

COMSOL NEWS

ЖУРНАЛ МУЛЬТИФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ



**Мультифизическое
моделирование —
источник данных
для коммерческих
и инженерных решений**

Компания Tauw улучшает качество воды

СТР. 6

Мультифизическое моделирование — источник данных для коммерческих и инженерных решений

Разработка инновационных, экономичных и экологических решений от первоначальной концепции до конечного продукта — это непростая задача как для менеджеров, так и для инженеров. Но усилия того стоят.

В этом выпуске COMSOL News мы расскажем о специалистах в области моделирования, которые вместе с коллегами и заказчиками находят решения, удовлетворяющие как запросам бизнеса, так и требованиям конкретной инженерной задачи. Это, например, позволяет избежать от «узких мест» на производстве и одновременно поддерживать эффективность и безопасность фармацевтических препаратов. Хорошие разработки появляются благодаря точному описанию физических законов, лежащих в основе той или иной системы. С помощью мультифизического моделирования инженеры могут смоделировать любые физические явления и описать их взаимосвязь. Они создают точные численные модели на границе технологических возможностей, одновременно уменьшая потребность в физических прототипах. Такие специалисты создают приложения для моделирования, а также пользовательские интерфейсы, облегчающие процесс мультифизического моделирования. Это дает возможность коллегам и пользователям по всему миру проводить виртуальные испытания новых идей путем численного моделирования.

В этом журнале вы найдете конкретные примеры того, как мультифизическое моделирование помогает в поиске лучших коммерческих и инженерных решений: развитие компьютерных технологий, улучшение качества воды, разработка бесконтактных магнитных муфт и минимизация коррозии в многокомпонентных сборках с помощью совместных усилий.

Приятного чтения и удачного мультифизического моделирования!



Валерио Марра
Директор по маркетингу
COMSOL, Inc.

COMSOL В СОЦИАЛЬНЫХ СЕТЯХ

БЛОГ comsol.ru/blogs

ФОРУМ comsol.com/forum

LinkedIn™ linkedin.com/company/comsol-inc

Facebook* facebook.com/multiphysics

Twitter* twitter.com/@COMSOL_Inc

Google+™ plus.google.com/+comsol

Мы ждем ваших замечаний и отзывов о журнале *COMSOL News*.
Пишите нам по адресу: info@comsol.com.

COMSOL NEWS

© 2018 COMSOL. COMSOL, COMSOL Multiphysics, Capture the Concept, COMSOL Desktop, COMSOL Server, LiveLink являются товарными знаками или зарегистрированными товарными знаками компании COMSOL AB. Все другие товарные знаки являются собственностью их владельцев. Компания COMSOL AB, ее дочерние компании и продукция не связаны с этими владельцами, не утверждались, не финансировались и не поддерживались ими. Полный список таких владельцев товарных знаков представлен на веб-сайте www.comsol.ru/trademarks.

LinkedIn является зарегистрированным товарным знаком компании LinkedIn Corporation и ее филиалов на территории США и в других странах. Facebook является зарегистрированным товарным знаком Facebook, Inc. TWITTER, TWEET, RETWEET и логотип Twitter являются зарегистрированными товарными знаками Twitter, Inc. и ее дочерних предприятий. Google+ является зарегистрированным товарным знаком Google LLC.

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМЫ ФОТОЛИТОГРАФИИ

- 4 Компания ASML ускоряет развитие компьютерных технологий с помощью мультифизического моделирования

ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД

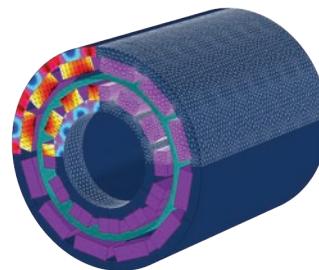
- 6 Моделирование многофазных потоков помогает проектировать очистные сооружения

БИОФАРМАЦЕВТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

- 9 Мультифизическое моделирование в области биофармацевтики

КОРРОЗИЯ В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СБОРКАХ

- 12 Облегченные конструкции из алюминия: приложения для моделирования коррозии помогают создавать высокотехнологичные решения



МАГНИТНЫЕ МУФТЫ

- 16 Магнитные муфты увеличивают срок службы прибрежных ветряных электростанций

РАСХОДОМЕРЫ КОРИОЛИСА

- 19 Как плыть по течению: оптимизация расходомеров



НА ОБЛОЖКЕ

Вид на меандры реки Доммел, проходящей через поселок Сон-эн-Брёгел, в 10 километрах к северу от города Эйндховен в Нидерландах. Изображение предоставлено: Waterschap de Dommel (Совет по водным ресурсам реки Доммел).

