

MULTIPHYSICS SIMULATION

При поддержке
COMSOL

IEEE
SPECTRUM

ОКТАБРЬ 2018 ГОДА

КВИНТИСЕНЦИЯ МУЛЬТИФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

ТРЕХМЕРНАЯ ДЕТАЛИЗИРОВАННАЯ
ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГЛАЗА ПОЗВОЛЯЕТ
ПРОДЛИТЬ ХОРОШЕЕ ЗРЕНИЕ ЕЩЕ НА 20 ЛЕТ

СТРАНИЦА 6

МУЛЬТИФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ БУДУЩЕГО

**МАЙКЛ ФОРСТЕР (MICHAEL FORSTER),
УПРАВЛЯЮЩИЙ ДИРЕКТОР, ОТДЕЛ ПУБЛИКАЦИЙ
IEEE**

МУЛЬТИФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ —

важный и гибкий инструмент. Он позволяет медикам-исследователям усовершенствовать методики офтальмологических операций. Швейцарская медицинская компания Kejako разработала численную модель человеческого глаза, учитывающую механические и оптические свойства этого важного органа. Сотрудники компании рассчитывают на основе этой модели разработать хирургические методики для пациентов с пресбиопией, старческим нарушением зрения, при котором сложно различать близко расположенные объекты.

Компания STMicroelectronics, крупный производитель полупроводниковых устройств, использует мультифизическое моделирование для разработки и оптимизации конструкций портативных и носимых медицинских устройств.

Благодаря мультифизическому моделированию инженеры могут решать исследовательские задачи, которые ранее были чересчур сложными или обходились слишком дорого. Например, исследователи в компании General Atomics приближаются к святому Граалю энергетики: они используют мультифизическое моделирование в разработке термоядерного синтеза с магнитным удержанием плазмы в токамаке.

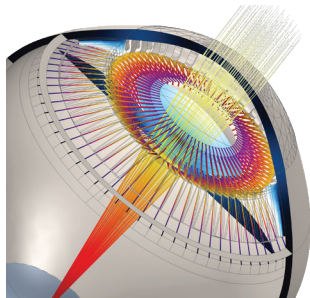
Физики в компании Giesecke+Devrient Currency Technology с его помощью создают датчики для высокопроизводительных систем обработки банкнот, через которые за день проходят миллионы купюр.

Мультифизическое моделирование позволяет компаниям по всему миру производить инновационные продукты будущего, спасать жизни и защищать экономику от фальшивых купюр.

Мы надеемся, что вам понравится рассказ о впечатляющих достижениях в этом специальном выпуске журнала от компании COMSOL. ☺

Майкл Б. Форстер, управляющий директор,
отдел публикаций IEEE

НА ОБЛОЖКЕ:
визуализация
механических
деформаций и
траектории лучей
в трехмерной
параметрической
модели глаза.
Изображение
предоставлено
компанией
Kejako SA.



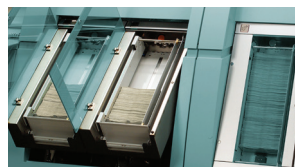
СОДЕРЖАНИЕ

3 ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ С ЛЕПЕСТКОВЫМИ КОНТАКТАМИ НА ЗАЩИТЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

— Компания ABB, Швейцария

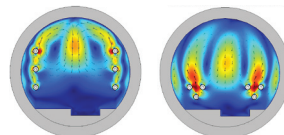
6 ТРЕХМЕРНАЯ ДЕТАЛИЗИРОВАННАЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГЛАЗА ПОЗВОЛЯЕТ ПРОДЛИТЬ ХОРОШЕЕ ЗРЕНИЕ ЕЩЕ НА 20 ЛЕТ

— Компания Kejako, Швейцария



10 «МОЗГИ» СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ БАНКНОТ

— Компания Giesecke+Devrient,
Германия



13 НАЦИОНАЛЬНАЯ СЕТЕВАЯ КОМПАНИЯ ВЕЛИКОБРИТАНИИ МОДЕЛИРУЕТ ПОДЗЕМНЫЕ КАБЕЛЬНЫЕ ЛИНИИ

— Национальная сетевая
компания Великобритании

16 МУЛЬТИФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПОРТАТИВНЫХ НОСИМЫХ МЕДИЦИНСКИХ СИСТЕМ

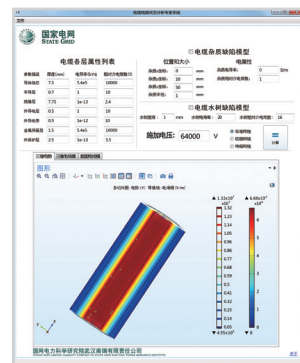
— Компания STMicroelectronics,
Италия

18 ГЕЛИКОННАЯ АНТЕННА ДЛЯ ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

Компания General Atomics, США

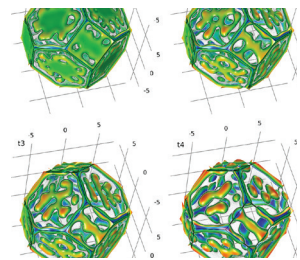
21 МОДЕЛИРОВАНИЕ УСКОРЯЕТ РАЗРАБОТКУ МИКРОГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ СОРТИРОВКИ КЛЕТОК

— Компания TTR,
Великобритания



24 ЭФФЕКТИВНАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ И ОБСЛУЖИВАНИЕ ЭЛЕКТРОСЕТИ С ПРИЛОЖЕНИЯМИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

— Группа компаний NARI,
Китай



27 МУЛЬТИФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЛИВАЕТ СВЕТ НА СЛОЖНЫЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

— Лаборатория ядерных
исследований Канады

30 ПРЕКЛОНЯЯ ГОЛОВУ ПЕРЕД МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

— Компания GN Resound,
Дания

32 УВЕРЕННАЯ РАЗРАБОТКА ВЫСОКОКЛАССНЫХ ПРОДУКТОВ

— компания WAT, Великобритания

ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ С ЛЕПЕСТКОВЫМИ КОНТАКТАМИ НА ЗАЩИТЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Инженеры компании ABB на основании мультифизического моделирования постоянно увеличивают допустимую токовую нагрузку автоматов защиты генераторов. Так они защищают электростанции по всему миру от выбросов тока и обеспечивают бесперебойную генерацию электроэнергии.

Автор — ЗАК КОНРАД

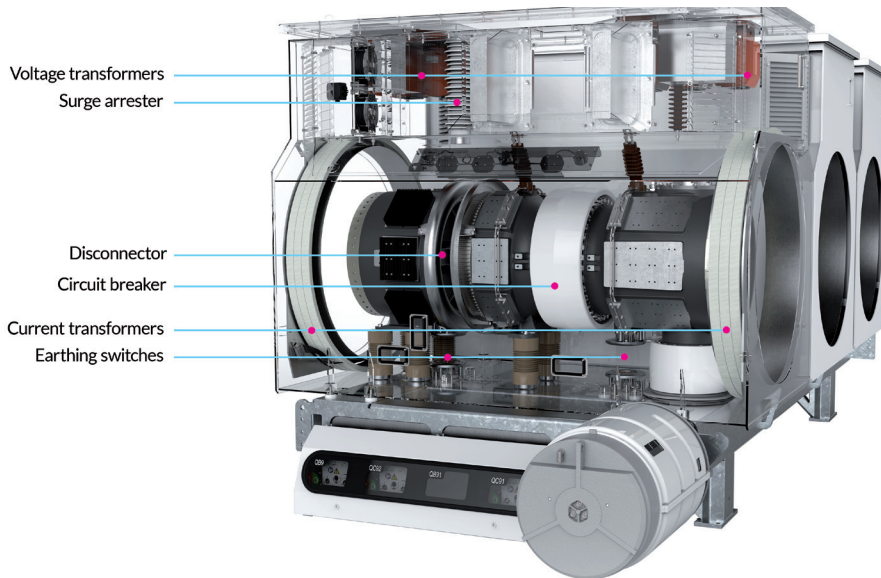


Рис. 1. Строение защитного автомата генератора ABB (HES10-210). Изображение предоставлено: ABB.

ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ — одна из главных опор современного общества. Столь важные для наших технологий системы необходимо защищать от простоев. И атомные, и угольные, и гидроэлектростанции оснащены одинаковыми универсальными элементами защиты — защитными автоматами генераторов. Защитные автоматы играют важную роль, защищая электростанции от сильных выбросов тока (рис. 1). Защитные автоматы разрывают соединение, если из-за неисправной электропроводки или проблем в электросети за десятки миллисекунд возникают вредоносные токи короткого замыкания, которые могут повредить оборудование электростанции. В современном мире, где даже самый короткий перебой в работе электростанции может обойтись в миллионы долларов, неудивительно, что защитные автоматы так важны. Международная компания ABB Group, один из лидеров в производстве электрооборудования, робототехники, промышленной

автоматики и энергосетевого оборудования, разрабатывает защитные автоматы для электростанций по всему миру.

Защита от выбросов тока сложна и нетривиальна, так как они могут возникнуть в любой момент времени. Из-за этого защитные автоматы должны быть предельно надежны и всегда готовы к безошибочной работе, даже после долгого периода бездействия. В нормальном

режиме защитный автомат — обычный элемент схемы с низким сопротивлением, соединяющий генератор с трансформатором и электросетью. Защитный автомат передает сгенерированную электроэнергию на высоковольтную линию передачи. При необходимости он должен разрывать соединение при токах, во много раз превышающих нормальные, не повреждая остальные компоненты сети.

» ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ С ЛЕПЕСТКОВЫМИ КОНТАКТАМИ ДЛЯ ЗАЕМЛЕНИЯ СИСТЕМЫ

ЗАЩИТНЫЕ АВТОМАТЫ, разработанные компанией ABB, обеспечивают надежное и безопасное подключение в тысячах электростанций по всему миру и служат не меньше тридцати лет. Инженеры компании ABB Франческо Агостини, Альберто Дзанетти и Жан-Клод Мору постоянно улучшают конструкционные решения своих разработок, чтобы соответствовать современным требованиям. Каждая новая разработка проходит всесторонние стандартные испытания, прежде чем уйти в коммерческое производство. Часть из этих стандартных испытаний — испытания заземлителей (рис. 2), важных компонентов защитных автоматов.

«Заземлители должны заземлять компоненты системы под током, создавая электрический контакт между ними и землей, — объясняет Мару. — Они также защищают специалистов, эксплуатирующих оборудование, поэтому они должны работать надежно и безопасно даже в экстремальных условиях».

К конструкции данного компонента предъявляется целый ряд требований. Распространенная конфигурация, которую компания ABB использует

TYPICAL SINGLE LINE DIAGRAM

1. Generator circuit breaker
2. Series disconnecter
3. Capacitors
4. Starting disconnecter for SFC
5. Manual short-circuit connection
- 6. Earthing switches**
7. Current transformers
8. Potential transformers
9. Surge arresters
10. Motorized short-circuit connection

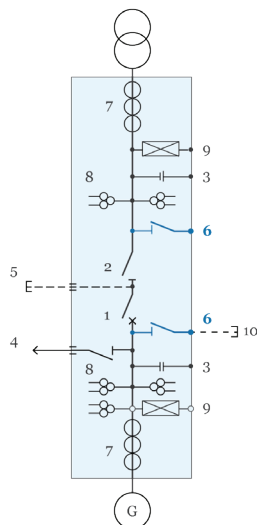


Рис. 2. Типовая однопроводная диаграмма защитного автомата, на которой показано расположение заземлителей.

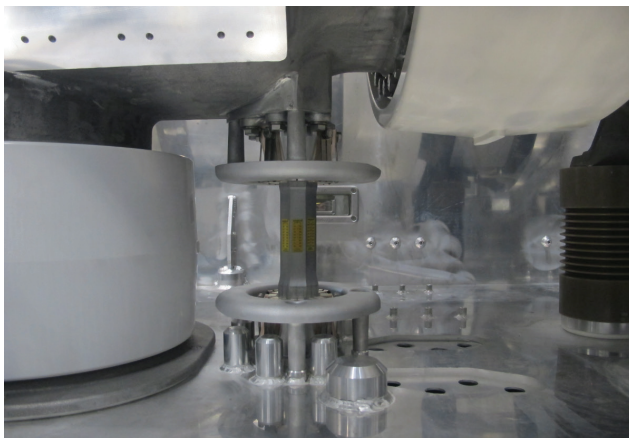


Рис. 3. Заземлители защитного автомата в замкнутом положении. Подвижная шпилька соединяет лепестковые контакты сверху и снизу. Изображение предоставлено: ABB.

в таких переключателях, называется лепестковой (и визуально напоминает тюльпан, что определяет её английское название — *tupil*). В этой конструкции фиксированные и скользящие посеребренные контактные пальцы обеспечивают отключаемое электрическое соединение, а пружины прикладывают статическую нагрузку к пальцам. С одной стороны, выключатель должен выдерживать ток короткого замыкания по стандартам Международной

электротехнической комиссии (IEC) при замкнутом контакте (рис. 3). С другой стороны, из-за чрезмерно высоких токов возникают большие электромагнитные силы, влияние которых нужно учитывать.

При проектировании контактной части заземлителя ключевым является расчет предельной токовой нагрузки, и Агостини, Дзанетти и Мару воспользовались мультифизическим моделированием, чтобы изучить сложную зависимость токовой

“ Мы прошли нормативные испытания с запасом, показав, как моделирование и эксперимент могут гармонично дополнять друг друга».

— ФРАНЧЕСКО АГОСТИНИ, ГЛАВА ОТДЕЛА РАЗРАБОТКИ ЗАЩИТНЫХ АВТОМАТОВ И МАТЕРИАЛОВ, КОМПАНИЯ АБВ

нагрузки от усилия в контакте и рассчитать все силы, действующие на контакт. В программном пакете COMSOL Multiphysics[®] они создали модель переключателя с лепестковыми контактами, чтобы рассчитать в полной связке все электромеханические явления и процессы.

» КОНТАКТНЫЕ ПАЛЬЦЫ, Э/М ПОЛЯ И ПРИЛОЖЕННЫЕ СИЛЫ

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИЛ на лепестковые контакты определяется двумя эффектами. Сила Хольма, приложенная к точкам электрического контакта, отталкивает их. Сила Лоренца, действующая на проводник с током в магнитном поле, притягивает их. Задача в том, чтобы сделать силу притяжения значительно больше силы отталкивания. Отталкивание пальцев снижает усилие в контакте и может привести к потере электрического контакта и значительному росту электрического сопротивления. Растущее сопротивление означает рост резистивных потерь, которые, в свою очередь, ведут к росту температуры. Из-за этого контакты выключателя могут расплавиться и повредить защитный автомат. Таким образом, усилие в контакте должно быть достаточно большим. Лепестковый контакт — это конструкционное решение, управляемое в первую очередь законом Лоренца. Усилие в контакте должно быть большим и для того, чтобы повысить токовую нагрузку, после которой контакты расплавятся. Предельная токовая нагрузка и допустимые электромагнитные силы отталкивания сильно зависят от конструкции лепесткового соединения. Если контакт выдерживает высокий ток, выключатель сможет отключить выброс тока, не расплавив контакты (рис. 4), и обеспечить надежную и безопасную работу всего защитного автомата в экстремальных условиях. «Смысл такой лепестковой конструкции в форме тюльпана не только в том, чтобы создать отключаемый контакт, но и в том, чтобы пружины прикладывали статическое радиальное усилие к контактным пальцам, — говорит Мору. — Большая сила Лоренца вносит свой вклад в усилие в контакте и позволяет повысить предельную токовую нагрузку».

Расчет результирующей силы, приложенной к контактам, требует учета взаимосвязанных физических явлений: Электрический ток, текущий через каждый палец, создает магнитное поле, которое, в свою очередь, оказывает силовое воздействие на каждый из остальных пальцев, по которым тоже течет ток. Исследовательская группа использовала мультифизическое моделирование и рассчитала силу несколькими способами, провела надежные и правдоподобные расчеты и проверила их экспериментально. Чтобы упростить модель и снизить требования к вычислительной мощности, они воспользовались симметрией задачи. Они создали модель одного контактного пальца (рис. 5 и 6), чтобы тратить в восемь раз меньше ресурсов на моделирование свойств полноразмерного лепесткового соединения. Используя формулировку через тензор напряжений Максвелла, они рассчитали силу Лоренца и подтвердили, что сила притяжения больше силы отталкивания Хольма, а значит, предложенная лепестковая конструкция предотвращает потерю

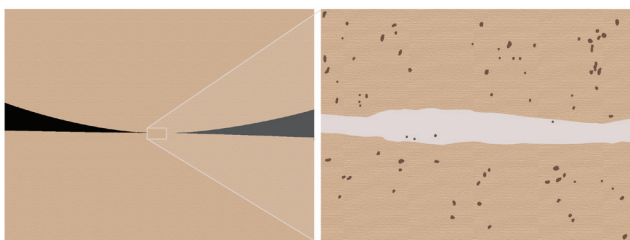


Рис. 4. Зона расплавления. Слева: сечение наконечника (вверху), сплавленного со шпилькой (внизу). Справа: крупный план зоны расплавления, на котором видно, как расплавленные металлы затвердевают и образуют сплав. Изображение предоставлено: ABB.

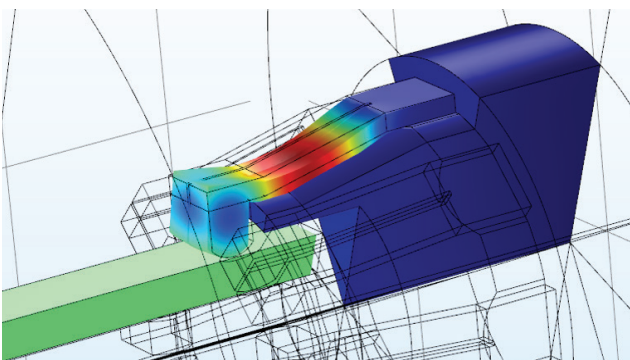
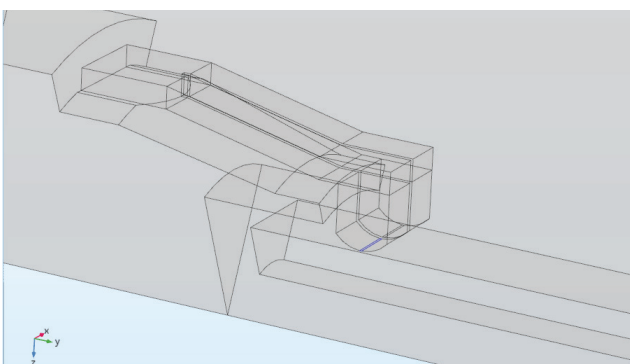


Рис. 5. Вверху: геометрия контакта. Внизу: деформация отдельного контактного пальца. Изображение предоставлено: ABB.

контакта. По расчетному значению результирующей силы можно определить теоретическую предельную токовую нагрузку и проверить, насколько ее можно поднять.

» СОГЛАСИЕ МЕЖДУ МОДЕЛИРОВАНИЕМ И ЭКСПЕРИМЕНТОМ ПОСЛЕ ТОГО КАК МОДЕЛЬ БЫЛА ГОТОВА, конструкции предстояло пройти многочисленные испытания.

Среди них были испытания диэлектрических свойств для предотвращения электрических пробоев, испытания на механическую износостойкость и испытания на температурный режим. Последнее и, вероятно, самое важное испытание — испытание на мощность КЕМА, в котором теоретические значения тока проверяют в эксперименте на соответствия стандартам IEC по токовой нагрузке. Чтобы измерить ток,

при котором контакты плавятся, проводится экспериментальное испытание: выключатель работает в условиях, схожих с электростанцией. Чтобы пройти сертификацию, выключатель должен выдержать пиковый ток в 500 кА. «Мы прошли эти испытания с запасом, показав, как моделирование и эксперимент могут гармонично дополнять друг друга. COMSOL — отличный инструмент, хорошо работающий в паре с экспериментальными испытаниями, — говорит Агостини. — Интуитивный интерфейс позволил нам упорядоченно и планомерно описать в модели множество физических явлений».

