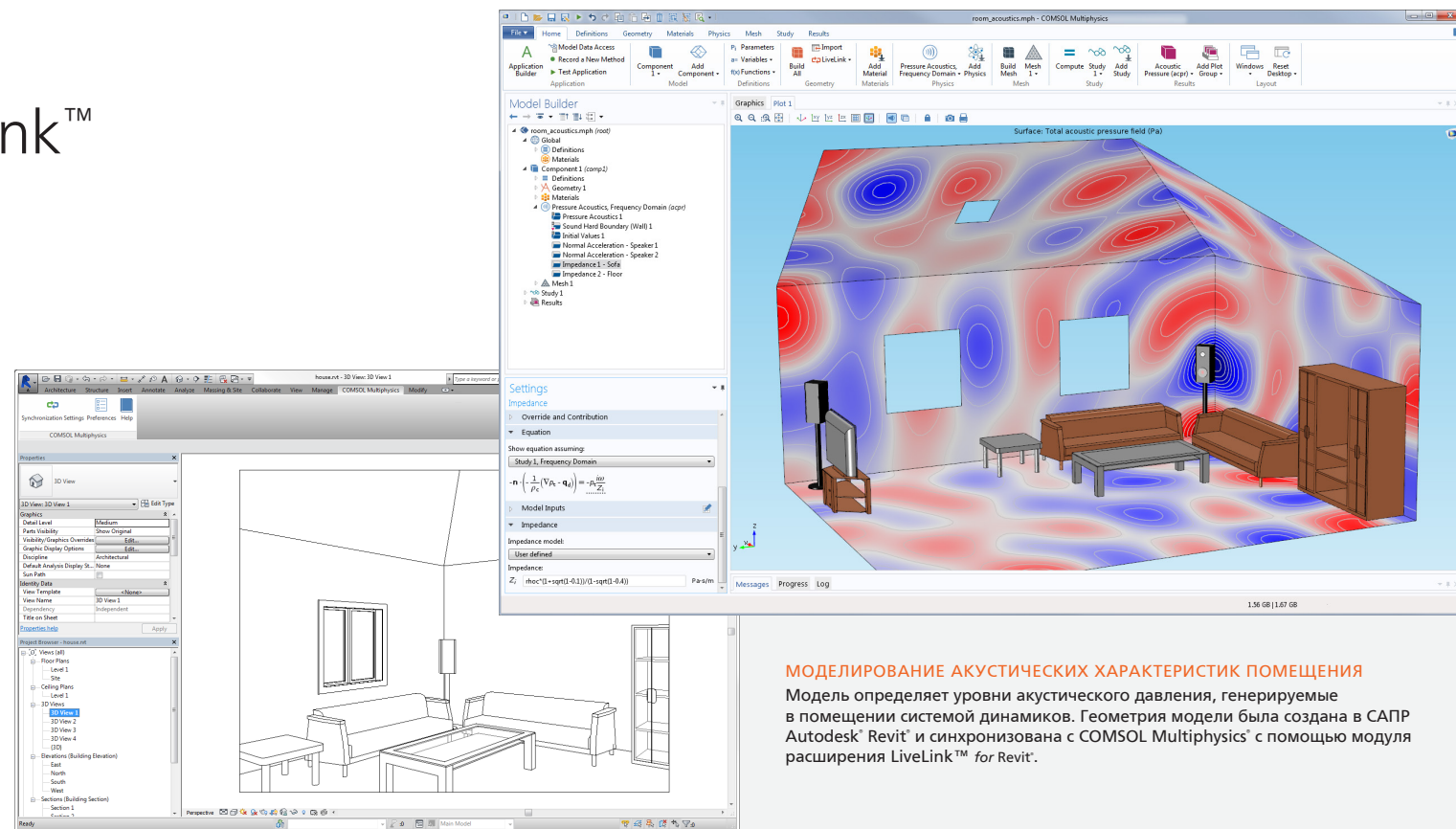
## LiveLink™ for AutoCAD®



Powered by  
**PARASOLID** **SPATIAL** **AUTODESK**  
Authorized Developer

Autodesk и AutoCAD являются зарегистрированными торговыми марками или торговыми марками компании Autodesk, Inc. и (или) ее дочерних компаний и (или) ее аффилированных компаний в США и (или) других странах.

