

COMSOL NEWS

ЖУРНАЛ МУЛЬТИФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование для **ВСЕХ**

СТР. 4

**КОМПАНИЯ NEWTECHNICS:
НОВЫЕ ПОДХОДЫ
К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ЗДАНИЙ**

СТР. 25

**СЛАДКАЯ СТОРОНА
МОДЕЛИРОВАНИЯ В NESTLÉ**

СТР. 10

КАК РАЗРАБОТАТЬ ОПТИМАЛЬНУЮ КОНСТРУКЦИЮ И ПОДЕЛИТЬСЯ ОПЫТОМ С ДРУГИМИ

Инженеры, специалисты по проектированию и научные работники часто задают себе этот вопрос. Этот выпуск издания *Новости COMSOL* посвящен именно им. Мы обсуждаем переход к новой парадигме моделирования, начало которой было положено COMSOL Multiphysics® версии 5 и Средой разработки приложений.

Из статьи на странице 4 вы узнаете, что Среда разработки приложений позволяет легко и быстро передать другим возможность воспользоваться вашим опытом моделирования. Теперь специалисты могут создавать приложения — специализированные пользовательские интерфейсы для доступа к своим моделям. Стимулом для этих пользователей COMSOL служит их непрерывное стремление к совершенствованию технологий. Они эффективно применяют новые инструменты моделирования — гибкие, многофункциональные и точно отражающие суть физических явлений. Кроме того, они делятся результатами своей работы, которыми может воспользоваться любой желающий. Таким образом, именно создание приложений стимулирует переход к «моделированию для всех».

Так как же разработать оптимальную конструкцию? Конечно, с помощью удобных инструментов и опыта коллег. В этом выпуске журнала *Новости COMSOL* мы расскажем о работе специалистов по моделированию в самых различных областях. Это пищевая промышленность (Nestle), физика зданий и архитектурное проектирование (Newtecnic), антикоррозийная защита деталей автомобилей (Daimler), взаимодействие лазерного излучения с материей (Ливерморская национальная лаборатория им. Лоуренса), 3D-печать (TNO) и прочие отрасли.

Мы благодарим пользователей COMSOL, которые щедро делятся с нами своим опытом моделирования и передовыми практиками. Нам было очень приятно работать с ними. Надеемся, представленные материалы будут для вас интересны. ❖



Приятного чтения!

Валерио Марра (Valerio Marra),
менеджер по техническому маркетингу,
COMSOL, Inc.

ПРИСОЕДИНЯЙТЕСЬ К СООБЩЕСТВУ COMSOL

БЛОГ comsol.ru/blogs

ФОРУМ comsol.ru/community/forums

LINKEDIN linkedin.com/company/comsol-inc

FACEBOOK facebook.com/multiphysics

TWITTER twitter.com/comsol_inc

GOOGLE+ plus.google.com/+comsol

Будем рады получить вопросы и замечания о материалах журнала *Новости COMSOL*; пишите нам по адресу info@comsol.ru

РЕДАКТОР Александра Фоули (Alexandra Foley),
технический писатель, COMSOL, Inc.

**COMSOL
NEWS
2015**

© 2015 г., COMSOL Журнал «Новости COMSOL» издается компанией COMSOL, Inc. и связанными с ней компаниями. Торговые знаки и зарегистрированные торговые знаки COMSOL, COMSOL Multiphysics, Capture the Concept, COMSOL Desktop, COMSOL Server и LiveLink являются собственностью компании COMSOL AB. Любые другие товарные знаки являются собственностью их владельцев. Компания COMSOL AB в США и других странах, ее дочерние компании и продукция не связаны, не утверждались, не финансировались и не поддерживались этими владельцами. Полный список таких владельцев товарных знаков представлен на сайте www.comsol.ru/trademarks.

СОДЕРЖАНИЕ

COMSOL® 5

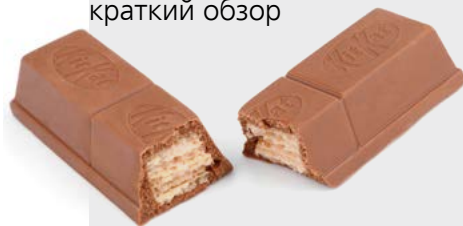
4 Моделирование для всех

ПРИМЕНЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

5 Оптимизация методов 3D-печати с помощью приложений для моделирования

КАК СОЗДАТЬ ПРИЛОЖЕНИЕ

7 Среда разработки приложений и COMSOL Server™: краткий обзор



ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

10 Сладкая сторона моделирования: за кулисами Nestlé

АВТОМОБИЛЕСТРОЕНИЕ

14 Антикоррозийная защита деталей автомобилей



РЕМОНТ ОПТИКИ

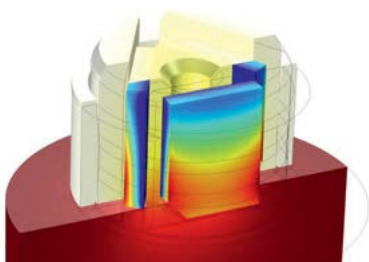
17 Моделирование взаимодействия лазерного пучка с материалом

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

20 Моделирование для солнечной энергетики

22 МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ
Многомасштабное моделирование открывает новые возможности виртуального проектирования материалов для 3D-печати

25 СТРОИТЕЛЬНАЯ ФИЗИКА
Оптимизация характеристик сложных фасадов зданий



28 ТЕХНИЧЕСКАЯ АКУСТИКА
Совершенное исполнение: стремление к идеальным измерениям

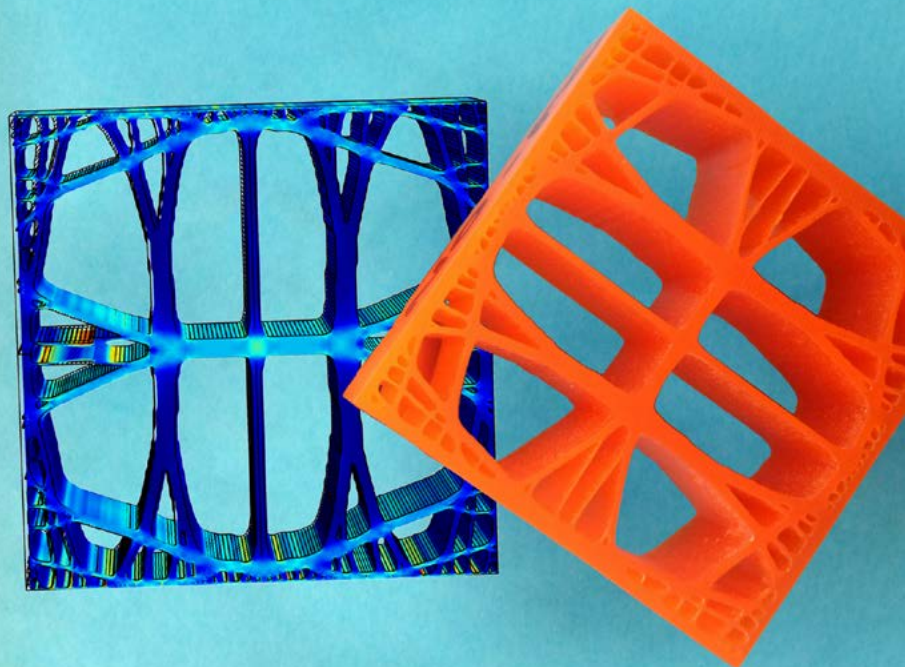
31 БИОТОПЛИВО
Использование биотоплива в качестве экономичного и возобновляемого источника энергии

34 ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭКСПЕРТИЗА
Моделирование решает загадку несчастного случая в лифте

36 УСТОЙЧИВАЯ ЭНЕРГЕТИКА
Усовершенствованные методы отопления и охлаждения зданий

39 БЛОГ COMSOL
В блоге COMSOL публикуются последние новости мультифизического моделирования

40 ГОСТЬ РЕДАКЦИИ
Приложения для моделирования делают Марс ближе



ТЕМА НОМЕРА

22

TNO

МНОГОМАСШТАБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКРЫВАЕТ НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ВИРТУАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ

DAIMLER И HZG

АНТИКОРРОЗИЙНАЯ ЗАЩИТА ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБИЛЕЙ

Моделирование гибридных деталей и шарниров из композитных материалов для автомобилей открывает новые возможности антикоррозийной защиты в автомобилестроении

14

MTC

ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДОВ 3D-ПЕЧАТИ С ПОМОЩЬЮ ПРИЛОЖЕНИЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Специалисты Центра производственных технологий анализируют SMD, метод 3D-печати металлом, с помощью приложений для моделирования

5

36

FRAUNHOFER ISE

УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЕ МЕТОДЫ ОТОПЛЕНИЯ И ОХЛАЖДЕНИЯ ЗДАНИЙ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ ВСЕХ

**АВТОР: СВАНТЕ ЛИТТМАРК
(SVANTE LITTMARCK)**

Ученые, в числе которых Ньютон, Максвелл и другие, сформулировали «научные законы», математические модели, которые позволяют нам точно прогнозировать поведение объектов и систем во времени и пространстве при заданных граничных и начальных условиях. Специалисты в области прикладной математики разработали численные методы, которые позволяют получать количественные результаты и графики, точно описывающие результат работы этих законов.

Это позволяет нам моделировать устройства и регулировать их параметры, в конечном итоге совершенствуя конструкцию едва ли не до идеала.

Физика, математика и вычислительные инструменты позволяют специалистам добиваться удивительных результатов при помощи моделирования. Исследовательские аппараты передают данные с Марса на Землю, появились такие коммуникационные устройства, как сотовые телефоны и GPS, — и это лишь пара примеров.

Последние десятилетия принесли нам множество революционных технологий. Вместе с тем многие области, которым моделирование принесло бы несомненную пользу, остаются сегодня на периферии внедрения этих мощных вычислительных инструментов. Почему?

→ ПРЕПЯТСТВИЯ

Современные вычислительные инструменты настолько сложны, что из огромного числа их потенциальных пользователей лишь немногие обладают необходимой квалификацией. К созданию математических моделей необходимо привлекать математика или физика. Также модели требуется упрощать для экономии вычислительного времени и оперативной памяти, а также для управления данными решения. Учитывать в моделях малозначимые явления не следует. Пренебрежимость явления следует оценивать с учетом области применения и желаемого результата. Для того, чтобы понять, какие физические явления включить в модель, а какие — опустить, а также как учесть их воздействие, требуется специалист по моделированию.

После создания модели выполняется численное решение уравнений, то есть переход от непрерывных дифференциальных уравнений к дискретизированным разностным уравнениям и точкам в пространстве-времени. Дискретизацию необходимо провести так, чтобы решение разностного уравнения сходилась к решению дифференциального. В противном случае она теряет физический смысл. Кроме того, для получения точного решения шаг дискретизации должен быть достаточно малым. Во многих областях физики существуют общепринятые параметры численных решателей. Но все они отличаются. Иногда для выбора параметров решателя необходим специалист по численному анализу.

Таким образом, типичный пользователь пакета моделирования — это кандидат или магистр физико-математических наук с опытом моделирования не меньше нескольких лет. Кроме того, такой пользователь прошел курс обучения работе с конкретным программным пакетом. Обычно это сотрудник научно-исследовательского отдела крупной организации. Для создания и проверки моделей и результатов моделирования требуется его опыт и знания.

Это означает, что малая группа людей обслуживает значительно большую группу людей, занятую разработкой, проектированием или производством продукции. Модели часто настолько сложны, что выбрать исходные данные, которые позволят получить осмысленные результаты, способен только автор. Налицо бутылочное горлышко.

→ РЕШЕНИЕ

Нам требуется предоставить этой малой группе возможность обслуживать гораздо большую группу. Решение очевидно: создать программный пакет, который позволит специалисту дополнить общую модель удобным и понятным пользовательским интерфейсом, то есть создать готовое приложение. Это приложение должно содержать документацию для пользователя, проверять соответствие введенного параметра области допустимых значений и строить отчеты заданного вида по нажатию кнопки. Такое приложение позволит избежать случайных ошибок ввода, концентрируясь на релевантных выходных данных. Затем его можно будет передать большой группе пользователей.

Такой подход намного проще долгого и сложного обучения, о котором мы говорили в начале. И переход к таким инструментам уже происходит. Приложения для моделирования будут распространяться очень быстро. Ни один инженер-проектировщик не захочет остаться за бортом. Каждая компания постарается внедрить их побыстрее, чтобы иметь преимущество перед конкурентами. В конечном итоге потребители сами станут запускать эти приложения, чтобы принимать более правильные решения при покупке. ❖



Сванте Литтмарк (Svante Littmarck), соучредитель и генеральный директор COMSOL Group.

ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДОВ 3D-ПЕЧАТИ С ПОМОЩЬЮ ПРИЛОЖЕНИЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

АВТОР: АЛЕКСАНДРА ФОУЛИ (ALEXANDRA FOLEY)

Путь новой технологии от ранних стадий исследования до решения, готового к промышленному производству, требует тщательного тестирования и проверок. Например, технология послойного синтеза (3D-печать) впервые возникла в начале 1980-х годов с уровнем технологической готовности TRL 1 (уровнем технологической готовности назывался предложенный NASA в конце 1970-х годов метод оценки готовности технологии к внедрению на производстве). Лишь через несколько десятков лет 3D-печать буквально взорвала рынок промышленных технологий и утвердилась как революционный метод производства, который перевернет мир.

→ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА SMD

«Центр технологий производства» (Manufacturing Technology Centre, MTC) находится в британском городе Ковентри. Наряду с другими похожими организациями он ставит перед собой задачу упростить переход от концепта к производству,

обеспечивая ресурсы для превращения теоретической разработки (TRL 1 – TRL 3) в коммерческий проект (TRL 7 – TRL 9). Одно из текущих направлений исследования MTC — технология осаждения металла на предварительно сформированную поверхность (shaped metal deposition, SMD).

«SMD обладает множеством преимуществ по сравнению с технологиями порошкового послойного синтеза, — объясняет Боржа Лазаро Тораллес (Borja Lazaro Toralles), научный сотрудник отдела производственного моделирования MTC, работающий с COMSOL Multiphysics® над разработкой модели и приложения для процесса SMD (см. рис. 1). — К преимуществам SMD относятся более высокая скорость синтеза, возможность создавать новые конструкции из существующих компонентов и даже синтезировать деталь из нескольких материалов».

В отличие от технологий послойного синтеза, в которых для плавления тонкого слоя порошкообразного вещества применяется лазерный луч, в SMD для создания изделия наносятся

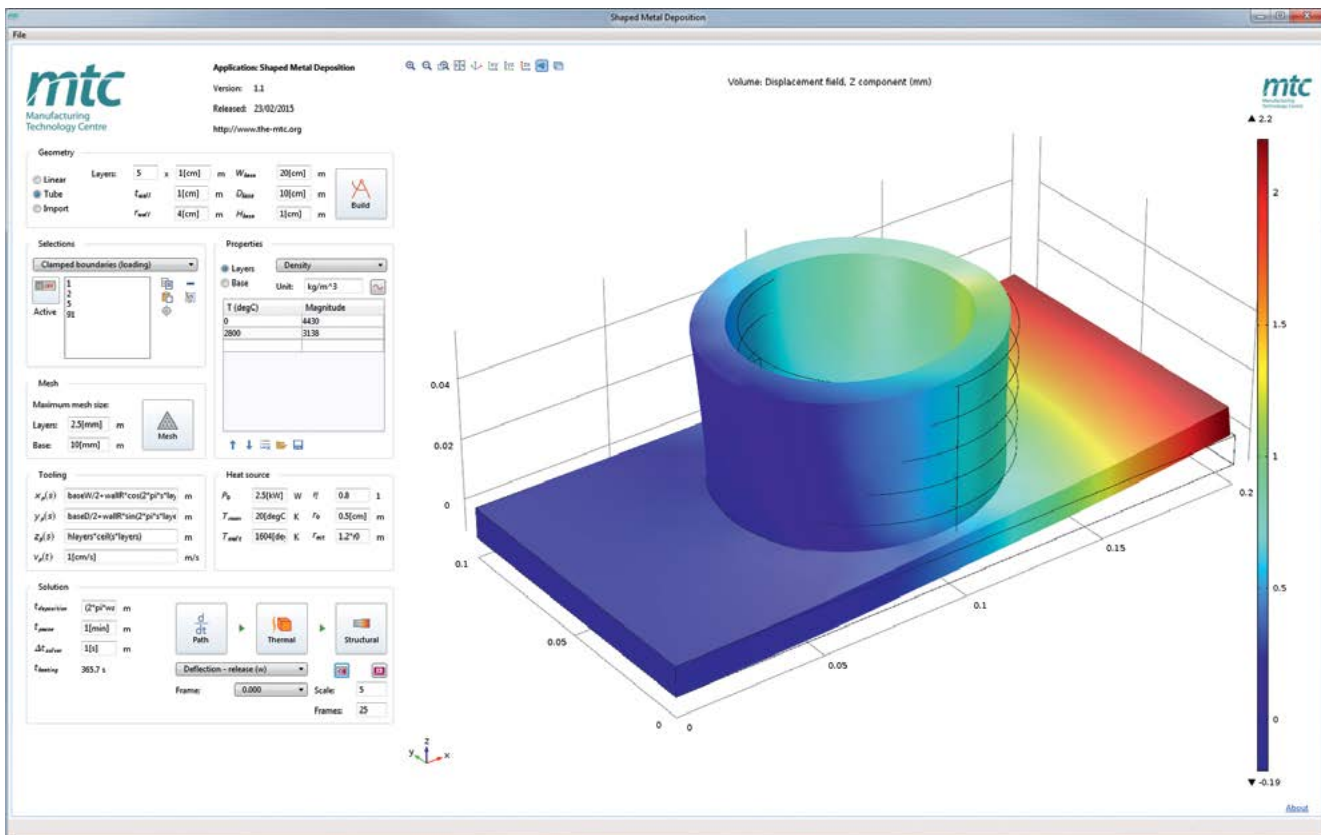


РИСУНОК 1. Приложение для моделирования осаждения металла на предварительно сформированную поверхность (shaped metal deposition, SMD), созданное с помощью Среды разработки приложений, входящей в состав COMSOL Multiphysics. Приложение вычисляет остаточные напряжения, возникающие в ходе производства, и прогнозирует конечную деформацию детали.

слои расплавленного материала (например, титана). Сам процесс напоминает сварку. «Одна из трудностей этого метода — тепловое расширение расплавленного металла, который, сжимаясь при охлаждении, может деформировать подложку, и изделие будет не таким, как задумывалось, — объясняет Лазаро Тораллес. — Чтобы понимать, каким получится спроектированное изделие, нам необходимо минимизировать деформации либо учитывать их в модели». На рис. 2 показан пример детали, полученной методом SMD. После нанесения шести слоев расплавленного металла изделие деформировалось. Для прогнозирования деформации детали при производстве и внесения необходимых изменений применялась модель, также показанная на рисунке 2.

→ ВЫРАЖЕНИЕ СЛОЖНЫХ ИДЕЙ С ПОМОЩЬЮ ПРИЛОЖЕНИЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Чтобы эффективно доносить сложные конструкторские идеи до различных отделов, занятых моделированием и проектированием, и помочь пользователям анализировать свойства предлагаемых конструкций, компания MTC использует Среду разработки приложений. Без приложений для моделирования тестирование и валидация разработок на пробных образцах требовала бы существенно больше времени и денег — в SMD применяются весьма дорогие материалы (см. рис. 1).

Для моделирования процесса SMD требуется провести согласованный термомеханический анализ в зависимости от времени, чтобы спрогнозировать остаточные тепловые напряжения и деформации, возникающие в тепловых циклах SMD.

«С помощью Среды разработки приложений мы создали приложение, которое позволяет прогнозировать соответствие параметров изделия установленным допускам, — объясняет Лазаро Тораллес. — При несоответствии приложение позволяет удобно и без лишних затрат моделировать различные вариации изделия, чтобы найти значения параметров, обеспечивающие приемлемый уровень конечной деформации».

С помощью этого приложения пользователи могут легко экспериментировать с геометрией модели, источниками тепла и материалами, не погружаясь в нюансы моделирования. Приложение содержит две готовых параметрических геометрии и позволяет импортировать пользовательские геометрии.

В настоящее время сотрудники отдела MTC, не обладающие навыками самостоятельного моделирования деталей и проектов для клиентов, пользуются этим приложением. «Если бы не это приложение, то для проверки любого проекта приходилось бы привлекать специалистов по моделированию, что заняло бы у них массу времени, — рассказывает Лазаро Тораллес. — С помощью Среды разработки приложений мы создаем удобные интерфейсы для других сотрудников MTC». Кроме того, приложения доступны и клиентам MTC.

«Приложения для моделирования помогут нам внедрять технологии с более высокими показателями TRL для практического применения на производстве, — заключает Лазаро Тораллес. — Среда разработки приложений — это мощная платформа, благодаря которой сложные мультифизические модели преобразуются в формат, доступный широкому кругу пользователей». ❖

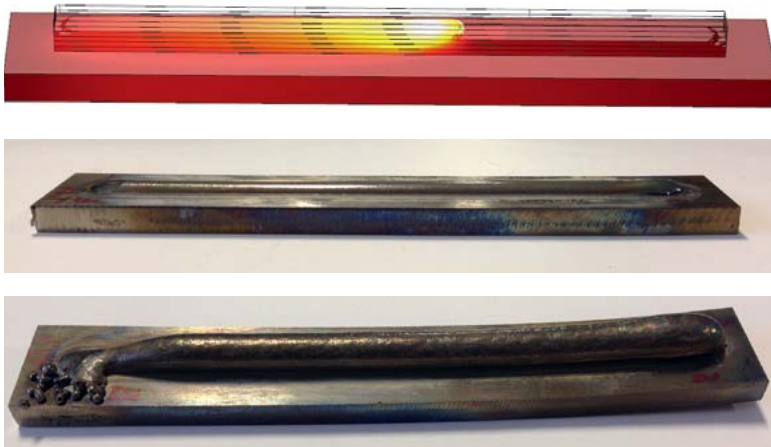


РИСУНОК 2. Циклические изменения температуры в ходе SMD приводят к образованию остаточных напряжений в производимых деталях. Вверху: моделирование детали, созданной методом SMD. В центре: на деталь нанесен один слой металла, деформация незаметна. Внизу: нанесено шесть слоев металла, деформация видна невооруженным глазом.



Сотрудники MTC — Адам Холловэй (Adam Holloway) слева, Боржа Лазаро Тораллес (Borja Lazaro Toralles) в центре и Виллем Денмарк (Willem Denmark) справа — разработали модель COMSOL, провели ее экспериментальную валидацию и создали в COMSOL приложение для SMD.

О «ЦЕНТРЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА»

MTC обеспечивает уникальную среду для разработки передовых производственных технологий, в которой ведущие ученые, инженеры и специалисты Великобритании вместе создают и демонстрируют новейшие промышленные технологии. Их работа позволяет клиентам разрабатывать новые производственные процессы в безопасной, нейтральной промышленной среде, без ограничений, которые накладывают условия коммерческого производства. В это объединение входит более 80 организаций, включая BAЕ Systems, GKN, HP, GM, Airbus и Rolls Royce.

СРЕДА РАЗРАБОТКИ ПРИЛОЖЕНИЙ И COMSOL SERVER™: КРАТКИЙ ОБЗОР

АВТОР: ВИЛЬЯМ Т. ВЕТТЕРЛИНГ (WILLIAM T. VETTERLING)

COMSOL Multiphysics® 5.0 привносит в область моделирования нечто новое: Среду разработки приложений и дополняющий ее компонент COMSOL Server™. Вместо разработки моделей при помощи специальных инструментов, учитывающих множество деталей, Среда разработки приложений позволяет создавать простые, удобные и интуитивные приложения.

Приложение может обладать простым интерфейсом, состоящим из кнопок, списков, меню, графических и текстовых элементов, упрощающих работу. Его можно запустить из программы COMSOL Multiphysics. Но, что особенно важно, приложение можно полностью извлечь из этой многофункциональной среды с помощью глобальной лицензии COMSOL Server. В этом случае приложение может запускаться автономно либо как веб-ресурс в браузере.

Среда разработки приложений позволяет решать множество различных задач. Приложение позволяет представлять результаты моделирования не в виде набора статических графиков и диаграмм, а в реальном времени и интерактивной форме. Их можно использовать в ходе лекций и семинаров. Компании могут знакомить клиентов с характеристиками своих продуктов, используя приложения вместо спецификаций, либо лицензировать и продавать сами приложения.

По сути, среда разработки приложений открывает новый способ взаимодействия между специалистами по созданию моделей и пользователями этих моделей.

→ КАК СОЗДАТЬ ПРИЛОЖЕНИЕ

Создание приложения — достаточно простой процесс. Я начал с рабочей модели COMSOL Multiphysics, которую хотел преобразовать в приложение. Я выбрал простую 3D-модель распределения тока и температуры в мультипиксельной толсто-пленочной печатающей головке — такие часто применяются в факсовых устройствах (см. рис. 1). На выбранные электроды печатающей головки можно подать напряжение, чтобы нагреть соответствующие участки резистивной плен-

ки. Модель должна помочь определить конечное распределение температур в пленке.