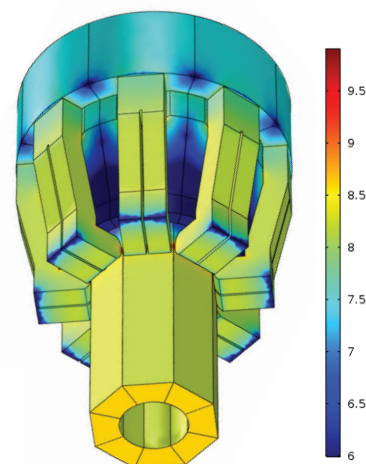
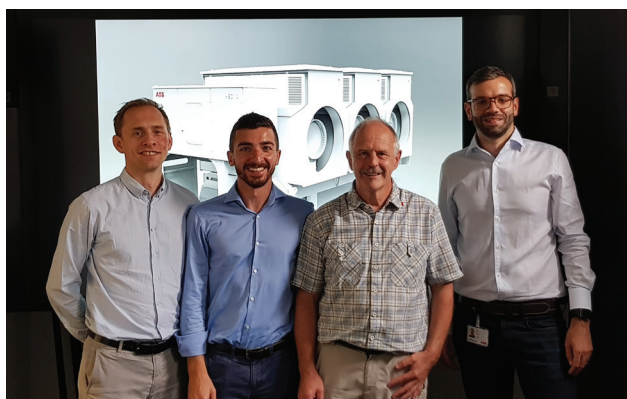


Рис. 6. Распределение плотности тока (логарифмический масштаб) в лепестковом соединении. Изображение предоставлено: ABB.

» ПОЛНАЯ ЭЛЕКТРОТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

В КОНЕЦ ИТОГЕ ГРУППА ИССЛЕДОВАТЕЛЕЙ планирует создать полную электротермомеханическую модель, которая позволит рассчитывать более сложные конструкции с учетом всех физических явлений, происходящих в выключателях. Кроме того, они планируют тщательно изучить физические и химические процессы плавления контактов. «Постоянные улучшения материалов и их модификация важны для разработки надежных и эффективных устройств, — говорит Мору. — Инструменты для моделирования развиваются и расширяются, и мы верим, что COMSOL справится и с более сложными задачами, которые мы будем решать в будущем». ©



Слева направо: Маркус Буётзек, менеджер по технологии защитных автоматов для генераторов; Франческо Агостини, глава отдела разработки защитных автоматов и материалов; Жан-Клод Мору, главный инженер отдела разработки защитных автоматов; Альберто Дзанетти, инженер-технолог.

ТРЕХМЕРНАЯ ДЕТАЛИЗИРОВАННАЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГЛАЗА ПОЗВОЛЯЕТ ПРОДЛИТЬ ХОРОШЕЕ ЗРЕНИЕ ЕЩЕ НА 20 ЛЕТ

Исследовательская группа в швейцарской медицинской компании Kejako рассказывает, как они применяют мультифизическое моделирование и разрабатывают инновационные методики, благодаря которым многим пациентам и клиентам еще десятки лет не будут нужны очки или операции на глазах.

Автор — **ДЖЕММА ЧЕРЧ**

ПРЕСБИОПИЯ — ЭТО РАССТРОЙСТВО ЗРЕНИЯ, ЯВЛЯЮЩЕЕСЯ ЕСТЕСТВЕННЫМ СЛЕДСТВИЕМ СТАРЕНИЯ, при котором хрусталик глаза меняет свои механические свойства и становится более жестким, что приводит к дальнозоркости. При этом аккомодация глаза снижается: глаз не может менять оптическую силу хрусталика так же эффективно, как раньше, и ясно фокусироваться на подвижном объекте.

Два решения этой проблемы, которые известны сейчас, противоположны по своей природе: можно перейти к использованию очков или пройти инвазивную хирургическую процедуру, рискуя ухудшить зрение (рис. 1).

Новое решение, разработанное компанией Kejako, предлагает компромиссный промежуточный вариант вмешательства, стоящий между очками и операцией. Разработанная ими трехмерная параметрическая численная модель глаза дает им бесценную информацию о причинах ухудшения зрения с течением времени. Основываясь на такой модели, в настоящее время компания Kejako находится в процессе внедрения инновационной технологии, благодаря которой пациентам с такими нарушениями зрения еще более 20 лет не будут нужны очки для чтения или инвазивная хирургия.

»» ПЕРсонаЛИЗИРОВАННЫЕ ВАРИАНТЫ ЛЕЧЕНИЯ

СОСНОВАТЕЛЬ И ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ДИРЕКТОР компании Kejako Давид Анфрэн объясняет: «Наше решение

может стать новым стандартом лечения в персонализированной офтальмологии следующего поколения, направленной против старения. Мы заинтересованы в раннем лечении, которое сохранит способность глаза к аккомодации, и предлагаем персонализированные лазерные операции, направленные против старения, после которых пациенты еще 20 лет смогут видеть нормально».

Решение компании Kejako призвано излечить причину пресбиопии. В его основе лежит цикл неинвазивных лазерных операций, идущих от начала развития пресбиопии до появления катаракт. Они сохраняют аккомодацию глаза на достаточном уровне, чтобы пациенту не нужны были очки (рис. 2).

Чтобы скорректировать пресбиопию, исследователи сочетают неинвазивное лечение и численное моделирование в одной комплексной технологии, которую они назвали реставрацией хрусталика (phakorestitution).

В основе расчетной части технологии лежит упомянутая ранее трехмерная параметрическая мультифизическая модель глаза пациента. Анфрэн отмечает: «Мы начали разработку в 2015 году и сначала работали в другом пакете, с которым уже были знакомы ранее. Вскоре мы поняли, что столкнулись с большим числом ограничений. Т.к. по сути, наш проект — это мультифизическая модель».

— «В 2016 году мы выбрали COMSOL благодаря его мультифизическому функционалу и качественной службе поддержки».

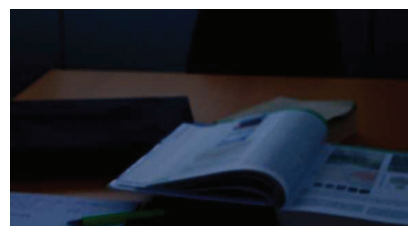
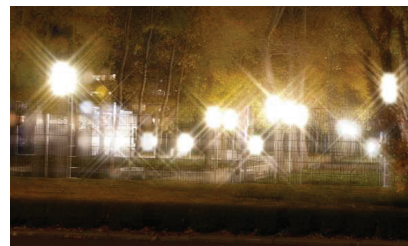


Рис. 1. Существующие методы хирургии могут ухудшить зрение и привести к появлению гало (вверху), бликов (в центре) и малой остроте зрения в темноте (внизу).

Полная модель глаза позволяет рассчитать критерии персонализированного лечения для каждого пациента. Все пациенты отличаются друг от друга как по степени пресбиопии, так и по физиологическим особенностям в принципе. Анфрэн продолжает: «Нет метода лечения пресбиопии, который подошел бы всем, но наша численная модель поможет справиться с этой проблемой. Она поможет подобрать персонализированное лечение и процедуры для каждого пациента».

»» ВЗГЛЯД И ВНИМАНИЕ НА ФИЗИКУ

ЧТОБЫ СОЗДАТЬ точную трехмерную параметрическую модель глаза, нужно учесть все подробности его строения и множество физических явлений. Орелиен Морер, инженер-исследователь компании Kejako, который руководит разработкой модели глаза, поясняет: «Полноценное решение должно учитывать

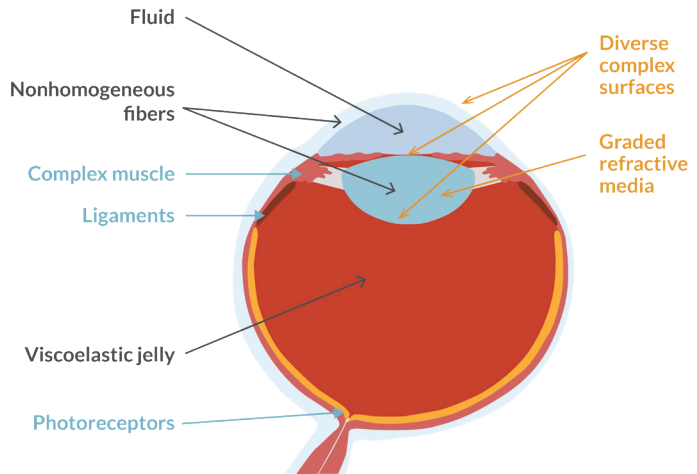
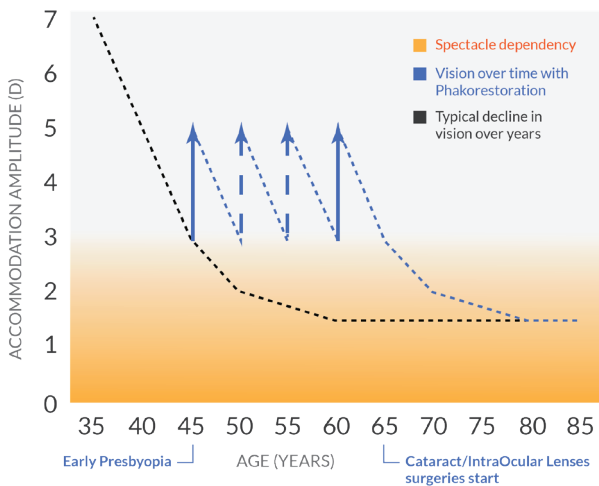


Рис. 2. Принцип влияния реставрации хрусталика (phakorestitution) на аккомодацию зрения с возрастом.

Рис. 3. Компоненты глаза, которые нужно учесть и описать в мультифизической модели.

механические и оптические свойства глаза. Нам нужна была детальная модель глаза, свойства которой мы сможем подстраивать и изменять для рассмотрения различных ситуаций».

Для достижения такой цели нужно включать в рассмотрение несколько сложных физических явлений и зависимостей свойств материалов, например гидродинамику внутриглазной жидкости, оптические свойства хрусталика и роговицы, показатель преломления хрусталика, деформируемого связками мышц.

Кроме этого, группа хотела рассчитать изменение показателя преломления по мере того, как свет проникает в хрусталик

глаза; для этого они комбинировали механику конструкций и геометрическую оптику. Морер отмечает: «До нас никто не обращал внимания на связь между механической деформацией и градиентом показателя преломления в хрусталике, так что мы решили добавить такую связь в модель и сравнить полученные результаты с опубликованными ранее результатами исследований».

В итоге комплексный подход, включающий моделирование и механических, и оптических свойств глаза, был подтвержден экспериментально. «Моделируя только механику или только оптику, мы бы не получили всей нужной нам информации.

Но если собрать все вместе, мы получаем волшебный и уникальный результат», — добавляет Морер.

»» ФОКУС НА МУЛЬТИФИЗИКУ

НА ОСНОВЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ из статистических измерений и стандартной оптической когерентной томографии группа разработала модель: получила изображение глаза и превратила его в параметризованную трехмерную геометрию в программном пакете COMSOL. Затем они численно описали механические компоненты глаза: сложные связки мышц, поддерживающие форму хрусталика, и вязкоупругие свойства стекловидного тела, заполняющего глаз.

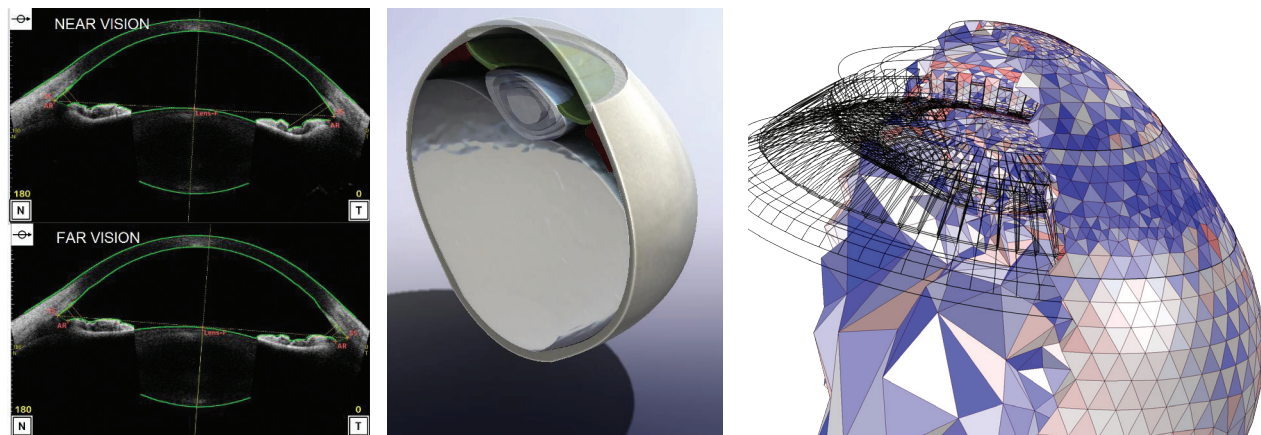


Рис. 4. От измерения к моделированию. Слева: типичное изображение глаза, полученное методом оптической когерентной томографии. Посередине: поперечное сечение трехмерной модели, построенной в программном пакете SOLIDWORKS® по результатам оптической когерентной томографии. Справа: сетка, используемая для трехмерной модели в программном пакете COMSOL®.

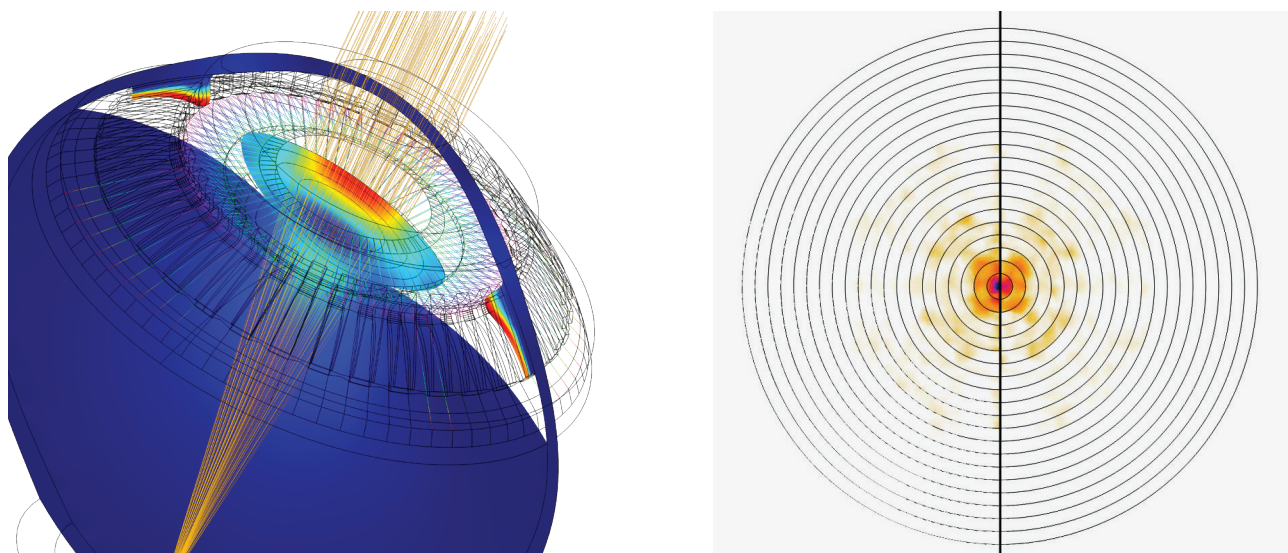


Рис. 5. Слева: модель показывает деформации глаза и траектории лучей при фокусировке вдаль. Справа: фокусировка лучей, прошедших через оптическую систему глаза. Темный цвет означает высокую плотность лучей.

Они также учли волокнистую неоднородную структуру склеры. Шарль-Оливье Зюбер, аспирант-биомедик из Ростокского университета в Германии, работающий в компании Kejako, объясняет: «Склера — белковая оболочка глаза — состоит из коллагеновых волокон. Нелинейные механические свойства этих коллагеновых волокон нужно моделировать в мультифизической среде». В итоге при учете всех факторов можно определить смещение материала глаза относительно положения покоя для каждого состояния аккомодации (рис. 5, слева).

Функционал для геометрической трассировки оптических лучей, реализованный в пакте, был использован для расчета преломления света в хрусталике и фокусировки лучей на сетчатке в предположении, что входящие лучи параллельны (как если бы они исходили от бесконечно удаленного

источника). Таким образом, группа смогла рассчитать остроту зрения пациента и объективный диапазон аккомодации. Также в модели была рассчитана (рис. 5, справа) фокусировка лучей в оптической системе глаза (роговица и хрусталик). Распределение лучей на сетчатке зависит от индивидуальной остроты зрения. «Наши расчетные модели показывают, что именно видит пациент, и позволяют нам лучше понимать и лечить конкретно его случай пресбиопии. Например, мы можем увидеть, как формируется изображение на сетчатке каждого пациента, и установить остроту его зрения», — добавил Морер. Группа проводила валидацию своих численных исследований аккомодации глаза и модели пресбиопии путем сравнения с измерениями, выполненными для более чем 50 глаз.

Трехмерная параметрическая полная модель глаза стала успешно работать благодаря калибровке на широком диапазоне параметров. Зюбер дополняет: «Мы особенно ценим тот факт, что пакет COMSOL дает нам доступ ко всем управляющим параметрам для геометрических последовательностей, свойств материалов и физических явлений. Такая гибкость помогает нам детально проанализировать задачу и найти самое эффективное решение».

» ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАДИЕНТА ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ БЛАГОДАРЯ МУЛЬТИФИЗИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ группа смогла оценить

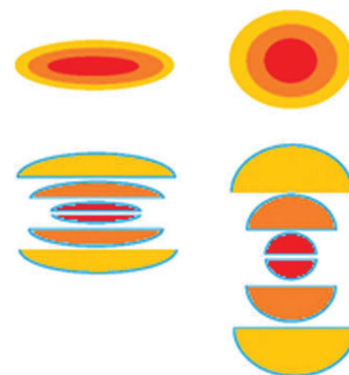


Рис. 6. Упрощенное многослойное представление градиента показателя преломления и разложение в формате эквивалентной оптической системы линзы. Слева показан случай зрения вдаль, справа — зрения вблизи. Цветом показано значение показателя преломления, красный цвет соответствует наивысшему показателю.

свойства хрусталика, которые они не могли измерить напрямую, в том числе градиент показателя преломления (величину GRIN), используемый затем в трехмерной параметрической модели глаза. Показатель преломления хрусталика незначительно меняется, что создает характерный паттерн отражений. Градиент показателя преломления (GRIN) описывает изменение показателя преломления (увеличивается от поверхности к центру) в хрусталике.

“ Мы выбрали COMSOL благодаря его мультифизическому функционалу и качественной службе поддержки.

— ДАВИД АНФРЁН, СООСНОВАТЕЛЬ И ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ДИРЕКТОР КОМПАНИИ KEJAKO.

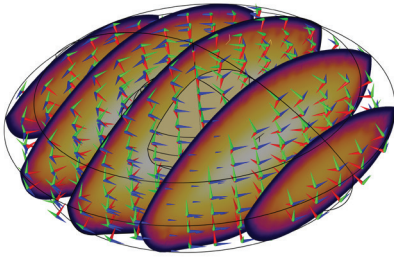


Рис. 7. Криволинейная система координат, используемая для задания анизотропных свойств материала хрусталика. Показано распределение градиента показателя преломления.

Это распределение сильно влияет на фокусировку света, абберацию и, как следствие, на остроту зрения. Посредством моделирования стало возможным определить градиент показателя преломления в хрусталике, без чего сложно понять, как свет проходит через хрусталик.

Показатель CRIN входит в выражение для аккомодации глаза как множитель. При аккомодации преломляющие ткани хрусталика сдвигаются, образуя одну из двух оптических конфигураций для двух предельных случаев: фокусировки вблизи и вдаль (рис. 6).

Хрусталик состоит из волоконнообразных клеток, уложенных в концентрические слои, как в луке. Такая структура обеспечивает хрусталику прозрачность, но приводит к анизотропии его свойств. В модели эта микроскопическая структура учитывается благодаря использованию криволинейной системы координат, которую можно задать в программе для того, чтобы описать конфигурацию волокон (рис. 7). Значение градиента показателя преломления (GRIN) невероятно сложно измерить напрямую, но учет градиента в параметрической модели (рис. 8) был очень важен для повышения точности и, в конечном счете, эффективности предлагаемого лечения.

» МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ ВСЕХ

ТЕПЕРЬ ИССЛЕДОВАТЕЛИ РАБОТАЮТ

над приложениями для моделирования, используя встроенную в пакет Среду разработки приложений. Так они смогут расширить свою трехмерную параметрическую модель глаза и подготовить компанию к выходу на большой рынок.

После преобразования мультифизической модели в приложение

«Наши расчетные модели показывают, что именно видит пациент, и позволяют нам лучше понимать и лечить конкретно его случай пресбиопии».

— ОРЕЛИЕН МОРЕР, ИНЖЕНЕР-ИССЛЕДОВАТЕЛЬ КОМПАНИИ КЕЖАКО.

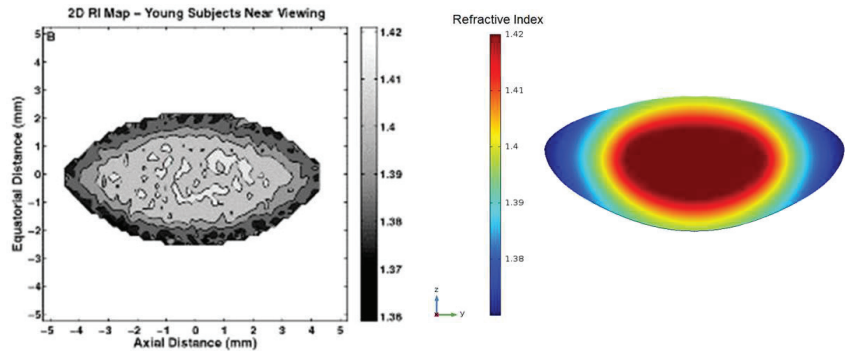


Рис. 8. Слева: пример измерения градиента показателя преломления (GRIN) при помощи магнитно-резонансной томографии. Справа: параметрическая численная модель градиента показателя преломления.

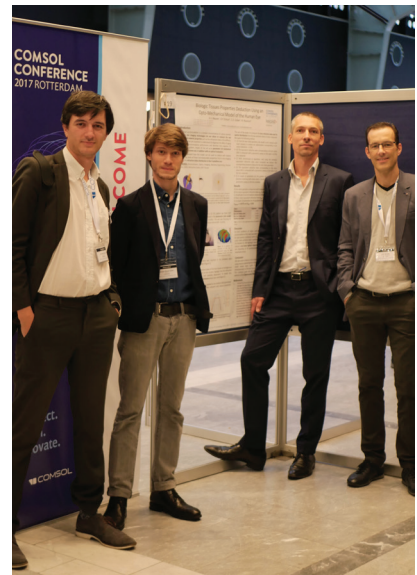
для моделирования с легкодоступным интерфейсом, работа с последним значительно упростится и в т.ч. позволит Кежако оптимизировать процесс работы с клиентами. Клиницисты могут получать изображение глаза пациента стандартным методом оптической когерентной томографии. Затем изображение отправляется в компанию Кежако, где группа специалистов может создать персонализированную трехмерную параметрическую полную модель глаза. После оптимизации модель поможет рассчитать индивидуальную процедуру реставрации хрусталика (phakorestitution).

Прогнозы неутешительны: к 2020 году от пресбиопии будут страдать более 1,3 миллиарда человек.

Чтобы справиться с таким спросом, непременно понадобятся приложения для моделирования, чтобы сотрудники без опыта моделирования могли использовать мультифизические модели и проводить реставрацию хрусталика (phakorestitution) для каждого пациента.

«Моделирование позволило сэкономить время на испытания *in vivo* *ex vivo*. Мы перейдем к масштабным клиническим испытаниям, когда убедимся, что мы можем принести пользу пациентам, и будем уверены в своем решении.

Благодаря COMSOL Multiphysics мы движемся в этом направлении гораздо быстрее», — резюмирует Анфрэн. ☺



Слева направо: Орелиен Морер, Шарль-Оливье Зюбер, Давид Анфрэн и Джон Спейрер.

«МОЗГИ» СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ БАНКНОТ

Инженеры и физики в компании Giesecke+Devrient Currency Technology с помощью мультифизического моделирования создают магнитные, оптические и ультразвуковые датчики для высокопроизводительных модульных систем обработки банкнот, через которые за день проходят миллионы купюр.

Автор — **ЗАК КОНРАД**

СЛОЖНО НЕ СОГЛАСИТЬСЯ с тем, что «деньги правят миром», но особенно хорошо это понимают в расчетно-кассовых центрах, через которые за день проходят миллионы купюр. В обращении сейчас больше наличных денег, чем когда-либо раньше, и этот рост объема вместе с усложнением дизайна банкнот и разнообразием защитных признаков привел к тому, что к автоматическим системам обработки банкнот предъявляются высокие требования. Типографии по всему миру должны обеспечить наивысшее качество каждой напечатанной банкноты. Кроме того, центральным и коммерческим банкам, а также инкассаторским фирмам нужно невероятно быстро и точно сортировать банкноты по достоинству, валюте, ориентации, подлинности и степени годности. Ян Домке и Клаус Тирауф, инженеры-физики компании Giesecke+Devrient Currency Technology, разрабатывают датчики для модульных высокопроизводительных систем обработки банкнот для таких расчетно-кассовых центров (рис. 1).

Чтобы снизить стоимость обработки и обеспечить безопасную выдачу проверенных банкнот, системы компании G+D Currency Technology содержат большой набор датчиков, гарантирующих воспроизводимый результат и длительный срок службы. Банкноты вводят в машину, где они двигаются по круглой ленте конвейера (слева на рис. 1), пока система считывает две стороны каждой банкноты. На основе данных с множества датчиков вдоль ленты принимаются решения о сортировке. С высокой степенью точности поддельные банкноты отбраковываются, а изношенные банкноты отделяются от остальных или даже сразу уничтожаются. Прошедшие проверку банкноты собираются в пачки и возвращаются в обращение или передаются в банковское хранилище. Типовая система компании G+D Currency Technology за один проход может распознать купюры разных стран в любой из четырех ориентаций. Самые быстрые системы обрабатывают более 150 тысяч банкнот в час. «В своем отделе мы разрабатываем системы датчиков и методики проверок, отвечающие за распознавание поддельных и изношенных банкнот, — говорит Домке. — Это глаза и мозг систем обработки».

» ДАТЧИКИ И СОРТИРОВКА БАНКНОТЫ, ПРОХОДЯЩИЕ

ЧЕРЕЗ систему обработки, встречаются с тремя системами датчиков: магнитных, оптических и ультразвуковых. Разные типы датчиков сочетаются, чтобы быстро и точно проверять и сортировать банкноты. Магнитные датчики различают специальные печатные магнитные защитные признаки; оптические датчики ультрафиолетового, ближнего инфракрасного и видимого диапазонов разделяют купюры по достоинству и странам, а ультразвуковые датчики проверяют изношенность (разрывы, отверстия, складки и другое). Домке и Тирауф со своей группой постоянно работают над совершенствованием характеристик сенсоров и используют мультифизическое моделирование, чтобы лучше понимать сложные физические явления, лежащие в основе работы датчиков. Моделирование — важный этап разработки, на котором проводится принципиальная проверка новых идей, после чего их можно обсуждать с другими отделами, например, с группой разработки алгоритмов. «Программный пакет COMSOL® — важный инструмент, благодаря которому все сотрудники "разговаривают на едином языке", т.е. манипулируют едиными визуальными



Рис. 1. BPS X9, самая быстрая система обработки банкнот в мире, может обрабатывать 44 банкноты в секунду. В час через нее проходит более 150 тысяч банкнот. Центральный модуль имеет размеры 1,9 м × 5,7 м.

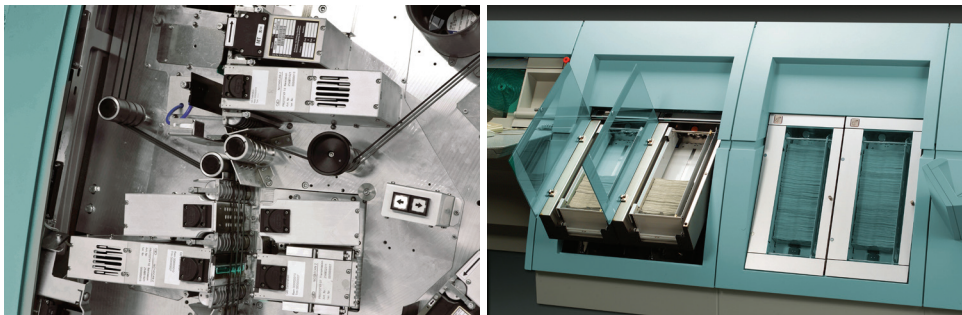


Рис. 2. Слева: часть системы сенсоров с круглой лентой конвейера, на которой банкноты проходят через систему обработки. Справа: сортировка банкнот в большом модуле для подготовки их к загрузке в банкоматы.

представлениями и физическими концепциями, — говорит Домке. — Он стал незаменимым в разработке датчиков».

» ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ЗАЩИТНЫХ ПРИЗНАКОВ

ОСОБЫЙ ЗАЩИТНЫЙ ПРИЗНАК банкнот — напечатанная магнитными чернилами надпись. Такие чернила играют роль магнитного зонда. Пока банкнота проходит систему обработки, зонд взаимодействует с направленным полем постоянных магнитов в датчиках. После этого можно в реальном времени изучать картину и динамику силовых линий и получать информацию от специализированных алгоритмов распознавания. Чтобы алгоритмы работали точно, сначала нужно численно исследовать происходящие изменения магнитного поля. Тирауф работает над расчетной моделью этого процесса. Настроив в программном пакете сборку из магнитного датчика с заданной магнетизацией

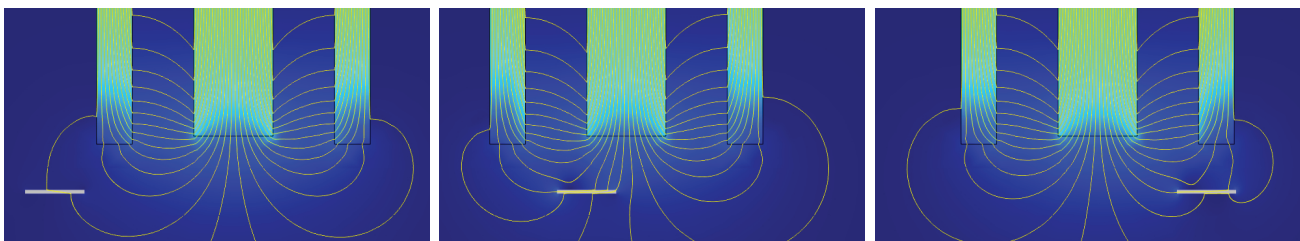
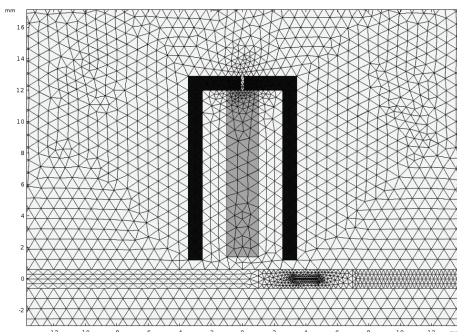


Рис. 3. Модель магнитного образца, проходящего мимо датчика. Вверху: постоянный магнит (серый цвет) и железные сердечники (черный цвет) задают магнитное поле датчика. Подвижная сетка позволяет смоделировать образец, проходящий мимо по виртуальной» ленте. Внизу: ряд изображений образца, проходящего мимо датчика и искажающего магнитное поле.

» ТРЕБОВАНИЯ К СОСТОЯНИЮ И ГОДНОСТИ БАНКНОТ КРОМЕ ЗАЩИТНЫХ ПРИЗНАКОВ

системы мониторинга должны распознавать, насколько купюры соответствуют требованиям к годности. Банкноты могут оказаться порванными, со сложенными или отсутствующими уголками, пятнами, надписями и клейкой лентой, или могут быть склеены с другими банкнотами. Например, чтобы определять слипшиеся банкноты и банкноты с клейкой лентой, группа Домке использует массив ультразвуковых датчиков. Когда купюра проходит мимо датчика, ультразвуковые импульсы проходят через нее и попадают в приемник с другой стороны купюры. Проблема используемой технологии в том, что лишь 1 % сигнала проходит через купюру и доходит до приемника: 99 % акустической энергии отражаются. Чтобы повысить разрешение на стороне приемника, в системе предусмотрено 24 пары передатчиков (рис. 4). Из-за столь большого числа передатчиков возникает интерференция сигнала, которая приводит к сложностям, связанным с управлением таймингами сигнала, затуханием и геометрией.

Для решения этих проблем группа Домке также использовала мультифизическое

и использовав технологию подвижной сетки для имитации движения мягкого магнитного образца, он смог на основе расчета разработать системы распознавания и подстроить ее параметры и геометрию для максимальной эффективности.

Когда образец проходит мимо датчика, он взаимодействует с магнитным полем. Магнитный датчик измеряет изменения в магнитном поле и выдает электрический сигнал/отклик на выход системы. Амплитуда сигнала зависит от расстояния между образцом и магнитами, и для понимания этой зависимости численное моделирование было критически важным. «Получив итоговое магнитное поле, можно рассчитать зависимость от расстояния, — объясняет Тирауф. — После этого можно оптимизировать модель и применить эти знания к более специализированным постановкам, отвечающим пользовательским условиям».

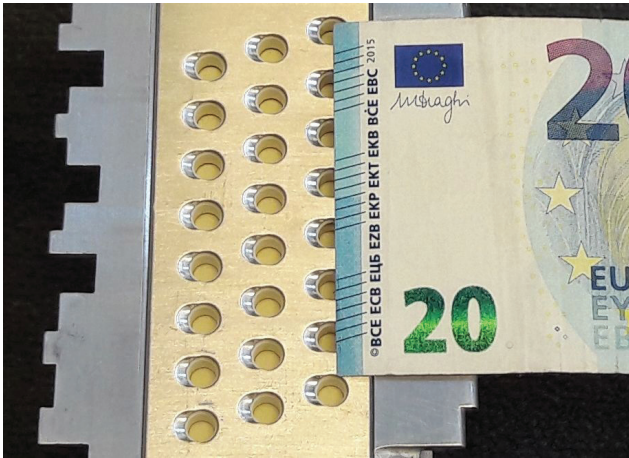


Рис. 4. Массив из 24 передатчиков, испускающих ультразвуковые сигналы, проходящие через банкноты. Показана купюра в 20 евро.

моделирование. Когда купюра проходит мимо датчика, отражая ультразвуковой сигнал, часть импульса огибает край банкноты из-за дифракции и все же попадает в приемник (рис. 5). Этот сигнал интерферирует со слабым сигналом от передатчика, поэтому приемник должен успеть принять сигнал до того, как дифрагированный сигнал доберется до приемника. В рамках мультифизической модели Домке исследовал добавление специальных акустических каналов, направляющих импульсный сигнал. Рассчитывая и анализируя характеристики в ближней и дальней зонах, максимальную амплитуду и затухание акустических волн, он смог избавиться от искажений в переданном сигнале. «Моделирование здесь играет ключевую роль, т.к. на таких малых масштабах

экспериментальные измерения бесполезны, — объясняет Домке. — Проводя настройку геометрии и времени сигнала за счет моделирования, мы получим качественную и неискаженную передачу сигнала на начальном этапе конструирования».

» ПЛАНЫ НА БУДУЩЕЕ

ДОМКЕ И ТИРАУФ также применяют мультифизическое моделирование в других направлениях разработки датчиков и будут дальше расширять область применения своих численных моделей. Они использовали мультифизический подход к моделированию ультразвуковых преобразователей и к анализу теплопередачи для управления тепловым режимом в своих печатных платах. Они провели сравнение расчетных данных

“ Моделирование здесь играет ключевую роль, т.к. на таких малых масштабах экспериментальные измерения бесполезны.

— ЯН ДОМКЕ, ИНЖЕНЕР-ФИЗИК, КОМПАНИЯ G+D CURRENCY TECHNOLOGY

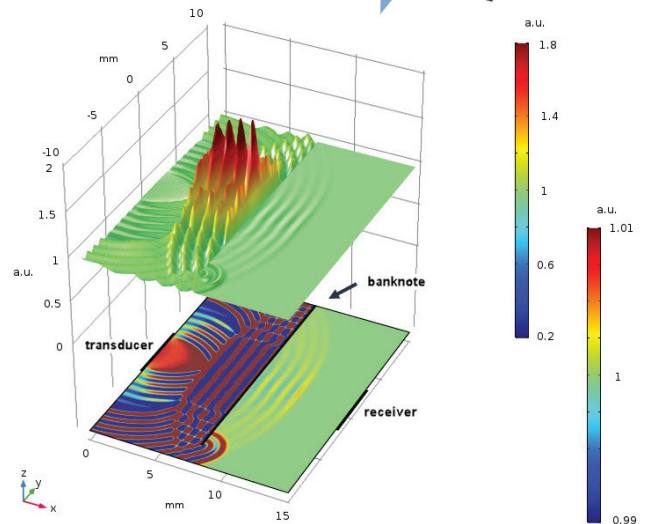
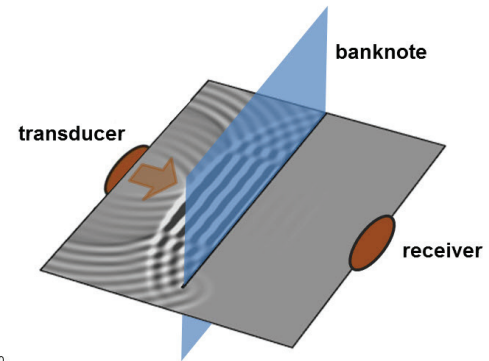


Рис. 5. Распространение акустической волны от преобразователя мимо края банкноты к приемнику. Вверху: схема модели. Внизу: два различных представления акустической волны, идущей к банкноте. Проиллюстрирована ситуация, когда половина волнового фронта уже столкнулась с банкнотой. Банкноту проходит лишь малая часть сигнала, большая часть дифрагирует вокруг края банкноты.

с экспериментом, и отличное согласование результатов лишний раз убедило их в том, что модели точны. Они надеются, что дальнейшая интеграция моделирования в процесс разработки поможет их системам гибко подстраиваться под требования заказчиков, оптимально отбраковывать поддельные купюры и сортировать купюры по годности так же хорошо, как бы это делал человек. ©



Клаус Тирауф и Ян Домке, инженеры-физики, компания G+D Currency Technology

НАЦИОНАЛЬНАЯ СЕТЕВАЯ КОМПАНИЯ ВЕЛИКОБРИТАНИИ МОДЕЛИРУЕТ ПОДЗЕМНЫЕ КАБЕЛЬНЫЕ ЛИНИИ

Использование моделирования для оценки состояния и режима работы подземных электрических кабелей позволило Национальной сетевой компании Великобритании увеличить выработку, повысить надежность и снизить расходы.

Автор — **ДЖЕННИФЕР ХЕНД**

ЧТО ВЫ ОЖИДАЕТЕ от потребительской электросети, в которую вы включаете свои новые гаджеты и «умную» бытовую технику? В первую очередь, она должна быть безопасной, надежной и доступной по цене.

Для обеспечения безопасности, надежности и экономичности необходимо проводить мониторинг электросети: непременно нужно убедиться, что выработка электроэнергии в течение дня соответствует спросу, а напряжение и частота находятся в допустимых пределах. В Англии и Уэльсе эти обязанности возложены на Национальную сетевую компанию Великобритании (National Grid): она строит, содержит и эксплуатирует высоковольтные линии передачи, которые снабжают электроэнергией дома и предприятия. На рис. 1 показана типичная система высоковольтных подземных кабелей.

Национальная сетевая компания Великобритании должна решать задачи управления тепловым режимом в этих обширных сетях, оптимизации маршрутов при прокладке новых кабелей и точного мониторинга номинальных параметров кабелей, особенно в случаях, когда после починки старых линий в одной линии сочетаются разные материалы. Для решения этих задач нужно понимать, как на линию передачи влияют почва, возраст кабеля, проведенные ремонты и близость других линий передач.