## LiveLink™ for Revit®



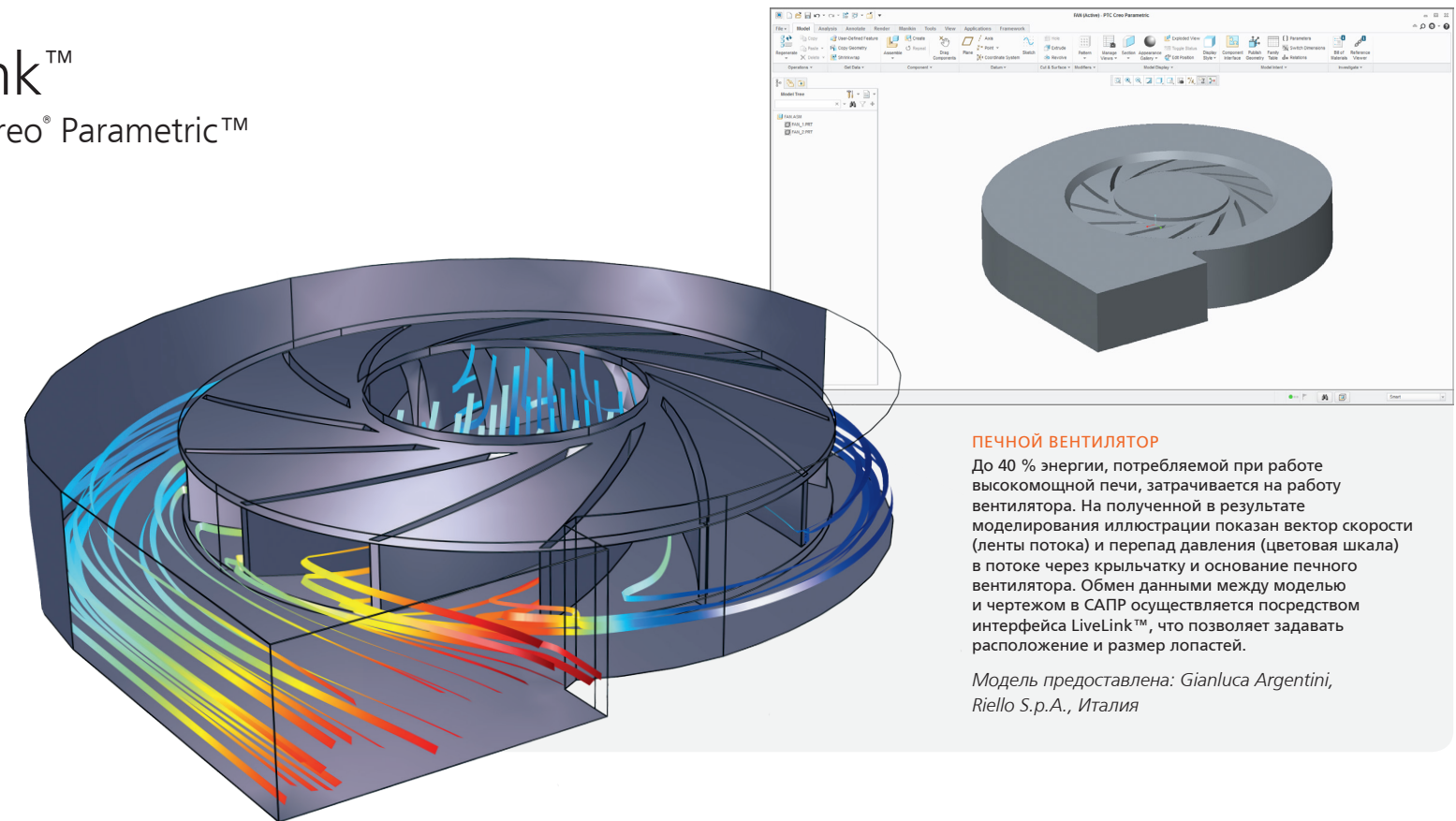
### МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОМЕЩЕНИЯ

Модель определяет уровни акустического давления, генерируемые в помещении системой динамиков. Геометрия модели была создана в САПР Autodesk® Revit® и синхронизована с COMSOL Multiphysics® с помощью модуля расширения LiveLink™ for Revit®.

Powered by  
**PARASOLID** **DS SPATIAL** **AUTODESK**  
Authorized Developer

Autodesk и Revit являются зарегистрированными торговыми марками или торговыми марками компании Autodesk, Inc. и (или) ее дочерних компаний и (или) ее аффилированных компаний в США и (или) других странах.

