

COMSOL NEWS

ЖУРНАЛ О МУЛЬТИФИЗИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ

Приготовление воздушных
хлопьев как наука
Корнеллский университет
СТРАНИЦА 7

МОТОЦИКЛЫ MAHINDRA.
ЧТО СКРЫВАЕТСЯ
ЗА РЕВОМ МОТОРОВ?
СТРАНИЦА 14

Специализированные
Hi-Fi преобразователи

от Xi Engineering и WAT

СТРАНИЦА 4

Решайте конструкторские задачи со специализированными приложениями для моделирования

Современные продукты исключительно сложны, и проектировщикам приходится зачастую искать компромиссы между противоречивыми требованиями. Для создания оптимальной конструкции требуется взаимодействие всех сотрудников компании.

Поэтому лейтмотивом выпуска COMSOL News в этом году является совместная работа: группы инженеров-разработчиков находят оптимальные решения быстрее, если работают в связке с другими отделами компании. Как им это удастся? Специалисты по моделированию разрабатывают специализированные приложения для моделирования при помощи программного пакета COMSOL Multiphysics® и развертывают их с помощью COMSOL Server™. Инженеры на производстве и в отделе продаж получают доступ к результатам высокоточного мультифизического моделирования, используя библиотеки приложений, разработанные внутри компании с учетом их конкретных потребностей. Не будучи экспертами в области математического моделирования, они могут воспользоваться самыми мощными вычислительными инструментами. Они могут экспериментировать с параметрами, влияющими на форму и функции продукта. Они могут предложить доработать конструкцию, исходя из своего опыта или отзывов клиентов.

Благодаря использованию приложений для моделирования во всех отделах компании упрощается процесс проектирования и расширяются связанные с ним возможности. Математическое и численное моделирование становится доступным большому кругу пользователей. Теперь знания всех сотрудников компании можно использовать для создания продуктов высочайшего качества. Узнайте о разработке специализированных преобразователей Hi-Fi в компаниях Xi Engineering и WAT, создании мотоциклов в Mahindra Two Wheelers и пищевых технологиях Корнеллского университета. Присоединяйтесь к пользователям COMSOL® и вдохновляйтесь их примером, чтобы создавать лучшие продукты.

Приятной работы!



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

ПРИСОЕДИНЯЙТЕСЬ К СООБЩЕСТВУ COMSOL



COMSOL, Inc.



COMSOL Multiphysics



@COMSOL_Inc



plus.google.com/+comsol

БЛОГ comsol.ru/blogs

ФОРУМ comsol.ru/community/forums

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

COMSOL NEWS
2017

© 2017 COMSOL. COMSOL, COMSOL Multiphysics, Capture the Concept, COMSOL Desktop, COMSOL Server, LiveLink и Simulation for Everyone являются товарными знаками или зарегистрированными товарными знаками COMSOL AB. Все другие товарные знаки являются собственностью их владельцев. Компания COMSOL AB, ее дочерние компании и продукция не рекомендуются, не финансируются и не поддерживаются этими владельцами. Полный список таких владельцев товарных знаков представлен на сайте www.comsol.ru/trademarks.

Логотип IN является товарным знаком или зарегистрированным товарным знаком LinkedIn Corporation и аффилированных с нею компаний в США и (или) других странах. Логотип «f» является зарегистрированным товарным знаком Facebook, Inc. Логотип в виде птицы является зарегистрированным товарным знаком Twitter, Inc. Логотип G+ является товарным знаком Google, Inc.

СОДЕРЖАНИЕ

ВЫСОКОТОЧНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

- 4 Музыка для ваших ушей:
Преобразователи нового типа для электростатических наушников



ПИЩЕВАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

- 7 Как приготовить идеальные воздушные хлопья

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА

- 11 Приложения для моделирования ускоряют создание специализированных конденсаторов

АВТОМОБИЛЬНАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

- 14 Мотоциклы Mahindra.
Что скрывается за ревом моторов?

ПРОИЗВОДСТВО ЛИСТОВОГО СТЕКЛА

- 17 Оптимизация защитных стекол на этапе производства

УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫМИ РЕЖИМАМИ

- 20 Повышение продаж и построение более прочных отношений с клиентами благодаря приложениям для моделирования



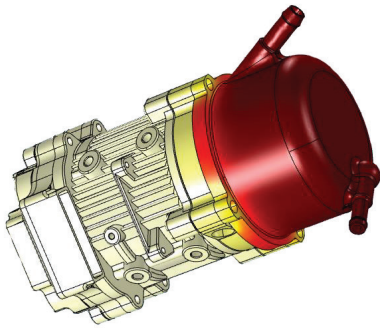
НА ОБЛОЖКЕ

Высококачественные наушники с высокоточным электростатическим ламинатным преобразователем (HP-EL) со встроенной системой усиления звука. Изображение предоставлено: Warwick Audio Technologies Ltd.

СОДЕРЖАНИЕ

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ АКУСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ

- 22 | Мультифизический анализ помогает обнаруживать утечки в водопроводных магистралях



МУЛЬТИФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

- 25 | Совершенствование электрогидравлического усилителя рулевого управления с использованием виртуальных прототипов

АККУМУЛЯТОРНЫЕ СИСТЕМЫ

- 28 | Как быстро нагревается элемент питания?

СОВРЕМЕННАЯ АУДИОТЕХНИКА

- 30 | На переднем крае разработки слуховых аппаратов

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РАЗРЯДЫ В КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТАХ

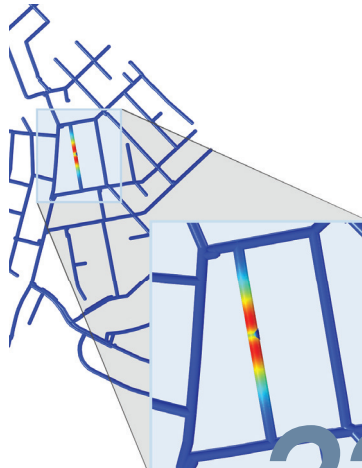
- 33 | Определение областей возникновения электрической дуги в спутниковых системах

ПРИГЛАШЕННЫЙ АВТОР

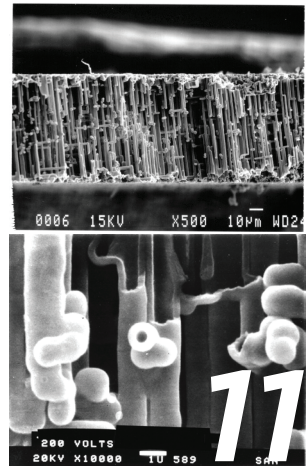
- 36 | Моделирование меняет индустрию медицинского оборудования



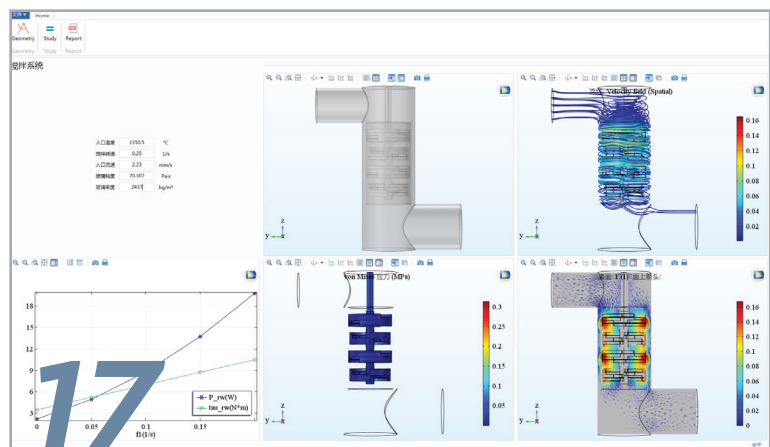
14



22



11



Музыка для ваших ушей: Преобразователи нового типа для электростатических наушников

Стартап в области аудиотехнологий представляет готовые к производству преобразователи нового типа для электростатических наушников класса Hi-End с уменьшенным завалом в области низких частот.



ДЖЕННИФЕР ХЭНД (JENNIFER HAND)

Настоящие энтузиасты Hi-Fi высоко ценят звучание, которое обеспечивают электростатические наушники. Наушники такого типа характеризуются не только естественным и объемным звуком, но и большей четкостью, низким уровнем искажений и расширенным диапазоном частот по сравнению с другими источниками высококачественного звука, используемыми в наушниках.

Принцип работы большинства электростатических наушников заключается в приложении электрического заряда к тонкой эластичной мембране, размещенной между двух токопроводящих пластин. Входной электрический сигнал приводит в движение заряженную мембрану, создавая звуковые волны, которые наши органы слуха и головной мозг воспринимают как музыку, заставляющую нас радоваться или грустить.

Несмотря на высокое качество звука и точность воспроизведения, стоимость электростатических наушников может быть слишком высока, а конструкция не обладать достаточной прочностью. Кроме того, до недавнего времени такие наушники изготавливались вручную в силу жестких требований к точности механической обработки. Видя потребность рынка в доступных и вместе с тем высококачественных и простых в изготовлении наушниках, специалисты компании Warwick Audio Technologies Limited (WAT) разработали высокоточный электростатический ламинатный преобразователь (HPEL). Эта запатентованная технология основана на использовании сверхтонкой диафрагмы и одной проводящей пластины вместо двух. Специалисты компании WAT, тесно связанные с Уорвикским университетом (Великобритания), разработали легкую слоистую мембрану толщиной всего 0,7 мм, которая идеально подошла для использования в электростатических наушниках.

HPEL представляют собой легкие тонкопленочные изделия, изготовленные посредством непрерывного проката. «Разработанная нами технология уникальна, — объясняет Мартин Робертс

(Martin Roberts), генеральный директор компании WAT. — Преобразователь HPEL изготовлен из металлизированной полипропиленовой пленки, полимерного разделителя с шестиугольными ячейками и токопроводящей сетки» (рис. 1).

В отличие от обычной конструкции, предусматривающей приложение постоянного тока к эластичной мембране, а переменного — к пластинам, предложенный компанией односторонний динамик предполагает приложение постоянного тока к эластичной мембране, а переменного — к однопроводной сетке, расположенной напротив мембраны.

Способ изготовления позволяет создавать такие преобразователи с гораздо меньшими затратами по сравнению с обычными электростатическими динамиками. Это значит, что впервые за свою историю электростатические технологии могут стать доступным решением для различных аудиоустройств сегмента Hi-Fi.

⇒ МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УСТРОЙСТВА

Прежде чем прийти к окончательному варианту конструкции, специалисты компании WAT тщательно исследовали взаимодействие многочисленных конструктивных элементов. Это было необходимо для обеспечения невысокой стоимости, простоты производства и высокого качества звука конечного изделия. «Мы разработали несколько прототипов, каждый из которых показывал превосходные рабочие характеристики. Главная проблема состояла в том, что

мы не вполне понимали, как именно отдельные материалы и конструктивные параметры влияли на эксплуатационные характеристики преобразователя», — говорит Робертс.

Динамические характеристики HPEL зависят от крайне сложного взаимодействия между величиной напряжения мембраны, уровнем сигнала переменного тока, геометрией динамика, упругими и диэлектрическими характеристиками материала, термоакустическими потерями, влиянием

“Мы перешли от еженедельного изготовления многочисленных прототипов вручную к простому изменению параметров в модели. Мы получили не только желаемую конструкцию, но и возможность оптимизировать характеристики преобразователей в соответствии с требованиями заказчика”

— МАРТИН РОБЕРТС,
ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ДИРЕКТОР, WAT

присоединенной массы воздуха, расположенного рядом с открытой стороной мембраны. Команда инженеров пыталась улучшить звучание басов, уменьшив завал низких частот, понизив искажения и увеличив уровень акустического давления при заданной величине электрического заряда. Они пришли к выводу, что внесение даже незначительных изменений в какой-либо элемент конструкции оказывает воздействие на звучание.

Несмотря на то, что инженеры компании WAT обладают огромным опытом в области механики, электрики и акустики, они не имели подходящих средств моделирования, которые помогли бы им понять подобные сложные процессы. Для выполнения виртуальной оптимизации конструкции HPEL они обратились к специалистам компании Xi Engineering, которая является сертифицированным консультантом COMSOL, специализирующимся в численном моделировании, анализе проектов, решении задач устранения шума и вибраций в промышленном оборудовании и других технологиях.



РИС. 1. Сверху вниз: преобразователи HPEL компании WAT; отдельная слоистая мембрана, вид готового преобразователя HPEL в сборе и в виде отдельных компонентов. Все слоистые мембраны изготовлены в Великобритании.

Доктор Бретт Мармо (Brett Marmo), технический директор компании Xi Engineering, руководил разработкой модели в программном обеспечении COMSOL Multiphysics®, использованном для исследования поведения HPEL. Программное обеспечение COMSOL® позволило Xi Engineering выполнить моделирование нелинейных эффектов с учетом асимметричной конструкции HPEL.

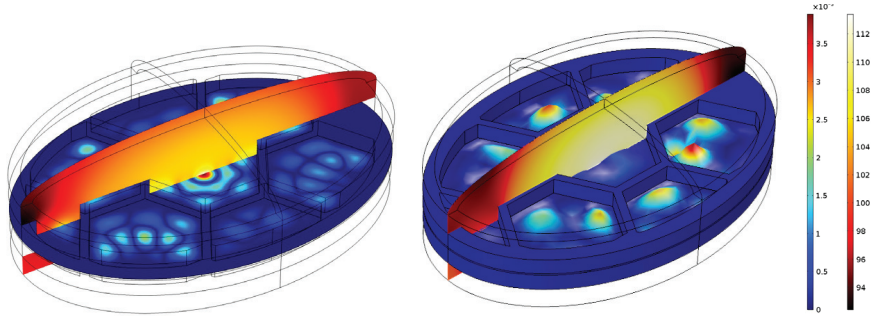


РИС. 2. График, показывающий уровень звукового давления (термическая цветовая шкала — Thermal) в дБ и смещение мембраны (радужная цветовая шкала Rainbow) в мм, полученный при решении полностью взаимосвязанной акустической и микромеханической модели в частотной области. Слева: решение для частоты 5000 Гц. Справа: решение для частоты 5250 Гц.

«Мы постарались упростить конструкцию первой модели для того, чтобы полностью посвятить себя работе над теми ее характеристиками, что оказывают непосредственное влияние на качество звука. Так, например, мы старались удержать основную гармонику как можно ниже, чтобы понять взаимодействие акустических колебаний и конструкции наушников, а также определить эксплуатационные характеристики HPEL на низкой частоте, — объясняет Мармо, рассказывая о предварительных расчетах прототипа. — Моделирование позволило выяснить, как приложенное напряжение воздействует на уровни сигнала. Это помогло нам понять исходные искажения звука».

Поскольку преобразователь является односторонним, значение электростатической силы изменяется в зависимости от положения вибрирующей мембраны, уменьшаясь пропорционально квадрату расстояния между мембраной и сеткой. Выяснив итоговое значение нелинейного искажения и спрогнозировав его воздействие, инженеры WAT смогли компенсировать возможные связанные искажения посредством электрических сигналов.

⇒ ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ HPEL

Более детальное моделирование, учитывающее механические, микромеханические и акустические процессы, позволило изучить воздействие изменения таких геометрических параметров, как размер ячеек проводной сетки, толщина провода, напряжение мембраны, зазор между мембраной и сеткой, а также влияние материальных свойств каждого компонента. Совместно со своими коллегами Мармо также исследовал воздействие различных смещений постоянного тока, которые зачастую ответственны за искажения на низких частотах. Кроме того, они проверили проводимость пластины, с тем чтобы определить участки

повышенного напряжения. После этого они исследовали термоакустические потери и смоделировали смещение мембраны на различных частотах средствами COMSOL (рис. 2).

«Мы выяснили, что подобный подход является единственно правильным способом моделирования плоских электростатических преобразователей, — продолжает Мармо. — В данном случае моделирование с использованием сосредоточенных параметров может описать ограниченный набор эксплуатационных характеристик устройства, например низкочастотную амплитудную характеристику. Значение одного параметра может быть превосходным, но он может стать причиной значительных искажений в другой части устройства. Мультифизическое моделирование позволяет охватить все параметры, влияющие на восприятие нами звука, такие как характеристику во временной области и нелинейное искажение».

Моделирование позволило инженерам WAT предельно точно отрегулировать параметры конструкции для оптимизации общей производительности устройства. В конечном итоге удалось спрогнозировать, какие именно факторы будут вызывать пики в частотном отклике, и сделать сигнал более плавным для большей точности звучания.

«Это позволило нам сэкономить значительное количество времени и денег, — говорит Робертс. — Мы перешли от еженедельного изготовления многочисленных прототипов вручную к простому изменению параметров в модели. Мы получили не только желаемую конструкцию, но и возможность оптимизировать характеристики преобразователей в соответствии с требованиями заказчика».

Группа под руководством Мармо сравнила каждую модель с данными физических измерений, предоставленными группой проектировщиков WAT. «Результаты моделирования оказались невероятно близки к физическим измерениям, — комментирует Дэн Анагнос (Dan Anagnos),

технический директор компании WAT. — Было захватывающе наблюдать, как модель "оживает", предоставляя нам точные данные о том, как поведет себя динамик в реальном мире».

⇒ ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ С ОГРОМНЫМ ПОТЕНЦИАЛОМ

Когда результаты моделирования прошли проверку и специалисты WAT остались ими довольны, пришло время для следующего шага. Теперь команде Xi Engineering предстояло передать контроль над дальнейшим моделированием в руки своих коллег из WAT. Имеющаяся в COMSOL среда разработки приложений позволила команде Мармо создать приложение на основе созданной модели, доступное в онлайн-режиме.

Интерфейс приложения позволяет пользователям изменять определенные исходные данные для того, чтобы проверить полученные изменения, например смещение постоянного тока, уровень сигнала переменного тока, характеристики материала, размер динамика, форму проволочной сетки и расположение разделителя (рис. 3). В приложении недоступны исходные параметры модели — вместо этого оно позволяет пользователям проводить дальнейшие тесты без необходимости обучения работе с ПО.

«Предоставление нашим коллегам из WAT приложения для моделирования избавило их от необходимости приобретения программного пакета и приема на работу опытного пользователя ПО, — говорит Мармо. — Благодаря приложениям наши заказчики могут взять процесс моделирования в свои руки. Им не нужно приходить к нам всякий раз, когда им потребуется внести небольшие изменения в конструкцию. Более того, это освобождает нас от разработки решений для задач, которые по сути являются вариациями уже решенных проблем, позволяя сосредоточиться на работе над новыми разработками». Специалисты компании Xi Engineering ожидают все более широкого применения подобных приложений в работе с другими заказчиками.

Компания WAT поступила точно так же, предоставив своим собственным заказчикам доступ к приложению, позволяя им подобрать преобразователь HPEL того типа, который лучше всего подойдет для их наушников. «Работа наших коллег из Xi Engineering была выше всяческих похвал. Они не только обладают глубоким пониманием предмета, но и помогли нам раскрыть всю сложность нашего изделия, — добавляет Робертс. — Интуитивно понятное приложение, разработанное специалистами Xi, стало для нас приятным дополнением. Не раскрывая данных, составляющих интеллектуальную собственность, мы даем нашим клиентам возможность самостоятельно испытывать и выбирать подходящие им решения».

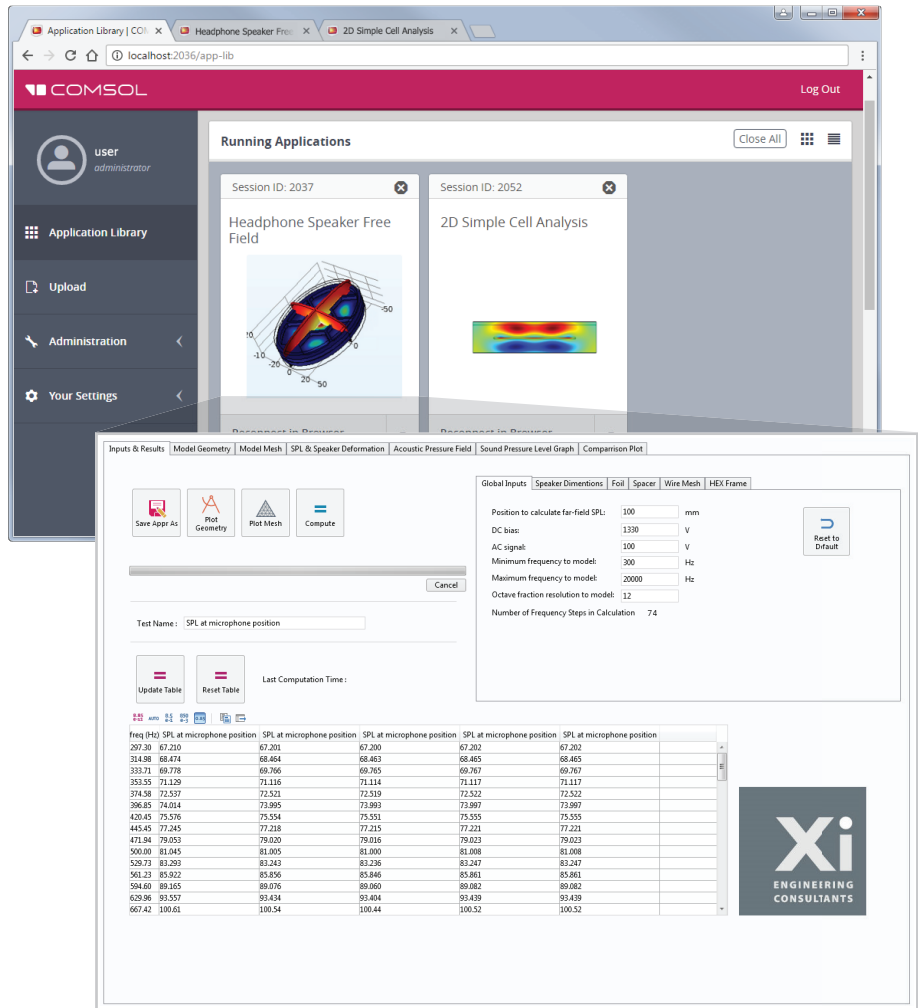


РИС. 3. На переднем плане: разработанное компанией Xi Engineering приложение позволяет инженерам изменять значения параметров, связанных с частотой, приложенной электрической нагрузкой, размерами динамика и характеристиками мембраны, разделителя и проволочной сетки. Полученные результаты демонстрируют уровни акустического давления для различных сценариев, смещение мембраны, частотную характеристику для различных смещений постоянного тока, а также сравнение с экспериментальными результатами. На заднем плане: доступ к приложению предоставляется через COMSOL Server™. Пользователи могут запускать его непосредственно в браузере.