» АКТУАЛЬНОСТЬ И СЛОЖНОСТЬ МОНИТОРИНГА

В БОЛЬШЕЙ ЧАСТИ сетей передачи и распределения энергии для оценки состояния кабеля используются нормативы, введенные стандартами Международной электротехнической комиссии (IEC), которые поддерживает Международный совет по большим электрическим системам (CIGRE). Среди нормативов — максимальная нагрузка, которую кабель может выдержать, не выходя из строя и не нагреваясь выше допустимой температуры.

Дэвид Скотт, специалист по энергосетям, занимается мониторингом параметров подвесных и подземных кабелей в соответствующем отделе Национальной сетевой компании. Он объясняет: «Тестирование высоковольтных систем — не такая простая задача. Кабели расположены на глубине 50 метров

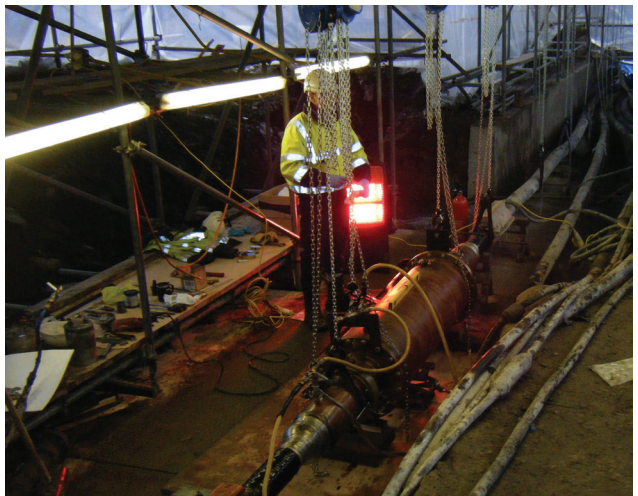


Рис. 1. Секция высоковольтной системы кабелей в туннеле (вверху) и под землей (внизу).

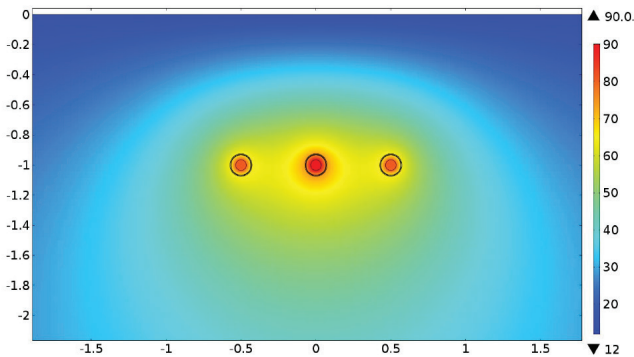


Рис. 2. Результаты расчета профиля температуры кабеля, размещенного в почве, с помощью COMSOL®.

под землей и взаимодействуют со всей сетью, а не работают изолированно. Температура почвы вокруг кабеля может меняться на разных участках, и тепловая нагрузка меняется на участках, где проходят рядом другие кабели, например, кабели сети распределения или железнодорожной сети электроснабжения. При этом провести валидацию результатов испытаний сложно. Но мы всегда стараемся получить самые точные данные для оценки состояния кабеля и мониторинга номинальных параметров».

Лаборатория высоковольтных систем имени Тони Дэвиса в Университете Саутгемптона работает вместе с Национальной сетевой компанией Великобритании над различными инновационными проектами, и в т.ч. над численным моделированием различных компонентов кабелей для изучения изменения параметров кабелей при старении и изменении внешних условий.

Их совместная работа началась с эмпирических моделей. А затем инженеры лаборатории высоковольтных систем вместе с Национальной сетевой компанией перешли к использованию метода конечных элементов в программном пакете COMSOL Multiphysics®. Фокусируясь в основном на тепловом анализе, они провели валидацию для номинальных показателей отдельных кабелей. Далее они стали изучать «критические» и «опасные»

ситуации режимов функционирования как изолированных систем, так и при различных условиях взаимодействия с внешней средой (рис. 2).

Например, влажная почва быстрее рассеивает тепло. Сухая почва проводит тепло хуже из-за мелких воздушных карманов, которые замедляют рассеивание тепла и влияют на тепловой режим кабеля (рис. 3). Исследователи учитывают влажность и растрескивание почвы при моделировании рва, в который уложен кабель. «В модели мы используем стандартные материалы для почвы и засыпки рва. Почва бывает разной, так что мы выбираем худший из возможных вариантов ее влияния на кабель», — объясняет Скотт.

» ТЕПЛОВЫЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРОФИЛИ

НАЦИОНАЛЬНАЯ СЕТЕВАЯ КОМПАНИЯ ВЕЛИКОБРИТАНИИ

благодаря моделированию смогла по-новому взглянуть на процесс мониторинга состояния кабелей, проходящих близко друг от друга, и на оптимизацию новых линий передачи. Близкое расположение кабелей

уменьшает теплоотдачу, при этом температура кабелей поднимается, что приводит к снижению допустимой токовой нагрузки. Тем не менее иногда оценки могут оказаться слишком строгими, что приведет к лишним тратам на дополнительные кабельные линии. «Мы обнаружили, что используемые и регламентированные в стандартах нормативы для кабелей обычно консервативны и осторожны, — говорит Скотт. — Если руководствоваться исключительно ими, то перегрев может возникнуть в случае, если кабели отстоят друг от друга на 100 метров, хотя на самом деле при этом друг на друга кабели почти не влияют».

Разработанная его группой модель в COMSOL позволяет проверить, можно ли укладывать новый кабель поверх существующих линий, не нарушая стандарты безопасности и работоспособности, и рассчитать оптимальное его расположение (рис. 4). «Моделирование позволяет нам подробно анализировать проекты новых систем и их влияние на существующие линии, — говорит Скотт.

— Раньше нам бы пришлось принимать особые меры

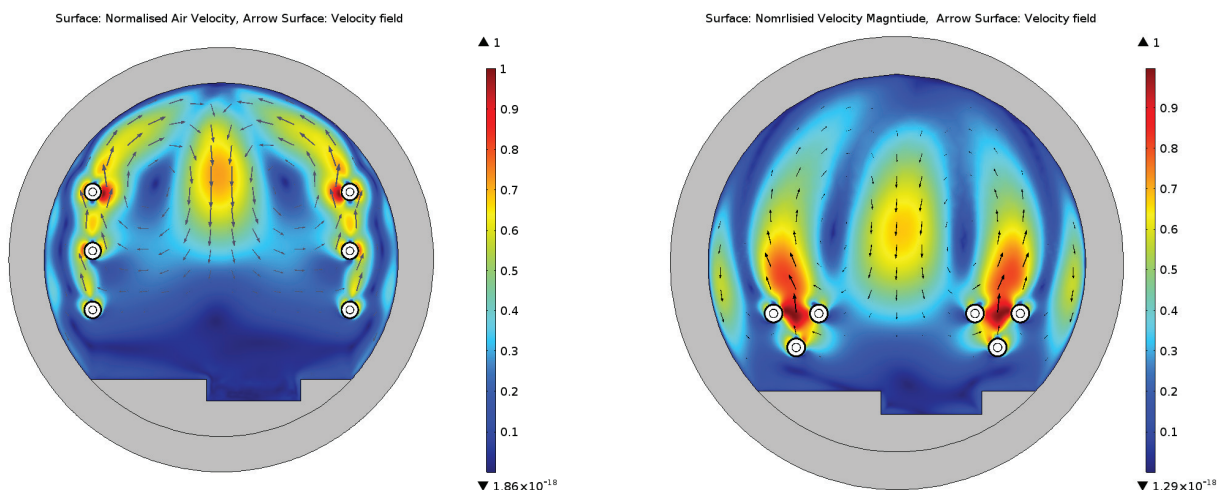


Рис. 3. Нормированный профиль потока воздуха в поперечном сечении длинного горизонтального туннеля.

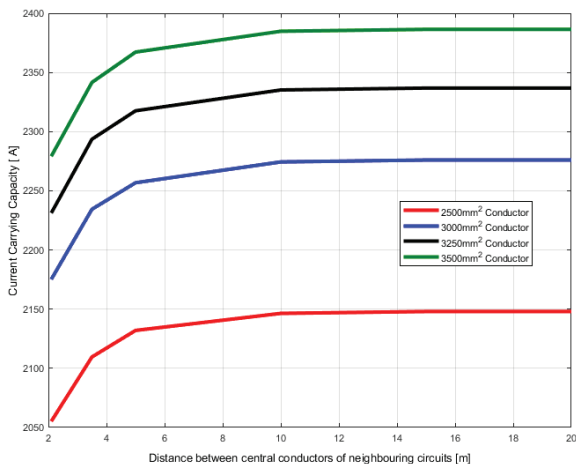


Рис. 4. Модель COMSOL®, показывающая допустимую токовую нагрузку четырех одинаковых схем в зависимости от расстояния между ними.

защиты: чаще всего мы просили третью сторону переместить их линии передачи в сторону или закопать их глубже. Глубоко размещенные кабели не очень хорошо работают, а для того чтобы переместить кабель, нужно отвести под него больший по площади участок земли. В тесных городских районах это иногда невозможно. Моделирование на основе метода конечных элементов позволило нам лучше понимать реальную ситуацию, рассчитывать реалистичные номинальные параметры и предлагать релевантные решения».

Другая сложность заключается в том, что запасные части для старых линий не всегда доступны, поэтому после ремонта в линии используются разнородные материалы (рис. 5). «Во многих старых кабелях используется свинцовая внешняя оболочка, а новые — сделаны из алюминия. При ремонте мы стараемся заменять только поврежденный отрезок, так как, очевидно, замена всей линии обойдется дороже. Многие линии передачи спроектированы так, чтобы минимизировать наведенные токи и максимизировать допустимую

токовую нагрузку. Сочетая при ремонте разнородные материалы, мы поступаемся расчетами, заложенными при проектировании кабеля. Существующие промышленные стандарты тоже не учитывают параллельное соединение разнородных проводников. COMSOL позволяет нам рассчитать потери энергии в сетях передачи и понять, какие меры нужно предпринять при сочетании тех или иных разнородных материалов».

» НАДЕЖНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПОМОГАЮТ В ПРИНЯТИИ ПРАВИЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ ГЛАВНАЯ ЦЕННОСТЬ МОДЕЛИРОВАНИЯ становится очевидной, когда Скотт рассказывает о стоимости новых линий передачи. «Примерная оценка стоимости километра подземного 400-киловольтового кабеля — 20 миллионов фунтов (1,7 миллиарда рублей). Когда начинается работа по укладке кабеля, бережливое проектирование объекта и максимизация допустимой токовой нагрузки экономят деньги, в первую очередь

“ Моделирование на основе метода конечных элементов позволило нам лучше понимать реальную ситуацию, рассчитывать реалистичные номинальные параметры и предлагать релевантные решения».

— ДЭВИД СКОТТ, СПЕЦИАЛИСТ ПО ЭНЕРГОСЕТЯМ, НАЦИОНАЛЬНАЯ СЕТЕВАЯ КОМПАНИЯ ВЕЛИКОБРИТАНИИ



Рис. 5. Фотография соединений, используемых для подключения отдельных секций кабеля в полевых условиях.

Знания, которые мы можем получить с помощью моделирования, позволяют нам выбрать менее сложные и трудоемкие варианты, не жертвуя безопасностью». Эти знания особенно полезны при работе в ограниченном пространстве линий электропередачи, к примеру в центре Лондона, где расширить площадь, занятую подстанцией, вряд ли возможно.

У инженеров, задействованных в проекте, есть множество идей о том, как расширить использование моделирования и на его основе принимать решения о жизненном цикле, совместимости и сопряжении высоковольтного оборудования, в том числе подвесных кабелей. «Если учесть при моделировании влияние ветра и температуры воздуха, окружающего подвесные линии, и добавить к системе нагрузку, зависящую от времени, мы получим мощную методику раннего

обнаружения потенциальных проблем, например, случаев, когда на поверхности линии застывает грязь», — объясняет Скотт. Можно также выявлять проблемы, связанные с прессуемой арматурой, моделируя циклы усталости и механические повреждения и рассчитывая режимы отказа такой арматуры.

Скотт добавляет: «Мы можем легко сосредоточиться на физической стороне задачи, не путаясь в математических формулировках. Мы можем использовать результаты, полученные лабораторией высоковольтных систем, и подстраивать/варьировать ключевые параметры для того, чтобы изучать новые конструкции, не сомневаясь в точности результатов. Если на вход модели подать точные данные, ее результаты будут предельно корректными, и мы сможем принять верные решения при прокладке и ремонте линий передачи». ©

МУЛЬТИФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПОРТАТИВНЫХ НОСИМЫХ МЕДИЦИНСКИХ СИСТЕМ

Инженеры компании STMicroelectronics используют численное моделирование, чтобы оптимизировать полупроводниковые решения для самых разных прикладных задач.

Автор — **ВАЛЕРИО МАРРА**

БЛАГОДАРЯ РАСТУЩЕМУ СПРОСУ на электронные устройства миниатюрных размеров и устройства для Интернета вещей перед специалистами, проектирующими микроустройства: приводы, контроллеры, блоки управления, датчики и передатчики, встают новые задачи. Инженерам, которые разрабатывают устройства с обратной связью и носимые регистраторы, энергосберегающее освещение для офисов и системы автоматизации производства, нужны надежные инновационные методики, которые свяжут микроскопические свойства полупроводниковых компонентов и наш макроскопический мир. Для этого инженеры обратились к виртуальному миру численного моделирования.

В R&D отделах компании STMicroelectronics, мировом лидере по разработке и производству полупроводниковых устройств, над исследованиями работает 7500 человек. Лючия Дзуллино, инженер-исследователь компании STMicroelectronics, рассказывает о своей работе: «В нашей отрасли необходимо исследовать очень маленькие конструкции и анализировать, как они взаимодействуют с большими модулями в разных конфигурациях, разных внешних условиях и разных прикладных задачах».

Для производителей полупроводниковых устройств критически важны выбор материалов и проектирование. Моделирование при этом играет важную роль как в подборе материалов, так и

определении рабочих характеристик. «Большая часть нашей работы основана на использовании программного пакета COMSOL Multiphysics[®], с помощью которого мы проверяем наши гипотезы и оптимизируем устройства, — объясняет Дзуллино. — В компании примерно 30 пользователей COMSOL, и хотя мы работаем в разных местах и разных отделах, мы постоянно наращиваем объем новых знаний о методах математического моделирования, которые применяем в различных проектах».

»» МУЛЬТИФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТКИ ИННОВАЦИОННЫХ ПРОДУКТОВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОМОГАЕТ изучить мультифизические взаимодействия на каждом этапе разработки различных конструкторских решений и продуктов. Среди примеров — оптимизация эпитаксиального реактора для ускорения производства полупроводниковых пластин, управление возмущением потока реагирующих веществ при жидкостном травлении и изучение взаимодействия полупроводниковых заготовок и корпуса устройства на микроскопическом уровне. Кроме разработки и производства микросхем, инженеры компании STMicroelectronics проектируют миниатюрные приводы, например, микросеркала, которые используют в задачах оптического распознавания.

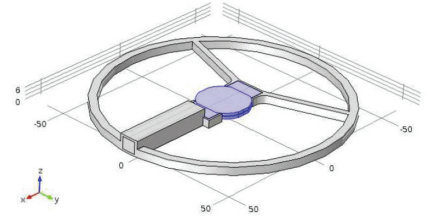


Рис. 1. Встроенный в механическую конструкцию датчик для мониторинга её целостности. Датчик показан голубым цветом.

Моделирование использовали и в другом проекте, связанном с актуаторами, в котором изучали печатающие головки и сравнивали эффективность двух различных принципиальных подходов: вытеснения чернил пузырьками под давлением и с помощью мембраны, приводимой в движение керамическим пьезоэлектрическим преобразователем из ЦТС (PZT). В этой работе исследователи установили, что тонкопленочные пьезоэлектрические печатающие головки лучше сочетаются с различными чернилами, позволяют достичь более высокой скорости печати, более высокого качества печати, а также продлевают срок службы головки.

»» ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ БЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЕ И ЧАСТНЫЕ КОМПАНИИ многие годы разрабатывали разнообразные датчики для оценки состояния бетона. В одном из R&D проектов компании моделирование использовали для изучения свойств бетона и расчета емкости встроенного датчика (рис. 1), который фиксирует

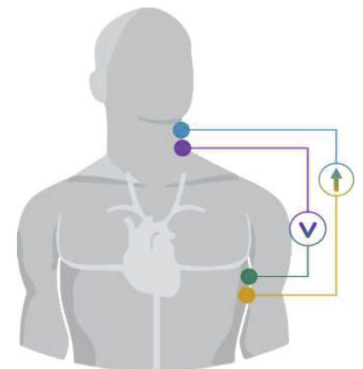


Рис. 2. Принцип измерения биоимпеданса органа человеческого тела.

“ Мы можем быстрее оценивать материалы и конструкции и выбирать из них лучшие, а значит, мы тратим меньше времени на испытания, принимаем лучшие технические и деловые решения.

— ЛЮЦИЯ ДЗУЛЛИНО, ИНЖЕНЕР-ИССЛЕДОВАТЕЛЬ КОМПАНИИ STMICROELECTRONICS

изменения свойств бетона, обусловленные его старением, и передает сигнал на поверхность. Эта система слежения за целостностью конструкции уже работает в Италии. Ее применяют в разных конструкциях для оценки целостности бетона и регистрации повреждений при неожиданных нагрузках, которые могут повлиять на надежность конструкции.

»» ПОРТАТИВНЫЕ НОСИМЫЕ МЕДИЦИНСКИЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА

ЗА НЕСКОЛЬКО ЛЕТ компания STMicroelectronics разработала ряд медицинских приборов. Один из созданных прототипов — пластырь для измерения биоимпеданса определенного органа в теле человека, например, сердца (рис. 2). На основе медицинских

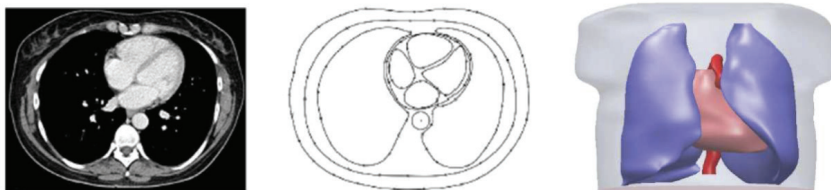
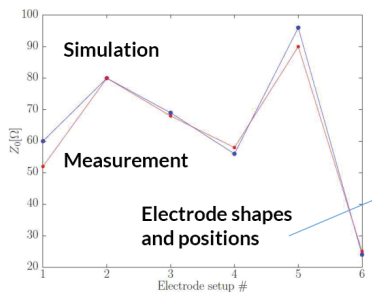


Рис. 3. Трехмерная модель, созданная на основе компьютерной томографии (слева), постобработка в CAD-системе (в центре) и интерполированные трехмерные области, используемые для анализа (справа).

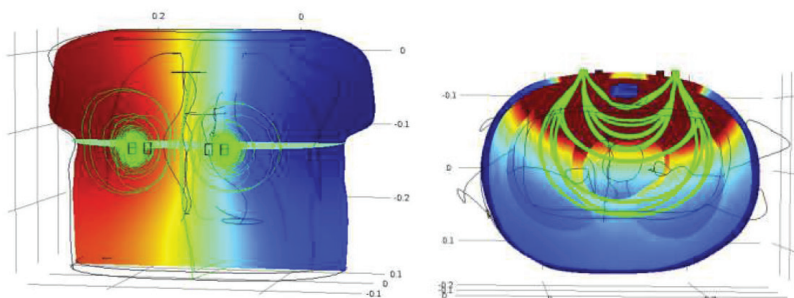


Рис. 4. Визуализация расчетного электрического напряжения и распределения тока в торсе человека.

снимков органов исследователи создали трехмерную модель (рис. 3) и провели AC/DC расчет электрических токов в частотной области, чтобы оценить влияние формы и расположения электрода на измеряемые физиологические параметры. Результаты, полученные в модели (рис. 5), хорошо согласовывались с реальными измерениями и позволили разработать носимый пластырь с возможностью настройки, который мог высокоточно показывать физиологические изменения. Такие датчики позволят врачам следить за различными болезнями сердца и получать данные в реальном времени, ставя современные технологии на службу пациентам.