## LiveLink™ for PTC® Creo® Parametric™



### ПЕЧНОЙ ВЕНТИЛЯТОР

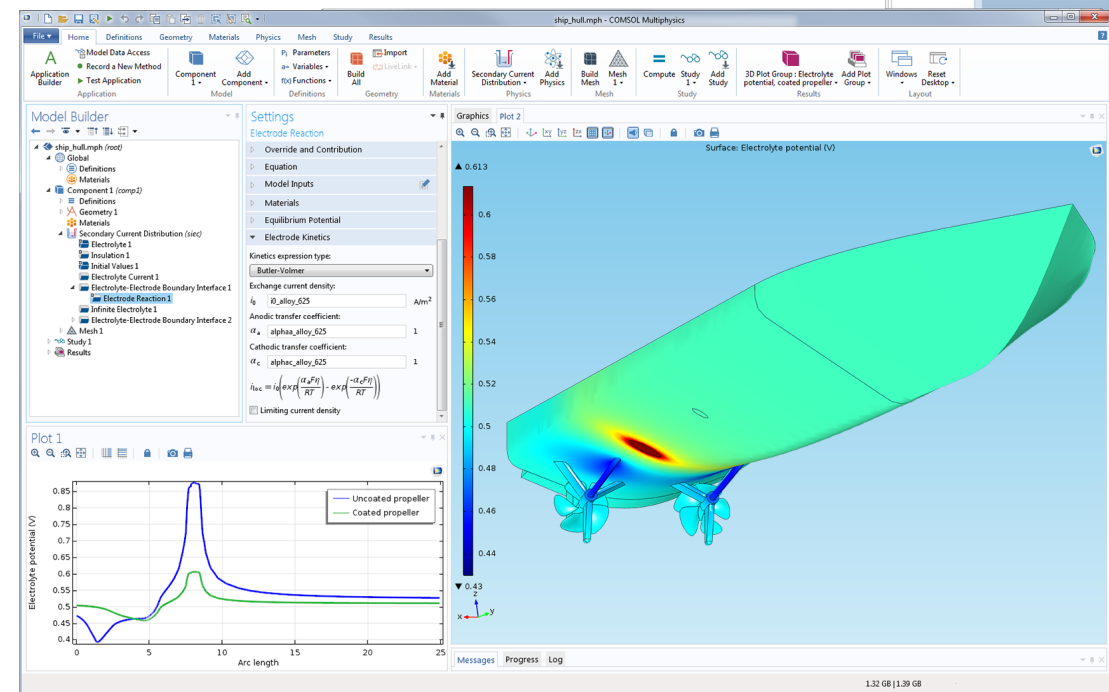
До 40 % энергии, потребляемой при работе высокоомощной печи, затрачивается на работу вентилятора. На полученной в результате моделирования иллюстрации показан вектор скорости (ленты потока) и перепад давления (цветовая шкала) в потоке через крыльчатку и основание печного вентилятора. Обмен данными между моделью и чертежом в САПР осуществляется посредством интерфейса LiveLink™, что позволяет задавать расположение и размер лопастей.

Модель предоставлена: Gianluca Argentini, Riello S.p.A., Италия

Powered by  
**PARASOLID** **DS SPATIAL** **PTC PartnerAdvantage**

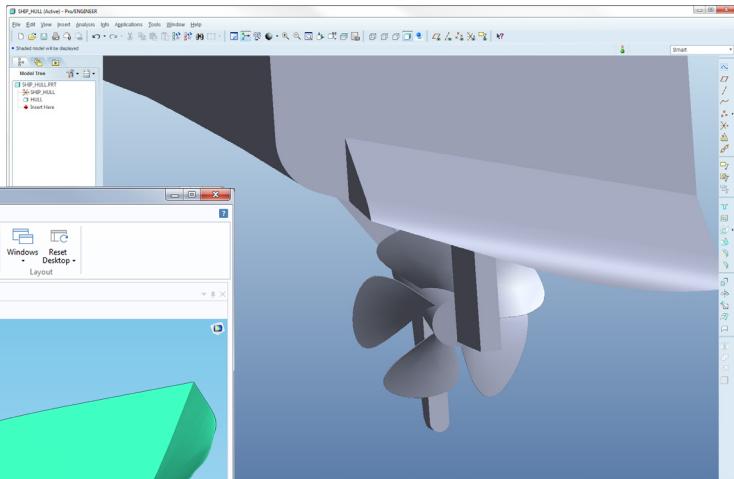
PTC и Creo являются торговыми марками или зарегистрированными торговыми марками компании PTC Inc. или ее дочерних компаний в США и других странах.