ГЛАВНОЕ

ТЕРМИЧЕСКАЯ ЭЛАСТОГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ СМАЗКА

22 | Приложения для моделирования способствуют успехам исследований в области трибологии

АКУСТИЧЕСКИЕ МЕТАПОВЕРХНОСТИ

25 | Первокласное звучание благодаря численному моделированию акустических метаповерхностей

ПРОЦЕСС СПЕКАНИЯ

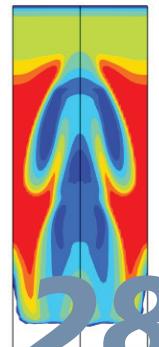
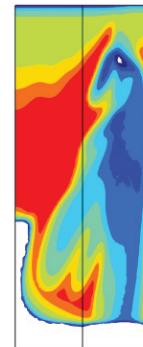
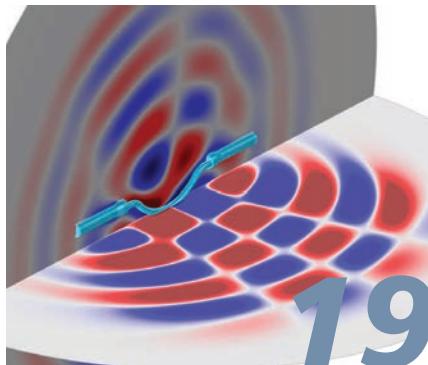
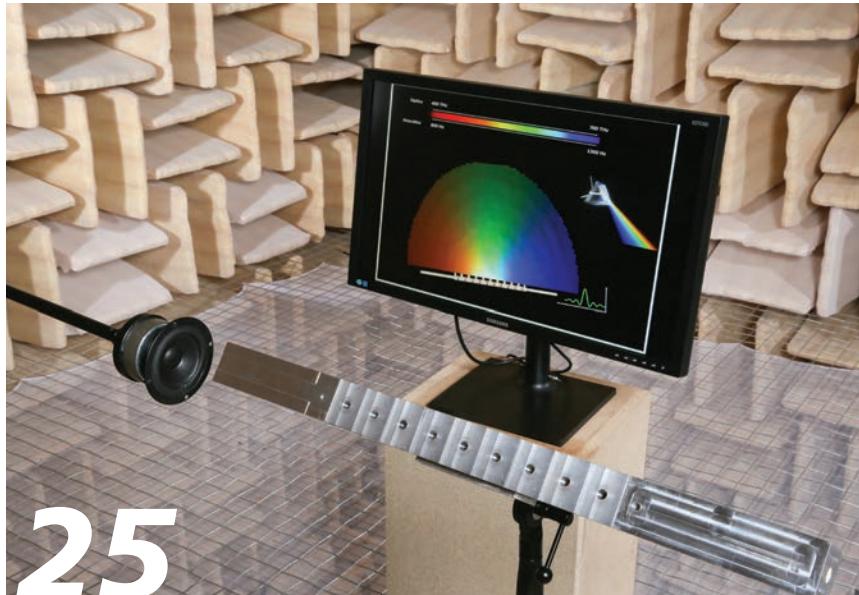
28 | Улучшение эффективности спекания железосодержащих руд

РАЗРАБОТКА ПРОДУКЦИИ ДЛЯ АВТОМОБИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

30 | Оптимизация конструкции пассажирских автомобилей с помощью приложений для моделирования