Рис. 5. Сравнение измеренного и расчетного значений биоимпеданса (слева) для разных положений и форм электродов (внизу).

»» РЕШЕНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ R&D ЗАДАЧ ЗА СЧЕТ МОДЕЛИРОВАНИЯ

«МОДЕЛИРОВАНИЕ позволило нам эффективно определить потенциальные сложности, и мы научились лучше оптимизировать полупроводниковые устройства для реальных задач. Теперь проектирование устройств и внутри компании, и для наших клиентов основано на численном моделировании», — комментирует Дзуллино. Она и ее коллеги намерены использовать мультифизическое моделирование на всех этапах разработки. Дзуллино рассказала, что в сейчас в компании ведутся исследования влияния влажности внутри корпуса устройства и рисков возникновения и развития коррозии. «Мы можем быстрее оценивать материалы и конструкции и выбирать из них лучшие, а значит, мы тратим меньше времени на испытания, принимаем лучшие технические и деловые решения, — делает вывод Дзуллино. — По сравнению с физическими испытаниями реализация и проверка новых решений теперь ничего не стоят. Моделирование — ключевой инструмент для инновационных разработок». ☺

ГЕЛИКОНОВАЯ АНТЕННА ДЛЯ ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

Инженеры и ученые компании General Atomics используют мультифизическое моделирование для разработки системы магнитного удержания плазмы в токамаке DIII-D.

Автор — **ДЖЕММА ЧЕРЧ**

ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ — процесс получения энергии, в котором два атома дейтерия разгоняются до скорости, достаточной, чтобы преодолеть кулоновское отталкивание, и превращаются в атом гелия и нейтрон, высвобождая при этом огромное количество энергии. Это святой Грааль для энергетики — почти неограниченный источник энергии без углеродных выбросов и отходов. Термоядерный синтез — источник энергии Солнца, и если бы мы смогли воспользоваться им на Земле, то совершили бы переворот в энергетике.

»» ПОДДЕРЖАНИЕ ТОКАМАКА DIII-D В ОТЛИЧНОЙ ФОРМЕ

ТОКАМАК — перспективная конструкция, в которой горячая плазма удерживается магнитным полем. Плазма — это ионизованный газ. Она состоит из положительно заряженных ионов и свободных электронов. Обычно плазма создается при низком давлении.

В токамаках для создания, формирования и удержания плазмы в камере, имеющей форму тора, используют массив магнитных катушек (рис. 1). Внешние нагреватели поднимают температуру плазмы до сверхвысоких значений — порядка 150 миллионов

градусов Цельсия, — при которых начинается термоядерный синтез.

Компания General Atomics в Сан-Диего, США, по поручению Министерства энергетики США работает на Национальной установке для термоядерного синтеза DIII-D над проектом по магнитному удержанию высокотемпературной плазмы. Более 650 исследователей со всего мира проводят на токамаке DIII-D передовые исследования термоядерного синтеза.

Рабочая группа токамака DIII-D провела мультифизическое моделирование для оптимизации и проверки рабочего и диагностического оборудования, поддерживающего работу установки. Старший оператор токамака Умберто Торребланка из General Atomics рассказывает: «Благодаря COMSOL Multiphysics нам не приходится использовать упрощенные модели для инженерных расчетов или предполагать, что условия работы всегда будут идеальными. Мы можем проводить исследования сложной конструкции токамака и в рамках нескольких разработанных мультифизических моделей.

«В итоге мы разрабатываем и развиваем наши идеи, не рискуя испортить установку. Безо всяких упрощающих предположений мы получаем высокоточные расчетные результаты», — добавляет Торребланка.

Например, внутренние магнитные поля в токамаке DIII-D уже были известны, но операторам приходилось полагаться на упрощенное описание внешних магнитных полей (рис. 2). Торребланка объясняет:

«Вокруг токамака расположено множество систем и компонентов, и магнитное поле токамака может индуцировать силы и токи, опасные для этих систем. Численное моделирование и анализ помогают избежать дорогостоящих поломок и задержек исследований».

Торребланка импортировал геометрию токамака с помощью LiveLink™ for SOLIDWORKS® и изучил внешнее магнитное поле в некоторых точках, чтобы понять, как оно повлияет на ту или иную установку.

«Это сэкономило мне немало времени: с легкостью созданная модель заменила предыдущие наши методы, на которые уходило больше времени», — отмечает Торребланка.

Например, статические, низко- и высокочастотные магнитные поля повреждали вакуумные турбонасосы, работа которых жизненно важна для основного и вспомогательного оборудования токамака. Исследователи использовали мультифизическое

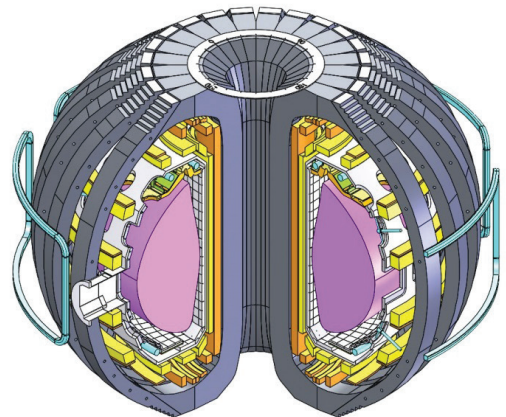


Рис. 1. Внутренняя структура токамака DIII-D для термоядерного синтеза.

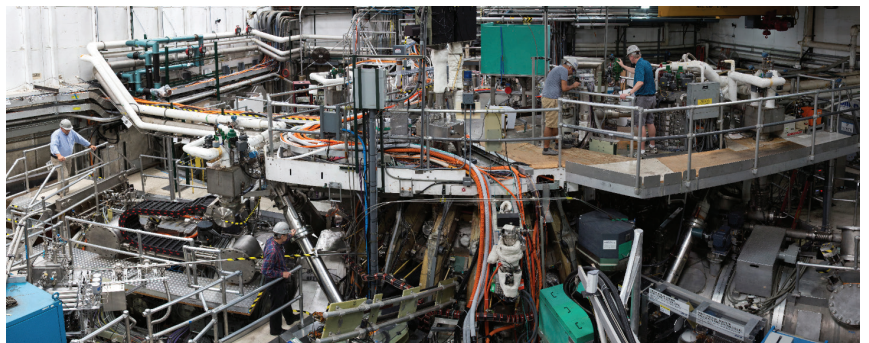


Рис. 2. Вокруг токамака DIII-D расположены сложные системы и компоненты, которые подвержены влиянию сильных магнитных полей.

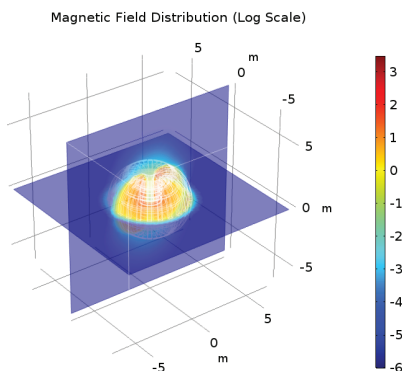


Рис. 3. Распределение магнитного поля внутри и снаружи камеры токамака.

моделирование, чтобы лучше изучить распределение меняющегося со временем магнитного поля снаружи токамака и определить, в каком месте лучше расположить насосы, чтобы повысить их надежность (рис. 3).

»» ГЕЛИКОНОВАЯ АНТЕННА ДЛЯ УКРОЩЕНИЯ ЭНЕРГИИ СОЛНЦА

ДЛЯ ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА в токамаке DIII-D создают температуры в десять раз выше, чем температура в центре Солнца. Для этого сейчас используют две системы (рис. 4): пучок нейтральных частиц, выдающий 20 МВт энергии в виде высокоэнергетических атомов дейтерия, и систему электрон-циклотронного нагрева, в которой гиротроны выдают до 4 МВт микроволнового излучения, нагревающего электроны. Разрабатывается и строится новая система нагрева на основе геликоновой антенны (рис. 4), которая может выдавать 1 МВт радиочастотного излучения.

Мультифизическая модель позволила значительно оптимизировать конструктивное решение геликоновой антенны. Токamak DIII-D станет первым токамаком с мегаваттной антенной, использующей радиочастотное излучение для создания токов и нагрева плазмы.

Геликоновая антенна содержит массив из 28 модулей, а также два торцевых модуля общим размером 1,7 м. Мощность можно подавать на любой из концов антенны через две полосковых линии, подключенные к торцевым модулям. Торцевые модули посредством индукционной связи передают энергию на все пассивные центральные модули по порядку. Время жизни плазмы в токамаке DIII-D

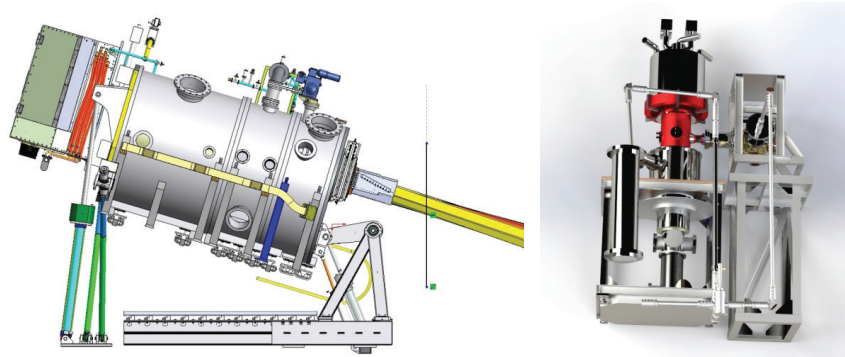


Рис. 4. Существующие системы нагрева токамака DIII-D: пучок нейтральных частиц (слева) и гиротрон (справа).

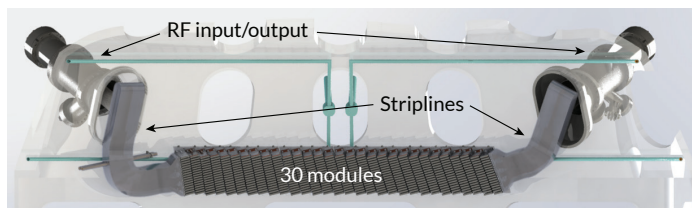


Рис. 5. Геликоновая антенна, установленная на токамаке DIII-D.

составляет вплоть до 10 секунд, а между импульсами проходит от 10 до 15 минут, нужных для того, чтобы вспомогательные системы охладилась до комнатной температуры. Антенна разрабатывается под такой же рабочий цикл.

Торребранка объясняет: «При использовании мультифизического моделирования мы можем пробовать новые материалы и рассчитывать, какие материалы дадут наилучшие результаты. Антенна должна выдерживать большие электромагнитные нагрузки, происходящие при срыве плазмы, когда в конструкции антенны текут большие наведенные токи. Чтобы снизить этот ток, нужен материал с низкой электропроводностью. В то же время для рассеивания потока тепла, идущего к антенне от плазмы, требуется материал с высокой теплопроводностью. Наилучшим сочетанием оказался гибридный материал из состава CuCrZr и сплава инконель. Моделирование сделало нашу работу проще: всего за пару щелчков мыши мы смогли изучить множество материалов».

Торребранка рассказывает: «Мы смогли легко рассчитать и визуализировать электромагнитные поля антенны. Мы скомбинировали в модели электромагнитный и тепловой анализ, чтобы рассчитать удельные радиочастотные потери и построить карту «горячих точек», что помогло нам

улучшить конструкцию антенны».

Антенна возбуждается на резонансной частоте (476 МГц), и исследователям General Atomics нужно было выяснить, как температура повлияет на эту частоту. Торребранка рассказывает: «Нам нужно было понять, смещается ли резонансная частота антенны с повышением температуры, чтобы мы могли скомпенсировать это смещение за счет конструкции антенны или корректировки рабочих параметров. Мы должны были добиться надежной работы антенны в течение 10 секунд».

«Мультифизическое моделирование позволило рассчитать распределение температуры в широком диапазоне рабочих условий. На его основе мы можем выяснить, можно ли использовать антенну в течение 10 секунд без вреда для нее, или рассчитать, может ли антенна работать несколько секунд и обеспечить требуемый ток и нагрев плазмы», — добавил Торребранка.

»» МИНИАТЮРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ, БОЛЬШИЕ ОТКРЫТИЯ

ГРУППА, РАБОТАЮЩАЯ НА DIII-D, построила уменьшенные копии основных компонентов антенны для испытаний. С их помощью — и с помощью мультифизического моделирования — исследователи смогли проверить

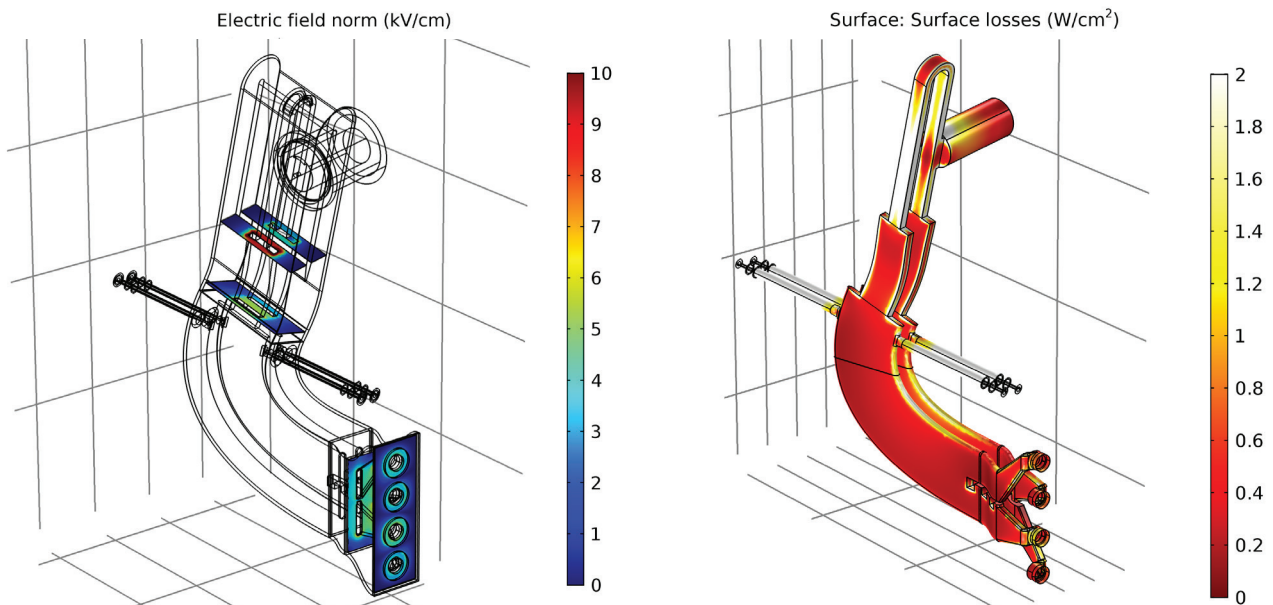


Рис. 6. Полосковая линия антенны. Показано распределение электрического поля (слева) и радиочастотных удельных потерь (справа).

параметры и условия работы этих компонентов полноразмерной антенны до того, как они были собраны. Испытания проходили на модели масштаба 1:4 и на радиочастотном резонаторе, которые воспроизводили электрическое поле полноразмерной антенны и полосковой линии. Испытания должны были показать, будут ли дуговые разряды или плазма резонансного высокочастотного разряда отрицательно влиять на систему (рис. 6). «Мы проверяем работу уменьшенных копий компонентов антенны, и моделирование хорошо согласуется с экспериментальными результатами. После испытаний мы еще более уверены в выбранных нами параметрах и геометрии антенны», — комментирует Торребланка.

«Результаты моделирования всегда поучительны для нас. Мы узнаем картину

электромагнитных полей, смотрим на визуализацию и лучше понимаем, как должна быть устроена конструкция и как она должна работать. В конечном итоге мы уверены, что система будет работать так, как нам надо», — резюмирует Торребланка.

Исследовательская программа DIII-D — важная часть международного сотрудничества, нацеленного на создание рабочей установки для термоядерного синтеза. Ее ключевая роль определяется во многом тем, что в ней участвуют сотрудники из многих институтов, а для оптимизации результатов внедряются инструменты численного моделирования.

Торребланка подытоживает: «Мы работаем над глобальной задачей для энергетики. Если мы быстрее получим хорошие результаты, используя программный пакет COMSOL, мы

сделаем еще один шаг к успешному термоядерному синтезу». ©

Указание на источник:

Эта статья основана на работе, поддержанной грантом от Министерства энергетики США (отдел научных исследований, отдел исследования термоядерной энергетики) и Национальной установкой термоядерного синтеза DIII-D (отдел научных исследований DIII-D), номер гранта DE-FC02-04ER54698.

Отказ от ответственности:

Это отчет о работе, финансовую поддержку которой оказало правительственное агентство США. Правительство США и агентства правительства, а также их сотрудники не гарантируют, явно или неявно, и не несут никакой законной ответственности за точность, полноту или применимость информации, устройств, продуктов или процессов, описанных здесь, а также не утверждают, что их использование не нарушит прав частных компаний. Все приведенные ссылки на коммерческие продукты, процессы и услуги, коммерческие обозначения, торговые марки, производители и так далее не означают, что правительство США и агентства правительства поддерживают, рекомендуют или предпочитают их. Мнения авторов, выраженные в статье, не обязательно совпадают с мнением правительства США и агентств правительства.

“ Благодаря COMSOL Multiphysics® нам не приходится использовать упрощенные модели для инженерных расчетов или предполагать, что условия работы всегда будут идеальными. Мы можем проводить исследования сложной конструкции токамака и в рамках нескольких разработанных мультифизических моделей.

— УМБЕРТО ТОРРЕБЛАНКА, СТАРШИЙ ОПЕРАТОР ТОКАМАКА DIII-D, КОМПАНИЯ GENERAL ATOMICS

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСКОРЯЕТ РАЗРАБОТКУ ПРИБОРА ДЛЯ МИКРОГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ СОРТИРОВКИ КЛЕТОК

Исследователи компании The Technology Partnership в Кембридже в Великобритании на основе мультифизического моделирования создадут новый прибор для сортировки клеток и лечения рака.

Автор — **ДЖЕММА ЧЕРЧ**

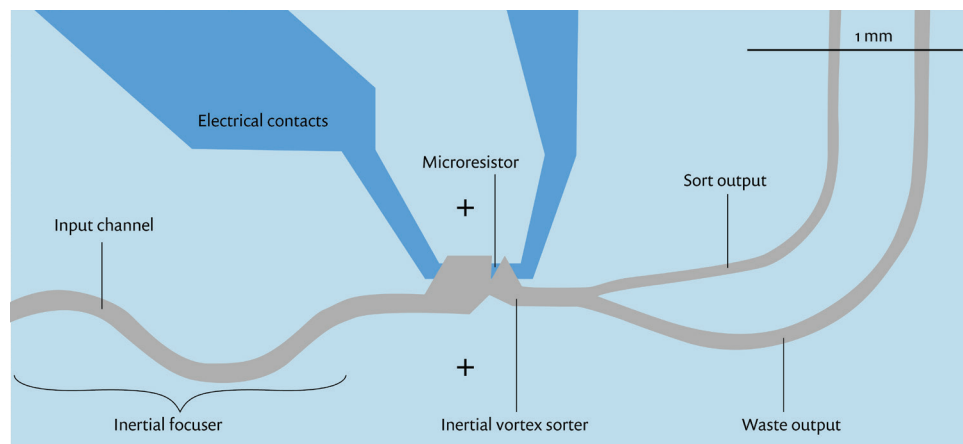


Рис. 1. Геометрия и составные части устройства вихревой сортировки клеток.

ИССЛЕДОВАТЕЛИ КОМПАНИИ The Technology Partnership, расположенной в Кембридже в Великобритании, создали новый прибор для сортировки клеток. На его основе можно организовать технологический процесс для клеточной терапии, нацеленной на широкий диапазон заболеваний, в том числе онкологических, а также на прикладные научные, диагностические и биотехнологические задачи.

Современные системы сортировки клеток могут выделять клетки с редким фенотипом или субпопуляции клеток с необычным поведением для биологических исследований. Несмотря на это, сортировка клеток не применяется в клинических целях. Робин Притчард, биолог в компании The Technology Partnership, объяснил: «Для новых методов клеточного лечения нужны более эффективные методы разделения клеток, но имеющиеся приборы для сортировки не могут выдавать готовые препараты клеточной терапии».