С помощью Мастера приложения я преобразовал эту модель в приложение. Мастер обрабатывает модель COMSOL® и создает список элементов модели, которые можно использовать для ввода и вывода данных, операций моделирования и графических элементов.

В качестве входных параметров я выбрал количество и ширину электродов, в качестве операций — команду, формирующую геометрию, и другую команду, запускающую моделирование, в качестве графических элементов — графики геометрии объекта и поверхностной температуры.

Выбрав эти элементы, я получил рабочее приложение, содержащее поля для ввода и вывода данных, кнопки, позво-

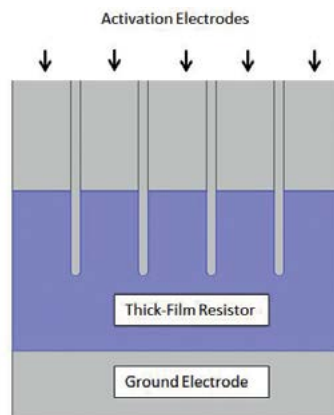


РИСУНОК 1. Упрощенная модель печатающей головки.

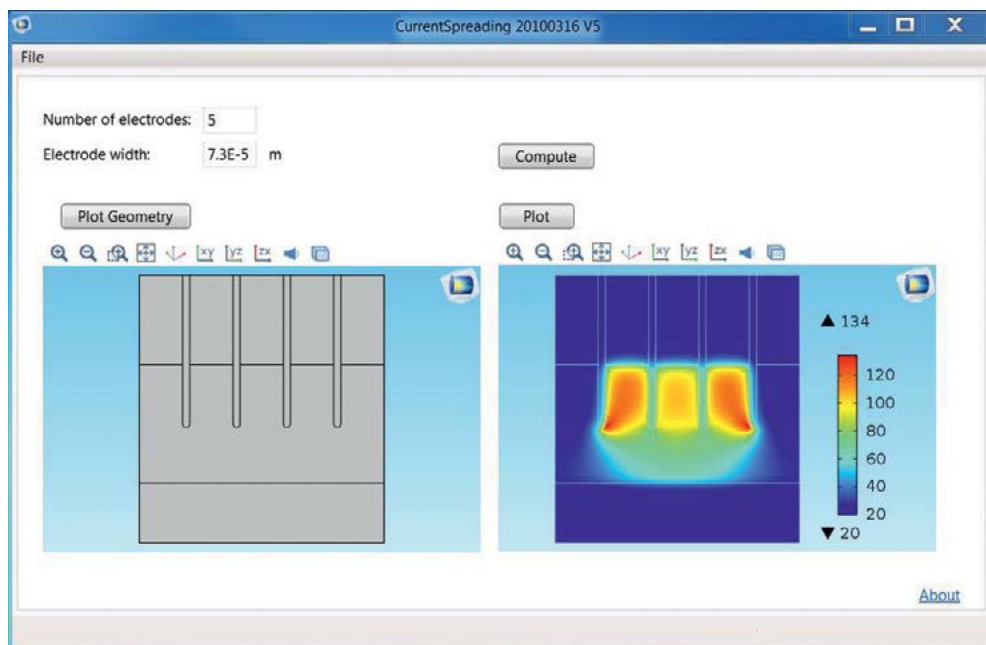


РИСУНОК 2. Окно приложения, созданного с помощью Мастера приложений.

ляющие запустить выбранные действия, и панели, на которых отображаются графики. Компоненты приложения, или виджеты, отображаются на так называемом «холсте» (canvas). Их можно перетаскивать мышью, создавая красивый и удобный интерфейс. Кнопка Test Application (Протестировать приложение) позволяет запустить новое приложение и проверить его возможности в среде разработки COMSOL. На рис. 2 показано окно приложения, созданного на основе модели с помощью Мастера приложений.

→ ШИРОКИЙ СПЕКТР ВОЗМОЖНОСТЕЙ

Мастер приложений позволяет получить удобную для пользователя версию модели всего за несколько минут. Однако возможности Среды разработки приложений этим не ограничиваются. Входящие в ее состав инструменты позволяют создавать более гибкие и функциональные приложения. Среда разработки приложений содержит два компонента: Редактор форм и Редактор методов.

Редактор форм позволяет создать макеты страниц приложения. Он поддерживает множество виджетов графического интерфейса. Пользователь может задать последовательность действий, запускаемую любым виджетом. Примеры таких компонентов: кнопки, флажки, поля со списками, переключатели, текстовые поля, ползунки и таблицы. Кроме того, с помощью Редактора форм к приложению можно добавить индикатор выполнения, журнал сообщений, виджет для вывода уравнений в формате LaTeX и таблицу результатов.

Второй компонент — Редактор методов. Это среда программирования на языке Java®, которая расширяет функциональность интерфейса COMSOL® за счет использования программ и библиотек Java®.

Кроме того, Редактор методов поддерживает некоторые возможности моделирования. Среда программирования на Java® позволяет добавлять код, классы и библиотеки Java® из любого источника. Кроме того, она позволяет работать с деревом модели COMSOL и с COMSOL API множеством удобных способов. К примеру, с помощью функции записи пользователь может записать операции, выполняемые с деревом моделей (например, создание графика или задание сетки), а затем преобразовать их в код Java® и добавить его в метод.

→ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ

Я посетил семинар COMSOL, посвященный Среде разработки приложений, и прочел Introduction to Application Builder (Среда разработки приложений — введение), а затем потратил еще день на доработку. В новое приложение (рис. 3) добавлена панель инструментов в верхней части окна, возможности определения геометрии и запуска модели, а также отдельные страницы для отображения результатов. На первой вкладке пользователь может задать количество пикселей и габариты печатающей головки, а затем нарисовать ее (геометрия строится и отображается с подгонкой под размер окна).

Вторая вкладка приложения (она показана на рис. 3) позволяет выполнить два действия. При выделении необходимой области в графическом окне отображается ее геометрия. Изображение формируется динамически: при щелчке по границе электрода на нее подается либо отключается напряжение. Кнопка Compute запускает построение сетки и расчет модели. Ход выполнения отображается на индикаторе в правом нижнем углу.

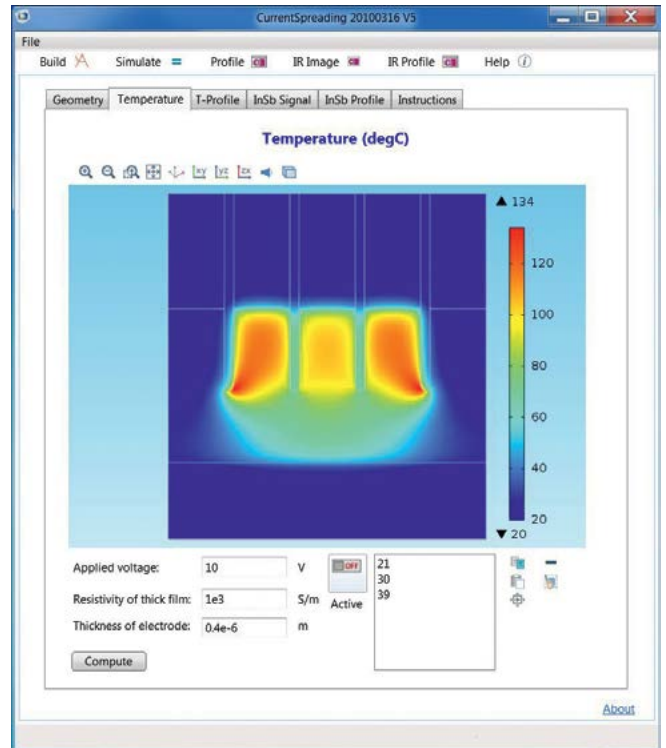


РИСУНОК 3. В приложения, созданные с использованием Мастера приложений, можно позднее добавлять формы и другие дополнительные элементы.

Когда расчет завершен, приложение воспроизводит звуковой сигнал и отображает результаты на странице отчетов. Один из результатов — одномерное сечение двумерного распределения температур, отображающее профиль температуры на линии, проходящей через центры пикселей. Два других — нормализованное температурное распределение и ее сопоставление с кривой отклика детектора из антимонида индия.

Все это было сделано за несколько часов работы в Среде разработки приложений. Создать удобный интерфейс не столь уж трудно, при этом даже опытному специалисту в области моделирования приятно приступить к продуктивной работе с моделью, избавившись от ненужного мусора.

Важная новая особенность COMSOL Multiphysics 5.0 заключается в том, что теперь разработку можно осуществлять с помощью единого инструмента. Это существенно упрощает взаимодействие с API и позволяет пользоваться сервером, отделенным от тонких инструментов моделирования. Эти нововведения ориентированы на то, чтобы создание пользовательского интерфейса стало неотъемлемой частью процесса разработки мультифизических моделей, тем самым расширяя их активную аудиторию. ❖

Уильям Т. Веттерлинг — научный сотрудник и руководитель лаборатории Image Science Laboratory компании Zink Imaging, а также соавтор серии книг и программ Numerical Recipes.



Monika Weber, Founder and CEO of Integrated Microfluidic Devices, was the Grand Prize Winner of the 2011 Create the Future Design Contest.



The team at SunFriend Corporation (l-r): Leonard Egan, Siddharth Potbhare, Karin Edgett, and Shahid Aslam (not pictured — Tariq Aslam). Winners of the 2011 Consumer Product Category.

Mark Wagner, President of Sensorcon, Inc. Grand Prize Winner of the 2012 Create the Future Design Contest.



The Future Starts With You



Bill Zebuhr, Co-CEO and CTO of Aquaback Technologies. Sustainable Technologies Category Winner of the 2012 Create the Future Design Contest.

Salim Nasser (left), CTO and Co-Founder of Rowwheels, Inc., was the Grand Prize Winner of the 2010 Create the Future Design Contest.



Your future starts here:
www.createthefuturecontest.com

Create
 THE **Future**
DESIGN CONTEST 2015

SPONSORED BY



CATEGORY SPONSORS



PRIZE SPONSOR



Сладкая сторона моделирования — за кулисами Nestlé



Исследователи Центра производственных технологий в Йорке (Великобритания) используют моделирование, чтобы довести производство шоколада Nestlé до совершенства.

АВТОР: АЛЕКСАНДРА ФОУЛИ

Исследования, разработки и технологии, которые необходимы для изготовления одного идеального шоколадного батончика Nestlé, просто заворачивают и не сильно отличаются от волшебного мира шоколадной фабрики Вилли Вонка. И хотя за производством сладостей не следит племя умпа-луппа, процесс совершенствуется благодаря долгим размышлениям и серьезному объему моделирования.

Помимо всего прочего, специалисты Центра производственных технологий (ЦПТ) Nestlé, расположенного в Йорке (Великобритания), разрабатывают три разных устройства: формующую машину для производства шоколадных батончиков, пластину для выпекания вафель и экструдер для одновременного приготовления и сортировки хлопьев. В ЦПТ, где занимаются исследованиями и разработками в области производства кондитерских изделий Nestlé, инженеры оптимизируют и совершенствуют процесс с помощью мультифизического моделирования.

→ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ В ПРОИЗВОДСТВЕ ШОКОЛАДА

Шоколадные батончики, такие как Kit Kat®, Aero®, Crunch, и плитки молочного шоколада производятся с использованием формующей машины, заполняющей форму жидким шоколадом. Шоколад поступает на формующую машину по верхней штанге и подается в форму через сопла (см. рис. 1).

«Нам нужно гарантировать одинаковое количество шоколада в каждом батончике, а для этого расход и давление шоколада в каждом сопле должны быть одинаковыми, — говорит Уильям Пиклз (William Pickles), инженер-технолог Nestlé. — Одинаковый вес батончика необходим не только для рентабельности и стандартизации. Мы также стремимся гарантировать точность информации о пищевой ценности на упаковке. Это позволяет нам поставлять продукцию с указанием точного количества калорий для сбалансированного питания наших покупателей». Чтобы добиться упомянутой стандартизации, расход и давление на всех соплах должны быть одинаковыми и абсолютно точными, с минимальными отклонениями.

Для этого в Nestlé используют набор различных средств моделирования. Формующая машина, показанная на рис. 1, сначала была разработана в программе SOLIDWORKS®, после чего ее геометрические параметры были

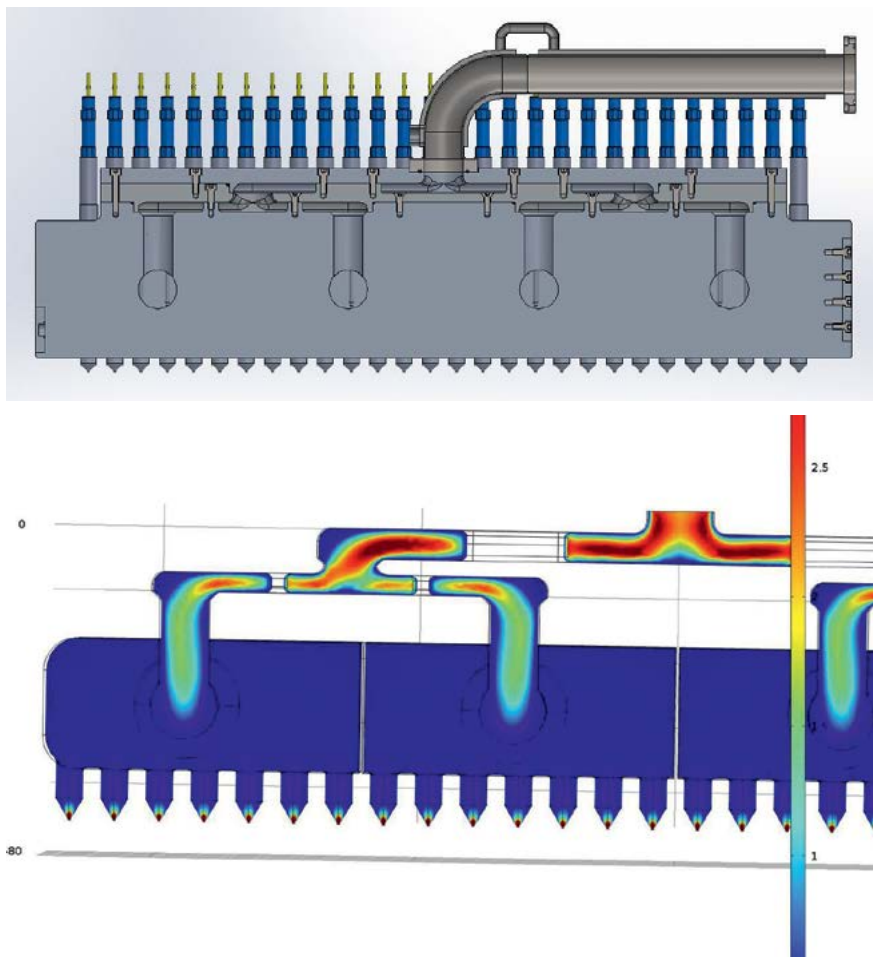


РИСУНОК 1. Вверху: геометрия формующей машины в программе SOLIDWORKS®. Внизу: модель, созданная в COMSOL Multiphysics®, показывающая интенсивность потока шоколада в соплах формующей машины и каналах.

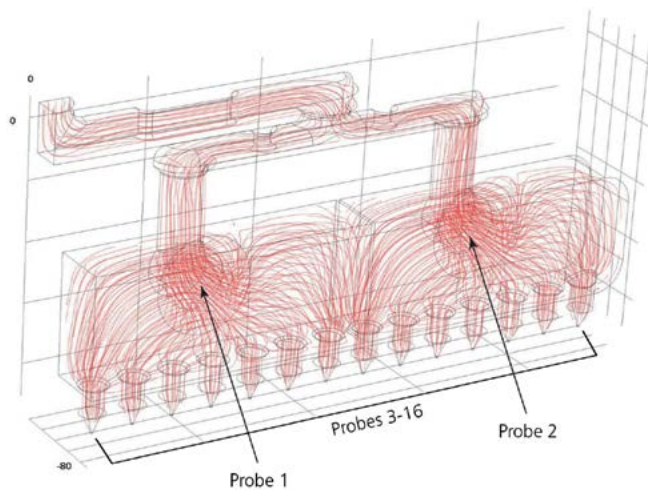


РИСУНОК 2. Датчики на кончиках каждого сопла и в каналах показывают, что расход и давление шоколада в формующей машине и соплах не выходят за пределы заданных значений. Линии показывают направление потока шоколада.

импортированы в среду моделирования COMSOL Multiphysics® для анализа. Моделирование использовалось для оптимизации потока текучей среды, проверки механических напряжений и анализа тепловых свойств при определенной геометрии.

«У каждого производителя есть собственный особый рецепт, дающий шоколад с уникальными характеристиками, — говорит Пиклз. — Мы смогли полностью смоделировать неньютоновскую динамику фирменного шоколада Nestlé, проведя моделирование, при котором в программу импортировалась зависимость между скоростью сдвига и напряжением сдвига для текучей среды, полученная экспериментально. Таким образом, мы были уверены в том, что моделируем жидкий шоколад с такими же свойствами, что и реальный продукт».

Используя моделирование, группа выявила зоны высокого и низкого рас-

хода и определила разницу в расходе на каждой игле формующей машины. Для анализа состояний в определенных зонах машины с выбранными геометрическими параметрами, в каналах потока и на кончиках сопел использовались многочисленные датчики.

«Оптимизируя конструкцию формующей машины, мы смогли добиться того, что расход на каждом сопле совпадал до десятой доли процента», — говорит Пиклз. Результаты этого моделирования показаны на рис. 2.

→ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОХРАНЯЕТ ХРУСТ ВАФЕЛЬ

Чем бы был Kit Kat® без знаменитого хруста вафель? При выпечке вафель от неравномерного нагрева концентрация влаги внутри вафли может оказаться разной, от чего вафля перестает быть хрустящей или даже может произвольно ломаться.

Для выпечки вафель на предприятиях Nestlé используются две пластины, между которыми сдавливается тесто (см. рис. 3). При выпекании пластины проходят примерно над 40 горелками.

«Мы используем моделирование для оптимизации конструкции пластин для выпекания, анализируя движения горячего воздуха под пластинами и вокруг них, чтобы обеспечить равномерность температурного профиля на всей поверхности пластин, — описывает про-

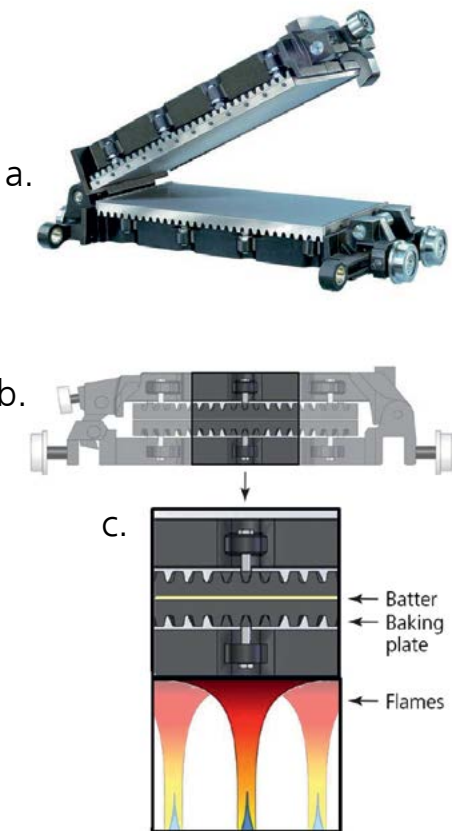


РИСУНОК 3. Две пластины (а) используются для выпекания вафель Kit Kat®. Верхняя и нижняя пластины сдавливают тесто (b), а пламя под ними пропекает вафлю (c).

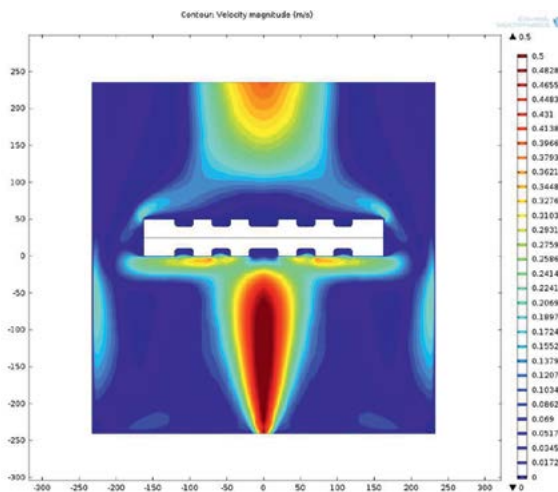


РИСУНОК 4. Поток воздуха вокруг пластин для выпечки.

«У каждого производителя есть собственный особый рецепт, дающий шоколад с уникальными характеристиками. Мы смогли полностью смоделировать фирменный шоколад Nestlé, используя COMSOL Multiphysics».

**—УИЛЬЯМ ПИКЛЗ,
ИНЖЕНЕР-ТЕХНОЛОГ NESTLÉ**

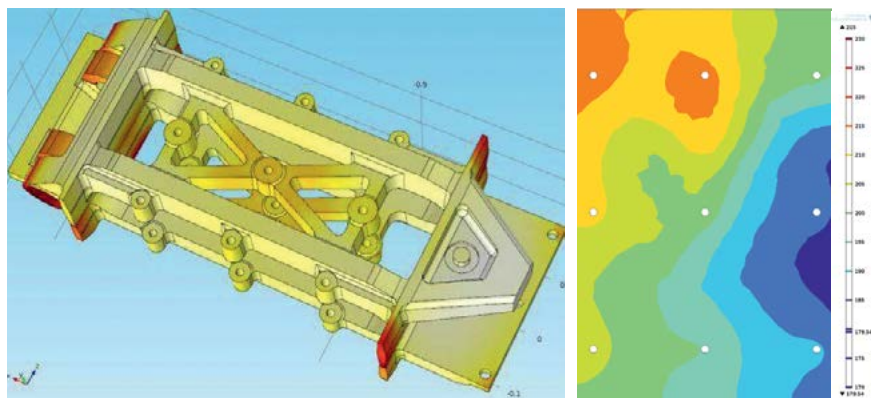


РИСУНОК 5. Слева: распределение температуры в опорной раме пластин для выпечки. Справа: температурный профиль поверхности верхней пластины для выпечки, на которой видны более нагретые участки в местах расположения болтов (белые кружки).

цесс Пиклз. — В данном исследовании наша цель — подобрать нужную мощность и ориентацию горелки, обеспечивая идеальное качество вафли и в то же время сокращая объем используемого топлива». Это соответствует политике компании Nestlé, которая постоянно стремится повысить эффективность всех своих производственных процессов.

Пламя горелок под пластинами для выпечки моделировалось как струи горячего воздуха при конвекционном нагреве. На рис. 4 показан профиль пламени под пластиной для выпечки и поток воздуха вокруг нее.

«Мы смогли подтвердить точность нашей модели на пластинах для выпечки, используемых в экспериментах, и обнаружили, что результаты моделирования хорошо согласуются с реальностью», — говорит Пиклз. Моделирование также показало, как из-за повышенной теплопередачи на болтах, скрепляющих пластины для выпечки, возникают более нагретые участки (см. рис. 5).

«На следующем этапе нужно будет оптимизировать эту конструкцию, чтобы нагрев распределялся максимально равномерно по поверхности верхней пластины, а температурные пики были сведены к минимуму», — говорит Пиклз.

→ ВЫПЕЧКА С ЭКСТРУДИРОВАНИЕМ

Такие хлопья, как Cheerios®, Trix®, Nesquik® и многие другие, производятся на предприятиях Nestlé с помощью экструдеров. «Принцип действия высо-

котемпературного экструдера, используемого Nestlé для приготовления определенных видов хлопьев, заключается в продавливании теста через головку. От возникающих при этом давления и трения тесто запекается за счет вязкостного нагрева, — говорит Пиклз, имея в виду экструдер, показанный на рис. 6. — Экструдеры применяются очень часто, поскольку это компактный и рентабельный метод производства».

Сейчас Пиклз занят разработкой корпуса для вискозиметра, который можно будет помещать внутрь экструдера для измерения вязкости теста, поступающего в головку. Это обеспечит стабильность характеристик теста, вследствие чего оно будет запекаться предсказуемым образом. «Для нашей конструкции требуется, чтобы корпус вискозиметра выдерживал высокое давление, возникающее внутри устройства», — говорит Пиклз.

В оригинальном варианте экструдера давление было слишком высоким, и корпус вискозиметра его не выдерживал.

«Мы изменили конструкцию корпуса, и это помогло снизить давление. Затем мы смогли добиться того, чтобы конструкция головки не приводила к превышению предельного напряжения сдвига и вискозиметр можно было без опаски устанавливать внутрь», — говорит Пиклз. Кроме того, моделирование использовалось для проверки стабильности подачи экструдера, потому что при колебаниях подачи хлопья имели бы неодинаковую форму и размеры (см. рис. 7).