Слева: Брет Мармо (Brett Marmo), технический директор, Xi Engineering. В центре: Мартин Робертс (Martin Roberts), генеральный директор, Warwick Audio Technology. Справа: Дэн Анагнос (Dan Anagnos), технический директор, Warwick Audio Technology.

КАК ПРИГОТОВИТЬ ИДЕАЛЬНЫЕ ВОЗДУШНЫЕ ХЛОПЬЯ

Группа исследователей из Корнеллского университета разработала математические модели вздутия зерен риса для применения в пищевой промышленности.

ЛЕКСИ КАРВЕР (LEXI CARVER)

Воздушные хлопья, которые в некоторых частях Азии уже много веков являются распространенной пищей, массово производятся в виде зерновых хлопьев и сухих завтраков. Сегодня их можно встретить на полках магазинов всего мира. Многим хорошо знаком приятный вкус рисовых хлебцев, различных видов воздушной кукурузы и хрустящих кусочков в шоколадных десертах.

Возможно, вам знакомо и менее приятное ощущение, когда, открыв упаковку, вы обнаруживаете, что воздушные хлопья слишком мягкие, вязкие, сухие или немного влажные. Из-за чего возникают подобные проблемы?

Например, что происходит с рисовым зерном при его вздутии? С точки зрения стороннего наблюдателя, зерно риса нагревается и затем взрывообразно изменяет форму, как попкорн (рис. 1).

Однако физические процессы, происходящие при вздутии рисовых зерен, включают в себя крайне сложные взаимодействия масс, моментов и переноса энергии, быстрое испарение воды, изменение фазовых состояний веществ, рост давления и пластическую деформацию.

Компании в пищевой промышленности потратили немало времени на то, чтобы влажность и структура воздушных хлопьев удовлетворяла потребителей. Они разработали такие условия

технологического процесса, при которых попадающиеся время от времени «резиновые» хлопья — это исключение, а не норма. Для применения методов приготовления зерен в промышленных масштабах процесс необходимо оптимизировать, чтобы обеспечить стабильность структуры, вкуса, содержания влаги, а в ряде случаев — и гарантировать безопасность пищевого продукта.

⇒ ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ОБРАБОТКИ

С помощью гранта программы исследований в области пищевой промышленности (AFRI) министерства сельского хозяйства США ученые из Корнеллского университета изучили процессы переноса вещества в деформируемой пористой среде, свойства которой зависят от фазового состояния, применительно к пищевым продуктам. Ашим Датта (Ashim Datta), профессор кафедры биологической и экологической инженерии, возглавил группу исследователей, разработавших модель динамики и поведения материалов при вздутии зерен пропаренного риса¹.

Помимо особенностей фазовых переходов, переноса энергии



РИС. 1. Пропаренный рис: обычный (сверху) и вздутый (внизу).

и механических процессов при вздутии, в этом обширном исследовании рассматривалось влияние предварительного помещения зерен в солевой раствор, а также температуры и начального уровня влажности на получение требуемой структуры конечного продукта.

Основной задачей была разработка общей методологии моделирования, применимой к самым различным процессам. «Мы создали основу для изучения физики процессов обработки пищи и применили ее к решению различных задач. Например, при жарке происходит ряд физических явлений, а при выпечке происходят несколько другие явления, но на той же общей основе», — поясняет профессор Датта. Он рассказывает о конкретных проблемах пищевой промышленности: «Потребителям требуется пища с консистенцией, как у жареной, но без нежелательных последствий для здоровья — требуется получить такие же свойства, но другим методом.

Поэтому предприятия пищевой промышленности рассматривают выпекание и «вздутие» в качестве альтернативы жарке. Они постоянно обновляют технологические процессы и выпускаемую продукцию. Когда что-либо изменяется, требуется определить новые оптимальные условия. Разработанная нами методология позволяет легко менять условия протекания процессов, оценивая их влияние на свойства конечного пищевого продукта.

Когда мы знаем, каким образом различные сочетания температуры и влажности приводят к получению определенных механических свойств в ходе определенного процесса, то можно установить, существуют ли другие процедуры, позволяющие получить

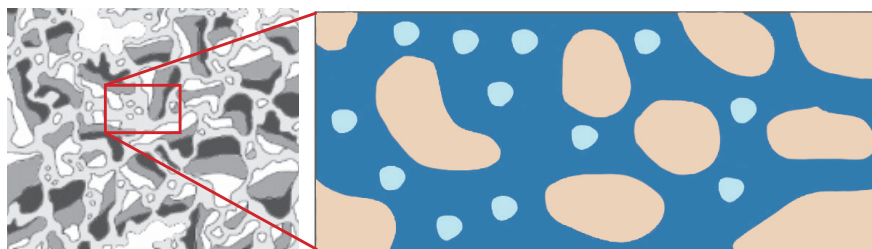


РИС. 2. Представление зерна риса в виде пористого упругопластичного твердого тела. Зерно содержит жидкую воду, подверженную капиллярной диффузии, конвекции и фазовым переходам (синий цвет); газ, состоящий из водяного пара и воздуха, образующий объемный поток и подверженный двойной диффузии и фазовому переходу (голубой цвет); твердый каркас из крахмала, испытывающий большие деформации (бежевый цвет).

пищевые продукты такого же качества. Мы хотели установить влияние различных процессов на консистенцию пищевого продукта, содержание влаги или масла и даже на возможные последствия для здоровья».

Одной из наиболее сложных проблем, с которыми столкнулась группа исследователей, был тот факт, что на свойства конечного продукта влияет огромное количество различных факторов. При нагреве зерен пропаренного риса до 200 °С происходит быстрое испарение воды в жидкой фазе, что приводит к сильному росту давления газа и фазовым превращениям в зерне. Происходит быстрый переход из твердого и хрупкого состояния к мягкому и податливому (эластичному), что позволяет зерну раздуться до окончательного размера. Время нагрева, а также исходное содержание воды и соли оказывают решающее влияние на результат.

⇒ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

Чтобы выявить взаимосвязь этих факторов и установить идеальные условия протекания процесса, Тушар Гулати (Tushar Gulati), в то время — студент профессора Датта, возглавил работу по раскрытию тайны вздутия рисовых зерен.

Он воспользовался программным обеспечением COMSOL Multiphysics® для моделирования взаимосвязанных механических и тепловых явлений, свойств материалов и поведения жидкости в зернах пропаренного риса при их вздутии.

«Это крайне сложная задача с точки зрения вычислений, — отмечает профессор Датта. — Наша группа изучала течения в пористых средах, многофазный перенос, механику твердого тела и теплопередачу. В ряде случаев учитывались электромагнитные явления при микроволновом нагреве».

Гулати разработал модель многофазной пористой среды для исследования изменений массы и момента, переноса энергии и значительного объемного расширения. Модель позволила проанализировать различные фазы твердого риса, воду в жидком и газообразном состоянии, а также режимы переноса влаги за счет капиллярного эффекта, двойной диффузии и перепада давления. Он предположил, что рис является

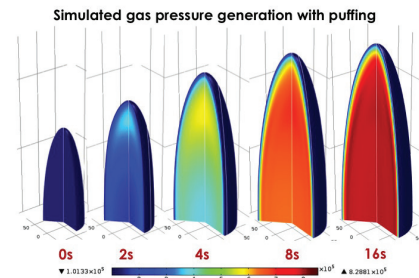
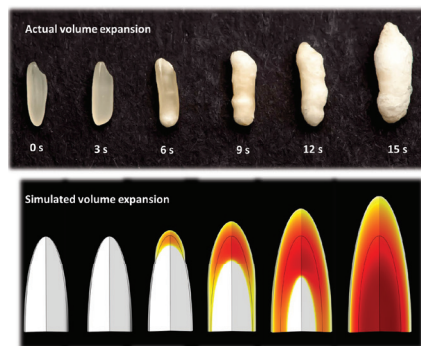


РИС. 3. Слева: измеренное и расчетное увеличение объема в течение 15-секундного процесса вздутия. Справа: моделирование роста давления газа.

упругопластичным материалом, и определил параметры его механических смещений и расширения.

С помощью моделирования было установлено пространственное и временное распределение температуры, содержания влаги, давления, скорости испарения, объемной деформации, пористости и уровней напряжений в различные моменты процесса вздутия (рис. 3 и 4).

Группа оценила качество расчетной модели путем реконструкции данных компьютерной микротомографии, на основании которых определялась скорость расширения и проводилась визуализация

образования микроструктуры. Гулати также обнаружил, что скорость расширения зависит от интенсивности испарения и собственной проницаемости представленной в модели твердотельной матрицы.

В итоге была получена комплексная модель, объединившая различные явления при вздутии, в том числе и фазовые переходы. Гулати объединил

модель переноса с моделью больших деформаций, а также выявил влияние различных уровней содержания соли на объемное расширение, испарение и свойства материала. Соль понижает температуру стеклования, то есть зерна риса вздуваются быстрее и при более низкой температуре.

«С помощью моделирования нам удалось найти начальное распределение свойств по объему рисового зерна, а также рассчитать их изменения в процессе нагрева, — добавляет профессор Датта. — Измерить эти характеристики в эксперименте невозможно. Модель

показывает нам, каким образом зерно риса расширяется, высыхает и сжимается».

Модель также позволила понять процесс образования пор. Формирование пор начинается на концах зерна и затем продолжается внутри (рис. 5).

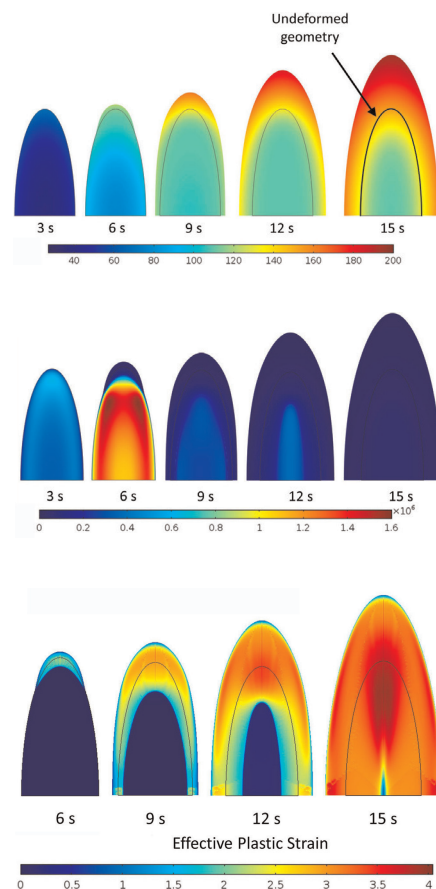


РИС. 4. Температура (вверху, в градусах Цельсия), первое главное растягивающее напряжение (в середине, в паскалях) и эффективная пластическая деформация (внизу) в ходе вздутия зерна.

“Приложения для моделирования открывают новые возможности для обучения. А в рамках учебного курса по безопасности пищевых продуктов студенты изучают междисциплинарный подход, который позволяет анализировать множество альтернативных сценариев”

— ПРОФЕССОР АШИМ К. ДАТТА,
КОРНЕЛЛСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На основании полученных результатов было установлено оптимальное количество соли, содержание влаги, температура и время нагрева, приводящие к получению идеальных воздушных рисовых зерен. Моделирование также выявило условия, при которых достигается максимальная степень расширения зерен.

⇒ ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПИЩЕВОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Ученые из группы профессора Датта не только разработали модель, но и внедрили методы численного моделирования для анализа безопасности пищевых продуктов. Данный вопрос весьма актуален для производителей пищевых продуктов, которым необходимо прогнозировать полезные свойства определенных видов продуктов, допустимые сроки хранения и обеспечивать безопасность технологических процессов.

Сегодня профессор Датта возглавляет проект, финансируемый Национальным институтом сельского хозяйства и пищевых продуктов министерства сельского хозяйства США, в рамках которого студенты применяют программное обеспечение COMSOL не только для проведения расчетов, но и для разработки приложений для выполнения расчетов, не требующих инженерных знаний. В Корнеллском университете доступ к этим приложениям предоставляется широкому кругу пользователей с помощью COMSOL Server™. Эти приложения приносят заметную пользу и студентам, и преподавателям, так как им не приходится непосредственно вкладывать средства в программное и аппаратное обеспечение.

«Приложения для моделирования открывают новые возможности для обучения, — отмечает профессор Датта. — В рамках учебного курса по безопасности пищевых продуктов студенты изучают междисциплинарный подход, который позволяет анализировать множество альтернативных сценариев». Созданное в Корнеллском университете приложение уже используется в нескольких университетах США.

Приложение позволяет технологам рассчитать время стерилизации консервированных продуктов в зависимости от размера банки (рис. 6). Пользователь приложения может ввести значение температуры и определить, сколько времени потребуется, чтобы содержимое банки заданного размера нагрелось до безопасной температуры. Приложение также выдает скорректированный график гибели бактерий, позволяющий подтвердить, что готовый продукт является безопасным для употребления в пищу.

Профессор Датта отмечает, что воздушный рис был только началом. Результаты исследования легко применить и к другим биологическим материалам, например к зернам кукурузы, или даже

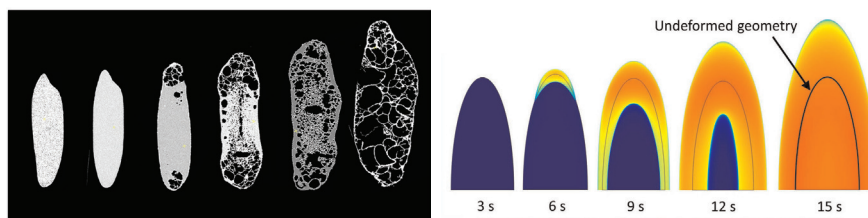


РИС. 5. Слева: компьютерная томография зерна риса в различные моменты процесса вздутия. Справа: результат моделирования с предсказанными профилями пористости.

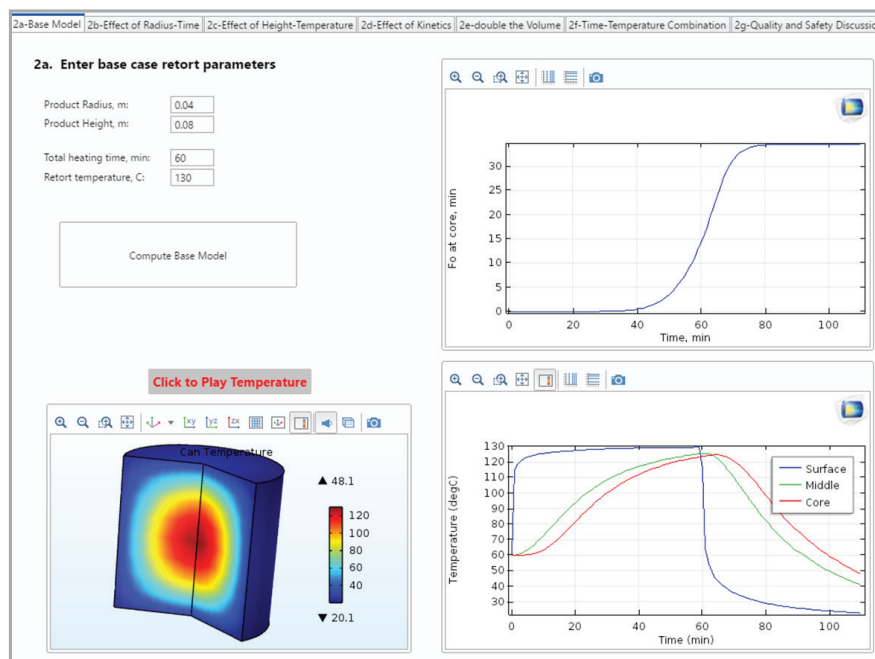


РИС. 6. Созданное студентами профессора Датта приложение для исследования консервированных продуктов. Пользователи могут изменять такие параметры, как размеры банки и время нагрева.

в совершенно других областях. «Знание физики и методов моделирования весьма полезно во многих отраслях, — говорит он. — Например, один из моих студентов изучал микроволновую сушку литейных форм для автомобильных каталитических конвертеров и применял методики моделирования, аналогичные тем, что мы разработали». Профессор Датта обучает новое поколение инженеров основам моделирования физических явлений и готовится решать новые задачи, возникающие в пищевой промышленности. ❖

ЛИТЕРАТУРА

1. Gulati, Tushar and Datta, Ashim K. "Coupled multiphase transport, large deformation and phase transition during rice puffing," *Chemical Engineering Science* 139 (2016) 75–98.



Любимой частью работы профессора Датта является его учебный курс в Корнеллском университете по использованию программного обеспечения COMSOL для моделирования биомедицинских процессов. Система способна полностью моделировать взаимосвязи физических явлений, например протекающих при вздутии зерна риса. Поэтому профессор Датта считает, что COMSOL — это отличное средство, позволяющее студентам осваивать моделирование и физические процессы в различных областях биомедицинской науки.

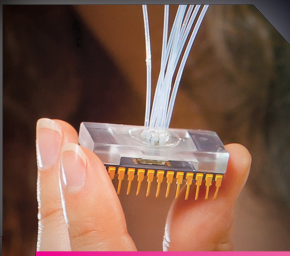
В этом году Датта будет выступать на семинаре в The International School on Modeling and Simulation (Международной школе моделирования). Эта краткосрочная школа была создана благодаря усилиям специальной группы по виртуализации в пищевой технологии.

Connect on social media:
#CTF2017

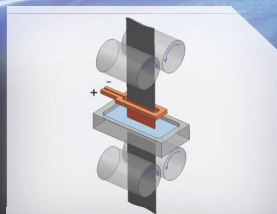


CAN YOU DESIGN A BETTER TOMORROW?

THEY DID.



Life-Saving Bacterial Detection



High Performance Armor



Oil Change Transformation



Grab-and-Go Booster Seat

NOW IT'S YOUR TIME TO SHINE!
ENTER TO WIN \$20,000 GRAND PRIZE
createthefuturecontest.com

Create
THE
Future

DESIGN CONTEST 2017

PRINCIPAL SPONSORS



ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ УСКОРЯЮТ СОЗДАНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

Инженеры компании Cornell Dubilier используют приложения COMSOL, чтобы проводить расчеты и улучшать специализированные конструкции конденсаторов. Упрощая работу со сложной исходной вычислительной моделью, эти приложения позволяют проектировщикам и инженерам-технологам быстро изучать новые конструкции на месте.

САРА ФИЛДС (SARAH FIELDS)

Конденсаторы повсеместно используются в современных электрических устройствах, в том числе для прикладных задач, связанных с экстремальными условиями. В зависимости от прикладной задачи различаются и требования к конденсаторам. Конденсатор должен выдавать определенную мощность, работать в заданном диапазоне температур или изготавливаться из определенных материалов.

Компания Cornell Dubilier Electronics, один из крупнейших производителей конденсаторов в мире, разрабатывает конденсаторы для самых сложных прикладных задач военной и аэрокосмической промышленности, в том числе для реактивных истребителей и радарных систем, а также мирных применений, таких как ветрогенераторы и солнечная энергетика. Инженеры компании Cornell Dubilier применяют математическое моделирование

и специализированные приложения для моделирования, чтобы улучшить конструкцию конденсаторов специального назначения.

«С помощью COMSOL Multiphysics и среды разработки приложений я создаю высокоточные мультифизические модели и превращаю их в приложения. Мои коллеги из других отделов используют эти приложения, чтобы выбрать лучшую конструкцию из различных вариантов», — поясняет Сэм Парлер (Sam Parler), руководитель исследований в компании Cornell Dubilier.

⇒ КОГДА СТАНОВИТСЯ ЖАРКО

В зависимости от прикладной задачи, для которой они созданы, конденсаторы компании Cornell Dubilier могут включать такие элементы, как электролитическая обкладка из алюминиевой фольги и целлюлозных сепараторов, электростатические обкладки из смещенных пленок металлизированного диэлектрика или чередующиеся слои из металлической фольги и диэлектрика, такого как слюда (рис. 1).

Проектировщики конденсаторов уделяют много внимания проблеме тепловыделения. Ток, проходящий через алюминиевую фольгу в обкладках, приводит к джоулеву нагреву, который необходимо учитывать при проектировании, чтобы точно знать распределение температуры внутри конденсатора. Тепло сильно сокращает срок службы конденсатора — при превышении максимально допустимой температуры на каждые 6–10 градусов он уменьшается вдвое. Инженеры компании Cornell Dubilier применяют моделирование, чтобы снизить выделение тепла и оптимизировать его рассеяние.

Для этого сложно устроенные материалы, из которых состоит конденсатор, должны быть достоверно представлены в модели. Конденсатор может состоять из шести различных



РИС. 1. Алюминиевые электролитические конденсаторы. Обкладки состоят из алюминиевой фольги и целлюлозных сепараторов и демонстрируют анизотропную теплопроводность.

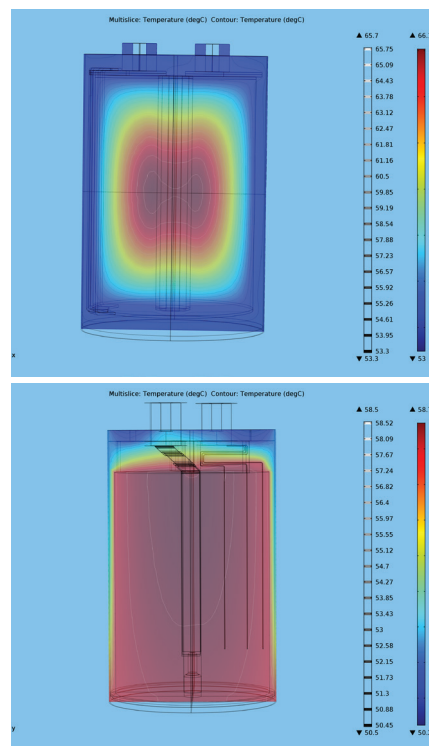


РИС. 2. Сравнение температур в конденсаторе на основе пленок металлизированного полипропилена (вверху) и в алюминиевом электролитическом конденсаторе (внизу). Оба конденсатора имеют примерные размеры 76–120 мм и рассеивают 5 Вт тепла в окружающую среду при температуре 45 °С.

материалов, в том числе с анизотропными свойствами. В одной из конструкций обкладки состоят из целлюлозных сепараторов и алюминиевой фольги. Такие обкладки демонстрируют анизотропную теплопроводность — на два порядка выше в осевом направлении по сравнению с радиальным.