Основным традиционным методом разделения клеток остается сортировка потока в воздухе, известная также под коммерческим названием сортировки с флуоресцентной активацией (FACS). Сначала клетки поодиночке измеряются лазером, а затем поток

клеток проходит через воздух в виде капель, которые поодиночке направляются электродами с высоким напряжением. Коммерческие системы сортировки потока в воздухе не подходят для клинических применений: они медленно сортируют клетки, требуют высококвалифицированных операторов, а пациенты и операторы рискуют своим здоровьем, если получаемый препарат окажется нестерильным или если в капли, проходящие через воздух, попадут патогены.

» ШАГ ВПЕРЕД: ВИХРЕВАЯ СОРТИРОВКА КЛЕТОК

КОМПАНИЯ THE TECHNOLOGY PARTNERSHIP изобрела новую микрогидродинамическую технологию сортировки клеток, которую они назвали VACS — вихревая сортировка клеток. Как и при сортировке потока в воздухе, клетки с флуоресцентными метками анализируют оптическими методами, и решение о сортировке принимается в реальном времени.

Система вихревой сортировки клеток состоит из входного канала и камеры с оригинальной геометрией, в которой клетки направляются в два выходных канала: один — для отбракованных клеток, другой — для отобранных (рис. 1).

Новый прибор может справиться со многими проблемами, характерными для существующих систем сортировки, по словам Притчарда: «Основной вопрос для получения препаратов клеточной терапии — можно ли сортировать клетки с достаточной скоростью? Любая система сортировки с одним потоком, в том числе системы сортировки потока в воздухе, упирается в ограничение скорости, связанное со смертью клеток. Чтобы ускорить процесс, нужна многопоточная параллельная обработка клеток. Как создать многопоточную систему сортировки, не усложняя процессы измерения и управления? Наилучший подход — уменьшить размер отдельных устройств для сортировки настолько, чтобы их можно было увидеть одновременно в объектив микроскопа. Мы стремились достичь скорости обработки в 500 миллионов клеток крови в час с высокой чистотой — это в 10–20 раз выше того, на что способны традиционные методы деления клеток».

Притчард добавил: «Сложность в разработке быстрой

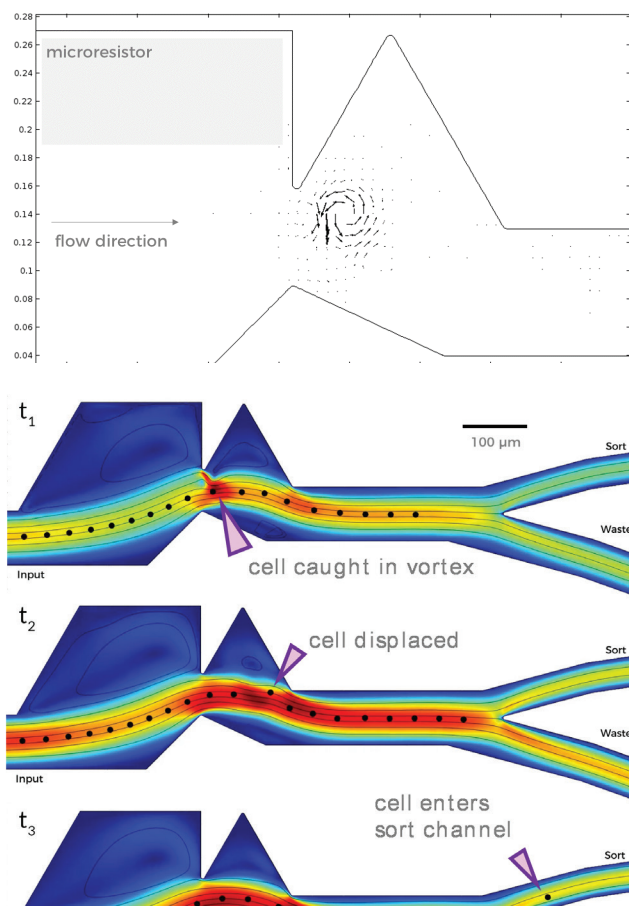


Рис. 2. Результаты моделирования показывают, как работает устройство вихревой сортировки. На графике показано положение микрорезисторного актуатора, который создает пузырьки методом испарения. На векторном графике сверху показан вихрь в модели. На последовательности внизу показана клетка, попавшая в вихрь, которая смещается вдоль линии тока и в конечном итоге отправляется в канал сортировки.

сортировки клеток в том, чтобы сделать устройство для сортировки гораздо меньшего размера, способное работать на тех же скоростях, что и обычные приборы».

Вихревая сортировка будет безопаснее: она проходит в закрытой системе и не требует опасного шага распыления аэрозоля, как в системах сортировки потока в воздухе. Новый прибор для сортировки одноразовый, что снижает риск загрязнения и перекрестного загрязнения образцов. Наконец, прибор удобен в работе, его можно переносить, его работу легко автоматизировать; это экономичный метод для клеточной терапии, отвечающий правилам надлежащей производственной практики.

» ВЫСОКОСКОРОСТНАЯ И МИНИАТЮРНАЯ РАЗМЕР УСТРОЙСТВА для вихревой сортировки — всего 1 мм × 0,25 мм, включая приводы; массив таких устройств можно разместить на микросхеме с шагом 1 мм с учетом пайки. «Если мы не ошибаемся, это самое миниатюрное высокоскоростное устройство для сортировки клеток в мире, — заявил Притчард.

— Разработку мы начали со списка приводов, которые были достаточно малыми для того, чтобы уместиться в устройство вихревой сортировки. Один из интересных примеров привода — тонкопленочный микронагреватель, который может создавать пузырьки термическим испарением. Этот привод в ширину примерно 0,1 мм, и его легко изготовить. Однако эксперименты и моделирование в COMSOL Multiphysics® быстро показали, что найденные нами приводы были слишком быстрыми и слабыми и не могли сами двигать клетки».

Притчард рассказывает: «Тогда к нам пришло озарение. Что если увеличить смещение, вносимое приводом, пользуясь методами инерционной микрогидродинамики? Это новая и интересная область исследований, которая показывает, как управлять клетками в микроскопических масштабах с помощью инерционных эффектов. — «Мы предположили, что если привод будет создавать крошечный вихрь, этот вихрь будет перемещаться в потоке вместе с нужной клеткой, постепенно отделяя ее от отбракованных клеток и направляя в целевой канал. Так появилась идея вихревой сортировки».

» МУЛЬТИ-ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАМЫКАЕТ КРУГ «МЫ ДАЖЕ И НЕ ДУМАЛИ о том, чтобы разрабатывать вихревую сортировку без мультифизического моделирования», — говорит Притчард.

Микрогидродинамические эффекты не похожи на все, что нас окружает, и кроме того, до недавнего времени никто и не верил, что инерционные эффекты могут оказаться важными для микрогидродинамических устройств. Кроме того, изготавливать и испытывать каждый новый вариант устройства было дорого и долго.

Мультифизическое моделирование для создания такого устройства оказалось незаменимым. Используя гидродинамическую модель и метод подвижной стенки, исследователи изучили эффект расширения и схлопывания пузырька, полученного термическим испарением. В методе подвижной стенки пузырьки моделируются реалистичными локальными сдвигами границы.

Притчард рассказал: «Такая модель повторяла поведение границы пузырька и действие 10-миллисекундных импульсов от пузырька, созданного термическим испарением, но при этом обходилась без моделирования сложной физики больших деформаций, вызываемых пузырьком. В результате, при таком новом подходе к моделированию мы могли рассматривать одновременно 20—30 вариантов конструкции и быстро пришли к конструкции инерционной вихревой сортировки, в работоспособности которой мы были уверены до того, как собрали ее физически». После многих итераций моделирования (рис. 2) собранный физический прототип заработал так, как надо.

“ Без инструментов для численного моделирования, которыми мы пользуемся, мы бы не смогли работать так быстро.

— РОБИН ПРИТЧАРД, КОНСУЛЬТАНТ-БИОЛОГ, КОМПАНИЯ TTP

В системе вихревой сортировки после того, как нужная клетка опознана, привод создает методом термического испарения пузырек, который за 10 миллисекунд расширяется и схлопывается. Инерционный вихрь, появляющийся при этом, держится в потоке примерно 200 мкм и сдвигает клетку примерно на 20 мкм. Клетка после этого уходит в отдельный канал, где собираются все отобранные клетки. Остальные клетки автоматически отбраковываются. На рис. 3 показаны одновременно траектории отобранных и отбракованных клеток.

» ПРОВЕРКА ГОТОВОГО ПРОДУКТА КРОМЕ ЭТОГО, ИССЛЕДОВАТЕЛИ ПРОВЕРЯЛИ

на мультифизических моделях свои конструкции. Притчард объяснил: «Во время производства микросхем мы сталкивались с разными трудностями роста, и моделирование оказалось лучшим инструментом для поиска причин и исправления ошибок. В частности, некоторые важные детали после микрообработки оказались не такими, какими мы рассчитывали при конструировании. С помощью моделирования мы доработали конструкцию и повысили производительность устройства, используя те детали, которые мы смогли изготовить».

Сейчас группа работает над многопоточковой версией микросхемы (рис. 4). Мультифизическое моделирование они используют для испытаний разных свойств этой микросхемы. Притчард объяснил: «Мы работаем над очень сложной микрогидродинамической системой: в ней 16 входных каналов и 16 отдельных устройств для сортировки — и должны убедиться, что в каждый канал попадают равные объемы жидкости и клеток».

Группа рассчитывает, что в ближайшем будущем одноканальное устройство

для инерционной вихревой сортировки выйдет на рынок, а многоканальное устройство появится чуть позже. Притчард добавил: «В ближайшие месяцы мы надеемся убедиться, что многопоточковая конструкция работает, и рассчитываем, что вскоре после этого мы изготовим полноценное устройство для демонстрации этой технологии. Без инструментов численного моделирования, которыми мы пользуемся, мы бы не смогли работать так быстро».

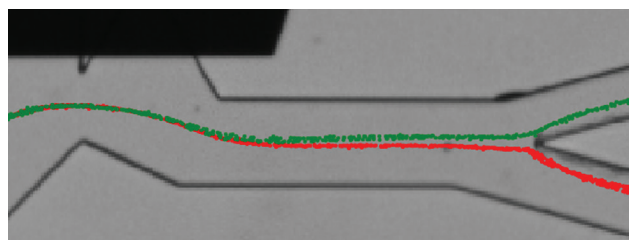


Рис. 3. Траектории отобранных (зеленый цвет) и отбракованных (красный цвет) клеток в системе вихревой сортировки.

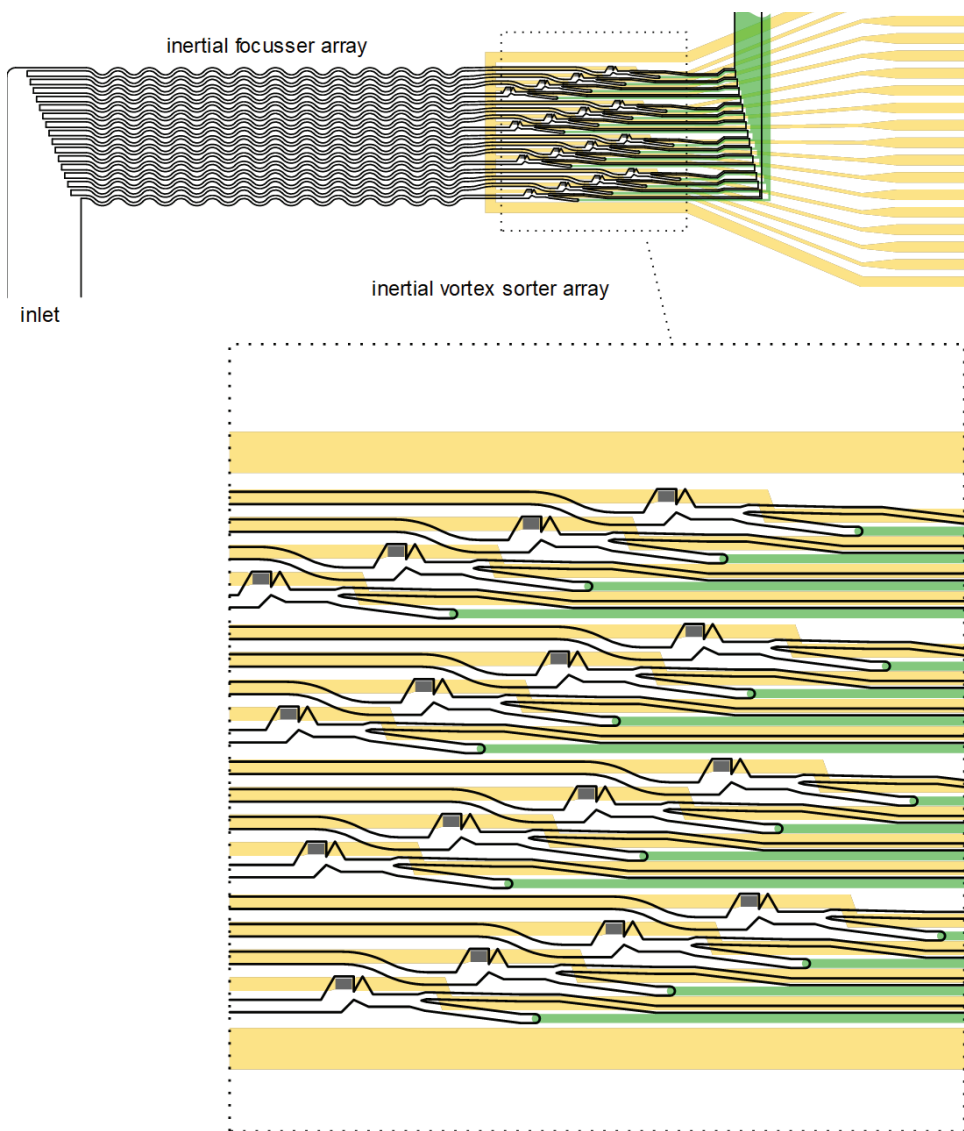


Рис. 4. Устройство вихревой инерционной сортировки с 16 входными каналами и 16 модулями сортировки.

ЭФФЕКТИВНАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ И ОБСЛУЖИВАНИЕ ЭЛЕКТРОСЕТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИЛОЖЕНИЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Инженеры компании NARI Group разработали специализированное приложение Cable Condition Analysis Expert System (Анализ состояния кабеля) на основе своей математической модели, чтобы точно рассчитывать дефекты кабеля и эффективнее исправлять ошибки.

Автор — **ЧЖАН ЦИЦИ**

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КАБЕЛИ И ПРОВОДА — артерии и нервы национальной экономики Китая. На них построены инфраструктура распределения электроэнергии, умные сети и новые энергетические предприятия.

С развитием экономики Китая растет и спрос на кабельные линии передачи. Растущая нагрузка может привести к отклонениям и флуктуациям рабочих характеристик электрических систем или даже к кратковременным отключениям. Как следствие, возможен отказ оборудования в электросети или даже, в крайнем случае, возникновение пожаров и взрывов. Регулярное техническое обслуживание кабельных линий способствует росту экономики и обеспечивает удовлетворенность клиентов, а разработанные на случай отказа протоколы действий позволяют быстро восстановить работу электросети.

Чтобы предотвратить перебои в электросети, нужно регулярно оценивать состояние электрического оборудования, используя инфракрасную и ультрафиолетовую дефектоскопию и метод частичного разряда. Тем не менее эти регулярные испытания не дают полной информации о состоянии кабеля

и во многих случаях не позволяют определить тип отказа. Кроме того, кабели могут быть проложены в самых разных условиях: под землей, в туннелях, на подвесах, — что добавляет

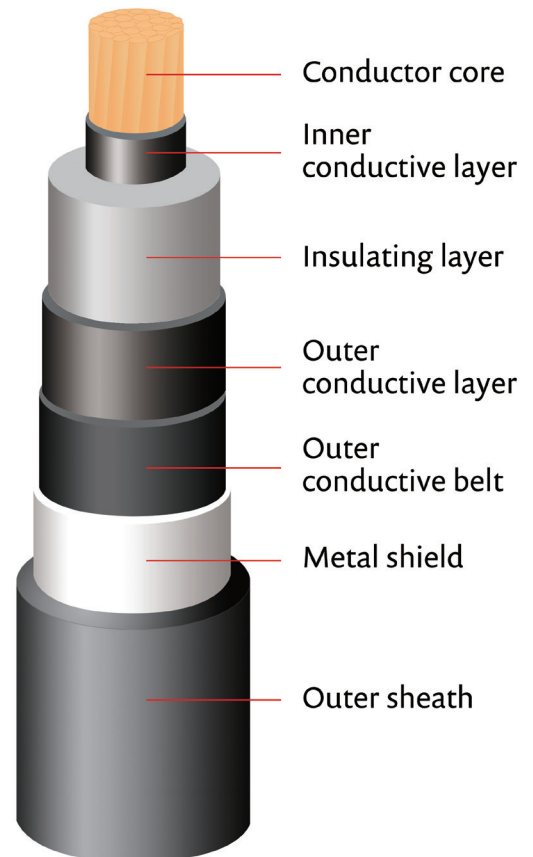


Рис. 1. Схема типовой конструкции кабеля.



Рис. 2. Слева: водный дендрит, появившийся из-за взаимодействия электрического поля и влаги. Справа: крупный план поврежденного слоя изоляции.

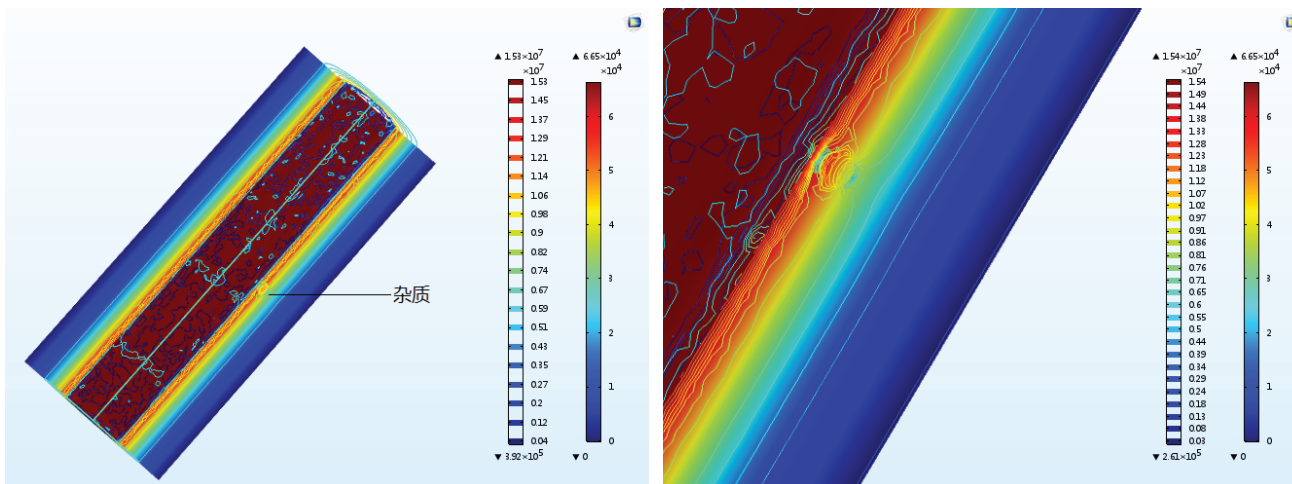


Рис. 3. Слева: результаты расчета кабеля с учетом неоднородностей. Показано распределение электрического потенциала и контуры нормы электрического поля. Справа: крупный план с визуализацией распределения электрического поля.

«необычных» и нестандартных проблем при обнаружении обрывов и неисправностей.

» ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ ТОЧНОЙ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ КАБЕЛЯ

ЧТОБЫ СЕТЬ РАБОТАЛА, инженеры полагаются не только на традиционные методы тестирования, но и учитывают другие факторы: конструкцию и материал кабеля, примеси и дефекты, флуктуации напряжения, условия работы кабеля и влияние окружающей среды.