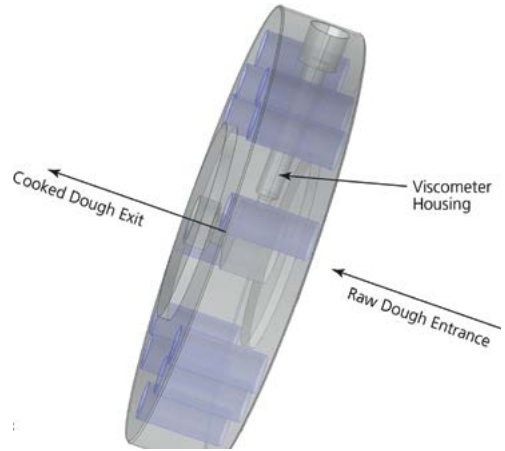


РИСУНОК 6. Геометрия экструдера.

→ МУЛЬТИФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ — ЗАЛОГ КАЧЕСТВА И БЕЗОПАСНОСТИ ПРОДУКЦИИ

Моделирование в Nestlé является важной частью процесса разработки, начиная от производства шоколада до вафель, хлопьев и всего остального.

«Наши покупатели потребляют продукцию Nestlé, поэтому мы должны гарантировать, что наши разработки не подведут в реальных условиях, — отмечает Пиклз в заключение. — Мы уверены в результатах моделирования и не сомневаемся, что они обеспечат высочайшее качество и безопасность разработок. А это, в свою очередь, позволит нам постоянно производить еще более вкусную и полезную продукцию».

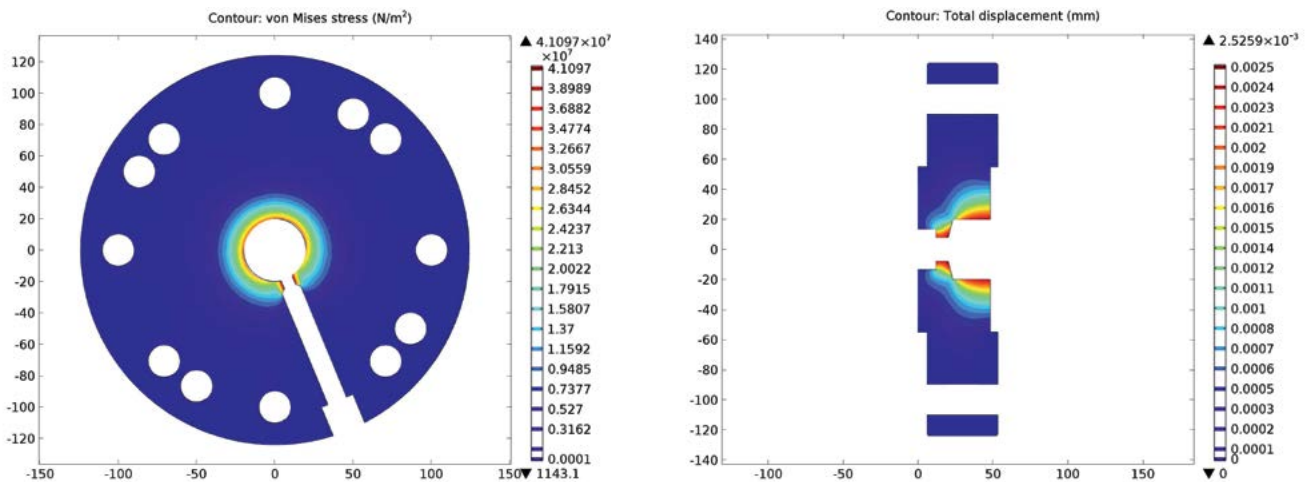


РИСУНОК 7. Корпус вискозиметра и результаты моделирования головки. Слева: контур напряжения по Мизесу. Справа: график сечений (Slice plot) для общей подачи.

ЗАЩИТА КОМПОНЕНТОВ АВТОМОБИЛЯ ОТ КОРРОЗИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ

Моделирование компонентов и соединительных элементов автомобиля из гибридных материалов стимулирует инновационные решения для защиты от коррозии в автомобильной индустрии.

АВТОР: ЛЕКСИ КАРВЕР (LEXI CARVER)

Взгляните на опорные балки моста, когда стоите в пробке. Обратите внимание на дверь самолета, когда ожидаете своей очереди на посадку. Посмотрите на капот своего автомобиля. В каждом из этих элементов вы заметите маленькие круглые головки заклепок, соединяющих различные поверхности. В транспортной промышленности они применяются в металлических автомобильных кузовах и опорных конструкциях. Несмотря на то, что заклепки малозаметны, они играют очень важную роль, соединяя компоненты, которые выдерживают огромные механические нагрузки. В некоторых автомобилях содержится более 2000 заклепок.

Как известно, конструкцию автомобилей стараются максимально облегчить за счет использования легких сплавов. Главная проблема, с которой пришлось при этом столкнуться, — это защита от невидимого вредителя, работа которо-

го видна, когда уже слишком поздно. Имя ему — коррозия.

→ ЛЯЗГ МЕТАЛЛА О МЕТАЛЛЕ: ГАЛЬВАНИЧЕСКАЯ КОРРОЗИЯ

Гальваническая коррозия — это всепроникающий процесс, который ежегодно обходится автомобильной индустрии в миллиарды долларов. Этот тип коррозии возникает в результате химических реакций при соприкосновении металлов. В некоторых случаях его можно опознать по белому порошкообразному наросту, который образуется на поверхности металлических деталей (см. рис. 1, в правом верхнем углу страницы). Вздущаяся краска и разрушающийся алюминий являются верным признаком того, что образовавшиеся ионы металлов разрушают поверхность.

Различные комбинации металлов по-разному реагируют на воздействие окружающей среды. А на химические



РИСУНОК 1. Слева: чистая заклепка. Вверху справа: заклепка с отложениями гидроксида магния (белый налет), образовавшимися вследствие коррозии. Внизу справа: крупный план заклепки в тестируемом листе.

реакции, возникающие на заклепках и элементах, которые они соединяют, влияет целый ряд факторов: тип соединения, свойства материала и шероховатость поверхности. Таким образом, для разработки надежной защиты от коррозии необходимо понимать основы электрохимии.

В стремлении ускорить тестирование и обеспечить более эффективные методы защиты инженеры из Института исследования материалов (HZG) и Daimler AG объединили усилия в области изучения методов предотвращения коррозии с помощью мультифизического моделирования. HZG — немецкий институт, занимающийся исследованием материалов, прибрежных районов и разработкой медицинских технологий; Daimler AG — производитель автомобилей Mercedes-Benz. Обе команды инженеров искали способы модернизировать конструкцию и производство заклепки, чтобы свести к минимуму число физических тестов и исключить ряд

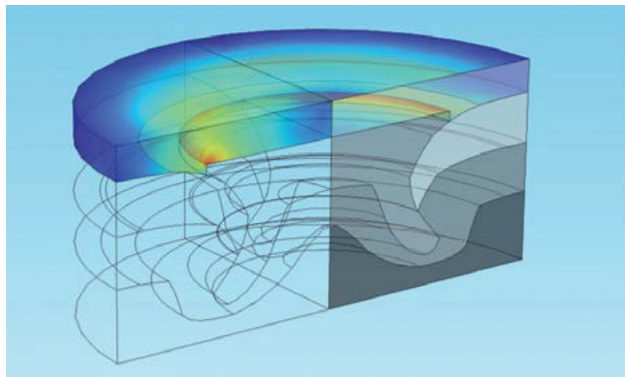
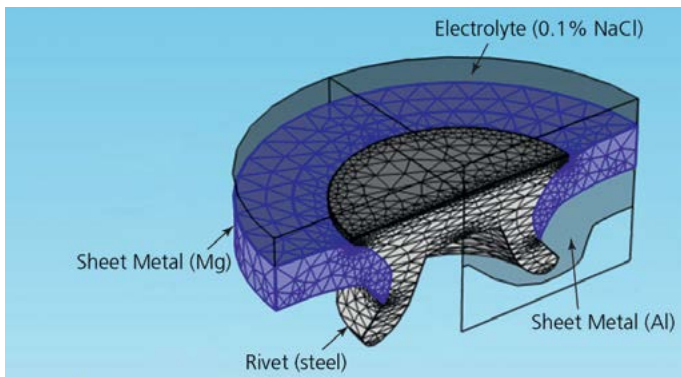


РИСУНОК 2. Слева: геометрия заклепки в разрезе в программе COMSOL Multiphysics®. Справа: результаты моделирования показывают плотность электрического тока на поверхности заклепки и листа металла. Моделирование математической модели прохождения электрического тока через поверхности заклепки и листа; наибольшая плотность тока возникает на острых краях.

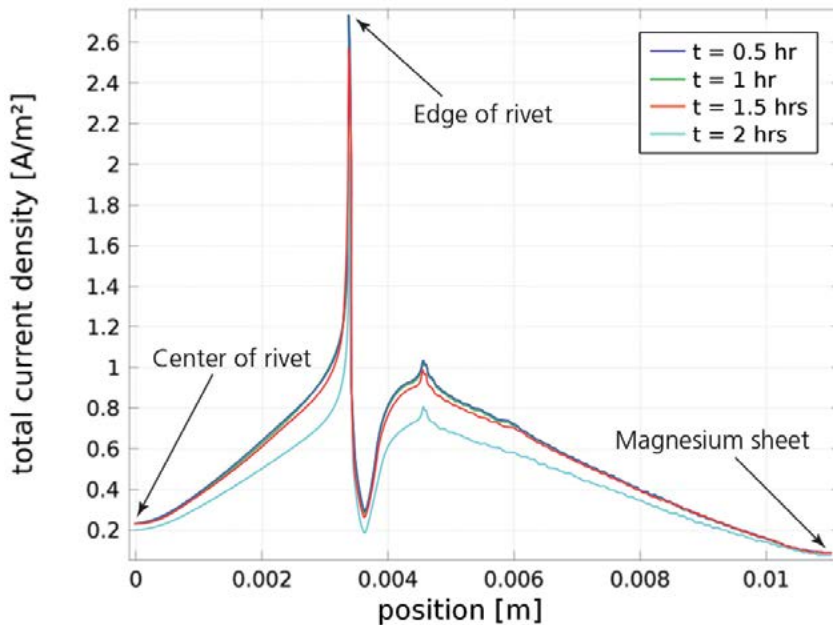


РИСУНОК 3. На графике программы COMSOL® показана локальная плотность электрического тока в различных местах на поверхности заклепочного соединения.

последующих этапов — например, обработку поверхности.

→ МУЛЬТИФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДАЕТ ЦЕННУЮ ИНФОРМАЦИЮ О КИНЕТИКЕ КОРРОЗИИ

Чтобы изучить кинетику гальванической коррозии, включая износ материала, состояние поверхности и реакцию взаимодействующих материалов в долгосрочной перспективе, д-р Даниэль Хёхе (Dr. Daniel Höche), научный сотрудник института HZG, смоделировал соединение стальной заклепки при помощи программы COMSOL Multiphysics®. Заклепка покрывается цинк-алюминиевым сплавом, который выступает в роли катода и защищает сталь. Программа позволила господину Хёхе проанализировать электрохимические реакции на поверхности и краях заклепки, спрогнозировать разрушение сопрягаемых листов и отрегулировать геометрию, чтобы минимизировать коррозию.

Его модель состоит из заклепки, листов из алюминия и магния, 0,1% NaCl слоя электролита на поверхности, представляющего собой внешнюю среду, а также гальванической пары на стыке между заклепкой и листами (см. рис. 2). Ученый также добавил угловой бор в геометрию заклепки, чтобы смоделировать наличие острого края, который увеличивает потенциал электролита.

А он в свою очередь увеличивает прохождение электрического тока и ускоряет электромеханические реакции, которые приводят к гальванической коррозии.

А поскольку между заклепкой и металлическими листами возникает коррозия, лист магния начинает деградировать быстрее, чем другие металлы. В результа-

те химической реакции образуется гидроксид магния ($Mg(OH)_2$), который образует тонкую защитную пленку на поверхности. Чем толще эта пленка, тем больше сопротивляемость коррозии и медленнее ее развитие. Однако полностью остановить этот невозможно из-за пористости $Mg(OH)_2$, поэтому коррозия все глубже проникает в металл.

Чтобы рассчитать распределение электрического тока и проанализировать химическую реакцию, господину Хёхе пришлось принять в расчет этот непостоянный рост и влияние свойств материала. Используя модули расширения COMSOL® Chemical Reaction Engineering (Разработка химических реакций) и Batteries & Fuel Cells (Аккумуляторы и топливные элементы), он стал работать с заклепкой и листом металла, как будто это электроды. За счет этого удалось оценить, как соотношение анодов/катодов, длительность воздействия электролита и изменение проводимости тока, вызванное скоплением $Mg(OH)_2$, влияют на деградацию магния.

«Поскольку пористость непосредственным образом влияет на защитные свойства, на полученную топологию поверхности оказывает влияние скорость деградации и увеличение толщины осадочного слоя. Базовые расчеты плотности гальванического тока были изменены в соответствии с толщиной этого слоя, — отмечает Хёхе. — Это привело нас к изучению изменений электромеханических реакций электродов с течением времени».

Scatched through e-coat only (1 mm wide)	Scatched with scalpel (0.1 mm wide)	Scatched down to steel (1 mm wide)
--	-------------------------------------	------------------------------------

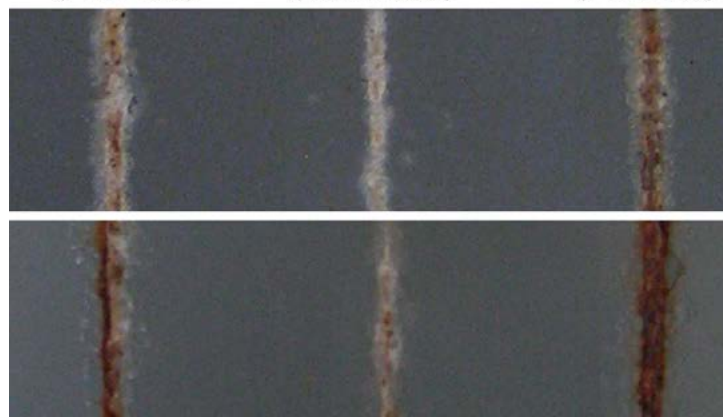


РИСУНОК 4. Коррозионное испытание на листе оцинкованной стали. Видимые следы коррозии в царапинах (вид сверху). Чтобы проанализировать влияние размера царапины на процесс расслоения, Бош сделал несколько царапин различной глубины и ширины. Сверху показаны результаты через одну неделю, снизу — через пять недель.

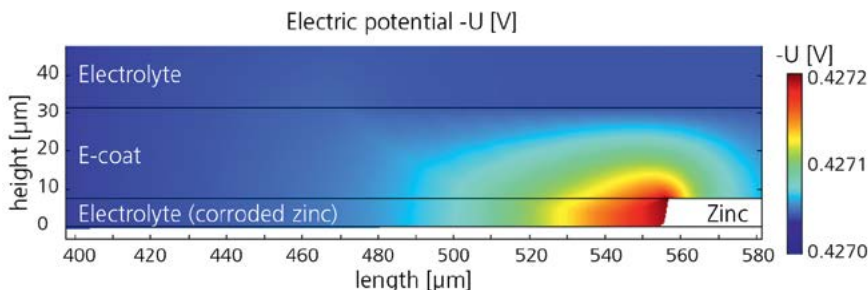
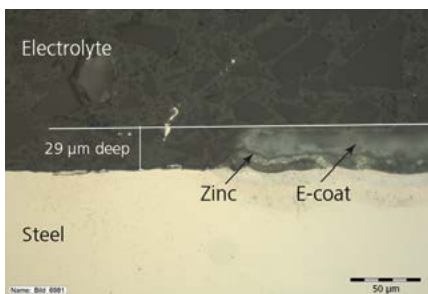


РИСУНОК 5. Слева: крупный план разреза тестового листа, на котором царапина повредила часть электростатического покрытия и слоев цинка. Справа: в результате работы COMSOL Multiphysics® виден электрический потенциал электростатического покрытия и электролита. Зона, окрашенная в белый цвет, показывает оставшийся цинк, часть которого уже поглощена.

Модель включает в себя частоту химических реакций, известные электромеханические свойства металла и зависимость от времени функцию с периодом экспозиции, равным 24 часам. Результаты показывают электрический потенциал и плотность электрического тока, когда заклепочное соединение подвергается воздействию электролита, а также позволяют оценить покрытие поверхности (пропорцию листов металла и поверхностей заклепок, покрытых $Mg(OH)_2$) в разное время после начала погружения. Плотность электрического тока зависит от расстояния от центра заклепки и показывает, где коррозия будет возникать быстрее всего (см. рис. 3).

→ КОПАЕМ ГЛУБЖЕ: РИСК РАССЛОЕНИЯ

Гальваническая коррозия возникает не только на стыке между заклепкой и металлическим листом. Опасности подвергаются и другие компоненты автомобиля. Незначительные, с виду неглубокие повреждения лакокрасочного покрытия открывают дорогу коррозии, ведь именно через них влага и электролиты окружающей среды попадают на поверхности, проводящие электрический ток. Даже небольшие повреждения элементов автомобиля могут со-

здать гальваническую пару, которая приведет к расслоению — нарушению адгезии покрытий на металлических листах — и значительному ослаблению защиты от коррозии.

Чтобы просчитать дополнительные риски, господин Хёхе вместе с исследователем из Daimler AG Нильсом Бёшем (Nils Bösch) изучили расслоение на примере покрытого алюминием листа стали, на который методом электроосаждения был нанесен слой катодной краски, также известной как e-coat (см. рис. 4). «Царапина на поверхности листа привела к возникновению гальванической пары между цинком и сталью, в результате чего цинк подвергся коррозии, — объясняет Бёш. — Это привело к возникновению постепенно увеличивающейся в горизонтальном (а не вертикальном) направлении щелевой коррозии между электростатическим покрытием и сталью». Такая реакция очень похожа на процесс щелевой коррозии, которая образуется между двумя поверхностями, создавая трещины в металле. В конечном итоге эти трещины могут привести к разрушению детали, хотя на первый взгляд повреждения и износ материала могут казаться незначительными.

Хёхе и Бёш использовали параметрические анализы в COMSOL для изучения электрического потенциала электролита и электростатического покрытия при различных свойствах защиты электростатического покрытия. Их модель показала рост щелевой коррозии в горизонтальном направлении за счет поглощения цинка (см. рис. 5).

Текущие исследования помогут понять, как размер дефектов на поверхностях влияет на скорость поглощения цинка. На этом этапе модель показывает, что ширина дефектов оказывает гораздо большее влияние, чем глубина: на узких царапинах были выявлены меньшее соотношение катодов к ано-

дам и более ограниченная диффузия, чем на широких повреждениях. А это приводит к замедлению процесса коррозии. Полученные результаты используются для дальнейшего изучения трещин покрытий и их негативного влияния на защиту от коррозии.

→ ОСНОВА ДОЛГОСРОЧНОЙ ЗАЩИТЫ КОНСТРУКЦИЙ

Хотя коррозия и является всепроникающим процессом, избавиться от которого целиком и полностью невозможно, его воздействие можно минимизировать путем тщательных анализов и использования экспертного подхода при конструировании. Хёхе и Бёш сократили число острых краев в заклепочных соединениях и усовершенствовали их геометрию таким образом, чтобы минимизировать зоны, подверженные коррозии, сохранив при этом механическую стабильность. Они также рекомендовали использовать электростатическое покрытие на листах металла, которые, исходя из параметрического исследования, обладают наименьшей проводимостью электрического тока и, соответственно, меньше подвержены разрушению. Их модели COMSOL предоставили важнейшую информацию об электрохимических реакциях, обеспечив инженеров HZG и Daimler AG инструментами для оптимизации заклепочных соединений и улучшения защиты от коррозии.

«Этот вид компьютерного анализа способствует развитию в области легких конструкций и позволяет обнаружить возможные проблемы, связанные с коррозией, на ранних этапах цикла разработки, — отмечает Хёхе. — Коррозия магния опасна для заклепок, используемых в автомобильной промышленности, однако вдумчивая проработка геометрии и обработка конструкции позволяют контролировать ее». ❖



Слева: д-р Даниэль Хёхе, научный сотрудник института HZG. Справа: Нильс Бёш, исследователь в Daimler AG.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА С МАТЕРИАЛОМ

Ученые Ливерморской национальной лаборатории США разрабатывают технологии ремонта кварцевой оптики с помощью мультифизического моделирования.

АВТОР: КРИС ХАРДИ CHRIS HARDEE

Лазеры — это крайне гибкие в настройке и точные устройства, поэтому они широко используются в самых разных устройствах: от бытовой техники до самой современной научной аппаратуры. В число самых известных применений входит изготовление деталей автомобилей, считывание штрих-кодов в магазинах, DVD-плееры и волоконно-оптическая связь. Применение лазеров как прецизионных источников тепла не столь широко известно. Однако именно это свойство делает их чрезвычайно эффективным инструментом для обработки некоторых материалов типа стекла, металлов или полимеров с нанометрической точностью.

Ключевым моментом в разработке и оптимизации лазерных систем для любых применений является понимание взаимодействия лазерного пучка с материалом. Именно такие взаимодействия во всей их сложности изучает Маньялибо Мэтьюз (Manyalibo Matthews), заместитель руководителя группы в отделении материаловедения Ливерморской национальной лаборатории (ЛНЛ). Его исследования связаны с ремонтом и техническим обслуживанием кварцевой оптики самого большого лазера в мире.

→ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛАЗЕРОВ ДЛЯ РЕМОНТА ОПТИКИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

ЛНЛ в г. Ливермор, штат Калифорния, осуществляет надзор за Национальным комплексом лазерных термоядерных реакций (National Ignition Facility, NIF), в котором находится самый большой и мощный лазер в мире. Гигантская установка, способная генерировать до 192 отдельных пучков и оснащенная 40 тыс. оптических устройств для фокусирования, отражения и направления этих пучков, может усиливать лазерные импуль-

сы в 10 миллиардов раз и направлять их в цель размером со стирательную резинку на конце карандаша. Лазерные пучки создают температуру, давление и плотность, сравнимые с теми, что регистрируются в глубинах звезд, сверхновых и больших планет. Ядерщики и астрофизики используют гигантский лазер, чтобы лучше понять Вселенную с помощью технологий типа инерциального управляемого термоядерного синтеза (inertial confinement fusion, ICF), при котором водород нагревается и сжимается до начала слияния ядер.

Но при многократном использовании этой мощной установки оптика системы повреждается. «Эта оптика бывает очень дорогой, — говорит Мэтьюз. — Сверхмощные пучки, генерируемые NIF, повреждают кварцевую оптику, создавая маленькие ямки на ее поверхности, примерно как на ветровом стекле вашего автомобиля при попадании мелких камешков. Мы делаем все, что можем, для ремонта и восстановления поврежденных стекол». Пример двух поврежденных поверхностей стекол до и после ремонта показан на рис. 1.

Хотя лазерный пучок при многократном прохождении и повреждает стекло, лазеры можно использовать и для восстановления повреждений. Только в отличие от гигантского лазера NIF, занимающего три футбольных поля, лазеры для ремонта поврежденной оптики меньше: это настольные установки со встроенными компонентами для формирования пучков и импульсов, которые можно настроить на сглаживание неровностей. Последние исследования Мэтьюза в ЛНЛ направлены на разработку новейшей технологии ремонта оптики, а в более широком плане охватывают все аспекты взаимодействия лазерного пучка с плавным кварцем или стеклом¹.

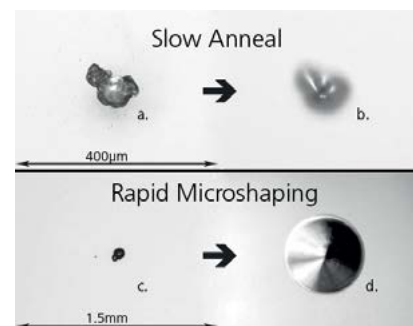


РИСУНОК 1. Примеры стекол, поврежденных многократным воздействием лазерных импульсов большой мощности. На фотографиях (a) и (c) показаны поврежденные участки поверхности, а на (b) и (d) — они же после ремонта. В случае (a) ремонт поврежденного участка производился путем медленного отжига, а в случае (c) — методом быстрой микрообработки, часто применяемым в NIF и обеспечивающим оптически приемлемое качество поверхности.

→ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПУЧКА СО СТЕКЛОМ

Мэтьюз и его команда с помощью компьютерного моделирования исследовали три способа восстановления поврежденной оптики: микрообработка инфракрасным (ИК) импульсным лазером, медленный отжиг и лазерное химическое осаждение из паровой фазы (L-CVD)².

На первой стадии исследования они попытались понять, как ведет себя плавный кварц под действием лазерного пучка при разных температурах.

В разных температурных интервалах эта задача распадается на три физических явления. При температурах до начала стеклования (1300 K), после которой плавный кварц демонстрирует резкое увеличение квазиупругих деформаций и становится менее стойким к пластическому течению, задача сводится к опре-

делению термоупругой реакции. В интервале между температурой стеклования и точкой испарения при ~2200 К рассматривается молекулярная релаксация стекла при вязком течении. Наконец, при температурах между 2200 и 3400 К исследованию подлежит испарение и повторное осаждение материала из паров.

