

COMSOL NEWS

ЖУРНАЛ МУЛЬТИФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

ИЗ СТУДЕНТОВ
В ПРЕДПРИНИМАТЕЛИ
Университет Буффало
СТР. 32

КОМПАНИЯ АВВ МОДЕРНИЗИРУЕТ
ПРОИЗВОДСТВО ТРАНСФОРМАТОРОВ
С ПОМОЩЬЮ ПРИЛОЖЕНИЙ
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ
СТР. 4

НАСА моделирует
нестабильное горение
в ракетных системах
СТР. 8

Творите, обменивайтесь опытом и совместно работайте с помощью специализированных приложений для моделирования: мультифизическое моделирование, доступное каждому

Настоящая сущность инноваций заключается в обеспечении доступности технологических решений для каждого. В выпуске «COMSOL News» за этот год вы сможете узнать, что для этого делают специалисты в области моделирования.

Зачастую результатами, полученными с помощью численного моделирования, необходимо эффективно обмениваться между несколькими командами, поскольку улучшение взаимодействия внутри организации крайне важно для ее успеха. Пользователи программного пакета COMSOL® рассказывают, как с помощью эффективных вычислительных инструментов, предоставляемых COMSOL Multiphysics®, они создают подробные физические модели, разрабатывают для них интуитивные пользовательские интерфейсы или преобразуют в специализированные приложения. Они также рассказывают, как публиковать подобные приложения для коллег и клиентов с помощью COMSOL Server™. Несмотря на то, что численное моделирование некогда было восточной исключительностью экспертов, приложения для моделирования сделали возможности мультифизического моделирования доступными любому желающему.

В данном выпуске вы познакомитесь со множеством исследовательских и конструкторских проектов, задействующих передовые технологии моделирования и проектирования, в самых разных сферах: от производства ракетных двигателей для агентства НАСА и силовых трансформаторов для компании ABB до технологического предпринимательства в Университете Буффало.

Выражаем благодарность всем пользователям COMSOL, поделившимся своими историями и знаниями, за их стремление к совершенству в своей области.

Приятного чтения!



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

ПРИСОЕДИНЯЙТЕСЬ К СООБЩЕСТВУ COMSOL



COMSOL, Inc.



COMSOL Multiphysics



@COMSOL_Inc



google.com/+comsol

БЛОГ comsol.ru/blogs

ФОРУМ comsol.ru/community/forums

Комментарии к материалам журнала «COMSOL News» направляйте по адресу info@comsol.ru

**COMSOL
NEWS**
2016

© 2016 COMSOL. COMSOL, COMSOL Multiphysics, Capture the Concept, COMSOL Desktop, COMSOL Server, LiveLink и Simulation for Everyone являются товарными знаками или зарегистрированными товарными знаками компании COMSOL AB. Любые другие товарные знаки являются собственностью их владельцев. Компания COMSOL AB, ее дочерние компании и продукция не рекомендуются, не финансируются и не поддерживаются этими владельцами и не связаны с ними. Полный список таких владельцев товарных знаков представлен на веб-сайте www.comsol.ru/trademarks.

Логотип IN является зарегистрированным товарным знаком компании LinkedIn Corporation и ее филиалов на территории США и в других странах. Логотип "f" является зарегистрированным товарным знаком компании Facebook, Inc. Логотип в виде птицы является зарегистрированным товарным знаком компании Twitter, Inc. Логотип G+ является товарным знаком компании Google, Inc.

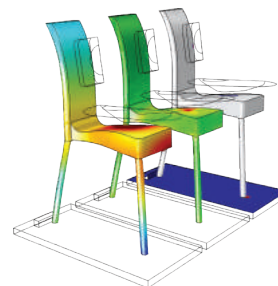
СОДЕРЖАНИЕ

ЭНЕРГЕТИКА

- 4 | От электронных таблиц к приложениям для мультифизического моделирования — компания ABB продолжает определять будущее отрасли трансформаторов

РАКЕТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

- 8 | Мультифизическое компьютерное моделирование акустических характеристик осредненного течения в ракетных системах



БЕЗОПАСНОСТЬ И КАЧЕСТВО ПРОДУКЦИИ

- 12 | Надежная опора для испытаний мебели

ОХЛАЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ

- 14 | Увеличение производительности и прибыли с помощью вычислительных приложений

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

- 18 | Совершенствование стандартов перекрытия газопроводов обжатием с помощью численного моделирования



НА ОБЛОЖКЕ

Запуск ракеты Atlas V с космического стартового комплекса 41 базы ВВС на мысе Канаверал, Флорида, США. Изображение: НАСА/Билл Ингэллс (NASA/Bill Ingalls).

Национальное аэрокосмическое агентство (НАСА) не выступает в поддержку программного пакета COMSOL Multiphysics®.

РАЗДЕЛЫ

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

21 | Ликвидация разливов нефти с помощью гидрофобных сеток

СТРОИТЕЛЬНАЯ ФИЗИКА

24 | Шум среди ясного неба: приложения COMSOL помогают определить воздействие вибраций на здания

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

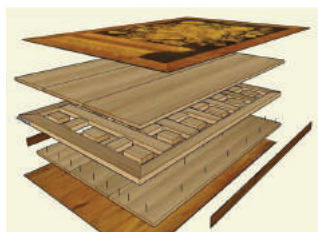
26 | Автоматизация обеспечения качества программных средств в области ядерной безопасности с помощью специализированных приложений

ЭНЕРГИЯ ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА С МАГНИТНЫМ УДЕРЖАНИЕМ ПЛАЗМЫ

29 | Рукотворные звезды — оценка конструктивной прочности в высокопроизводительном оборудовании термоядерного синтеза для производства энергии

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПРЕДПРИНИМАТЕЛЬСТВО

32 | Специализированные приложения для моделирования способствуют промышленным инновациям



СТРОИТЕЛЬНАЯ ФИЗИКА

35 | Мультифизический анализ помогает сохранять прошлое

КОРПУСА ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ

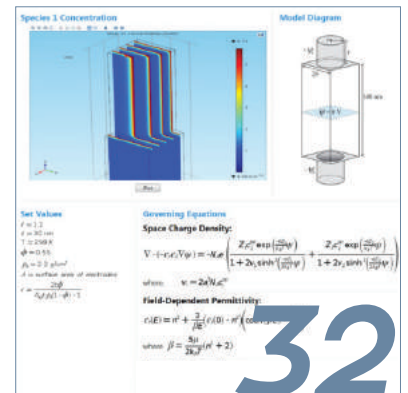
38 | Определение тепловых характеристик электронного устройства с помощью специализированного приложения

ГОСТЬ РЕДАКЦИИ

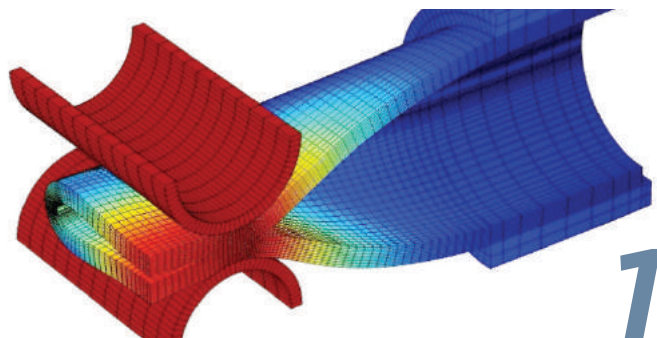
40 | COMSOL Multiphysics® — двигатель инноваций в образовании и промышленности



8



32



18



ОТ СВОДНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ТАБЛИЦ К ПРИЛОЖЕНИЯМ ДЛЯ МУЛЬТИФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ — КОМПАНИЯ АБВ ПРОДОЛЖАЕТ ОПРЕДЕЛЯТЬ БУДУЩЕЕ ОТРАСЛИ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Компании, разрабатывающие новое оборудование для силовых трансформаторов, несут затраты на прототипирование и тестирование, стремясь снизить уровень шума. Команда инженеров АБВ разрабатывает мультифизические модели и специализированные приложения, чтобы дать представление о создаваемых ими конструкциях другим отделам компании.

ЛЕКСИ КАРВЕР (LEXI CARVER)

Каждый день, что бы мы ни делали — готовили обед или заряжали смартфон, — мы пользуемся электрическими сетями, которые снабжают энергией наши дома, офисы и школы. В эти многокомпонентные сети входят электростанции, вырабатывающие электроэнергию, высоковольтные линии передачи электроэнергии на большие расстояния, распределительные линии, доставляющие энергию в каждый дом и в каждый микрорайон, и связанное с ними оборудование для управления потоками мощности и аппаратной защиты.

Часть этого оборудования — силовые трансформаторы, которые повышают или понижают напряжение в линиях электропередачи переменного тока (см. рис. 1). Повышение напряжения выгодно для передачи энергии на большие расстояния, так как при этом уменьшаются потери энергии. С другой стороны, высокие напряжения были бы опасны для потребителей электричества, поэтому трансформаторы повышают напряжение при подаче мощности в энергосистему и понижают его перед жилыми районами и домами.

Но трансформаторы не бывают бесшумными — в нескольких шагах от работающего трансформатора слышно жужжание или гудение. Хотя невозможно избавиться от шума полностью, нормативные документы требуют, чтобы шум был снижен до безопасного уровня. Грамотное проектирование трансформаторов позволяет достичь этого.

Компания АБВ (с головным офисом в Цюрихе, Швейцария), один из крупнейших производителей трансформаторов по всему миру, использует численное моделирование и вычислительные приложения для прогно-



РИС. 1. Фотография трансформаторного оборудования для высоковольтных линий электропередачи.

зирования и снижения уровня шума от своих трансформаторов. С помощью программного обеспечения для моделирования COMSOL Multiphysics® и Среды разработки приложений они выполняют виртуальные проверки проектов, тестируют различные конфигурации и распространяют результаты моделирования через специализированные пользовательские интерфейсы, дающие доступ к численным моделям.

⇒ **СНИЖЕНИЕ ШУМА ОТ НЕСКОЛЬКИХ ИСТОЧНИКОВ**

Шум трансформатора обычно исходит от нескольких источников, например, от вибрации сердечника трансформатора, вспомогательных вентиляторов и насосов системы охлаждения. Для снижения уровня шума каждый источник требуется рассматривать отдельно. Трансформаторы, производимые компанией ABB, включают в себя металлический сердечник с витками проводов вокруг различных секций, за-

щитный кожух или резервуар и изоляционное масло, заполняющее резервуар (см. рис. 2, вверху). Переменный ток, текущий по виткам одной обмотки, создает магнитный поток, наводящий ток в соседней обмотке. Напряжение изменяется за счет различного числа витков в обмотках.

Так как сердечник выполнен из магнитоэластичного материала — стали — эти магнитные потоки, меняющие свое направление, вызывают механические деформации. Быстрое расширение и сжатие металла и создает вибрации. Эти вибрации передаются на стенки резервуара через масло и фиксаторы, удерживающие сердечник, и создают характерный гул, который называют шумом сердечника (см. рис. 2, внизу).

Кроме шума сердечника, переменный ток в обмотках создает силу Лоренца, действующую на отдельные витки и вызывающую вибрации, известные как шум нагрузки. Их механическая энергия также передается на резервуар.

Так как уровень шума от этих источников определяется взаимосвязанными электромагнитными, акустическими и механическими явлениями, инженеры из Корпоративного исследовательского центра ABB (ABB CRC) в Вестеросе,

Швеция, должны хорошо понимать характер этих внутренних процессов, чтобы снизить уровень шума при проектировании трансформаторов.

⇒ **КОМПЛЕКСНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ АКУСТИЧЕСКИХ, МЕХАНИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ**

«Мы выбрали пакет COMSOL Multiphysics, — говорит исследователь из исследовательского центра ABB Мустафа Кавасоглу (Mustafa Kavasoğlu), — поскольку он позволяет легко решать связанные междисциплинарные задачи. Так как в этом проекте нам требовалось моделировать электромагнитные, акустические и механические явления, программный пакет COMSOL® оказался лучшим вариантом для решения этих трех классов физических задач в единой среде».

Мустафа Кавасоглу, доктор Андерс Данерюд (Anders Daneryd), главный исследователь, и доктор Ромен Атель

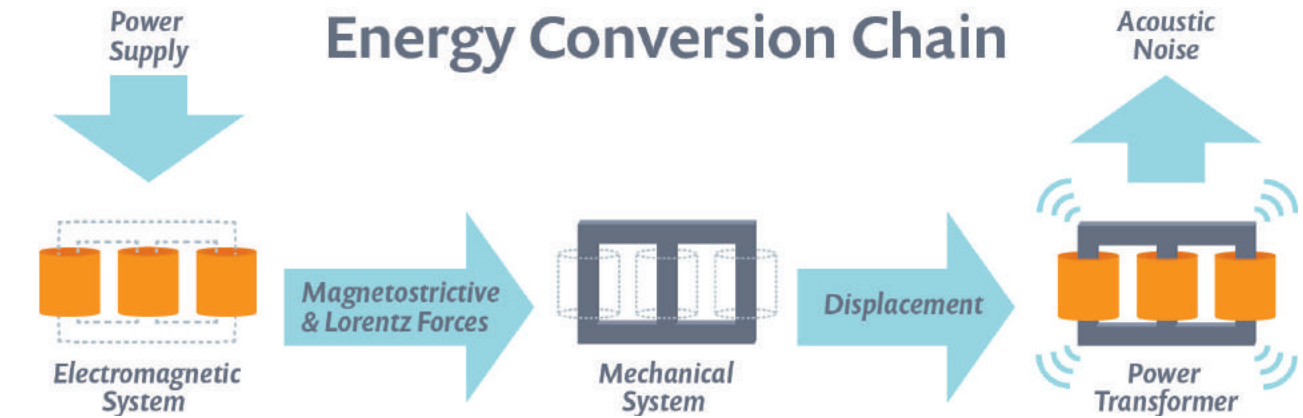
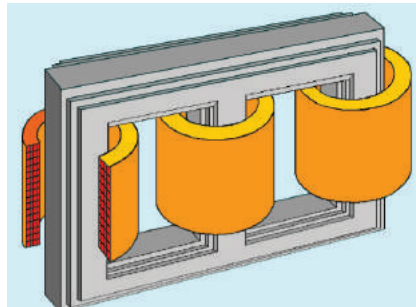


РИС. 2. Вверху слева: модель активной части трехфазного трансформатора с обмотками вокруг сердечника, созданная в САПР. Вверху справа: активная часть силового трансформатора, погруженная в резервуар с маслом. Внизу: последовательность преобразования энергии, ведущая к созданию шума сердечника (магнитоэластичность в сердечнике) и шума нагрузки (силы Лоренца в обмотках).

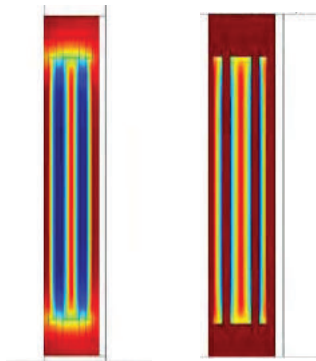


РИС. 3. Результаты моделирования демонстрируют плотность магнитного потока (слева) и силы Лоренца (справа) в витках обмотки трансформатора.

(Romain Haette), главный инженер, составляют рабочую группу исследовательского центра ABB CRC, работающую над акустикой трансформаторов. Их целью было создание набора моделей и вычислительных приложений для расчета магнитных потоков в сердечнике трансформатора и обмотках (см. рис. 3, слева), сил Лоренца в обмотках (см. рис. 3, справа), механических перемещений, вызванных магнитострикционной деформацией, и обусловленных этим уровнем звукового давления упругих волн, распространяющихся в резервуаре. Они тесно сотрудничают с бизнес-подразделением ABB Transformers, часто полагаясь на опыт и знания доктора Кристофа Плетнера (Christoph Ploetner), известного эксперта в области силовых трансформаторов, чтобы точно следовать всем требованиям и нуждам бизнеса.

Одна из моделей прогнозирует уровень шума, создаваемого сердечником вследствие магнитострикции. Команда начала с модели электромагнитных явлений, рассчитывающей магнитные поля, создаваемые переменным током, а также магнитострикционные деформации в стали.

Геометрия модели состояла из стального сердечника, обмоток и внешней области, представляющей резервуар. «На основе магнитострикционных деформаций мы рассчитали

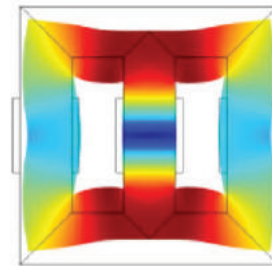
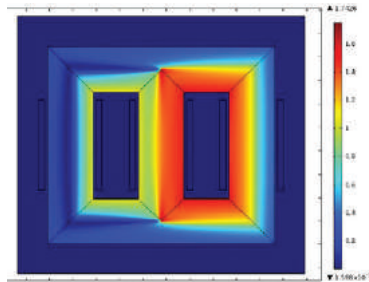


РИС. 4. Слева: результаты, полученные в программном пакете COMSOL® для уровней магнитного потока в стали. Справа: результаты, отображающие резонансы в сердечнике. Деформации увеличены для наглядности.

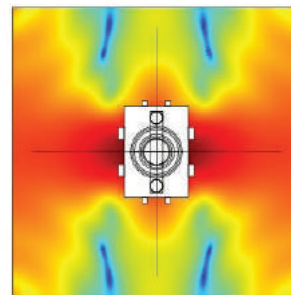
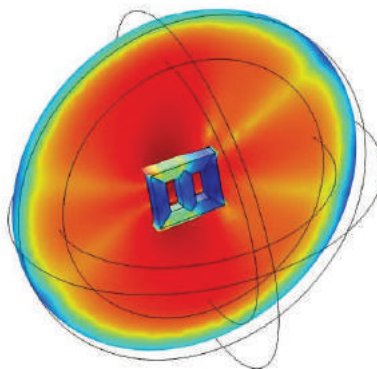


РИС. 5. Результаты акустического анализа, отображающие поле звукового давления вокруг сердечника (слева) и вокруг трансформатора (справа).

перемещения, а затем вычислили резонансные характеристики на разных частотах с помощью модального анализа, — рассказал Кавасоглу (см. рис. 4). — Резонансы с легкостью вызываются магнитострикционными деформациями, что приводит к заметному усилению вибраций на этих частотах».

Затем они смогли спрогнозировать распространение звуковых волн в масле и рассчитать обусловленные ими вибрации резервуара, которые ведут к излучению звуковых волн в окружающую среду (см. рис. 5).

Они также выполнили моделирование перемещения витков обмотки, вызывающее шум нагрузки, и определили величины давления на стенки резервуара, связанного с создаваемым при этом звуковым полем (см. рис. 6).

Параметрический анализ, выявляющий сложные связи между параметрами устройства (например, толщиной стенок резервуара и свойствами материалов) и итоговым уровнем шума трансформатора, позволил снизить шум, изменяя геометрию и конструкцию сердечника, обмоток и резервуара.

⇒ РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВО ВСЕЙ КОМПАНИИ ABB

Команда исследовательского центра продолжает использовать программный пакет COMSOL не только для понимания и моделирования физических процессов, но и для того, чтобы другие конструкторы компании ABB и бизнес-подразделение в целом могли воспользоваться плодами их трудов. С помощью Среды разработки приложений COMSOL Multiphysics они превратили свои мультифизические модели в приложения, которые легко подстраиваются под нужды каждого отдела компании.

Эти приложения для моделирования упрощают тестирование и проверку,

“С помощью лицензии на COMSOL Server™ мы также распространяем и тестируем наше приложение в других офисах, что позволяет с легкостью распространять его. Глобальная лицензия — это прекрасно; у нашей организации есть офисы по всему миру, и инженеры в других офисах могут пользоваться этими приложениями”

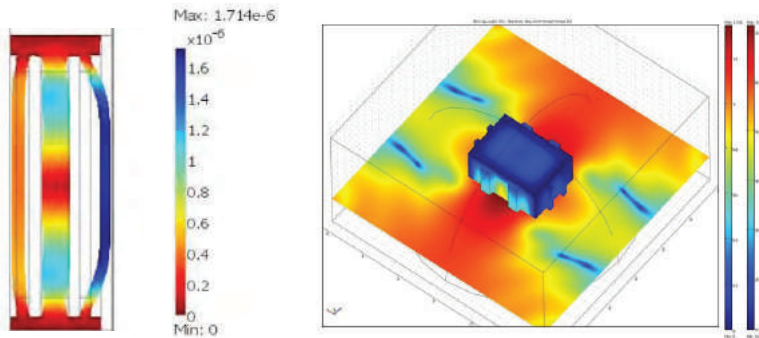


РИС. 6. Слева: результаты моделирования показывают перемещение в обмотках. Деформации увеличены для наглядности. Справа: результаты показывают уровни давления звука вне резервуара и перемещения стенок.

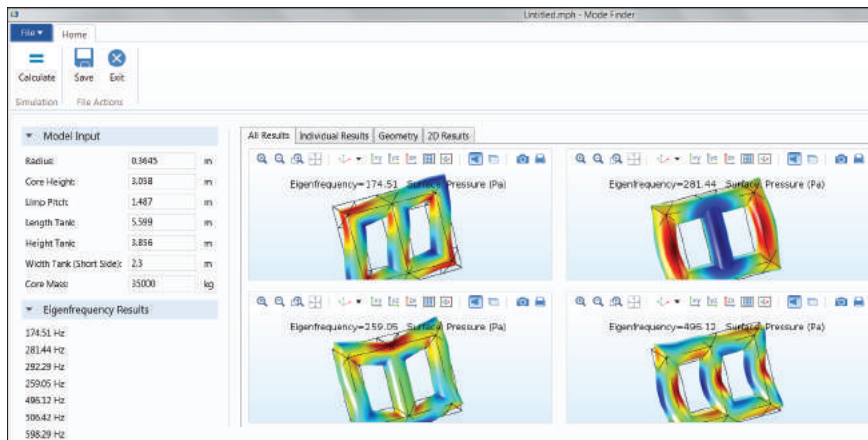


РИС. 7. Часть снимка экрана первого приложения для моделирования, созданного для расчета собственных частот сердечника трансформатора. Вкладка слева показывает исходные данные модели, справа показаны результаты — вычисленные значения собственных частот. Деформации увеличены для наглядности.

которыми заняты инженеры-конструкторы и инженеры научно-исследовательского отдела: «Конструкторы ранее пользовались инструментами, основанными на статистике и эмпирических моделях. Мы восполняем пробелы, разворачивая приложения для моделирования. Среда разработки приложений предоставляет доступ к расчетам методом конечных элементов через пользовательский интерфейс, так что другим инженерам не требуется изучать теорию метода конечных элементов», — объясняет Атель.

Одно приложение (см. рис. 7) вычисляет собственные частоты сердечника трансформатора, которые могут привести к повышенному уровню шума из-за того, что некоторые частоты попадают в слышимый диапазон. Это приложение включает в себя как физическую модель, разработанную в программном пакете COMSOL®, так и специальные методы, написанные на языке Java® в Среде разработки приложений.

«Наши конструкторы используют стандартные электронные таблицы, и это хорошо подходит для часто проектируемых трансформаторов. Но когда мы предлагаем новые конструкции или меняем габариты трансформаторов, этот подход может привести к проблемам, например, ошибочным выводам и менее точным данным об уровнях шума. Такие ошибки могут дорого обойтись, если уже законченный трансформатор потребует дополнительных средств шумоподавления», — продолжает Атель.

«Кроме вопроса стоимости, есть еще вопрос времени. Новое приложение делает работу конструкторов проще и продуктивнее благодаря точности метода конечных элементов».

Специализированные приложения дают пользователям удобный инструмент для того, чтобы проверить, как геометрия, свойства материалов и другие параметры конструкции влияют на итоговые уровни шума транс-

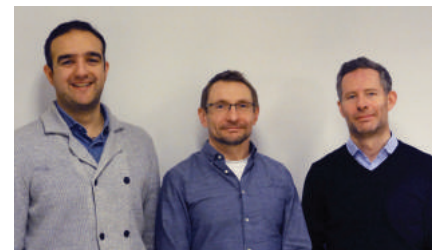
форматора. «Мы тщательно обдумали, к каким параметрам мы предоставляем доступ, выделив самые значимые из них», — добавляет Кавасоглу.