Группа компаний Wuhan NARI из Государственного института исследований электросети входит в Государственную электроэнергетическую корпорацию Китая. Компания NARI занимается исследованиями, разработкой, конструированием, изготовлением и проектированием устройств для передачи и преобразования электроэнергии. Также NARI вместе с местными электроэнергетическими компаниями занимается обслуживанием оборудования и анализом отказов. Учитывая, сколько

параметров и физических явлений нужно принимать во внимание, группа инженеров под руководством Цзина в NARI использовала численное моделирование, чтобы понять, как меняются электрические поля при ухудшении состояния кабеля и какие именно факторы приводят к отказам.

» КАК ВОДНЫЕ ДЕНДРИТЫ ВЛИЯЮТ НА СОСТОЯНИЕ КАБЕЛЯ

КОНСТРУКЦИЯ КАБЕЛЕЙ представляет собой сложную многослойную структуру. Сердцевина кабеля состоит из одного или нескольких изолированных друг от друга витых проводов, покрытых слоем надежной изоляции (рис. 1). Если на слой изоляции действуют «вредные» факторы: влага, примеси, выпучивания, пространственный заряд, — в изоляционном материале появляются разветвленные микроканалы, обусловленные совместным действием влаги и электрического поля. Электрическое поле в кабеле под напряжением «смещает» влагу таким образом, что она постоянно накапливается в проблемных участках. Из-за этого слой изоляции повреждается,

и зона повреждения растет. Это явление, которое называют водными дендритами или водным трингом, считают основной причиной повреждения высоковольтных кабелей линий электропередачи (рис. 2).

Чтобы понять, как из-за этого меняется состояние кабеля, инженеры компании NARI создали мультифизическую модель. «Легкая в использовании графическая оболочка COMSOL Multiphysics[®] и готовые физические интерфейсы упрощают применение моделирования во всей компании», — отмечает Цзин Чжан, инженер компании NARI.

Моделирование отказа кабеля проводилось в два этапа. На первом этапе инженеры задали радиус и электрические свойства материалов каждого слоя кабеля и рассчитали нормальное электрическое поле кабеля под высоким напряжением. На следующем шаге они добавили параметры, описывающие примеси и водные дендриты. «Для исследования отказа кабеля нужно проанализировать его характеристики в случае, если ухудшаются свойства материалов и образуются водные дендриты. Это легко сделать в программном пакете COMSOL[®]», — объяснил Чжан.

Сравнивая результаты расчетов электрического поля в нормальных и аномальных условиях, инженеры смогли хорошо понять, как примеси и водные дендриты влияют на характеристики кабеля. В электрическом поле обычных кабелей силовые линии указывают только на слой изоляции и направлены радиально; электрическое поле распределено равномерно. Как только появляются примеси, как показано на

“ Разработанное приложение для моделирования играет ключевую роль в обслуживании кабеля. Наши полевые инженеры благодаря ему точно отыскивают и устраняют дефекты.

— ЦЗИН ЧЖАН, ГРУППА КОМПАНИЙ NARI

рис. 3, равномерное электрическое поле искажается. Если локальная разность электрических потенциалов превысит максимальное допустимое для слоя изоляции напряжение, изоляция будет повреждена и быстро выйдет из строя.

» ПОЛЕВЫЕ УСЛОВИЯ И ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЗВОЛЯЕТ

инженерам компании NARI узнавать больше о кабелях. Однако ремонтники, устраняющие отказы кабелей в полевых условиях, не обучены работать с комплексной мультифизической моделью для анализа причин отказа на основе данных в реальном времени — цифровым двойником. Специалист, который может осмотреть кабель на месте и устранить дефект, может не добраться до кабеля в удаленном районе даже за несколько дней или недель. Ремонтные работы можно значительно упростить, если ремонтники на местах будут пользоваться результатами моделирования и самостоятельно анализировать, какие обстоятельства привели к отказу. Чтобы ремонтники могли в реальном времени реагировать на отказы, Чжан разработал приложение для моделирования с нужными параметрами, которые ремонтники могут менять. Приложение для моделирования можно создать на основе любой мультифизической модели с использованием функционала Среды разработки приложений, доступной в COMSOL Multiphysics.

Приложение Cable Condition Analysis Expert System (рис. 4) позволяет техническим специалистам вводить данные по кабелям и выбирать тип отказа, на ходу менять параметры лежащей в основе мультифизической модели, рассчитывать и выводить данные, нужные для понимания причин отказа. Приложение быстро рассчитывает потенциал и электрическое поле, что позволяет техническим специалистам решить, нужно ли заменять или чинить кабель. «Разработанное приложение для моделирования играет ключевую роль в обслуживании кабеля. Наши полевые инженеры благодаря ему точно отыскивают и устраняют дефекты», — отмечает Чжан.

Приложением, разработанным в компании NARI, стали пользоваться и в дочерней компании Guangxi Power Grid. Их ремонтникам оно позволяет рассчитывать отказы кабеля и поддерживать работу энергосети в юго-западном Китае. ☺

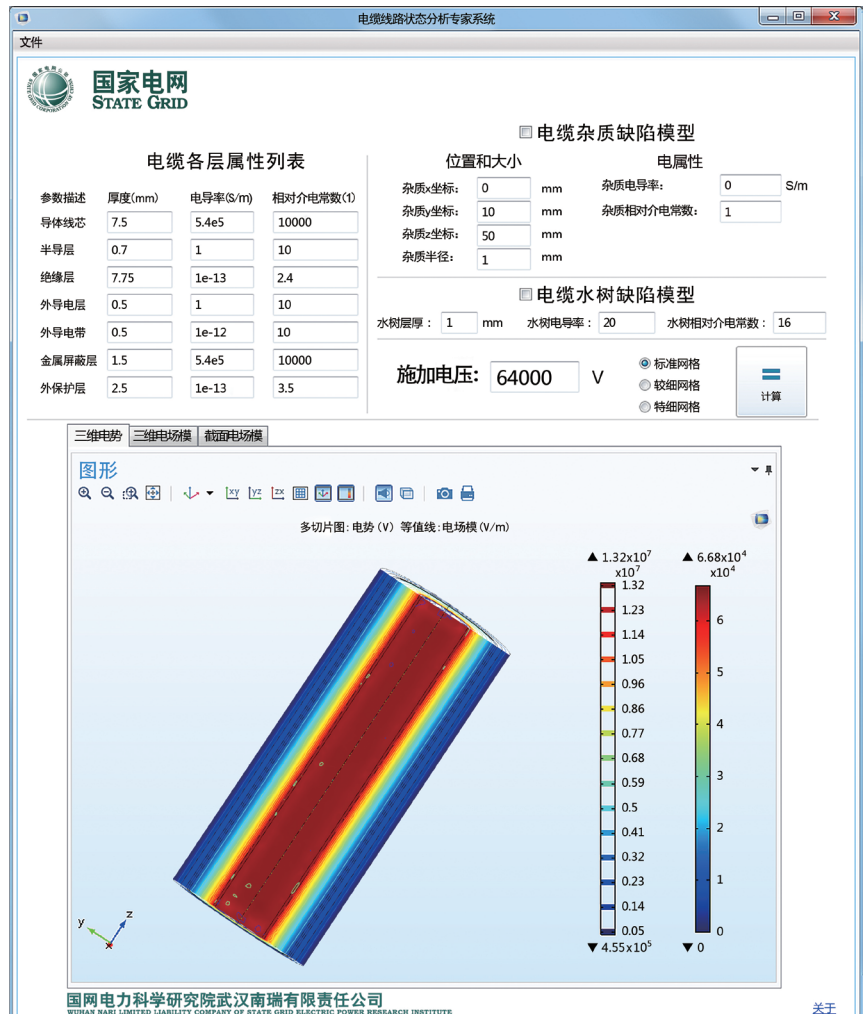
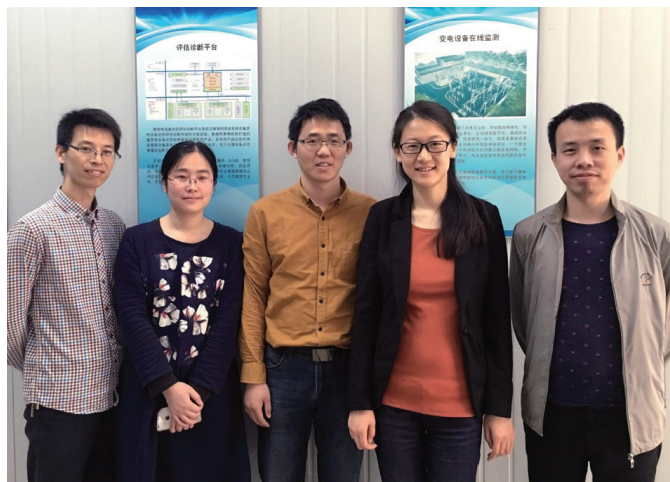


Рис. 4. Приложение Cable Condition Analysis Expert System (Экспертный анализ состояния электрического кабеля).



Сотрудники группы разработки и численного моделирования из компании NARI. Слева направо: Чжао Чэнь, Тин Ху, Тию Фан, Цзин Чжан и Хао Ван

МУЛЬТИФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЛИВАЕТ СВЕТ НА СЛОЖНЫЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

Мультифизическое моделирование используют в Лаборатории ядерных исследований Канады, чтобы пролить свет на сложное поведение материалов, из которых состоит ядерное топливо.

Автор — САРА ФИЛДС

ЧТО БУДЕТ, ЕСЛИ ИНЖЕНЕРЫ

заменяют старый, неудобный, но проверенный код, написанный ими самими, на программный пакет для мультифизического моделирования? Этим вопросом задались в отделе вычислительных методов Лаборатории ядерных исследований Канады, ведущей организации в Канаде, занимающейся ядерными исследованиями и технологиями.

Для моделирования в области ядерных исследований, где особое внимание уделяется безопасности, эффективности и экономичности реакторов, используют проверенные временем и надежные программные коды, написанные своими силами. К сожалению, чтобы внести даже небольшое изменение, приходится проверять огромное количество кода, а это мешает внедрению инноваций. Вместо

того чтобы изменять унаследованный программный код, можно использовать мультифизическую среду, которая позволяет инженерам изучать изменения в данных и методы моделирования, не сталкиваясь со сложностями при адаптации большого количества кода.

Эндрю Прудил, специалист по безопасному применению топлива в Лаборатории ядерных исследований, в ходе своей работы применяет программные пакеты для моделирования, чтобы улучшить традиционную и, казалось бы, неизменную конструкцию ядерных реакторов.

«Ядерные исследования — почти материаловедение, только в них нужно еще учитывать влияние радиации, — объясняет Прудил. — Мы в том числе исследуем ядерное топливо и

материалы, из которых состоят прилегающие к нему компоненты».

» ЯДЕРНОЕ ТОПЛИВО — СЛОЖНАЯ ЗАДАЧА

ПО ИТОГАМ СВОЕЙ РАБОТЫ

с мультифизическими программными пакетами Прудил создал замечательную математическую модель, учитывающую поразительное число физических явлений. В его модели представлены топливные таблетки для ядерного реактора с учетом явлений теплопередачи, механической деформации, механического контакта, роста давления из-за выделения газообразных продуктов деления и микроструктурных изменений из-за роста зерен, радиационного повреждения и выгорания топлива. Он также смоделировал изменение оболочки, окружающей ядерное топливо.

Свежие топливные таблетки (рис. 1) помещаются в оболочку — запаянную металлическую трубку — в ядерном реакторе. При облучении температура внутри таблетки растет, и тепло передается через металлическую трубку к воде. Горячая вода, в свою очередь, переходит в пар, который используется для получения электричества таким же образом, как и на обычных электростанциях.

При облучении в таблетках происходит реакция деления ядра, в результате которой выделяется тепло, что приводит к росту температуры и ее градиента, а также к тепловому расширению. Важно учитывать и специфичные для ядерного топлива явления: в топливных таблетках накапливаются продукты реакции деления.

На рис. 1 показана сложная микроструктура топливной таблетки после длительной эксплуатации при высокой температуре. Изначальная структура зерен свежей таблетки не меняется лишь снаружи, ближе всего к теплоносителю, где температура поднимается меньше всего. При повышении температуры зерна укрупняются, образуя область равноосного роста зерен. При высоких температурах из-за механизма переноса в газовой фазе поры в таблетке смещаются в направлении градиента температуры — к центру таблетки, формируя центральную полость и оставляя за собой длинные вытянутые зерна.

Из-за этих эффектов в керамическом топливе возникают трещины. Нужно также учитывать контакт между керамическим топливом и металлической оболочкой. Есть и радиационное повреждение, так как высокоэнергетические продукты реакции деления — гамма-излучение и нейтронное излучение — меняют

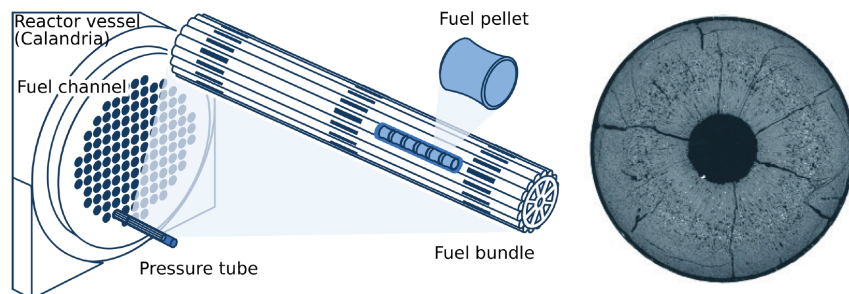


Рис. 1. Слева: схема, показывающая расположение топливных таблеток в тепловыделяющей сборке. Справа: микрофотография поперечного среза топливной таблетки, показывающая микроструктуру, которая возникает при использовании.

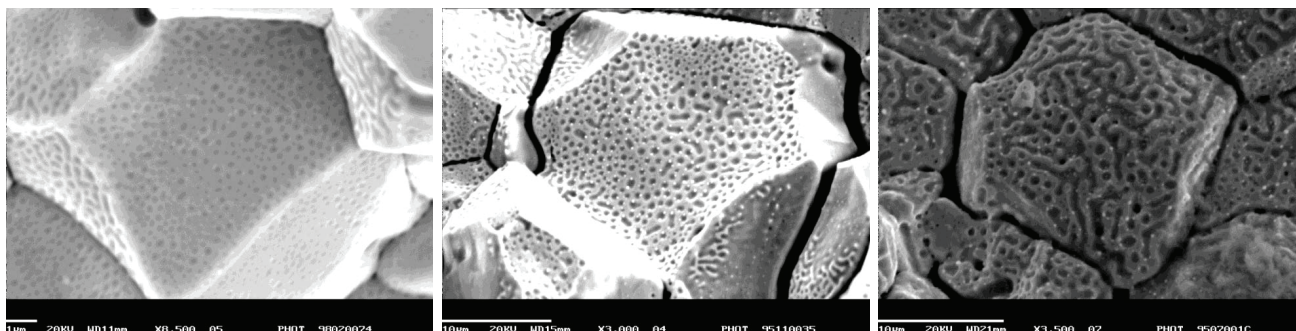


Рис. 2. Микрофотографии, на которых показано выделение газообразных продуктов реакции деления на границах зерен диоксида урана. По мере выгорания топлива (слева направо) пузырьки растут и сливаются. White, *Development of grain-face porosity in irradiated fuel* (Развитие пор между гранями зерен в облученном топливе), J. Nuc. Mat. 325, 2004, www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022311503004616.

микроструктуру любого материала. Есть и макроскопическое увеличение в объеме: при реакции деления один атом разделяется на два, занимающих больше места.

Кроме того, два газообразных продукта реакции деления — ксенон и криптон — благородные газы, которые образуют пузырьки внутри топливных таблеток (рис. 2).

Учитываются и явления коррозии: горячая вода под воздействием радиации образует продукты радиолитического распада, вызывающие коррозию внешней части оболочки.

» ПРЕДОТВРАТИТЬ ОТКАЗ

ТАК КАК СВОЙСТВА ядерного топлива резко меняются при облучении, инженеры пользуются моделями для расчета рабочих характеристик топлива: пиковой температуры, давления газа и деформации оболочки, — чтобы интерполировать данные имеющихся экспериментов. По этой же причине невозможно узнать, как изменения в конструкции проявятся при облучении, если не проводить тщательное моделирование и физические испытания.

Одна из главных целей работы Прудила — смоделировать деформацию оболочки и получить хорошую оценку величины деформации, так как она вносит значительный вклад в повреждение оболочки. После создания модели деформации оболочки конструкцию можно было бы оптимизировать виртуально. Возможные стратегии оптимизации — изменение топливной таблетки, зазора между таблеткой и оболочкой или же изменение процесса, происходящего с топливом в реакторе.

«Модель построить достаточно просто, говорит Прудил, — сложное узнать, какие свойства материала ввести в эту модель, особенно если они меняются со временем и в зависимости от дозы облучения».

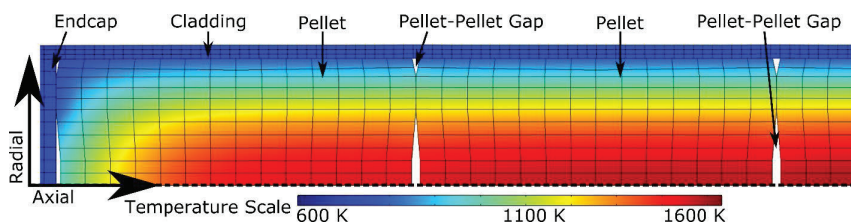


Рис. 3. Результаты моделирования топлива и оболочки. Показана температура в оболочке, топливных таблетках и зазорах между ними.

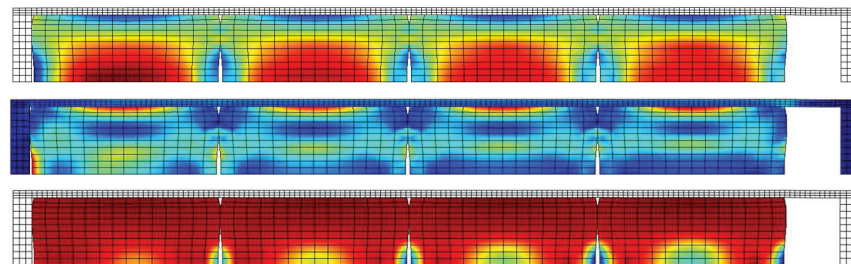


Рис. 4. Результаты моделирования топлива и оболочки. Показаны гидростатическое давление (вверху), напряжение по Мизесу (в центре) и осевая ползучесть (внизу) в оболочке, топливных таблетках и зазорах между ними.

Создав новую модель, он сравнивает результаты расчетов с экспериментом, чтобы оценить точность модели.

Идея изменять само топливо для улучшения характеристик реактора выглядит привлекательно, потому что топливные таблетки все равно используются только один раз. Это экономит средства: не понадобится заменять детали реактора. Инженеры смогут просто подавать в реактор новые топливные таблетки, когда старые перестанут работать.

«Таким образом, — говорит Прудил, — мы, в первую очередь, должны были точно описать интересные нас материалы».

» СОВМЕСТИТЬ В ОДНОЙ МОДЕЛИ РАЗНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

ИСПОЛЬЗУЯ ПРОГРАММНЫЙ ПАКЕТ

COMSOL MULTIPHYSICS®

Прудил создал модель топлива и оболочки, описывающую сложные механизмы теплопередачи, деформации твердых тел и поведение материалов и веществ, из которых состоят топливо, оболочка и которые наполняют зазор между ними. На рис. 3 показан пример профиля температуры, рассчитанный для топливных таблеток и оболочки.