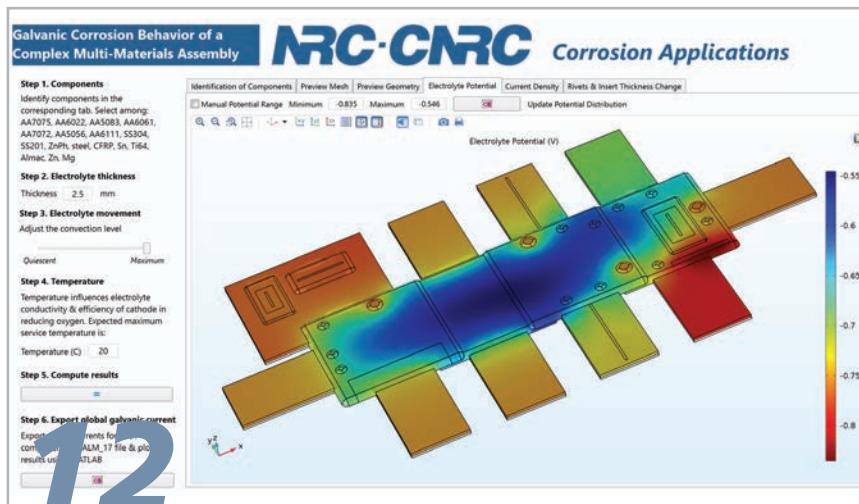
СИСТЕМЫ МОЛНИЕЗАЩИТЫ

33 | Мультифизическое моделирование на защите ветряных турбин от молний



ПРИГЛАШЕННЫЙ АВТОР

36 | Научно-техническое образование: приложения для моделирования дают знания, которые будут востребованы вне учебного класса



Компания ASML ускоряет развитие компьютерных технологий с помощью мультифизического моделирования

В компании ASML рассказали, как мультифизическое моделирование становится ключевым фактором при производстве микросхем. Полученные ими знания будут полезны в любом производстве.

Автор **ВАЛЕРИО МАРРА**

Меня вдохновляет мысль, что сложное моделирование на мощных компьютерах позволяет разрабатывать компоненты, которые лягут в основу компьютеров следующего поколения. Именно так работает компания ASML, ведущий производитель систем фотолитографии. Компания ASML производит компьютерные микросхемы, перенося чертежи микросхемы на светочувствительный слой фоторезиста, нанесенный на кремниевую пластину.

С компанией ASML работают многие крупные поставщики микросхем. Чтобы оставаться конкурентоспособными, они должны помогать своим клиентам идти в ногу с законом Мура. Оказывается, чтобы успевать за прогрессом и создавать новые поколения электронных компонентов, нужно понимать взаимосвязь разных физических эффектов, например, из гидродинамики и механики твердого тела.

Мультифизическое моделирование — незаменимый инструмент в отраслях, где требуется создание устройств с точностью до микро- и нанометра.

⇒ ВОЗМОЖНОСТИ И ПРОБЛЕМЫ В РАБОТЕ С ГЛУБОКИМ УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Чтобы создавать более высокопроизводительные микросхемы, нужно уместить большее количество транзисторов на заданной единице площади. Физические элементы становятся все меньше (рис. 1) и все более чувствительными к незначительным изменениям параметров окружающей среды, а это создает проблемы для производственного процесса. Точность существенно выросла по сравнению с предыдущими поколениями систем. Новейшие фотолитографические машины (рис. 2) используют для травления глубокое ультрафиолетовое излучение (EUV) с длиной волны 13,5 нм. «Существует прямая зависимость между длиной волны используемого света и критическим размером компонентов, которые проецируются на микросхему, — объясняет Фред Хейзинга, руководитель группы по механическому анализу. — Речь идет об элементах размером в несколько нанометров с исключительно малыми допусками».

Процесс фотолитографического травления должен проходить в полном вакууме и требует использования прецизионных воздушных подшипников, в которых вместо масла или роликов между поверхностями нагрузки используется тонкий слой сжатого газа. Эти воздушные подшипники чувствительны к микродвижениям, и очень малые изменения давления оказывают большое влияние на точность травления. «В таких системах физические испытания могут занять слишком много времени. Фактически некоторые из этих явлений настолько малы, что их трудно обнаружить или измерить,

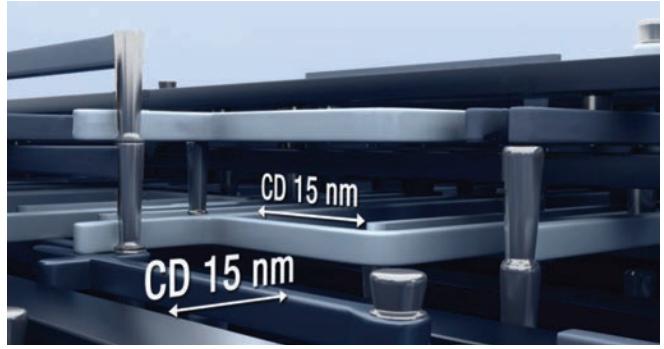


РИС. 1. Критические размеры внутри процессора для смартфона измеряются в нанометрах. Для сравнения: диаметр человеческого волоса в 5300 раз превышает критические размеры этих чипов.