Столь гибкие инструменты необычайно полезны в проектировании и виртуальном тестировании, учитывая широкий диапазон промышленных задач, для которых компания ABB конструирует трансформаторы. «Мы проектируем трансформаторы для любых промышленных задач. Сейчас мы уделяем больше внимания трансформаторам переменного тока большой мощности, используемым производителями электроэнергии, которые передают и распределяют электроэнергию в масштабах города», — объяснил он.

«Но результаты нашей работы пригодятся для любых видов трансформаторов, и при получении конкретного запроса мы адаптируем приложение в соответствии с ним. Это позволяет нам с легкостью выполнять дополнительные работы по проектированию. Среда разработки приложений сделала распространение знаний и технологий гораздо проще.

С помощью лицензии на COMSOL Server™ мы также устанавливаем и тестируем наше приложение в других офисах, что позволяет с легкостью распространять его. Глобальная лицензия — это прекрасно; у нашей организации есть офисы по всему миру, и инженеры в других офисах могут пользоваться этими приложениями». После локальной установки COMSOL Server специалисты по моделированию могут управлять приложениями и разворачивать их, делая их доступными через клиентское приложение или веб-браузер.

Команда работает над следующим приложением, рассчитывающим шум нагрузки. После завершения в бизнес-подразделении это приложение снимет с конструкторов и инженеров по продажам груз утомительных вычислений, позволяя им запускать больше виртуальных тестов без необходимости работать с подробной моделью, что позволит компании ABB быстро и легко производить лучшие трансформаторы в мире. ❖



Слева направо: Мустафа Кавасоглу, Ромен Атель и Андерс Данерюд из исследовательского центра ABB CRC.

МУЛЬТИФИЗИЧЕСКОЕ КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОСРЕДНЕННОГО ТЕЧЕНИЯ В РАКЕТНЫХ СИСТЕМАХ

Неустойчивое горение в моторах твердотопливных и жидкостных ракетных двигателях — проблема, которая продолжает беспокоить конструкторов и инженеров. Высокоточный подход к моделированию на основе мультифизического анализа позволяет лучше понять и спрогнозировать эти явления.

ШОН Р. ФИШБАХ (SEAN R. FISCHBACH)

Ракетные системы часто испытывают резкие колебания давления, скорости и температуры, связанные со сложным взаимодействием между процессами горения топлива и динамикой газов. В предельных случаях неустойчивого горения амплитуды колебаний могут достигать или превышать среднее давление в камере. Большая амплитуда колебаний приводит к повреждению инжекторов, ухудшению рабочих характеристик ракеты, повреждению полезной нагрузки, а в некоторых случаях и к нарушению целостности оболочки и потере ракеты.

Фронтальная поверхность инжектора
двигателя F1 ракеты-носителя «Сатурн-5».

В прошлом сложности в моделировании и прогнозировании неустойчивого горения приводили к тому, что в большей части ракетных систем неустойчивость компенсировалась дорогостоящим тестированием (см. рис. 1), или же систему списывали целиком.

“Мы приближаемся к более полному описанию неустойчивого горения, если пользуемся глобальными оценками на основе энергетического баланса”

На ранних этапах развития технологии реактивных двигателей ученые и инженеры собирали данные об основополагающих физических явлениях, проводя измерения на вибрационных стендах, наблюдая за колеблющимися факелами выхлопных газов и, в первую очередь, слушая шумы, связанные с неустойчивостями. Благодаря этим наблюдениям первые исследователи неустойчивого горения сосредоточили свои усилия на моделировании акустических волн внутри камер сгорания.

Это решение довольно логично с учетом того, что измеренная частота колебаний часто хорошо соответствует нормальным акустическим модам камеры сгорания. Но такой подход не учитывает влияние поперечных и тепловых волн, вызванных акустическими волнами или тесно связанных с ними. Мы приближаемся к более полному описанию неустойчивого горения, если пользуемся глобальными оценками на основе энергетического баланса.

Последние достижения в области моделирования неустойчивого горения на основе учета энергетического баланса требуют точного определения акустических частот и форм мод. Особенный интерес представляют акустические взаимодействия осредненного течения в сужающейся области ракетного сопла, где наблюдаются большие перепады давления, плотности и скорости. Неравномерный выброс энергии через сопло ракеты считается основным источником акустического снижения тяги в ракетных системах.

Подход к решению проблемы снижения тяги в сопле с учетом эффектов осредненного течения был недавно разработан Френчем (French)². Этот новый подход продолжает работу Сиг-

мана и Зинна (Sigman, Zinn)³ и решает уравнение для потенциала акустической скорости, получаемое из уравнений Эйлера методом возмущений⁴.

Найти методные значения уравнения для потенциала акустической скорости, в котором ψ — комплексный акустический потенциал, λ — комплексное собственное значение,

$$\nabla^2 \psi - \left(\frac{\lambda}{c}\right)^2 \psi - \mathbf{M} \cdot [\mathbf{M} \cdot \nabla(\nabla \psi)] - 2 \left(\frac{\lambda \mathbf{M}}{c} + \mathbf{M} \cdot \nabla \mathbf{M}\right) \cdot \nabla \psi - 2\lambda \psi \left[\mathbf{M} \cdot \nabla \left(\frac{1}{c}\right)\right] = 0$$

c — скорость звука, \mathbf{M} — вектор Маха, гораздо сложнее, чем решить обычное

$$\nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho} \nabla p\right) + \frac{1}{\rho c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0$$

волновое уравнение для давления, и для решения этой задачи потребуется численное приближение поля течения в камере и собственные значения.

⇒ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИКИ В КАМЕРЕ

Новейшие теоретические модели колебательных возмущений в высокоскоростных потоках требуют точно определить акустические собственные моды камеры сгорания. Но сначала требуется выполнить моделирование свойств осредненного течения в камере сгорания.

Программное обеспечение COMSOL Multiphysics® предоставляет вычислительную платформу для удобного и точного моделирования динамики газов в камере сгорания и акустических явлений. Программный пакет для моделирования при помощи метода конечных элементов включает в себя большое число предварительно заданных физических моделей и обобщенный математический интерфейс.

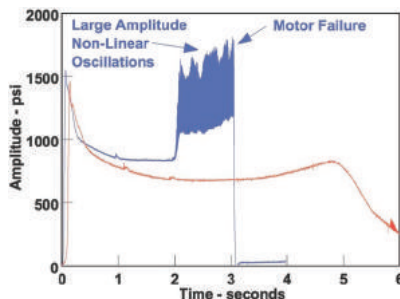


РИС. 1. Осциллограмма давления устойчивого (красная кривая) и неустойчивого (синяя) режима работы двигателя твердотопливной ракеты¹.

В данной работе мы использовали метод конечных элементов в COMSOL для моделирования параметров поля

установившегося течения в типичном жидкостном двигателе с помощью интерфейса физики High Mach Number Laminar Flow (ламинарный поток с большим числом Маха), который использует уравнения Навье — Стокса для полностью сжимаемого идеального газа совместно с уравнениями сохранения энергии и массы.

Чтобы учесть ввод горячего газа, образующегося в результате горения топлива, фронтальная плоскость инжектора моделируется однородным входным течением сгоревшего ракетного топлива (см. рис. 2). Все остальные твердые границы моделируются граничным условием проскальзывания, а плоскость среза моделируется условием гибридного выходного потока, учитывающим дозвуковые и сверхзвуковые течения.

Результаты анализа осредненного течения проверяются на действительность и сходимость. Параметры осредненного течения: давление, плотность, скорость течения и скорость звука — требуются для решения уравнения для потенциала акустической скорости. Особенный интерес представляют значения осредненного течения в сужающейся части сопла, в области критического сечения. Плоскость, на которой число Маха равно единице, создает звуковой барьер в потоке. Чтобы создать точную геометрию для акустического анализа, эта плоскость (показанная сиреневым цветом на рис. 3) исключается из анализа осредненного течения.

⇒ МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТИКИ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ

Математический интерфейс Coefficient Form PDE (коэффициентная форма записи дифференциального уравнения в частных производных) пакета COMSOL Multiphysics используется для того, чтобы определить комплексные собственные значения уравнения для потенциала акустической скорости. Параметры осредненного течения в уравнении потенциала акустической скорости берутся из результатов анализа осредненного течения. Газодинамика в камере сгорания играет решающую роль в определении граничных условий акустического анализа. В сужающейся и расширяющейся секциях ракетного сопла, а именно в плоскости, где число Маха равно единице, градиенты давления, скорости и плотности теоретически стремятся к бесконечности. Далее по течению от этой плоскости акустические возмущения

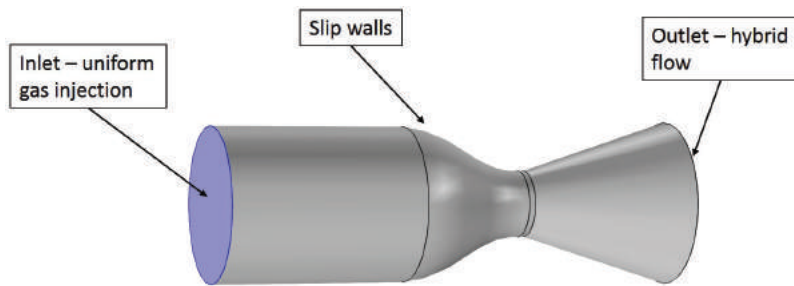


Рис. 2. Модельная геометрия жидкостного двигателя и граничные условия.

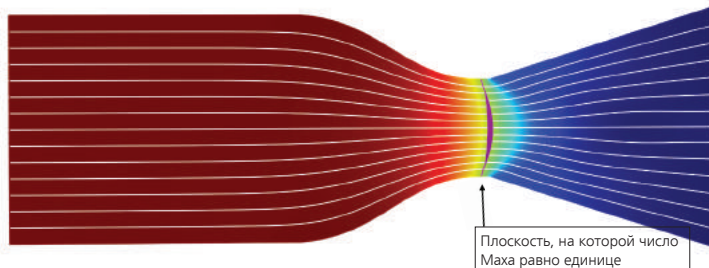


Рис. 3. Линии тока скорости на графике давления в камере. Плоскость, на которой число Маха равно единице, выделена сиреневым.

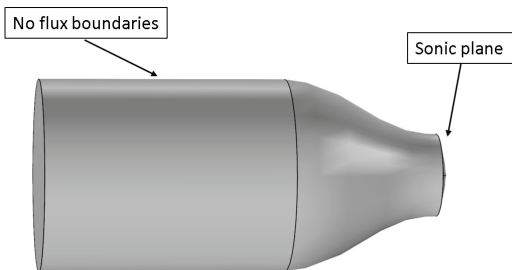


Рис. 4. Геометрия акустического анализа и граничные условия.

переносятся с осредненным течением на сверхзвуковых скоростях. По этой причине возмущения, возникшие далее по течению от этой плоскости, не распространяются против течения. Расширяющаяся секция сопла не производит шумов и не влияет на акустику камеры сгорания. Геометрия модели обрезается на звуковой линии сопла, где автоматически выполняется граничное условие нулевого потока (см. рис. 4). Остальные границы моделируются граничным условием нулевого потока, что предполагает нулевое поглощение звука на всех поверхностях.

Анализ собственных значений дает комплексные моды собственных колебаний и собственные значения, отвечающие каждой моде акустических колебаний, вместе с комплексно сопряженными величинами. Действительная часть комплексных собственных

значений отвечает за затухание акустических колебаний со временем, а мнимая часть определяет частоту колебаний. Комплексные собственные векторы определяют пространственную амплитуду и фазу акустических волн.

Сравнивая формы акустических мод, рассчитанных из классического однородного волнового уравнения (уравнения Гельмгольца), с формами мод, рассчитанных из уравнения потенциала

акустической скорости, мы видим, что высокочастотные модели лучше описывают физику этих явлений (см. рис. 5). Включение параметров осредненного течения в уравнение потенциала акустической скорости позволяет точно учесть сдвиг фазы, вызванный установившимся течением газа. Учет фазы совершенно необходим, поскольку модели неустойчивого горения основаны на интегрировании акустических собственных векторов по времени и пространственным координатам.

Моделирование газодинамики ракеты и вычисление собственных мод акустических колебаний в COMSOL Multiphysics дает более точную форму мод, чем ранее используемые методы. Эти высокочастотные акустические расчеты легко включить в модели неустойчивого горения с тем, чтобы конструкторы и инженеры могли лучше прогнозировать процессы горения.

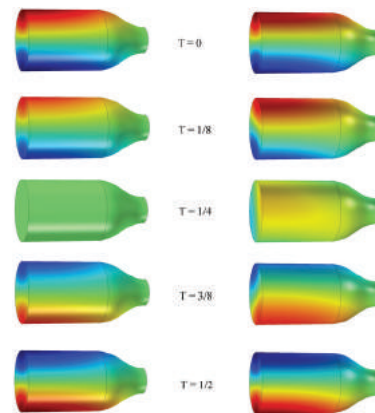


Рис. 5. Сравнение первой тангенциальной моды собственных колебаний, полученной из классического однородного уравнения (слева) и из уравнения потенциала акустической скорости (справа) на половине периода колебаний T .

Теперь мы можем точно смоделировать добавление таких устройств демпфирования, как перегородки, или изменение условий эксплуатации до тестирования.

⇒ ДАЛЬНЕЙШАЯ РАБОТА

Более подробное описание неустойчивого горения должно включать в себя поперечные и тепловые колебания, сопряженные с акустикой камеры. Поперечные колебания являются прямым следствием акустических колебаний, а тепловые колебания могут возникать и в их отсутствие. Дальнейшая работа с использованием COMSOL Multiphysics будет сосредоточена на расчете вязких поперечных волн, которые сопутствуют любым акустическим колебаниям. ❖

Эта статья была написана Шоном Р. Фишбахом (Sean R. Fischbach), Marshall Space Flight Center/Jacobs ESSA Group, MSFC, Хантсвилл, штат Алабама.

ЛИТЕРАТУРА

1. F. S. Bloomshild, *Lessons Learned in Solid Rocket Combustion Instability*, 43rd AIAA Joint Propulsion Conference, AIAA-2007-5803, Cincinnati, OH, July 2007.
2. J. C. French, *Nozzle Acoustic Dynamics and Stability Modeling*, Vol. 27, *Journal of Propulsion and Power*, 2011.
3. R. K. Sigman and B. T. Zinn, *A Finite Element Approach for Predicting Nozzle Admittances*, Vol. 88, *Journal of Sound and Vibration*, 1983, pp. 117-131.
4. L. M. B. C. Campos, *On 36 Forms of the Acoustic Wave Equation in Potential Flows and Inhomogeneous Media*, Vol. 60, *Applied Mechanics Reviews*, 2007, pp. 149-171.

"THE BEST WAY TO PREDICT THE FUTURE ...IS TO CREATE IT."

—ABRAHAM LINCOLN

Revolutionary Design



2011 GRAND PRIZE WINNER FLUID-SCREEN BACTERIAL DETECTION SYSTEM

For the past 100 years, the standard procedure for detecting dangerous bacteria meant collecting a sample, sending it out to a lab, and waiting 24 to 48 hours to grow a culture and report the results. Fluid-Screen's patent-pending new technology puts the power of a lab in the palm of your hand to give you test results in about 30 minutes.

Fluid-Screen is a revolutionary bacterial detection system for quality assurance testing in fields such as municipal water supplies, medical applications, and food processing.

WILL YOUR DESIGN BE NEXT?

Start Creating the Future at:

www.createthefuturecontest.com

Create THE Future

DESIGN CONTEST 2016

PRINCIPAL SPONSORS



CATEGORY SPONSORS



PRIZE SPONSORS



Надежная опора для испытаний мебели

В мире мебели все решают стандарты качества. Стулья, прошедшие натурные испытания, можно продавать в магазинах. Не прошедший испытания прототип возвращается конструкторам на доработку.

ЛЕКСИ КАРВЕР (LEXI CARVER)

За каждым потребительским товаром на рынке стоит долгий циклический процесс проектирования, перепроектирования, прототипирования и, наконец, испытаний, которые позволяют оценить работу исследователей, инженеров и прочих специалистов и убедиться, что изделие готово к выходу на рынок. Для соблюдения требований к безопасности и качеству готового изделия производителю необходимо пройти проверку, которая позволит ему продавать свою продукцию в магазинах.

Для того, чтобы обычный стул попал на полки магазинов, ему предстоит выдержать тщательное тестирование, включающее в себя подтверждение способности выдержать человеческий вес, сохранять форму и не изгибаться в определенных условиях. В течение своего срока службы стул должен выдержать тысячи циклов повторяющегося приложения нагрузки, при этом он не должен ломаться, изгибаться и давать трещины.

⇒ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ ЦЕНТРЫ УПРОЩАЮТ ЗАДАЧУ ДЛЯ КОНСТРУКТОРОВ

Так как процесс испытаний для компаний, желающих пройти сертификацию, может быть затратным как с точки зрения финансов, так и времени, существуют независимые оценочные организации (испытательные центры), которые облегчают эту задачу для компаний, занимающихся производством стульев. Сотни различных моделей ежегодно проходят через испытательные центры, и в случае, если они не соответствуют европейским и американским стандартам качества (EN, BS, ISO и ANSI), производителю предстоит потратить тысячи долларов на внесение изменений в конструкцию и повторные испытания.

Для облегчения нагрузки на производителей один из испытательных

центров обратился к сертифицированному консультанту COMSOL — компании Continuum Blue, которая помогает своим клиентам в разработке приложений для численного моделирования. Испытательный центр попросил создать инструмент, который позволил бы их клиентам самостоятельно испытывать различные конструкции стульев. Подобное приложение позволило бы клиентам с помощью виртуальной модели оценить вероятность прохождения испытаний, прежде чем приступить к ним.

«Наш заказчик хотел узнать, возможно ли разработать приложение для моделирования процесса испытаний, — объясняет доктор Марк Йомэн (Mark Yeoman), директор компании Continuum Blue. — Клиенты заказчика должны были иметь возможность удаленного подключения, загрузки различных конструкций стульев и виртуального испытания каждой из них. Только после того, как клиенты убеждаются в том, что предложенная конструкция успешно проходит испытания, они могут приступить к изготовлению образца, который будет отправлен в испытательный центр».

Подобное приложение потребовало бы включения в свой состав широкого набора функций. Оно должно было бы включать критерии качества, быть интуитивно понятным и удобным на всех этапах разработки как для инженеров, так и для дизайнеров, а также обладать достаточным количеством настроек для испытания стульев различных моделей и форм, изготовленных из различных материалов.

⇒ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСКОРЯЕТ ПРОЦЕСС СЕРТИФИКАЦИИ МЕБЕЛИ

С помощью программного пакета COMSOL Multiphysics® Йомэн разработал численную модель, которая могла прогнозировать поведение стула при прохождении стандартного испыта-

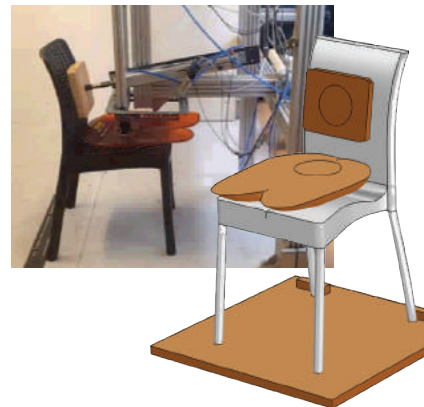


РИС. 1. Состав испытательного стенда. На переднем плане — геометрия модели стула от Continuum Blue

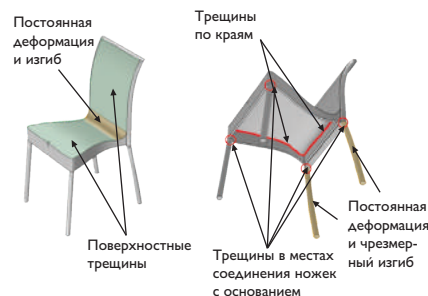


РИС. 2. Схематическое изображение критических точек в конструкции стула, в которых чаще всего возникают поломки.

ния под нагрузкой. Созданная им модель включала геометрию стула, пол, фиксаторы ножек, а также нагрузочные пластины для спинки и сиденья, имитирующие элементы, применяемые в реальном испытании (см. рис. 1).

Данная модель давала ответ на вопрос, «выдержит ли этот стул необходимую нагрузку» для стульев различной конструкции.

Йомэн отмечает, что «стулу необходимо выдержать приложенную нагрузку всего на нескольких участках. В течение срока службы стул не должен ломаться или давать трещины, а его ножки не должны гнуться, развезаться или чрезмерно искривляться. Если трещины появятся в точках, где ножки прикрепляются к сиденью, стул не пройдет испытания».

⇒ ИЗМЕРЕНИЯ В СООТВЕТСТВИИ С КРИТЕРИЯМИ ИСПЫТАНИЙ

«В первой части теста используется статическая нагрузка. Это испытание показывает, способен ли стул выдержать определенную максимальную нагрузку, — объясняет Йомэн. — Испытательная

нагрузка прикладывается к стулу в течение 20 секунд. Первоначально нагрузка распределяется на сиденье, а затем на спинку, как будто на стул садится крупный человек и откидывается на спинку. Вторая часть испытания включает в себя оценку усталостной прочности — в течение тысяч повторяющихся циклов нагрузка прикладывается к стулу и снимается с него. Этот этап имитирует эксплуатацию стула в течение многих лет».

Анализ с помощью модели Йомэна позволил установить деформацию стула в то время, как на него садится человек, величину механического напряжения и наиболее вероятные точки ранних поломок (см. рис. 2). Также данная модель измеряет давление в точках контакта стула, нагрузочных пластин и пола, на основании чего дается прогноз числа циклов до возникновения поломки (см. рис. 3).

Йомэн добавляет: «Настройка

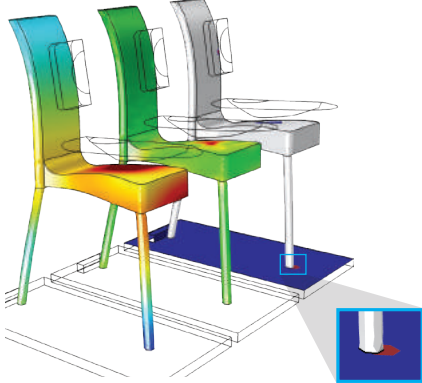


РИС. 3. Результат моделирования деформации (слева), напряжения (в центре) и давления в точках контакта (справа) для одного стула, проходящего испытания под нагрузкой.

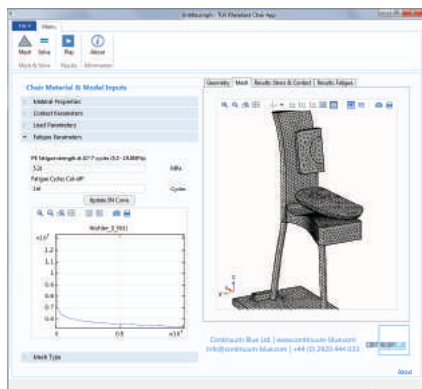


РИС. 4. Отображение в приложении от компании Continuum Blue сетки и полей ввода, благодаря которым клиент имеет возможность настраивать модель в соответствии со своими потребностями.

большинства параметров модели была довольно простой. Задание параметров механики конструкций, характеристик материала и параметров нагрузки в среде COMSOL® выполняется относительно быстро». На успешное прохождение стулом испытания оказывает влияние множество механических факторов, однако анализ контактного взаимодействия оказался делом непростым, как объясняет Йомэн: «Анализ контактного взаимодействия — это по природе своей сложная задача. Она в значительной мере зависит от характеристик материалов контактных поверхностей и коэффициентов трения, которые существенно нелинейны.

Несколько контактных точек образуют внутренне неустойчивую контактную задачу: четыре точки контакта ножек стула с полом, точки между сиденьем и нижней нагрузочной пластиной, спинкой и задней нагрузочной пластиной, — продолжает он. — Для точного расчета параметров контакта мы используем данные о жесткости материала, пределе текучести и коэффициенте трения».

⇒ УПРОЩЕНИЕ И УСКОРЕНИЕ ВИРТУАЛЬНОГО ИСПЫТАНИЯ

После завершения работы над моделью в среде COMSOL и проверки правильности ее работы команда Continuum Blue перешла к созданию специализированного пользовательского интерфейса, другими словами — приложения, которое позволило бы пользователю быстро выполнять виртуальные испытания конструкции стула путем изменения определенных исходных данных и параметров, относящихся к геометрии, условиям нагрузки и свойствам материала.