«Используя программный пакет COMSOL, — говорит Прудил, — я не

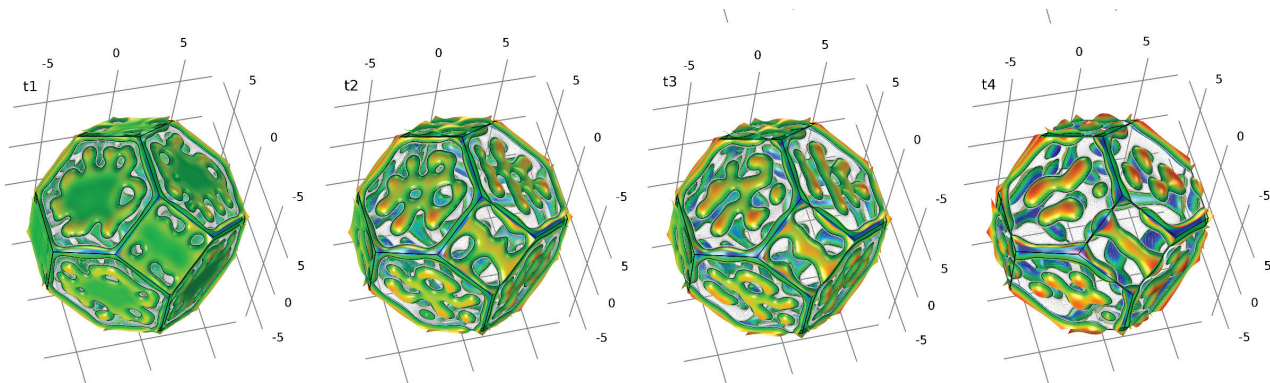


Рис. 5. Модель показывает образование (слева), движение (в центре) и укрупнение пузырьков газа на границах зерен.

задумываюсь о программировании и численных расчетах. Я напрямую решаю математические и физические задачи, а не беспокоюсь о процессе решения и обработке результатов. При этом возникает меньше побочных проблем, чем обычно при численном моделировании с помощью своего собственного кода».

Прудил также использовал свою модель топлива и оболочки, чтобы рассчитать гидростатическое давление, напряжение по Мизесу и осевую ползучесть в оболочке и топливных таблетках (рис. 4). Распределение этих полей зависит от параметров конструкции: отношения длины к диаметру, размеров камеры — и от рабочих условий: уровня мощности и температуры теплоносителя.

» МОДЕЛИРОВАТЬ РАЗВИТИЕ ПОР И ГРАНИЦ ЗЕРЕН

ЧТОБЫ РАЗВИТЬ СВОИ ИНСТРУМЕНТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ и получить новую информацию о работе реактора, Прудил построил модель диффузии газа из зерен топлива, а также образования и движения пузырьков на границах зерен (рис. 5), используя моделирование на основе уравнений пользователя в COMSOL[®].

При облучении и изменении химического состава ядерного топлива из зерен топлива выходят газообразные продукты реакции, образуя пузырьки. Эти пузырьки движутся внутри таблеток и сливаются (рис. 5). При обычном применении метода фазового поля моделируют весь объем зерен топлива. Новизна и универсальность данного подхода состоит в том, что твердую фазу топлива игнорируют и моделируют лишь подвижную границу между твердой фазой и газом. Так трехмерная задача превращается в двухмерную, что значительно снижает требования к вычислительной мощности.

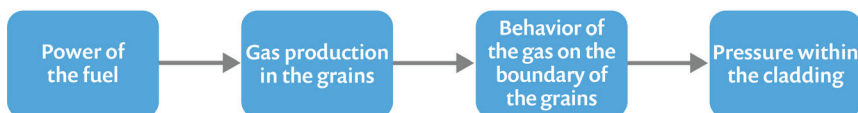


Рис. 6. Процесс деградации топлива.

Модель задает два связанных уравнения в слабой форме на поверхности зерен, одно для расстояния до поверхности пузырька, а второе — для химического потенциала. Зная, сколько газа выделяется из топлива, Прудил рассчитал теплопроводность и давление газа в топливной таблетке. Результаты такого анализа позволили Прудилу определить другие ключевые показатели работы топлива. Эта серия расчетов демонстрирует нелинейный процесс деградации топлива (рис. 6).

Модель позволяет приблизительно оценить, сохраняется ли достаточно низкий уровень давления и можно ли продолжать облучать топливо, — а это бесценная с точки зрения безопасности информация.

» ПРИНЕСТИ НОВЫЕ ИДЕИ В ПРОИЗВОДСТВО ТОПЛИВА ИСПОЛЬЗУЯ МУЛЬТИФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

инженеры Лаборатории ядерных исследований создали полезный инструмент, стали быстрее проходить итерации проектирования и внедрять новые идеи. Прудил замечает, что мультифизическое моделирование дает информацию и для других областей ядерных исследований, например, для разработки топлива, безопасного при авариях. Разрабатывая ядерное топливо, безопасное даже в случае крупной аварии, инженеры могут пересмотреть все подходы к созданию топлива.

Прудил также замечает, что в долгосрочной перспективе программные пакеты для моделирования будут играть важную роль в разработке малых модульных реакторов, которые приведут к смене парадигмы: разрабатывать будут меньшие по размеру и простые в построении реакторы, что снизит капитальные затраты на строительство. Малые модульные реакторы можно построить из новых материалов, на основе новых геометрий и новых принципов безопасности, что позволит отойти от продержавшейся десятки лет тенденции строить все более крупные и мощные ядерные реакторы.

В то же время сложные модели существующих ядерных реакторов, которые создает Прудил, позволяют лучше понять многоуровневые сложные системы ядерных реакторов. ©



Эндрю Прудил, специалист по безопасному применению топлива в Лаборатории ядерных исследований.

ПРЕКЛОНЯЯ ГОЛОВУ ПЕРЕД МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Инженеры компании GN Resound использовали для акустических расчетов метод граничных элементов, чтобы создать компьютерную модель HATS-манекена (голова и торс) — одного из классических и ключевых инструментов, с помощью которых проводится оценка характеристик акустических устройств, взаимодействующих с телом человека: наушников, гарнитур, устройств беспроводной голосовой связи и слуховых аппаратов.

Автор — ЗАК КОНРАД

ПОНЯТЬ, КАК ТЕЛО ЧЕЛОВЕКА влияет на звуковые сигналы, распространяющиеся в воздухе, сложно, но именно эту задачу нужно решить, чтобы оценить и определить рабочие характеристики акустических устройств, взаимодействующих с людьми. Стандартный метод оценки характеристик — электроакустические испытания в естественных условиях, но неправильная форма и значительные вариации формы торса, головы, ушной раковины и слухового прохода добавляют инженерам-акустикам головной боли.

Чтобы собранные акустические данные были более точными, компания-производитель оборудования для акустических и вибрационных измерений Brüel & Kjær разработала манекен HATS (Head and Torso Simulator, модель головы и торса), который точно повторяет геометрическую форму и акустические свойства головы и торса среднестатистического человека (рис. 1). Такой манекен со встроенными имитациями рта и уха отлично подходит для проведения электроакустических испытаний наушников, гарнитур, устройств беспроводной связи, слуховых аппаратов, шлемов и шумозащитных устройств. Ухо обычно представлено полудюймовым микрофоном, подключенным к предварительному усилителю, а рот — громкоговорителем с высокой акустической податливостью и распределением звукового давления, повторяющим среднестатистическое распределение в окрестности рта человека во время разговора.

Компания GN Resound много лет использовала HATS-манекен для измерений: они исследовали влияние геометрии уха на воспринимаемый уровень звука

на барабанной перепонке и определяли характеристики направленности при рассеянии звука на ухе и голове. Недавно в программном пакете COMSOL Multiphysics[®] они создали математическую модель HATS-манекена. Модель, разработанная ведущим инженером Рене Кристенсенем, реализована с использованием метода граничных элементов (ВЕМ). Данная модель теперь позволяет его коллегам проводить виртуальные исследования вместо физических.

» ПОЧЕМУ БЫЛ ВЫБРАН МЕТОД ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ?

СОВМЕСТНОЕ ВЛИЯНИЕ торса, головы, ушной раковины и слухового канала на звуковые сигналы, передающиеся по воздуху, и акустическое поле вокруг головы описывается так называемой передаточной функцией головы (HRTF — Head-Related Transfer Function). «Для каждой точки пространства вокруг головы вы можете описать, как звук, исходящий из этой точки, достигнет барабанной перепонки», — объясняет

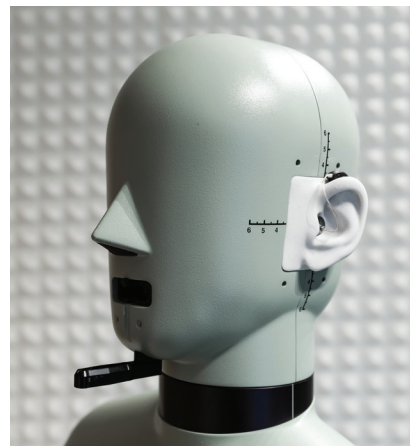


Рис. 1. HATS-манекен для испытания комплексной системы шлема.

Кристенсен. Такой детерминированный подход позволяет визуализировать звук в модели для разных положений микрофона (характерные положения показаны на рис. 2), помогая инженерам совершенствовать конструктивные решения и изучать, как голова и торс влияют на полное давление звука (рис. 3). Проблема заключается в том, что классические реалистичные акустические модели для метровых расстояний, построенные на основе метода конечных элементов (FEM), требуют много вычислительных ресурсов и, в первую очередь, оперативной памяти.

Для Кристенсена, который часто работает с моделями на ноутбуке, это стало серьезным ограничением. Программный пакет COMSOL Multiphysics[®] позволил ему выбрать другую технологию расчета: для данной задачи он использовал метод граничных элементов, который для нее позволяет строить гораздо более эффективные акустические модели. С одной стороны, метод граничных элементов требует выполнить больше вычислений в расчете на одну степень свободы, чем метод конечных элементов, но, с другой стороны, методу граничных элементов обычно требуется значительно меньше степеней свободы для построения решения в большом объеме с той же точностью. При использовании

« Программное обеспечение [COMSOL] очень полезно, если вы, как и я, работаете с физическими задачами, математическое описание которых еще не реализовано в качестве готового и преднастроенного интерфейса. Я обычно спрашиваю себя: «А каким уравнением можно описать эту задачу?» Если вы знаете уравнение, то значит вы сможете задать и решить его в COMSOL».

— РЕНЕ КРИСТЕНСЕН, ВЕДУЩИЙ ИНЖЕНЕР КОМПАНИИ GN RESOUND

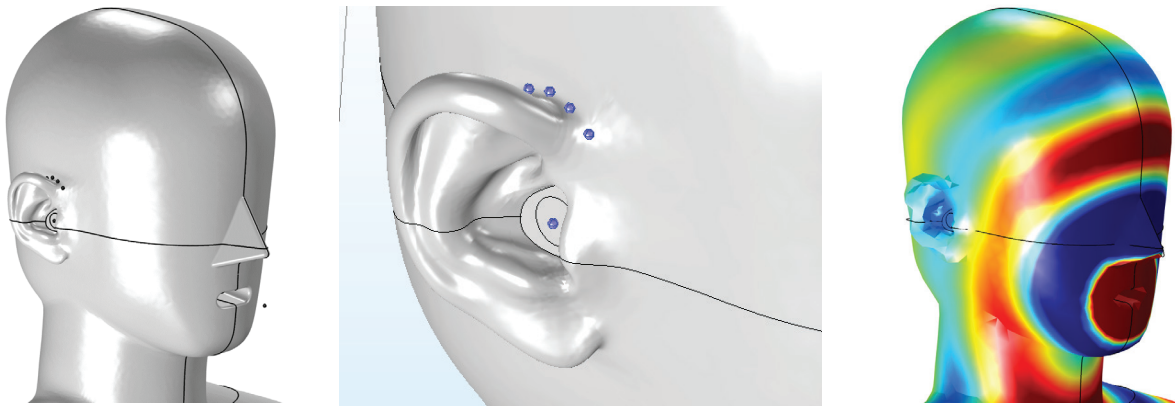


Рис. 2. Слева и в центре: точки вблизи уха, в которых рассчитывается передаточная функция ото рта до точки. Передаточная функция ото рта до точки вблизи уха — это частный случай передаточной функции головы. Справа: распределение давления звука на частоте 3200 Гц. Красный цвет соответствует высокому положительному давлению, синий — высокому отрицательному давлению.

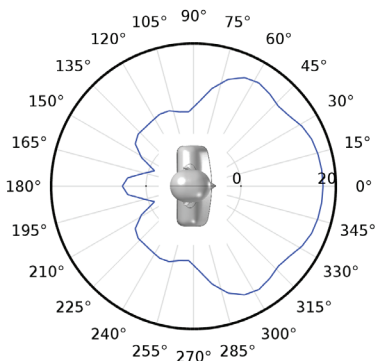


Рис. 3. Полярный график (диаграмма направленности) полного давления звука для радиуса 1 м и частоты 3200 Гц.

метода граничных элементов строить сетку и выполнять вычисления требуется только на границах трехмерных областей, при этом можно рассчитать значения давления звука в любой точке области — такой подход существенно экономит вычислительные ресурсы. Напротив, метод конечных элементов подразумевает построение сетки во всем объеме области — и это целесообразно, только если вас интересует ближнее поле. После перехода на метод граничных элементов Кристенсену для проведения расчетов стало хватать вычислительных ресурсов его ноутбука. «Настройка модели стала гораздо проще при использовании метода граничных элементов», — отмечает Кристенсен. — При наличии хорошей геометрической модели все, что вам нужно сделать — это построить сетку на поверхности. Раньше мне приходилось генерировать объемную сетку, в т.ч. для заданных воздушных областей, а также применять на их внешних границах специальные условия на излучение для имитации открытых границ, но теперь все эти аспекты естественным

образом учитываются в формулировке на основе метода граничных элементов».

» И СЛУШАТЬ, И ГОВОРИТЬ ПРЕЛЕСТЬ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ

НАТС-МАНЕКЕНА в том, что ее можно использовать для изучения задач с несколькими источниками звука, например, для случая человека, разговаривающего по гарнитуре в шумном офисном помещении. При этом особенно сложно исследовать слуховые аппараты, потому что они совмещают одновременно микрофон и динамик, которые могут фонить. «В модели появляется новый уровень сложности: в обычном слуховом аппарате два микрофона, каждый из которых принимает звуковые колебания и вибрации», — объясняет Кристенсен. — Часть из них идет от самого слухового устройства, и микрофон может начать фонить, выдавая ужасный шум».

Проводить моделирование на основе метода граничных элементов довольно просто, поскольку для описания постановки задачи («физики») требуется лишь небольшое число настроек. В таких моделях в области рта используются граничные условия, задающие акустическое ускорение, что имитирует работу громкоговорителя. Торс и голова манекена считаются жесткими, а открытые внешние граничные условия реализованы в методе граничных элементов автоматически. После этого рассчитывают поле звукового давления вокруг головы и торса, а уже на этапе обработки результатов моделирования можно проанализировать самые разные положения микрофона. Если в модели задана геометрия слухового устройства, инженеры-конструкторы могут перечислить все возможные положения, и на основе модельных расчетов будет выбрано оптимальное положение. «Для метода граничных элементов постановка

расчетной задачи очень проста, — говорит Кристенсен. — Нам интересна взаимосвязь между ртом и ухом, поэтому я накладываю граничное условие акустического ускорения на границу рта, а затем рассчитываю давление в точках перед ртом или во рту и в ухе, только и всего. Из физических явлений мы учитываем только акустику в окружающем воздухе».

» ПЛАНЫ НА БУДУЩЕЕ РАЗРАБОТАННАЯ КРИСТЕНСЕНОМ МОДЕЛЬ

ценна для него и его коллег в т.ч. потому, что на основе результатов ее расчета можно получить огромный массив информации, используя различные встроенные инструменты обработки. Можно анализировать разные конфигурации, например, купола для плотно прилегающих слуховых устройств или проходов, соединяющих внутреннее и наружное ухо; можно рассчитывать передаточные функции для разных точек и даже передавать расчетную информацию в другие программные пакеты.

Кристенсен подчеркивает, что он продолжает улучшать свои акустические модели для НАТС-манекена и других виброакустических задач и использовать для этих целей COMSOL Multiphysics[®]. «Мне нравится удобный и интуитивный интерфейс этого программного пакета, и я часто пользуюсь возможностью добавлять и модифицировать нужные мне уравнения», — рассказывает он. — Такой функционал очень полезен, если вы, как и я, пытаетесь моделировать физические процессы, для которых математические модели не всегда встроены в ПО. Я обычно спрашиваю себя: «А каким уравнением можно описать эту задачу?» Если вы знаете уравнение, то значит вы сможете задать и решить его в COMSOL». ©

УВЕРЕННАЯ РАЗРАБОТКА ВЫСОКОКЛАССНЫХ ПРОДУКТОВ

Автор — ДЭН АНАГНОС, ТЕХНИЧЕСКИЙ ДИРЕКТОР КОМПАНИИ WARWICK AUDIO TECHNOLOGIES

ИНЖЕНЕРЫ, РАЗРАБАТЫВАЮЩИЕ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ,

многие годы используют традиционные методики моделирования, основанные на сосредоточенных или распределенных эквивалентных (обычно схемотехнических) элементах. Такие подходы полезны для некоторых прикладных задач, но их точность и эффективность ограничены. Часто полученные с их использованием результаты плохо согласуются с акустическими испытаниями и не позволяют понять, какие механизмы лежат в основе работы устройства, из-за чего возможно сделать неверные выводы и испортить конструкцию. Для разработки новых, передовых технологий воспроизведения звука необходима универсальная, точная и эффективная методика моделирования.

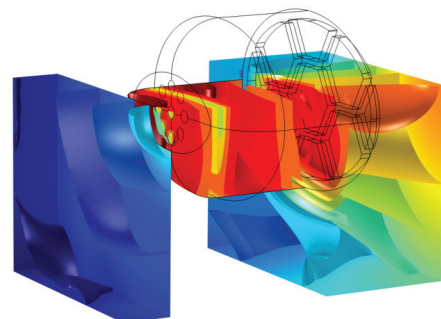
Мы в компании Warwick Audio Technologies перешли к использованию мультифизического моделирования, чтобы резко сократить циклы разработки, снизить затраты на прототипирование и быстро находить оптимальные решения для различных прикладных задач. Два года назад мы начали сотрудничество с сертифицированной COMSOL консалтинговой компанией Xi Engineering Consultants. Они помогли разработать наш высокоточный слойный электростатический преобразователь первого поколения. После этой успешной работы мы продолжили работу с Xi Engineering и создали планарный преобразователь второго поколения, а также специализированную электронную систему привода. Новое конструктивное решение с заметно улучшенными рабочими характеристиками было проще масштабировать для прикладных задач, требующих разных размеров, форм и уровней мощности преобразователя: от наушников до автомобильных аудиосистем.

Мультифизическое моделирование позволило очень точно рассчитать уровни звукового давления (SPL), чувствительность, линейность и разные типы искажений в диапазоне частот от 10 Гц до 60 кГц для разных уровней входной мощности.

Благодаря численному моделированию нам удалось параметризовать геометрию и материалы, чтобы еще до начала стадии прототипирования получить полностью оптимизированное конструктивное решение. Мы даже смогли добавить в модель детали, релевантные для сборки и изготовления, и оценить, как они влияют на характеристики устройства.

Мы также включили в нашу модель акустическое окружение. Сочетая метод граничных элементов (BEM) и метод конечных элементов (FEM), мы смогли подобрать оптимальные материалы и акустические условия для системы динамиков в подголовнике автомобиля с автономным питанием. Кроме этого, мы масштабировали и оптимизировали преобразователь и электронные блоки, устанавливаемые в разных точках автомобиля.

Мультифизическое моделирование — невероятно мощный и эффективный инструмент для решения критически важных исследовательских задач. Он экономит время, деньги и ресурсы, которых часто не хватает. Он также снижает риски, связанные с исследованием и разработкой, и полезен как для зрелых корпораций с именем, так и для таких молодых компаний с венчурным финансированием, как наша. Наши инвесторы быстро получают убедительные доказательства эффективности наших разработок, а после выигрывают от высококачественных конструктивных решений и продуктов, которые способны быстро выйти на целевой рынок. ©



Контурные уровни звукового давления (SPL) в высокоточном слоевом электростатическом преобразователе, расположенном в подголовнике автомобиля.



Акустическая система Sonoma Headphone System премиального сегмента, в которой используются высокоточные слойные электростатические преобразователи и комплексные электронные блоки, разработанные компанией WAT.



ДЭН АНАГНОС — технический директор Warwick Audio Technologies Ltd., технологической компании в Великобритании, которая разрабатывает передовые планарные электростатические преобразователи и собственные электронные блоки для высококлассных аудиосистем. Последние 30 лет Дэн вел электроакустические исследования и разрабатывал продукты для разных компаний, занимающихся потребительской электроникой, профессиональными аудиосистемами и комплексным аудиооборудованием. Соавтор 14-ти патентов в области электроакустики.