Благодаря COMSOL Multiphysics® Парлер может точно рассчитывать распределение температуры внутри таких конденсаторов с помощью гибких инструментов, позволяющих напрямую задать тензор теплопроводности. Например, диагональный тензор теплопроводности для обычного конденсатора с направленной вдоль

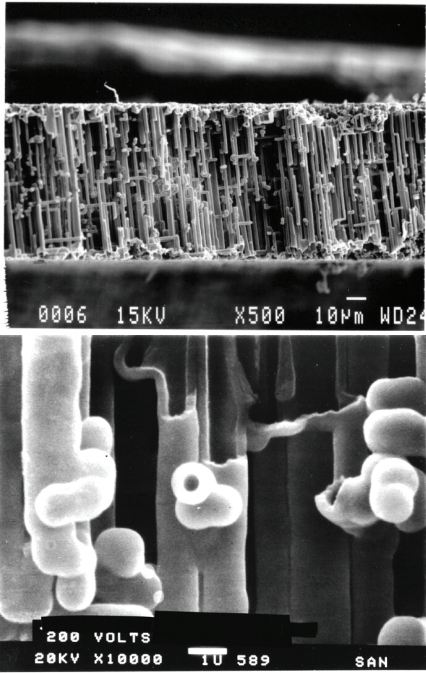


РИС. 3. Коаксиальная микроструктура больших алюминиевых электролитических конденсаторов. Диэлектрик — оксид алюминия (Al_2O_3), выращенный анодированием извилистой поверхности глубоко протравленной алюминиевой фольги. На этих изображениях алюминий, окружающий диэлектрические трубки из оксида алюминия, удален путем растворения.

разработанных в компании. Когда Парлер проектировал большой алюминиевый электролитический конденсатор, ему понадобилось описать комплексное сопротивление диэлектрического слоя оксида алюминия (Al_2O_3) со сложной микроструктурой. Диэлектрик изготавливался анодированием извилистой поверхности глубоко протравленной алюминиевой фольги (рис. 3).

Точечная нульмерная модель электрической цепи, выполненная в другом программном пакете, позволяла воспроизвести частотную характеристику, но не давала возможности промоделировать переходный режим из-за ошибок причинности, связанных с ограничениями внутренних алгоритмов обратного преобразования Лапласа.

Парлер нашел для клиента правильное решение для переходного состояния с помощью метода оптимизации формы в программном пакете COMSOL. Он начал с модели одиночной цилиндрической поры, заполненной электролитом, поддал возбуждение известной формы на вход и использовал разреженный нелинейный

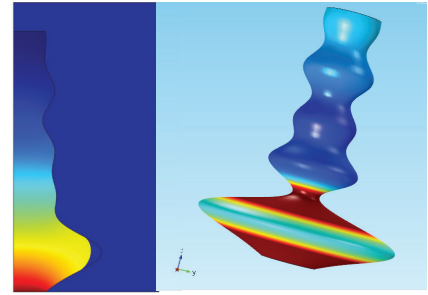


РИС. 4. Методы оптимизации формы позволяют по-новому подойти к изучению электрических свойств диэлектрического материала с коаксиальной микроструктурой. Показана оптимизированная микроструктура.

решатель задач оптимизации (SNOPT), имеющийся в составе ПО, чтобы найти решение нелинейной задачи оптимизации. В этой задаче форма осесимметричной поры варьировалась, чтобы найти наилучшее соответствие с экспериментальными данными о комплексном сопротивлении.

“С помощью COMSOL Multiphysics® и среды разработки приложений я создаю высокоточные мультифизические модели и превращаю их в приложения. Мои коллеги из других отделов используют эти приложения, чтобы выбрать лучшую конструкцию из различных вариантов”

— СЭМ ПАРЛЕР, РУКОВОДИТЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЙ В КОМПАНИИ CORNELL DUBILIER

оси z цилиндрической электролитической обкладкой можно считать ортотропным со значениями {1,1,100} [Вт/м²/К].

В одном из случаев Парлер рассматривал два силовых конденсатора схожего размера и со схожим номинальным пульсирующим током, но с совершенно разными конструкциями: конденсатор на основе пленок металлизированного полипропилена (пластика), а второй — алюминиевый электролитический конденсатор (рис. 1 и 2).

У пленочного конденсатора (сверху) осевая теплопроводность оказалась гораздо меньше, чем у алюминиевого (снизу). Используя мультифизическое моделирование, Парлер оценил, насколько сильнее пленочный конденсатор нагревается по сравнению с алюминиевым, если они рассеивают одинаковую мощность.

⇒ ИЗУЧЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ С ПОМОЩЬЮ ОПТИМИЗАЦИИ ФОРМЫ

Компания Cornell Dubilier разрабатывает конденсаторы, основанные на передовых технологиях, поэтому иногда требуется изучать комплексное сопротивление (импеданс) новых материалов,

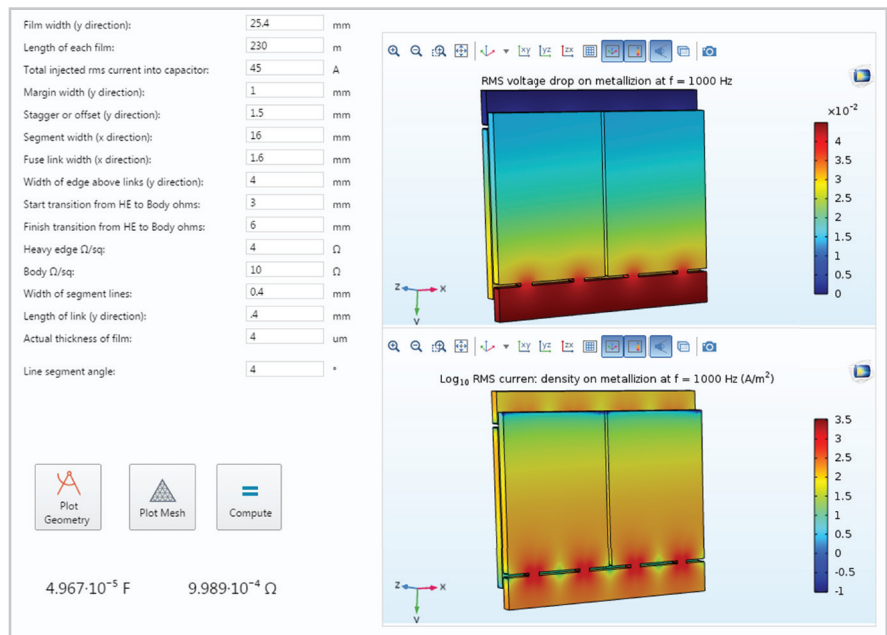


РИС. 5. Приложение для проектирования мощного пленочного конденсатора рассчитывает емкость и сопротивление.

Полученная геометрия (рис. 4) показала, что программный пакет может точно воспроизводить временную характеристику импульсного тока, измеренного экспериментально. На основе проверенной таким образом математической модели можно выполнять дальнейшее проектирование.

⇒ СЕМЕЙСТВО ПРИЛОЖЕНИЙ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

После того, как Парлер и его команда создали модели в COMSOL и изучили свои конструкции, они превратили модели в приложения для моделирования, которыми могут пользоваться инженеры-технологи и которые можно развертывать на производственных объектах в целях упрощения процесса проектирования.

Так, в интерфейсе приложения для моделирования мощного пленочного конденсатора проектировщик может ввести ширину пленки (обычно несколько сантиметров), длину пленки, поверхностные сопротивление и положение переходной области, чтобы определить емкость и сопротивление сегмента металлической пленки (рис. 5). Масштабируя результат, можно получить емкость и сопротивление всей обкладки для первоначальной валидации конструкции, созданной инженерами.

Другое приложение вычисляет плотность энергии для металлической пленки в цилиндрическом конденсаторе. Кроме того, приложение рассчитывает распределение температуры в сердцевине конденсатора, на разъемах и выходах, учитывая условия эксплуатации у клиента: пульсирующий ток, температуру окружающей среды и скорость потока воздуха (рис. 6).

Третье приложение рассчитывает эффективную последовательную индуктивность (ESL) пленочного конденсатора с одним выводом (рис. 7). Пользователь может менять геометрические параметры: диаметр контакта, высоту контакта, расстояние между контактами, ширину вывода, диаметр обкладки и наружный диаметр сердцевины. Модель, лежащая в основе приложения, использует методы электромагнитного моделирования, реализованные в COMSOL, и исследование в частотной области. Эффективная последовательная индуктивность — ключевой параметр при проектировании любого конденсатора, напрямую связанный с его рабочими характеристиками.

⇒ ПРИЛОЖЕНИЯ ОПРЕДЕЛЯЮТ БУДУЩЕЕ ПРОИЗВОДСТВА

Мультифизическое моделирование позволило команде Парлера точно спрогнозировать рабочие характеристики своих конденсаторов, ускорить процесс разработки и обеспечить надежную работу устройств.

Приложения для моделирования, основанные на моделях COMSOL,

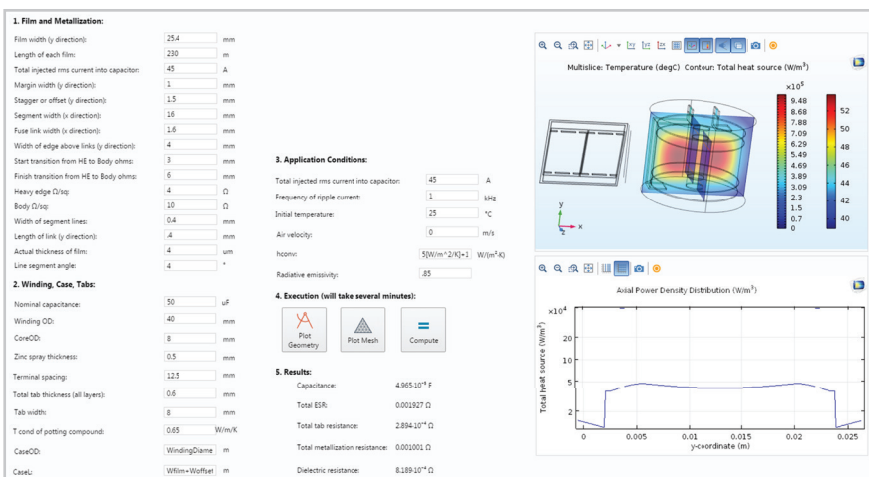


РИС. 6. Приложение для расчета распределения температуры в сердцевине конденсатора и плотности энергии в пленке цилиндрического конденсатора с выводами и контактами.

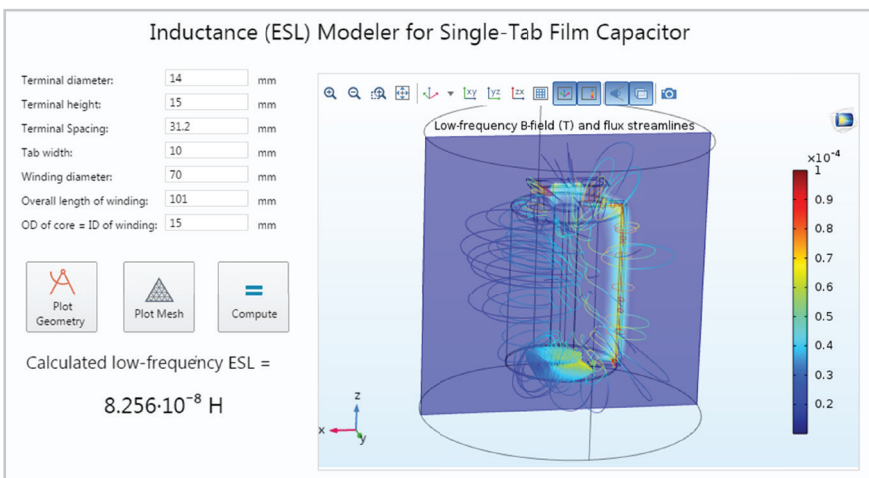
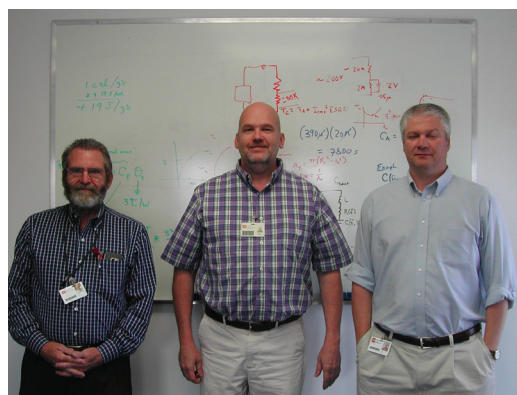


РИС. 7. Приложение рассчитывает эффективную последовательную индуктивность пленочного конденсатора с одним выводом.

позволили другим проектировщикам и инженерам-технологам настраивать ключевые параметры модели с помощью простого пользовательского интерфейса. Они смогли проверить, насколько хорошо работают их конденсаторы и как на их работу влияют изменения в конструкции. Так возможности моделирования используются в процессе проектирования и производства.

Парлер подводит итоги: «Мультифизические модели и приложения для моделирования упростили проектирование конденсаторов и ускорили разработку специализированных конденсаторов для наших клиентов по всему миру». ❖



Слева направо: Дэвид Ли (David Leigh), научный сотрудник; Сэм Парлер, руководитель исследований; Трент Бейтс (Trent Bates), специалист по конденсаторам (сотрудники компании Cornell Dubilier).



МОТОЦИКЛЫ MAHINDRA. ЧТО СКРЫВАЕТСЯ ЗА РЕВОМ МОТОРОВ?

Для того, чтобы обеспечить соответствие двигателей своих мотоциклов нормативам по шуму и при этом сохранить уровень удовлетворенности клиентов, компания Mahindra Two Wheelers использовала методы мультифизического моделирования.

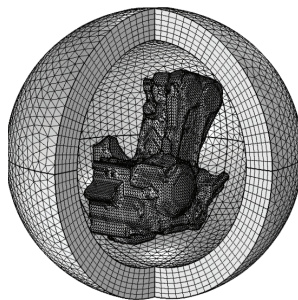
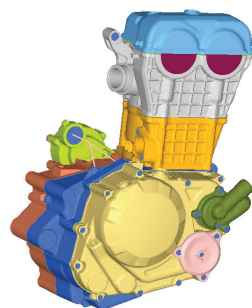
ВАЛЕРИО МАРРА (VALERIO MARRA)

Индийская компания Mahindra Two Wheelers производит широкий ассортимент мопедов, мотороллеров и мотоциклов для внутреннего рынка. Благодаря внедрению методов численного моделирования на раннем этапе разработки водители и пассажиры могут наслаждаться превосходной динамикой и экономичностью мототехники и путешествовать с комфортом даже по самым плохим дорогам Индии. Для исследования шумовых и вибрационных характеристик двигателя, систем впуска и выпуска в компании Mahindra прибегли к мультифизическому моделированию.

Знания, полученные инженерами в результате численного моделирования, позволили улучшить конструкцию двигателя и добиться желаемых уровней шума. «Программное обеспечение COMSOL помогло нам существенно снизить количество итераций на этапе разработки, экономия таким образом наше время», — говорит Никет Бхатия (Niket Bhatia), заместитель руководителя отдела R&D, Mahindra.

⇒ ДОСТИЖЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО УРОВНЯ ШУМА

Двигатель внутреннего сгорания содержит множество узлов и компонентов, которые могут быть источником шума. Впуск воздуха, сгорание топливовоздушной смеси, выпуск отработанных газов, работа поршней, зубчатых колес и клапанного механизма — все это является источником шумового излучения. Шум, сопровождающий сгорание топливовоздушной смеси, вызван вибрациями конструкции в результате быстрого увеличения давления в цилиндрах. Через подшипники такие вибрации передаются от коробки передач



на картер двигателя, создавая шум.

Исследование акустических характеристик двигателя путем физических испытаний требует значительных материальных и временных затрат. Команда инженеров компании Mahindra решила дополнить физические испытания акустическим моделированием для того, чтобы изучить, как именно конструкция двигателя может влиять на уровень производимого им шумового излучения. Задача исследователей состояла в том, чтобы найти наиболее шумные узлы и компоненты двигателя, а также внести изменения в конструкцию для снижения его уровня.

С помощью ПО COMSOL Multiphysics® рабочая группа выполнила расчет акустического излучения одноцилиндрового двигателя внутреннего сгорания (ДВС) во время его работы. Расчетная область вокруг двигателя была ограничена снаружи с помощью идеально согласованного слоя (PML). Идеально согласованные слои

РИС. 1. Вверху: геометрическая САД-модель двигателя. Внизу: трехмерная модель с наложенной сеткой, окруженная идеально согласованным слоем (PML).

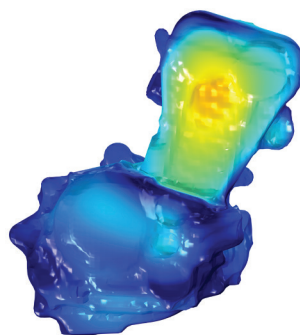
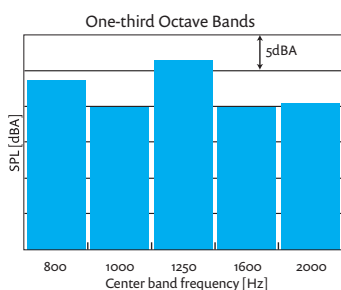


РИС. 2. Слева: график третьоктавной полосы частот. Справа: трехмерный поверхностный график с результатами расчета уровня звукового излучения.

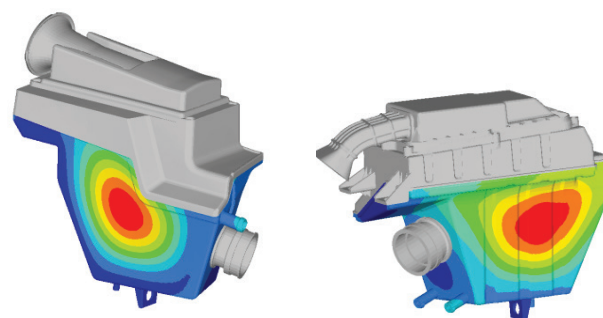


РИС. 3. Конструкция воздушного фильтра. Слева: Исходная конструкция. Справа: модифицированная конструкция, оснащенная ребрами, улучшающими акустическую передаточную функцию.

поглощают испускаемые волны практически без отражений (рис. 1). Это обеспечивает точность и корректность получаемых результатов, позволяя уменьшить размер вычислительной области.

Команда решила изучить диапазон частот от 800 Гц до 2000 Гц, поскольку физические испытания показали, что именно на эту часть акустического спектра приходится большая часть шумового излучения, создаваемого двигателем во время работы. Подобный выбор позволил инженерам сэкономить вычислительные ресурсы, а также лучше понять, какие участки конструкции мотоцикла ответственны за большую часть испускаемого им шума.

Полученные результаты послужили отправной точкой для дальнейшего изучения уровня звукового давления, а также стали основанием для предложенных изменений в конструкции головки и блока цилиндра: увеличения высоты ребер и толщины стенок, усиления места крепления (рис. 2). Регулировка данных параметров позволила снизить уровень звукового давления в заданном частотном диапазоне.

⇒ СНИЖЕНИЕ ШУМОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СИСТЕМЫ ВПУСКА

Системы впуска и системы выпуска в автомобилях и мотоциклах производят немало шума. Основным фактором, влияющим на уровень шума системы впуска, является шум, возникающий в корпусе воздушного фильтра, обычно изготовленном из пластмассы. Поэтому был выполнен анализ акустической передаточной функции пластмассовых стенок корпуса воздушного фильтра. Для улучшения данной функции конструкция корпуса воздушного фильтра была изменена путем добавления ребер (рис. 3). Это позволило снизить уровень шума, производимого воздушным фильтром (рис. 4).

⇒ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАТУХАНИЯ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ЗВУКА ГЛУШИТЕЛЯ

Требования стандартов зачастую противоречат желанию клиентов получить громкий рычащий звук выхлопа, который воспринимается большинством как важный показатель мощности мотоцикла. Ограничения допустимого уровня шума заставили инженеров Mahindra искать способ усилить рычание глушителя в низкочастотном диапазоне, одновременно уменьшив громкость высокочастотных звуков.

Поскольку ослабление звука выхлопа является основной функцией глушителя, необходимо дополнительно учитывать такие факторы, как возможность обеспечения малого обратного давления и соответствие нормативам по шуму. Характеристики глушителя системы выхлопа в автомобилестроении определяются следующими тремя параметрами: затуханием, вносимыми потерями и уровнем излучаемого шума. Затухание является наиболее важным из них и зависит исключительно от

конструкции глушителя, а не от источника давления. Основной задачей, которая стояла перед командой инженеров, было спрогнозировать затухание для мотоциклетного глушителя, после чего оптимизировать его уровни в определенном диапазоне частот.

Расчет выполнялся для глушителя одноцилиндрового мотоциклетного мотора. Расчет затухания для глушителя проводился с использованием программного обеспечения COMSOL Multiphysics. С помощью инструментов модуля Акустика в соответствующих местах были заданы такие граничные условия, как непрерывность и жесткая для звука стенка (sound hard wall).

Характеристики перфораций в трубках задавались на основе данных о пористости данного участка с помощью встроенной модели переходного полного сопротивления. Необходимые для расчета исходные данные включают в себя пористость участка, толщину экрана и трубки, а также диаметр отверстий. Для пористых материалов, например стекловаты, аэродинамическое сопротивление определяется с помощью пороакустической модели, входящей в состав программного пакета. В качестве исходных данных для зоны впуска также было использовано единичное давление, а на границах впуска и выпуска было применено граничное условие излучения/поглощения для плоской волны.

На основании полученных результатов в конструкцию были внесены изменения — увеличена длина трубы, размещенной внутри глушителя. Глушитель новой конструкции позволил команде выполнить задачу по уменьшению затухания на низких частотах (рис. 5). В результате было достигнуто требуемое

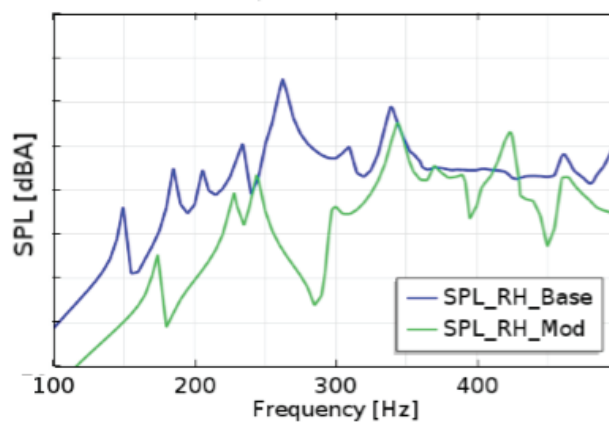


РИС. 4. Результаты моделирования, демонстрирующие сокращение шума модифицированного корпуса воздушного фильтра.