«Мы воспользовались Средой разработки приложений из программного пакета COMSOL Multiphysics», — поясняет Йомэн. Среда позволяет разработчику по своему усмотрению расположить поля для ввода информации, таблицы с результатами, кнопки, выпадающие меню и элементы графического оформления. Полученное в результате приложение целиком выполняет моделирование, а пользователь, который может не иметь необходимых знаний из области инженерных наук или мультимедийного моделирования, имеет доступ только к некоторым входным параметрам, но не к параметрам и настройкам модели, интерфейс физик и алгоритмам анализа.

«Мы хотели, чтобы пользователь приложения, которое мы создали для нашего клиента, имел возможность определять различные опции, напри-

мер, нелинейность материала. Мы подобрали все основные параметры модели так, чтобы они были связаны между собой. Таким образом, при изменении одного параметра произойдет обновление модели в целом».

«Во время приложения нагрузки уровни механического напряжения оцениваются в сравнении с данными о пределе текучести и прочности на разрыв определенного материала. В случае, если происходит постоянная пластическая деформация, соответствующие участки стула будут подсвечены с тем, чтобы показать пользователю области с превышением предела текучести. В случае, если значение механического напряжения превосходит величину прочности на разрыв, имеет место один из видов катастрофического разрушения материала, например, появление трещин и расслоение, — говорит Йомэн. — Приложение автоматически выводит на экран всплывающее окно с предупреждением о том, что уровень механического напряжения превысил величину прочности на разрыв. Это означает, что стул не прошел испытания».

Это было именно то, в чем так нуждался испытательный центр — приложение, которое позволило бы производителям и дизайнерам стульев импортировать собственную геометрию, выбирать материалы, определять условия контакта и приложения нагрузки, сравнивать результаты с требованиями испытаний и, соответственно, сразу же понимать, пройдет или не пройдет предложенная конструкция натурные испытания (см. рис. 4).

Посредством установки COMSOL Server™ на рабочих станциях Йомэн смог также распространять приложение среди различных пользователей, позволяя им подключаться к базе данных и запускать специфические приложения. В свою очередь, испытательный центр намерен в будущем использовать COMSOL Server для обеспечения доступа к приложениям для своих клиентов по всему миру.

«Данные приложения смогут облегчить проектировщикам и инженерам-испытателям задачу оценки эксплуатационных характеристик стула перед началом производства и натурных испытаний, — говорит Йомэн. — Это даст им возможность виртуально оценить множество конструкций, прежде чем выбрать одну удачную для прототипирования и испытаний, будучи уверенными в том, что она пройдет испытания и будет соответствовать стандартам качества, сокращая временные и финансовые затраты на производство и испытание физических прототипов». ❖

Увеличение производительности и прибыли с помощью вычислительных приложений

От использования вычислительных приложений на основе высокоточных мультифизических моделей выигрывает каждый. Как разработчик приложения, так и конечный пользователь пользуются преимуществами инновационных решений, одновременно снижая риски и минимизируя затраты, или даже получают новый источник доходов.

ДЖЕННИФЕР СЕГУИ (JENNIFER SEGUI)

HeatSinkSim — современный вычислительный инструмент, созданный специалистами по моделированию компании AltaSim Technologies. До недавнего времени сама разработка подобного инструмента в разумные временные сроки была невозможна. Дружественный пользовательский интерфейс расширяет возможности мультифизического моделирования и виртуального прототипирования для любого инженера, желающего оптимизировать конструкцию радиаторов для микроэлектроники.

Приложения для моделирования найдется место в процессе разработки или проектирования любого продукта. Большим компаниям они могут помочь в устранении узких мест в рабочем процессе, а небольшим компаниям и стартапам, не имеющим по финансовым причинам в штате отдельных специалистов по моделированию, обеспечат доступ к специализированным инструментам проектирования.

«Будь вы большой компанией или небольшим стартапом, если у вас есть стремление изменить будущее и доминировать на рынке, то придется заменить традиционные инструменты проектирования на что-то более предсказуемое и отвечающее реальности. Приложения для мультифизического моделирования, подобные HeatSinkSim, не только сделают инженерные инновации возможными, но и ускорят их появление», — объясняет Джеф Кромптон (Jeff Crompton), сооснователь и директор компании AltaSim.

Данная статья содержит практические рекомендации и вдохновляет на использование подхода к проектированию на основе моделирования, сокращающего затраты на разработку продукта и время его выхода на рынок.

“Приложения для мультифизического моделирования, подобные HeatSinkSim, не только сделают инженерные инновации возможными, но и ускорят их появление”

— ДЖЕФ КРОМПТОН, ДИРЕКТОР И СООСНОВАТЕЛЬ КОМПАНИИ ALTASIM TECHNOLOGIES

⇒ ОТ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЦЕЛЕЙ ПРОЕКТИРОВАНИЯ К ИННОВАЦИОННОМУ ПРОДУКТУ

Интеграция моделирования в процесс разработки продукта значительно упрощается благодаря приложениям для моделирования, которые оставляют в прошлом затратный, основанный на методе проб и ошибок процесс прототипирования. Для того, чтобы проиллюстрировать данное утверждение, давайте представим себе, во-первых, типичные цели проектирования и оптимизации радиаторов для микроэлектроники, и, во-вторых, последующий процесс разработки и роль приложения HeatSinkSim в достижении поставленных целей. Даже если вы, возможно, не занимаетесь разработкой радиаторов, предложенные методы организации рабочего процесса легко применимы к другой продукции или процессу.

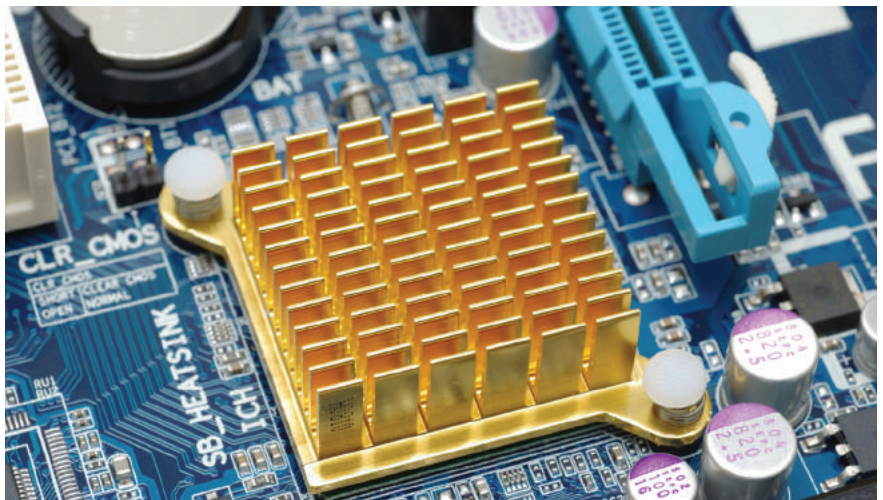


РИС. 1. Радиатор с вертикальными ребрами охлаждения, установленный на плату с электронными компонентами, управляющую важным непрерывным производственным процессом

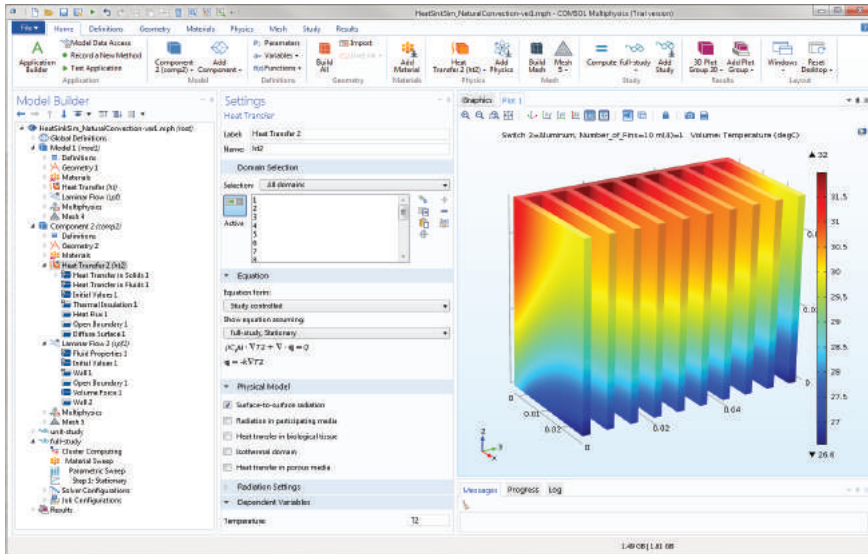


РИС. 2. Построитель моделей в окне COMSOL Desktop, посредством которого вы задаете геометрию, материалы и физические свойства модели. Затем происходит построение сетки, решение и обработка результатов.

Главной задачей в данном примере является своевременная поставка на рынок высококачественных продуктов и услуг за счет достижения надежной продолжительной работы электронных устройств, управляющих автоматизированными процессами производства практически любых потребительских товаров. Рост промышленного производства вместе с ростом эксплуатационных требований к электронным устройствам и их миниатюризации приводит к повышению их удельной мощности и рабочей температуры, что, в свою очередь, может стать причиной преждевременного выхода устройства из строя.

Для того, чтобы предотвратить снижение надежности систем управления производственными процессами из-за повышенных рабочих температур, необходимо оснащать их электронные компоненты системами охлаждения на основе пассивного рассеивания тепла и естественной конвекции. Поэтому электронные устройства, размещаемые на печатных платах, оснащаются радиаторами, как показано на рис. 1. Конструкция радиатора, представленного на рисунке, предусматривает использование множества ребер охлаждения для увеличения площади поверхности теплоотвода. На эксплуатационные характеристики радиатора для заданной приложенной мощности оказывают влияние количество и размер ребер охлаждения, расстояние между ними и теплопроводность материала, из которого они изготовлены. При оптимизации конструкции радиатора необхо-

димо учитывать большое количество параметров, чтобы обеспечить нагрев электронного устройства значительно ниже максимальной рабочей температуры. Каким же путем оптимизации пойти, принимая во внимание все задействованные параметры?

Хотя физическое прототипирование было и остается необходимым звеном в производственном цикле, которое обеспечивает высокое качество конечного продукта, виртуальное прототи-

пирование посредством мультифизического моделирования значительно снижает материальные и временные затраты, сокращая количество необходимых прототипов, и позволяет оценить рентабельность проекта на самом раннем этапе проектирования.

Используя программный пакет COMSOL Multiphysics®, компания AltaSim разработала и верифицировала мультифизическую модель радиатора, представленную на рис. 1 и служащую незаменимым инструментом при оптимизации конструкции. Получить представление о процессе построения модели можно, взглянув на рис. 2, на котором основные шаги представлены в виде последовательности узлов в окне построителя моделей.

С помощью встроенной в COMSOL Multiphysics Среды разработки приложений (см. рис. 3) компания AltaSim разработала специализированное приложение на основе проверенной модели радиатора. Приложение для моделирования HeatSinkSim представлено на рис. 4. С помощью Среды разработки приложений удалось создать простой интерфейс, позволяющий любому пользователю, даже если он не является специалистом в области моделирования, выполнять сложный инженерный анализ. Основными инструментами Среды разработки приложений являются Редактор форм и Редактор методов, позволяющие сразу добавлять объекты форм в пользовательский интерфейс приложения, а также специализированные функции

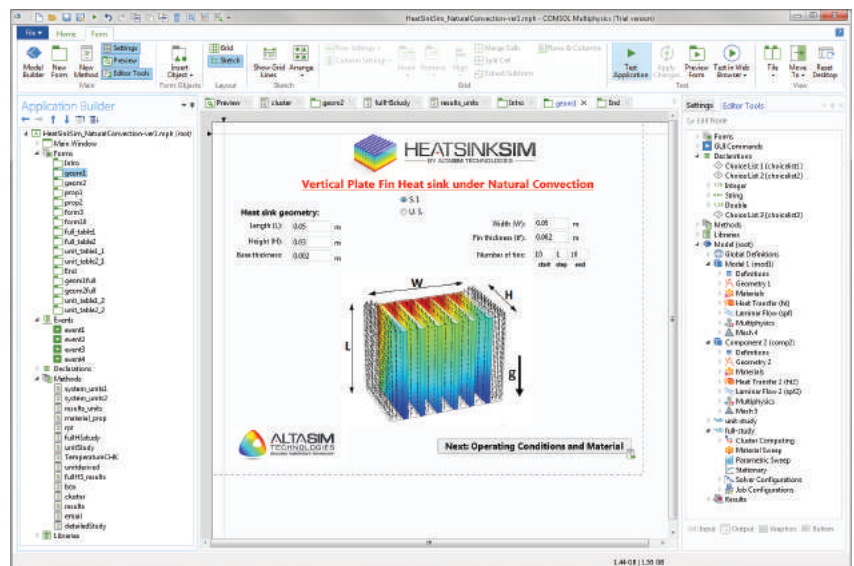


РИС. 3. Среда разработки приложений в окне COMSOL Desktop®, посредством которой вы создаете приложения для моделирования на основе собственных мультифизических моделей, используя Редактор форм и Редактор методов

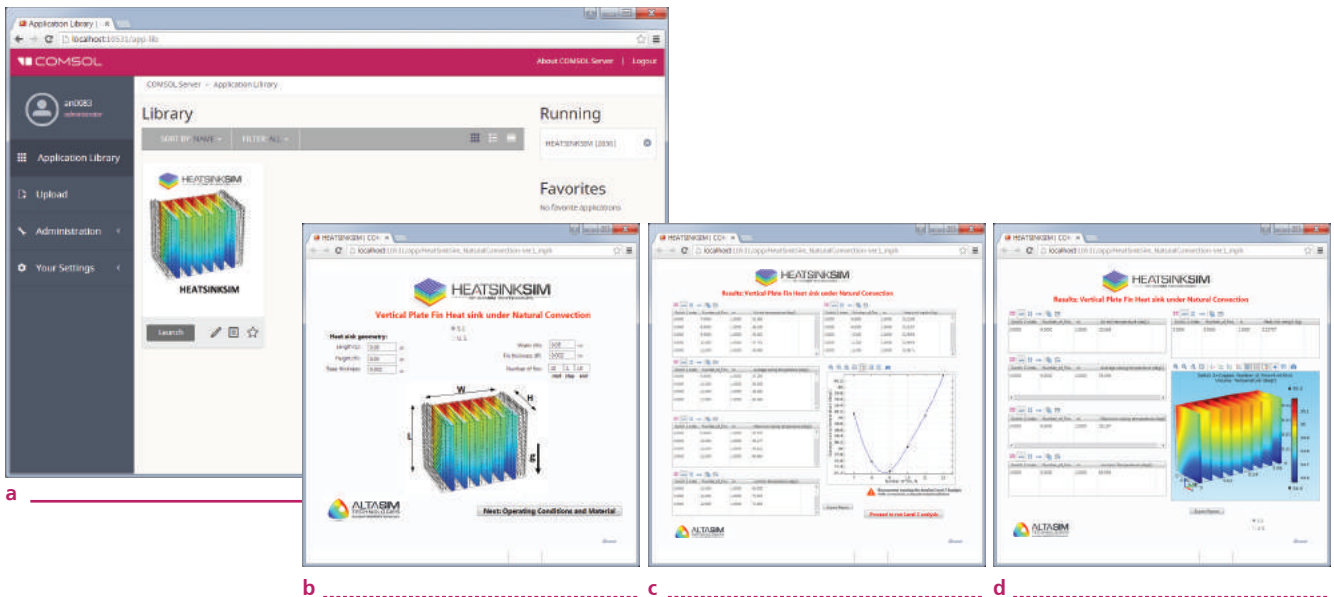


РИС. 4. Войдите в COMSOL Server™ с помощью браузера. После чего запустите HeatSinkSim с сервера COMSOL Server в отдельной вкладке или окне браузера (а). Посредством приложения для моделирования в (б) вы задаете геометрию, материалы и рабочие условия. Приложение позволяет выполнять анализ на двух уровнях. Результаты анализа уровня 1 (с) показывают, что необходим дальнейший анализ уровня 2 (d), который включает полное трехмерное исследование сопряженного теплообмена.

в виде методов Java®, выполняемые в ответ на действия пользователя.

Результаты работы приложения HeatSinkSim представлены на рис. 4, из которого видно, что пользователю доступны два различных уровня анализа. Анализ теплопередачи *на уровне 1* решает сопряженную задачу теплообмена и включает течение среды с теплопроводностью, конвекцией и излучением. Результаты анализа представлены в виде одномерных линейных графиков зависимости температуры от конструктивных параметров, таких как число ребер охлаждения радиатора. Анализ *на уровне 2* использует более подробную модель теплопередачи для получения более точного трехмерного решения, однако его выполнение занимает больше времени. В случае, если температура достигает заданного пользователем предела во время выполнения анализа уровня 1, программа HeatSinkSim предложит пользователю выполнить анализ уровня 2.

При планировании рабочего процесса на основе моделирования очень важно продумать внутреннюю логику — кто будет заниматься настройкой и валидацией исходной мультифизической модели, разработкой приложения для моделирования на ее основе, выполнять оценку и оптимизацию конструкции с помощью приложения. Возможность создать приложение на основе мультифизической модели делает рабочий процесс более гибким

и упрощает его планирование, так как с помощью приложения большее количество пользователей сможет моделировать свои конструкции.

«Если вы понимаете, что можете создать стабильное приложение для моделирования реалистичных ситуаций с реальными размерами и рабочими характеристиками, то самое время взглянуть на число потенциальных пользователей, которые смогут его применить, — говорит Кромптон. — В мире насчитывается порядка 80 миллионов инженеров и ученых, потенциальных пользователей приложений для расчета, при этом лишь 750 тысяч из них используют системы инженерного анализа (CAE) в настоящий момент».

Вместо того, чтобы выполнять анализ самостоятельно, что может стать узким местом рабочего процесса, ваши специалисты по моделированию могут воспользоваться соответствующими приложениями, чтобы больше времени уделять разработке новых инструментов, требующей их знаний и опыта. В случае если у вас в штате нет подобных специалистов и вы не собираетесь ими

обзаводиться, вы можете либо доверить создание модели и приложения сертифицированному консультанту COMSOL, такой компании как AltaSim, либо оплатить доступ к существующим приложениям для моделирования, одним из примеров которых является HeatSinkSim.

Используя в работе приложения для моделирования, вы и ваши коллеги сможете прогнозировать реальные эксплуатационные характеристики вашего продукта или процесса на основе очень точных мультифизических моделей. Вы сможете первым представить свой инновационный продукт на рынке за счет более глубокого понимания особенностей его работы и сокращения материальных и временных затрат на прототипирование.

Возвращаясь к оптимизации конструкции радиатора для микроэлектроники, следует отметить, что приложение HeatSinkSim предоставляет пользователю конкурентные преимущества, упрощая работу с инструментами моделирования. Это помогает обеспечить безопасную рабочую температуру и непрерывный производственный процесс.

“В мире насчитывается порядка 80 миллионов инженеров и ученых, потенциальных пользователей приложений для расчета, при этом лишь 750 тысяч из них используют средства автоматизированного проектирования (САПР) в настоящий момент”

⇒ РАСПРОСТРАНЕНИЕ И ПОЛУЧЕНИЕ ПРИБЫЛИ

Обеспечение средств доступа и запуска приложений для моделирования не менее важно, чем определение лиц, занятых его разработкой и использованием для достижения целей проектирования. После локальной установки программного пакета COMSOL Server™ ваши коллеги и клиенты смогут быстро обращаться к приложениям для моделирования посредством клиента COMSOL Client или браузера. На рис. 4а изображено окно браузера с открытой Библиотекой приложений для COMSOL Server, из которой можно запустить приложение HeatSinkSim. Для управления доступом к приложениям и функциям AltaSim использует панель инструментов.

COMSOL Server является программным продуктом, который можно запустить как на стандартном ноутбуке или настольном ПК, так и на самом современном суперкомпьютерном кластере. Важными факторами, которые следует принимать во внимание при выборе аппаратного обеспечения для конкретных потребностей пользователя, являются стоимость, доступность, сложность модели и желаемое время решения. Если вы хотите получить результат как

можно скорее и вместе с тем не готовы брать на себя ответственность по управлению аппаратной частью или обеспечению безопасности, услуги оснащенного суперкомпьютером вычислительного центра могут оказаться привлекательным вариантом.

Для обеспечения доступа к приложению HeatSinkSim компания AltaSim объединила усилия с компанией AweSim, предоставляющей малым и средним производителям возможность использовать в процессе разработки средства моделирования для улучшения конкурентной среды. Компания AweSim располагает ресурсами суперкомпьютерного центра штата Огайо (OSC) с тремя основными системами. Приложение HeatSinkSim выполняется на узле кластера Oakley, представляющего собой компьютер HP на базе процессоров Intel® Xeon®, располагающий более чем 8300 ядрами для параллельных вычислений. Отправив в AweSim заявку на работу с приложением HeatSinkSim, вы получите учетную запись OSC для удаленного входа с помощью установленного на вашем компьютере браузера и запуска приложения на суперкомпьютерном кластере.

Подход AweSim заключается в предоставлении пользователям пробного бесплатного доступа к HeatSinkSim с по-

следующей платой за использованные функции или машинное время. Разрабатывая приложения для моделирования, вы не только расширяете доступ к средствам точного мультифизического моделирования, но и получаете новый источник доходов для организации, предоставляя к ним платный доступ.

⇒ УЛУЧШЕННЫЙ И ГИБКИЙ ПРОЦЕСС РАЗРАБОТКИ ПРОДУКТА

Приложение HeatSinkSim от компании AltaSim является не только примером решения, соответствующего вашим задачам, но и представляет собой отдельный продукт, разработанный и проверенный опытными специалистами в области моделирования. Использование средств мультифизического моделирования, разработки и распространения приложений из состава COMSOL Multiphysics и COMSOL Server в процессе проектирования продукта позволит предоставить каждому возможности для самостоятельного моделирования, сделав таким образом рабочий процесс более гибким, что поможет улучшить качество конечного продукта, снизить риски и затраты, вывести наилучший возможный продукт на рынок в кратчайшие сроки. ❖

Краткие выводы

HEATSINKSIM: ЧТО СКРЫВАЕТСЯ ЗА ИНТЕРФЕЙСОМ

Чтобы обеспечить проектировщиков теплотехники точными инструментами, компания AltaSim Technologies разрабатывает вычислительные приложения на основе подробных физических моделей. Приложения обладают собственным интерфейсом, позволяющим пользователям выполнять мультифизический анализ путем изменения, например, параметров конструкции или рабочих условий. Приложение HeatSinkSim исследует влияние конструкции радиатора на рассеивание тепла в силовых электронных компонентах, позволяя сэкономить месяцы, которые могут уйти на исправление ошибок в процессе дальнейшей разработки.

Компания AltaSim предоставляет доступ к приложению как на собственных рабочих станциях и кластерах, так и посредством защищенного соединения с имеющимися ресурсами для параллельных вычислений. Отдельные пользователи также имеют возможность дальнейшей индивидуальной настройки.

Преимущества виртуального прототипирования на основе приложений

- Комплексный подход для всей компании
- Экспертные знания в области математического моделирования, доступные конструкторам и инженерам
- Решения принимаются на основе предсказуемого физического анализа
- Экономичность

Управление приложениями, их установка и использование

- Пользователи с правами администратора могут устанавливать, распространять и управлять приложениями с помощью COMSOL Server™
- Пользователи подключаются к COMSOL Server для доступа к приложениям и выполнения мультифизического анализа в браузере или клиенте COMSOL Client
- Приложения позволяют выполнять кластерные вычисления
- Доступ из любой точки мира в режиме 24/7



Джефф Кропфтон, директор и сооснователь компании AltaSim Technologies

Совокупный опыт коллектива компании AltaSim в области разработки и применения средств мультифизического вычислительного анализа и моделирования составляет более 100 лет. В качестве одного из основателей программы сертифицированных консультантов COMSOL (COMSOL Certified Consultants) компания AltaSim сочетает свой опыт в использовании программного пакета COMSOL Multiphysics® и расширении его функциональности с фундаментальными знаниями в области физики, механики, вычислительных методов и реальных производственных процессов.

Совершенствование стандартов перекрытия газопроводов обжатием с помощью численного моделирования

Чтобы упростить решение задач по ежедневному обслуживанию газопроводов, Институт технологии газа (GTI) разрабатывает методы разработки на основе моделирования, которые позволят пересмотреть требования стандартов ASTM по перекрытию трубопроводов обжатием.