Для разработки конкретных методик устранения повреждений Мэтьюз обратился к программному пакету COMSOL Multiphysics®. «Я решил использовать COMSOL, чтобы лучше понять происходящее, — объясняет Мэтьюз. — В пакете уже имела вся нужная мне физика, так что нетрудно было опробовать идеи и избежать траты времени и сил на разработку собственного кода с нуля».

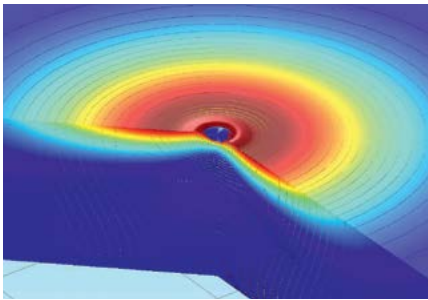


РИСУНОК 2. Результаты моделирования, обнаруживающие эффект Марангони в нагретом лазером стекле. Этот эффект проявляется при возникновении градиентов поверхностного натяжения при нагреве лазерным пучком из-за зависимости натяжения от температуры и заставляет материал вытекать наружу в радиальных направлениях, образуя своеобразные волны или наплывы.

По словам Мэтьюза, пакет COMSOL оказался очень полезным как для понимания сути взаимодействия лазерного пучка с плавленным кварцем, так и для отработки собственных конкретных методик ремонта. «Мощные лазерные системы не допускают сильной шероховатости поверхности оптических приборов. Для обеспечения ровной поверхности по столь высоким стандартам необходим серьезный объем работ по моделированию», — говорит он. В число интересующих Мэтьюза явлений входит теплопередача в жидкостях, химические реакции и механика конструкций, а также массообмен и текучие среды.

→ ИК-ИМПУЛЬСНАЯ ЛАЗЕРНАЯ МИКРООБРАБОТКА

Хотя первым для устранения оптических повреждений был применен простейший способ медленного отжига (см. верхние фотографии на рис. 1), эксперимент и моделирование показали, что при такой обработке вследствие термокапиллярного течения или сдвиговых напряжений Марангони возникает мелкий поверхностный рельеф, который ведет к нежелательному искажению пучка при помещении такой поверхности в луч лазера. Рис. 2 иллюстрирует результат моделирования распределения температур вокруг лазерного пучка и смещение материала под действием сдвиговых напряжений Марангони.

Для устранения этого эффекта Мэтьюз с коллегами попытались дать более короткие (десятки микросекунд вместо минут) лазерные импульсы, чтобы при-

дать материалу форму, наименее искажающую лазерный пучок в системе. Получилась технология, которую они назвали «быстрым абляционным выравниванием» (RAM). ИК-лазер нагревает подложку чуть выше точки испарения, и небольшое, строго определенное количество материала испаряется, оставляя ровную неповрежденную поверхность. Такая нано-абляционная обработка повторяется тысячи и миллионы раз, пока не получится гладкое коническое углубление, которое является «оптически удовлетворительным» в том смысле, что не искажает прошедший сквозь него свет (см. нижние фотографии на рис. 1).

«Несмотря на долгую предысторию применения ИК-лазеров для обработки кварцевой оптики, — отмечает Мэтьюз, — было сделано лишь несколько попыток связать энергию пучка с тепловыми потоками, чтобы оптимизировать этот процесс. Мы же смогли ответить на многие из подобных вопросов благодаря моделированию параметров лазерного пучка и свойств материалов в широких пределах, используя среду COMSOL».

Результаты моделирования по распределению температур и поведению материала в областях абляции хорошо согласуются с экспериментальными данными исследователей. «Наши результаты имеют далеко идущие последствия, — продолжает Мэтьюз, — и могут применяться не только для устранения повреждений в высокоэнергетических импульсно-лазерных системах, но и для лазерной полировки, отжига и формирования поверхности кварцевого стекла практически в любых системах»¹.

→ ЛАЗЕРНОЕ ХИМИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ ИЗ ПАРОВОЙ ФАЗЫ ПРИ УСТРАНЕНИИ СИЛЬНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ

Третья физическая задача, которой занималась команда ЛНЛ при ремонте поврежденной оптики, заключалась в лазерном химическом осаждении материала из паровой фазы (L-CVD). В этой технологии газообразный прекурсор диоксида кремния «натекает» на поверхность через сопло. Сфокусированный пучок газового лазера на основе CO₂ проходит в сопло через окно (см. рис. 3) и там разлагает прекурсор. Образующаяся газовая фаза охлаждается на поверхности стекла и осаждается в виде твердого SiO₂ на дефекте, устраняя его. Технология L-CVD разрабатывается для ремонта с нанометрической точностью больших дефектов на оптических поверхностях, которые трудно заделать с помощью ИК-микрообработки и дру-

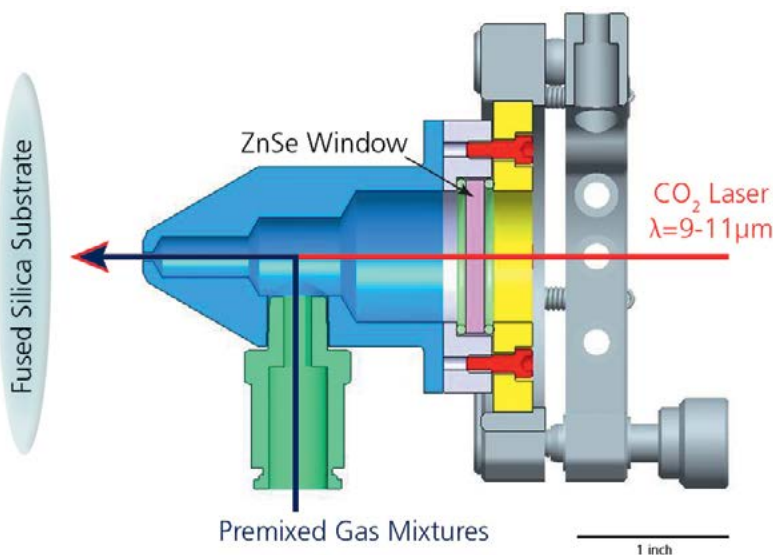


РИСУНОК 3. Схематическое изображение оптически сопряженного газового сопла для лазерного осаждения из газовой фазы, в которое газ входит через боковой порт, в то время как луч ИК-лазера проходит вдоль оси через окно из ZnSe.

гих схожих технологий, основанных на удалении материала. Эта технология позволяет полностью восстановить оптические характеристики изделия.

«Моделирование помогло нам изучать влияние интенсивности пучка, его положения и длительности импульса на количество осажденного на поверхность материала», — поясняет Мэтьюз. Моделирование дает возможность определить концентрацию и параметры потока разлагающегося диоксида кремния, а также место его осаждения (см. рис. 4).

Ученые обнаружили, что мощность лазера имеет критическое для данной технологии пороговое значение, за которым начинаются свойственные многим процессам L-CVD нежелательные явления типа широко известного кратерообразования.

«На сегодняшний день нам не известны другие приемы, с помощью которых можно было бы наносить высококачественный материал субстрата взамен потерянного, чтобы устранить повреждение, — отмечает Мэтьюз. — Успешное внедрение этой технологии позволит снизить технологические расходы, продлить срок службы оптики и в целом создать новую, более стойкую к повреждениям оптику для высокоэнергетических лазеров. Кроме того, разработанную технологию L-CVD можно применять и для других материалов помимо кварцевого стекла, где она может оказаться более выгодной, чем стандартные методы обработки. Для разработки этих новых областей применения особенно важна возможность моделирования нестационарных потоков, реакций и теплопередачи».

→ ОТ РЕМОНТА СТЕКЛА К ПРОИЗВОДСТВУ

Пока технология L-CVD находится в состоянии разработки, команда Мэтьюза в рамках программы ремонта оптики внедрила в NIF технологию лазерного сглаживания поверхности с помощью CO₂-лазера, оптимизированную с помощью мультифизического моделирования. Только за 2014 год с использованием ИК-микрообработки и других подобных технологий было восстановлено более 130000 точек повреждений, после чего восстановленная оптика возвращалась обратно в NIF, поддерживая его в рабочем состоянии.

Однако исследования, посвященные взаимодействию лазерного пучка с материалом, не ограничиваются ремонтом оптики. Мэтьюз и его команда поддерживают принятую в лаборатории ини-

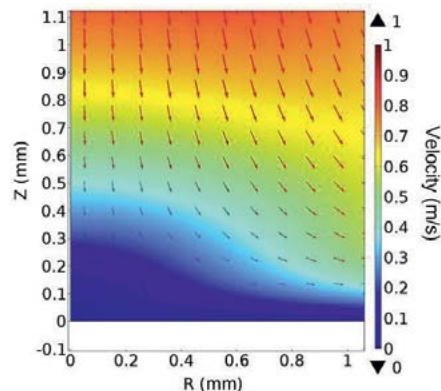
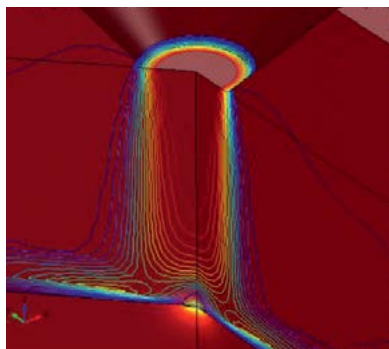


РИСУНОК 4. Моделирование полей скорости течения и температуры в технологии L-CVD.

Слева: контуры скорости течения прекурсора L-CVD из сопла диаметром 3 мм и поле температур, создаваемое лазерным нагревом на границе поверхности стекла и воздушной среды.

Справа: линии скоростей течения газообразного диоксида кремния; в левом нижнем углу виден преимущественно диффузионный перенос стекла (темно-синий).

циативу по внедрению трехмерной печати, в рамках которой начали разработку технологии послойной печати методом так называемого избирательного лазерного плавления (SLM)³. «Эти исследования захватили меня, — говорит Мэтьюз. — Если мы сумеем оптимизировать трехмерную печать, это может иметь огромные последствия для быстро растущей отрасли. Она словно создана для компьютерного моделирования, которое должно прийти на смену методу проб и ошибок».

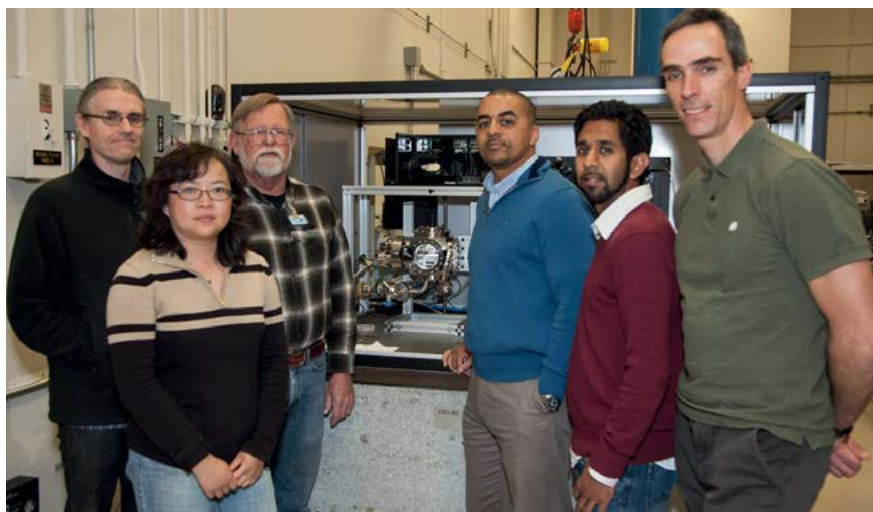
ЛИТЕРАТУРА

¹M. J. Matthews, S. T. Yang, N. Shen, S. Elhadj, R. N. Raman, G. Guss, et al., "Micro-Shaping, Polishing, and Damage Repair of Fused Silica Surfaces Using Focused Infrared Laser Beams,"

Advanced Engineering Materials, vol. 17, p. 247, 2015. (Микрообработка, полировка и устранение повреждений на поверхности плавного кварца с помощью фокусированных пучков инфракрасного лазера).

²M. J. Matthews, S. Elhadj, G. M. Guss, A. Sridharan, N. D. Nielsen, J.-H. Yoo, et al., "Localized planarization of optical damage using laser-based chemical vapor deposition," in SPIE Laser Damage, 2013, pp. 888526-888526-9. (Локальное выравнивание оптических повреждений с помощью лазерного химического осаждения материала из паровой фазы).

³N. E. Hodge, R. M. Ferencz, and J. M. Solberg, "Implementation of a thermomechanical model for the simulation of selective laser melting," Computational Mechanics, vol. 54, pp. 33-51. (Реализация термомеханической модели избирательного лазерного плавления).



Группа устранения оптических повреждений и лазерной обработки материалов ЛНЛ (слева направо): Гейб Гасс (Gabe Guss), Нань Шень (Nan Shen), Норман Нильсен (Norman Nielsen), Маньялибо Мэтьюз, Раджеш Раман (Rajesh Raman) и Селим Эльхадж (Selim Elhadj). Установка на заднем плане предназначена для исследования динамики плавления металлических порошков при облучении мощным лазером — важного направления в области трехмерной печати с применением металлов.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Компания EMIX применяет мультифизическое моделирование для оптимизации своей технологии производства так называемого «солнечного кремния» методом плавки в холодном тигле и непрерывного литья (так же известного как «кремний солнечного качества» — т. е. кремния, используемого в производстве фотоэлементов).

АВТОР: КРИС ХАРДИ

Кремниевые пластины микронной толщины являются фундаментом полупроводниковой промышленности. Эти пластины — базовый элемент интегральных схем (ИС), в которых собственная проводимость металла используется для создания контактных дорожек, осуществляющих связь между ИС во всех современных компьютерах и электронике.

Но есть и другая отрасль, где кремний играет главную роль — это солнечная энергетика (СЭ). В этом быстро растущем направлении альтернативной энергетики фотоэлементы на основе кремниевых пластин превращают свет Солнца в электричество. Многие видят в солнечной энергетике большое будущее. Однако чтобы конкурировать с более развитыми технологиями на основе ископаемого топлива, производителям солнечных батарей необходимо найти способы снижения стоимости единицы произведенной энергии.

«В зависимости от цены поликристаллического кремния, стоимость кремния может составлять до 30% конечной коммерческой цены солнечной батареи», — сообщает д-р Жюльен Живерно (Julien Givernaud), инженер-исследователь компании EMIX, входящей во французский филиал корпорации Grupo FerroAtlantica. Живерно работает над оптимизацией холодного тигля для индукционной печи и сопутствующего оборудования для повышения чистоты солнечного кремния. «Понижение себестоимости кремния при увеличении его чистоты — это критическое условие существования всей отрасли».

→ ПРОИЗВОДСТВО КРЕМНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЧИСТОТЫ

По распространению в природе кремний является вторым по массовому содержанию в земной коре. Для применения в энергетике металлургический кремний (чистотой 99,9%) нужно переработать в более чистый сорт, содержащий не более одного атома примеси на миллион (99,9999%). Чистота важна потому, что она прямо влияет на выработку солнечной батареей электроэнергии из одного и того же количества солнечной энергии — показатель, называемый коэффициентом фотогальванического преобразования.

Известен ряд альтернативных технологий трансформации природного кремния до солнечной чистоты. «Но наш способ плавки в холодном тигле и непрерывного литья (continuous cold crucible casting или 4C) — это новая технология», — гово-

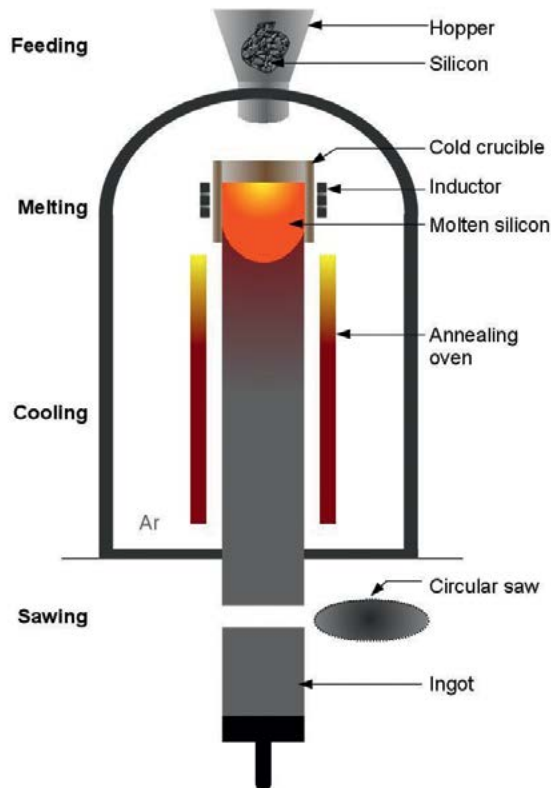


РИСУНОК 1. Схематическая иллюстрация технологии плавки в холодном тигле и непрерывного литья (4C) для производства кремния солнечной чистоты. Исходный кремний подается в бункер наверху, затем плавится, охлаждается и режется на слитки.

рит Живерно, который использует программный пакет COMSOL Multiphysics® для оптимизации параметров производства. Его компания имеет несколько патентов и эксклюзивную всемирную лицензию на данную технологию.

В технологии 4C кремниевое сырье подается в водоохлаждаемый тигель, где нагревается индукционными токами до температуры плавления 1414 °C. Затем он перемешивается электромагнитными полями в тигле, не приходя в контакт со стенками тигля благодаря силам Лоренца, причем перемешивание обеспечивает однородность концентрации примесей на границе твердого тела с жидкой средой, что способствует кристаллизации. В результате чистота расплава высока (см. рис. 1).

После перемешивания расплав «вытягивается» через отверстие в дне тигля, охла-

ждается и затвердевает в режиме отжига при тщательно контролируемых условиях. На выходе из установки непрерывно образующийся кремниевый стержень режется на слитки, которые и продаются производителям солнечных батарей, а те, в свою очередь, нарезают их на пластины толщиной 200 микрон и делают из этих пластин батареи.

→ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЫШАЕТ КОЭФФИЦИЕНТ ВЫРАБОТКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Будучи сравнительно простой в принципе, технология 4C компании EMIX зависит от большого числа переменных параметров производства. Здесь в дело и включается моделирование. На моделях Живерно выполнил множество расчетов для исследования, например, способов ох-

лаждения, скорости вытягивания, форм тигля и индуктора, а также характеристик печей. Он проанализировал также влияние на кристаллизацию электромагнитного поля, формы границы между твердым телом и жидкой средой, а также упругих напряжений.

Инженеры компании EMIX применяют мультифизическое моделирование для оценки технологии производства уже восемь лет — почти столько же, сколько занимаются солнечным кремнием. «Среда COMSOL Multiphysics гораздо удобнее, чем инструмент для расчета методом конечных элементов (FEA), которым я пользовался на прежней работе, — говорит Живерно. — Все свои геометрии я создаю прямо в COMSOL. Построить сетку в модели очень просто. Можно легко переключаться между разными физиками, а решатель работает быстро и эффективно. В целом это очень интуитивный и мощный инструмент».

В последних работах Живерно учитываются многомасштабные электромагнитные явления, и применяется трехмерное моделирование непрерывной разливки кремния. Моделирование электромагнитных процессов позволило оценить индуктивность и импеданс системы с тем, чтобы оптимизировать конструкцию тигля для повышения электрического КПД (см. рис. 2). Моделирование же непрерывной разливки позволило учесть такие параметры, как электромагнитная мощность, скорость кристаллизации, высота охлаждаемой зоны тигля и температура вне зоны нагрева. Сочетание результатов этих исследований позволило найти компромисс между высокой производительностью установки и низкими остаточными напряжениями в слитках.

Для разных видов моделирования использовались также интерфейсы COMSOL Heat Transfer in Fluids (Теплопередача в жидкостях) и Laminar Flow (Ламинарный поток) для расчета фазового превращения кремния в процессе его затвердевания в тигле. Расчеты для цилиндрического экспериментального тигля после проверки будут выполнены и для большого тигля, используемого в промышленном производстве.

«Соответствие между нашими результатами моделирования и экспериментальными данными на опытной установке оказалось очень высоким, — говорит Живерно. — Моделирование помогло нам достичь хороших параметров кристаллизации, повысить электрический КПД и уменьшить число пусков опытной установки». Далее он добавляет, что последние серии работ по моделированию продемонстрировали теоретическую экономию энергии приблизительно в 15% при повышении скорости вытягивания на 30%, что делает технологию 4С намного более производительной, чем прочие стандартные технологии выплавки кремния.

Производители всей отрасли стремятся понизить себестоимость кремниевых пластин с одновременным повышением чистоты материала для солнечной энергетики. Наградой для компаний, разработавших самых

коммерчески оправданные решения, служит увеличение их доли на растущем рынке. «Мультифизическое моделирование помогло нам найти некоторые приемы, которые стоит испытать в промышленном масштабе», — говорит Живерно. Он надеется, что компании EMIX удастся покорить новые высоты благодаря инновациям, над которыми он работает. ❖

«Среда COMSOL Multiphysics гораздо удобнее, чем инструмент для расчета методом конечных элементов (FEA), которым я пользовался на прежней работе... В целом это очень интуитивный и мощный инструмент».

—ЖЮЛЬЕН ЖИВЕРНО, ИНЖЕНЕР-ИССЛЕДОВАТЕЛЬ КОМПАНИИ EMIX



Научно-исследовательская группа компании EMIX на фоне печи для производства кремния (слева направо): Жюльен Живерно, Элоди Перейра (Elodie Pereira), Николая Пурад (Nicolas Pourade), Флорин Буль (Florine Boule), Александр Пети (Alexandre Petit).

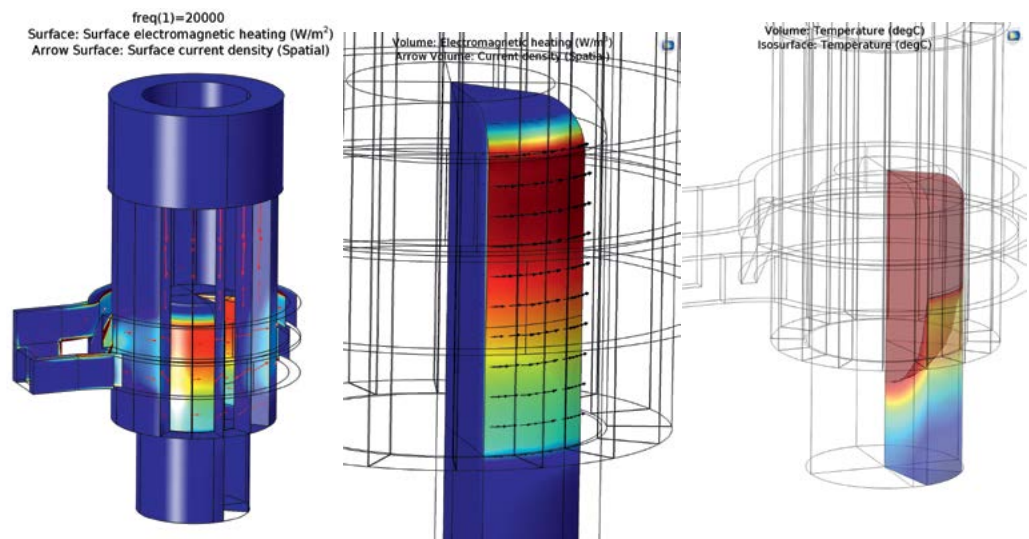


РИСУНОК 2. Модель холодного тигля, которая использовалась для прогнозирования электромагнитного нагрева тигля (слева), кремниевого расплава (в центре) и границы между твердым телом, жидкой и газообразной средой (справа). Красным и желтым обозначен расплав, а синим и зеленым — твердая фаза.

МНОГОМАСШТАБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКРЫВАЕТ НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ВИРТУАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ

Исследователи Нидерландской организации прикладных научных исследований (TNO) применяют методы мультифизического многомасштабного моделирования и оптимизации топологии в исследованиях композитной 3D-печати.

АВТОР: ЛЕКСИ КАРВЕР (LEXI CARVER)

В последние годы 3D-печать (технология послойного синтеза) стала играть важную роль в научных разработках, проектировании и производстве. Также она обладает серьезным потенциалом и в области разработки материалов. Возможность печатать объекты из нескольких материалов, обеспечивая вариативность свойств объекта, в ближайшем будущем станет привычной. Она сделает возможным создание продукции с очень специфическими свойствами материалов.

В технологии послойного синтеза для создания объекта часто применяются периодические микроструктуры. Элемент такой микроструктуры называется элементарной ячейкой. Их форма может быть простой, например, треугольной или шестиугольной, либо весьма сложной, с поперечными распорками и пустотами между стенками. Возможности композитной 3D-печати на микроуровне, позволяющие комбинировать эти микроструктуры и обеспечивать необходимые свойства, в настоящее время интенсивно развиваются. Такая возможность тонкого управления позволит инженерам выбирать соотношения материалов и взаимное расположение элементов, а значит, создавать материалы и объекты, недоступные для моно-материальной 3D-печати.