## LiveLink™ for PTC® Pro/ENGINEER®

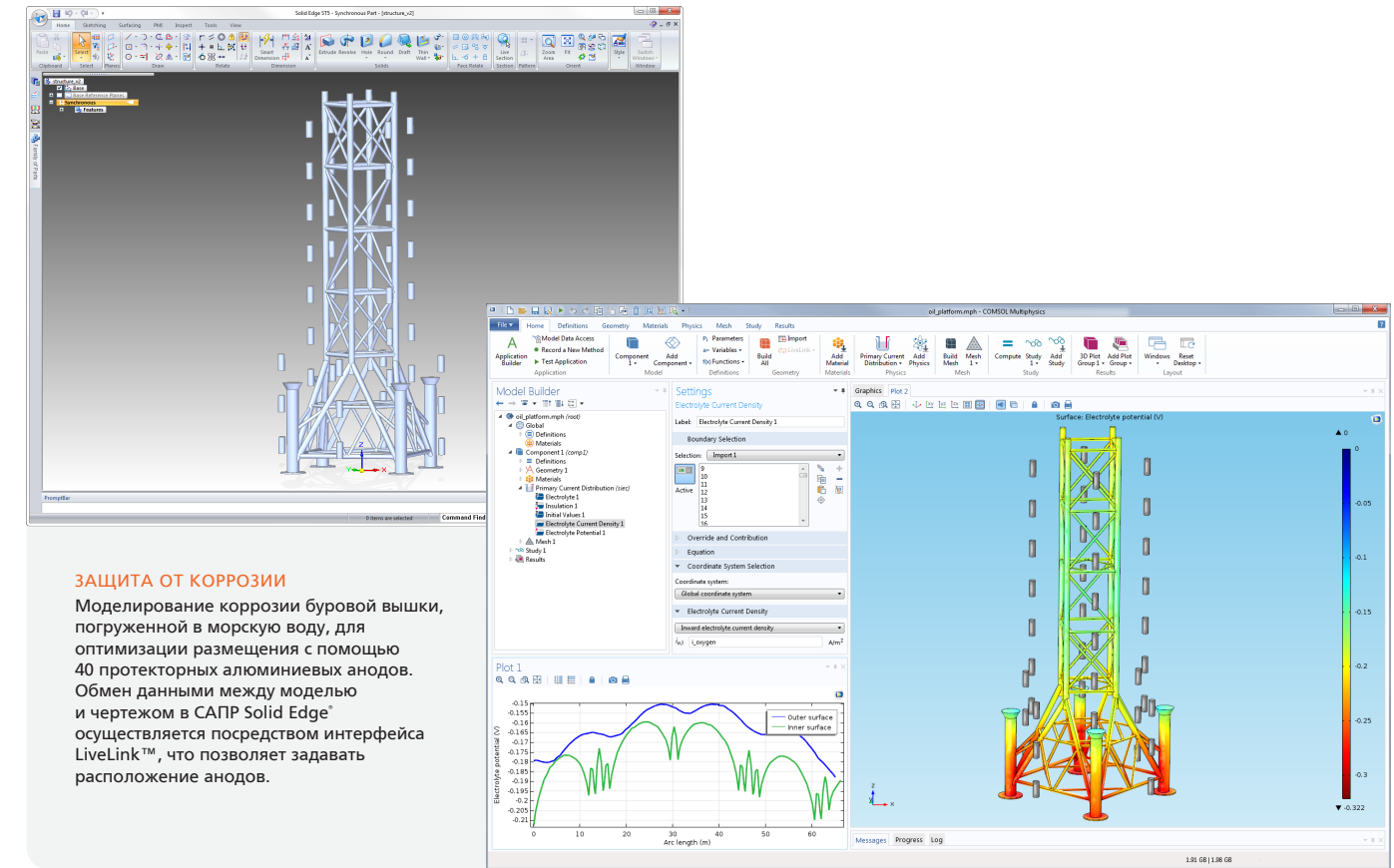


### ОСЛАБЛЕНИЕ КОРРОЗИИ

Интерфейс LiveLink™ for PTC Pro/ENGINEER® позволяет импортировать эту геометрию непосредственно в среду COMSOL Multiphysics. Данная среда позволяет с легкостью создать сетку и запустить решение этой задачи (моделирование катодной защиты корпуса корабля и винта с покрытием наложенным током). Результаты показывают распределение потенциалов в электролите на винте с покрытием.



## LiveLink™ for Solid Edge®



### ЗАЩИТА ОТ КОРРОЗИИ

Моделирование коррозии буровой вышки, погруженной в морскую воду, для оптимизации размещения с помощью 40 протекторных алюминиевых анодов. Обмен данными между моделью и чертежом в САПР Solid Edge® осуществляется посредством интерфейса LiveLink™, что позволяет задавать расположение анодов.

Powered by  
**PARASOLID**



PTC® PartnerAdvantage

PTC и Pro/ENGINEER являются торговыми марками или зарегистрированными торговыми марками компании PTC Inc. или ее дочерних компаний в США и других странах.

Powered by  
**PARASOLID**



Solid Edge является торговой маркой или зарегистрированной торговой маркой Siemens Product Lifecycle Management Software Inc. или ее дочерних компаний в США и других странах. Siemens и логотип Siemens являются зарегистрированными торговыми марками компании Siemens AG.

# Модуль Импорт данных из ECAD

Данный модуль позволяет перенести файлы ECAD в среду COMSOL Multiphysics с автоматическим преобразованием двумерных чертежей в объемные модели САПР. Это значительно облегчает моделирование широкого спектра систем: компонентов интегральных схем, подключенных микроэлектромеханических устройств и систем охлаждения электроники.

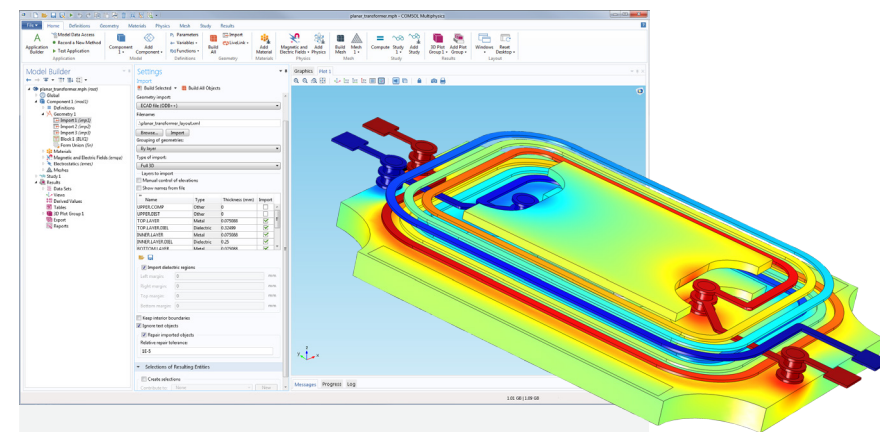
Модуль Импорт данных из ECAD поддерживает распространенные форматы файлов: GDSII, ODB++, ODB++(X) и NETEX-G. Пользователь может ограничить импорт определенными ячейками, сетками и слоями. Также имеется возможность изменять толщину слоя, управлять геометрическим представлением рельсовых соединителей и добавлять выбранные диэлектрические области до или после импорта.