БРИАННА КОСТА (BRIANNE COSTA)

Плановые работы по техническому обслуживанию линий природного газа часто требуют выполнения земляных работ на главных дорогах, заставляя водителей выбирать сложные объезды и грунтовые дороги. Но что, если бы процесс ремонта и замены газовых трубопроводов был бы более эффективным и менее деструктивным? Институт технологии газа (GTI), ведущая организация по исследованиям, разработкам и обучению в области технологий природного газа, намерен провести исследование промышленных стандартов обжатия газопроводных труб с целью обеспечения лучшего доступа к трубам.

⇒ КАК БЛИЗКО МОЖНО ПЕРЕКРЫТЬ ТРУБОПРОВОД МЕТОДОМ ОБЖАТИЯ?

Научно-исследовательский институт технологии газа в штате Иллинойс занимается разработками новых технологий в сфере энергетики и природного газа. Одним из направлений деятельности института является изучение расстояний для перекрытия обжатием гибких газопроводов из полиэтилена (ПЭ). Перекрытие гибких трубопроводов обжатием — это, на первый взгляд, простая процедура, которая заключается в сжатии трубы таким образом, чтобы полностью остановить поток газа (см. Рис. 1). Обычно это делается в целях технического обслуживания и замены секций трубы без отключения всей системы.

После снятия перекрытия трубопровода, труба восстанавливает большую часть своей исходной формы, обеспечивая возобновление потока газа. Полиэтилен в качестве трубного материала обладает естественными преимуществами: гибкость и способность подвергаться сильным деформациям; отсутствие коррозии; плавкость и однородная структура; устойчивость в суровых природных условиях.

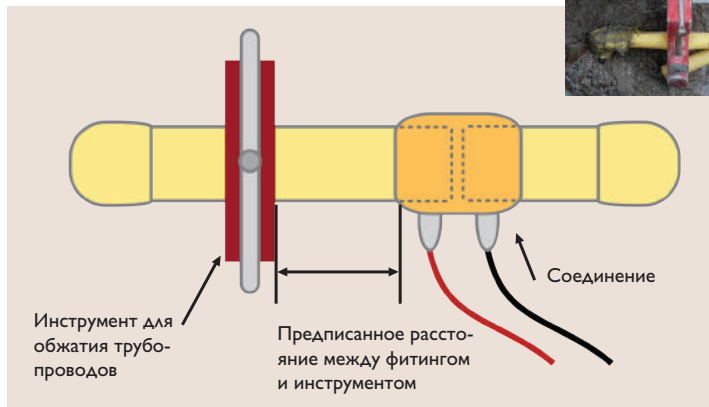


РИС. 1. Труба из полиэтилена изолируется методом обжатия.

Стандарты, опубликованные Американским обществом по испытанию материалов (ASTM), позволяют избежать повреждения и неисправной работы. Они должны соблюдаться в ходе перекрытия трубопроводов методом обжатия. В частности, один из стандартов определяет расположение перекрытия по отношению к трубной арматуре. В соответствии с требованиями стандарта, обжатие должно быть

“[Мы] доверяем реализации метода конечных элементов в программном обеспечении COMSOL, поскольку предыдущие испытания подтверждают, что он позволяет получить достоверные результаты”

— ОРЕН ЛЕВЕР, ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР ОТДЕЛА РАЗРАБОТКИ И ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ИНСТИТУТА ТЕХНОЛОГИИ ГАЗА

на наибольшем из следующих двух расстояний: три диаметра трубы или двенадцать дюймов (30,5 см) от следующего трубного фитинга.

Данное правило было установлено во избежание напряжения и разрывов в трубах. Тем не менее, многие компании газоснабжения общего пользо-

вания заинтересованы в сокращении минимального требуемого расстояния. Требование по расстоянию в двенадцать дюймов — слишком высокое для большинства трубопроводов (большая часть труб, используемых в коммунальных и промышленных целях, имеет диаметр 2,375 дюймов или меньше). Это означает, что хотя расстояние равно трем диаметрам составляет семь дюймов, обжатие все равно тре-

буется выполнять на большем расстоянии — двенадцать дюймов. Использование более длинных расстояний обжатия для трубных секций малого диаметра ведет

не только к увеличению объемов земляных работ, но и к необходимости обустройства большего количества объездных дорог, что потребует больших временных и денежных затрат.

Необходимость соблюдения расстояния двенадцать дюймов для труб малого диаметра была изучена специали-

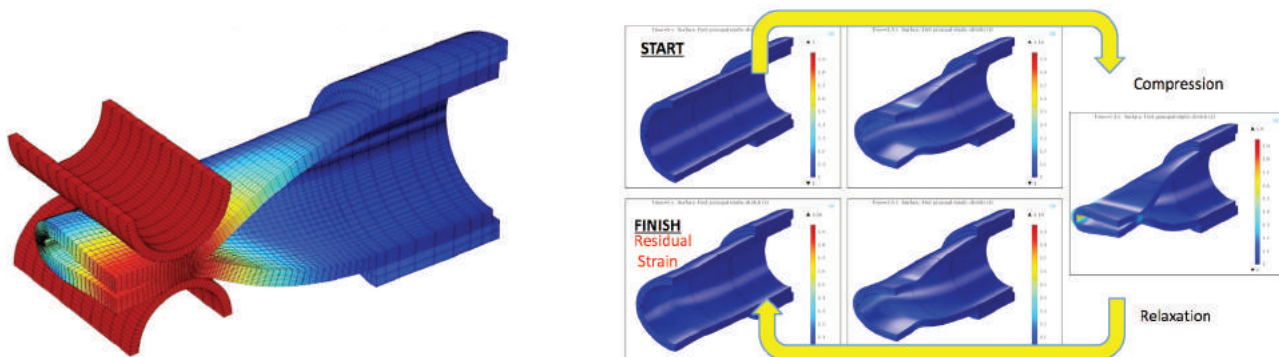


РИС. 2. Модель, на примере которой показано общее смещение (мм) места обжатия трубы (слева) и полное моделирование процесса перекрытия трубопровода обжатием (справа).

стами GTI Оренбург Левером и Эрнестом Левером при финансовой поддержке компании Operations Technology Development (OTD), основанной газораспределительными компаниями в целях развития технологий распределения природного газа. Цель данного исследования заключалась в том, чтобы определить, насколько близко можно изолировать трубу методом обжатия по отношению к сплавному стыку, чтобы не превышать допустимый уровень натяжения и коэффициент концентрации напряжений. Чтобы получить ответы, специалисты использовали возможности моделирования механики конструкций при помощи программного пакета COMSOL Multiphysics®.

⇒ РАСЧЕТ НАПРЯЖЕНИЯ И ДЕФОРМАЦИИ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБ

Специалисты GTI разработали полностью параметризованную, нестационарную модель с помощью модуля механики конструкций и модуля нелинейных конструкционных материалов программного обеспечения COMSOL. По словам Орена Левера (GTI), они «доверяют методу конечных элементов, реализованному в программном обеспечении COMSOL®, поскольку предыдущие испытания подтверждают, что он дает достоверные результаты». Они определили механические и количественные характеристики двух наборов контактов для моделирования внутренней точки контакта трубы с трубой и наружной точки контакта трубы с механизмом обжатия, соответственно.

Были использованы возможности программного обеспечения COMSOL для построения гибридной сетки путем объединения структурированной и неструктурированной сеток. Такой подход вместе со специально разработанной

структурной моделью, реализованной при помощи программного обеспечения, позволил им тщательно проанализировать пластические деформации в трубе. В процессе моделирования учитывались стадии изоляции трубопровода обжатием, показанные на рис. 2: создание давления в трубе, обжатие, фиксация, сброс давления и разжатие.

Особое внимание уделялось построению сетки трубы под обжимными прутьями, чтобы модель позволяла анализировать очень сильные деформации, связанные с полным обжатием трубы (см. рис. 3). Благодаря возможностям построения параметрической сетки в программном обеспечении COMSOL, ее оказалось очень легко применить к трубам разного размера и диаметра. Несмотря на то, что напряжения и деформации на этом участке не являлись целью данного проекта, они представляют интерес исходя из общего влияния обжатия на срок службы трубы. Модель, созданная в COMSOL, позволит специалистам GTI провести дальнейшее исследование перекрытия труб обжатием.

⇒ ПРИМЕНЕНИЕ СИЛЬНО НЕЛИНЕЙНЫХ МАТЕРИАЛОВ ТРЕБУЕТ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ

Чтобы использовать уникальные свойства полиэтилена, GTI потребовалась специальная модель на основе вязкоупругого пластика. С этой целью они обратились в компанию Veryst Engineering, сертифицированного консультанта компании COMSOL, за помощью в реализации модели выбранного материала в COMSOL Multiphysics. Для этого, как объяснил Наги Элаббаси (Nagi Elabbasi) из компании Veryst, они сначала определили параметры модели термоупругой среды, используемой

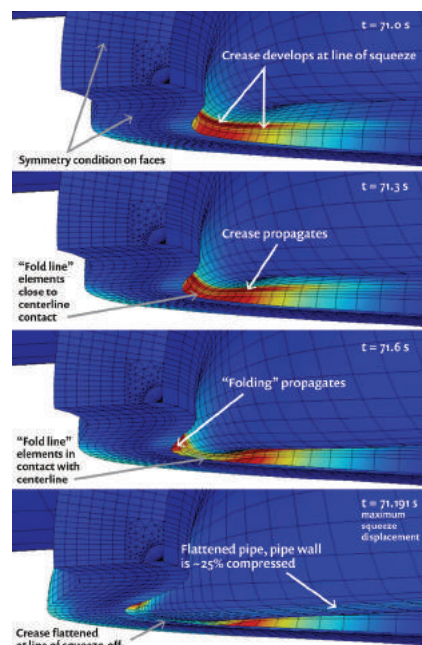


РИС. 3. Деформация на линии обжатия на разных этапах времени, непосредственно перед обжатием и при максимальном смещении при обжатии.

обычно для описания свойств термопластических материалов, например полиэтилена, затем согласовали параметры материала с профилем напряжения/деформации ПЭ и, наконец, создали в COMSOL систему обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ), необходимых для специально разработанной модели материала.

Испытания материала были проведены GTI на полиэтилене средней плотности в качестве трубного материала и включали испытания на растяжение и сжатие при разных температурах, интенсивности деформации и на деформации, особенно сильные деформации, а также испытания на загрузку/разгрузку (см. рис. 4). Специалисты компании Veryst получили фактические значения параметров

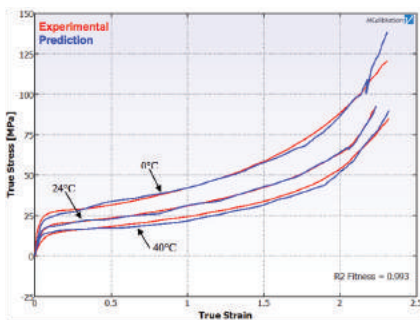
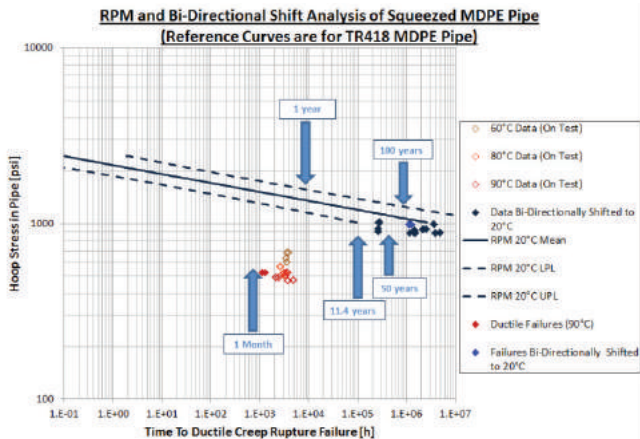


РИС. 4. Пример реакции ПЭ на растяжение и модель, подобранная компанией Veryst Engineering (внизу), а также ускоренные испытания на эксплуатационную долговечность обжатия ПЭ труб, выполненные Институтом технологии газа (вверху).

материала, которые соответствовали экспериментальным данным. Для калибровки специалисты компании Veryst использовали инструмент оптимизации MCalibration. С его помощью параметры варьировались вплоть до оптимального совпадения с экспериментальными данными. При реализации и проверки закономерностей выбранного материала в COMSOL Multiphysics компания Veryst полагалась на гибкость программного обеспечения, добавив систему обыкновенных дифференциальных уравнений, представляющую дополнительные состояния для описания специально разработанной структурной модели.

Еще одна возможность, полезная в тех случаях, когда модель материала нельзя описать с помощью уравнений, — это использование расширения External Material (Внешний материал) для доступа к функциям, написанным на ФОРТРАНе или языке С и скомпилированным в общую библиотеку. В этом случае свойства внешнего материала можно задать, определив соотношение между напряжением и деформацией, добавляя учет

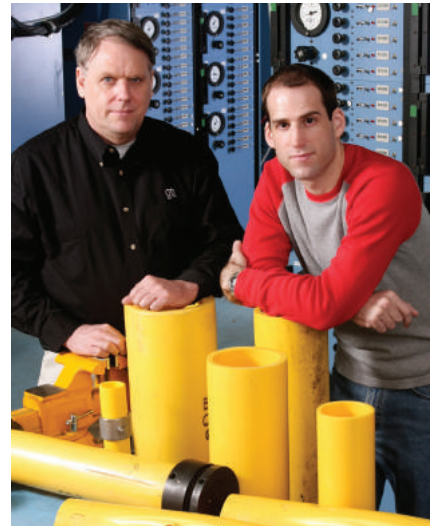
неэластичной деформации в используемую модель материала, или подключившись непосредственно к коммерческой библиотеке внешних материалов, такой как библиотека PolyUMod® от компании Veryst Engineering.

С помощью моделирования специалисты GTI определили, что при использовании труб малого диаметра (менее 3,5") более близкое расстояние обжатия, равное трем диаметрам трубы, не вызывает деформаций, которые превышают допустимые пределы напряжений.

Для проверки данных результатов было использовано ускоренное испытание на эксплуатационную долговечность (показано на рис. 4). Обжатие было испытано на расстоянии два и четыре дюйма от сплавленного соединения при температурах достаточно высоких, чтобы ускорить скорость ползучести полиэтилена по сравнению с нормальным режимом эксплуатации. Благодаря такому испытанию специалисты GTI обнаружили, что срок службы труб составит 80 лет при средней температуре эксплуатации 20°C. Это соответствует нормативному сроку службы для газовых труб из полиэтилена средней плотности, равному 80 годам.

⇒ ЭФФЕКТИВНОСТЬ — КЛЮЧ БУДУЩИХ ПЛАНОВ В GTI

По результатам моделирования специалисты GTI обнаружили, что обжатие на трубах малого диаметра может располагаться ближе к фитингам, чем текущее минимальное расстояние, регламентируемое стандартом ASTM. Это подтверждает мнение о том, что действующее в настоящее время требование по минимальному расстоянию в двенадцать дюймов можно пересмотреть для труб малого диаметра, которые наиболее часто используются в коммунальных и коммерческих



Эрнест Левер, Директор по НИОКР (слева) и Орен Левер, Главный инженер (справа) в компании GTI.

сетях газоснабжения. Благодаря проведенным исследованиям GTI может принять участие в определении новых нормативов, которые сделают процесс текущего технического обслуживания газопроводов менее дорогим, более эффективным и менее деструктивным.

Что касается будущих исследований, по словам Левера, они планируют расширить структурную модель, включив в нее температуру и ползучесть, чтобы более точно определить эффекты, возникающие при разжатии. Цель состоит в том, чтобы проанализировать распространение повреждений и причины дефектов, а также спрогнозировать реакцию труб в разных условиях нагружения, например, после установки усиливающих хомутов.

GTI также планирует предоставить полученные результаты инженерам, в том числе и тем, которые не специализируются на численном моделировании. Благодаря COMSOL у них есть доступ к Среде разработки приложений — инструменту, который позволяет специалистам по моделированию, таким как Левер, работать с моделью COMSOL через настраиваемый и удобный для пользователя интерфейс. Это означает, что инженеры на местах и обслуживающий персонал не должны пересматривать свой выбор, особенно в нестандартных рабочих условиях. При этом специалисты по моделированию могут сэкономить время и сфокусироваться на новом проекте. В настоящее время компания GTI продолжает научно-исследовательскую работу и разработку инновационных решений в сфере природного газа и энергетики. ❖

ЛИКВИДАЦИЯ РАЗЛИВОВ НЕФТИ С ПОМОЩЬЮ ГИДРОФОБНЫХ СЕТОК

Поскольку используемые в настоящее время методы очистки и локализации разливов нефти часто являются дорогостоящими, а их эффективность ограничена, инженеры компании Amphos 21 разработали приложение для численного моделирования испытаний новых технологий очистки с помощью гидрофобных сеток.

ЛЕКСИ КАРВЕР (LEXI CARVER)

Разливы нефти печально известны тем, что происходят внезапно и неожиданно, наносят огромный вред водной среде, морской флоре и фауне и должны быть быстро локализованы, прежде чем станут причиной длительного бедствия. Существуют способы локализации и сбора разливов нефти с использованием боновых заграждений и специальных судов, собирающих нефть с поверхности моря, но это редко позволяет решить проблему полностью.

Боновые заграждения используются для сдерживания распространения нефти, а также для защиты от нее уязвимых прибрежных зон. Некоторые виды боновых заграждений могут абсорбировать нефть, обеспечивая таким образом ее удаление, для чего также используются технологии сбора нефти. В других случаях нефть с поверхности воды выжигается управляемым горением, хотя при этом и образуется другое загрязняющее вещество, или в воду добавляются химические диспергаторы для ускорения разложения компонентов нефти.

Данные методы, при всей их пользе, не в состоянии собрать большое количество нефти в ходе очистки и эффективны только при условии очень быстрого применения на месте аварии. Большое количество нефти оседает на морском дне. Например, в ходе ликвидации утечки из танкера «Эксон Вальдез» в 1989 г. у берегов Аляски большую часть нефти собрать не удалось.

То, что собирается, часто представляет собой водно-нефтяную смесь, использовать которую можно лишь частично. Это означает, что, помимо очевидного экологического ущерба,

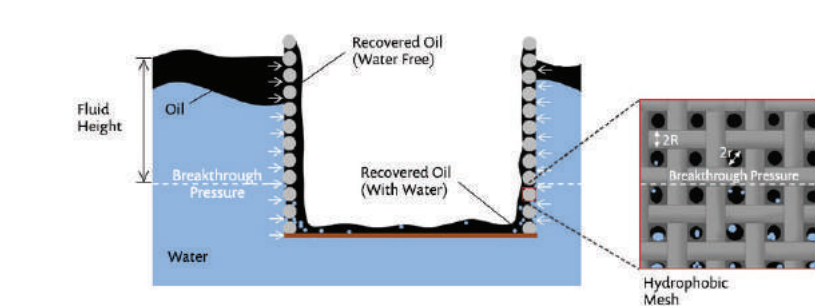


РИС. 1. Принцип действия гидрофобной сетки

потери нефти ведут к еще большему увеличению добычи после попыток очистки, чтобы получить первоначальное ее количество.

В ответ на потребность в методах очистки, предотвращающих экологическое бедствие и потери нефти, Amphos 21, консалтинговая группа, специализирующаяся на технологиях защиты окружающей среды, разработала численные модели гидрофобных сеток — концепцию сбора разлитой нефти, которую исследуют ученые и технологи. Какова же их цель? Решение этой проблемы, которое будет быстрым, простым в использовании и экологически безопасным.

После создания концепции гидрофобной сетки как пористой среды было выполнено компьютерное моделирование и разработаны специализированные приложения для распространения среди людей, вовлеченных в создание продукции, ликвидацию последствий аварий и работу в экологических организациях. С помощью приложений для модели-

рования предполагается предоставить возможность проведения виртуальных испытаний для инженеров, исследователей и групп по очистке с целью поиска подходящего варианта реагирования на конкретный сценарий разлива нефти для наиболее быстрого предотвращения его разрушительных последствий.

⇒ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НОВОГО МЕТОДА СБОРА НЕФТИ

Сетки, которые исследуются в компании Amphos 21, обычно выполнены из стали или меди и покрыты гидрофобным полимером для отталкивания воды и сбора нефти. Они действуют как фильтры — вода остается с одной стороны, а нефть проходит сквозь сетку (см. рис. 1). Интенсивность прохождения нефти через отверстия сетки зависит от глубины воды, характеристик нефти (которые могут отличаться в зависимости от того, где она добывалась), а также покрытия металла.

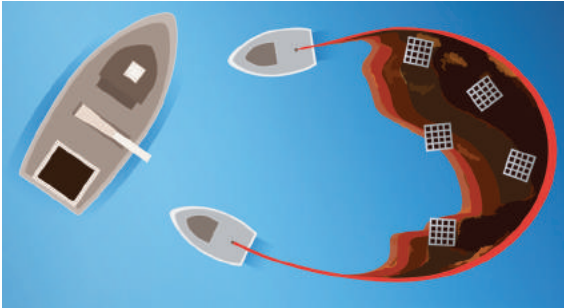


РИС. 2. Концепция: боновое заграждение, буксируемое лодками, окружает нефть, которая собирается гидрофобными сетками.

«Помимо того, что такая технология эффективна для отделения нефти от воды, она также дает возможность дальнейшего использования разлитой нефти без ее переработки, которая часто является еще одним затратным этапом процесса очистки, — говорит Эмили Коэн (Emilie Coene), консультант компании Amphos 21. — Такие сетки могут использоваться непрерывно, оставаясь очень чистыми, и теоретически обеспечивают хорошую эффективность и производительность сбора нефти».

Гидрофобные сетки гипотетически могли бы использоваться вместе с оборудованием, разработанным для ограничения распространения разлитой нефти. Так, при окружении разлива боновым заграждением, сетки и сборные емкости могут сбрасываться непосредственно на нефтяную пленку для ее сбора (см. рис. 2). Собранную нефть затем можно периодически откачивать из емкости, чтобы обеспечить требуемый перепад давления между двумя сторонами сетки.

«Представьте себе большую цилиндрическую емкость (сетку), которую можно оставить в океане до тех пор, пока она не наполнится нефтью, после чего опорожнить», — добавляет Орландо Силва (Orlando Silva), старший консультант и руководитель проекта. «Емкость также может быть постоянно

подключена к насосу для непрерывной откачки нефти по мере ее накопления. Кроме того, сетки можно адаптировать к различным рабочим условиям, — продолжает он. — Мы надеемся, что сможем предложить решения для инженеров научно-исследовательских отделов, которые разрабатывают очистное оборудование, природоохранных компаний, проводящих исследования, а также для нефтяных

компаний, которым требуется решать задачи по очень быстрой локализации обширной проблемы».

При использовании метода сбора с помощью гидрофобных сеток возникает одна проблема — высота столба жидкости. На определенной глубине воды гидростатическое давление достигает уровня «прорыва», что приводит к проникновению воды в сетку и сборную емкость. Если достаточное количество воды смешается с собранной нефтью, то потребуются ее очистка и переработка для дальнейшего использования.

Удерживающая способность сетки зависит от поверхностного натяжения на границе «нефть-воздух» и «вода-воздух», а также углов контакта нефти и воды с поверхностью сетки. Покрывание сетки обеспечивает ее гидрофобность, но на определенных глубинах она исчезает. Поток нефти и воды через сетку зависит от свойств жидкости, таких как вязкость, плотность и поверхностное натяжение, которые различаются у разных типов нефти, а также от пористости и проницаемости сетки.

Учитывая этот факт, каким образом команде Amphos 21 удалось разработать сетку для различных уровней воды и типов нефти? Могут ли различные гидрофобные покрытия работать на разных глубинах океана?

Ответом является поиск наилучшей комбинации свойств сетки для разных условий разлива нефти. Команда создает численные модели, которые помогают им разработать наилучшие решения, обеспечивающие сбор максимального количества нефти.

⇒ КАК КОНСТРУКЦИЯ СЕТКИ ВЛИЯЕТ НА ПРОТЕКАНИЕ НЕФТИ ЧЕРЕЗ НЕЕ?

Поиск неизвестного пока решения проблемы иногда может выглядеть, как поиск иголки в стоге сена, даже при наличии общего представления об отправной точке для поиска. Однако, технологии математического моделирования существенно упрощают процесс.

Коэн, Силва и Джордж Молинеро (Jorge Molinero), партнер и директор по моделированию в компании Amphos 21, использовали программный пакет COMSOL Multiphysics® для моделирования гидрофобных сеток, чтобы проанализировать, как различные конструкции сеток будут себя вести на разной глубине воды, а также чтобы оценить их рабочие характеристики.