Сотрудники Нидерландской организации прикладных научных исследований (TNO) исследуют возможности виртуальной разработки материалов с помощью систем мультифизического и мультимасштабного моделирования. Они стремятся понять, как эффективно управлять свойствами изделий, получаемых 3D-печатью. Это направление работы научно-исследовательского института затрагивает множество тем — безопасность и охрана труда, управление энергоснабжением и производство. Методы, при-

меняемые для оптимизации материалов и топологии моделей для 3D-печати, теперь используются и в других областях разработок: мехатроник легковесных устройств, фотоэлементов произвольной формы, осветительных приборов.

→ НАГРУЗКИ, НАПРЯЖЕНИЯ И ЖЕСТКОСТЬ АНИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Анизотропные материалы по-разному реагируют на нагрузку, приложенную в различных направлениях. Современные методы производства материалов позволяют управлять анизотропией лишь в ограниченных масштабах. Это затрудняет применение анизотропии в проектировании изделий.

Марко Баринк (Marco Varink), научный сотрудник TNO, стремится разработать процедуру, которая позволила бы проектировать пригодные для массового производства анизотропные структуры за счет оптимизации жесткости и топологии. Он начал применять среду COMSOL Multiphysics® для изучения элементарной ячейки, жесткость которой в двух направлениях отличалась бы в два раза (см. рис. 1). «Мы стремимся создать ячейку с желаемой матрицей жесткости: мы задаем напряжение в COMSOL, а затем проводим оптимизацию, чтобы определить нужную нагрузку, — рассказывает Баринк. — Мы можем поставить в COMSOL задачу придать материалу в одном направлении вдвое большую жесткость, чем в другом, а затем анализировать поведение материала при заданной геометрии». Для проверки результатов моделирования он изготовил опытный образец, который тестировался на соответствие материала нужным свойствам. После того, как полученные результаты подтвердились, Марко провел еще один оптимизационный анализ для материала

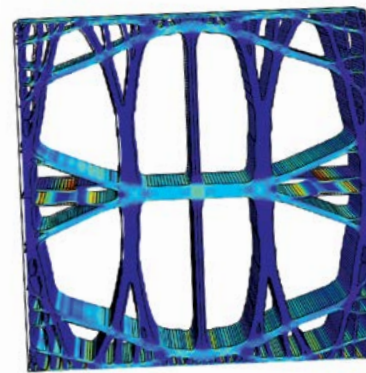
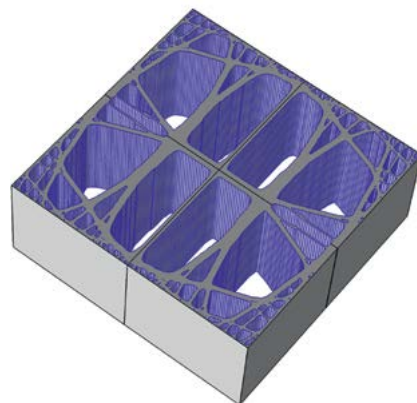


РИСУНОК 1. Вверху: геометрия элементарной ячейки. В центре: результаты моделирования — механические нагрузки в оптимизированной модели; жесткость в двух направлениях отличается в два раза. Внизу: образцы, полученные с помощью 3D-печати.

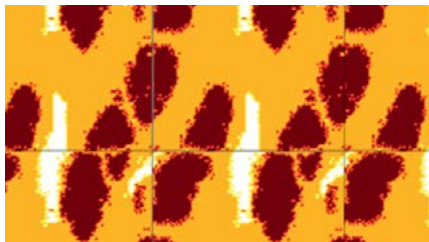


РИСУНОК 2. Результаты моделирования по Баринку отражают оптимальную (трехкомпонентную) структуру материала при желаемой анизотропной теплопроводности. На полученной моделировании диаграмме видны области высокой теплопроводности (белый цвет), низкой теплопроводности (оранжевый), теплоизолирующий материал и пустоты (красный). Элементарные ячейки организуются в периодические массивы.

с высокой степенью анизотропии. В этом случае моделирование позволило управлять не только пространственным распределением материала, но и ориентацией анизотропных волокон.

Однако перед проектом стояла более масштабная задача — проектирование изделий со свойствами, которые не присущи «чистым» материалам. Поэтому следующим этапом стало моделирование композитных структур, состоящих из различных материалов. В среде COMSOL Марко создал анизотропную композитную ячейку, затем выполнил оптимизацию локального распределения каждого материала в периодической структуре, состоящей из этих ячеек (рис. 2). Путем последовательной модификации состава и распределения композитного материала в программной среде он добился необходимого значения общего значения теплопроводности.

→ МНОГОМАСШТАБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ГОМОЕНИЗАЦИЯ

В масштабах всего изделия элементарная ячейка очень мала. Проведя оптимизацию на микроуровне, рабочая группа TNO приступила к изучению оптимизации материалов в более крупных масштабах. «Как мы выяснили, оптимизация на микроуровне хорошо работает для малых объемов, — рассказывает Эрика Кунен (Erica Coenen), научный сотрудник TNO. — Однако для проектирования рабочих изделий необходимо осуществлять моделирование более крупных объемов за достаточно малое время. Эта задача решается методами многомасштабного моделирования: они обеспечивают моделирование одновременно на микроуровне и в масштабах всего изделия».

Эрика воспользовалась возможностями COMSOL, чтобы вычислить параметры эффективного структурного поведения элементарной композитной ячейки. Эти сведения об эффективном поведении применяются для создания полномасштабной модели (макромодели) всего устройства. «Мы успешно провели полное многомасштабное моделирование: макромодель содержит однородные свойства без сведений о подструктурах, а микромодель включает в себя гетерогенную структуру композитного материала. В рамках одной макромодели работает множество микромоделей, — объясняет она. — Мы можем исследовать множество микромоделей одновременно, определяя поведение материалов с высокой степенью нелинейности и зависимости от температуры на основе локальных условий макромодели».

Эрика и Марко применили упрощенную версию этого метода в работе над одним из важных направлений исследований TNO — разработку больших, гибких органических светодиодных индикаторов (OLED), при изготовлении которых органические полупроводники наносятся на гибкую подложку. Чтобы обеспечить высокую однородность светового потока, требуется тщательная работа над металлическими сетками, которые лежат в основе прозрачных электродов на передней панели этих устройств. При видимых различиях в интенсивности излучения на поверхности образуются более светлые и темные участки, что нежелательно для конечного продукта.

Однако непосредственное моделирование OLED на основе металлической сетки оказалось сложной задачей: масштабы компонентов устройства сильно

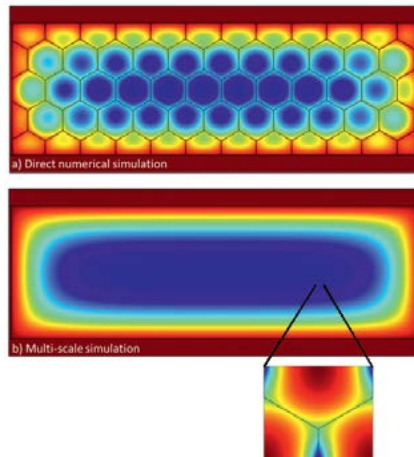


РИСУНОК 3. Результаты моделирования в среде COMSOL®: светоотдача органического светодиода. Вверху: модель, содержащая гексагональную решетку. Внизу: макромодель с гомогенизированными свойствами материала.

отличаются. Ширина шестиугольной ячейки сетки — всего несколько миллиметров, а толщина металлических граней — 10–100 микрон. При этом сам органический диод достаточно велик (размеры устройства — десятки сантиметров). Учесть различные масштабы в одной модели достаточно сложно.

«Многомасштабное моделирование позволило нам существенно продвинуться вперед», — рассказывает Баринк. В новом исследовании, выполненном с помощью COMSOL, была проанализирована форма сетки и определена идеальная структура для улучшения распределения света. Сочетание макромоделирования всего диода и микромоделирования гексагональной сетки позволило оптимизировать размещение и параметры сетки,

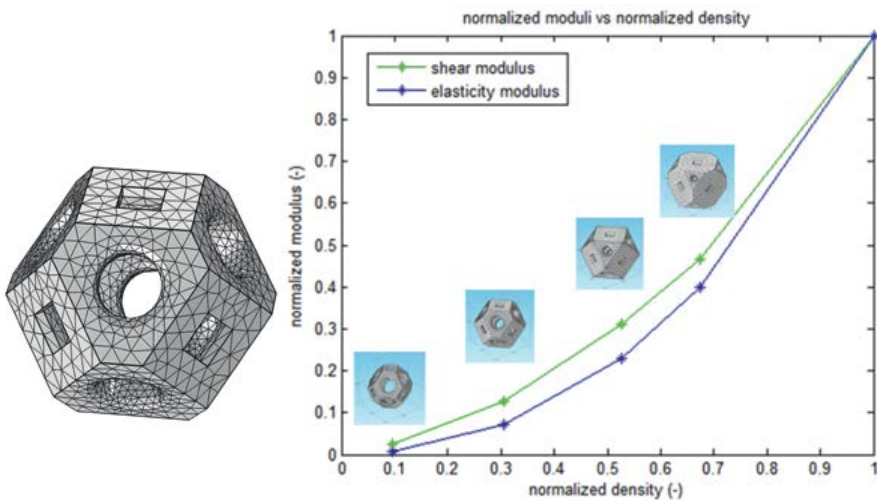


РИСУНОК 4. Слева: модель ячейки с сеткой, оптимизированная для 3D-печати металлом. Справа: график гомогенизированных свойств материала для различных структур ячейки.

чтобы получить желаемый уровень светового излучения (см. рис. 3). Внесенные в проект изменения позволили улучшить однородность светового потока на 12%, сохранив эффективность OLED на прежнем уровне.

**→ СИНТЕЗ РЕЗУЛЬТАТОВ:
ОТ ОТДЕЛЬНОЙ ЯЧЕЙКИ
К ЦЕЛОМУ УСТРОЙСТВУ**

Эрика и Марко показали, что оптимизация топологии — мощный инструмент в создании моделей для послойного синтеза, позволяющий разрабатывать продукты, невозможные в рамках стандартных подходов. Но ограничения присущи даже такой гибкой технологии производства. При селективном лазерном плавлении (SLM; один из способов 3D-печати) принтер сплавляет слои порошкообразного вещества, придавая им нужную форму. Неиспользованный порошок после печати необходимо удалить с объекта. Крупные выступы могут изгибаться, поэтому их в SLM стремятся избегать. Эта особенность процесса — источник потенциальных проблем. Что случится, если в результате оптимизации топологии будет получена модель, содержащая пустоты или крупные выступы?

«Чтобы избежать этого, наши инженеры применяют ячейки с различными значениями плотности, — объясняет Баринк. — Эти ячейки разработаны так, чтобы всегда быть жесткими и пригодными к печати. Кроме того, они содержат отверстия, позволяющие удалить порошок. Сочетание различных элементарных ячеек позволяет задавать различные свойства изделия». Затем с помощью COMSOL исследователи проанализировали взаимосвязь между плотностью материалов и жесткостью изделия (см. рис. 4).

Обрабатывать модель всего устройства, состоящую из тысяч элементарных 3D-ячеек, невозможно. Поэтому они пошли проверенным путем: вначале была проведена гомогенизация жесткости для ячейки каждого типа, а затем — оптимизация топологии в более крупном масштабе. «Гомогенизированные свойства отдельных элементарных ячеек позволяют рассматривать их как отдельные материалы при оптимизации топологии в масштабах всего устройства», — рассказывает Баринк.

Им удалось применить этот метод не только к металлической печати, но и к более дешевым методам — например, для оптимизации ручки молотка из полимерного материала (см. рис. 5). Конечная модель представляет собой комбинацию ячеек различного типа,

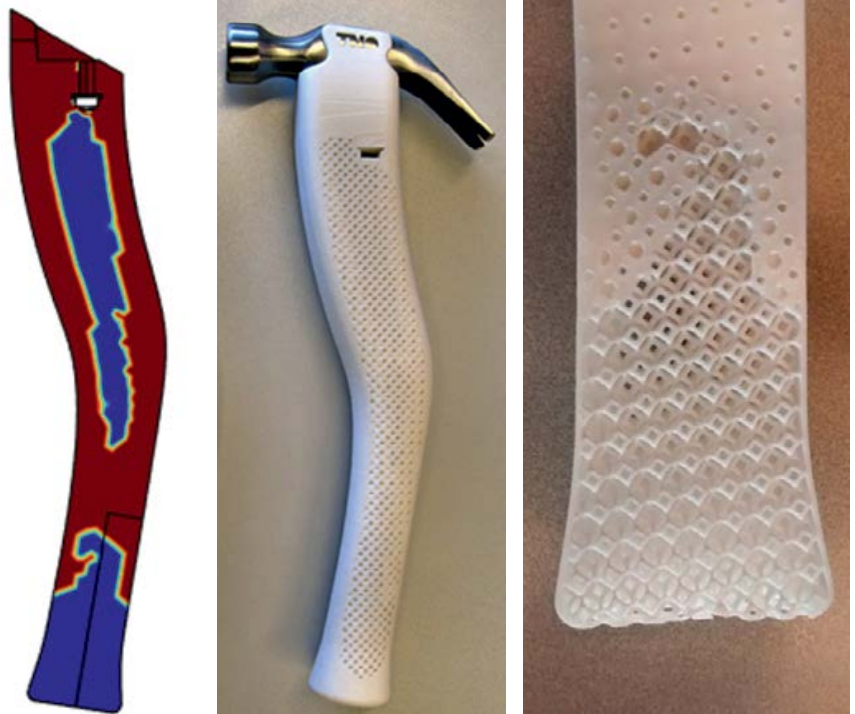


РИСУНОК 5. Слева: результат оптимизации топологии в среде COMSOL®. В центре: оптимизированная ручка молотка, 3D-печать, нейлон. Справа: крупный план структуры, содержащей ячейки трех различных типов: наиболее плотные ячейки с маленькими отверстиями вверху, наименее плотные ячейки внизу, несколько промежуточных форм — посередине.

программно оптимизированную для обеспечения необходимой жесткости и минимального расхода материалов. «Эта ручка молотка демонстрирует мощь и гибкость нашей процедуры на всех этапах — от проектирования до выпуска конечного продукта, — поясняет Кунен. — Мы разработали метод, позволяющий создавать изделия с заданными свойствами на микроуровне — проектирование элементарных ячеек, гомогенизация, оптимизация топологии, создание модели для принтера и, наконец, печать. Эти методы позволяют решить стандартные задачи металлической пе-

чати и разрабатывать более надежные и высокотехнологичные продукты.

Специалисты TNO начали разработку с элементарной ячейки и успешно проделали весь путь до анизотропных композитных микроструктур. Применение этих методов в различных сферах разработок TNO показало, что сочетание имитации и многоуровневого моделирования открывает новые возможности разработки инновационных продуктов. Так методы моделирования позволили заглянуть будущее, в котором композитное проектирование станет стандартным методом послойного синтеза. ❖



Марко Баринк (слева) и Эрика Кунен (справа) с 3D-принтером, TNO.

ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СЛОЖНЫХ ФАСАДОВ ЗДАНИЙ

Используя мультифизическое моделирование для понимания взаимодействия между переменными величинами окружающей среды, геометрических форм и строительных сооружений, инженеры компании Newtecnic гарантируют эстетичность и реализуемость инновационных фасадов зданий.

АВТОР: ДЖЕНИФЕР ХЕНД (JENNIFER HAND)

Площадь Федерации, Мельбурн, Австралия



РИСУНОК 1. Культурный центр имени Гейдара Алиева, Баку, Азербайджан.

Динамичные, текстурные и символические; не важно, бросают ли они вызов силе притяжения или органично вырастают из окружающего ландшафта, — знаменитые сооружения часто имеют сложные фасады. Спроектированные не только для защиты, они также регулируют такие переменчивые факторы, как температура и внешняя эстетика.

Специалист в данной области, компания Newtecnic, проектирует и анализирует фасадные системы для их использования в значимых общественных проектах, а также систематически сотрудничает с компанией Zaha Hadid Architects, известной во всем мире смелыми, текучими архитектурными формами. Основатели и нынешние руководители компании Newtecnic Эндрю Уоттс (Andrew Watts) и Ясмин Уоттс (Yasmin Watts) известны своей работой над выдающимися проектами, в число которых входят знаменитая Площадь Федерации (Мельбурн, Австралия) и совсем недавно построенный культурный центр имени Гейдара Алиева в центре Баку, Азербайджан (см. рис. 1).

Работа с уникальными решениями для компании Newtecnic не в новинку, при этом каждый проект требует мышления, выходящего за рамки концептуального проектирования. Архитекторы заботятся об эстетике и выполняют моделирование поверхностей проектируемых зданий, после чего инженеры компании Newtecnic слой за слоем выстраивают фасад, не забывая о креативности конструкции и обеспечивая ее конструктивную целостность.

«Наши клиенты хотят получить эффективные и экономичные конструкторские решения, которые бы соответствовали требованиям, условиям окружающей среды и были бы просты в эксплуатации, — говорит Кармело Галанте (Carmelo Galante), начальник исследовательского отдела компании Newtecnic. — Поэтому ключевым аспектом нашей работы является описание физических свойств фасадных систем, которые мы проектируем».

Существует множество задач, которые можно решить с помощью моделирования: от исследований солнечного излу-

чения, которые позволяют оптимизировать расчет затенения, чтобы уменьшить нагрузку на систему охлаждения и добиться максимальной эстетики, до влияния крепежных кронштейнов вентилируемого фасада на целостность изоляции.

→ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗА РАМКАМИ КОНЦЕПТУАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Программное обеспечение COMSOL Multiphysics® стало ключевым инструментом для компании Newtecnic. Рассказывает Кармело Галанте: «Один пакет для моделирования решает все наши задачи. Я использую COMSOL для изучения трехмерных моделей теплового моста — это когда материалы с высокой проводимостью проникают в изоляцию — и его влияния на общую энергоэффективность всего сооружения, а также для оценки максимальной температуры компонентов и выбора наиболее подходящих изделий или материалов. Я могу оценивать давление облицовки на конструкцию здания на

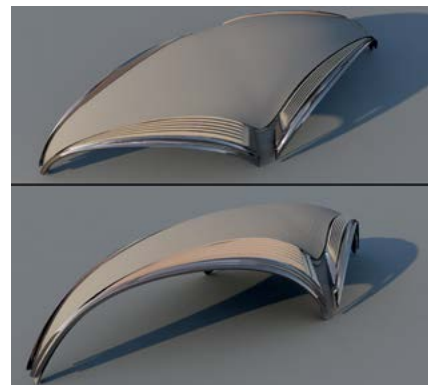


РИСУНОК 2. Визуализация одной оболочки под двумя разными углами. Множество таких оболочек станут частью здания.

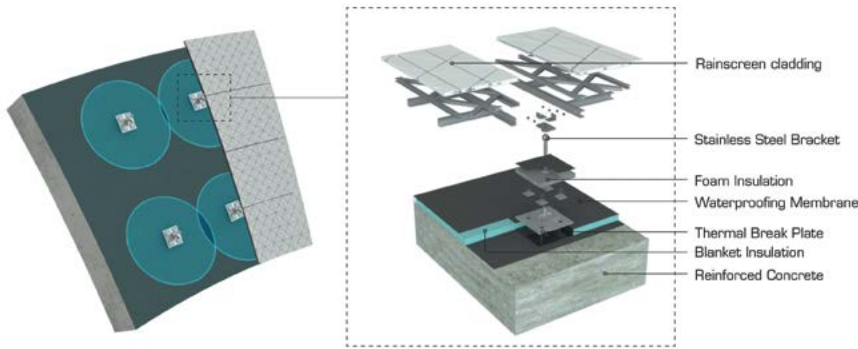


РИСУНОК 3. Выделенные элементы системы вентилируемого фасада с крепежными кронштейнами.

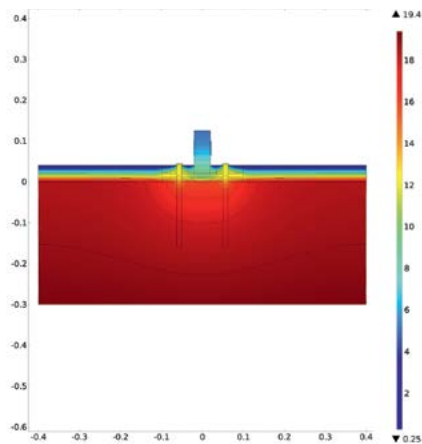


РИСУНОК 4. Результаты моделирования в виде изотерм и профиля распределения температур в °С для кронштейна в разрезе.

этапах эскизного проектирования и исследовать более сложные фасады, в которых одновременно присутствует и принудительная, и естественная вентиляция. Также я могу оценивать влияние различных конфигураций конструкции на гигротермические характеристики фасадной системы».

С помощью функции импорта данных САПР, доступной в среде COMSOL®, Галанте часто импортирует сложные геометрические формы, в основном из ПО Autodesk® AutoCAD® и Rhinoceros®. В компании Newtecnic все чаще применяется ПО Autodesk® Revit®, поэтому новый модуль расширения LiveLink™ for Revit®, обеспечивающий интеграцию моделей COMSOL со средой Revit, исключительно важен для работы. Также Галанте использует COMSOL совместно с инструментами параметрического моделирования, такими как язык программирования Grasshopper®, который применяется для построения и анализа сложных геометрий посредством порождающих алгоритмов.

В одном из текущих проектов компании Newtecnic применяется проектиро-

вание фасадных систем для престижного частного сооружения, которое состоит из самонесущих бетонных оболочек длиной от 10 до 80 м и высотой до 30 м (см. рис. 2).

Бетонные оболочки облицованы вентилируемыми фасадными системами, изготовленными из керамических панелей с двумя криволинейными контурами поверхности, что позволяет точно воспроизводить геометрию здания. Каждая панель на углах поддерживается регулируемыми крепежными кронштейнами, изготовленными из нержавеющей стали. Эти кронштейны крепятся к бетонной конструкции четырьмя анкерами после просверливания дополнительных отверстий, как показано на рис. 3. Так как кронштейны проходят сквозь слой изоляции и имеют более высокую теплопроводность, чем бетонная конструкция, то они создают тепловые мосты через фасадную оболочку, существенно снижая ее тепловые характеристики.

Выполнив упрощенный двумерный анализ в среде COMSOL, Галанте изучил, каким образом создаваемый кронштейнами эффект теплового моста влияет на

«Моделирование сводит к минимуму затраты на строительство, демонстрируя подрядчикам, что именно необходимо построить».

— ФАБИО МИКОЛИ, ЗАМЕСТИТЕЛЬ ДИРЕКТОРА КОМПАНИИ NEWTECNIC

распределение температуры по фасаду (см. рис. 4). Результаты моделирования были внесены в сценарий Grasshopper® для оценки трех интересующих областей: тех, на которые воздействует один кронштейн; на которые воздействуют два или более кронштейнов и на которые кронштейны вообще не воздействуют (эти области показаны на рис. 5).

После этого Галанте смог подготовить точную геометрию системы, а также все компоненты сооружения. «Это большое преимущество, когда ты можешь использовать два инструмента сразу, — говорит Галанте. — Grasshopper® дает мне возможность изучить геометрию в очень большом масштабе, в масштабе целого здания, после чего я с имеющимися данными возвращаюсь в COMSOL и создаю детальную трехмерную модель, чтобы узнать реальные физические процессы, происходящие в системе». Используя такой подход, Галанте смог выполнить трехмерный анализ для изучения эффекта теплового моста в кронштейнах и всем здании (см. рис. 6), а также вычислить общий коэффициент теплопередачи (коэффициент теплоусвоения) фасада.

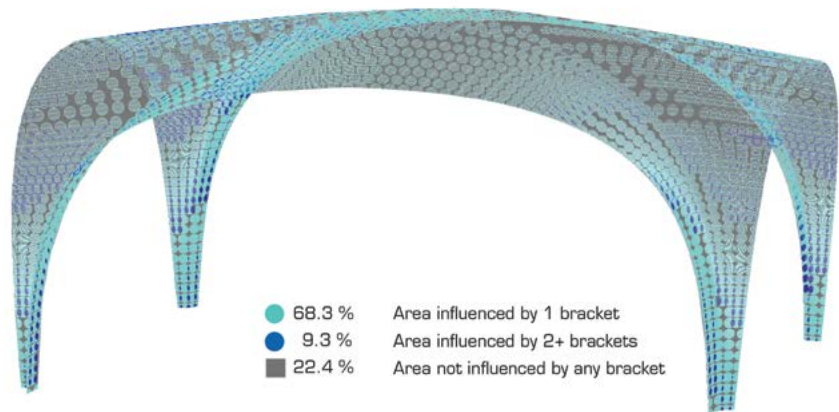


РИСУНОК 5. Модель одной из оболочек, изображенных на рисунке 2, с обозначением точек крепления в зависимости от количества используемых скоб: 1 скоба, 2 скобы или отсутствие скоб.