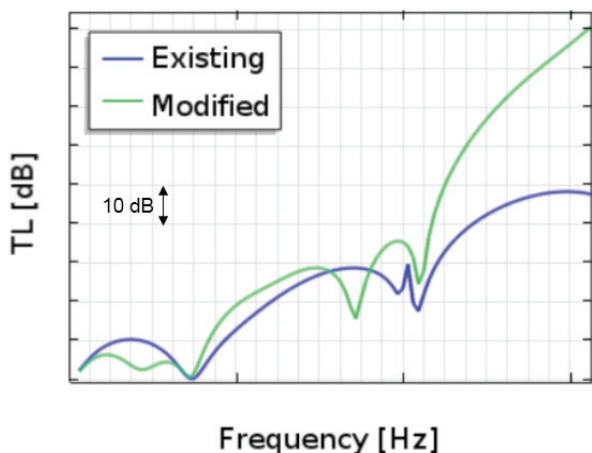


Рис 5. Сравнение затухания для различных конструкций. Модернизированная конструкция характеризуется пониженным затуханием на низких частотах и повышенным на высоких. Модифицированная конструкция обеспечивает желаемый рычащий звук выхлопа и соответствие нормативам.

“С помощью среды разработки приложений мы создали приложение для моделирования, которое сравнивает файлы результатов расчета, а также строит графики уровня звукового давления, экономя огромное количество времени”

— УЛЬХАС МОХИТЕ (ULHAS MOHITE), РУКОВОДИТЕЛЬ R&D ОТДЕЛА, MAHINDRA

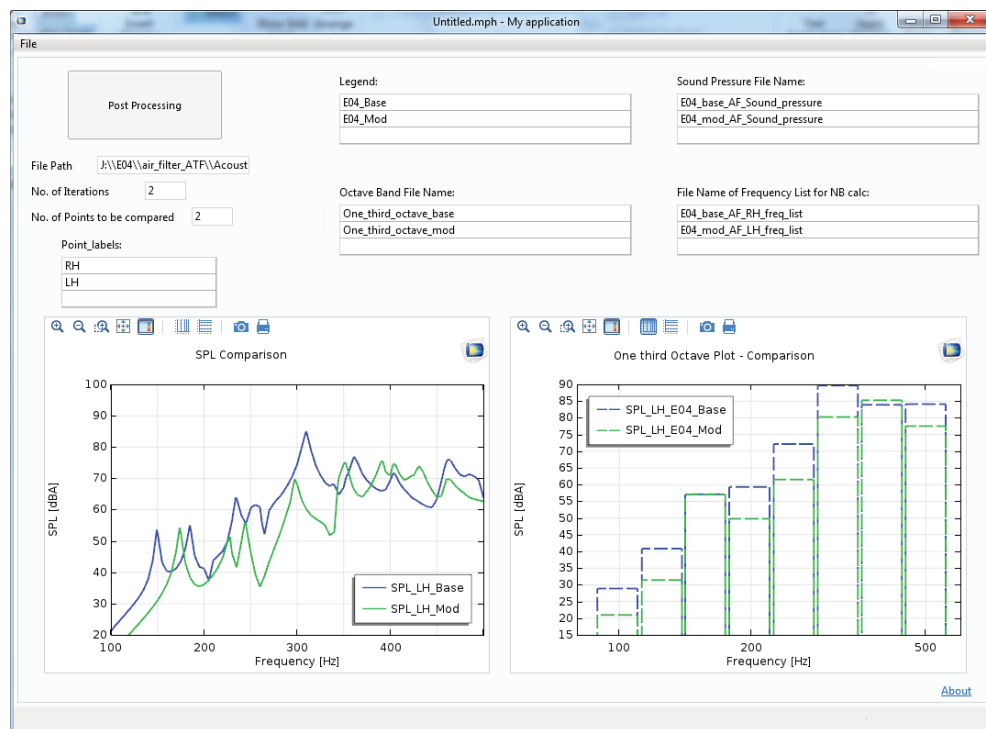


Рис 6. С помощью среды разработки приложений инженерам компании Mahindra удалось создать простое в использовании приложение, позволяющее сравнивать расчетные данные и строить графики уровня звукового давления.

увеличение уровня шума на низких частотах, так называемое «рычание».

⇒ **ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ НА РАННИХ ЭТАПАХ РАЗРАБОТКИ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПОЗВОЛЯЕТ СЭКОНОМИТЬ ВРЕМЯ И ДЕНЬГИ**

«Лично мне понравилась как гибкость программного обеспечения в целом, так и возможности входящих в его состав инструментов, например COMSOL API, — говорит Ульхас Мохите (Ulhas Mohite), руководитель отдела R&D, Mahindra. — Это позволило нам автоматизировать процессы, используя Java-скрипты, которые, например, при выполнении анализа акустических характеристик позволили нам использовать разные сетки для различных частотных точек и найти компромисс между точностью моделирования и затрачиваемым на вычисления временем. Также благодаря этому мы могли автоматически экспортировать необходимые данные, такие как графики уровня звукового давления на поверхности или данные об уровне звукового давления в дальней зоне, прямо во время расчета. Это помогло нам сэкономить массу времени по сравнению с постобработкой и экспортом данных вручную».

Также Мохите назвал невероятно полезной среду разработки приложений, входящую в состав программного пакета COMSOL. «С помощью среды разработки приложений мы создали приложение для моделирования (рис. 6), которое сравнивает

файлы результатов расчета, а также строит графики уровня звукового давления, экономя огромное количество времени».

Результаты расчета очень хорошо коррелировали с данными физических испытаний. Используя средства моделирования, инженеры компании Mahindra смогли на раннем этапе внести в конструкцию необходимые изменения, руководствуясь имеющимися результатами расчета. Это помогло сэкономить материальные и временные ресурсы компании, необходимые для эффективной разработки изделия. «Верифицированные на экспериментальных данных модели помогли нам двигаться в правильном направлении для поиска наиболее подходящего решения проблем шума мотоциклов», — подводит итог Бхатия. ✦

ЛИТЕРАТУРА

1. Mohite, U., Bhatia, N., and Bhavsar, P., "An Approach for Prediction of Motorcycle Engine Noise under Combustion Load," SAE Technical Paper 2015-01-2244, 2015, doi:10.4271/2015-01-2244. (<http://papers.sae.org/2015-01-2244/>)
2. Reducing Motorcycle Engine Noise with Acoustics Modeling, COMSOL Blog, <https://www.comsol.com/blogs/reducing-motorcycle-engine-noise-with-acoustics-modeling/>

Оптимизация защитных стекол на этапе производства

Компания Kornerstone Materials Technology (КМТС) оптимизирует процессы производства стекла, используя мультифизическое моделирование, и способствует совместной работе разных отделов над приложениями для моделирования.

ВАЛЕРИО МАРРА (VALERIO MARRA) И ЛЕКСИ КАРВЕР (LEXI CARVER)

Сегодня смартфоны и планшеты стали неотъемлемым атрибутом повседневной жизни — работы, учебы, отдыха и развлечений. Экран любого мобильного устройства закрыт специальным стеклом. Оно защищает экран, хорошо пропускает свет и подчеркивает элегантный внешний вид устройства.

Защитное стекло — высокотехнологичный продукт, который стоит в десятки и сотни раз дороже обычного силикатного стекла. Высокая цена обусловлена чрезвычайно сложным процессом производства. В различных условиях эксплуатации защитное стекло ведет себя по-разному, что еще больше усложняет его изготовление. Компания, разрабатывающая и производящая стекло, должна учитывать все эти особенности, чтобы получить качественный продукт.

Компания Kornerstone Materials Technology Co., Ltd. (КМТС) специализируется в разработке и производстве дисплеев, компонентов сенсорных экранов и высокотехнологичных материалов (рис. 1). «Мы производим защитные стекла для электронных устройств — смартфонов и планшетов, — объясняет Фрэнк Хун (Frank Hong), руководитель отдела исследований в КМТС. — КМТС использует мультифизическое моделирование для оценки и оптимизации процессов производства стекла. Так мы отвечаем на растущие запросы наших клиентов и справляемся с задачами, которые стоят перед индустрией сенсорных экранов».

⇒ МУЛЬТИФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СТЕКЛА

В производстве экранных стекол преобладают три основных метода: плавающей ленты, вертикального вытягивания и сплавления. Чаще всего из этих трех используют метод сплавления. Сверхтонкие листы стекла в этом процессе формируются в воздухе при слиянии

двух потоков расплавленного стекла, переливающихся через борт (слева на рис. 2). Так получают стекло с плоской поверхностью, которое можно разрезать без стекольной пыли. Его не требуется шлифовать или полировать, чтобы избавиться от неровностей поверхности.

Компания КМТС первой начала производить высокоглиноземистые защитные стекла и стала лидером в стране по технологии сплавления. «Благодаря нашему уникальному технологическому процессу на стекле не остается ни следов, ни повреждений, — говорит Хун. — Поверхность стекла гладкая, чистая и без изъянов, что и требуется на рынке потребительской электроники».

В процессе сплавления вязкое и однородное расплавленное стекло течет из плавильной печи через платиновый канал в лодочку из жаростойких материалов (слева на рис. 2). Расплавленное стекло под действием силы тяжести перетекает через оба края лодочки (справа на рис. 2). В нижней части лодочки потоки сливаются и продолжают течь вниз вдоль пластины, охлаждаясь на воздухе и образуя сверхтонкий лист стекла.

Толщина листа определяется скоростью входящего потока и направляющими пластинами, которые также определяют и выработку стекла. Температура влияет

на вязкость стекла и скорость потока, поэтому изменения температуры тщательно отслеживают, чтобы избежать деформаций. Полное описание процесса изготовления стекла — мультифизическая задача, сочетающая гидродинамику, механику твердого тела, теплопередачу и электродинамику.

Инженеры компании КМТС оценивают эффективность электрического нагрева плавильных печей с помощью мультифизических моделей. Кроме этого, они используют основанные на своих моделях приложения, чтобы в реальном времени моделировать процессы изготовления стекла. Полученные данные учитываются в технологических процессах, используемых производственным отделом.

Мультифизические модели, созданные в COMSOL Multiphysics®, сочетают явления гидродинамики, механики конструкций, теплопередачи и электродинамики. Группа создает гидродинамические модели и модели теплопередачи в расплавленном стекле, чтобы рассчитать распределение толщины готового стекла перед охлаждением и напряжения, создаваемые в процессе формовки (рис. 3). «В программном пакете мы можем вводить свои материальные уравнения, менять скорость входного потока и уклон лодочки, а также



РИС. 1. Защитные стекла сложной формы позволяют конструкторам создавать лучшие экраны для смартфонов и планшетов.

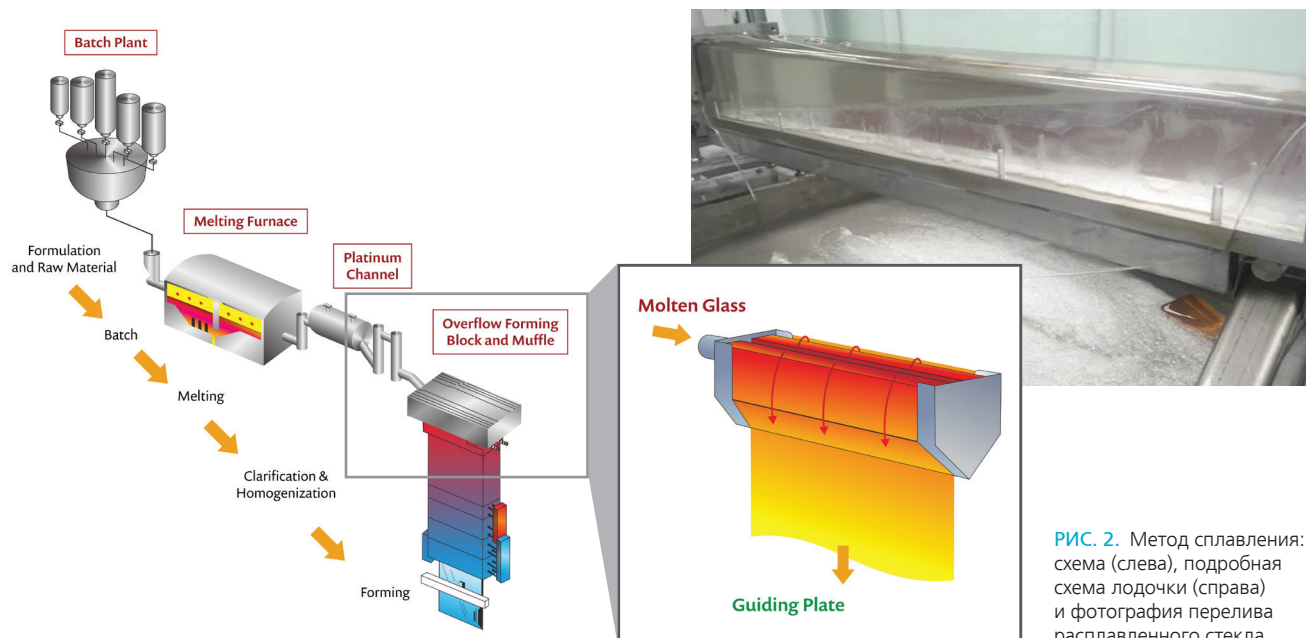


РИС. 2. Метод сплавления: схема (слева), подробная схема лодочки (справа) и фотография перелива расплавленного стекла.

оптимизировать условия процесса до начала массового производства», — объясняет Хун.

Результаты мультифизического моделирования позволяют оценить качество листов стекла, учитывая их толщину, однородность, гладкость и количество дефектов, а также оптимизировать оборудование и технологические условия. «Программное обеспечение COMSOL позволяет решать мультифизические задачи с требуемым уровнем специализации», — говорит Хун.

⇒ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАГРЕВА

Когда расплавленное стекло соприкасается с жаропрочными материалами лодочки, оно поглощает воздух. Так в готовом стекле могут появиться пузырьки воздуха, а его вес может измениться. Платиновый канал исправляет этот недостаток, позволяя очищать, гомогенизировать, перемешивать расплавленное стекло и изменять его температуру до попадания на лодочку. Каждый отрезок канала может пропускать расплавленное стекло с различной вязкостью благодаря регулированию температуры в реальном времени с помощью трубчатого электронагревателя переменного тока.

В канале расположены трубчатые нагреватели двух видов: прямая трубка со стенками переменной толщины и коленчатая трубка со стенками постоянной толщины (рис. 4). «С помощью COMSOL Multiphysics мы рассчитали распределение плотности тока на стенках

трубок и нагрев, производимый трубками обеих конструкций», — говорит Хун.

Мультифизическая модель учитывает джоулев нагрев, связывая электрические токи и теплопередачу. Уравнения, описывающие этот процесс, с помощью метода конечных элементов записываются в дискретном виде, после чего частотно-стационарное исследование позволяет найти решение. Результаты вычислений нагрева переменным током и распределения поверхностной плотности тока показаны на рис. 4. Эти данные показали группе Хуна различия в нагреве трубками двух видов. Экспериментальная проверка показала, что результаты моделирования хорошо согласуются с реальными измерениями.

⇒ ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОМОГАЮТ РАБОТАТЬ ВМЕСТЕ

«Чтобы создавать специализированные модели, требуется и опыт в моделировании, и знание физики моделируемой системы», — объясняет Хун. Среда разработки приложений, входящая в программный пакет COMSOL, позволяет наиболее эффективно делиться этими знаниями со всеми сотрудниками компании. Специалисты по моделированию могут настраивать свои модели, оставляя пользователю возможность изменять только некоторые параметры. Специализированный интерфейс основан на модели,

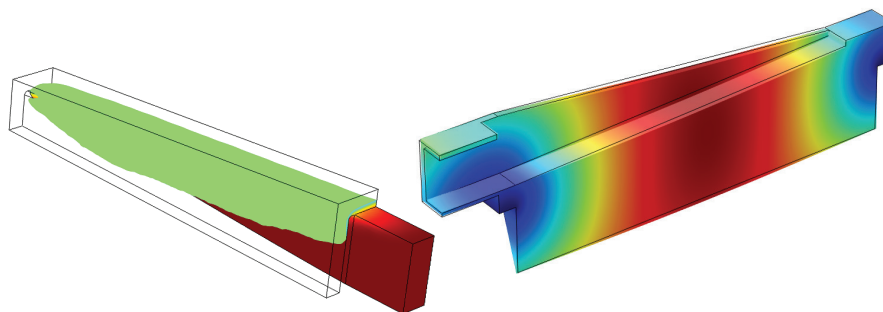


РИС. 3. Модель процесса перелива расплавленного стекла в программном обеспечении COMSOL. Результаты показывают область течения расплавленного стекла (слева, зеленый цвет) и растяжение в лодочке (справа).

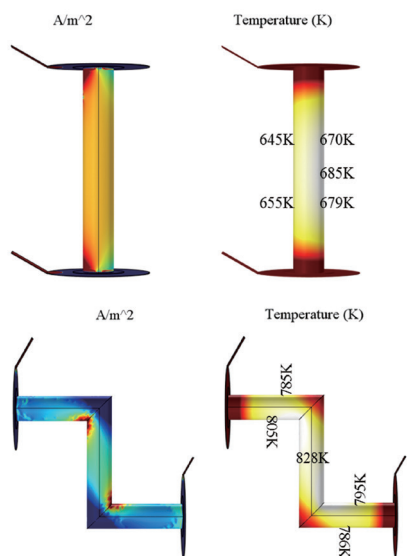


РИС. 4. Модель, рассчитывающая состояние стекла в трубке нагревателя. Вверху: прямая трубка со стенками переменной толщины. Внизу: коленчатая трубка со стенками постоянной толщины. Слева направо: результаты моделирования — распределение плотности тока и температуры.

совместный доступ к которой можно предоставить коллегам. С ее помощью сотрудники могут независимо друг от друга запускать сложные расчеты.

Группа по моделированию входит в состав отдела исследований компании КМТС, но приложения для моделирования помогают и проектному отделу. Следующая задача — сделать модели напрямую доступными для клиентов. Так заказчики смогут вносить точные корректировки в свои конструкции без участия специалистов по мультифизическому моделированию.

Группа специалистов компании КМТС создала приложение для моделирования платинового канала. Приложение рассчитывает температуру жидкости и скорость потока, а также распределение напряжений в трубке нагревателя в процессе изготовления, чтобы прогнозировать уровни напряжения и состояние готового стекла (рис. 5). Пользователи могут настраивать входные параметры: температуру стекла, скорость на входе и мощность нагрева. В рамках стационарного анализа оцениваются и оптимизируются рабочие условия, а нестационарный анализ позволяет смоделировать процесс изготовления в реальном времени. Приложение предоставляет данные, необходимые для подготовки производственных инструкций.

«Инженеры легко меняют входные параметры в интерфейсе приложения, чтобы, например, прогнозировать состояние стекла в трубке нагревателя, — говорит Хун. — Это упрощает работу конструктора и повышает продуктивность группы».

В целом процесс моделирования стал проще. Специалисты по моделированию работают над параметрической математической моделью, добавляя в нее различные расчетные параметры для дальнейшего использования. Затем модель превращают в приложение для моделирования, которым пользуются остальные инженеры. Конструкторы, не знакомые с мультифизическим моделированием, получают гибкий

и мощный инструмент для решения практических задач.

Приложения для моделирования разворачиваются на вычислительном кластере с установленным COMSOL Server™, что позволяет выполнять запросы сотрудников отдела исследований и проектного отдела. Пользователи могут запускать приложения, исходя из потребностей клиентов, и сразу же получать ценные указания для производства. «Приложения для моделирования — прекрасный инструмент для долгосрочного использования группами, применяющими системы инженерного анализа (CAE) в моделировании, поскольку они имеют преимущества с точки зрения затрат и защиты информации», — говорит Хун. ❖

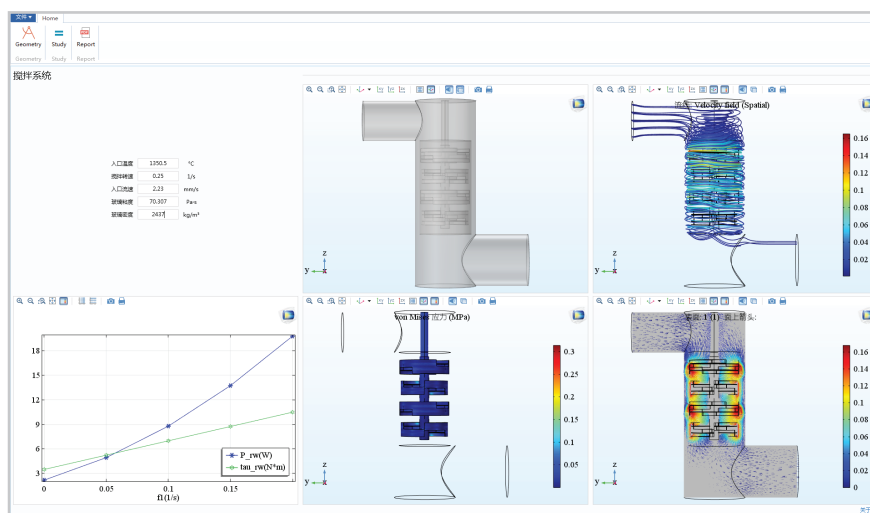


РИС. 5. Приложение рассчитывает состояние стекла в трубке нагревателя. Пользователи могут изменять температуру стекла, скорость на входе и мощность нагрева в разных секциях, чтобы исследовать температуру жидкости, скорость потока и напряжения в трубке нагревателя.



Слева направо: Чжэньлун Ян (Zhenlong Yang), Цзимин Ян (Jiming Yang); Лияо Тао (Liyao Tao); Лисинь (Фрэнк) Хун (Lixin (Frank) Hong), руководитель отдела исследований компании КМТС.

ПОВЫШЕНИЕ ПРОДАЖ И ПОСТРОЕНИЕ БОЛЕЕ ПРОЧНЫХ ОТНОШЕНИЙ С КЛИЕНТАМИ БЛАГОДАРЯ ПРИЛОЖЕНИЯМ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Специалисты по мультифизическому моделированию в GrafTech улучшают процесс продаж, используя мультифизические приложения внутри всей организации и за ее пределами.