Результативность сетки оценивается по интенсивности сбора нефти и чистоте собранной нефти. Поэтому работа команды по моделированию включала также тестирование свойств различных типов полимерных покрытий и работы сетки на разных глубинах, а также анализ скорости протекания различных типов нефти.

Чтобы проанализировать влияние различных геометрических параметров на протекание нефти, они также параметризовали радиус проволоки сетки, размер отверстий и расстояние между ними. В программном пакете COMSOL® сетка была представлена как пористая среда в сочетании с двухфазным потоком, который моделировал прохождение через нее воды и нефти. Исходя из этого, Коэн, Молинеро и Силва смогли рассчитать уровень

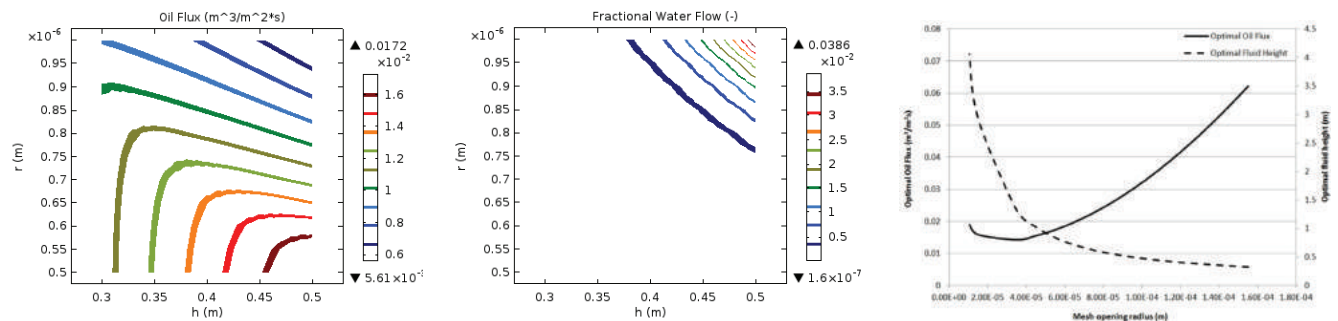


РИС. 3. Результаты работы программного пакета COMSOL®, показывающие, как интенсивность потока нефти (слева) и удельный поток водной фазы (в центре) зависят от радиуса проволоки и глубины воды. Анализ пор, показывающий соотношение между высотой столба жидкости, радиусом пор и интенсивностью потока нефти (справа).

насыщения нефтью, интенсивности потока нефти и воды и долю воды, смешанной с нефтью, которая проходит через сетку (см. рис. 3, слева и в центре). «Эти результаты особенно полезны при выборе радиуса пор в ходе разработки сетки для использования на определенных глубинах», — поясняет Молинеро.

После исследования корреляции между оптимальной интенсивностью потока нефти и оптимальной высотой столба жидкости они также использовали свою модель для проведения анализа пор (см. рис. 3, справа), исходя из заданной максимальной доли воды — количества воды, допустимого в составе смеси без необходимости дальнейшей переработки нефти.

«Для различных размеров отверстий сетки результаты моделирования определили интенсивность потока нефти и максимальную высоту столба жидкости для требуемого уровня чистоты нефти, — продолжает Коэн. — Например, представим, что я хочу использовать сетку на глубине, как минимум, полметра, и чтобы доля воды в смеси составляла не более 1%. Это определяет, какой радиус отверстий требуется для моей сетки».

⇒ ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРЕДОСТАВЛЯЮТ ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Одна из функций программного пакета COMSOL дает возможность легко распространять результаты моделирования среди других участников, не предоставляя им всю модель. «Мы использовали Среду разработки приложений, имеющуюся в COMSOL Multiphysics, для создания специального пользовательского интерфейса для нашей модели». — поясняет Силва. «Приложения для моделирования дают

“С помощью модели COMSOL и специализированного приложения, разработанного на ее основе, мы добились прогресса в разработке нового способа ликвидации разливов нефти”

– ДЖОРДЖ МОЛИНЕРО, ПАРТНЕР И ДИРЕКТОР ПО МОДЕЛИРОВАНИЮ, КОМПАНИЯ AMPHOS 21

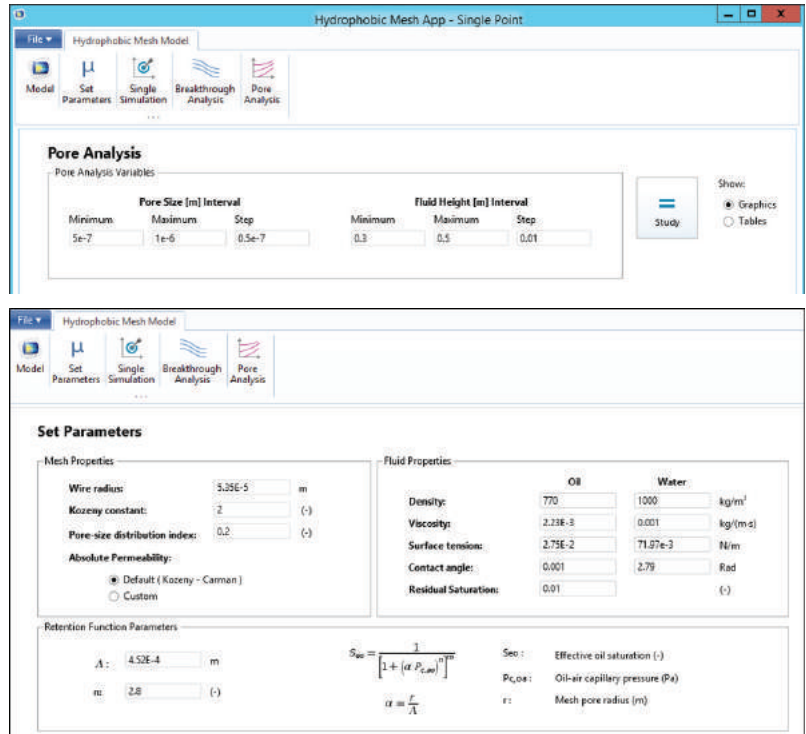


РИС. 4. Фрагмент снимка экрана приложения Amphos 21 для гидрофобных сеток, показывающий исходные данные для анализа пор (вверху) и свойства сетки и жидкости (внизу).

возможность публиковать результаты моделирования для пользователей, не предоставляя им полный доступ к модели. Компании могут использовать эти приложения для уменьшения числа экспериментов, экономии средств на испытаниях, а также смогут моделировать небольшую секцию сетки и масштабировать ее для разработки той технологии, которая им требуется. Это весьма перспективная разработка в проектировании гидрофобных сеток».

Приложение Amphos 21 (см. рис. 4) позволяет пользователю спрогнозировать эксплуатационные характеристики сетки и быстро проверить качество разработки в разных рабочих условиях, изменяя характеристики сетки и жидкости. Не более 30 секунд потребуется для проведения анализа по диапазону размеров пор и глубин воды, чтобы выбрать наиболее подходящую сетку для определенной глубины, исходя из выбранной максимальной доли воды.

Приложение также рассчитывает различные характеристики сеток, такие как абсолютная проницаемость и прочие параметры, имеющие отношение к давлению прорыва, помогая конструкторам выбрать идеальный вариант, удовлетворяющий потребности в разных обстоятельствах.

«Мы считаем, что это вызовет большой интерес со стороны научно-иссле-

довательских отделов, групп по охране окружающей среды, а также других организаций, занимающихся решением данной проблемы, — говорит Молинеро. — С помощью модели COMSOL и специализированного приложения, разработанного на ее основе, мы добились прогресса в создании нового способа ликвидации разливов нефти».

В дальнейшем команда планирует распространять свое приложение среди инженеров, которые смогут использовать модель гидрофобной сетки в больших масштабах, чтобы создавать идеальные сетки для конкретных ситуаций и, в конечном итоге, использовать новые полезные инструменты в реальном времени. ♦



Команда Amphos 21 работает со своим приложением для моделирования. Слева направо: Орландо Силва, Эмили Коэн, Джордж Молинеро.

Шум среди ясного неба: приложения COMSOL помогают определить воздействие вибраций на здания

Норвежские ученые пытаются выяснить, как низкочастотные звуковые волны распространяются внутри зданий, и определить, какие улучшения необходимо внести в их конструкцию для уменьшения раздражающих вибраций.

ДЖЕНИФЕР ХЕНД (JENNIFER HAND)

Каждому, кому доводилось проводить ночь вблизи аэропорта, знакомо это ощущение — пробуждение во время взлета или посадки раннего утреннего рейса, и не только от шума двигателей, но и от того, что все вокруг, кажется, трясется. Люди, живущие вблизи ветрогенераторов, военных объектов и госпиталей с вертолетными площадками, высказывают похожие жалобы: при возникновении шума снаружи оконные стекла начинают дребезжать, а повседневные предметы — гудеть. Более загадочным для них является то, что раздражающие вибрации могут быть ощутимы даже тогда, когда никакие звуки поблизости не слышны.

В случае, если частота звуковых колебаний составляет 20 колебаний в секунду (20 Гц) или менее, подобный звук называется инфразвуком — и он, как правило, не воспринимается человеческим ухом. Однако его воздействие легко заметить. Когда такие волны ударяются в оконное стекло, распространяются по полу и воздействуют на внутренние стены, они вызывают заметную вибрацию внутри помещения. Низкочастотные звуковые волны известны тем, что часто вызывают раздражение и беспокойство.

⇒ НИЗКОЧАСТОТНЫЕ ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ В ЗДАНИЯХ

Шум уже стал частью современной жизни. Для определения уровней восприятия, проникновения звука и опасности высокочастотных звуковых волн для человека применяются стандарты, основанные на измерении уровня звукового давления. Финн Лёвхольт (Finn Løvholt) из Норвежского геотехнического института (NGI) считает, что возникновение в зданиях вибраций под воздействием инфразвука до сих пор исследовано недостаточно подробно. Именно поэтому в течение нескольких лет сотрудники NGI, международного исследовательского и консультационного центра в области наук о Земле, проводили исследования по заказу Агентства по управлению недвижимостью Министерства обороны Норвегии.

«Низкочастотные звуковые волны меньше поглощаются

« Нам никогда еще не удавалось добиться такого уровня соответствия результатам натуральных испытаний. Это стало возможным благодаря моделированию различных структурных компонентов с помощью средств COMSOL Multiphysics. »

— ФИНН ЛЁВХОЛЬТ, NGI

воздушной средой, чем высокочастотные, поэтому они могут распространяться на большие расстояния. Соответственно возрастает и мощность звуковых волн, попадающих внутрь зданий. Нам интересно узнать, что же происходит на границе слышимости», — поясняет Лёвхольт. «Мы хотим выяснить, как звук от внешнего источника взаимодействует со зданием и создает воспринимаемые людьми вибрации. После этого мы сможем рекомендовать контрмеры, направленные на предотвращение вибрации, а также предложить стандарт для измерения и учета «коэффициента раздражающего воздействия».

⇒ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКОВЫХ ВОЛН

Совместно с коллегами Лёвхольт решил создать компьютерную модель, которая позволила бы отдельно изучить механизм столкновения низкочастотных звуковых волн со зданием и их дальнейшего проникновения. Для моделирования деревянной постройки из двух разделенных стеной комнат (вверху на рис. 1), практически повторяющей лабораторный экспериментальный стенд, они использовали программный пакет COMSOL Multiphysics®. В одну из комнат внутри модели был помещен громкоговоритель, во вторую — микрофон. Для наблюдения за уровнем звукового давления и вибрациями в модели было установлено несколько датчиков. Было тщательно выполнено моделирование всех элементов

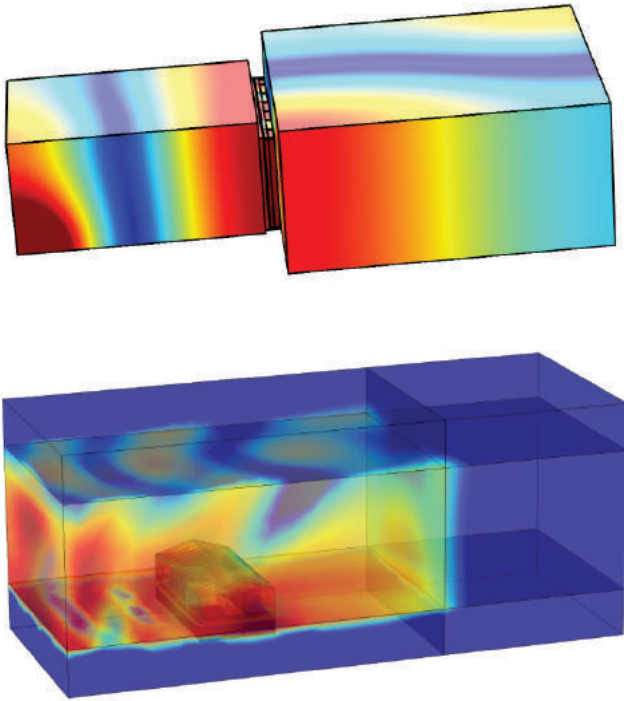


РИС. 1. Вверху: Результат моделирования звукового давления внутри лаборатории с двумя разделенными стеной помещениями. Громкоговоритель размещен в помещении слева. Модель показывает, что акустические резонансы внутри каждой комнаты влияют на характеристики звукоизоляции. Внизу: Результат моделирования низкочастотного звука с источником извне, вокруг и внутри здания. В обоих случаях цвет обозначает перепады звукового давления внутри комнат и пустот в стенах.

конструкции, включая стальной каркас, воздушную полость и стойки в стене, окна, листы фанеры и гипсокартона. «Резонансные характеристики каждого элемента зависят от длины звуковой волны и распределения давления. Например, зона высокого давления располагается в комнате с громкоговорителем, а зона низкого давления — в комнате с микрофоном. Таким образом, резонансные характеристики стены будут зависеть от ее длины, толщины и жесткости», — объясняет Лёвхольт.

Также команде пришлось учитывать сложные резонансы, возникающие при соединении двух компонентов, например, двух скрепленных винтами деревянных брусков. «Преимущество COMSOL Multiphysics состоит в том, что мы можем задать все параметры, которые нам нужно наблюдать. В частности, это позволяет объединять физики и, к примеру, исследовать взаимодействие звука, приходящего снаружи, со структурной динамикой помещения. Так как подобная связь является взаимной, мы можем изучить и обратное взаимодействие. Моделирование взаимосвязанных физических процессов является ключевым для нашего анализа, поскольку звуковые волны могут порождать огромное количество резонансных явлений в широком диапазоне. С помощью моделирования мы смогли это увидеть».

После завершения этого этапа команда NGI проверила результаты моделирования с помощью лабораторных исследований низкочастотных звуковых волн, проходящих сквозь деревянную конструкцию из двух комнат. Лёвхольт объ-

ясняет, что основными измеряемыми величинами являются вибрации стены и уровень звукового давления. Полученные результаты демонстрируют близкую корреляцию с моделью, построенной в COMSOL Multiphysics (см. рис. 2). «Характеристики отклика стены легко понять, и наша модель воспроизводит их практически идеально. Это наиболее наглядный пример».

Модель показывает, что передача звука внутри здания определяется взаимодействием низкочастотных волн с основными модами компонентов здания, размерами помещения и тем, как воздух покидает его наружную оболочку. Основными источниками низкочастотного звука внутри помещения являются вибрации стен и потолка, а также вибрации пола, возникающие в результате звукового давления внутри комнаты.

⇒ ДЕШЕВЛЕ И БЫСТРЕЕ, ЧЕМ НАТУРНОЕ ИСПЫТАНИЕ

«Теперь у нас появился инструмент, с помощью которого мы можем моделировать звук и вибрацию низких частот», — говорит Лёвхольт. «Мы можем использовать данный инструмент для проектирования и проверки средств звукоизоляции, таких как ламинирование оконных стекол или повышение жесткости стен — чем меньше движется стена или оконное стекло, тем меньше передача звука. Кроме того, модель показывает, какое влияние оказывают небольшие детали на систему в целом: например, как винтовое соединение стоек и листов гипсокартона может снизить эффективность звукоизоляции, так как оно снижает общую жесткость конструкции».

На следующем этапе команда намерена провести полномасштабное испытание в настоящем доме, расположенном в той части Норвегии, что подвержена влиянию шумового излучения летательных аппаратов. Пока же команда продолжит использовать и улучшать имеющуюся модель. «Нам никогда еще не удавалось добиться такого уровня соответствия результатам натуральных испытаний. Это стало возможным благодаря моделированию различных структурных компонентов с помощью средств COMSOL Multiphysics», — подводит итог Лёвхольт. «Имеющаяся модель позволяет нам принимать решения и предлагать контрмеры. По сравнению с натурными испытаниями стоимость данного процесса снизилась, а скорость возросла. Данная модель может быть расширена для исследования распространения звуковых волн и вибраций во всем здании целиком» (внизу на рис. 1). ❖

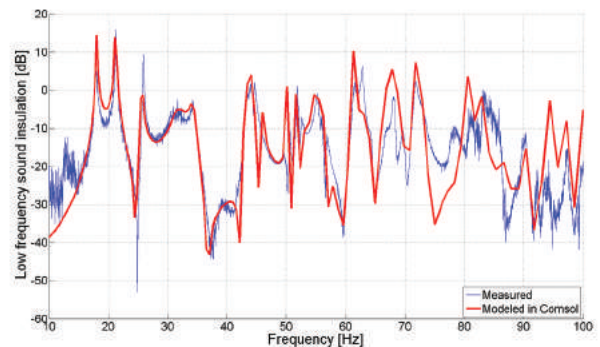


РИС. 2. Модель точно локализует резонансные явления, а также уровень резонанса в диапазоне нескольких децибел. С увеличением частоты все большее количество мод во все более малых конструкциях будет приходить в возбуждение. Это видно по растущей разнице между измерениями и результатами моделирования.

Автоматизация обеспечения качества программных средств в области ядерной безопасности с помощью специализированных приложений

Строгость процедур, связанных с ядерной безопасностью, имеет веские основания. Мелкие ошибки в разработке могут быстро перерасти в нежелательные сбои. Исследователи Окриджской национальной лаборатории совместно с COMSOL создали приложение для моделирования, которое автоматизирует процесс верификации для обеспечения качества программного обеспечения и позволяет получить результаты менее, чем за 24 часа.

НАТАЛЯ СВИТАЛА (NATALIA SWITALA)

Иногда обновление программного обеспечения заставляет чувствовать себя так, как будто ожидаешь в гостях старого друга, который не предупредил о визите заранее. Вы в равной мере чувствуете возбуждение и беспокойство. Вы надеетесь, что все пройдет гладко, что обновление совместимо с прежней версией, которой вы пользуетесь, и что оно соответствует всем требованиям к обеспечению качества программного обеспечения (Software Quality Assurance, SQA). Ситуация вызывает еще большее волнение, когда программное обеспечение используется в среде с высоким уровнем контроля, как, например, исследовательский ядерный реактор, используемый для Министерства энергетики США.

⇒ ПРОЦЕДУРЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ НА СТРАЖЕ НАШЕЙ БЕЗОПАСНОСТИ

При работе с ядерной энергией существует множество мер безопасности для предотвращения неисправностей, включая требования к обеспечению качества ПО, которые применяются ко всем компонентам, связанным с ядерной безопасностью на реакторных установках.

Одна из задач, решением которых заняты Джеймс (Джим) Д. Фрилс (James D. Freels) и его группа в Окриджской национальной лаборатории (ORNL), это исследование и разработки по переводу высокопоточного изотопного реактора (HFIR) с высокообогащенного урана (ВОУ) на низкообогащенный уран (НОУ) (рис. 1). В качестве ответной реакции на инициативу «Глобальное снижение угрозы» (GTRI) многие из исследовательских ядерных реакторов по всему миру уже переведены на другой тип топлива. Одной из главных целей разработки для перевода HFIR на низкообогащенный уран является сохранение самого мощного источника нейтронов высокопоточного реактора для исследований веществ в конденсированном состоянии в США и, таким образом, сохранение конкурентоспособности на мировом рынке источников нейтронов. Уникальность топлива и конструкции активной зоны, а также высокая плотность энергии реактора HFIR делают задачу конверсии реакторов на другой вид топлива весьма сложной. Исследователи ORNL используют программный пакет COMSOL Multiphysics® для изучения воздействия замены топлива на рабочие характеристики реактора HFIR и на рассеяние нейтронов.

Министерство энергетики требует строгого соблюдения стандартов обеспечения качества программного обеспечения. Таким образом, ORNL были разработаны и выполняются процедуры соблюдения практик в сфере ядерной безопасности. Чтобы обеспечить такое соответствие, Джим и команда

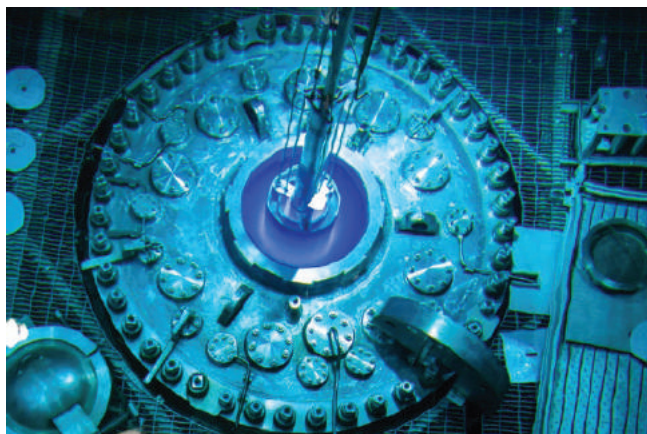
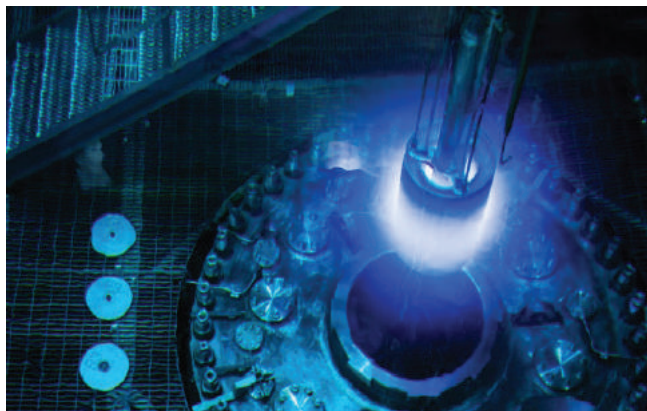


РИС. 1. Активная зона реактора HFIR в ходе операции по выгрузке топлива

ORNL проверяют, чтобы функционирование любого программного обеспечения, которое они используют, соответствовало ожиданиям разработчиков кода на всех этапах: от установки до последних обновлений.