Макет автоматически обрабатывается и преобразуется в 3D-модель САПР, которую можно использовать в любых моделях COMSOL Multiphysics в сочетании с любыми дополнительными продуктами. Геометрическую 3D-модель можно использовать для моделирования твердых тел в COMSOL Multiphysics. Модули CAD Import (Импорт данных из САПР) и продукты LiveLink позволяют экспортировать 3D-модель в форматы файлов Parasolid® (.x\_b, .x\_t) или ACIS® (.sat) для дальнейшей обработки.

## ПОДДЕРЖИВАЕМЫЕ ФОРМАТЫ ФАЙЛОВ ECAD

- DXF (.dxf)\*
- GDSII (.gds)
- ODB++ (.zip, .tar, .tgz, .tar.gz)
- ODB++(X) (.xml)
- NETEX-G (.asc)

\*Поддерживается COMSOL Multiphysics; расширенные возможности обеспечивает модуль Импорт данных из САПР



### СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

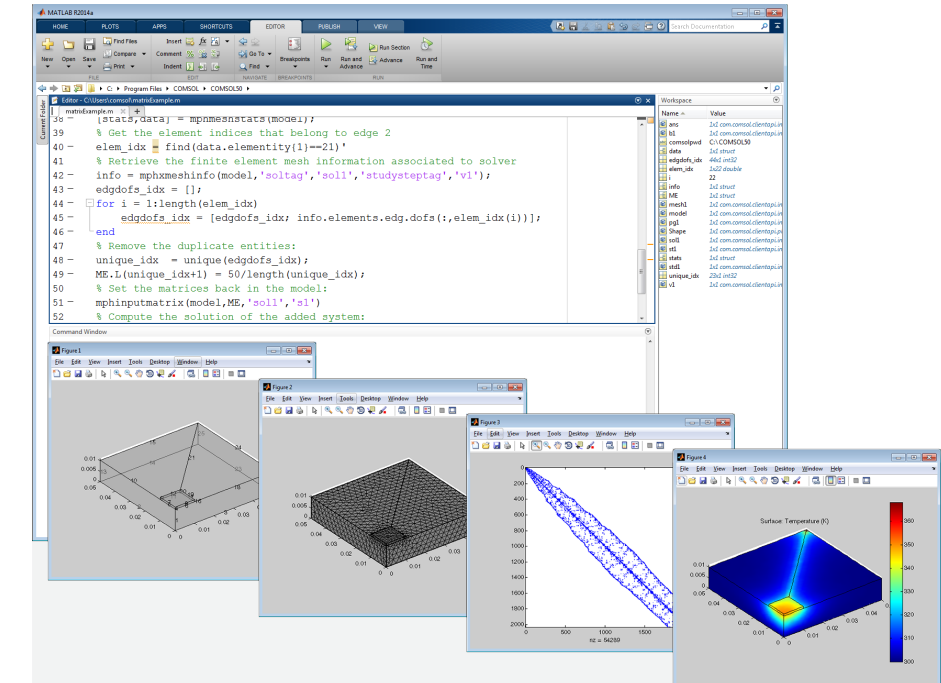
Результат моделирования показывает электрический потенциал на поверхности плоского трансформатора. Схема импортирована в виде файла ODB++(X) и преобразована в геометрическую 3D-модель.

Поддержка в реализации формата ODB++™ предоставлена компанией Mentor Graphics Corporation на условиях соглашения ODB++ Solutions Development Partnership General Terms and Conditions ([www.odb-sa.com](http://www.odb-sa.com)). ODB++ является торговой маркой Mentor Graphics Corporation.

# LiveLink™ for MATLAB®

Модуль LiveLink™ for MATLAB® дает пользователю возможность управлять моделью с помощью ПО MATLAB® и среды COMSOL Desktop®. Это существенно упрощает работу и позволяет применять язык сценариев MATLAB® для обновления или извлечения данных модели. При этом пользователь полностью контролирует настройки модели и процесс моделирования в COMSOL Desktop®.

- Расширьте возможности разработки в MATLAB® мощными программными средствами мультифизического моделирования
- Создавайте геометрию моделей на основе вероятностных или графических данных
- Проводите произвольный статистический анализ результатов моделирования
- Используйте мультифизические модели в сочетании с генетическими алгоритмами и алгоритмами математического аннилинга
- Экпортируйте модели COMSOL в матрицы пространства состояний для интеграции в системы управления
- Используйте функции MATLAB® в среде COMSOL Desktop®



### ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

Модель теплопередачи в переходном режиме модифицируется для вычислительной среды MATLAB® с использованием интерфейса LiveLink™. Матрицы пространства состояний, информацию о сетке и о решении можно передать из COMSOL Multiphysics® в среду MATLAB® для дальнейшего моделирования пространства состояний в MATLAB®. На иллюстрациях показаны: зависимость температуры от времени, конечноэлементная сетка, расположение ненулевых элементов матрицы жесткости.



MATLAB является зарегистрированной торговой маркой компании The MathWorks, Inc.

## LiveLink™ for Excel®

Расширьте возможности COMSOL Multiphysics® с помощью модуля LiveLink™ for Excel®, который позволяет осуществлять моделирование непосредственно из интерфейса электронных таблиц. Параметры и переменные, заданные и смоделированные в COMSOL Multiphysics®, сразу же отражаются в Microsoft Excel® и автоматически синхронизируются с моделью COMSOL®.