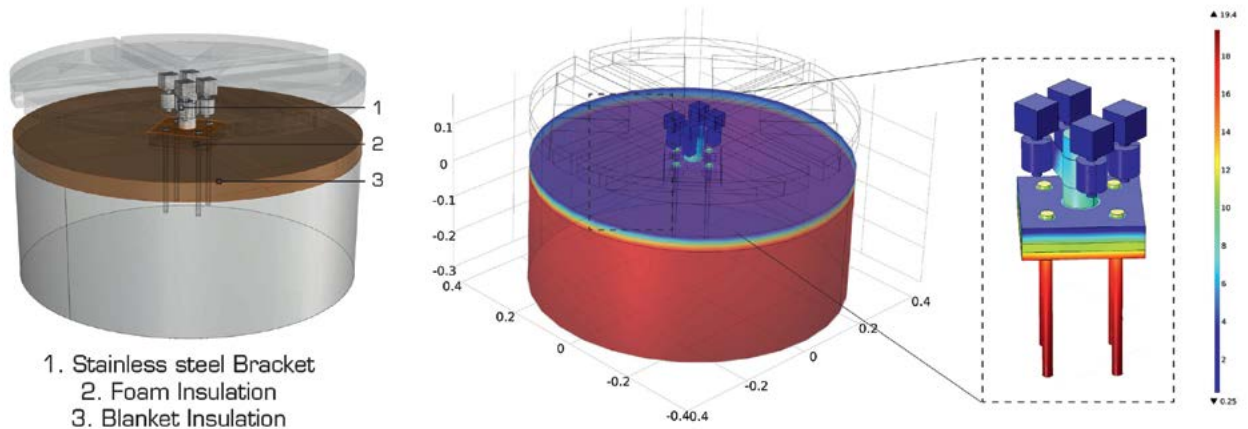


РИСУНОК 6. Слева: трехмерная модель кронштейнов и окружающей изоляции, построенная в ПО Rhinoceros® и импортированная в среду COMSOL Multiphysics®. В центре: модель, выполненная в среде COMSOL® и отображающая профиль распределения температур в °C в области, на которую воздействует кронштейн. Справа: кронштейн из нержавеющей стали.

«С помощью мультифизического моделирования я сумел лучше понять реальную ситуацию, — объясняет Галанте. — Я могу анализировать потоки сред совместно с явлениями теплопередачи с учетом проводимости, конвекции и излучения. Иными словами, я могу более точно оценивать взаимосвязь разных физических явлений и проверять характеристики различных конструкций и материалов».

→ УЧЕТ ИЗМЕНЕНИЙ КОНСТРУКЦИИ

Инженеры компании Newtecnic должны учитывать постоянные изменения конструкции и подтверждать правильность любых таких изменений. «Моделирование дает нам такую возможность, — говорит Галанте. — Мы можем четко продемонстрировать, какой именно эффект окажут изменения конструкции, и не важно, относятся ли они, например, к энергоэффективности, конструктивным характеристикам, коррозии или сроку службы компонента».

Директору Newtecnic Эндрю Уоттсу приходится отвечать на вопросы вроде: «Стоит ли поменять это, чтобы заработало что-то другое?» или «Если мы это поменяем, то до какой степени?». Он высказал свое мнение: «С помощью моделирования мы можем отойти от применяемых в строительстве традиционных принципов изучения отдельных компонентов, которые выполняют одну единственную функцию, а вместо этого думать о многофункциональных компонентах и сооружении в целом».

Моделирование используется для анализа каждого компонента сооружения, а его результаты в полном объеме присутствуют в чертежах, поэтому оцен-

ка затрат становится исчерпывающей и понятной. Фабио Миколи (Fabio Micoli), заместитель директора компании Newtecnic, отметил ценность обратной связи с клиентами.

«Моделирование сводит к минимуму затраты на строительство, демонстрируя подрядчикам, что именно необходимо построить. Это, в свою очередь, позволяет сократить бюджет неподвижных затрат и время на устранение недостатков конструкции, давая строительной бригаде сконцентрироваться на сроках выполнения проекта».

→ НЕПРЕРЫВНЫЙ ПРОЦЕСС УЛУЧШЕНИЯ

«Цифровые инструменты, которые мы используем, например, среда моделирования, позволяют нам изучать новые возможности, а также улучшать процесс

проектирования», — говорит Галанте. Он и его коллеги видят потенциал для более широкого использования моделирования в компании Newtecnic, включая новую Среду разработки приложений, входящую в COMSOL Multiphysics® 5.0. Миколи отмечает: «Мы можем, например, лучше взаимодействовать с клиентами, создав приложение, которое позволило бы архитектору изменять различные параметры и видеть, как именно изменения повлияют на конструкцию, не вникая в нюансы мультифизического моделирования».

Определяющим фактором является то, что с помощью моделирования клиенты компании Newtecnic смогут лучше чем, когда-либо, понять характеристики сооружения, что подчеркнет преимущества инновационного архитектурного проекта. ❖



Кармело Галанте (слева), Эндрю Уоттс (в центре) и Фабио Миколи (справа) за обсуждением одного из последних проектов в офисе компании Newtecnic в Лондоне, Великобритания.

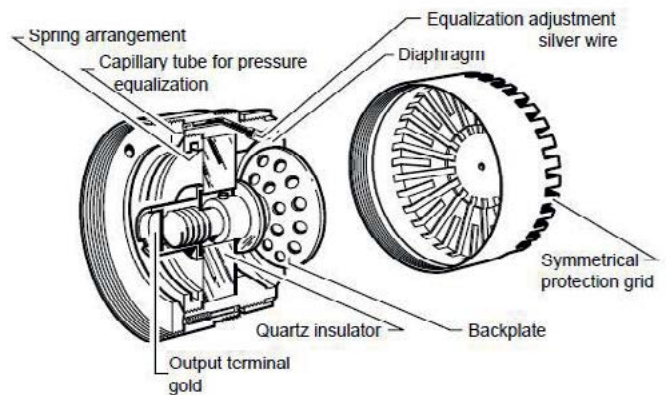
СОВЕРШЕННОЕ ИСПОЛНЕНИЕ: СТРЕМЛЕНИЕ К ИДЕАЛЬНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ

Исследователи компании Brüel & Kjær используют моделирование для достижения новых уровней точности своих промышленных и измерительных микрофонов и преобразователей.

АВТОР: АЛЕКСАНДРА ФУЛИ



РИСУНОК 1. Слева: фотография микрофона 4134 с защитной сеткой, установленной над диафрагмой. Справа: вид типового капсюля микрофона в разрезе, где показаны его основные компоненты.



Ничего идеального не существует: ни идеальных измерений, ни идеального измерительного прибора. Несмотря на то, что мы можем полагаться на выполнимые нами измерения, ни одно из них никогда не будет безупречным, поскольку наши приборы не определяют, что именно измеряют. Вместо этого, они реагируют на окружающие явления и сопоставляют эти данные с безупречным представлением абсолютного стандарта.

Следовательно, все приборы имеют степень допустимой погрешности — допустимую величину, на которую измерения могут различаться, оставаясь пригодными для использования. Основной задачей представляется разработка приборов, диапазон погрешности которых остается определенным и постоянным даже на протяжении длительных временных периодов. Уже более 40 лет компания Brüel & Kjær A/S сохраняет лидерство в сфере звукометрии, измерения вибраций, анализа вибраций и звуковых сигналов. Среди ее клиентов Airbus, Boeing, Ferrari, Bosch, Honeywell, Caterpillar, Ford, Toyota, Volvo, Rolls-Royce, Lockheed Martin, NASA и другие.

Поскольку спектр задач в области промышленной акустики и вибраций широк — от дорожно-транспортного

шума и шума аэропортов до вибраций автомобильных двигателей, шума ветряных турбин и контроля качества готовой продукции — компания Brüel & Kjær должна разрабатывать микрофоны и акселерометры, которые соответствуют целому ряду различных измерительных стандартов. Для обеспечения соответствия данным требованиям научно-исследовательская деятельность компании включает в себя моделирование как способ проверки точности устройств и испытания новых и инновационных конструкций.

→ РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ТОЧНЫХ МИКРОФОНОВ

Компания Brüel & Kjær разрабатывает и производит конденсаторные микрофоны, работающие в диапазоне частот от инфразвука до ультразвука и с уровнями сигналов, начиная ниже слухового порога и заканчивая самым высоким звуковым давлением при нормальных атмосферных условиях. Линейка продукции включает в себя микрофоны, соответствующие промышленным и лабораторным стандартам, а также специализированные микрофоны. В разработке всех своих микрофонов компания

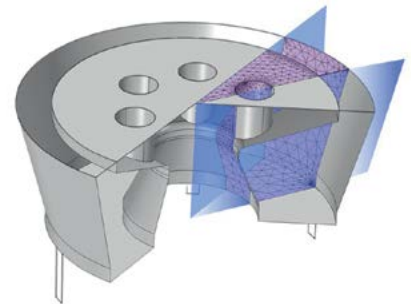


РИСУНОК 2. Геометрическая схема конденсаторного микрофона 4134. На рисунке показана сетка, используемая в усеченной геометрии сектора, составляющей 1/12 общей геометрии.

Brüel & Kjær руководствуется такими ключевыми параметрами, как стабильность и надежность.

«Мы используем моделирование для разработки конденсаторных микрофонов и для обеспечения их соответствия действующим стандартам Международной электротехнической комиссии (IEC) и Международной организации по стандартизации (ISO), — говорит Эрлинг Ольсен (Erling Olsen), инженер-конструктор отдела исследований и разработок компании Brüel & Kjær. — Моделирова-

ние входит в процесс исследования и разработки наряду с прочими инструментами для обеспечения надежной работы наших микрофонов в широком диапазоне условий. Например, мы точно знаем влияние на все наши микрофоны статического давления, температуры и влажности, а также прочих факторов — параметров, измерить которые было бы весьма сложно без применения моделирования.

Конденсаторный микрофон типа 4134 компании Brüel & Kjær, показанный на рис. 1, — это старый микрофон, который на протяжении долгого времени использовался для многих теоретических и практических исследований. Таким образом, микрофон 4134 использовался и используется в качестве прототипа для разработки мультифизических моделей конденсаторных микрофонов Brüel & Kjær. Для анализа характеристик микрофона модели Ольсена учитывают деформацию диафрагмы, электромеханические взаимодействия деформаций мембраны с генерацией электрических сигналов, резонансной частотой и вязкостными и тепловыми акустическими потерями во внутренних резонаторах микрофона.

→ МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОФОНА

Когда звук попадает в микрофон, волны звукового давления вызывают деформации диафрагмы, которые изменяются как электрические сигналы. Эти электрические сигналы затем преобразуются в значения уровня звукового давления в децибелах. «Моделирование микрофона включает в себя решение подвижной сетки и тесно связанных между собой механических, электрических и акустических задач — а это невозможно без мультифизического анализа, — отмечает Ольсен. — Модели должны обеспечивать подробную детализацию, поскольку в большинстве случаев большое соотношение ширины и высоты (из-за формы капсулы микрофонов) и небольшие габариты приводят к возникновению тепловых и вязкостных потерь, которые сильно влияют на производительность микрофона».

Эта модель также может использоваться для предсказания взаимодействий, возникающих между задней пластиной и диафрагмой. Помимо прочего, это влияет на характеристики направленности микрофона. «Мы использовали моделирование для анализа деформационных колебаний диафрагмы», — говорит Ольсен. При моделировании термического напряжения и резонансной

частоты для уменьшения времени вычисления использовалась симметрия модели (см. рис. 2). Кроме того, упрощенная модель использовалась при анализе уровня звукового давления в микрофоне для звуков, нормально падающих на поверхность диафрагмы микрофона (см. рис. 3). Однако, когда звук входит в микрофон не под прямым углом, на мембрану распространяются асимметричные граничные условия. Это требует моделирования, учитывающего полную геометрию, чтобы обеспечить четкую фиксацию прогиба мембраны (см. рис. 4).

Моделирование также использовалось для определения влияния вентиляционного отверстия микрофона при измерении низкочастотных звуков. «Мы моделировали микрофон с вентиляционным отверстием, подверженным воздействию внешнего звукового поля, с отверстием, не подверженным такому воздействию, либо вообще без вентиляционного отверстия, — объясняет Ольсен. — Хотя последний из упомянутых вариантов вряд ли реализуем на практике, он позволил нам определить влияние конфигурации вентиляционного отверстия на результирующие значения входного сопротивления для различных вариантов низкочастотного поведения. Одно из самых важных преимуществ моделирования: мы можем изменять параметры модели, не ограничиваясь уже изготовленными устройствами, что позволяет нам испытывать альтернативные конструкции и изучать пределы возможностей устройства (см. рис. 5)».

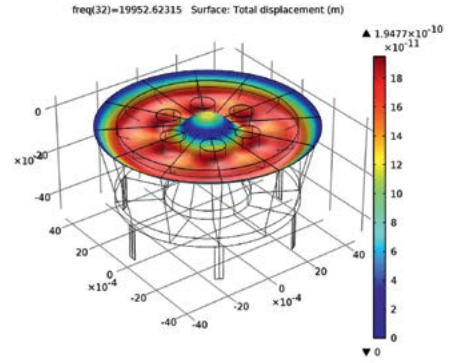


РИСУНОК 3. Представление уровня звукового давления под диафрагмой для случая падения звука под прямым углом, рассчитанного с использованием геометрии сектора. Деформация мембраны оценена при частоте $f = 20$ кГц.

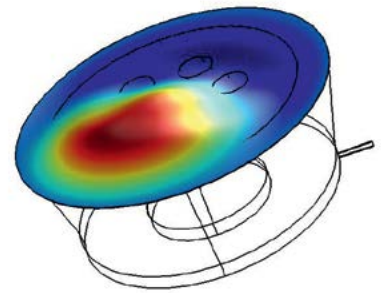


РИСУНОК 4. Результаты моделирования, представляющие деформацию мембраны, рассчитанную для падения не под прямым углом при частоте в 25 кГц. Поскольку деформация асимметрична, расчет производится с использованием полной 3D-модели.

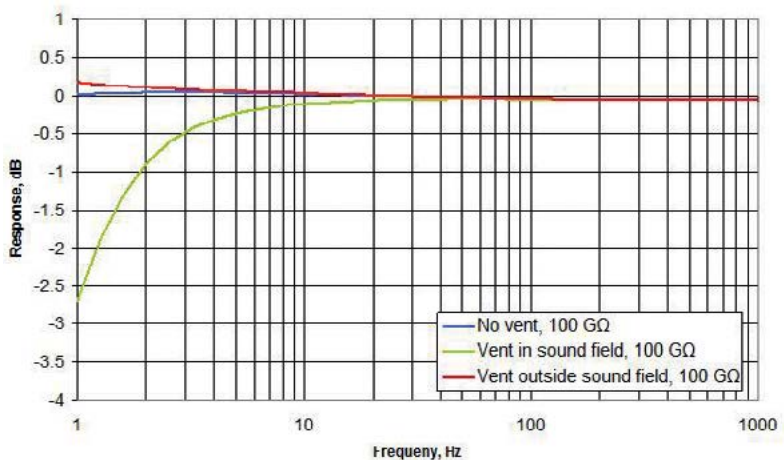


РИСУНОК 5. В конфигурации с отсутствующим вентиляционным отверстием повышение чувствительности происходит вследствие того, что звуковое поле внутри микрофона при очень низких частотах становится чисто изотермическим. В конфигурации, где вентиляционное отверстие выходит за пределы звукового поля, кривая сначала повторяет кривую конфигурации с отсутствующим вентиляционным отверстием, но чувствительность продолжает повышаться, поскольку вентиляционное отверстие позволяет понизить давление с обратной стороны диафрагмы.

Включение моделирования в процесс исследования и разработки позволяет Ольсену и его коллегам не только разрабатывать и испытывать стандартные изделия компании Brüel & Kjær, но и создавать устройства по требованиям заказчика.

«С помощью моделирования мы можем точно определять подходы для внесения конкретных усовершенствований согласно требованиям заказчика. Хотя акустику микрофона очень сложно измерить только при помощи тестирования, после проверки нашего моделирования на физической модели в определенной конфигурации появляется возможность использовать моделирование для анализа других конфигураций и сред в индивидуальном порядке».

→ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИБРАЦИОННОГО ДАТЧИКА

Сёрен Андресен (Søren Andresen), инженер-конструктор компании Brüel & Kjær, также использует моделирование для разработки и испытания конструкций вибрационных датчиков.

«Одна из сложностей, возникающих при разработке датчиков для анализа вибраций, заключается в наличии неблагоприятных условий окружающей среды, которые данные устройства должны выдерживать», — говорит Андресен. — Наша цель состоит в разработке устройства с высокой конструктивной прочностью, которое выдерживало бы крайне неблагоприятные условия».

Большинство механических систем обладают собственными резонансными частотами, ограниченными относительно узким диапазоном (10–1000 Гц). Одна из самых важных особенностей конструкции датчика заключается в том, что данное устройство не резонирует на частоте измеряемых вибраций, поскольку это негативно сказалось бы на резуль-

татах измерения. На Рисунке 6 показано механическое смещение подвешенного датчика вибраций, а также диаграмма резонансной частоты устройства.

«Нам необходимо, чтобы у датчика была плоская АЧХ и резонансная частота не попадала в измеряемый диапазон вибраций», — говорит Андресен. — Мы используем COMSOL, чтобы экспериментировать с различными конструкциями и найти сочетание материалов и геометрии, которое обеспечит плоский профиль (отсутствие резонанса) для определенной конструкции. Это область, в которой будет использоваться данный датчик».

При разработке датчика для отсечения нежелательного сигнала, вызванного резонансом датчика (при наличии такого), может использоваться фильтр нижних частот или механический фильтр. Данные фильтры состоят из материала, обычно резины, вклеенного между двумя опорными дисками, который затем фиксируется между датчиком и установочной поверхностью.

«Как правило, мы устанавливаем верхний предел частоты на одну треть

резонансной частоты датчика, чтобы знать, что вибрационные составляющие, измеряемые на верхнем пределе частоты, будут иметь погрешность, не превышающую 10–12%», — говорит Андресен.

→ МАКСИМАЛЬНАЯ ТОЧНОСТЬ

Хотя разработать безупречный датчик или произвести идеальное измерение все же невозможно, моделирование как никогда ранее сближает исследователей и разработчиков, позволяя им быстро и эффективно испытывать новые проектно-технические решения для множества различных сценариев эксплуатации.

«Для того, чтобы опередить конкурентов, необходимы уникальные знания», — говорит Андресен. — Их нам дает моделирование. Оно позволяет вносить необходимые коррективы и производить виртуальные измерения, которые, в противном случае, мы не могли бы выполнить экспериментальным путем. Благодаря этому мы можем испытывать и оптимизировать инновационные конструкции». ❖

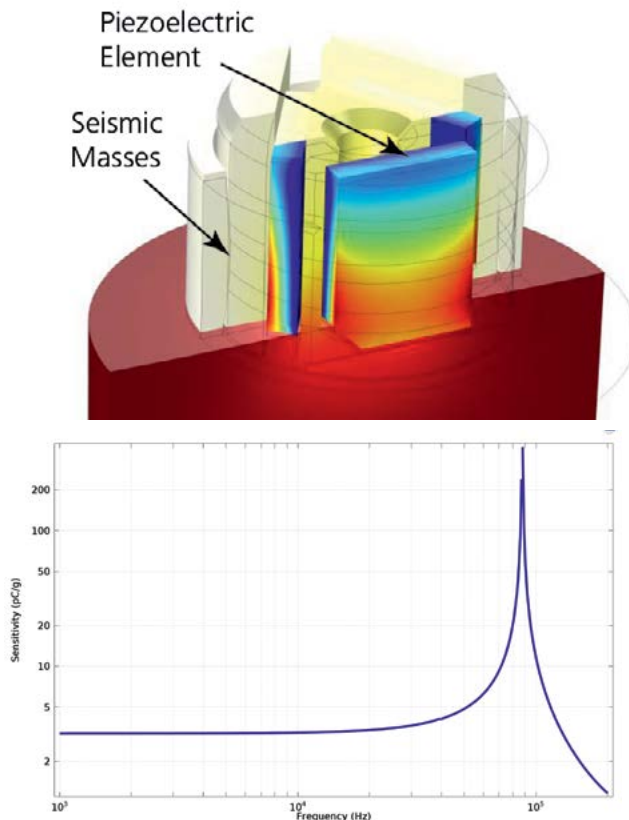


РИСУНОК 6. Результаты моделирования подвешенного пьезоэлектрического датчика вибраций. Вверху: механическая деформация и электрическое поле в пьезоэлектрическом чувствительном элементе и сейсмические массы. Внизу: частотная характеристика, показывающая первый резонанс датчика приблизительно при 90 кГц. Данное устройство следует использовать исключительно для измерения объектов при частотах ниже 90 кГц.

«С помощью моделирования мы можем точно определять подходы для внесения конкретных усовершенствований согласно требованиям заказчика».

**— ЭРЛИНГ ОЛЬСЕН,
ИНЖЕНЕР-КОНСТРУКТОР
КОМПАНИИ BRÜEL & KJÆR**

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИОТОПЛИВА В КАЧЕСТВЕ ЭКОНОМИЧНОГО И ВОЗОБНОВЛЯЕМОГО ИСТОЧНИКА ЭНЕРГИИ

Сотрудники Национальной лаборатории по исследованиям в области возобновляемых источников энергии (National Renewable Energy Laboratory) используют мультифизическое моделирование для лучшего понимания и оптимизации процессов конверсии биотоплива растительного происхождения.

АВТОР: ДЖЕНИФЕР СЕГУИ (JENNIFER SEGUI)

В будущем во многих сферах применения биотопливо может заменить ископаемые виды топлива как альтернативный источник энергии для отопления зданий, выработки электричества и для двигателей в транспортном секторе.

Производство биотоплива из материалов растительного происхождения, в целом называемых «биомасса», имеет много преимуществ. Такие виды топлива являются возобновляемыми, обеспечивают полное сгорание и обеспечивают нулевой баланс выбросов углерода, т. е. при сжигании выделяют углекислый газ в объеме, не превышающем содержание углекислого газа в исходном материале. При этом их основное практическое применение — в качестве топлива для автомобилей — до сих пор крайне ограничено. По данным Управления по информации в области энергетики США

(U.S. Energy Information Administration) по состоянию на 2014 год число автозаправочных станций, предлагающих топливо E85 на основе этанола, составляло лишь 2%.

Сам процесс производства представляет существенный экономический барьер для широкого применения биотоплива. Исследования NREL при поддержке Консорциума расчетного пиролиза направлены на улучшение понимания физических процессов, стоящих за конверсией биотоплива, путем разработки компьютерных моделей, обеспечивающих наиболее точное представление геометрии частиц биомассы на сегодняшний день. Такая модель может в дальнейшем использоваться для усовершенствования конструкции и методов эксплуатации реакторов для обеспечения массового производства биотоплива.

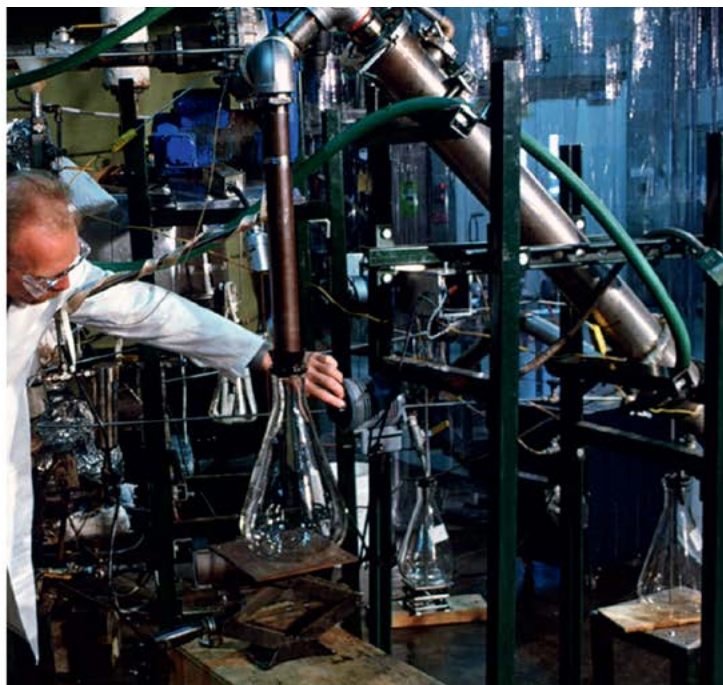


РИСУНОК 1. При подготовке к пиролизу показанная слева древесная биомасса фрезеруется и может также проходить дополнительную химическую обработку. Для построения полной модели пиролиза, показанной справа, должны учитываться некоторые физические процессы, включая теплопередачу, массообмен, химические реакции и фазовые переходы. В колбу, показанную на фотографии, собираются конденсированные пары бιονефти, полученные в результате пиролиза в опытном реакторе. Фотографии: Уоррен Гретц (Warren Gretz), NREL 05756 (слева) и Фил Шенерд (Phil Shepherd), NREL 03677 (справа).