⇒ ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТНОСТИ, БЕЗОПАСНОСТЬ НА ПЕРВОМ МЕСТЕ

Процесс обеспечения качества программного обеспечения должен гарантировать, что используемое для проведения анализа программное обеспечение выдает надлежащие результаты. «Проверка того, что установленное локальное программное обеспечение функционирует так, как рассчитывал разработчик, может требовать значительных временных

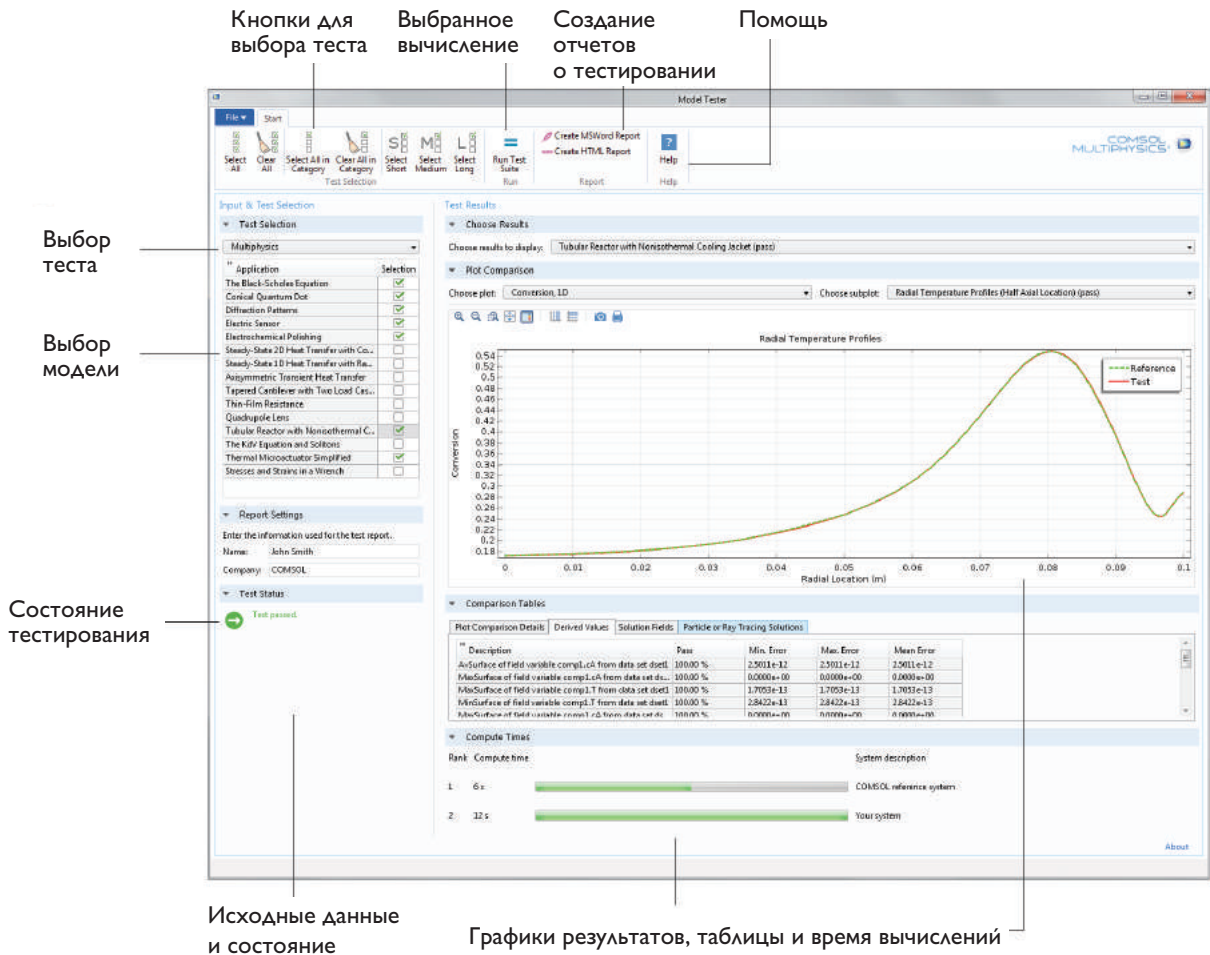


РИС. 2. Приложение Model Tester, которое запускает ряд моделей и сравнивает определенные физические результаты, такие как температура и разность электрических потенциалов, со значениями, указанными в документации на продукт. Пользователь получает автоматический отчет после завершения теста.

затрат, но является необходимым этапом согласно нормам ядерной безопасности», — объясняет Джим, старший научный сотрудник ORNL. ORNL разделяет свои мероприятия по обеспечению качества программного обеспечения на две категории: верификация и валидация (V&V).

Самым сложным может оказаться выполнение требований валидации, поскольку идеальная ситуация предусматривает наличие экспериментальных, эксплуатационных данных или данных испытаний для прямого сравнения и измерения точности кода. Для некоторых кодов, в частности, COMSOL Multiphysics, которые являются новыми для ядерной отрасли, наилучшим подходом, который и планирует ORNL использовать для COMSOL Multiphysics, является подготовка отдельного отчета по валидации, который предоставит обоснованные результаты по определенному объему моделирования, непосредственно связанному с их исследовательской работой. С другой стороны, задача валидации является частью официального процесса расчета по ядерной безопасности, который управляется и контролируется отдельной процедурой.

Несмотря на то, что обеспечить соответствие требованиям верификации более просто, это может занять много времени без соответствующего программного обеспечения. Министерство энергетики требует, чтобы команда подготовила отчет, который сравнивает результаты работы избранного

набора программных приложений COMSOL®, используемых ORNL и включенных в Библиотеку приложений COMSOL Multiphysics, с результатами, представленными в документации на программное обеспечение. Количество избранных приложений может быть большим, и каждая выходная переменная, указанная в результатах, должна быть задокументирована, что требует привлечения значительных ресурсов для выполнения процедур верификации.

Джим: «С такими требованиями к отчетности сертификация новой версии COMSOL занимает от одного до трех месяцев, поскольку нам требуется вручную сравнить результаты по нескольким моделированиям с документацией, предоставленной COMSOL».

⇒ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ

Все изменилось после того, как компания COMSOL создала Среду разработки приложений, а к команде ORNL в качестве аналитика по ядерной безопасности и экспериментальной работе присоединился Майк (Michael W. Crowell), который увидел возможность автоматизировать часть процесса обеспечения качества программного обеспечения. Среда раз-

работки приложений позволяет специалистам по моделированию, использующим COMSOL Multiphysics для физического анализа, создавать для своих моделей специализированный пользовательский интерфейс. Это означает, что любой член команды может получить доступ к модели COMSOL и получить преимущества от работы специалистов, не имея при этом опыта в написании кода для COMSOL. Помимо возможности легко создать специализированный интерфейс, специалисты по моделированию могут расширить свои модели с помощью методов, написанных на Java®, что позволяет им использовать специальные команды и связи с другими существующими программами. Это именно то, что требовалось команде ORNL.

Процедуры верификации требуют от исследователей демонстрации того, что программное обеспечение было правильно установлено на конкретном компьютере и выдает результаты, предполагаемые разработчиками COMSOL Multiphysics. Майк искал решение, которое позволило бы команде проверить, получают ли они одинаковые результаты

“Автоматический отчет позволил сэкономить время, повысить точность и надежность результатов”

— ДЖИМ ФРИЛС, СТАРШИЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬ, ORNL

моделирования на разных компьютерах, использующих разные операционные системы и математические библиотеки. «Из-за различий в архитектуре машин и библиотек, а также ограничений в точности вычислений, мы не надеемся, что предоставленные и локальные результаты будут идентичны до последнего десятичного знака, но ожидаем, что они будут достаточно близки», — объясняет Майк. Причина отличий может состоять, например, в том, как решатели и алгоритмы построения сетки создаются и компилируются в локальной среде, что может повлиять на конечные результаты.

До появления разработанной COMSOL Среды разработки приложений «Model Tester» Майк разработал специализированную программу MATLAB®, которая автоматизировала процесс верификации аналогичным образом, выбирая подмножество моделей из Библиотеки приложений, которая поставляется с программным пакетом COMSOL®, для локального выполнения, получения и сравнения результатов. Данная разработка была описана в недавней публикации в материалах конференции COMSOL 2015 в Бостоне. Программа MATLAB®, которую разработал Майк, сравнивает результаты моделей и документации, предоставленной COMSOL, с локально полученными результатами, а затем сообщает о расхождениях и выделяет аномальные случаи. Используя новый подход Майка, ORNL смогла уменьшить время, необходимое для выполнения верификации, с нескольких месяцев до нескольких дней.

Джим с радостью поделился достижениями Майка с COMSOL, а также с другими организациями, работающими по проектам Министерства энергетики. Результатом такой общей осведомленности стала беседа с Эдом Фонтесом (Ed Fontes), техническим директором COMSOL, о разработке приложения, которое будет включено в Библиотеку приложений для всех заказчиков, обеспечивая легкую верификацию установки COMSOL Multiphysics. Эд пояснил, что такого рода верификационные тесты выполняются в ходе разработки COMSOL Multiphysics путем ежедневного тестирования сотен моделей. Он с радостью согласился запустить проект и объяснил, что «приложение позволит заказчикам запустить ряд моделей и сравнить определенные физические

результаты, такие как температура и разность электрических потенциалов, со значениями, указанными в документации на продукт (и в Библиотеке приложений) и получить автоматический отчет после завершения теста» (см. рис. 2).

⇒ АВТОМАТИЧЕСКИЕ ОТЧЕТЫ ПОВЫШАЮТ ПРОДУКТИВНОСТЬ

Заказчики смогут запускать модели из Библиотеки приложения в соответствии с лицензией COMSOL Multiphysics с возможностью выбора моделей, которые они хотят включить в свои собственные установочные тесты. После запуска моделирования тестовое приложение сообщит заказчику, какие модели прошли тестирование и какие нет, включая значения, на которых имел место отказ, и предоставит автоматический отчет. Критерии прохождения и непрохождения тестирования установлены по умолчанию, но могут быть изменены в соответствии с потребностями заказчиков. Заказчики также могут расширить тесты с помощью своих собственных моделей и введения своих собственных контрольных значений для числового решения.

«Заказчики могут использовать приложение для сравнения результатов по предыдущей установке, чтобы четко понимать влияние возможного обновления продукта при новой установке, — говорит Эд. — Например, если COMSOL изменит алгоритм сетки или модель турбулентности, вы сможете проверить, какое воздействие окажут обновления на результаты ваших собственных моделей и моделей из Библиотеки приложений COMSOL».

После тестирования предварительной версии тестового приложения Майк воскликнул: «Мы сможем полностью закончить процесс верификации примерно за 24 часа!»

Джим добавил: «Автоматический отчет позволил сэкономить время, повысить точность и надежность результатов. Это дает нам возможность направить усилия на работу по замене топлива реактора HFIR с высокопроизводительного ВОО на НОО». ❖



Вверху: площадка высокопоточного изотопного реактора в Окриджской национальной лаборатории. Внизу: основная группа, работающая с COMSOL в отделе исследовательских реакторов ORNL, слева направо: Кристофер Херт, Франклин Кертис, Прашант Джейн, Майкл Кроуэлл, Джеймс Фрилс, Эмильен Попов (Christopher J. Hurt, Franklin G. Curtis, Prashant K. Jain, Michael W. Crowell, James D. Freels, Emilian L. Popov).

Рукотворные звезды — оценка конструктивной прочности в высокопроизводительном оборудовании термоядерного синтеза для производства энергии

Исследователи Центра плазмы и термоядерного синтеза Массачусетского технологического института используют численное моделирование для оценки и оптимизации предлагаемой конструкции усовершенствованного экспериментального дивертора — компактной установки термоядерного синтеза, которое развивает полную мощность реактора на научно-исследовательской испытательной площадке.

ДЖЕННИФЕР СЕГУИ (JENNIFER SEGUI)

Ядерный синтез происходит естественным путем в солнечном ядре, при этом высвобождается огромное количество лучистой энергии за счет дефекта массы при объединении ядер водорода с образованием более тяжелых атомов гелия. На Земле мы наблюдаем эту энергию в виде солнечного света, несмотря на то, что отдалены от ее источника в среднем на 150 миллионов километров.

Демонстрация осуществимости синтеза водорода для использования в качестве чистого, безопасного и практически неисчерпаемого источника энергии была первоочередной задачей международных научных исследований в течение более чем 50 лет. В Массачусетском технологическом институте (MIT) основным предметом исследований является концепция использования очень сильного магнитного поля для синтеза. В Центре плазмы и термоядерного синтеза (PSFC) Массачусетского технологического института применяют эксперименты, передовые теории и численное моделирование для определения и решения научных и технологических задач, приближающих возможность практического использования термоядерной энергии.

Усовершенствованный экспериментальный дивертор (Advanced Divertor eXperiment или ADX) представляет собой экспериментальную установку для ядерного синтеза, а именно токамак, созданный учеными в PSFC для получения тепловых потоков, плотностей и температур, аналогичных тем, которые предполагаются в термоядерном реакторе, но в очень коротких плазменных разрядах (см. рис. 1).

В токамаке при температурах свыше 150 миллионов градусов ядра

теряют электроны, образуя полностью ионизированную перегретую плазму из газообразного водородного топлива. Ядерная плазма удерживается в тороидальной вакуумной камере под высоким давлением для получения плотной плазмы с высокой вероятностью столкновения. Внешние магнитные поля удерживают и контролируют плазму аналогично действию сильных гравитационных полей на ядро солнца, обеспечивая таким образом ядерный синтез.

«Последние достижения в сфере высокотемпературных сверхпроводников позволили нам разработать токамак, работающий с более сильными магнитными полями, повышая характеристики плазмы до уровней реактора, — объясняет Джеффри Дуди (Jeffrey Doody), инженер-механик в PSFC. — Затем исследовательские усилия перемещаются от улучшения характеристик плазмы к системам обеспечения токамака».

Используя численное моделирование, Дуди и его коллеги разрабатывают конструкцию ADX для поддержания тепловых потоков и магнитных полей на уровне реактора, создавая таким образом подходящий испытательный стенд для систем отвода мощности и взаимодействия плазмы и материалов, которые способствуют разработке термоядерных установок следующего поколения.

⇒ ВЫДЕРЖАТЬ СРЫВ ПЛАЗМЫ

Предлагаемая конструкция вакуумной камеры ADX является инновационной в том, что она состоит из пяти отдельных осесимметричных оболочек, показанных на рис. 2, вместо единственного цилиндра. Модульная конструк-

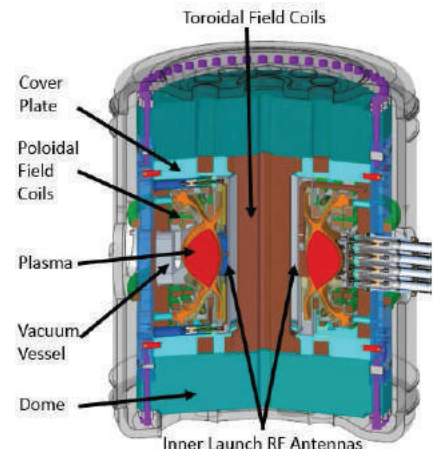


РИС. 1. Схема предлагаемого токамака ADX, разработанного Центром плазмы и термоядерного синтеза Массачусетского технологического института.

ция дает возможность разгрузить магнитные катушки и протестировать различные конфигурации, где дивертор служит в качестве системы отвода мощности для удаления из токамака продуктов термоядерного синтеза. Ионы, не задержанные магнитными полями, контролирующими плазму, собираются дивертором и направляются за пределы камеры.

Модульная камера должна выдерживать не только высокие тепловые потоки и магнитные поля, необходимые для ядерного синтеза, но и срывы плазмы, которые являются еще одним источником напряжения в оболочке вакуумной камеры, возникающего при разрушении плазмы.

«Для оценки предлагаемой конструкции камеры ADX мы выполнили

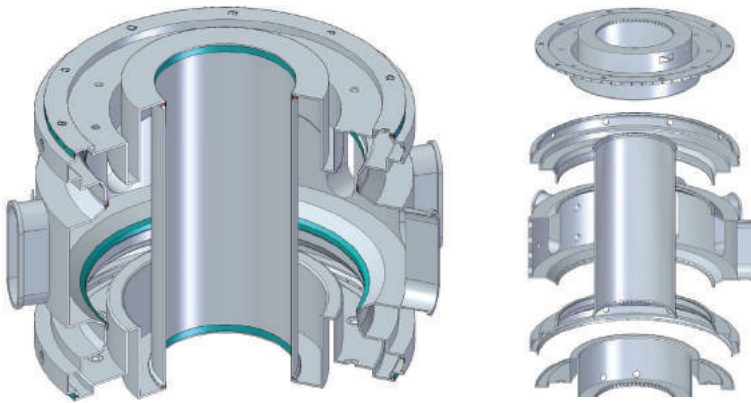


РИС. 2. Вакуумная камера ADX имеет уникальную конструкцию, состоящую из пяти отдельных оболочек, которые соединены вместе с помощью болтов.

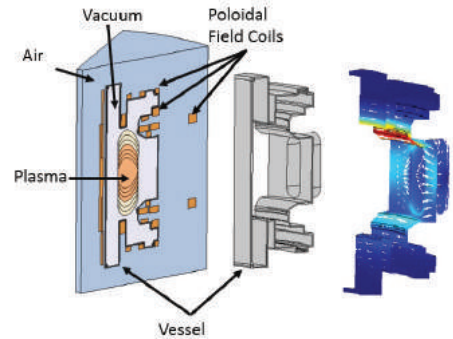


РИС. 3. Геометрическая модель (слева), используемая для определения вихревых токов в стенках вакуумной камеры ADX (справа).

численное моделирование в программном пакете COMSOL Multiphysics®, чтобы спрогнозировать магнитные поля, вихревые токи и силы Лоренца, возникающие при срыве плазмы, — объясняет Дуди. — Рассчитанные нагрузки далее применялись к отдельной структурной модели камеры, чтобы спрогнозировать напряжение и смещение». На рис. 3 показана геометрия циклично-симметричной магнитной модели ADX, включая камеру, плазму и полоидальные магнитные катушки,

которые требуются для удержания плазмы в равновесии.

Наихудший сценарий для срыва плазмы имеет место в случае вертикального смещения (VDE), когда плазма смещается вверх, неся 1,5 млн ампер тока, прекращает движение через 10 миллисекунд и теряет весь ток за одну миллисекунду. Быстро изменяющиеся магнитные поля, окружающие срыв плазмы, создают вихревые токи в оболочке вакуумной камеры. Силы Лоренца воздействуют на камеру,

когда вихревые токи одновременно пересекают полоидальные магнитные поля и более сильные тороидальные магнитные поля токамака, которые удерживают плазму.

В ходе вертикального смещения вихревые токи выше по амплитуде, поскольку плазма близко приближается к стенке камеры, поэтому вертикальное смещение выбрано в качестве тестового сценария в вычислительной модели ADX. На рис. 3 показано распределение вихревых токов, рассчитанное по численной модели. Вторая модель была разработана для определения сил Лоренца, возникающих из-за тороидальных магнитных полей токамака, в то время как в первой модели ADX учитывались только полоидальные поля.

⇒ УСИЛЕНИЕ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ ADX

Срывы плазмы приводят к возникновению больших сил Лоренца, которые действуют на стенки ADX, в частности на верхние и нижние полости вакуумной камеры во время вертикального смещения. В структурной модели камеры ADX, показанной на рис. 4, верхняя и нижняя границы прикреплены к оболочке камеры и не могут быть смещены во время моделирования. Нагрузки, соответствующие силе Лоренца, воздействующей на камеру, прилагаются к соответствующим границам. В данном тестовом случае сила Лоренца была определена для токамака, работающего с током плазмы в 1,5 млн ампер и с напряженностью тороидального поля 6,5 тесла.

Компоненты модульной камеры выполнены из прочного никелевого сплава Inconel 625, который также обладает высоким сопротивлением протеканию

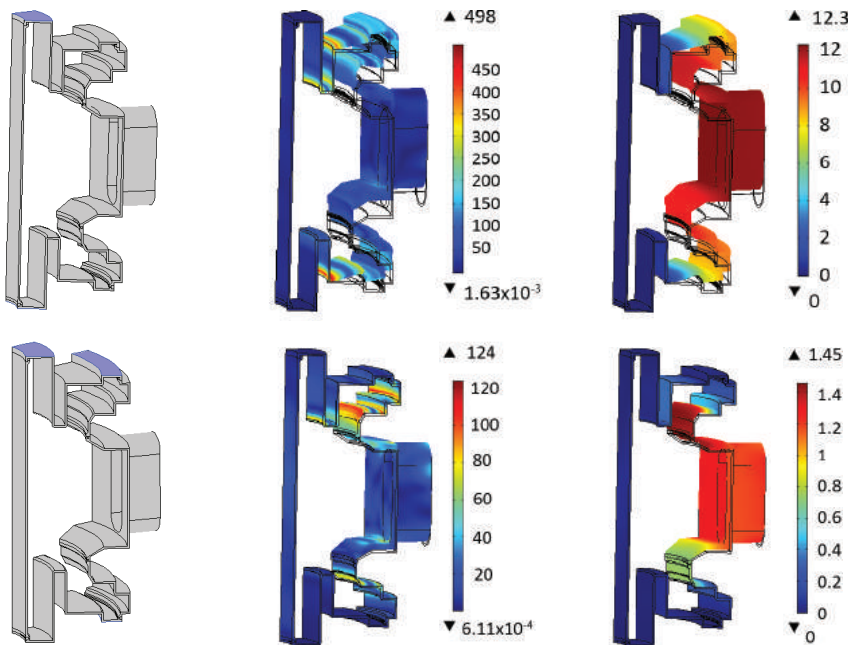


РИС. 4. Наверху — геометрия структурной модели ADX показывает пурпурным цветом границы, где конструкция закреплена. Результаты расчета напряжения и смещения показывают, что требуется усиление конструкции. Внизу — геометрия модели показывает дополнительную фиксированную границу, соответствующую опорному блоку, добавленному к конструкции ADX.

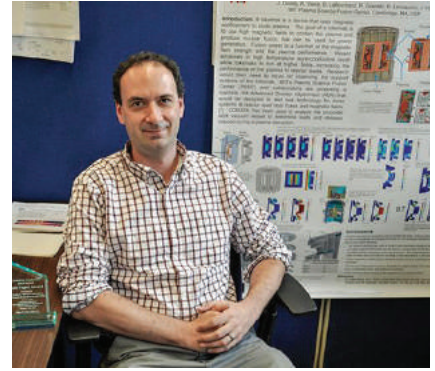
тока, сводя вихревые токи к минимуму. Предел текучести материала составляет 460 МПа, однако критерии проектирования для ADX предусматривают, что стенки камеры не должны подвергаться напряжениям, превышающим 306 МПа, что составляет две трети значения предела текучести.

Численное моделирование показывает, что без изменения конструкции сила Лоренца, возникающая из-за вертикального смещения, приводит к большим напряжениям в камере, приближающимся к значению предела текучести и вызывающим прогибы конструкции на 1 см. Для стабилизации стенок вакуумной камеры добавлен опорный блок, чтобы закрепить дополнительную границу, как показано в нижнем ряду на рис. 4. Результаты моделирования, полученные для вариан-

та с установленным опорным блоком, демонстрируют значительно меньшие напряжения и смещение стенки камеры, показывая, что стабилизированная вакуумная камера может выдержать срыв плазмы и обеспечить работу ADX.

⇒ СЛЕДУЮЩИЙ ЭТАП ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА И ДАЛЬНЕЙШЕЕ РАЗВИТИЕ

Конструирование ADX на основе численного моделирования поможет обеспечить его безопасную, успешную работу в PSFC, где он станет новейшей установкой термоядерного синтеза, служащей в качестве научно-исследовательской платформы для испытаний концепций диверторов, требуемых для термоядерного реактора. ❖



Джеффри Дуди, инженер-механик в Центре плазмы и термоядерного синтеза Массачусетского технологического института, на Конференции COMSOL 2015 в г. Бостоне, где он получил награду за работу в сфере моделирования

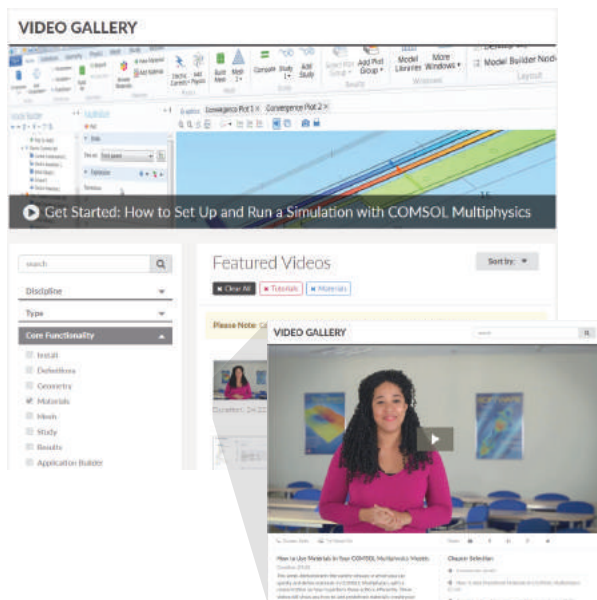
Видеогалерея COMSOL — интерактивное средство обучения

ЭНДРЮ ГРИСМЕР (ANDREW GRIESMER)

Видеогалерея COMSOL содержит более 200 видеороликов и обновляется каждую неделю. Данные видеоролики ориентированы на поддержку пользователей программных пакетов COMSOL Multiphysics® и COMSOL Server™ и помогают получить максимальные результаты в процессе численного моделирования.

СЕРИЯ ОБУЧАЮЩИХ ВИДЕО

Обучающее видео показывает, как использовать программное обеспечение, начиная от настройки геометрических параметров и заканчивая постобработкой результатов со всеми промежуточными этапами. Эти видеоролики предназначены как для начинающих пользователей, так и для опытных специалистов по моделированию, и охватывают в равной мере базовые возможности и продвинутые методики. Все видеоролики созданы на основе информации, полученной от группы технической поддержки COMSOL.