НАТАЛЬЯ СВИТАЛА (NATALIA SWITALA)

Менеджеры по продажам редко задумываются о том, что специалисты по моделированию способны помочь им в работе с клиентами, но при совместной работе сотрудников различных отделов можно достигать большего. Рик Бейерле (Rick Beyerle) является старшим научным сотрудником в группе инноваций и технологий компании Advanced Energy Technologies (AET), дочерней компании GrafTech. Он помогал сотрудникам отдела продаж интегрировать приложения COMSOL в рабочий процесс продажи изделий из углерода и графита.

⇒ ФОРМИРОВАНИЕ ДОВЕРИТЕЛЬНЫХ ОТНОШЕНИЙ ДЛЯ ПРИВЛЕЧЕНИЯ КЛИЕНТОВ

Рик и его коллеги используют мультифизическое моделирование для изучения электрических, структурных и тепловых характеристик углерода и графита, а также для разработки и оптимизации процессов в нескольких сферах промышленности. При сотрудничестве с отделом продаж стало очевидно, что завоевание доверия перспективных клиентов было одним из самых важных факторов процесса продаж. «Зачастую предоставление клиентам отдела продаж "доказательств правильности концепции" способствует установлению доверия между сторонами», — объясняет Рик.

До появления настраиваемых приложений для моделирования для такого доказательства требовалось, чтобы Рик и его коллеги отвлеклись от исследовательских задач, изменили и повторно рассчитали уже проверенные модели для конкретной конфигурации каждого клиента. Команда по продажам не владела численным моделированием, а для инженеров-разработчиков был установлен приоритет натуральных

испытаний над моделированием, требующим значительных временных затрат. «Некоторые модели имеют сотни параметров и граничных условий, которые не кажутся значимыми для неспециалиста, но значительно влияют на результаты моделирования», — говорит Рик.

⇒ ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ — КЛЮЧ К ЭФФЕКТИВНОЙ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЕ

Рик — энтузиаст нового подхода к использованию моделирования на благо всей организации. С помощью Среды разработки приложений, доступной в программном пакете COMSOL Multiphysics®, Рик и команда инженеров-разработчиков создали удобный интерфейс, основанный на их стандартной мультифизической модели. Результатом стало приложение SpreaderCalc, которое позволяет инженерам по продажам и специалистам по эксплуатации прогнозировать характеристики целого ряда виртуальных прототипов до испытаний дорогостоящего физического прототипа (рис. 1).

Достижение больших технологических результатов и результатов продаж — задача всей компании. Вот почему Рик хотел предоставить своим коллегам в отделе продаж программные инструменты для совместной работы и предложить потенциальным клиентам ответы в режиме реального времени. «Часто клиент отдела продаж просит, чтобы мы порекомендовали конструкции для отвода тепла не только для обеспечения требований безопасности и надежности. Клиентам также важно обеспечить максимальное удобство работы путем устранения ограничений по температуре. Особенно это важно,

когда на конструкцию распространяются определенные ограничения по габаритам и геометрии, — прокомментировал Пьер Хатте, директор по продажам. — Новый инструмент, разработанный нашими коллегами в группе инновационных технологических разработок, помогает моей команде добиться повторной встречи с клиентом и высокой вероятности последующей продажи. Если вы работаете в продажах, вы знаете, что именно при повторной встрече открываются реальные возможности».

⇒ ПРЕДОСТАВЛЕНИЕ КЛИЕНТАМ ДОСТУПА К ПРИЛОЖЕНИЯМ

Когда приложения для моделирования готовы для использования отделом продаж, их можно развернуть с помощью COMSOL Server™, который обеспечивает централизованное размещение и доступ через защищенное веб-соединение. «С приложениями для моделирования вам не обязательно быть экспертом для получения высокоточных результатов мультифизических расчетов, — комментирует Рик. — С использованием приложений для моделирования рабочий процесс стал более упорядоченным и содержательным».

“Демонстрация потенциальному покупателю сравнения теплопередачи при различных конфигурациях в приложении аналогична примерке костюма перед покупкой. Они станут уверены, что результаты соответствуют их требованиям”

— ПЬЕР ХАТТЕ (PIERRE HATTE), ДИРЕКТОР ПО ПРОДАЖАМ, GRAFTECH

Когда отдел продаж имеет доступ ко всем требуемым приложениям и уже отработал в них различные сценарии, возникающие в ходе цикла продаж, компания предоставляет клиентам доступ к этим приложениям посредством COMSOL Server. «До сих пор мы предоставляли одну специализированную модель для клиента в год; политика компании заключалась в том, что моделирование было слишком дорогостоящим для большинства клиентов», — продолжает он. «Теперь вместо выполнения ряда испытаний в течение недели инженер-разработчик тратит только час для планирования экспериментов над моделями. Благодаря приложениям клиенты все больше доверяют нашим продуктам, — говорит Пьер. — Они интуитивно понятны и просты в использовании и при этом имеют

The screenshot shows the GrafTech International COMSOL Server Application Library interface. The main window displays the 'SpreaderCalc' application, which is a 'Heat Spreader Sizing Tool'. The interface includes a sidebar with 'Application Library', 'Upload', and 'Your Settings'. The main area shows a detailed configuration table for a heat spreader with 8 layers (L1-L8), each with specific thickness, grid, and thermal conductivity values. A 3D mesh model of the heat spreader is visible on the right. The bottom of the window features 'Advanced Patterning Options' and 'Advanced Viewing Options'.

РИС. 1. Используя локальную версию продукта COMSOL Server™, GrafTech AET предоставляет коллегам по всему миру доступ к приложениям через внутреннюю сеть компании. В приложении SpreaderCalc сравнивается теплопередача между графитовыми пленками, которые рассеивают тепло в бытовой электронике.

много функций, потому что основаны на мультифизической модели, созданной нашими специалистами. Демонстрация потенциальному покупателю сравнения теплопередачи при различных конфигурациях в приложении аналогична примерке костюма перед покупкой. Клиент может быть уверен, что результаты соответствуют его требованиям».

«Мы предполагаем, что приложения позволят клиентам принимать более информированные решения до момента размещения заказов. Некоторые отделы закупок вынуждены сокращать расходы и иногда игнорировать технические требования. При отсутствии технического сопровождения затрачивается много усилий для обоснования использования материала с высокими характеристиками, если единственным показателем является цена, — говорит Рик. — Моделирование графита затруднено из-за его высокой ортотропности. Был невозможен даже "грубый" анализ. Теперь инженеры могут получить качественный расчет без необходимости покидать свое рабочее

место. Для меня это ключевой момент — программная среда COMSOL позволяет осуществить то, чего нельзя было достичь другим путем».

Приложения для моделирования также способствуют совместной работе и прозрачности. Например, приложения облегчат клиентам обоснование выбранного варианта продукта для руководства внутри своей организации. Для пользования COMSOL Server клиенту требуются только данные для входа в систему, чтобы запустить приложение и загрузить его результаты. Таким образом упрощается утверждение заказа на закупку для всех участвующих сторон. Основываясь на успехе приложения SpreaderCalc и расширяя свою инфраструктуру программного обеспечения, GrafTech AET уже создает варианты сопровождения на таких нишевых рынках, как материалы для тепловых интерфейсов, экранирование электромагнитных и радиочастотных помех и быстрые процессы нагрева. ❖

УЗНАТЬ БОЛЬШЕ

Если вы хотите получить больше информации о сценариях промышленного применения углерода и графита для отвода тепла, см. статью, опубликованную на стр. 3 журнала Multiphysics Simulation от 2016 года [www.comsol.com/offers/mphsim16].



Слева: Пьер Хатте (Pierre Hatte), директор по продажам GrafTech. Справа: Рик Бейерле (Rick Beyerle), старший научный сотрудник GrafTech.

МУЛЬТИФИЗИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОМОГАЕТ ОБНАРУЖИВАТЬ УТЕЧКИ В ВОДОПРОВОДНЫХ МАГИСТРАЛЯХ

Чтобы точно обнаружить место утечки в заглубленных трубах, например в магистральном водопроводе, важно определить скорость распространения звука. Компания Echologics Engineering применяет метод конечных элементов для моделирования распространения акустических волн в трубах и оценки изменений скорости звука.

ВАЛЕРИО МАРРА (VALERIO MARRA)

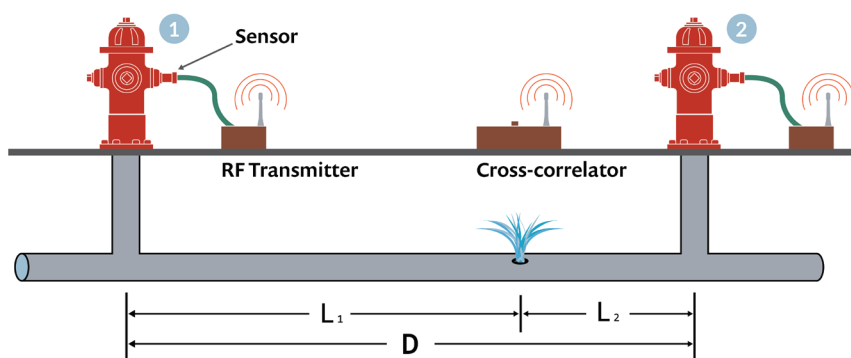


РИС. 1. Слева: исследуемая труба с утечкой. Справа: схема обнаружения утечки. По обе стороны от места утечки устанавливаются два датчика, расстояние между которыми равно D . Шум от утечки распространяется в обе стороны, а коррелятор измеряет время, за которое он достигает каждого датчика. Зная скорость распространения звука по трубам, можно определить точное местонахождение утечки.

Чистая питьевая вода — это ценный продукт, терять который через утечки в трубах муниципальные власти себе позволить не могут. По мере старения трубопроводной инфраструктуры находить прорывы водопроводов становится все сложнее, а с ростом цен на воду это становится все более важной задачей.

С этим прекрасно справляется компания Echologics из Торонто, входящая в состав Mueller Canada, Ltd., благодаря своим уникальным технологиям обнаружения утечек внешним методом. «Эти дефекты создают шум», — объясняет Себастьян Перье (Sebastien Perrier), научный сотрудник Echologics по акустическим исследованиям. Перье — инженер-механик, специализирующийся в области акустики и вибраций, конструкционных соединений, а также обработки сигналов. «Трубы могут "разговаривать", и если их слушать, они могут сообщить вам, где находится протечка», — говорит он.

В компании Echologics измеряют время распространения звуковой волны с помощью функции корреляции и акустических датчиков, установленных на трубах или пожарных гидрантах. Если

утечка находится где-то между двумя датчиками, она будет обнаружена, а результат корреляции будет использован для определения разницы во времени, за которое шум утечки достигает каждого датчика. Таким образом определяется расстояние от места утечки до каждого датчика при известной скорости распространения звука по данным трубам (рис. 1).

Компания Echologics является ведущим разработчиком инновационных акустических систем для инфраструктуры водоснабжения и внедряет технологии, в которых используется описанная корреляция для обнаружения утечек и непрерывного мониторинга трубопроводов. Примеры продукции Echologics включают корреляционный течеискатель LeakFinderST™ (рис. 2) и систему мониторинга трубопроводов EchoShore®-DX (рис. 3). Корреляторы Echologics позволяют специалистам на объектах исследовать течи самых разных трубопроводов с помощью датчиков, преобразователей и пользовательского интерфейса, который может быть выведен на экран стандартного ноутбука. Данная акустическая технология может

обнаруживать даже очень слабые утечки на ранних стадиях. Это дает возможность оперативно предпринять соответствующие меры, экономия муниципальных средств и предотвращая повреждения трубопроводов.

Технология, лежащая в основе продуктов Echologics, требует точного знания скорости распространения звука в трубопроводах различных типов. Скорость звука зависит от материала, пропорциональна жесткости трубы и меняется в зависимости от геометрии трубопровода. «Ключевой задачей была разработка достаточно точной технологии, позволяющей обнаруживать утечки в трубах из ПВХ», — объясняет Перье. По сравнению с металлом, пластмасса обладает сильными демпфирующими свойствами, способствующими затуханию звуковой волны. Еще больше усложняет задачу то, что в старых системах водоснабжения, изначально выполненных из чугуна, в процессе ремонта часть сегментов заменяется на пластмассовые.

Одной из сфер ответственности Перье является обновление и поддержание точности сложных алгоритмов акустической корреляции. Он должен



РИС. 2. Компактный и простой в применении корреляционный течеискатель LeakFinderST™.

давление в системе трубопроводов по мере распространения звуковой волны по направлению к датчику, а также учесть механическое затухание волны, характерное для участков, выполненных из различных материалов, давая возможность наглядно визуализировать процесс (рис. 4).

⇒ **ПОВСЕДНЕВНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ И ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Выполняя каждый раз однотипные операции в данной расчетной модели, Перье задумался о возможности создания специализированного приложения для моделирования и его преимуществах. На основании его анализа в COMSOL Multiphysics® с использованием встроенных программных инструментов он создал собственное приложение, объединяющее в себе исследования взаимодействия звуковой волны и конструкции, акустики трубопроводов, а также временной и частотный анализ системы (рис. 5). Приложение позволяет пользователю менять геометрию и свойства материала различных участков трубопровода и анализировать сегмент трубы или всю сеть.

В приложении пользователь может определить магистральную водопроводную сеть, задав длину и количество сегментов, а также характеристики труб. Скорость распространения звука вычисляется после выбора свойств материала из имеющегося списка, например чугуна или пластмассы. Моделирование использует результаты полевых измерений, которые пользователь обычно вводит вручную на основании корреляций для прогнозирования местоположения утечек.



РИС. 3. Система EchoShore®-DX дает возможность использовать существующие пожарные гидранты для интеллектуального обнаружения утечек.

понимать фундаментальные основы физики для оптимизации и разработки новейших решений для подземных трубопроводных систем. Для ускорения процесса проектирования и обеспечения возможности использования его разработок другими отделами Перье создал акустические вычислительные модели и основанные на них приложения для моделирования.

⇒ **ОБНАРУЖЕНИЕ УТЕЧКИ ДО ВОЗНИКНОВЕНИЯ АВАРИИ**

Как численное моделирование помогает прогнозировать распространение звуковой волны по трубам? Анализ сети трубопроводов может оказаться сложным и долгим. Может возникнуть потребность проанализировать процесс распространения звуковой волны и ответных колебаний в одной трубе или всей системе. Поэтому сложность модели и время ее расчета могут существенно меняться в зависимости от степени детализации физических процессов в модели, необходимой для получения нужной точности.

На ранней стадии проектирования Перье решил основную задачу: убедился в том, что скорость распространения звуковой волны определена точно для каждого участка трубопровода. Затем он применил мультифизическое моделирование для быстрой оценки и получения параметров, необходимых для его работы. При анализе трубопроводной сети требуется найти мультифизические связи между такими дисциплинами, как акустика, гидродинамика и механика конструкций.

В работе Перье моделирование может применяться самыми разными способами: например, оно позволяет явно учесть небольшие допуски на погрешности и усовершенствовать технологию. Изучение параметров материала и геометрии сети трубопроводов с помощью акустического моделирования позволяет прогнозировать различные сценарии. Акустическое моделирование демонстрирует наличие шумов при различном расстоянии между датчиками или позволяет обнаружить пластмассовые ремонтные вставки, не учтенные при испытаниях. Расчеты, которые проводит Перье, также позволяют прогнозировать

“Создав это приложение, я дал возможность пользоваться сложной моделью всем коллегам, где угодно и когда угодно”

— СЕБАСТЬЕН ПЕРЬЕ, НАУЧНЫЙ СОТРУДНИК ECHOLOGICS ПО АКУСТИЧЕСКИМ ИССЛЕДОВАНИЯМ

Превращение мультифизической модели в приложение для моделирования упрощает взаимодействие между отделами компании. «Создав это приложение, я дал возможность пользоваться сложной моделью всем коллегам, где угодно и когда угодно», — говорит Перье. Приложение для моделирования можно защитить паролем и установить их вместе с локальной версией COMSOL Server™, что позволяет быстро обновлять их и обеспечивать

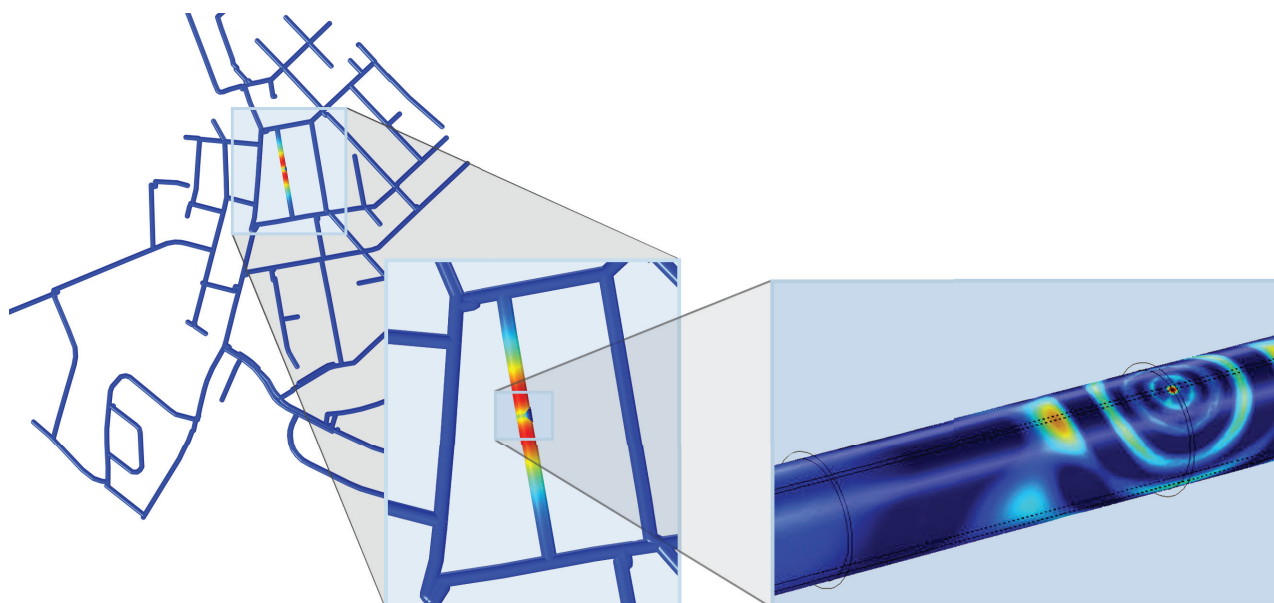


РИС. 4. Анализ распространения шума утечки в трубопроводной сети. На графике показано звуковое давление в зоне вокруг утечки.

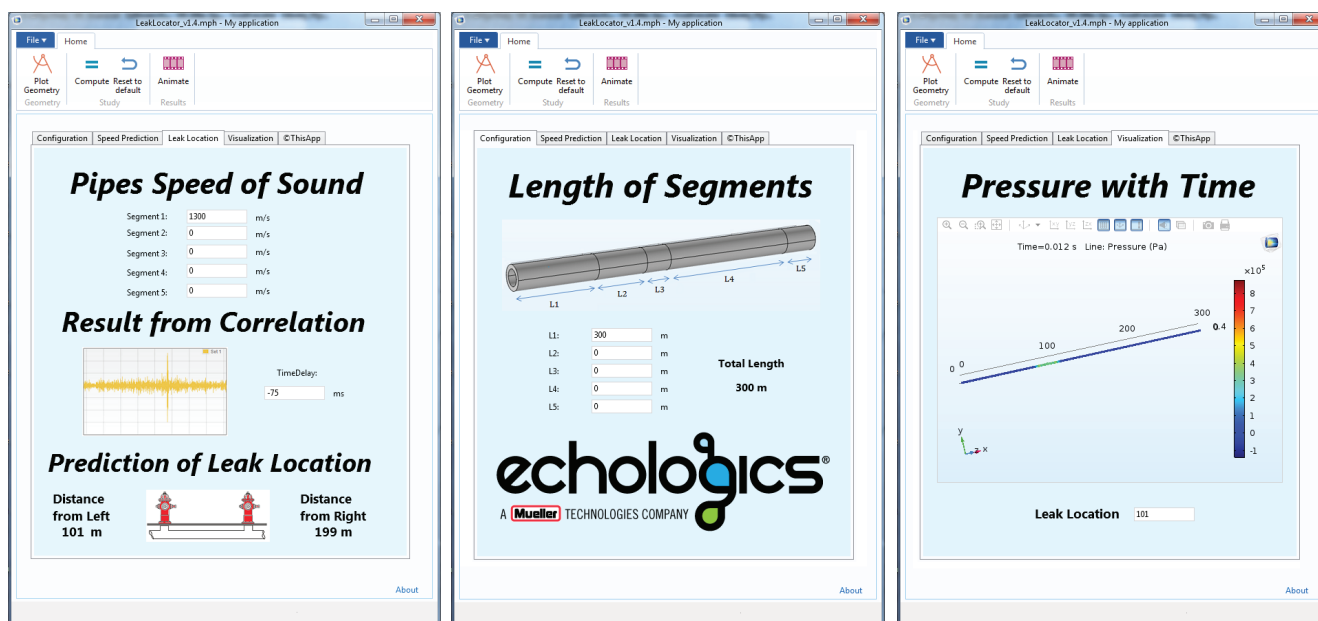


РИС. 5. Простой интерфейс помогает пользователю предсказать точное местоположение утечки путем задания геометрии и характеристик труб. Приложение вычисляет скорость звука в трубе и позволяет с помощью анимации визуализировать распространение волны от места утечки без необходимости сложных расчетов взаимодействия конструкции и звуковой волны для локализации утечки.

конфиденциальность. Это представляло важность для разработчика, поскольку значительная часть его работы является конфиденциальной. Перье создал приложение, которое может использоваться полевыми инженерами на объектах.

Он ожидает, что это приложение будет широко применяться в компании Echologics. Главным требованием полевых инженеров Echologics является

возможность быстрого и точного обнаружения утечек без необходимости понимания механических или математических основ моделирования. По мнению Перье, моделирование является мощным инструментом, позволяющим визуализировать распространение звуковой волны и дающим пользователю возможность увидеть снижение или увеличение скорости звука при изменении геометрии или свойств материала. ❖



Себастьян Перье, научный сотрудник Echologics по акустическим исследованиям

Совершенствование электрогидравлического усилителя рулевого управления с использованием виртуальных прототипов

Компания FZB Technology использует мультифизическое моделирование для оптимизации конструкции электрогидравлических усилителей рулевого управления.