так как деформации иногда имеют порядок ниже точности измерения». В этом случае единственное доступное инженерное решение — это численное моделирование.

⇒ ПОЛНЫЙ НАБОР ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ВОЗДУШНЫХ ПОДШИПНИКОВ

Хейзинга начал работать на компанию ASML после того, как 25 лет руководил инженерными разработками в автомобильной промышленности. «Для разработки и анализа наших машин требуются знания в столь разных областях физики, что мы используем множество инструментов моделирования. Существует много инструментов для анализа задач, ограниченных одним разделом физики,

например, задач термодинамики или механики». Мультифизическое моделирование в программном обеспечении COMSOL® оказалось особенно полезным, поскольку «явления в наномасштабе и сложные системы требуют анализа различных физических процессов и применения полного набора инструментов для моделирования».

Хороший пример, в котором не обойтись без мультифизического моделирования, — разработка модели воздушных подшипников (рис. 3). Модели таких подшипников важны для компании ASML, потому что в фотолитографических машинах много подвижных частей. Воздушные подшипники также обеспечивают более высокую жесткость и теплоизоляцию и не выделяют частиц из-за трения.

Однако такая точность приводит к новым проблемам.



РИС. 2. Готовая к работе система литографии компании ASML® TWINSCAN® NXE:3350B на основе глубокого ультрафиолетового излучения производит 125 компьютерных пластин в час при облучении на частоте 13,5 нм. Необходимо поддерживать идеальный вакуум при перемещении пластин на высоких скоростях и нагрузках, чтобы искажения не превышали 1 нм.

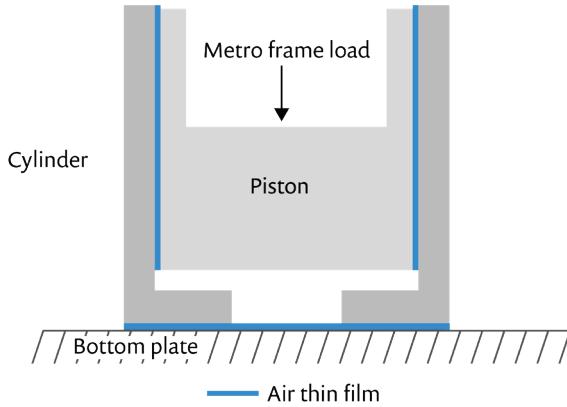


РИС. 3. Схематическое изображение воздушного подшипника в системах фотолитографии компании ASML.

Распределение давления в воздушной пленке будет локально деформировать конструкцию и влиять на ширину воздушного зазора между поверхностями компонентов подшипника. Поскольку ширина зазора изменяет поток воздуха между поверхностями, он, в свою очередь, влияет на распределение давления и опять же влияет на деформацию (рис. 4).

Задача требует полностью связанной модели взаимодействия жидкости и конструкции (FSI), которая была реализована в программной среде COMSOL. В результате разработана модель, которая помогает инженерам определять важные критерии проектирования, включая жесткость при поступательном и вращательном движении, размер зазора под нагрузкой и количество потребляемого воздуха.

Другой важный пример, который Хейзинга планирует проработать, — это модель нагрузки, действующей на пластины, когда их помещают на стол для обработки. Последующие деформации настолько малы (измеряются в нанометрах), что пластину следует моделировать как эластичное тело, которое удерживают вакуумные или электростатические держатели и на которое действуют сила тяжести, сила трения, тепловой нагрев и сила адгезии. Эти взаимодействия можно описать только как полностью связанную мультифизическую задачу. Модель поможет конструкторам оптимизировать свои разработки без трудоемкого и дорогостоящего процесса прототипирования.

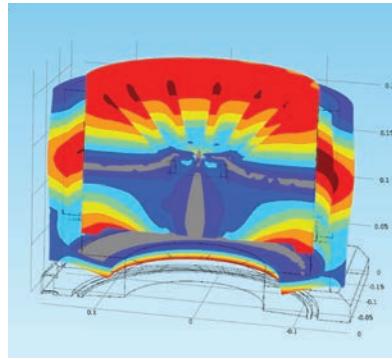


РИС. 4. Радиальная деформация цилиндра и поршня в воздушном подшипнике.