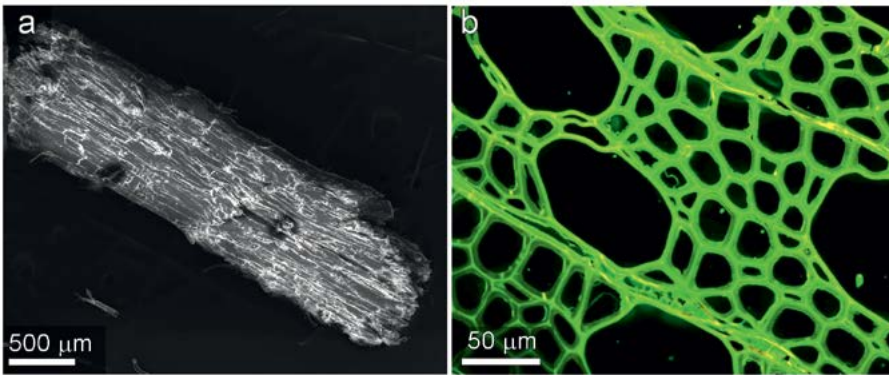


РИСУНОК 2. Слева: растрово-электронная микрофотография подтверждает форму и структуру частицы биомассы из твердой древесины. Справа: микрофотография сечения частицы, сделанная с помощью конфокального лазерного сканирующего микроскопа, показывает ее микроструктуру.

Конечные результаты этой работы могут обеспечить экономичность и конкурентоспособность биотоплива по сравнению с традиционными невозобновляемыми видами топлива, запасы части которых будут истощены всего через несколько десятилетий.

→ ПРОИЗВОДСТВО ТОПЛИВА ИЗ МАТЕРИАЛОВ РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Как показано на рис. 1, термохимические процессы, такие как пиролиз, используют воздействие высоких температур для разрушения и преобразования частиц биомассы в жидкое биотопливо, которое может использоваться в различных сферах повседневного применения. Усовершенствование процессов быстрого пиролиза, опытного метода термохимического преобразования, который часто используется для древесной био-

массы, является одной из целей исследовательской программы NREL и описывается более подробно в колонке ниже.

Питер Чесельски (Peter Ciesielski), исследователь NREL, и его коллеги используют мультифизическое моделирование для понимания фундаментальных процессов, стоящих за преобразованием биомассы в результате пиролиза, начиная с исследования теплопередачи и массообмена.

Эффективная теплопередача и массообмен через частицы биомассы минимизируют образование угля и ускоряют благоприятные реакции за счет обеспечения проникания катализаторов конверсии и выхода целевого продукта. Работа Чесельски учитывает влияние размера, формы и внутренней микроструктуры частиц биомассы, которые определяются породой дерева и процессом фрезерования, который применяется до пиролиза.

«Поскольку в среде COMSOL уже реализованы геометрические инструменты, физика, построение сетки конечных элементов и решатели, мы можем посвятить больше времени непосредственно повышению точности геометрии модели биомассы».

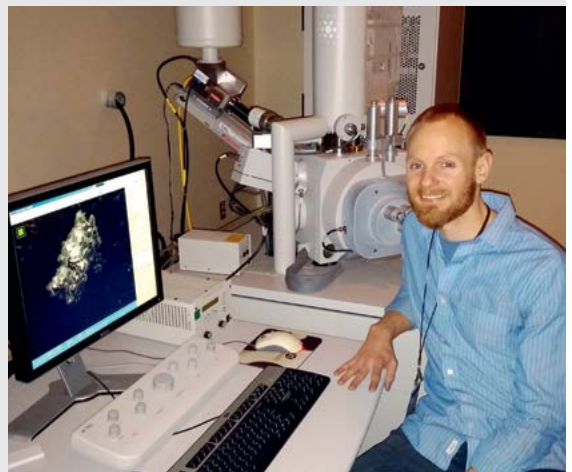
— ПИТЕР ЧЕСЕЛЬСКИ,
ИССЛЕДОВАТЕЛЬ NREL

КОНСОРЦИУМ РАСЧЕТНОГО ПИРОЛИЗА

Работа Чесельски, поддерживаемая Консорциумом расчетного пиролиза и финансируемая Министерством энергетики США, представляет собой совместные усилия исследователей из NREL, Окриджской национальной лаборатории (ORNL) и Национального института стандартов и технологии (NIST). В сотрудничестве участвуют эксперты в области компьютерного моделирования, конверсии биомассы, проектирования реакторов и исследования свойств материалов для оптимизации процессов производства биотоплива путем пиролиза.

Для того, чтобы понять пиролиз, необходимо представить огонь, но без пламени. Пиролиз представляет собой способ термохимического преобразования, который вызывает разложение биомассы под воздействием высоких температур при отсутствии кислорода. Без кислорода горения или пламени не возникает. В результате пиролиза образуется коксовый остаток — жидкое вещество, часто именуемое бионефтью, а также газообразные продукты химической реакции. Биотопливо производится при дальнейшей переработке бионефти.

Исследования быстрого пиролиза в NREL выводят процесс на следующую ступень за счет использования крайне высокой скорости теплопередачи для разрушения биомассы при возрастании внутренних температур до 500 °C в течение 1 секунды.



Питер Чесельски, исследователь NREL, рядом с электронно-сканирующим микроскопом, использовавшимся для получения изображений биомассы дерева для его работы, опубликованной в статье Energy & Fuels¹.

→ ТОЧНАЯ МОДЕЛЬ БИОМАССЫ

Вычислительные исследования, направленные на понимание и оптимизацию процесса преобразования биотоплива, всегда использовали упрощенную геометрию частиц биотоплива, которая не учитывала внутреннюю микроструктуру.

Исследования Чесельски направлены на понимание процессов теплопередачи и массообмена в биомассе за счет разработки модели в среде COMSOL Multiphysics®, с учетом внутренней микроструктуры. «Поскольку в среде COMSOL уже реализованы геометрические инструменты, физика, построение сетки конечных элементов и решатели, мы можем посвятить больше времени непосредственно повышению точности геометрии модели биомассы», — поясняет Чесельски.

При создании трехмерных моделей для использования в среде COMSOL применялось сочетание различных методов построения изображения с целью описания внешней морфологии и гранулометрического состава, а также внутренней микроструктуры каждого типа биомассы. Примеры изображений, полученных для этого исследования, показаны на рис. 2.

Стереометрическое изображение было построено с использованием внешних и внутренних размеров частиц биомассы, определенных по изображениям в качестве исходных данных для серии логических операций над геометрией в ПО COMSOL. Как показано на рис. 3, полная геометрия состоит из двух областей.

→ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПИРОЛИЗА: ТЕПЛОПЕРЕДАЧА И МАССОБМЕН

Разложение биомассы при быстром пиролизе начинается с применения высоких температур (около 500 °C) к сосуду реактора без содержания кислорода в течение нескольких секунд. При применении таких условий в COMSOL для моделирования теплопередачи между внешней жидкой средой, показанной на рис. 3а и состоящей из газообразного азота, и частицей биомассы использовался интерфейс Conjugate Heat Transfer (Сопряженная теплопередача). Теплопередача в жидкости осуществляется преимущественно посредством конвекции, а в граничной зоне и в частице биомассы — только за счет теплопроводности.

Моделирование выполнялось с помощью высокопроизводительного вычислительного кластера (HPC) с использованием одного или двух вычислительных узлов, каждый из которых состоит из 24 процессоров Intel® Xeon® Ivy Bridge с 64 ГБ

ОЗУ. Результаты на Рисунке 3б показывают распределение температуры в частице твердой древесины через 0,5 секунды после начала моделирования сопряженной теплопередачи. Для заданного размера, формы и микроструктуры частицы можно определить срок, необходимый для достижения оптимальной для разложения температуры всей частицы, в особенности ее центра.

В отдельной модели оценивалась диффузия серной кислоты, используемой для предварительной обработки биомассы до ее преобразования в биотопливо. Для моделирования переходных состояний массообмена в микроструктуре и геометрии твердых частиц, в данном случае в жидкой среде, использовался интерфейс Transport of Diluted Species (Передача разбавленных растворов).

Результаты анализа теплопередачи и массообмена указывают на то, что объемная модель, в особенности сферическая модель, может не обеспечивать достаточной точности для оценки и оптимизации процессов конверсии биотоплива и на обоснованность использования микроструктурной модели.

→ ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КРУПНОГО РЕАКТОРА

В настоящем исследовании основное внимание уделяется теплопередаче и массообмену в биомассе, однако для полного понимания и оптимизации производства биотоплива в процессе быстрого пиролиза крайне важны быстрые фазовые переходы и химические реакции. Текущая работа Чесельски предусматривает добавление этих процессов в моделирование, и возможность такого добавления стала важной причиной для выбора COMSOL.

У исследовательской группы есть дальнейшие планы по использованию вычислительной модели. Выполнение исследований для достижения фундаментального понимания процессов переноса в биомассе обеспечило возможность эффективного сопоставления моделей низшего уровня для ряда технологических параметров и исходного сырья биомассы. Эти сопоставления могут использоваться для оптимизации конструкции и принципов работы крупных реакторов для массового производства биотоплива с повышением эффективности и экономичности процесса. ❖

ЛИТЕРАТУРА

¹ P. N. Ciesielski, et. al., Energy Fuels, 2015, 29(1), pp 242-254.

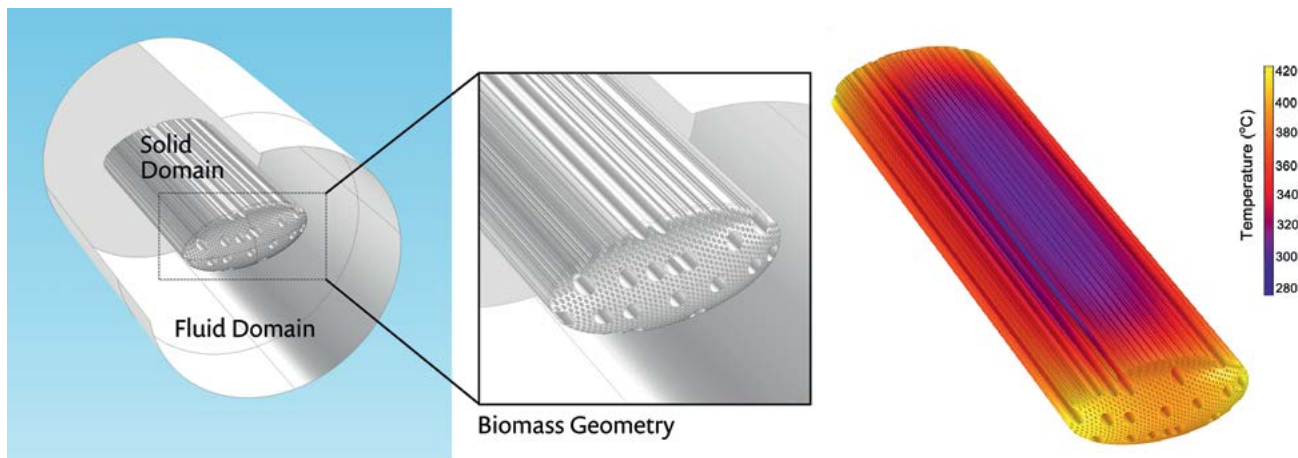


РИСУНОК 3. Слева: геометрия модели в ПО COMSOL® с отображением жидкой среды вокруг частицы биомассы из твердой древесины. Справа: показано распределение температуры для моделирования переходного процесса при сопряженной теплопередаче.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕШАЕТ ЗАГАДКУ НЕСЧАСТНОГО СЛУЧАЯ В ЛИФТЕ

Мы рассматриваем моделирование как неотъемлемую часть разработки продукции, однако не менее важны и другие сферы применения, например, анализ отказов при эксплуатации и экспертные исследования. В Veryst Engineering применили мультифизическое моделирование для расследования причин преждевременного выхода из строя тормоза лифта.

АВТОРЫ: СТЮАРТ БРАУН (STUART BROWN), НАГИ ЭЛАББАСИ (NAGI ELABBASI) И МЭТЬЮ ХЭНКОК (MATTHEW HANCOCK), КОМПАНИЯ VERYST ENGINEERING

В 2007 г. лифт начал подниматься как раз в то время, когда из него выходили люди. В результате один из них застрял и получил травмы. Барабанный тормоз, который должен был удерживать лифт на месте, вышел из строя, и лифт неожиданно начал движение. В результате расследования выяснилось, что ухудшение характеристик электромагнита, отвечающего за работу тормоза привело к прихвату тормозных колодок к барабану и их преждевременному износу. При выключенном электромагните тормозные колодки должны оказывать давление на барабан, удерживая лифт на месте. Чрезмерный износ колодок нарушил работу тормоза, что и привело к несчастному случаю. На рис. 1 изображена САПР-модель тормоза: тормозные рычаги шарнирно крепятся к нижним осям и прижимаются к барабану под действием пружины.

Против обслуживающих фирм были возбуждены уголовные дела по обвинению в том, что несмотря на очевидные признаки ухудшения работы электромагнитного клапана, в течение нескольких лет не проводился его ремонт. Вопрос состоял не в том, был ли электромагнит сломан, а в том, почему это произошло и с какой скоростью — медленно или быстро?

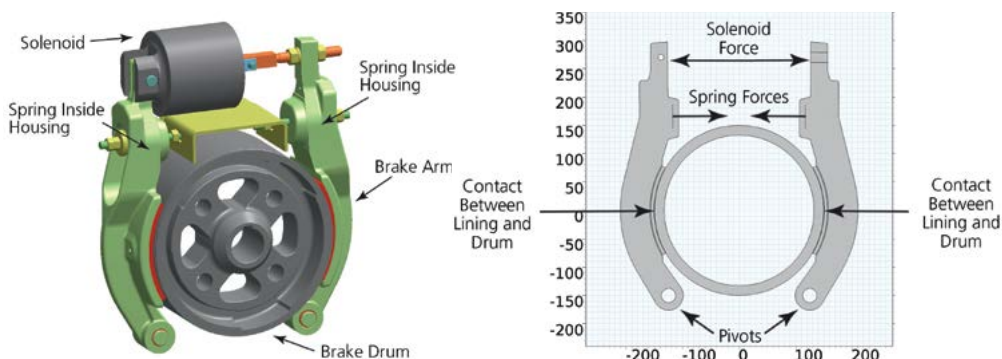


РИСУНОК 1. Слева: геометрическая САПР-модель тормоза. Справа: схема модели тормозных колодок с тормозным барабаном, рычагами и шарнирами, с указанием противодействующих рычагам сил пружины и электромагнита, а также контакта между тормозными колодками и барабаном.

Если отказ произошел в течение короткого времени, то, вероятно, его нельзя было предвидеть. Однако, если ухудшение происходило постепенно, вероятно, несчастный случай можно было предотвратить. Было предложено много возможных причин неисправности. Нашей консалтинговой фирме Veryst Engineering (штат Массачусетс) предложили определить достоверность разных теорий, и моделирование сыграло ключевую роль в нашем расследовании.

→ АНАЛИЗ ОТКАЗА ЭЛЕКТРОМАГНИТА

После происшествия следователи обнаружили, что сопротивление электромагнита составляло примерно половину от номинального, что привело к снижению усилия по сравнению с исправным. Было предложено несколько теорий, объясняющих возникновение этой неисправности.

По одной теории, свидетельствовавшей в пользу медленного нарастания неисправности, резистивный нагрев вызывал тепловое расширение и сжатие внутри электромагнита, что создавало сильную нагрузку, вызвавшую постепенное растрескивание обмотки электромагнитной катушки. Трещины снижали электродвижущую силу (ЭДС) электромагнита, приводя к прихвату тормозных колодок. Для проверки этой теории мы прибегли к помощи пакета COMSOL Multiphysics® и провели с его помощью комбинированный анализ термомеханической нагрузки на электромагнит. Модель показала недостаточность нагрузок для образования трещин, доказав, что расширение и сжатие по причине резистивного на-

грева не могло стать причиной отказа.

По второй теории, свидетельствовавшей в пользу постепенного отказа, ЭДС сама по себе создавала сильную нагрузку на катушку, приводя с течением времени к ее выходу из строя. Мы проверили эту теорию, выполнив комбинированный электро-механический анализ, результаты которого приведены на рис. 2. С помощью пакета COMSOL® была рассчитана сила Лоренца в электромагнитной катушке, которая оказалась настолько малой, что ею можно было пренебречь.

В то же время, одна из теорий быстрого отказа электромагнита подразумевала короткое замыкание между соседними витками обмотки вследствие локального нагрева. Мы не анализировали

эту теорию непосредственно, однако результаты анализов, опровергающие теории медленного износа, сократили количество возможных причин и свидетельствовали в пользу сценария быстрого отказа.

→ АНАЛИЗ БЫСТРОГО ИЗНОСА ТОРМОЗНЫХ КОЛОДОК

Помимо анализа причин отказа электромагнита, мы исследовали его роль в износе тормозных колодок. Учитывая, что усилие неисправного электромагнита было значительно меньше, чем у исправного, могло ли это повлиять на скорость износа тормозных колодок? После происшествия следователи обнаружили повышенный износ тормозных колодок и предположили, что он происходил постепенно.

Чтобы проверить возможность быстрого износа, мы разработали в среде COMSOL модель тормоза для расчета локального износа колодок. Модель учитывала шарнирное крепление тормозных рычагов и противодействующие ему силы пружины и поврежденного электромагнита. Кроме того, в модели были учтены данные экспериментов по повышенному износу, проведенных следователями на прототипе тормозных колодок. Это позволило соотнести данные о скорости объемного износа колодок с данными о температуре барабана.

Мы объединили эти данные о температуре и износе с моделью скорости износа, широко применяемой производителями тормозов, и получили модель скорости локального износа. Модель была реализована с помощью модуля Structural Mechanics (Механика конструкций) и заданных вручную дифференциальных уравнений, описывающих поверхность тормозных колодок. Граничное условие контакта, доступное в COMSOL, позволило учесть в модели давление локального контакта и использовать его для определения скорости локального износа в каждой из точек поверхности тормозной колодки. Прогнозируемый износ тормозных колодок, в свою очередь, был использован в граничном условии контакта для задания смещения исходной поверхности тормоза. При этом было сделано обоснованное предположение о малой величине износа по сравнению с толщиной колодок. Входными данными для моделирования износа была предполагаемая динамика изменений температуры барабана. Для проверки этой модели было выполнено моделирование двух других задач механического износа: износа при трении «стержень — диск» и износа автомобильных дисковых тормозов.

Наличие в модуле Structural Mechanics готового граничного условия и поддержка ввода пользовательских дифференциальных уравнений существенно упростили программирование процесса и помогли нам избежать таких трудоемких методов, как исключение элементов из сетки. Подобный тип анализа был бы невозможен или неприемлемо сложен при использовании любого другого пакета программ для расчетов методом конечных элементов.

На рис. 3 показана модель расчета методом конечных элементов, используемая для анализа износа. На рис. 4 показан результат сравнения экспериментального и прогнозируемого износа тормозных колодок по всей поверхности тормоза в конце испытаний. Кроме того, модель дает прогноз изменения глубины износа с течением времени. По результатам моделирования износа стало ясно, что повреждение электромагнита могло вызвать сильный нагрев барабана, который и привел к быстрому износу тормозных колодок.

Другими словами, чрезмерный износ тормозных колодок полностью согласуется с быстрым вариантом развития собы-

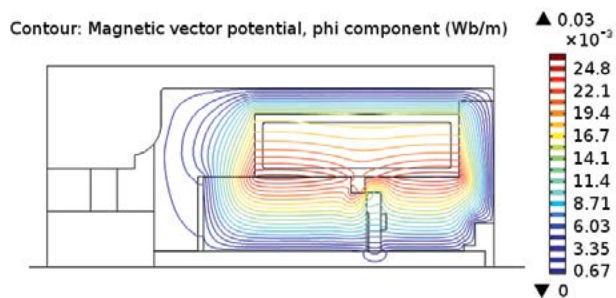


РИСУНОК 2. Магнитный потенциал в электромагнитном компоненте.

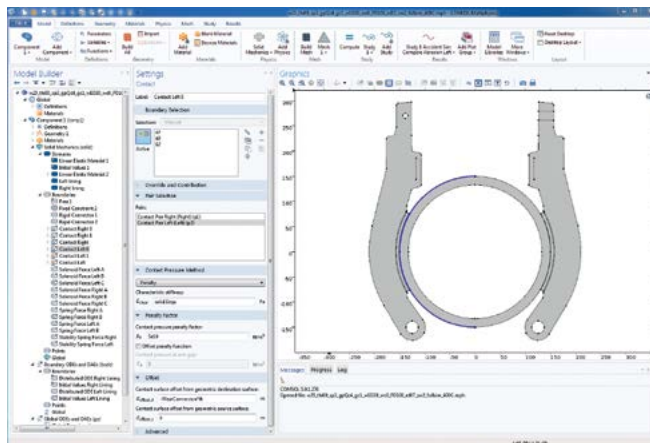


РИСУНОК 3. Программная модель COMSOL Multiphysics®, использованная для расчета износа тормозных колодок.

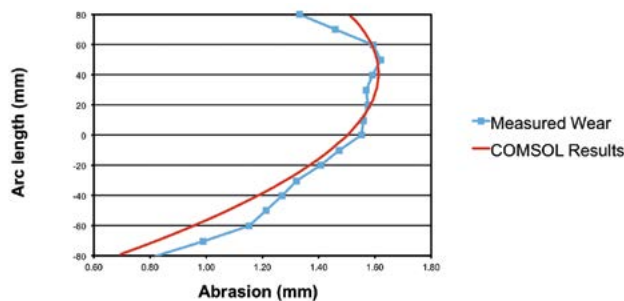


РИСУНОК 4. Сравнение экспериментального и прогнозируемого износа колодок.

тий: от быстрой деградации электромагнита до быстрого и серьезного износа колодок тормоза. Данная теория быстрого износа стала альтернативным, логичным и научно обоснованным объяснением произошедшего, исключая медленное развитие процесса.

Программное обеспечение COMSOL Multiphysics было важной составляющей этого расследования, оно позволило нам своевременно проанализировать различные сценарии за счет быстрого импорта и обработки разных геометрий, учета в одной модели различных физик, импорта и использования в наших моделях экспериментальных данных. Моделирование обеспечило эффективный системный подход к проверке и оценке сценариев возникновения неисправности, который прежде никем не применялся. ❖

УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЕ МЕТОДЫ ОТОПЛЕНИЯ И ОХЛАЖДЕНИЯ ЗДАНИЙ

Мультифизическое моделирование помогает исследователям Института солнечных энергосистем Фраунгофера разрабатывать инновационные адсорбционные охладители, обратные тепловые машины и теплоаккумуляторы, работающие на солнечной энергии, природном газе и избыточном тепле.

АВТОР: ГЭРИ ДЕГЕСТАЙН (GARY DAGASTINE)

В Европе почти половина энергопотребления приходится на обогрев и охлаждение зданий, что подталкивает исследователей к поискам альтернатив привычным технологиям.

Одной из заманчивых перспектив является использование систем отопления и охлаждения на основе адсорбции с использованием тепловой, а не электрической энергии. Поскольку тепло может генерироваться солнечными нагревателями, путем утилизации тепловой энергии промышленных объектов либо комбинированными термоэлектрическими установками, такая технология адсорбции позволила сократить потребление электроэнергии и связанных с ним выбросов CO₂. Эта технология может использоваться не только в высокопроизводительных системах отопления с применением обратных тепловых машин на газовом топливе для улучшения обогрева зданий, но также для компактного хранения энергии в течение длительного времени.

В построенных по этому принципу системах отопления и охлаждения рабочая жидкость используется в цикле поглощения/отдачи, в котором жидкость несколько раз переходит из жидкой фазы в газообразную и обратно (более подробную информацию см. в боковой колонке на стр. 37). Эта тех-

нология позволит построить специальные теплообменники, действующие как термокомпрессоры с периодическим нагревом и охлаждением адсорбента при различных температурах и давлениях. Такие системы могут заменить механические компрессоры, работающие от электроэнергии, в обратных тепловых машинах и охладителях с дополнительным преимуществом в виде тепловой емкости, которая обеспечивает трехкратное повышение эффективности хранения энергии по сравнению с привычными системами водяного отопления.

→ ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ И АККУМУЛЯЦИИ ТЕПЛА

Развитие систем отопления и охлаждения на основе адсорбции представляет собой сложную задачу. Эти системы имеют дискретный рабочий цикл, переменные пики энергетических потоков, при этом их динамика определяется сложным и комбинированным явлением теплопередачи и массообмена.

Несмотря на то, что имеются серийно выпускаемые системы на основе адсорбции (см. рис. 1), для более широкого внедрения технологии необходимо повысить эффективность и компактность решений, а также снизить стоимость производства.