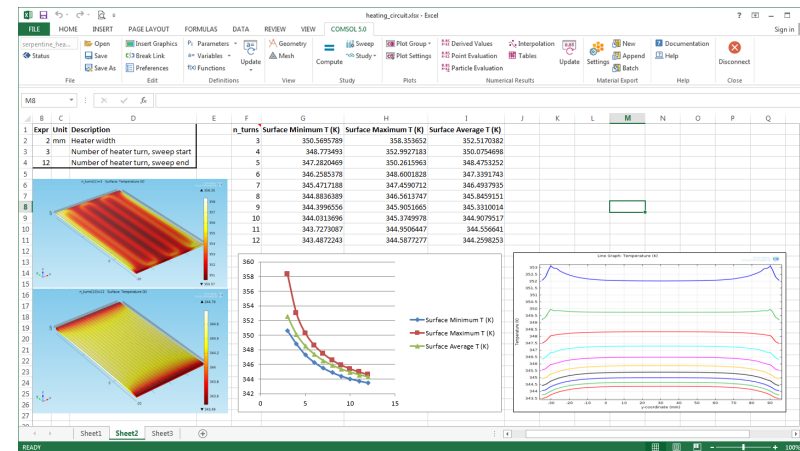
LiveLink™ for Excel® добавляет вкладку COMSOL Multiphysics® на ленту Excel®. С ее помощью можно управлять параметрами, переменными и сеткой, а также запускать моделирование. Эта возможность существенно упрощает работу: пользователь может просматривать и изменять только самые важные параметры моделирования, которые можно модифицировать на лету или изменять в ходе углубленного анализа параметров с помощью таблицы Excel®.

В электронную таблицу можно добавлять изображения и графики COMSOL Multiphysics. Численные данные можно импортировать из модели COMSOL® в Excel® для создания отчетов и дальнейшего анализа. Кроме того, LiveLink™ for Excel® позволяет импортировать и экспортировать файлы Excel®, содержащие списки параметров и переменных, в среду COMSOL Desktop®. LiveLink™ for Excel® совместим с Excel® 2007, 2010 и 2013 для ОС Windows®.

### ПОДДЕРЖИВАЕМЫЕ ФОРМАТЫ ФАЙЛОВ

Книга Microsoft Excel® 2013 (.xlsx)  
Книга Microsoft Excel® 2010 (.xlsx)  
Книга Microsoft Excel® 2007 (.xls)

Microsoft, Excel и Windows являются торговыми марками или зарегистрированными торговыми марками корпорации Microsoft в США и (или) других странах.



### ПАРАМЕТРИЗОВАННЫЙ АНАЛИЗ

Здесь LiveLink™ for Excel® применяется для параметризованного мультифизического моделирования контура отопления (Джоулев нагрев постоянным электрическим током) и структурного поведения тонкого резистивного слоя на твердой стеклянной подложке. Пользователь изменяет параметры, определяющие геометрические размеры модели и граничные условия, в таблице Excel®, и они автоматически синхронизируются с базовой моделью COMSOL Multiphysics®. На ленту Excel® добавлена специальная вкладка, позволяющая работать с параметрами, функциями, геометрией, сеткой, решателями и результатами.

## Поддержка пользователей

- ✓ **Подписка на программное обеспечение**  
Покупая бессрочную лицензию на программное обеспечение COMSOL, пользователь автоматически получает доступ к обновлениям ПО и услугам технической поддержки на 12 месяцев. Обновление продукта позволяет использовать все современные возможности и обеспечить совместимость с операционными системами. Кроме того, в рамках подписки можно воспользоваться услугами администрирования лицензий для установки ПО COMSOL на новый компьютер, изменения именованных пользователей и решения других задач.
- ✓ **Оперативная техническая поддержка**  
Обращаясь в службу технической поддержки COMSOL, пользователь получает консультации квалифицированных профессионалов в области поддержки нашего ПО. С ними легко связаться по телефону или через электронную почту. В нашей Базе знаний, пользующейся заслуженным признанием, содержится множество вопросов и ответов практически на все вопросы по мультифизическому моделированию. База доступна в режиме онлайн в любое время.
- ✓ **Таблицы характеристик**  
Таблицы характеристик позволяют определить оптимальное сочетание продуктов для решения ваших научных или технических задач. С их помощью можно выбрать продукты для конкретной прикладной области, узнать, какие возможности моделирование открывает сочетание нескольких модулей ([comsol.ru/products/specifications](http://comsol.ru/products/specifications)) или интеграция с системами САПР ([comsol.ru/products/specifications/cad](http://comsol.ru/products/specifications/cad)).
- ✓ **Непрерывное обучение**  
Мы часто проводим учебные курсы в различных странах. Темы учебных мероприятий отличаются разнообразием: от введения в COMSOL Multiphysics до решения специализированных задач в области электричества, гидродинамики, химии, оптимизации, трассировки частиц и взаимодействия систем.
- ✓ **Учебные видео и вебинары**  
Видеогалерея COMSOL — удобный ресурс для обучения с помощью готовых моделей. Видеоинструкции помогут вам на всех этапах процесса моделирования. Вебинары — онлайн-демонстрации применения COMSOL Multiphysics для решения конкретных научных или технических задач в прямом эфире. Видео и архивы вебинаров доступны на странице [comsol.ru/videos](http://comsol.ru/videos).
- ✓ **Интернет-сообщество и блог COMSOL**  
Интернет-сообщество COMSOL — площадка для обмена опытом моделирования, которой пользуются уже тысячи специалистов в различных областях науки и техники. Центральный ресурс сообщества — форум обсуждений ([comsol.ru/community/forums](http://comsol.ru/community/forums)). В блоге COMSOL ([comsol.ru/blogs](http://comsol.ru/blogs)) доступны публикации по вопросам моделирования, включая решение задач электричества, механики, гидродинамики и химии.
- ✓ **Сертифицированные консультанты**  
Сертифицированные консультанты COMSOL помогут пользователям в решении сложных задач моделирования. Сертифицированные консультанты COMSOL — признанные эксперты в различных областях науки и техники, опытные пользователи COMSOL Multiphysics.
- ✓ **Конференция COMSOL**  
По мнению отраслевых экспертов, конференция COMSOL (COMSOL Conference) — важнейшее мероприятие в области мультифизики. Эта ежегодная конференция проводится в ведущих научно-технических центрах мира. Это ценный источник знаний как для новичков, так и для экспертов COMSOL. Здесь специалисты могут узнать о новейших мультифизических инструментах и решателях, пройти обучение и ознакомиться с сотнями презентаций, докладов и инфографических материалов.