ЛЕКСИ КАРВЕР (LEXI CARVER)

Если вам приходилось управлять автомобилем без усилителя руля, то вы помните, какое значительное усилие нужно прикладывать к рулю, чтобы повернуть колеса в желаемом направлении. К счастью, это время осталось далеко позади. Усилители рулевого управления, которые упрощают вождение благодаря вспомогательному усилию на руле, за годы своего существования претерпели множество изменений и постоянно совершенствуются.

До 90-х годов наиболее распространенные варианты усилителей были представлены гидравлическими и электрическими системами. Эти системы были предшественниками электрогидравлического усилителя рулевого управления (EHPS), обеспечивающего меньший расход топлива. В системе EHPS используется обычный гидропривод, но при этом гидравлический насос приводится в действие электродвигателем, а не двигателем автомобиля (рис. 1). Поскольку выходная мощность электродвигателя регулируется в соответствии с углом поворота руля и скоростью движения автомобиля, потери мощности в таком случае гораздо меньше.

Насос подает жидкость из бака рабочей жидкости к рулевому механизму с усилителем, который увеличивает крутящий момент, когда водитель поворачивает руль. В состав системы также входит электронный блок управления (ECU), датчик крутящего момента, распределительный клапан для регулирования давления жидкости и трубопроводы.

⇒ СЛОЖНОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ EHPS

Проектирование системы с таким количеством взаимосвязанных компонентов представляет собой нетривиальную задачу, поскольку отклик одного из них зачастую зависит от отклика другого. Регулировки, которые кажутся незначительными, могут оказать большое влияние на работоспособность, эффективность и надежность всей системы.

«Одним из инструментов, упрощающих внесение изменений в конструкцию, является мультифизическое моделирование», — объясняет Фэн Ци (Feng Qi), старший инженер-механик компании FZB Technology, расположенной в Плимуте, штат Мичиган. Компания FZB предлагает исследовательские услуги для автомобильной отрасли, включая разработку электродвигателей, датчиков, бесключевых систем зажигания на базе RFID, а также систем EHPS.

Для моделирования компонентов EHPS инженеры компании FZB зачастую используют CAD-системы и COMSOL Multiphysics® (рис. 2). Это позволяет им понять поведение внутренних компонентов системы и максимально приблизиться к окончательному варианту конструкции, прежде чем перейти от виртуального прототипирования к натурным испытаниям.

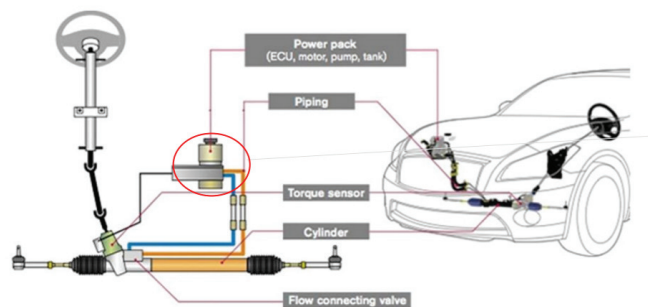


РИС. 1. Принципиальная схема рулевого управления с электрогидравлическим усилителем (EHPS).

«Моделирование позволяет нам точно понять, в чем заключается проблема. Так мы обеспечиваем соответствие требованиям автопроизводителей до того, как приступаем к созданию физической модели, — говорит Ци. — Нам необходимо понимать, как поведет себя система на различных уровнях: механическом, термодинамическом, гидродинамическом, акустическом и электромагнитном».

Он поясняет, что валидация и физические испытания требуют значительных временных и материальных затрат — до шести месяцев, — но и после этого требуется дальнейшая оптимизация удачного прототипа. «Подобные темпы неприемлемы для цикла разработки, поэтому для ускорения процесса мы используем компьютерное моделирование. Мы регулярно общаемся с инженерами таких компаний, как Chrysler, чтобы внести улучшения в нашу конструкцию с помощью COMSOL до начала валидации физических моделей. В противном случае мы просто не сможем обеспечить соответствие заданным требованиям».

Чтобы понять процессы, происходящие под капотом, команде Ци потребовалось выполнить моделирование основных компонентов в ходе работы над последней системой EHPS: электронного блока управления, отдельного кронштейна крепления, электродвигателя с постоянным магнитом, бака рабочей жидкости и насоса с роторами со спиральным зацеплением. Инженеры смоделировали отдельные компоненты, а затем выполнили мультифизическое исследование всей сложной системы, конструкция которой отличается в каждой модели автомобиля.

Исследование тепловых, гидродинамических, механических и электромагнитных явлений ускорило решение задач, связанных с термическими характеристиками, динамическим управлением перемещениями, подачей жидкости насосом, шумом, вибрацией и непланностью работы (рис. 3).

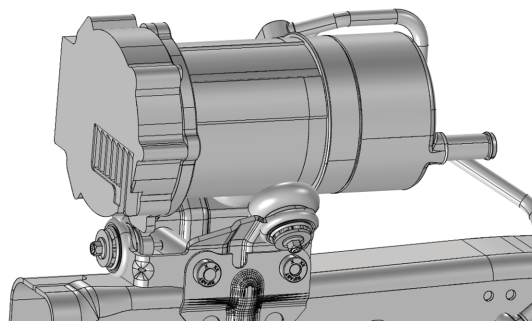


РИС. 2. Геометрия, используемая для мультифизического анализа конструкции EHPS. Конструкция включает в себя ребра, обеспечивающие отвод тепла в окружающую среду, крепежные элементы и отверстия для жидкости.

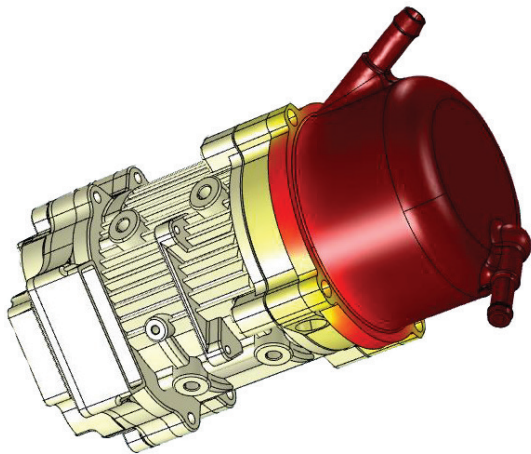


РИС. 3. Для получения данных о распределении температуры в различных компонентах во время проверки насоса под различными нагрузками использовалось моделирование стационарного и переходного состояний. Результаты моделирования позволили выяснить оптимальные характеристики локальной геометрии, параметры конструкции, размер и количество сквозных соединений в электронном блоке управления, а также прочих теплопроводящих компонентов.

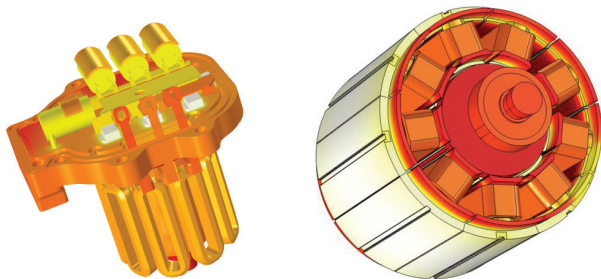


РИС. 4. Температура в узле электронного блока управления и ротора (слева), в узле статора и ротора (справа). Модель позволяет спрогнозировать тепловые характеристики продукта после его установки на автомобиль.

⇒ ТЕМПЕРАТУРА В ПОДКАПОТНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Одним из главных факторов, влияющих на рабочие характеристики системы в целом, является возможность работы в безопасном диапазоне температур. Ци создал модель, характеризующую теплопередачу в насосе и нагрев жидкости, смазывающей роторы насоса. Используя в качестве переменного граничного условия температуру жидкости, его сотрудники смогли спрогнозировать распределение температуры в системе в зависимости от условий эксплуатации.

Ци объясняет, что наибольшая нагрузка на насос приходится в момент, когда колеса автомобиля упираются в бордюр, а водитель пытается их повернуть. Когда это происходит в реальной жизни, электропитание от аккумуляторной батареи по-прежнему подается к насосу, несмотря на блокировку колес, вызывая нагрев электронного блока управления и магнита электродвигателя.

На основании данных об условиях эксплуатации, предоставленных автопроизводителями, инженерам удалось смоделировать поведение рабочей жидкости усилителя рулевого управления в подобном случае. Дополнительно они изучили отклик таких компонентов электронного блока

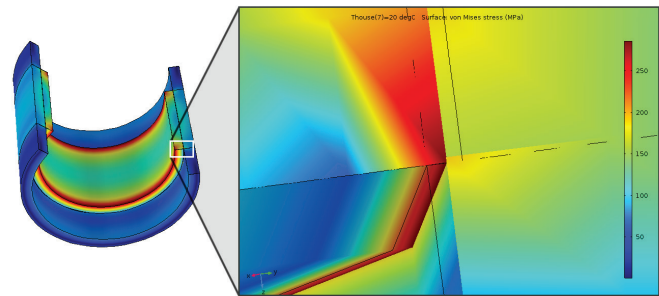


РИС. 5. Уровни механического напряжения в модели, с помощью которой исследуется посадка с натягом при сборке корпуса и статора.

управления, как МОП-транзисторы и провода, на повышение температуры при блокировке колес автомобиля. Специалисты использовали многоступенчатый подход к моделированию, начав с моделирования отдельных компонентов системы, объединяя их на уровне системы и соотнося эти данные с результатами физических испытаний. Эти исследования помогли им тщательно подобрать граничные условия и характеристики материалов, чтобы понять, как работают различные конфигурации системы.

Распределение температуры также влияет на элементы конструкции: корпус, статор, ротор и тяги электродвигателя (рис. 4). Тепловое расширение металла оказывает влияние на КПД электродвигателя, поскольку для обеспечения необходимой выходной мощности насоса требуется большая величина крутящего момента и частота вращения насоса. Характеристики рабочей жидкости, например динамическая вязкость и плотность, также изменяются вместе с изменением температуры. В связи с этим требуется определенный тип зацепления зубчатых колес для поддержания плавной и устойчивой работы.

«Ситуация, при которой автомобиль неподвижен, а нагрузка на насос очень высока, является наиболее сложной, — говорит Ци. — Нам было необходимо удержаться в таком диапазоне рабочих температур, который бы предотвращал повреждение компонентов, поэтому во время моделирования мы старались спрогнозировать самые тяжелые условия эксплуатации, чтобы убедиться в безотказной работе нашей системы».

Команда под руководством Ци смоделировала изменения толщины стенок корпуса электродвигателя, статора и насоса, вызванные тепловым расширением, чтобы определить, не превысит ли приложенная нагрузка предел текучести какого-либо компонента (рис. 5). Моделирование статора электродвигателя представляло собой отдельную трудность, поскольку тепловое расширение могло привести к его повреждению. Исследователям удалось выявить эту проблему на раннем этапе моделирования с помощью COMSOL, поэтому в конструкции статора был предусмотрен тепловой зазор, который позволял ему расширяться без повреждения.

Геометрические параметры оказались исключительно важны для определения посадки с натягом, а также размеров корпуса и статора. Поскольку коэффициенты теплового расширения корпуса и статора различаются, необходимо тщательно подбирать тип посадки и толщину компонентов с тем, чтобы они не повреждались при работе в заданном диапазоне температур.

“Путь автомобиля от идеи до рынка зависит от множества факторов... Для обеспечения работы нашей междисциплинарной группы нам требовался инструмент, который позволял бы выполнять мультифизические исследования”

— СТИВЕН ЦИ (STEVEN CI),
РУКОВОДИТЕЛЬ, FZB

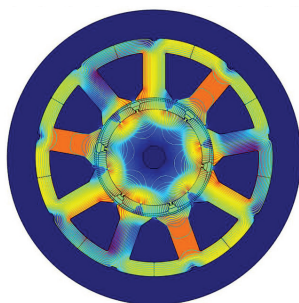


РИС. 6. Модель, демонстрирующая распределение магнитной индукции и векторного магнитного потенциала, при нестационарном исследовании работы электродвигателя системы EHPS.

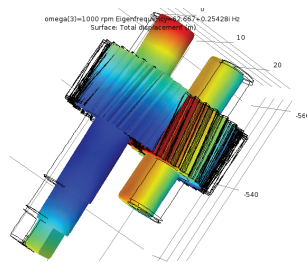


РИС. 7. Результаты, полученные с помощью COMSOL, показывающие величину смещения роторов со спиральными зубьями при частоте вращения коленчатого вала двигателя 1000 об/мин и собственной частоте 2718,2 Гц после импорта данных гидродинамического анализа, полученных с помощью ПО PumpLinX®.

(рис. 7 и 8). Дополнительное моделирование динамических характеристик роторов помогло определить критические частоты вращения, на которых вибрации многократно усиливались, приводя к сбоям в зацеплении роторов. Эти неполадки являлись причиной повышенного шума и снижения КПД.

«Перед нами стояла задача не только понять, насколько шумной будет система, но и выяснить, какое влияние шум оказывает на электромагнитные характеристики и поведение жидкости, — говорит Ци. — Все взаимосвязано. Мы моделировали пульсацию давления в жидкости, после чего с помощью COMSOL исследовали ее влияние на шум. Полученные результаты позволили нам оптимизировать конструкцию подшипников, валов, а также форму роторов со спиральными зубьями и канавок отвода жидкости, выполненных во втулке насоса».

⇒ НА ПУТИ К УЛУЧШЕНИЮ EHPS

Итак, специалистам компании FZB удалось существенно улучшить геометрию насоса на основе результатов моделирования, выполненного с помощью COMSOL. Более того, моделирование позволило подготовить отчет о предельных значениях энергопотребления для инженеров-конструкторов с целью обеспечения соответствия требованиям автомобилестроения.

⇒ ГИДРОДИНАМИКА, АКУСТИКА И ЭЛЕКТРОНИКА — ВАЖНО УЧЕСТЬ ВСЕ

Инженеры команды также создали электромагнитную модель для исследования эксплуатационных характеристик спирального магнита и насоса с роторами со спиральным зацеплением на различных отметках времени во время работы насоса (рис. 6). Это позволило выяснить, насколько изменяются характеристики электродвигателя с течением времени, включая точную оценку тепловых потерь на обмотках и сердечниках. В результате геометрия была изменена так, чтобы обеспечивать более равномерное распределение температуры в узлах и компонентах системы.

Исследователи связали моделирование электромагнитных явлений с вычислительной гидродинамикой для того, чтобы понять, каким образом они воздействуют на расход жидкости и КПД насоса. Для получения данных о характеристиках и расходе жидкости, а также пульсации давления использовался программный комплекс PumpLinX®, разработанный специально для моделирования насосов.

Ци перенес характеристики рабочей жидкости в модель COMSOL Multiphysics®, а также внес с помощью программы SOLIDWORKS® необходимые изменения в геометрию. Затем для изучения вибраций был выполнен акустический расчет

Было изучено влияние различных граничных условий на энергопотребление и выходную мощность насоса, а также сопоставлены результаты моделирования различных сценариев с результатами натурных дорожных испытаний.

«Мы выбрали COMSOL, потому что нам требовалось исследовать взаимосвязанные физические явления, — подводит итог Ци. — Путь автомобиля от концепции до выпуска в продажу зависит от множества факторов, а сроки цикла разработки при этом могут быть очень сжатыми. Для обеспечения работы нашей междисциплинарной группы нам требовался инструмент, который позволял бы выполнять мультифизическое моделирование. Программное обеспечение COMSOL предоставляет мощные инструменты для объединения множества разделов физики с различными граничными условиями, что позволяет нам получить точный прогноз эксплуатационных характеристик нашей системы EHPS».

ЛИТЕРАТУРА

1. Qi, F., Dhar, S., Nichani, V., Srinivasan, C. et al., "A CFD study of an Electronic Hydraulic Power Steering Helical External Gear Pump: Model Development, Validation and Application," *SAE Int. J. Passeng. Cars — Mech. Syst.*

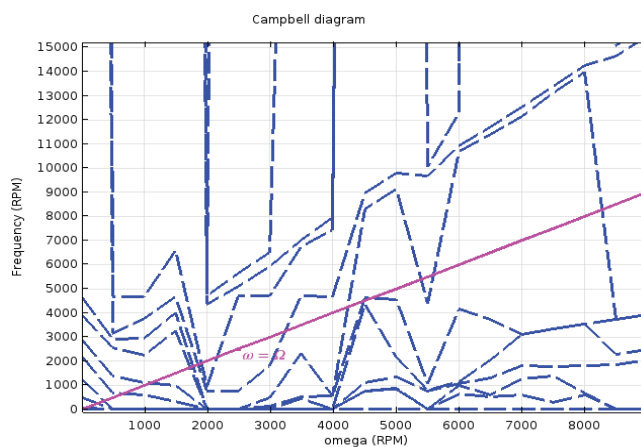


РИС. 8. Диаграмма Кэмпбелла, созданная с помощью COMSOL, показывающая изменение собственной частоты колебаний в зависимости от угловой скорости роторов со спиральными зубьями.



Верхний ряд: Цзиньмин (Джим) Ян (Jinming (Jim) Yang), генеральный директор; Чжунхуэй (Макс) Бин (Zhonghui (Max) Bing), директор; Стивен Ци, менеджер, FZB. Нижний ряд: Лян (Леон) Ян (Liang (Leon) Yang), менеджер, FZB; Дахун Юй (Dahong Yu), исполнительный директор; Ин Се (Ying Xie), менеджер; Fuxin Dare Automotive Parts Co., Ltd., KHP.

КАК БЫСТРО НАГРЕВАЕТСЯ ЭЛЕМЕНТ ПИТАНИЯ?

Численное моделирование помогает детально изучить процесс сборки литий-ионных элементов при производстве высокотехнологичных аккумуляторных систем.

ДЖЕННИФЕР ХЭНД (JENNIFER HAND)

Характеристики и долговечность литий-ионных аккумуляторов сильно зависят от температуры их эксплуатации. При низких температурах аккумуляторы хуже работают, а при высоких — быстро деградируют. Таким образом, надежность аккумулятора снижается, что делает его потенциально небезопасным.

Благодаря промышленным исследованиям появились стандарты колебаний температуры, которые должен выдерживать работающий аккумулятор. Напротив, гораздо меньше внимания уделялось температурам, воздействию которых аккумуляторы подвергаются на производстве: при плазменной предварительной обработке, ультрафиолетовом отверждении, лазерной сварке, ультразвуковом сшивании, горячей сборке и горячем склеивании. Литий-ионный аккумулятор может состоять из тысяч отдельных элементов, которые требуется собрать вместе. Сборка обычно включает в себя несколько стадий термообработки, причем при некоторых из них корпус или другие части ячеек на короткое время подвергаются чрезвычайно интенсивному воздействию высоких температур.

Герд Либиг (Gerd Liebig) из Центра исследования энергетических технологий NEXT ENERGY EWE Ольденбургского университета в Германии объясняет: «Хорошо известно, что некоторые методы обработки, например сварка, сильно повышают температуру внутри аккумулятора. Однако мы не знаем, насколько высоко поднимается температура внутри аккумулятора и насколько сильно это вредит элементам».

Памина Бон (Pamina Bohn) из Ольденбургского университета и ученые из NEXT ENERGY тесно сотрудничают, чтобы узнать, наносят ли производственные процессы необратимый вред аккумуляторам, снижая их надежность и емкость из-за начинающихся процессов электрохимической деградации. Так как эксперименты требуют много времени, затрат и мер предосторожности, они решили выполнить валидацию собственной математической модели. Группа исследователей использовала численное моделирование, чтобы изучить различные условия эксплуатации и получить данные для любой точки модели. В физическом эксперименте это нецелесообразно или даже невозможно.

⇒ ПЛАН ЭКСПЕРИМЕНТА С ТЕРМИЧЕСКИМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ

На первом этапе они измерили температуру в физическом эксперименте с модельным призматическим литий-ионным элементом, который подвергался кратковременному термическому напряжению. Собранные данные они использовали, чтобы проверить математическую модель и изучить влияние различных процессов при изготовлении элемента. Элемент состоял из скрученных рулоном анода и катода, имеющих двойное покрытие и разделенных полиолефиновым сепаратором. Такую скрученную конструкцию, которую обычно называют рулонной, пропитали органическими растворителями, имитирующими электролит аккумулятора.

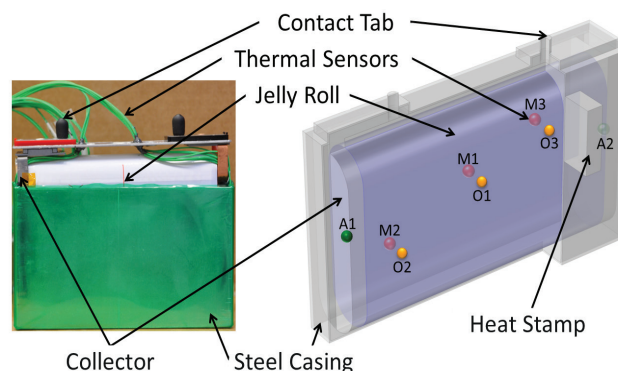


РИС. 1. Слева: модельный литий-ионный призматический элемент. Справа: геометрия CAD для моделирования элемента. Элемент снабжен восемью датчиками температуры: датчики O1, O2 и O3 на поверхности рулона, M1, M2 и M3 в середине рулона, A1 и A2 на токосъемниках. В модели COMSOL® датчики расположены в тех же точках.

В элементе разместили восемь датчиков температуры: три в середине рулона, три на внешней поверхности намотки элемента и два на медном (анодном) и алюминиевом (катодном) коллекторах, которые называют также токосъемниками (рис. 1).

⇒ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ

Группа исследователей также воспроизвела трехмерную конструкцию коммерческого призматического литий-ионного элемента в программном пакете Autodesk® Inventor® и перенесла ее в программный пакет COMSOL Multiphysics®. Они рассчитали модель теплопередачи теплопроводностью, в которой внешний источник тепла располагался в разных точках элемента в зависимости от различных производственных процессов, а другие области поверхности элемента обеспечивали естественное конвекционное охлаждение.

Физические и теплотехнические свойства отдельных материалов были определены экспериментально, после чего на их основе была рассчитана однородная область рулона, заключенная в призматическую стальную оболочку. «Из-за анизотропии компонентов элемента в модели необходимо учитывать зависимость тепловых параметров от направления», — комментирует Либиг.

Прямоугольный источник тепла был расположен в модели точно так же, как и в физическом эксперименте. На рис. 2 показано распределение температуры через 60 секунд после того, как источник тепла приложили к поверхности элемента. В областях с высокими температурными градиентами использовали более мелкую дискретизацию, полученную адаптивным измельчением сетки, чтобы обеспечить точные результаты.