Одна из ведущих мировых исследовательских организаций в этой области — это Институт солнечных энергосистем Фраунгофера (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (ISE))

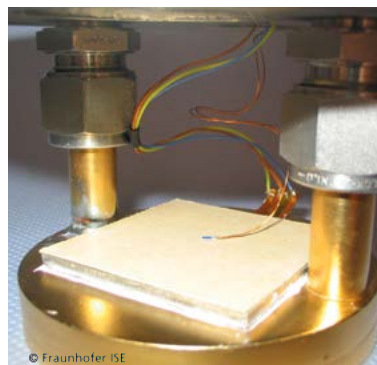


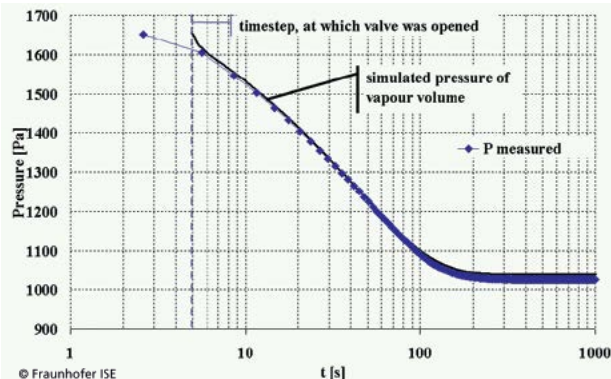
РИСУНОК 2. Слева: экспериментальная установка для подтверждения моделей адсорбционной кинетики, созданных в среде COMSOL®, состоящая из тонкого слоя цеолита размером 50x50 мм² на алюминиевом носителе, размещенного на холодной пластине в камере дозирования с контролем температуры и теплового потока. Справа: график, демонстрирующий высокую степень соответствия между смоделированным и измеренным давлением водяных паров при испытаниях с сорбентом цеолита в институте Фраунгофера.



РИСУНОК 1. Пример серийно выпускаемого адсорбционного охладителя.

в г. Фрайбург, Германия. Численность персонала института составляет примерно 1300 сотрудников. Институт исследует все вопросы преобразования, аккумуляции и использования солнечной энергии. Этот институт входит в сеть из более чем 65 немецких исследовательских институтов Фраунгофера, специализирующихся на различных аспектах прикладной науки.

Эрик Лауренц (Eric Laurenz) и Ханнес Фугман (Hannes Fugmann), исследователи Института Фраунгофера ISE, входят в группу из 20 человек под руководством Лены Шнабель (Lena Schnabel), которая ведет разработку высокопроизводительных теплообменников для систем адсорбции. Лауренц изучает пары горя-



чей воды и тепловые потоки в пористых структурах с целью оптимизации размера и производительности системы, а Фугман проводит проектные исследования потоков неизотермических сред и теплопроводности в твердых средах для разработки усовершенствованной архитектуры теплообменников.

«Аналитические методы для нашей работы непригодны из-за устойчивых нелинейных связей между процессами теплопередачи и массообмена, — объясняет Лауренц. — Нам нужны инструменты численного анализа, такие как COMSOL Multiphysics®, позволяющие моделировать циклическую загрузку и разгрузку сорбента и учитывать распределение температуры и массы в пространстве и времени. С помощью этих инструментов можно учитывать динамику адсорбции и десорбции при моделировании».

Общий подход заключается в комбинировании моделирования с продуманными маломасштабными экспериментами для построения крупномасштабных моделей, точно прогнозирующих сложное поведение исследуемых физических процессов в реальных условиях. На моделях малого масштаба группа детально моделирует физические механизмы, а более крупные модели позволяют сократить сложность, экономя время расчетов. Этот подход может значительно сократить потребность в построении полномасштабных физических прототипов, что обеспечивает экономию как времени, так и денежных средств.

→ ПРОВЕРКА ПРОЦЕССА АДСОРБЦИИ

Одна из основных задач усовершенствования адсорбционных теплообменников заключается в оптимизации скорости поглощения и емкости слоев сорбента в системе. В одном из исследований Лена Шнабель и Геррит Фюльднер (Gerrit Fuldner) создали модель, описывающую динамику взаимодействия теплопередачи и массообмена в слое сорбента. С помощью этой модели группа смогла полностью понять данные измерений при экспериментах, показанных слева на рис. 2.

«Мы смогли определить коэффициенты передачи, которые было невозможно измерить напрямую, путем сравнения опытных данных и результатов моделирования с оценкой параметров, — поясняет Лауренц. — Далее эти данные использовались при более сложном моделировании системы».

Группа Лены Шнабель начала использовать COMSOL Multiphysics почти десять лет назад. Однако в последнее время группа начала использовать модели с различным уровнем детализации для расчета параметров переноса и моделирования циклического поведения комплексных систем при динамически изменяющихся рабочих условиях. Возможность простого моделирования сопряженных физических процессов в сложных и динамических системах оказалась незаменимой для большей части исследований в Институте Фраунхофера ISE.

→ УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЕ КОНСТРУКЦИИ ТЕПЛООБМЕННИКОВ

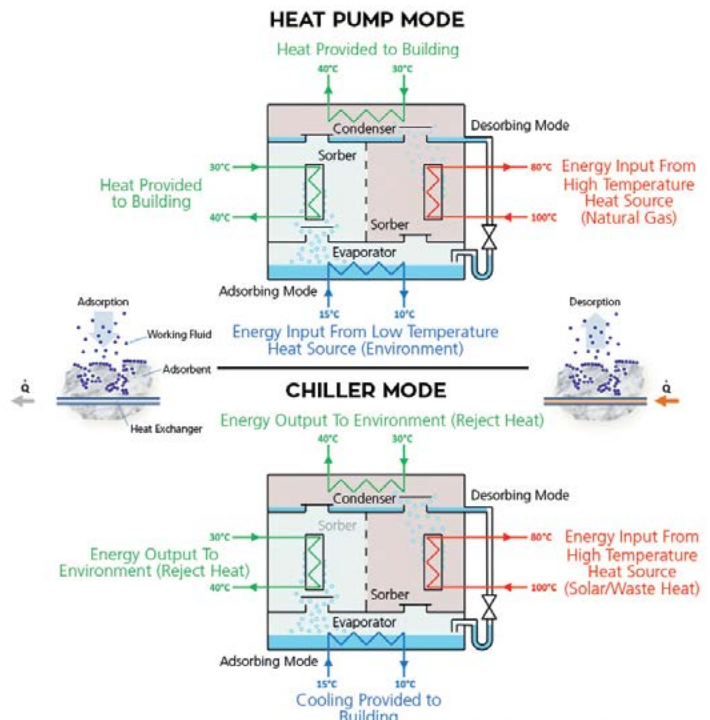
В своей работе по оптимизации архитектуры теплообменников Фугман выпо лняет базовое исследование различных конструкций, включая охладители и обратные тепловые машины. Некоторые геометрии рассчитаны на повышение площади теплопередачи с использованием проволочных структур, например, таких как на рис. 3, в отличие от более привычных теплообменников из ребристых труб. В этих новаторских архитектурах плетеная или вязаная проволочная конструкция охватывает трубы, разделяющие среды теплообменника. В экспериментальном проволочном газожидкостном теплообменнике горячая вода протекает в трубах, в то время как холодный воздух протекает между трубами и через проволоку.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АДСОРБЦИИ ДЛЯ СИСТЕМ ОТОПЛЕНИЯ И ОХЛАЖДЕНИЯ

На приведенном ниже рисунке показана схема двухступенчатого цикла, используемого для проектирования адсорбционных охладителей и обратных тепловых машин. Для объяснения рассмотрим, что происходит в режиме обратной тепловой машины. Цикл состоит из одного шага адсорбции и одного шага десорбции. На шаге адсорбции рабочая среда испаряется при низкой температуре. В то же время рабочая среда адсорбируется адсорбентом при средней температуре с выделением тепла, что может использоваться при отоплении здания.

После насыщения сорбента процесс инвертируется, и начинается шаг десорбции. Сорбент нагревается до высокой температуры, что вызывает десорбцию рабочей среды. Далее рабочая среда конденсируется при средней температуре, а выделяемое при конденсации тепло может использоваться для отопления здания.

Подводя итог: при отоплении (обратные тепловые машины) здание отапливается за счет отбора энергии из окружающей среды. При охлаждении (охладители), наоборот, здание охлаждается за счет выпуска тепла в окружающую среду. При прерывании цикла потенциальное тепло от адсорбции может аккумулироваться без потерь. В зависимости от условий применения адсорбция может использоваться для отопления или охлаждения здания, в то время как окружающая среда выступает в роли источника или поглотителя тепла.



The sorber continuously switches between the adsorbing and desorbing modes during operation

© Fraunhofer ISE

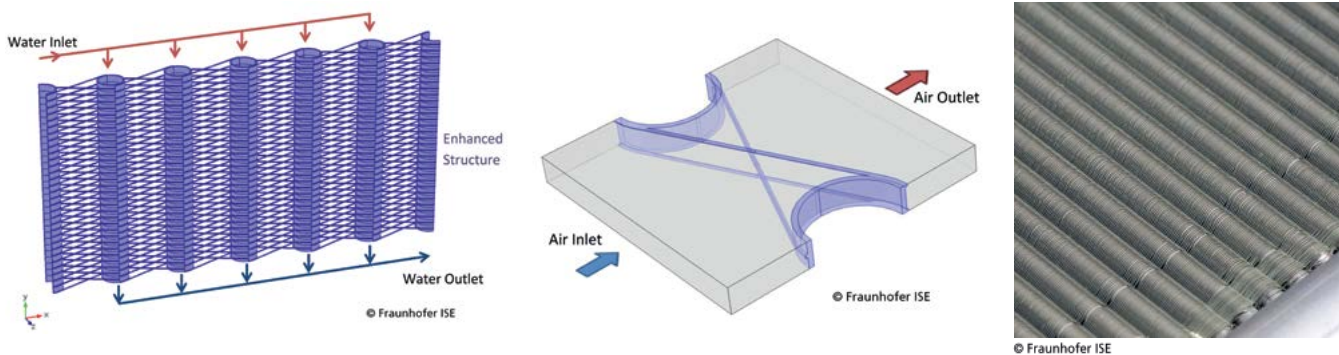


РИСУНОК 3. Слева: геометрия устройства с трубами подачи теплой воды. Холодный воздух обтекает трубы, охлаждая текущую по ним воду. Посередине: модель геометрии, показывающая впуск холодного воздуха и выпуск теплого воздуха. Проволочная конструкция и трубы показаны фиолетовым цветом. Справа: геометрия устройства, используемого для испытаний.

«Было обнаружено, что при использовании проволочных конструкций можно добиться лучшего коэффициента теплопередачи при большей площади, а также сэкономить на материалах, — говорит Фугман. — Мы можем достичь этого без заметного увеличения перепада давления, а гибкость проволочных конструкций также дает нам возможность легко адаптировать геометрию в зависимости от рабочих параметров проекта».

С помощью пакета COMSOL® Фугман выполнил параметрический анализ перепадов давления, коэффициентов теплопередачи, расхода материалов, а также провел другие виды анализа геометрии. На рис. 4 показано распределение температуры и диапазон скорости для оптимизированной геометрии проволочной конструкции и труб.

Вот как Фугман описывает устройство: «По результатам измерений было обнаружено, что связанные соединения между проволоками и трубами дают высокое и доминирующее тепловое сопротивление. За счет понимания ограничений теплопередачи в проволочных конструкциях мы можем обеспечить дальнейшую оптимизацию».

В связи с повышением отношения площади теплообмена к объему проволочные конструкции также проходят

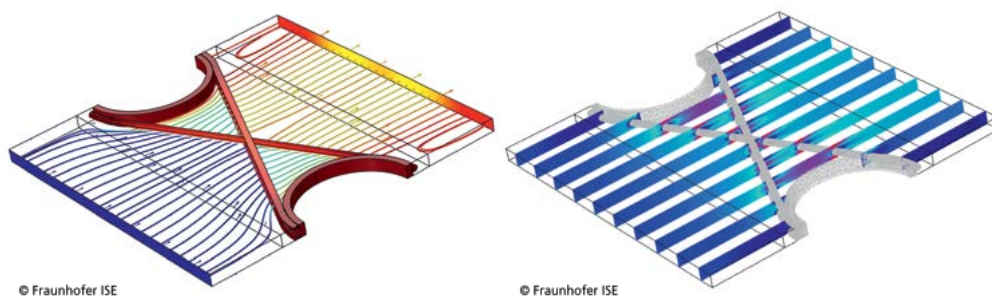
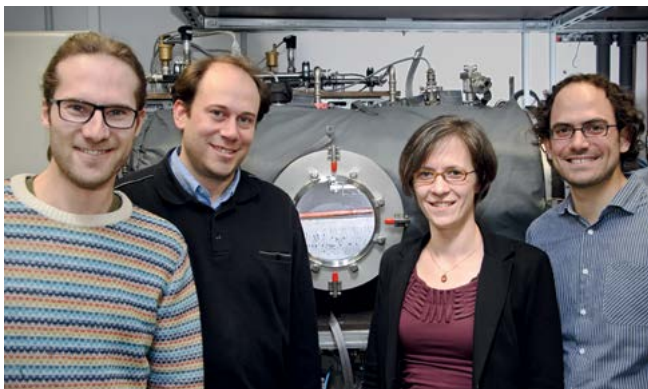


РИСУНОК 4. Слева: модель с линиями тока поля скоростей и температурным распределением в воздухе, в стенке трубки и в проволоке, соединяющей две трубки (красный цвет: тепло, синий цвет: холод). Справа: модель с указанием значения скорости в воздухе (красный цвет: высокая скорость, синий цвет: низкая скорость).

экспериментальный и численный анализ в Институте Фраунгофера для использования в качестве конструкций с покрытием сорбентом и для увеличения площади теплообменников в тепловых аккумуляторах.

→ ДАЛЬНЕЙШИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ

«Наша непосредственная задача заключается в увеличении знаний и компетенций в этих областях, чтобы мы могли помочь как заказчикам, так и коллегам в Институте Фраунгофера, работающим над различными аспектами адсорбционных климатических систем, — говорит Лауренц. — В более длительной перспективе мы ожидаем широкого распространения этих технологий для сокращения нагрузки на электрические сети и сохранения ресурсов планеты». ❖



Исследовательская группа Института Фраунгофера ISE (слева направо): Ханнес Фугман, Геррит Фюльднер, Лена Шнабель и Эрик Лауренц. Группа стоит перед экспериментальной установкой для динамического описания адсорбционных теплообменников. Установка используется для получения экспериментальных данных для расчета параметров на основе моделирования.

ЛИТЕРАТУРА

¹Füldner, G. & Schnabel, L., 2008. Non-Isothermal Kinetics of Water Adsorption in Compact Adsorbent Layers on a Metal Support.. Из материалов конференции COMSOL в г. Ганновер, 2008 г. Конференция COMSOL. Ганновер.

В БЛОГЕ COMSOL ПУБЛИКУЮТСЯ ПОСЛЕДНИЕ НОВОСТИ МУЛЬТИФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Блог COMSOL — источник ответов на вопросы по мультифизическому моделированию и просто интересных материалов для научно-технических специалистов.

АВТОР: ФЭНИ ЛИТТМАРК (FANNY LITTMARCK)

Для научных и технических специалистов различных стран блог COMSOL является ценным источником информации о мультифизическом моделировании. Читатели блога могут узнать, когда, как и почему удобнее всего пользоваться средой COMSOL Multiphysics® — напрямую от экспертов. Все материалы блога пишутся и публикуются специалистами, участвующими в разработке приложений COMSOL, другими сотрудниками компании и приглашенными авторами. Подбор авторов обеспечивает разнообразие публикаций: от сложных технических материалов до популярных статей.

→ ОТВЕТЫ НА ВОПРОСЫ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ, НОВОСТИ О ВЫПУСКАХ И ПРОЧИЕ ТЕМЫ

В блоге публикуются материалы по 40 с лишним темам. Большая их часть отсортирована по областям физики, что позволяет с легкостью найти нужные публикации. Для пользователей COMSOL Multiphysics блог COMSOL — это источник решений технических проблем, советов по моделированию, новостей о выпусках, информации о конференциях COMSOL и многого другого. В блоге публикуются не только материалы о среде моделирования COMSOL®, но и научно-популярные статьи — они доступны в категории Trending Topics.

Чаще всего публикуются отдельные статьи, однако некоторые темы требуют серии публикаций. Самая популярная серия статей посвящена решателям. В ней разработчик приложений Уолтер Фрей (Walter Frei) объясняет, что творится «под капотом» COMSOL в ходе расчета модели. Также большим интересом пользуются серии публикаций по постобработке, высокопроизводительным вычислениям (HPC), слабым формам уравнений и другим вопросам. В правом нижнем углу страницы блога находится облако тегов. В нем доступны все серии публикаций — при выходе новых статей облако обновляется.

→ ОТКРОЙТЕ ДЛЯ СЕБЯ БЛОГ COMSOL

В блоге COMSOL каждый найдет для себя что-то интересное: новые публикации по самым различным темам выходят каждую неделю по будним дням. Откройте в браузере страницу www.comsol.ru/blogs или перейдите по ссылке в нижнем колонтитуле сайта COMSOL (раздел Community/Сообщество). ❖

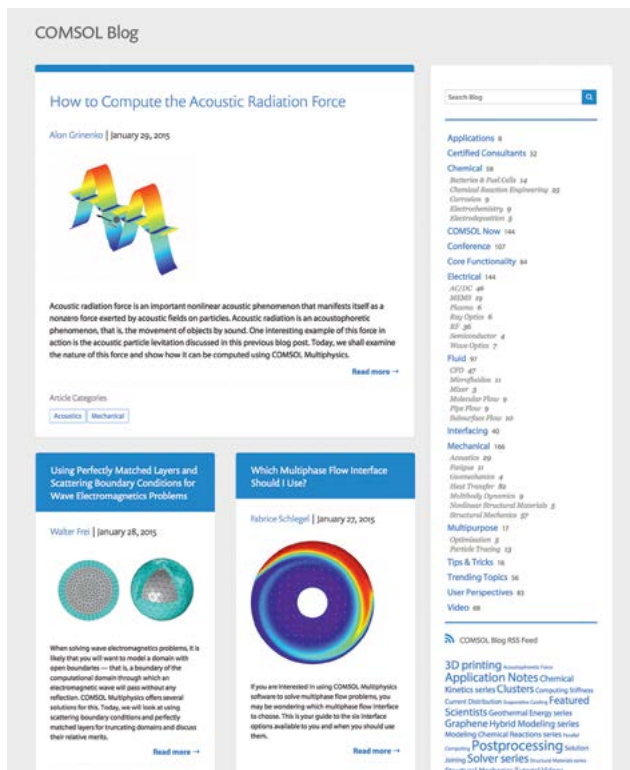


РИСУНОК 1. Страница блога COMSOL.

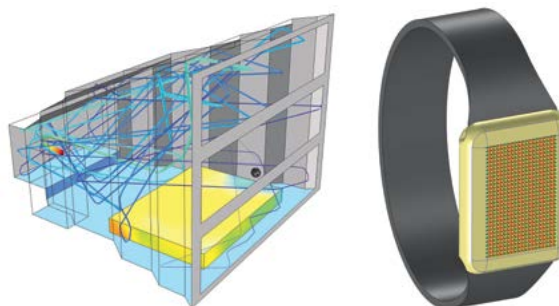


РИСУНОК 2. Слева: траектория луча в концертном зале, иллюстрация к публикации «Modeling Room Acoustics with COMSOL Multiphysics» в блоге. Справа: экран сенсорных часов, публикация «Analyzing Capacitive Touchscreens in Consumer Electronics».

3D printing Acoustophoretic Force
Application Notes Chemical
Kinetics series Clusters Computing Stiffness
Current Distribution Evaporative Cooling Featured
Scientists Geothermal Energy series
Graphene Hybrid Modeling series
Modeling Chemical Reactions series Parallel
Computing Postprocessing Solution
Joining Solver series Structural Materials series
Structural Mechanics Tutorial Videos
Thermoacoustics Weak Form Working with M-files 蒸发冷却

РИСУНОК 3. Облако тегов — серии публикаций в блоге COMSOL.

ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИБЛИЖАЮТ НАС К МАРСУ

АВТОР: ДЖИМ НОКС (JIM KNOX), ЦЕНТР КОСМИЧЕСКИХ ПОЛЕТОВ ИМЕНИ МАРШАЛЛА, NASA

Впервые я начал серьезно применять средства математического и компьютерного моделирования в 1987 году, приступив к работе в Национальном управлении по воздухоплаванию и исследованию космического пространства (NASA). Тогда я разрабатывал компьютерные модели, которые помогали создавать системы удаления диоксида углерода (CO_2) в системе жизнеобеспечения Международной космической станции (МКС). Каждый член экипажа вырабатывает в день 1 кг CO_2 . Этот газ необходимо удалять из кабины, поскольку он быстро накапливается, причиняя вред здоровью космонавтов. Системы, применяемые для удаления CO_2 , обычно строятся на процессах поглощения, в рамках которых происходит сложное взаимодействие теплопередачи, массообмена и потоков газа в пористых средах. В то время на рынке не было средств, способных производить расчеты для набора сопряженных математических моделей — например, решать дифференциальные уравнения в частных производных. Приходилось либо как-то решать задачу с помощью пакета для теплового анализа, либо писать собственную программу, способную осуществлять дискретизацию, строить сетку и вычислять решение. К сожалению, программирование процессов удаления CO_2 с нуля не позволяло сосредоточиться на сложной, но необходимой задаче — понять базовые физические процессы и отразить их в математических моделях. Управлением конфигурацией часто пренебрегали ввиду жестких временных рамок проекта. В итоге получался код, который стороннему программисту было проще переписать заново, чем изменить.

«Среда разработки приложений содержит инструменты, позволяющие распределить работу между несколькими специалистами».

В начале 2000-х годов я решил перейти к моделированию систем удаления CO_2 с помощью платформы, поддерживающей формирование сетки, решатели, с функциями постобработки и возможностью решать пользовательские мультифизические дифференциальные уравнения в частных производных. Этим требованиям соответствовала программная среда COMSOL Multiphysics®, которую мы и выбрали. Она помогла инженеру уделить необходимое внимание базовым физическим процессам. Продуманный пользовательский интерфейс позволил с легкостью управлять конфигурациями — теперь пользователи среды COMSOL® могли обмениваться компьютерными моделями. Моя группа разработала модели, которые уже обеспечили ценную возможность отладки системы удаления CO_2 на МКС, а также будет поддерживать обновления этой системы.

Поскольку NASA готовится к следующему этапу освоения космоса человеком — экспедициям к Марсу, а затем и на его поверхность, — потребность в надежных и эффективных системах резко возросла. В таких полетах, в отличие от МКС, пополнить запасы или вернуться раньше задуманного будет невозможно. Поэтому проектирование системы удаления CO_2 требует гораздо более тщательной оптимизации на всех этапах, включая выбор адсорбентов и процессов сорбции.

На своей нынешней должности я, среди прочего, отвечаю за управление развитием систем удаления CO_2 для космических аппаратов в рамках программы NASA Advanced Exploration Systems и в связи с этим слежу за текущими разработками в сфере сбора и удаления CO_2 . Недавно меня поразил вывод докладчика на одной из конференций: технология столь сложна, что для оптимизации процессов нельзя использовать стандартные показатели производительности. Следует использовать компьютерное моделирование, учитывающее ключевые физические аспекты процесса, в том числе связанные явления теплопередачи и массообмена в пористых средах. Чтобы прийти к оптимальному решению, требуется построить большое число параметрических моделей. Разумеется, методы параметрического тестирования тоже применимы, однако они потребуют огромных ресурсов и времени, что существенно сократит количество вариантов, которые удастся проверить.

Гибкость и скорость решателей, которые входят в мультифизические приложения, продолжают возрастать огромными темпами. Однако для ускорения моделирования одномерных систем и для успешного многомерного моделирования комплексных систем удаления CO_2 в будущем крайне желательно дальнейшее повышение надежности, скорости и эффективности использования памяти.

Одна из возможностей, которая позволила бы повысить скорость выполнения параметрических исследований уже сегодня, — это Среда разработки приложений COMSOL Multiphysics. После сопоставления итогов моделирования системы удаления CO_2 с тестовыми результатами можно заблокировать конфигурацию и передать приложение для моделирования нескольким пользователям, которые смогут проводить параметрический анализ параллельно. К параметрическим переменным относятся, например, наборы сорбентов, толщина слоя, продолжительность циклов и скорости потоков. Выпуск Среды разработки приложений пришелся очень кстати — этот инструмент существенно облегчает рабочий процесс.

Подводя итоги, можно сказать, что результаты предварительного изучения возможности применения COMSOL в качестве платформы для параметрического анализа в разработке систем удаления CO_2 выглядят очень многообещающими. Среда разработки приложений содержит инструменты, позволяющие распределить работу между несколькими специалистами. Такой подход поможет принять обоснованное решение в пользу того или иного варианта из множества доступных, а значит, эффективнее создавать оптимальные системы удаления CO_2 для экипажей, отправляющихся к Красной планете и на ее поверхность. ❖



Джим Нокс (Jim Knox) — менеджер, ответственный за развитие систем удаления CO_2 в рамках программы NASA Advanced Exploration Systems. Джим получил степень бакалавра авиа- и ракетостроения в Колорадском университете, и степень магистра машиностроения в Алабамском университете. Он занимается моделированием процессов адсорбции в среде COMSOL Multiphysics® в ходе работы над своей кандидатской диссертацией.