## Варианты лицензирования COMSOL Multiphysics®

**Именная однопользовательская лицензия (NSL):** сеанс работы с программным обеспечением может запускать конкретный человек, идентифицируемый в COMSOL по имени. Лицензия не предназначена для работы через сеть.

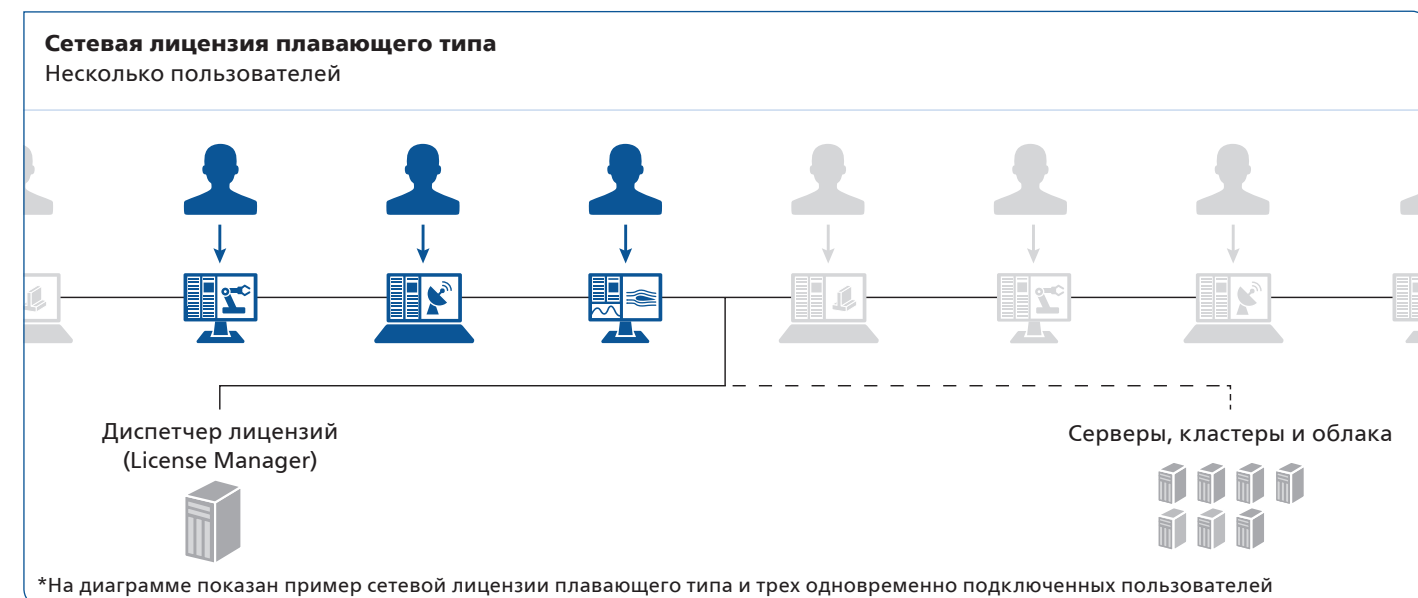
**Однопользовательская лицензия с привязкой к процессору (CPU):** Приложение можно установить на один компьютер, на котором могут поочередно работать разные пользователи. Лицензия не предназначена для работы через сеть.

**Плавающая сетевая лицензия (FNL):** одна лицензия предоставляет возможность работы с программным обеспечением одному пользователю за раз. Установить ПО можно на любое количество компьютеров в сети. ПО COMSOL выполняется на локальных ПК с использованием сети только для проверки подлинности лицензии либо на удаленном ПК с доступом по сети.