⇒ ВЫЯВЛЕНИЕ ПРИЗНАКОВ ПОВРЕЖДЕНИЯ

Мультифизическая модель достаточно хорошо воспроизводила поведение модельного физического элемента. После проверки модели исследователи были готовы к моделированию распространения температур в элементе при том или ином производственном процессе.

Рис. 3 показывает распределение на выводе элемента, к которому на четыре секунды приложили тепловую нагрузку при температуре 1100 °C, как при сварке. Тепло распространяется внутрь элемента, и температура поднимается выше 100 °C. Даже после того, как внешний источник тепла удален, температура внутри элемента продолжает подниматься. Через четыре секунды после прекращения внешнего нагрева температура внутри рулона достигает 138 °C.

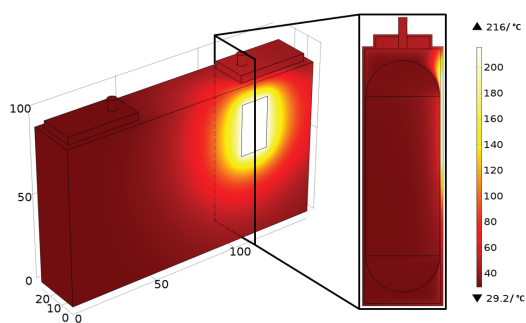


РИС. 2. Результаты численного моделирования распределения температуры через 60 секунд после того, как к оболочке элемента приложен источник тепла мощностью 50 Вт.

Бон замечает: «Такая температура приведет к необратимым повреждениям: разложению электролита, который очень чувствителен к температуре, и изменению характеристик на границе раздела "электрод — электролит". Такие изменения не только локально повреждают материалы, но и приводят к общей потере емкости и росту сопротивления элемента».

⇒ СВАРКА БЕЗ ПОВРЕЖДЕНИЯ

Исследователи хотели убедиться, что высокая плотность мощности лазерного пучка позволяет быстро проводить сварку с ограниченной передачей тепла внутрь аккумуляторного

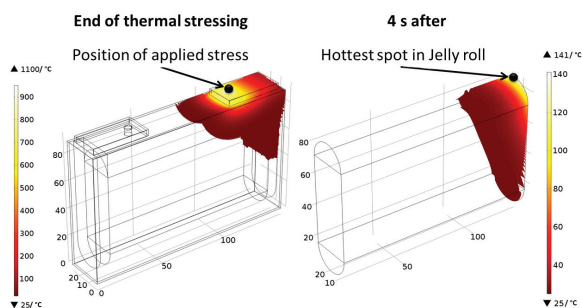
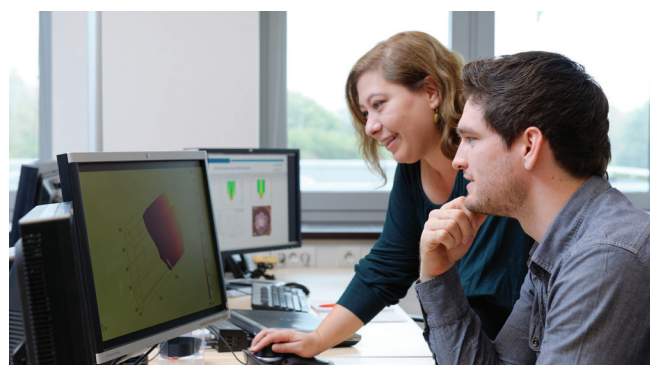


РИС. 3. Модель распространения тепла после сварки вывода при 1100 °С. Показаны распределения температуры через четыре секунды после повышения температуры на границе (слева) и через четыре секунды после удаления источника тепла (справа).



Герд Либиг (Gerd Liebig) и Лидия Комсийска (Lidiya Komsiyiska), NEXT ENERGY.

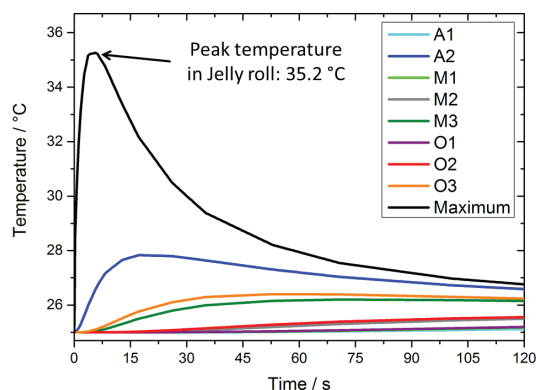


РИС. 4. Профили температуры датчиков через четыре секунды после повышения температуры на границе до 1100 °С.

элемента. Лазерная сварка происходит очень быстро и, благодаря высокой плотности мощности пучка, может использоваться для разных металлов.

Чтобы смоделировать лазерную сварку, исследователи приложили к выводу элемента температуру 1100 °С в течение 0,2 секунды (рис. 4). Они определили, что тепло распространяется по оболочке элемента, при этом температура не поднимается выше 36 °С и не наносит вреда компонентам аккумулятора. Смоделированное распределение температуры внутри рулона хорошо согласуется с термографическими снимками, сделанными через несколько секунд после завершения лазерной сварки на литий-ионном элементе 26650.

⇒ ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ БУДУЩИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Либиг говорит: «Теперь у нас есть надежный инструмент для моделирования. Программный пакет COMSOL Multiphysics удобен в использовании и содержит полезный набор инструментов. Его очень легко подстроить под наши задачи: от моделирования материалов до задания граничных условий. Различные физические интерфейсы, геометрические инструменты и гибкие функциональные возможности экономят очень много времени».

Группа исследователей подводит итог: «Так как для разных прикладных задач требуются аккумуляторы различных типов, не существует одного идеального материала, размера или формы. Наша модель создает отличные возможности для будущих исследований. Мы можем изменять геометрию, назначение аккумулятора и материалы. Численное моделирование позволяет нам уверенно продолжать исследования литий-ионных аккумуляторов».

ЛИТЕРАТУРА

1. G. Liebig, P. Bohn, *Temperature Propagation and Effects by Short-Term Thermal Stressing of Lithium-Ion Cells*, *Battery Safety Conf.* 2015.
2. P. Bohn, S. A. Garnica Barragan, L. Komsiyiska, G. Wittstock, *Performance and the characteristics of thermally stressed anodes in lithium ion cells*, *Journal of The Electrochemical Society*, 162 (2) (2015).
3. P. Bohn, G. Liebig, L. Komsiyiska, G. Wittstock, *Temperature propagation in prismatic lithium-ion-cells after short term thermal stress*, *Journal of Power Sources*, Volume 313, 1 May 2016.
4. M.J. Brand, P.A. Schmidt, M.F. Zaeh, A. Jossen, *Welding techniques for battery cells and resulting electrical contact resistances*, *J. Energy Storage* 1 (2015).

На переднем крае разработки слуховых аппаратов

Инженеры компании Knowles развивают новые технологии слухопротезирования, устраняя акустическую обратную связь при помощи мультифизического моделирования.

ГЭРИ ДАГАСТИН (GARY DAGASTINE)

Известно, что почти 20 % населения Соединенных Штатов страдают нарушениями слуха. На самом деле эта цифра может оказаться выше — многие люди не хотят признавать наличие проблем со слухом. Пациенты, обратившиеся за медицинской помощью, получают миниатюрные слуховые аппараты, улучшающие и слух, и качество жизни. Создание слухового аппарата — от изготовления опытного образца до вывода изделия на рынок — требует значительного объема исследований и разработок.

В ходе работы инженеры постоянно сталкиваются со сложными техническими задачами. Основной проблемой является акустическая обратная связь. Она вызывает высокочастотный писк или свист, что ограничивает максимальный коэффициент усиления сигнала аппаратом. «Обратная связь обычно возникает, когда в микрофон слухового аппарата случайно попадают звуки или вибрации, направляемые самим аппаратом в ушной канал. Эти звуки попадают на вход усилителя, создавая нежелательные пульсации», — поясняет Бренно Варанда (Brenno Varanda), старший инженер-электроакустик компании Knowles Corp., расположенной в городе Итаска, штат Иллинойс.

«Для многих заказчиков компании Knowles создание нового слухового аппарата представляет собой длительный и дорогостоящий процесс, на который уходит от двух до шести лет», — добавляет он. Точное моделирование помогает в выборе динамиков и совершенствовании конструкции виброизолирующих опор и креплений, направленном на уменьшение доли излучаемой динамиком энергии, попадающей обратно в микрофон. Разработчикам слуховых аппаратов важно иметь возможность создавать простые модели преобразователей, которые облегчат процесс разработки и позволят предлагать заказчикам более эффективные решения. Полные модели динамиков и микрофонов весьма сложны и включают множество факторов, не влияющих на подавление обратной связи. «Конечно, конструкторам

Knowles важно понимать происходящие в преобразователях электромагнитные, механические и акустические физические процессы, но столь высокая сложность моделирования не обязательно принесет реальную пользу нашим заказчикам», — говорит Варанда.

Knowles — мировой лидер в производстве преобразователей для слуховых аппаратов, интеллектуальных акустических систем и акустических компонентов специального назначения — организовала многосторонний проект по разработке виброакустических моделей преобразователей, которые были бы удобны в работе и пригодны для использования заказчиками, занимающимися слухопротезированием. Модели должны повысить эффективность перехода от опытного образца к окончательному варианту конструкции слухового аппарата без потери точности и качества.

⇒ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СЛУХОВЫХ АППАРАТОВ И ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ

При разработке слуховых аппаратов инженерам приходится находить компромисс между двумя основными взаимоисключающими требованиями. Аппарат должен быть компактным и не создавать неудобств владельцу, но при этом обладать высокой выходной звуковой мощностью, чтобы компенсировать потерю слуха. Пациентам гораздо больше нравятся миниатюрные и легкие аппараты. Это еще более усложняет задачу подавления обратной связи. «Общая проблема при конструировании — разместить все элементы конструкции в наименьшем возможном объеме так, чтобы при этом не возникла обратная связь», — продолжает Варанда.

Типичный заушный слуховой аппарат (ВТЕ) содержит микрофоны, преобразующие внешние звуки в электрические сигналы, цифровой сигнальный процессор и усилитель, которые преобразуют сигнал и усиливают его, а также миниатюрный

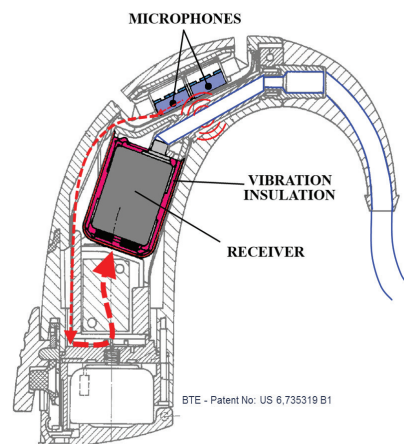


РИС. 1. Обычный заушный слуховой аппарат состоит из многих компонентов, включая микрофоны, виброизоляцию и ресивер. Компактное размещение этих компонентов приводит к возникновению нежелательных акустических и механических обратных связей. (Изображение предоставлено Knowles Corp.)

громкоговоритель, иногда называемый ресивером (рис. 1). Ресивер или громкоговоритель получает усиленный электрический сигнал и преобразует его в акустическую энергию или звук, направляемый в ушной канал по трубке или через ушной вкладыш.

В ресивере установлен рычаг с электромагнитным приводом, называемый язычком. Рычаг соединен с мембраной, которая колеблется и создает звуковые колебания. Внутренние электромагнитные силы также создают силы реакции, в результате чего вибрации передаются по конструкции слухового аппарата, создавая звук, попадающий в микрофон. Затем такой сигнал усиливается и снова подается на ресивер, вызывая появление обратной связи. Схема возникновения обратной связи представлена на рис. 1.

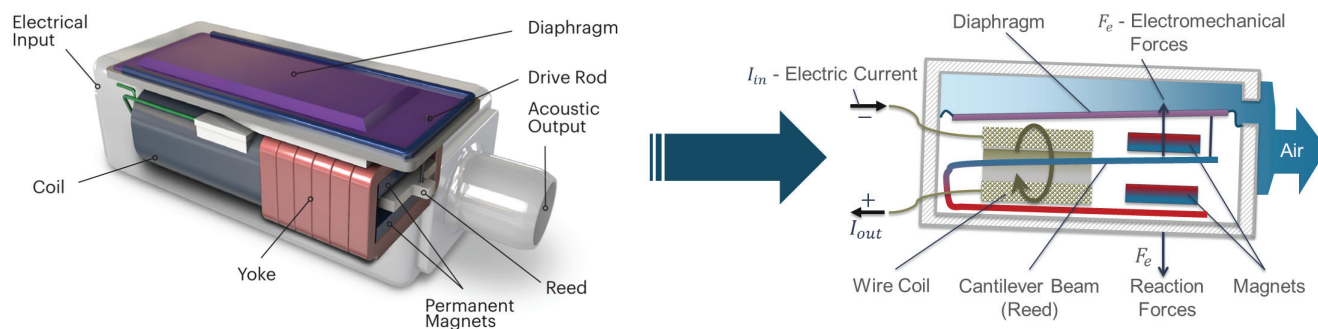


РИС. 2. Ресивер является ключевым элементом слухового аппарата. Он содержит миниатюрный динамик, включающий мембрану с электромагнитным приводом, которая и создает звук. Внутренние электромагнитные силы вызывают вибрацию конструкции, что приводит к возникновению механической обратной связи.

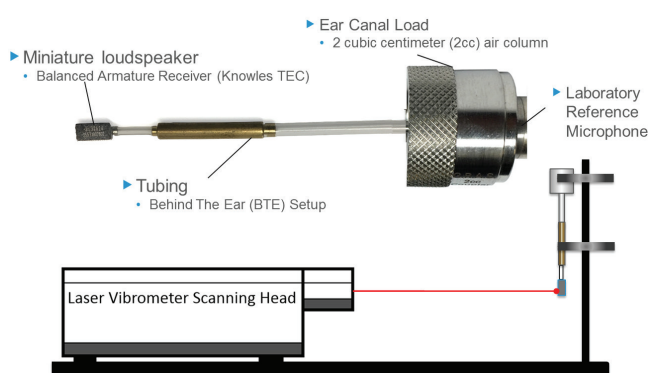


РИС. 3. Оборудование экспериментального стенда и схема его работы.

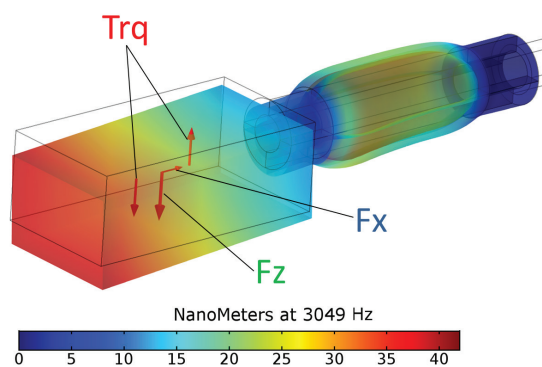


РИС. 4. Результаты расчета воздействующих сил и смещений ресивера и присоединенной к нему силиконовой трубки на частоте 3 кГц.

⇒ МОДЕЛЬ ТИПА «ЧЕРНЫЙ ЯЩИК»

Единственной задачей ресивера является преобразование подаваемого с микрофона усиленного электрического сигнала в звук. Хотя конструкция кажется простой, происходящий процесс весьма сложен (рис. 2). Сначала электрический сигнал преобразуется в магнитный, затем в механический и, наконец, в акустический. Каждый этап имеет свои собственные частотные характеристики. Выявление суммарного влияния всех элементов конструкции крайне важно для проектирования эффективных ресиверов, применяемых в различных видах слуховых аппаратов. Инженеры Knowles с начала 1960-х годов используют сложные эквивалентные электрические схемы, позволяющие моделировать происходящие в слуховых аппаратах электрические, магнитные, механические и акустические явления.

Точное моделирование сложных характеристик ресивера требует создания чрезвычайно большой и сложной мультифизической конечноэлементной модели, малоприменимой для быстрой и эффективной разработки слуховых аппаратов. Эту проблему удалось

решить, когда специалист по ресиверам и микрофонам слуховых аппаратов доктор Даниэл Уоррен (Daniel Warren) в 2013 году предложил использовать модель типа «черный ящик». В ней содержится минимальное количество простых электронных компонентов, достаточное для нахождения электроакустической передаточной функции, связывающей напряжение и уровень выходного звукового давления для ресиверов с уравновешенным якорем. Факторы, не представляющие важности для ограничения обратной связи, при этом не учитываются.

Важнейший прорыв в упрощении модели был достигнут, когда Уоррен и Варанда показали, что упрощенный электроакустический контур можно превратить в полнофункциональную виброакустическую модель, лишь немного увеличив ее сложность. «Преобразование выполняется на основе анализа участка цепи "черного ящика", в котором напряжение на обмотках прямо пропорционально внутренним механическим силам, вызывающим вибрацию конструкции», — поясняет Уоррен.

«Черный ящик» и виброакустические модели было необходимо испытать на

соответствие реальным акустическим и механическим системам ресивера. Только после этого такие модели можно было применять в проектировании слуховых аппаратов. Поэтому в 2014 году Knowles в сотрудничестве со своими заказчиками по всему миру начала проект по валидации моделей в программном обеспечении COMSOL Multiphysics® и проведению стандартных испытаний, принятых в отрасли.

⇒ СОТРУДНИЧЕСТВО В ОБЛАСТИ ВАЛИДАЦИИ

Для оценки качества полученных моделей требовалось одновременно измерять выходной акустический сигнал и силы вибрации, используя конструкцию, легко моделируемую методом конечных элементов. Как и все стандартные испытания слуховых аппаратов, это испытание предусматривает подключение ресивера к короткому отрезку трубки, ведущей в замкнутую полость объемом 2 см³. Полость имитирует стандартную акустическую нагрузку в ушном канале (см. рис. 3). Звуковое давление в полости измеряется при помощи лабораторного микрофона. Для проверки достоверности модели параметры ресивера также

измерялись при помощи сложной конструкции из трубок, имитирующей заушный слуховой аппарат. Длинная трубка имеет переменный диаметр, а ее длина достаточна для возникновения множественных акустических резонансов. Одновременно с измерением выходного акустического сигнала лазерный измеритель вибраций фиксирует перемещения деталей ресивера. Смещения и повороты измерялись путем отслеживания положения ряда точек на поверхности корпуса ресивера.

Уоррен и Варанда проводили все эти измерения в сотрудничестве с рядом заказчиков Knowles. При помощи COMSOL Multiphysics им удалось создать упрощенную модель виброакустического контура, имитирующую описанный выше испытательный стенд. Данная модель связывает механическое взаимодействие между перемещениями ресивера и присоединенной к нему силиконовой

трубки, термовязкостные потери при различных площадях поперечного сечения трубки и нагрузки от звукового давления в полости и трубке с внутренними электрическими, магнитными и акустическими явлениями в модели ресивера типа «черный ящик».

Модель в программном обеспечении COMSOL позволила установить зависимость выходного давления и механических сил от приложенного напряжения, частоты и свойств материала. На рис. 4 показаны результаты расчета перемещений в модели с частотой 3 кГц и сил реакций, связанных с ресивером.

Варанда сравнил результаты моделирования с реальными измерениями, и они оказались прекрасно согласованными (рис. 5). Силы, действующие на мембрану и язычок, имеют акустическую зависимость от выходного звукового давления. При этом, как и ожидалось, силы, действующие на мембрану, прямо пропорциональны силам реакции конструкции.

Объединение усилий пошло на пользу всем предприятиям, занимающимся слухопротезированием. «В конечном счете разработчикам слуховых аппаратов не требуются сверхсложные модели преобразователей и занимающее много времени моделирование. Они хотят просто сосредоточиться на разработке собственной конструкции, пробуя в ней различные варианты преобразователей, — добавляет он. — Именно это и позволяет делать созданная в COMSOL модель. В ней можно легко сравнивать сотни вариантов преобразователей для одного и того же слухового аппарата».

Конструкторы слуховых аппаратов получили возможность уменьшить обратную связь и в целом улучшить рабочие характеристики изделия, что работает на благо пациентов с нарушениями слуха. При этом были также сокращены экономические и временные затраты на проектирование. ❖

“Конструкторы слуховых аппаратов получили возможность уменьшить обратную связь и в целом улучшить рабочие характеристики изделия, что работает на благо пациентов с нарушениями слуха. При этом были также сокращены экономические и временные затраты на проектирование.”

⇒ РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗНАНИЙ

Knowles предоставила разработанную модель другим разработчикам слуховых аппаратов, чтобы они могли устранить обратную связь в выпускаемых изделиях. Имея полное представление об акустических, механических и электромагнитных характеристиках компонентов, можно успешно проводить виртуальную оптимизацию конструкции.

«Программное обеспечение COMSOL — один из немногих инструментов моделирования, позволяющий легко связать цепь ресивера с сосредоточенными параметрами типа "черный ящик" с акустикой и механикой твердого тела, — отмечает Варанда. — До сих пор верификация и оптимизация конструкций слуховых аппаратов была в одинаковой степени искусством и наукой. Мы очень рады появлению новых конструкций слуховых аппаратов, созданных на основе наших моделей».



Бренно Варанда (Brenno Varanda), старший инженер-электроакустик Knowles Corp.

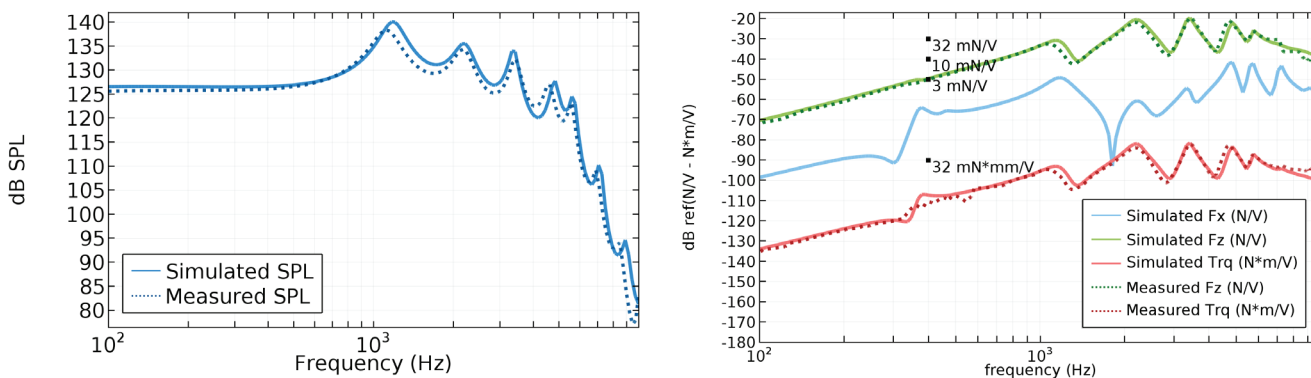


РИС. 5. Слева: сравнение измеренного (пунктирная линия) и расчетного (сплошная линия) уровней звукового давления в полости объемом 2 см³. Справа: Сравнение измеренных (пунктирная линия) и расчетных (сплошная линия) сил и моментов, действующих на ресивер.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТЕЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ В СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМАХ

Электрический дуговой разряд на орбитальных спутниках может привести к отказу системы, но его трудно предсказать. Инженеры Института сильноточной электроники (Россия) используют мультифизическое программное обеспечение для обнаружения критических областей возникновения пробоев и защиты бортового оборудования.