⇒ ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЕЛАЮТ СЛОЖНОЕ ДОСТУПНЫМ

Доступность так же важна, как и моделирование. Приложения для моделирования, которые выполняют большую часть рутинной или сложной работы за пользователя, увеличивают доступность программной среды даже для инженеров, разбирающихся в мультифизическом программном обеспечении. Именно здесь компании ASML полезна Среда разработки приложений COMSOL Multiphysics®. С ее помощью в компании создали приложение для расчета воздушного подшипника (Air-Bearing Calculator), которое позволяет всем сотрудникам проверять характеристики различных конструкций подшипников в компьютерной модели, не вдаваясь в подробности исходной модели (рис. 5). «Таким образом, мы не тратим сил на создание сетки, настройку анализа и постобработку», — говорит Хейзинга.

Разработка мультифизических моделей, их максимальная

возможная проверка, а также их доступность представляют особую ценность для компании ASML в программном пакете COMSOL. Стремясь повысить качество, производительность и экономическую эффективность, компании из разных отраслей промышленности, в том числе и компания ASML, создают продукты с жесткими допусками по размерам и сборки с близко расположенными деталями микронного размера. Компания ASML и фотолитографическая промышленность, несомненно, находятся во главе этого движения, но прогресс также вдохновляет и других. Мультифизическое моделирование часто может быть единственным практическим решением для инженерных задач нанометровых масштабов. ❖

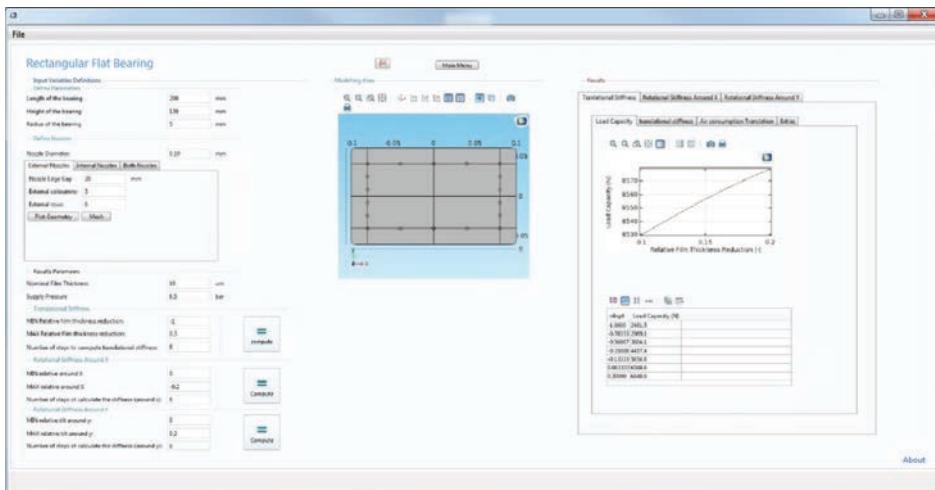


РИС. 5. В компании ASML создали приложение для расчета воздушного подшипника, в котором инженеры могут ввести размеры и другие переменные и получить результаты, не указывая параметры сетки, параметры модели и задания по постобработке.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОФАЗНЫХ ПОТОКОВ ПОМОГАЕТ ПРОЕКТИРОВАТЬ ОЧИСТНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

Инженеры компании Tauw и Совета по водным ресурсам реки Доммел используют методы вычислительной гидродинамики, чтобы снизить затраты на строительство и улучшить работу станции очистки сточных вод в городе Эйндохвен.

Автор САРА ФИЛДС

Спокойная река Доммел протекает через город Эйндохвен (Нидерланды) от бельгийской границы на юге до более крупной реки Маас на севере. По пути течения в нее попадают стоки со станции очистки сточных вод города Эйндохвен, а также из более чем 200 комбинированных переливов канализационных сетей на территории 10 муниципалитетов, через которые проходит около 170000 кубометров воды в день.

Совет по водным ресурсам реки Доммел следит за состоянием реки и ищет оптимальный баланс между желаниями людей, экологией и экономикой. Для этих целей совет запустил проект KALLISTO. Этот широкомасштабный исследовательский проект направлен на подбор экономически эффективного комплекса мер, предотвращающих падение уровня кислорода и выбросы аммиака, вызванные сочетанием биологически очищенных сточных вод со станции очистки и переливов канализационных сетей. Решение этих задач позволяет Совету соблюдать требования Рамочной директивы по водной среде и поддерживать экосистему реки Доммел.