**Лицензия на класс (Class Kit License, CKL):** через сеть образовательного учреждения с программным обеспечением смогут работать до 30 учащихся одновременно. Лицензия также дает преподавателю право использовать ПО для подготовки учебных материалов.

Область применения	NSL	CPU	FNL
Несколько ПК	✓		✓
Несколько платформ	✓		✓
Несколько пользователей		✓	✓
Клиент/сервер			✓
Кластеры			✓
Облачные вычисления			✓

**ПОДДЕРЖИВАЕМЫЕ ПЛАТФОРМЫ:** Windows®, Linux®, OS X



**Высокопроизводительные вычисления:** все типы лицензий обеспечивают поддержку многоядерных вычислений без ограничений на количество ядер. Сетевая лицензия плавающего типа обеспечивает дополнительную поддержку кластерных и облачных вычислений без ограничений на количество вычислительных узлов.

## Варианты лицензирования COMSOL Server™

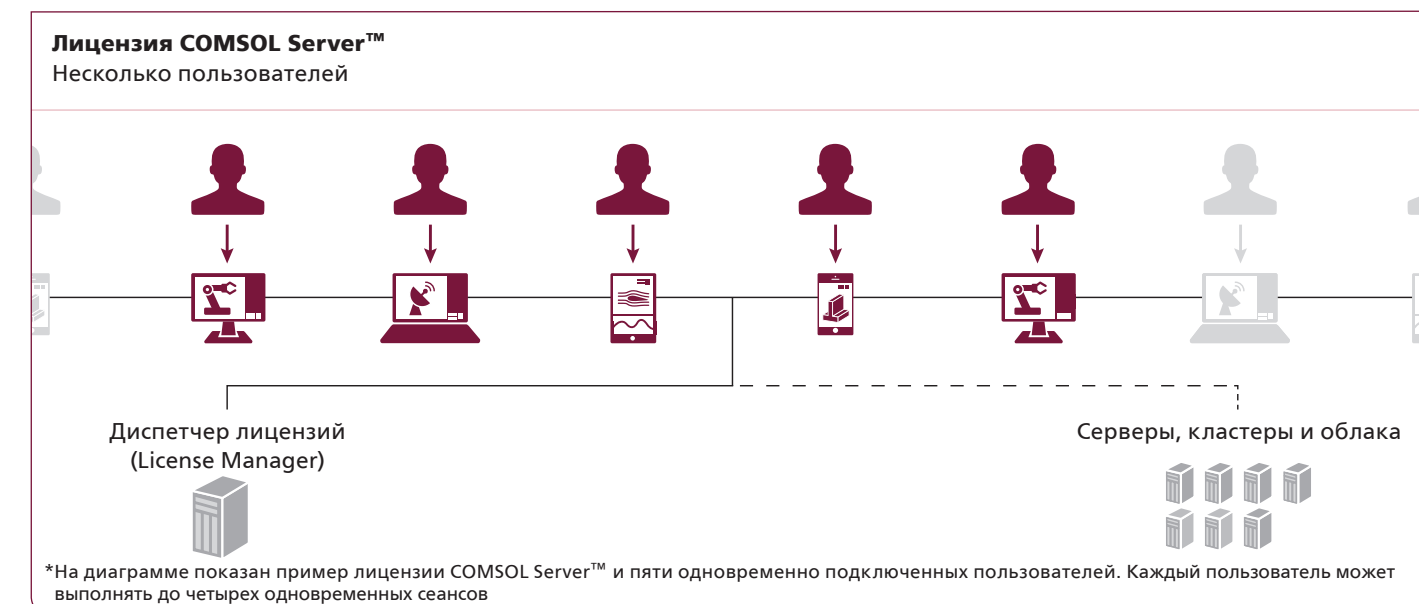
**Лицензия COMSOL Server (CSL):** лицензия определяет допустимое количество одновременно подключенных пользователей. Каждый пользователь может выполнять до четырех приложений моделирования. CSL-версия программного обеспечения позволяет выполнять приложения моделирования, встроенные в COMSOL Multiphysics. Лицензия CSL предоставляет возможность размещать эти приложения и выполнять их в инфраструктуре организации и вне ее с разделением времени доступа к одновременным подключениям.

**Академическая серверная лицензия (ASL):** лицензия обеспечивает возможность одновременной работы с ПО для 300 пользователей. Каждый пользователь может выполнять до четырех приложений моделирования. ASL-версия программного обеспечения позволяет выполнять приложения моделирования, встроенные в COMSOL Multiphysics. Лицензией ASL могут воспользоваться учащиеся и преподаватели любого образовательного учреждения по всему миру, чтобы размещать и выполнять эти приложения.

С приложениями можно работать через современный веб-браузер или COMSOL Client для Windows®.

Область применения	CSL
Несколько ПК	✓
Несколько платформ	✓
Несколько пользователей	✓
Клиент/сервер	✓
Кластеры	✓
Облачные вычисления	✓

**ПОДДЕРЖИВАЕМЫЕ ПЛАТФОРМЫ:** Windows®, Linux®, OS X, iOS, Android™



Подробные условия лицензирования и дополнительная информация доступны в лицензионном соглашении COMSOL Software License Agreement.