ДЖЕММА ЧЕРЧ (GEMMA CHURCH)

В 1995 году компания Boeing Satellite Systems представила новое семейство интерфейсных шин для спутников с силовыми, управляющими и двигательными системами в одном корпусе. В конструкции спутников использовались высоковольтные шины, подключенные к стабилизированному источнику питания 100 В вместо стандартного напряжения 27 В. Это привело к увеличению рабочего напряжения, что снизило рабочие токи и соответствующие активные потери в проводниках. Однако это также создало опасность катастрофической аварии в электронных системах спутников — дугового разряда (рис. 1).

Василий Кожевников, научный сотрудник Института сильноточной электроники в Томске, Россия, поясняет: «Переход на новый стандарт рабочих напряжений привел к проблеме возникновения электрической дуги между элементами электронных печатных плат. Для того, чтобы максимально уменьшить массу спутника, пространство внутри корпуса платы не заполняется изолятором и не конструируется для работы в вакууме. При этом возможно возникновение электрического дугового разряда или разрядного каскада, который может распространиться на значительный объем бортового оборудования».

«Зажигание электрической дуги внутри бортовой спутниковой системы всегда

приводит к частичному или полному отказу. В большинстве случаев это приводит к выходу спутника из строя», — добавил он.

Это исследование тесно связано с физикой газового разряда в экстремальных условиях, при которых электрооборудование не всегда работает по обычным физическим законам. Например, электрические разряды иногда возникают ниже порога, известного как минимальное напряжение Пашена. В обычных условиях такие

значения напряжения недостаточны для возникновения разряда или электрической дуги между двумя электродами.

«Мы считаем, что это исследование также найдет потенциальное применение для диагностики электроники, работающей в широком диапазоне внешних параметров, таких как давление, уровни ионизации и т. д. В перспективе оно широко применимо и не только в аэрокосмической промышленности и исследованиях космоса», — отметил Кожевников.

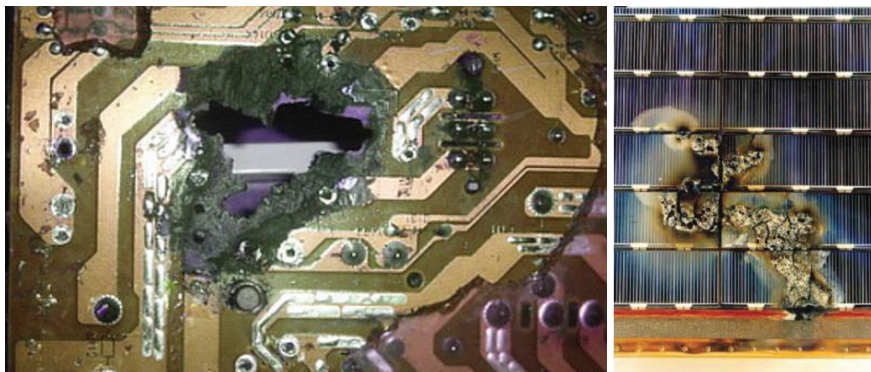


РИС. 1. Типовое повреждение, вызванное первичной дугой в источнике питания, работающем при напряжении 100 В.

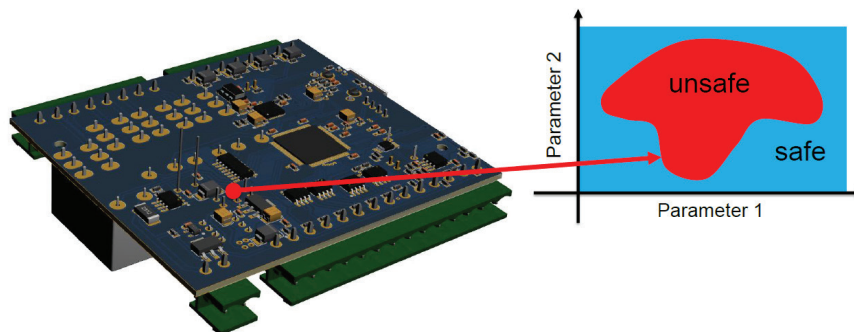
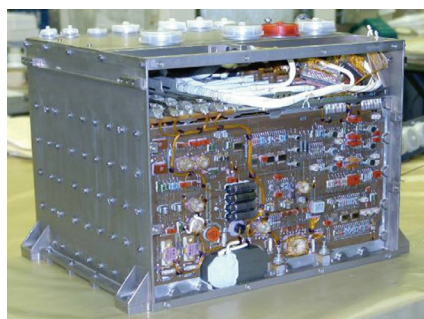


РИС. 2. Пример печатной платы для спутникового оборудования. Ширина критических областей менее 5 мм. Инженерам Института сильноточной электроники необходимо определять диапазон небезопасных условий эксплуатации и характеристик для разработки системы, которая может эксплуатироваться на борту спутников без риска выхода из строя.

Поскольку электронные системы используются во все более экстремальных условиях, проблема предотвращения электрической дуги актуальна не только для гражданской космической промышленности. Электрическая дуга представляет угрозу для любого электронного изделия, разработанного для длительной автономной работы с повышенными требованиями к отказоустойчивости. Поэтому решение этой проблемы актуально не только для спутников, но также и для наземных систем и подводного оборудования.

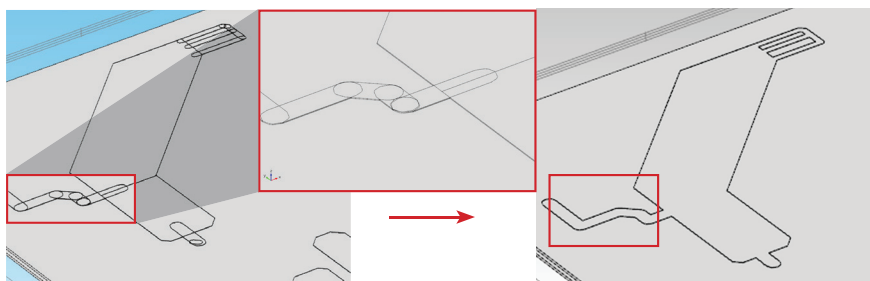


РИС. 3. Коррекция геометрии в COMSOL.

⇒ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКИХ ОБЛАСТЕЙ

Для предотвращения разрушения бортового электронного устройства самопроизвольным дуговым разрядом необходимо обозначить так называемую «критическую область», в которой возникает самоподдерживающийся разряд. Как только эта потенциально проблемная область будет определена, инженеры должны провести дополнительные исследования, чтобы выявить причины, которые могут вызвать электрический дуговой разряд.

“В программном обеспечении COMSOL нам удалось провести исследование без создания собственного вычислительного кода. Мы ожидаем, что [оно] будет чрезвычайно перспективным для наших будущих исследований”

— **ВАСИЛИЙ ЮРЬЕВИЧ КОЖЕВНИКОВ,**
НАУЧНЫЙ СОТРУДНИК ИНСТИТУТА
СИЛЬНОТОЧНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

В ходе экспериментальных исследований невозможно определить такие зоны риска, поскольку на практике невозможно воспроизвести весь диапазон рабочих параметров на космической орбите.

Единственно возможная альтернатива, моделирование, также сопряжена

с большими трудностями. Прежде всего, типичное бортовое электронное устройство состоит из множества печатных плат, распределенных по большой площади и размещенных внутри металлического корпуса (рис. 2). Кожевников поясняет: «Единственный способ определить возможные области возникновения самоподдерживающегося разряда — это численное моделирование разряда, но оно практически невозможно для таких крупномасштабных задач из-за связанных с этим затрат на вычисления. Задача моделирования разряда является одновременно и мультифизической, и многоуровневой».

⇒ ВЫЯВЛЕНИЕ НЕТОЧНОСТЕЙ ГЕОМЕТРИИ

Исследовательская группа в Томске упорно работала над поиском точного и практически применимого вычислительного подхода. Для решения этой задачи исследователи предложили методологию «декомпозиции», реализованную с помощью вычислительных средств. Вместо полного моделирования разряда постоянного тока для всего электронного устройства они создали специализированное приложение для моделирования, которое самостоятельно разделяет устройство на части и ищет в нем наиболее вероятные критические области. С этой целью они использовали программное обеспечение COMSOL Multiphysics® и среду разработки приложений

для создания мультифизической модели, поддерживающей весь цикл моделирования.

Важным этапом моделирования была предварительная обработка, выполненная для применения надлежащих граничных условий и импорта детализированной геометрии реальной бортовой электронной системы.

С помощью Среды разработки приложений команда выполнила предварительную обработку с использованием специального метода на основе трехмерной макромодели. Они также реализовали свой собственный механизм импорта с автоматической коррекцией границ объектов. Метод включал как импорт, так и автоматическую коррекцию границ объектов, поясняет Кожевников (рис. 3). Без коррекции такие ошибки могли стать серьезным препятствием в моделировании.

⇒ ДЕКОМПОЗИЦИЯ ЗАДАЧИ ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ

После предварительной обработки моделирование проводилось в три этапа: предварительный электростатический анализ потенциальных критических областей в трехмерной модели; извлечение областей, в которых происходит процесс усиления поля, и определение критических областей с помощью соответствующих двумерных моделей; моделирование разряда постоянного тока в критических областях для дальнейшего исследования.

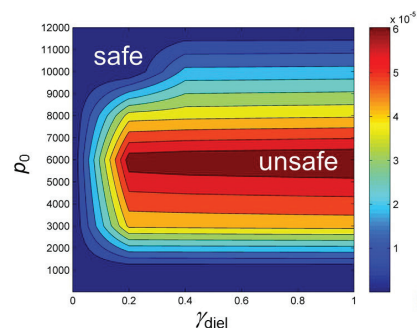
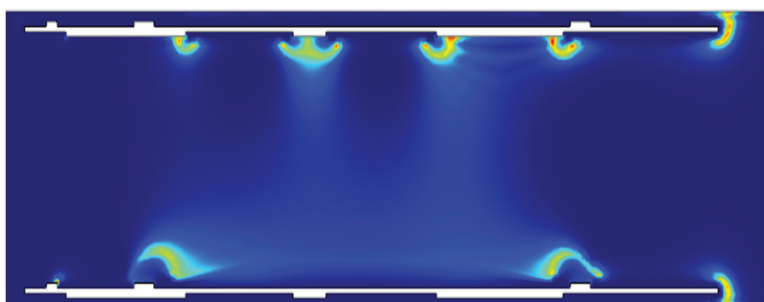


РИС. 4. Слева: распределение плотности электронов для фазы самоподдерживающегося разряда. Эта двумерная модель получена на основе результатов определения критических областей в трехмерной модели источника питания спутника. Справа: пример диаграммы критических параметров, на которой показана зависимость эмиссии электронов от давления. Цветовая карта отображает уровень плотности тока разряда.

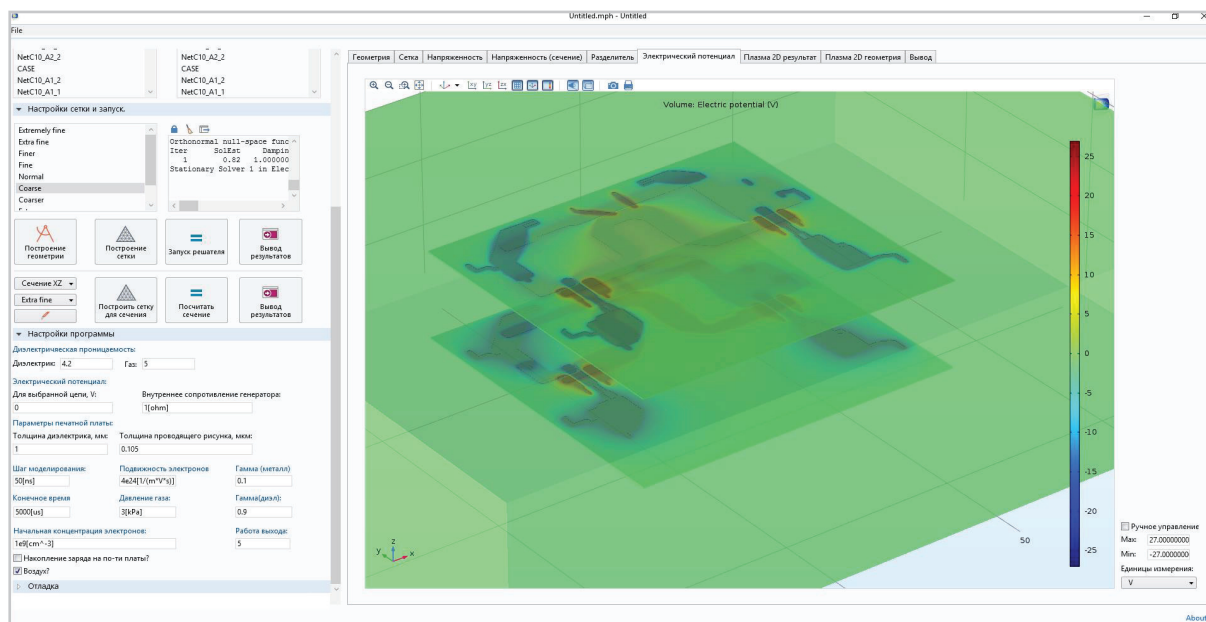


РИС. 5. Разработанное Кожевниковым мультифизическое приложение позволяет изменять такие параметры, как давление и эмиссия электронов, для определения областей, в которых наиболее вероятно самоподдерживающийся разряд. Приложение дает возможность изменять положение дуги и исследовать некоторые режимы зажигания разряда без полномасштабного моделирования разряда постоянного тока. В результате работы оно рассчитывает электрический потенциал во всей системе электронных компонентов.

С самого начала команда использовала программный пакет COMSOL Multiphysics из-за его уникального функционала, позволяющего реализовать все функции двухмоментной теоретической модели разряда постоянного тока и изменять необходимые параметры. При моделировании был проведен анализ распределения электронной плотности и выявлена критическая область (рис. 4). Кожевников поясняет: «Программный пакет COMSOL Multiphysics точно соответствует требованиям нашего проекта, в частности в области анализа диапазона рабочих давлений. Такой расчет для средних и высоких давлений намного быстрее и удобнее, чем моделирование методом частиц в ячейке (PIC)».

«Моделирование методом частиц в ячейке (PIC) просто нецелесообразно для таких задач из-за больших вычислительных затрат. Возможно моделирование лишь упрощенных конфигураций (например, газовых диодов), но, в зависимости от задачи, оно может потребовать в 5–20 раз больше времени для средних давлений, чем расчеты с использованием COMSOL. Среднее время расчета в COMSOL для такой конфигурации составляет менее 2 часов».

Созданное группой специализированное приложение, продемонстрированное на рисунке 5, скрывает от пользователя сложность физических явлений, определяющих параметры модели. Оно оставляет доступным для пользователя приложения только относящиеся к анализу параметры и позволяет подключать пользовательские команды и алгоритмы.

Кожевников рассказывает: «Строго говоря, благодаря COMSOL нам удалось провести исследование без создания собственного вычислительного кода, который для этой задачи был бы чрезвычайно сложным. Мы ожидаем, что это программное обеспечение будет чрезвычайно полезным для наших будущих исследований газовых разрядов». Другими аргументами в пользу выбора COMSOL стал широкий выбор инструментов предварительной и постобработки, включая Среду разработки приложений и функции импорта из CAD-систем.

⇒ РЕШЕНИЕ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ И МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫХ ЗАДАЧ

По мнению Кожевникова, существует возможность использовать аналогичные модели в исследованиях, в которых решаются другие практические задачи. «Если в будущем станет возможным выполнение полного неразрушающего испытания, то моделирование в COMSOL позволит сузить область экспериментальных испытаний путем исключения несущественных частей. Некоторые работы по разработке неразрушающих испытаний были выполнены нашими коллегами из лаборатории вакуумной электроники Института сильноточной электроники в рамках нашего совместного проекта».

«Автономное программное обеспечение для спутникового оборудования должно быть достаточно гибким, чтобы гарантировать постоянную работоспособность аппарата, — продолжает он. — Стандарты космической промышленности периодически меняются, поэтому трудно учесть все последствия таких изменений. Мы решили задачу диагностики дугового разряда, однако мы ожидаем, что увеличение напряжения также потребует серьезной модернизации некоторых бортовых электронных устройств для соответствия новым условиям эксплуатации. Проще говоря, если условия работы какого-либо устройства существенно отличаются от «нормальных условий», то необходимо соответствующим образом перестроить его архитектуру. Наше приложение предоставляет рекомендации по перепроектированию печатных плат для увеличения их устойчивости к электрической дуге, но оно также может быть полезно при разработке отказоустойчивых электронных систем. ❖



Василий Юрьевич Кожевников в 2008 году защитил кандидатскую диссертацию по теоретической физике в Томском государственном университете, Россия. С 2008 года является научным сотрудником лаборатории теоретической физики Института сильноточной электроники СО РАН (Томск). Активно использует программный пакет COMSOL с 2012 года.

Моделирование меняет индустрию медицинского оборудования

ФРЕДДИ ХАНСЕН (FREDDY HANSEN), ABBOTT LABORATORIES

Мы, разработчики медицинского оборудования, развиваем современные технологии, которые помогут облегчить боль, восстановить здоровье и продлить жизнь. Пять лет назад я перешел из национальной лаборатории в сектор производства медицинского оборудования. В то время для моделирования использовался единственный подход — методы вычислительной гидродинамики (CFD). Моделирование медицинских имплантатов представляет особую трудность, так как тело человека — необычайно сложная и плохо изученная система управления.

Было ясно, что поставить граничные условия для численной модели будет очень непросто. Например, придется изрядно постараться, чтобы построить даже термическую модель имплантата (при том, что большинство из нас считает ее простой), потому что требуется учесть теплопередачу в ткани, снабжаемой кровью. Еще одно препятствие — правильный подбор свойств материала. Мышцы, жир и другие ткани организма — враждебная среда для имплантата. Они могут

“В последнее время я сталкиваюсь со случаями, когда точность определения рабочих характеристик с помощью традиционных стендовых испытаний оказывается намного ниже, чем точность результатов моделирования. Почему же не применять моделирование в таких случаях?”

обладать весьма странными свойствами и со временем способны изменять материал самого устройства. Металлы корродируют, а неметаллы поглощают жидкости, которые затем вместе с ионами могут диффундировать.

Если возникает столько трудностей, то зачем использовать моделирование? К счастью, у компьютерного моделирования есть и значительные преимущества — оно позволяет сэкономить время и средства на построении и испытании множества прототипов, а также «измерить» все, что вы пожелаете, где угодно.

Если говорить о медицинских имплантатах, то их испытания — очень затратный этап разработки. И хотя в процессе испытаний, конечно, можно делать измерения, но часто бывает просто невозможно разместить датчики скорости, термодатчики и другие сенсоры в желаемые контрольные точки. Моделирование помогает спланировать и подготовить такие испытания. Применение методов численного моделирования позволило нам интерполировать экспериментальные данные, полученные в нескольких точках, и, таким образом, выполнить более сложный анализ. В итоге нам удалось сократить количество необходимых испытаний. В некоторых случаях можно даже отказаться от испытаний, полностью заменив их моделированием.

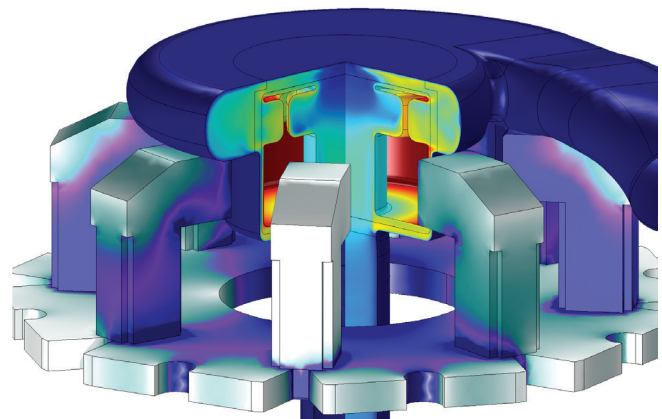
Обнадеживает, что контролирующие организации по всему миру постепенно разрешают заменять физические испытания для регистрации изделия на моделирование.

Зачастую менее затратные стендовые испытания также можно заменить моделированием. В последнее время я сталкиваюсь со

случаями, когда точность определения рабочих характеристик с помощью традиционных стендовых испытаний оказывается намного ниже, чем точность результатов моделирования. Почему же не применять моделирование в таких случаях?

Со временем программное обеспечение для моделирования стало более совершенным. Особенно мне нравится среда численного моделирования COMSOL Multiphysics, поскольку ее возможности мультифизического моделирования не знают себе равных. Даже если не требуется моделировать взаимосвязанные физические явления, использование одного и того же пользовательского интерфейса для моделирования теплопередачи, электромагнитных явлений, механики конструкций и вычислительной гидродинамики ускоряет рабочий процесс и снижает количество ошибок. Я также жду, что появится возможность вводить произвольные сложные свойства материала или легко связывать свои собственные дифференциальные уравнения с существующими физическими интерфейсами.

Компьютерное моделирование открывает много возможностей для медицинской промышленности. Я рад видеть, что спрос и понимание преимуществ численного моделирования постоянно растет как в моей компании, так и в отрасли в целом.



Модель левожелудочкового аппарата вспомогательного кровообращения, построенная с помощью COMSOL Multiphysics®.



ОБ АВТОРЕ

Фредди Хансен имеет докторскую степень по прикладной физике, закончил Калифорнийский технологический институт. Живет в районе залива Сан-Франциско. Работает в Abbott Laboratories над созданием искусственного сердца, используя свои знания об электромагнитных явлениях и гидродинамике. Автор более 40 научных работ. Зарегистрировал или подал заявку на полдюжины патентов. Соавтор популярного учебника по физике для вузов.