ДЕМОНСТРАЦИЯ МОДЕЛЕЙ

Хотите узнать о моделировании конкретного физического явления? Демонстрации на моделях проведут вас через все этапы, необходимые для моделирования различных физических процессов, включая явления электромагнетизма, механику конструкций, неизотермическое течение, акустику, химические реакции, микроэлектромеханические системы, микрогидродинамику и многое другое. Эти видеоролики покажут вам, как создавать модели в программном пакете COMSOL Multiphysics® и преобразовывать их в специальные приложения с удобным пользовательским интерфейсом, доступные для запуска всеми пользователями, подключающимися к COMSOL Server™.

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ

Узнайте у инженеров и ученых, как они используют численное моделирование в своей отрасли. Каждый год на мероприятиях по всему миру пользователи COMSOL представляют свою работу, демонстрируя лучшие практики и инновационные разработки. Посмотрите эту коллекцию презентаций, не отходя от своего компьютера.

ВИДЕОРОЛИКИ COMSOL В ИНТЕРНЕТЕ

Посмотрите доступные видеоролики в видеогалерее COMSOL по адресу: comsol.ru/videos.

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СПОСОБСТВУЮТ ПРОМЫШЛЕННЫМ ИННОВАЦИЯМ

Исследовательская группа Университета Буффало применяет свой опыт для решения задач множества различных отраслей, разрабатывая специализированные приложения для моделирования. С помощью таких приложений конечный пользователь может выполнять нужные процедуры анализа, даже не обладая знаниями и опытом, необходимыми для разработки базовой вычислительной модели.

БРИДЖИТ КАННИНГХЭМ (BRIDGET CUNNINGHAM)

Все современные отрасли промышленности, от автомобилестроения до потребительской электроники, объединяет общая черта — потребность в более инновационных технологиях. На смену одним технологиям и устройствам постоянно приходят другие, все более сложные, совершенные и функциональные.

Быстрое создание все более сложных устройств — непростая задача, и средства численного моделирования — одно из возможных ее решений. Эти инструменты позволяют точно прогнозировать поведение физических устройств, не создавая прототипы для каждой модификации. Однако не все организации способны позволить себе нанять специалиста в области моделирования, который помог бы им создавать и изменять модели. Именно в таких случаях и применяются приложения для моделирования. Такое приложение представляет собой специализированный пользовательский интерфейс для численной модели системы на физической основе. С его помощью пользователь может самостоятельно запускать процессы мультифизического анализа, предварительно настроенные специалистами в области моделирования.

Эдвард Фурлани (Edward Furlani) — профессор Школы инженерного дела и прикладных наук Университета Буффало, входящего в систему университета штата Нью-Йорк. По совместительству он занимает должности на кафедрах химической и биологической инженерии и электротехники. Моделированием для решения задач промышленности он занимается уже более 30 лет. Профессор Фурлани увидел возможность предоставить доступ к средствам численного моделирования более широкому кругу организаций. Его идея заключалась в следующем: организовать

университетскую группу, которая могла бы совместно создавать математические модели для анализа и разработки материалов и устройств для применения в промышленности. Возможность создания специализированных приложений для моделирования, реализованная в программном пакете COMSOL Multiphysics®, позволит организациям широкого спектра отраслей воспользоваться опытом этой команды.

⇒ НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВО МНОГИХ ОТРАСЛЯХ

Для Фурлани мультифизическое моделирование всегда было важной составляющей повседневной работы. В его круг обязанностей ученого-исследователя в Eastman Kodak входило моделирование для поддержки разработки материалов и устройств для коммерческих продуктов, в том числе систем сопел для распыления краски и множества технологий формирования цифровых изображений. Кроме того, Фурлани разрабатывал модели для решения ряда задач различных отраслей — от фотоники и микрогидродинамики до прикладных технологий микросистем и магнитных устройств. На своей текущей должности профессора Университета Буффало Фурлани применяет мультифизическое программное обеспечение в обучении, чтобы помочь студентам приобретать знания и осваивать инженерные навыки в интерактивной вычислительной среде.

Задача группы Фурлани в Университете Буффало объединяет большое число различных дисциплин и включает как промышленные, так и академические исследования. Аспиранты создают мультифизические вычислительные

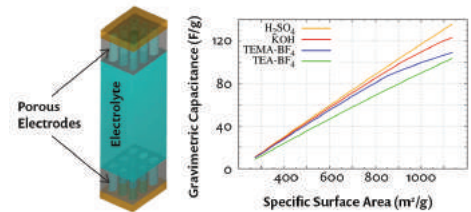


РИС. 1. Геометрия двухслойного электрохимического конденсатора и график прогнозируемой емкости

модели для разработки продуктов с функциональностью на всех уровнях, от нано- до макромасштаба. Группа создала ряд моделей COMSOL®, с целью развитию продвижения инновационных технологий в промышленности.

Например, в области хранения энергии все большую популярность приобретают электрохимические устройства, такие как двухслойные электрохимические конденсаторы (EDLC). По емкости эти устройства значительно превосходят традиционные конденсаторы, что открывает новые возможности их применения в задачах, где необходимы быстрые циклы зарядки и разрядки. В конденсаторах ионы разделяются и накапливаются на поверхностях электродов с противоположным зарядом под воздействием приложенного напряжения. Разрабатывая модели, группа Фурлани в сотрудничестве с профессором Гэнь Ву (Gang Wu) из Университета Буффало смогла прогнозировать перенос ионов и накопление равновесного заряда в устройствах, а также их емкость, что позволило лучше понять их поведение и разработать пути их оптимизации (см. рис. 1).

Мембранная технология также представляет большой интерес для промышленности. Она отличается широчайшим спектром применений — от опреснения морской воды до очистки природного газа от CO₂. Разработка высокоизбирательных тонкопленочных композитных (TFC) мембран — ключ

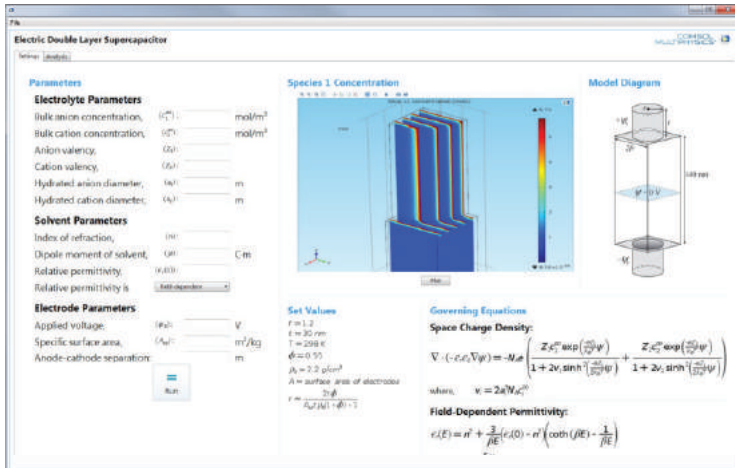


Рис. 2. Часть снимка экрана приложения для анализа двухслойных электрохимических конденсаторов

к расширению возможностей применения мембранных систем при сохранении затрат и размеров на минимальном уровне. Команда Университета Буффало разработала трехмерные модели, позволяющие видеть, как толщина, избирательность и пористость слоев влияет на эффективность мембраны. Эти модели, экспериментальную проверку которых провел профессор Хайкин Лин (Haiqing Lin) из Университета Буффало, помогают находить способы дальнейшей оптимизации таких энергоэффективных систем и открывают возможности их применения в новых областях.

Фурлани начал преобразовывать эти и другие сложные модели в простые в использовании приложения, одно из которых показано на рис. 2. Используя Среду разработки приложений в составе программного пакета COMSOL Multiphysics, он и его студенты снабдили каждую модель упрощенным интерфейсом, составленным в соответствии с конкретными задачами отдельной компании. С помощью таких приложений широкие группы пользователей могут проводить вычислительные тесты самостоятельно. «Специализированные приложения позволяют людям, не имеющим навыков разработки базовых моделей, пользоваться всеми возможностями COMSOL Multiphysics, — объясняет Фурлани. — Пользователи могут изучать параметры, которые сложно измерить, и существенно ускорить свои циклы разработки продуктов, избегая затратного и долгого проектирования методом проб и ошибок».

Чтобы дополнительно стимулировать экономическое развитие посредством математического моделирования, команда применяет

продукт COMSOL Server™, запущенный на вычислительном кластере в Центре вычислительных исследований (CCR) университета. Это подразделение использует вычислительную мощь суперкомпьютеров для научных расчетов, разработки программного обеспечения и параллельных вычислений. Эта инфраструктура образует высокопроизводительную вычислительную среду с высокой пропускной способностью для выполнения приложений, в которой конечные пользователи могут подклю-

чаться к COMSOL Server посредством клиента или веб-браузера. Специалисты по моделированию, решающие служебные задачи, могут с легкостью управлять этими приложениями, разворачивать и обновлять их непосредственно через COMSOL Server.

⇒ РАЗРАБОТКА СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ НА КОММЕРЧЕСКОЙ ОСНОВЕ

Кроме того, группа выполняет работы по моделированию для мира стартапов. Основатели стартапа Vader Systems из города Буффало (Нью-Йорк), Закари (Zachary) и Скотт Вейдеры (Scott Vader), разработали инновационный процесс, который называется «жидкометаллическая струйная печать» (liquid metal jet printing, LMJP). Эта технология, созданная по аналогии с обычной струйной печатью, основана на явлениях магнитогидродинамики и включает плавление твердого металлического материала и выброс капель расплавленного металла под действием электромагнитного импульсного поля. Это позволяет печатать очень сложные трехмерные металлические объекты. В ходе запуска серийного производства принтеров, основанных на технологии LMJP, группа Фурлани разработала

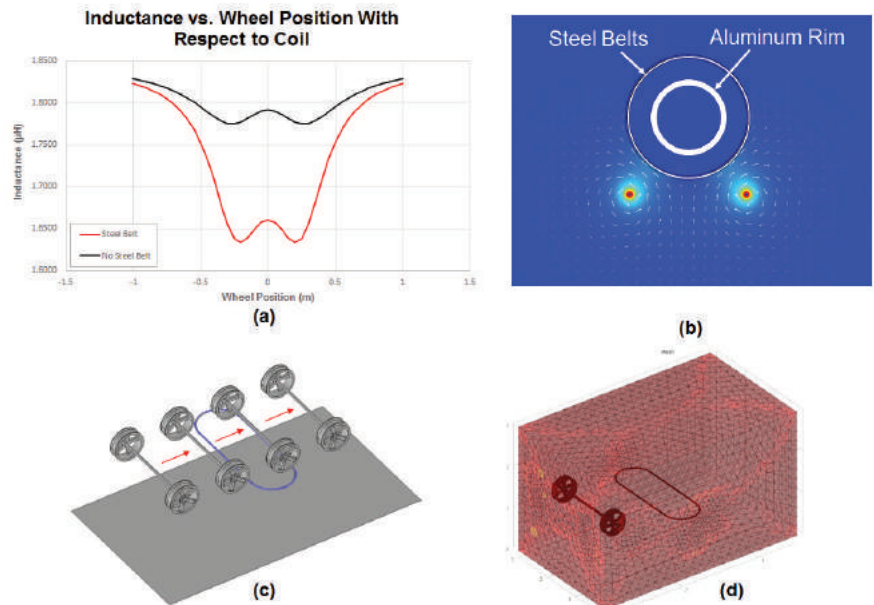


Рис. 3. Моделирование взаимодействия катушки индуктивности с движущимся транспортным средством. В ходе анализа изучается влияние стальных лент и движущейся крышки на индуктивность катушки (а) и распределение магнитного поля при перемещении крышки над катушкой индуктивности (б). Показано перемещение оси транспортного средства (с) и трехмерная вычислительная область, в которой моделируется обнаружение оси (д).

приложения COMSOL, которые помогли лучше понять процесс печати и усовершенствовать его.

Другой важный проект был реализован совместно с учеными Xerox под руководством доктора Питера Пола (Peter Paul). Группа внесла вклад в разработку инновационных сенсорных систем на основе индукционных контуров, которые могут быть использованы в проектах управления дорожным движением. Наряду с мониторингом и управлением дорожным движением, технология дистанционных измерений позволяет создавать новые методы сбора данных о транспортных потоках.

“Используя приложения для моделирования, можно с легкостью модифицировать пользовательский интерфейс и добавлять параметры, которые представляют интерес для различных компаний, что является очень полезной функцией”

— ЭДВАРД ФУРЛАНИ, ПРОФЕССОР ИНЖЕНЕРНОЙ ШКОЛЫ, УНИВЕРСИТЕТ БУФАЛО

Чтобы обеспечить максимальную эффективность систем, необходимо понимать электромагнитную взаимосвязь между катушками датчиков, встроенных в дорожное покрытие, и ферритовыми и металлическими компонентами транспортных средств, таким как колеса и оси. Команда использовала COMSOL Multiphysics для моделирования зависимости индуктивности катушки от положения и перемещения алюминиевых колес и покрышек, содержащих стальную ленту (см. рис. 3).

В ходе реализации этого и других проектов очень быстро обнаружилась необходимость привлечения к процессу разработки большего количества людей. После создания базовых моделей команда стремилась создать интерактивный инструмент, с которым могли бы работать другие пользователи и который соответствовал бы их индивидуальным потребностям. Решением снова стало создание специализированных приложений.

«Используя приложения для моделирования, можно с легкостью

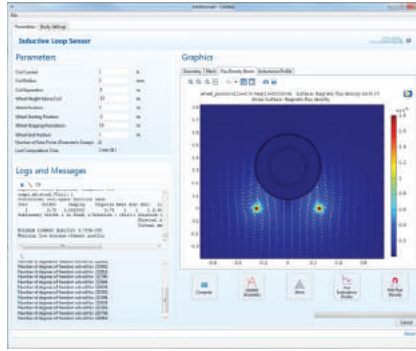


РИС. 4. Снимок экрана приложения, созданного для Xerox на основе модели измерений с помощью индукционных контуров

модифицировать пользовательский интерфейс и добавлять параметры, которые представляют интерес для различных компаний, что очень ценно», — объясняет Фурлани.

Широкие возможности настройки и гибкость — не единственное преимущество приложений для моделирования: они также обеспечивают ранее недоступную легкость обмена информацией с другими организациями и внутри них. Если установить COMSOL Server для предоставления доступа к приложениям, то конечному пользователю практически не потребуются использование COMSOL Multiphysics. За счет доступности моделирования для более широкого круга сотрудников организации задачи разработки могут решаться быстрее и с гарантированной точностью. Команды Vader Systems и Xerox (приложение последней показано на рис. 4) уже испытали на практике преимущества использования приложений, такие как внедрение

более эффективного цикла разработки продуктов с улучшенными возможностями для сотрудничества.

⇒ ИЗ СТУДЕНТОВ — В ПРЕДПРИНИМАТЕЛИ

Для студентов средства моделирования могут стать увлекательным способом совершенствования инженерных навыков. Приложения устроены так, чтобы скрыть сложность базовой модели, поэтому для студентов, которые не очень глубоко знакомы с моделированием в программном пакете COMSOL, они могут стать полезным учебным материалом. Осваивая различные возможности и функциональные особенности, студенты могут переходить к углубленному изучению и применению новых инструментов.

Создание приложений может стать для студентов не только способом познакомиться с программным пакетом, но и дорогой в мир бизнеса. Как отмечает Фурлани, разработка приложения — процесс многоэтапный. «Поддержка приложения также требует работы» — объясняет он. «Важно оставаться доступным, предоставлять клиентам поддержку и помощь, участвовать в решении их задач».

В этом смысле искусство и наука разработки приложений помогает формировать деловые навыки — студенты учатся своевременно отвечать на вопросы и реагировать на потребности клиентов. Создавая собственные приложения, студенты готовятся к новым условиям разработки, в которых ведущую роль играет моделирование. Такой подход отличается большей открытостью, гибкостью и свободой предпринимательства. ❖

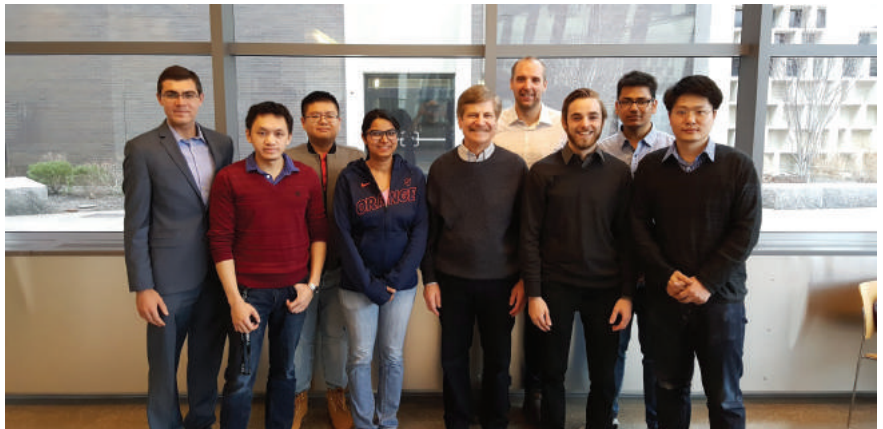


РИС. 5. Члены группы Фурлани (слева направо): Данте Иоццо (Dante Iozzo), Майк Тон (Mike Tong), Сюэчжень Сюэ (Xiaozheng Xue), Адити Верма (Aditi Verma), Эдвард П. Фурлани (Edward P. Furlani), Иоаннис Карампелас (Ioannis Karampelas), Виктор Сухоцкий (Viktor Sukhotskiy), Гурэй Гарг (Gouray Garg) и Кай Лю (Kai Liu).

Мультифизический анализ помогает сохранять прошлое

Студенты и консультанты вместе работают над совершенствованием антропогенной среды и сохранением исторических сооружений и памятников с помощью приложений для моделирования.

**ГЭРИ ДЕГЕСТАЙН
(GARY DAGASTINE)**



РИС. 1. На изображениях (слева направо) показаны различные масштабы изучаемых структур антропогенной среды — от больших территорий до материалов, из которых изготовлено окно.

Творения человеческого разума всегда можно улучшить. Особенно наглядно это проявляется в так называемой антропогенной среде — в искусственных условиях, где мы живем, работаем и развлекаемся. К антропогенным средам относится все от крупных мегаполисов до отдельных зданий, парков, шоссе и инфраструктуры, с которой мы взаимодействуем на протяжении всей жизни. На них медленно, но непрерывно влияет множество физических факторов, таких как теплота, ветер, влажность воздуха. Они протекают в различных масштабах (см. рис. 1).

Возможность точного моделирования этих процессов может способствовать существенному прогрессу во множестве областей — энергосбережение, здравоохранение, безопасность, оптимизация эксплуатационных расходов, повышение надежности и, не в последнюю очередь, сохранение исторического наследия.

Йос ван Схэндел (Jos van Schijndel), основатель нидерландской консалтинговой фирмы CompuToolAble и доцент Эйндховенского технологического университета, глубоко увлечен этой работой. Его специализация — математическое моделирование физики зданий.

«Работа над этими проектами не только позволяет воплотить результаты передовых исследований. Она важна для общества и вдохновляет моих студентов, поэтому эти проекты приносят мне радость и удовлетворение» — объясняет он. «Я основал компанию CompuToolAble, чтобы предоставить клиентам возможность воспользоваться нашим опытом в области высшей математики и вычислительных инструментов, а также способностью проводить сложные вычислительные эксперименты для создания инновационных разработок и оптимизации

их эффективности».

Обязанности консультанта и профессора часто требуют от ван Схэндела изобретать способы представления сложных идей в форме, понятной для клиентов, которые не являются специалистами в области моделирования, или для студентов, которые только изучают эту область. Являясь пользователем программного пакета COMSOL Multiphysics®, он активно применяет возможности Среды разработки приложений, которая позволяет создавать интуитивно понятные пользовательские интерфейсы на основе моделей COMSOL®. Это помогает ему как специалисту в области моделирования эффективно сотрудничать с клиентами и коллегами из других организаций и подразделений.

⇒ ПРИЛОЖЕНИЯ, КОТОРЫЕ РАСШИРЯЮТ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Ван Схэндел предлагает своим корпоративным клиентам услуги в области численного анализа и проведения испытаний посредством специализированных пользовательских интерфейсов (приложений), созданных на основе моделей COMSOL. С помощью этих приложений конечные пользователи, которые никогда ранее не работали с пакетом для моделирования или не имеют достаточной технической подготовки, чтобы создавать модели, могут с легкостью проводить виртуальные испытания при различных изменениях проекта, исходя из их собственных задач.

В университетской среде он применяет то же программное обеспечение, чтобы знакомить студентов с мультифизическим моделированием и разработкой приложений. Использование приложений COMSOL дает студентам возможность познакомиться с численным анализом и физическими системами перед тем, как они приступят к разработке собствен-

Использование приложений COMSOL открывает перед студентами возможность знакомства с численным анализом и физическими системами до того, как они начнут разрабатывать собственные модели с нуля.

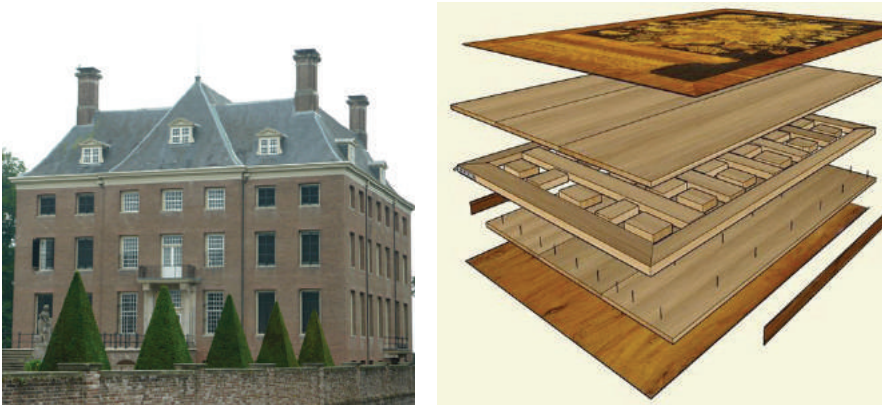


РИС. 2. Замок Амеронген (слева) — пример исторического здания, которое подвержено потенциально разрушительным процессам напряжений и деформаций, обусловленных теплом и влагой. Это относится как к самому строению, так и к сокровищам, которые хранятся в замке, например, к показанной справа двери кабинета (источник: Rijksmuseum, Амстердам).

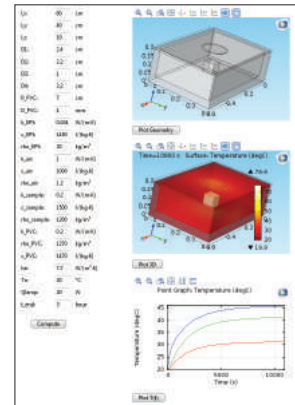


РИС. 3. Пользователи приложения могут анализировать множество вариантов устройства и сценариев использования, например, различные геометрические параметры и свойства материалов.

ных моделей с нуля. После того, как студенты в достаточной мере ознакомятся с принципами и методами моделирования, они могут создавать в Среде разработки приложений собственные приложения, углубляя свои знания и расширяя возможности совместного анализа.

«Среда разработки приложений очень важна для меня в двух отношениях, — объясняет ван Схэндел. — В академической среде постоянно приходится придумывать, как мотивировать студентов применять свои творческие способности и изобретательность перед тем, как они перейдут к углубленному изучению математического моделирования. Но теперь я могу с легкостью создавать интересные приложения для моделирования именно с такими характеристиками, которые мне хотелось бы предложить студентам для изучения. Затем, только после того, как им будет предоставлена возможность первоначально ознакомиться с приложениями для анализа происходящих физических процессов и для понимания того, к чему приводят различные изменения, мы приступаем к углубленной работе.

«В деловой среде, — продолжает ван Схэндел, — часто приходится сталкиваться с людьми, которым нужно использовать численное моделирование для отслеживания и понимания влияния физических процессов на их продукты, но которые недостаточно подготовлены или заинтересованы, чтобы разрабатывать модели самостоятельно. С помощью Среды разработки приложений я могу создать специализированный пользовательский интерфейс на основе комплексных численных моделей и реализовать в нем только те параметры, которые интересуют пользователей. Это также защищает от появления ошибок, поскольку в основе нашей работы лежит одна и та же базовая модель». Приложение можно установить так, чтобы работать с ним могли все, кому требуется доступ, посредством браузера или загружаемого клиента. После этого требуется предоставить пользователю возможность подключения к продукту COMSOL Server™ (снимок экрана приложения показан на рис. 3).

⇒ МУЛЬТИФИЗИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОМОГАЕТ СОХРАНЯТЬ ИСТОРИЧЕСКОЕ НАСЛЕДИЕ

Для сохранения исторических зданий и находящихся в них памятников культуры (см. рис. 2) необходимо изучить совместное влияние тепла, ветра и влажности воздуха, чтобы

противодействовать их разрушительным проявлениям. Колебание уровней температуры и влажности может повысить величину напряжений и деформаций в исторических строениях и объектах, а они, в свою очередь, способны вызывать изгибы, трещины, изменения размеров и другие повреждения. Чем лучше мы понимаем динамику этих процессов и особенности их протекания, тем эффективнее можем сохранять историческое наследие.

Ван Схэндел создавал и контролировал создание множества моделей COMSOL, связанных с сохранением исторических зданий и объектов, в тесном сотрудничестве со своим коллегой Хэнком Шелленом (Henk Schellen), адъюнкт-профессором физики памятников. Например, их аспирант Зара Худжибрегтс (Zara Huijbregts) пользовалась модулем расширения «Теплопередача» в COMSOL Multiphysics, чтобы моделировать нагрев пола и стен помещения проникающим через окна солнечным

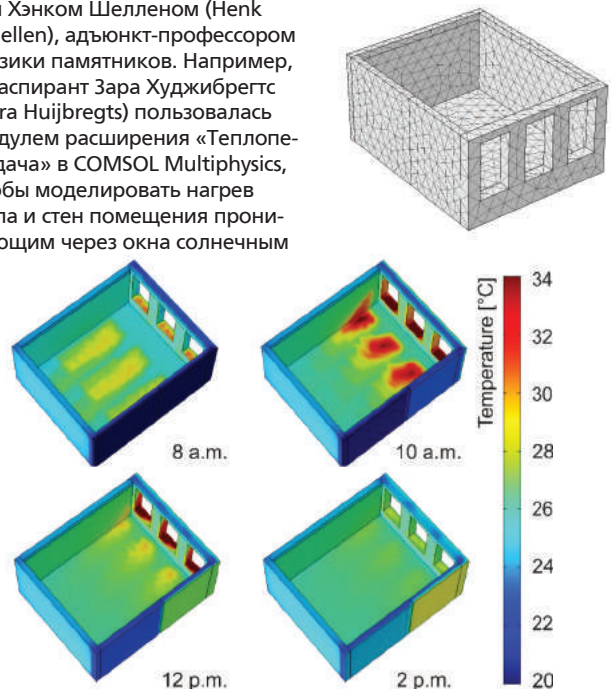


РИС. 4. Результат численного моделирования в программном пакете COMSOL®: распределение температуры в полу и стенах помещения в различное время суток. Источником тепла является солнечный свет, проникающий через окна, когда солнце проходит над помещением.

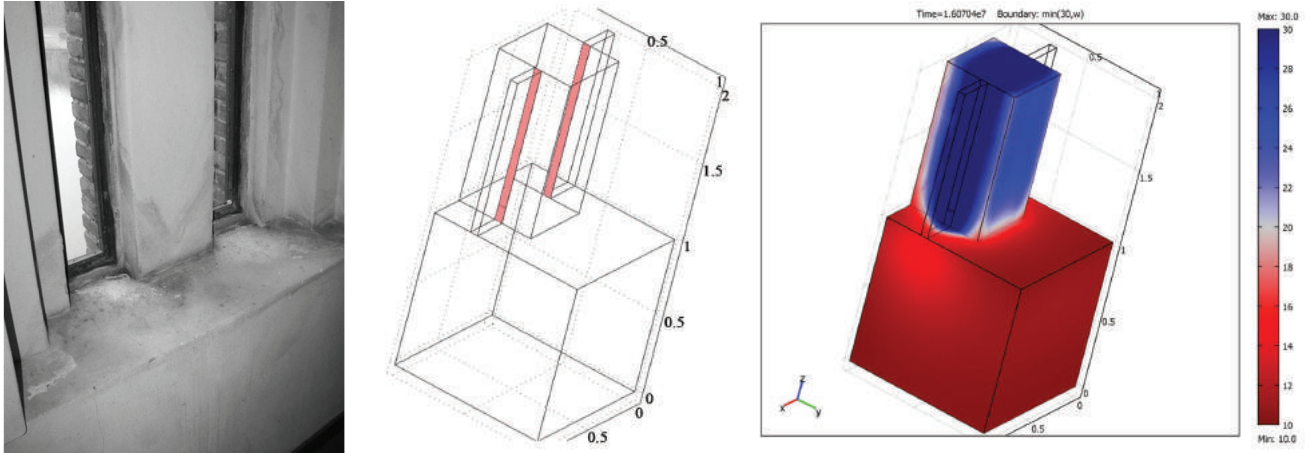


РИС. 5. Чтобы изучить перенос влаги, который может вызвать повреждения, подобные показанным выше (слева), ван Схэндел создал модель COMSOL, точно учитывающую совместное влияние переноса тепла и влаги через стену (справа).

светом в различное время дня (см. рис. 4).

В этой модели одновременно учитывается теплопередача путем теплопроводности через наружную оболочку здания, конвективная теплопередача и измеренные параметры воздуха в помещении, а также теплопередача излучением. Модель включала различные поверхности комнаты и фасадов здания, а также учитывала охлаждение от внешней тени.

Результаты позволили спрогнозировать температуру на каждой стене в различное время дня, определив таким образом места, лучше всего оберегающие чувствительные объекты от разрушительного влияния солнечного света и тепла. «Крайне важно знать столь точные распределения температуры, чтобы, например, разместить картины там, где на них меньше повлияет нагрев солнечными лучами», — поясняет ван Схэндел.

Повреждение от влаги — еще одна существенная проблема, которая может угрожать стенам, зданиям, крышам и объектам в помещениях. Поскольку источник влажности в здании или помещении достаточно старой постройки не всегда очевиден, ван Схэндел иногда использует COMSOL Multiphysics для поиска ответа.

«Требуется выяснить, как влага может попадать внутрь, путем мультифизического моделирования, включающего измерение относительной влажности в различных точках. Области высокой относительной влажности помогают понять, как происходит массообмен влаги, и мы объединяем эту информацию с моделированием теплопередачи, поскольку нагрев стимулирует распределение влаги», — объясняет он.

Ван Схэндел разработал в пакете COMSOL модель переноса влаги в стене с видимыми повреждениями от протечек рядом с окном. Его модель позволила установить источник влажности (см. рис. 5). Он и его студенты использовали этот метод для моделирования тепловых мостов с использованием различных материалов, чтобы проанализировать, как размещение изоляции влияет на теплопередачу изнутри здания наружу, и понять, как влага проходит через различные строительные материалы, например, бетон, камень и теплоизоляцию (см. рис. 5).

Напряжения и деформации в ценных объектах, например, в исторических картинах, во многом обусловлены температурой и влажностью, поэтому возможность точно и одновременно учитывать эти факторы и их взаимосвязь в модели поможет лучше прогнозировать потенциальный ущерб. Модель ван Схэндела рассчитывает распределение

температуры в стене и в картине, а также относительные изменения влажности (см. рис. 6).

«Изменения климата, повышение урбанизации и другие факторы представляют не имеющую аналогов угрозу для исторических сооружений. В то же время современные нормативы в отношении их сохранения строги, как никогда раньше, поскольку защита исторического наследия прошлого важна для общества. Возможность использовать комплексные инструменты для моделирования, такие как COMSOL, является важной частью инструментария, который помогает нам обеспечить соблюдение этих требований», — говорит ван Схэндел. ❖

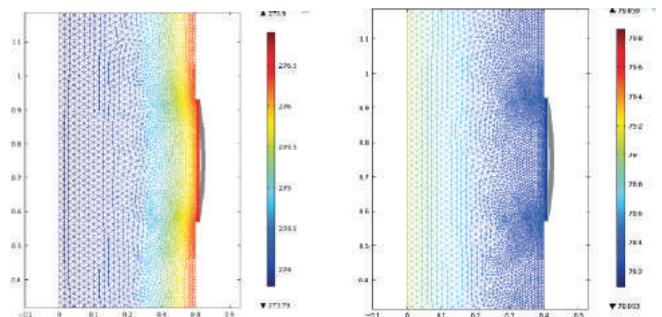


РИС. 6. На обоих изображениях показаны результаты моделирования в COMSOL поперечного сечения стены, на которой висит картина. На рисунке слева показано распределение температуры в стене и в картине в заданный момент времени, на рисунке справа — скорость изменения относительной влажности в стене и в картине в тот же момент времени. Эта модель помогает прогнозировать напряжения и деформации, которые влияют на исторические строения и памятники, что предоставляет специалистам необходимую информацию для принятия соответствующих мер защиты.



Слева направо: Хэнк Шеллен (Henk Schellen), Зара Худжибреттс (Zora Huijbregts) и Йос ван Схэндел (Jos van Schijndel).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОННОГО УСТРОЙСТВА С ПОМОЩЬЮ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ПРИЛОЖЕНИЯ

Распространяя высокоточные мультифизические модели в виде специализированных приложений для моделирования, инженеры компании BE CAE & Test эффективно используют свои знания и упрощают процесс консультирования.

ДЖУЗЕППЕ ПЕТРОНЕ (GIUSEPPE PETRONE)

Консультанты по моделированию используют специализированные приложения как эффективный способ передать результаты своей работы клиентам. Вместо предоставления статичного отчета они теперь могут установить приложение, содержащее в себе все детали полной математической модели и снабженное понятным и удобным интерфейсом. Это позволяет заказчику самостоятельно выполнять моделирование. Наша компания, BE CAE & Test, создала такое приложение для моделирования компонента поверхностного монтажа (SMD).

⇒ ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСШИРЯЮТ ВОЗМОЖНОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ ИНЖЕНЕРАМИ

Для консультантов по моделированию приложения стали новой ступенью взаимодействия между инженерами. Они позволяют легко и просто общаться и работать с заказчиками. Специализированное приложение дает заказчику доступ к полноценной модели с помощью удобного пользовательского интерфейса. Приложение становится полезным и для консультанта, и для клиента: заказчик получает простой в использовании инструмент, с которым он может работать самостоятельно, а консультант может уделить больше времени тонкой настройке модели, а не выполнению расчетов для заказчика.

В этом примере, который рассказывает об исследовании SMD, заказчик получает доступ к численной модели через приложение и может изменять некоторые параметры и материалы.

⇒ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УСТРОЙСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО МОНТАЖА

Устройства, потребляющие или преобразующие энергию, должны отводить тепло таким образом, чтобы обеспечивалась их работа в заданном диапазоне температур. Компонент поверхностного монтажа является одним из примеров электронных систем, которые мы моделируем по запросам заказчиков. Для изучения этих систем мы пользуемся программным пакетом COMSOL Multiphysics®, который позволяет с легкостью использовать в модели большой набор физических явлений и учитывать взаимосвязь между ними. В нашей модели SMD нас в основном интересует медная подложка, слой бессвинцового припоя и кремниевый кристалл (см. рис. 1).

Материалы слоя припоя и кристалла, толщина слоя припоя и рассеиваемая тепловая мощность могут влиять на максимальную температуру спая и на тепловое сопротивление спай-корпус. В нашей модели мы изучаем, как эти параметры воздействуют на распределение тепла, которое в конечном итоге влияет на работу SMD. Во время тестового расчета мощность источника тепла была равна 15 Вт, началь-

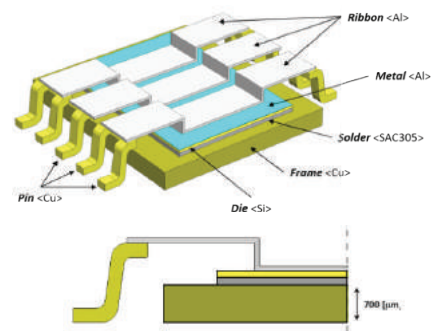


РИС. 1. Вверху: геометрические элементы и материалы компонента поверхностного монтажа. Внизу: вид сбоку подложки, кристалла, припоя, ножек и ленты.

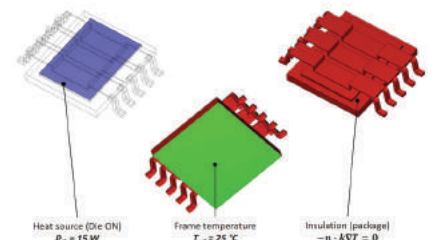


РИС. 2. Выделенные области компонента поверхностного монтажа, обозначающие граничные условия, используемые в мультифизической модели.

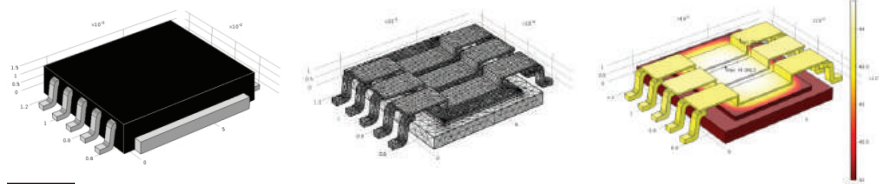


РИС. 3. Слева направо: трехмерная геометрия, сетка и результаты моделирования в программном пакете COMSOL Multiphysics®.

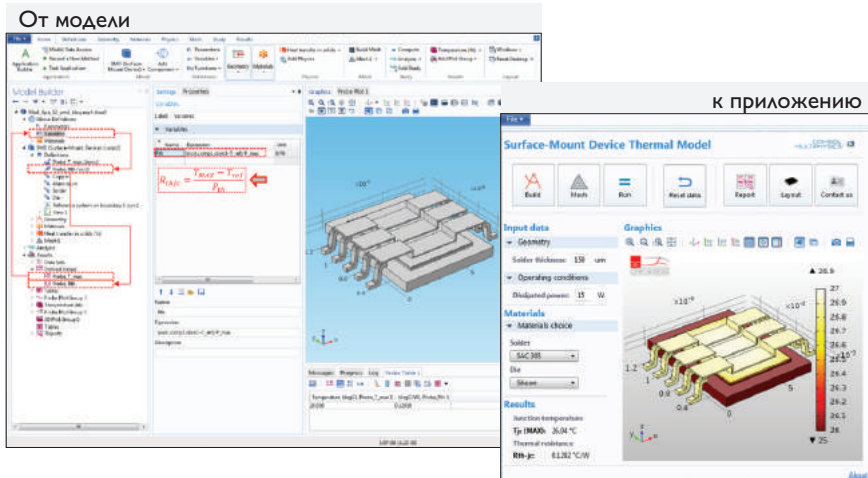


РИС. 4. Приложение для моделирования тепловых эффектов в компоненте поверхностного монтажа создано в Среде разработки приложений, входящей в программный пакет COMSOL Multiphysics®. Пользователь может менять такие параметры, как толщина слоя припоя, условия работы и материалы, чтобы изучать тепловые эффекты в различных конструкциях компонентов поверхностного монтажа.

модель с высокой точностью и предсказательной способностью, не перегружая при этом пользователя лишними подробностями. Описанное здесь приложение позволяет пользователю изучить зависимость максимальной температуры спая и теплового сопротивления спай-корпус от материалов деталей, толщины слоя припоя и рассеиваемой тепловой мощности. Меняя параметры и быстро получая результат, пользователь может подтвердить или опровергнуть свои предположения и принять обоснованное проектное решение.

⇒ УЛУЧШЕНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ ИНЖЕНЕРАМИ

Опыт создания приложений для моделирования говорит нам, что заказчики рады получить интерактивный инструмент для изучения своих систем.

Ранее, когда мы выдавали заказчикам только результаты моделирования, мы часто получали просьбы пересчитать численную модель с новыми параметрами. Теперь консультант по моделированию может установить специализированное приложение, чтобы заказчик самостоятельно получил ответы на оставшиеся вопросы. Это выгодно и консультантам по моделированию, и заказчикам — вместо того, чтобы тратить время на повторные запуски расчетов с новыми параметрами, мы можем делать модель и приложение более подробными.

После перехода к приложениям мы отвечаем на запросы по параметрическому моделированию так: «Давайте мы создадим для вас специализированное приложение COMSOL, чтобы вы сами смогли исследовать свой продукт».

ная температура была задана равной 25°C, а остальные части были теплоизолированы.

Моделирование теплопередачи в COMSOL Multiphysics становится простым и удобным, поскольку все шаги моделирования выполняются в одной среде. Мы смогли быстро построить геометрию модели, добавить материалы, задать граничные условия с помощью интерфейса физики Heat Transfer in Solids (теплопередача в твердых телах), построить сетку, решить задачу и провести постобработку результатов для расчета интересующих нас величин, таких как тепловое сопротивление спай-корпус.

⇒ СОЗДАНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ПРИЛОЖЕНИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ

Готовая модель COMSOL Multiphysics (см. рис. 2 и 3) может быть дополнена удобным для пользователя интерфейсом с помощью Среды разработки приложений. Хорошо зная изучаемую область физики, мы подбираем параметры, которые можно настраивать в приложении, и диапазон их изменения (см. рис. 4), исходя из нашей математической модели и требований заказчика.

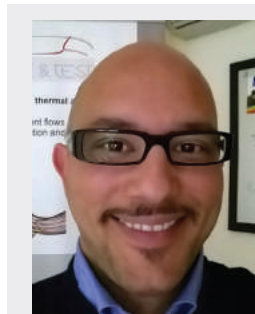
Пользователь приложения может рассмотреть геометрию компонента поверхностного монтажа, настроить толщину слоя припоя, построить сетку, запустить моделирование, вернуться к настройкам по умолчанию и создать

отчет. Эти функциональные возможности легко обеспечиваются Средой разработки приложений COMSOL.

Когда пользователь приложения последовательно проходит необходимые для моделирования шаги, отображаются графические результаты: сначала геометрия SMD, затем сетка, и наконец численное распределение температуры. Интерактивная и динамическая природа модели, таким образом, сохраняется в приложении. Когда пользователь меняет какой-либо параметр, все графики и изображения легко создаются заново.

Конечным результатом работы является простое и легкое в работе приложение, которое опирается на построенную специалистами математическую

“Для консультантов по моделированию приложения вывели на новый уровень взаимодействие между инженерами. Они позволяют легко и просто общаться и работать с заказчиками”



О ПРИГЛАШЕННОМ АВТОРЕ

Джузеппе Петроне (Giuseppe Petrone) — сооснователь и единоличный руководитель компании BE CAE & Test, сертифицированного консультанта COMSOL. Он получил степень магистра по машиностроению в Университете Катании (Италия), а позже кандидатскую степень по энергетике и организации производственных процессов в Université Paris-Est (Франция). До основания BE CAE & Test Петроне посвящал свое время академическим исследованиям, включая разработку численных методов для гидродинамики и теплового анализа. Он пользуется пакетом COMSOL Multiphysics® с 2005 года.

COMSOL Multiphysics® — двигатель инноваций в образовании и промышленности

КАРЛ Д. МАЙНХАРТ (CARL D. MEINHART)

Я использую программный пакет COMSOL Multiphysics® для решения сложных мультидисциплинарных задач, — как научных, так и промышленных. Причина проста: задачи, которые ранее потребовали бы составления специализированного численного алгоритма, от сложных мультифизических приложений до оптимизационного анализа, сейчас можно легко решить с помощью программного пакета COMSOL®.

В Калифорнийском университете (Санта-Барбара) программные решения COMSOL применяются в нескольких учебных курсах для студентов бакалавриата и магистратуры. Например, основными слушателями курса «Введение в мультифизическое моделирование» являются студенты-старшекурсники и магистранты, изучающие машиностроение. Навыки, полученные в ходе этого курса, позволят студентам использовать пакет COMSOL при разработке и оптимизации решений для своих курсовых проектов, работа над которыми продолжается весь год. Курс позволяет студентам познакомиться со множеством концепций в области проектирования в течение осенней четверти выпускного года, еще до того, как они приступят к разработке машинного оборудования. Этот процесс помогает сэкономить много сил и времени при обучении студентов современным методам промышленного проектирования.

Кроме того, мы планируем использовать специализированные приложения, созданные с помощью Среды разработки приложений. Сначала приложения, вероятнее всего, будут применяться в лабораторных занятиях для студентов бакалавриата. Студенты могут использовать заранее созданные приложения для моделирования физических экспериментов и прогнозирования ожидаемых результатов перед тем, как проводить их в лаборатории. На этапе анализа студенты будут сравнивать результаты моделирования и эксперимента, чтобы понять физические процессы, а также экспериментальные и численные ошибки.

Многие проекты по своей природе являются мультидисциплинарными, охватывая области техники, химии, физики и биологии. Уникальным преимуществом COMSOL является возможность с легкостью моделировать физические процессы, относящиеся к разным областям физики, для решения исследовательских проблем или для поиска ответа на научные вопросы, которые ранее требовали нескольких лет разработки специализированных численных алгоритмов. Такая гибкость позволяет исследователям меньше заботиться о вычислениях и уделять больше времени размышлениям над физическими вопросами.

В качестве примера можно привести микрогидродинамику, где электротермический поток, создаваемый переменным током, используется для проведения гетерогенных химических реакций. В таких моделях требуется учитывать электростатические процессы, теплопередачу, потоки жидкости и химические реакции. Чтобы повысить и без того высокую достоверность наших численных экспериментов, в наших математических моделях учитывается зависимость свойств материалов от температуры. Эти модели позволяют объединить физические процессы и моделировать их взаимосвязь в точном соответствии с закономерностями реального мира.

Я основал компанию Numerical Design, Inc. в 2012 году. С самого открытия она получила статус сертифицированного

консультанта COMSOL (COMSOL Certified Consultant). Мы оказываем услуги компаниям из различных отраслей в таких областях техники, как микрогидродинамика, электромагнетизм, химические технологии и многие другие.

Мы работаем над решением множества прикладных задач микрогидродинамики. Пространственный масштаб соответствующих процессов составляет от десятков нанометров до десятков микрометров, временной — порядка нескольких микросекунд. Из-за малых пространственных и временных масштабов зачастую бывает очень сложно оснастить устройства приборами для измерения характеристик экспериментальных процессов. К счастью, COMSOL Multiphysics позволяет нам моделировать эти устройства и с помощью численных методов выбирать такие параметры, которые обеспечивают оптимальные рабочие характеристики.

Мы регулярно разрабатываем такие микрогидродинамические устройства, создать которые путем оснащения аппаратных прототипов измерительными приборами было бы невозможно. Более того, каждый процесс технологического производства множества микрогидродинамических устройств может обойтись в десятки тысяч долларов и занять, например, шесть месяцев. При столь существенных затратах и сроках проведение нескольких циклов разработки может оказаться нецелесообразным. COMSOL® позволяет быстро выполнить моделирование и проанализировать множество концепций разработок, а также оптимизировать их перед началом процесса изготовления технических изделий.

На рынке доступно множество инструментов для оптимизации. Однако при оптимизации формы на основе мультифизического подхода COMSOL является идеальным инструментом для разработки комплексных структур, которые невозможно спроектировать, исходя исключительно из базовых принципов. Недавно при решении промышленной задачи мы провели оптимизацию нелинейной мультифизической задачи по десяти параметрам. Если бы мы рассматривали все возможные комбинации параметров, каждый из которых принимал бы, скажем, 10 последовательных значений, то нам пришлось бы провести 10^{10} процедур моделирования. Если каждый нелинейный проход занимает примерно 30 минут, то для решения задачи нам потребовалось бы 570 000 лет. С помощью COMSOL мы смогли найти оптимальное решение примерно за день. Получившаяся геометрическая структура не являлась интуитивно понятной, ее нельзя было предсказать *априори*.



ОБ АВТОРЕ

Доктор Карл Майнхарт (Carl Meinhart) — профессор инженерной механики в Калифорнийском университете (Санта-Барбара). Докторскую степень он получил в Университете Иллинойса в 1994 году. С самого начала работы в Калифорнийском университете в 1996 году основным направлением его исследований стала разработка микрогидродинамических устройств и изучение механизмов переноса, которые лежат в их основе. Доктор Майнхарт также является основателем и генеральным директором Numerical Design, Inc. — компании со статусом COMSOL Certified Consultant (сертифицированный консультант COMSOL) в Санта-Барбаре, Калифорния. Доктор Майнхарт является членом Американского физического общества.