«Предельно допустимые нормы содержания фосфатов, азота и взвешенных твердых веществ в реке снижаются и будут снижаться в будущем», — поясняет Тони Фламелинг, старший советник по водным технологиям в Совете по водным ресурсам реки Доммел. В рамках этой работы Совет по водным ресурсам ввел систему аэрации, которая повышает уровень кислорода в биологически очищенных сточных водах, прежде чем они попадают в реку. «Мы внедряем систему аэрации, чтобы защитить экосистему реки Доммел от разрушительного влияния нехватки кислорода», — объясняет Фламелинг.

На станции очистки сточных вод перед аэрацией вода подвергается предварительному осаждению, очистке в активном иле и осветлению, с помощью которых из воды удаляются питательные и твердые вещества. Чтобы свести к минимуму потребность в энергии, уровень воды поддерживается на определенной высоте, чтобы вода могла течь по всей станции (рис. 1).

Чтобы понять, как аэрация будет влиять на структуру течения, Фламелинг обратился к Ронни Бергу, консультанту,



РИС. 1. Вид сверху на станцию очистки сточных вод города Эйндохвен.

специализирующемуся на технологиях очистки воды и управлении водными ресурсами в компании Tauw.

«Если высота уровня воды в сточном канале слишком низкая, перенос кислорода неэффективен. С другой стороны, если уровень воды слишком высок, то существует опасность перелива из аэрационного канала обратно в осветлитель, что приведет к загрязнению оттока», — поясняет Берг (рис. 2).

Еще одна потенциальная проблема — это слишком низкий уровень воды, который может

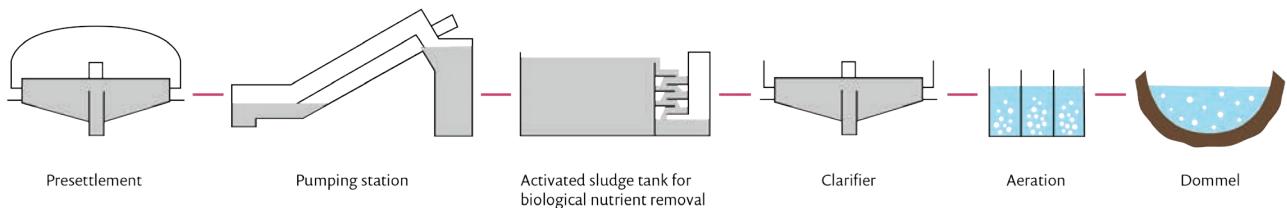


РИС. 2. Схема стадий водоочистки на станции очистки сточных вод города Эйндохвен. Аэрация выполняется после осветления, непосредственно перед повторным впуском очищенной воды в реку Доммел.



РИС. 3. Вид на регулируемую плотину на выходе из канала аэрации.

быть недостаточным для процесса очистки. Зная профиль потока в сточном канале и связанном с ним водосбросном канале, члены Совета могут решить, как лучше всего оптимизировать систему для максимальной аэрации.

⇒ ПУЗЫРЬКИ: ХОРОШО ДЛЯ РЫБЫ, ПЛОХО ДЛЯ ТЕЧЕНИЯ?

Чтобы полностью изучить влияние аэрации и плотин (рис. 3) на профиль потока и уровень воды, Берг обратился к мультифизическому моделированию гидродинамики с помощью программного обеспечения COMSOL Multiphysics®.

Зная, что существующий канал будет модернизирован для аэрации, Берг создал геометрию сточного канала (рис. 4), включая стены, существующие направляющие экраны и запланированное расположение элементов аэрации.

Чтобы определить параметры системы, Берг экспериментировал с разными вариантами расположения аэрационных установок, высотой различных участков регулируемой плотины и уровнем воды в реке Доммел. Таким образом он мог понять, стоит ли сохранять существующие направляющие экраны, а также выяснить, как будет изменяться профиль потока в зависимости от уровня аэрации, времени года и уровня воды в реке Доммел.

Берг разработал модель потока жидкости с учетом турбулентного режима и наличия пузырьков воздуха. Используя интерфейс Bubbly flow, k-epsilon (Аэрированный поток, k-ε модель), доступный в программном пакете, Берг смог определить влияние аэрации на профиль потока. Моделируя вызванную пузырьками турбулентность и отслеживая эффективную плотность газа, он смог проанализировать дополнительное сопротивление, создаваемое пузырьками, и индуцированный спиральный поток в канале.

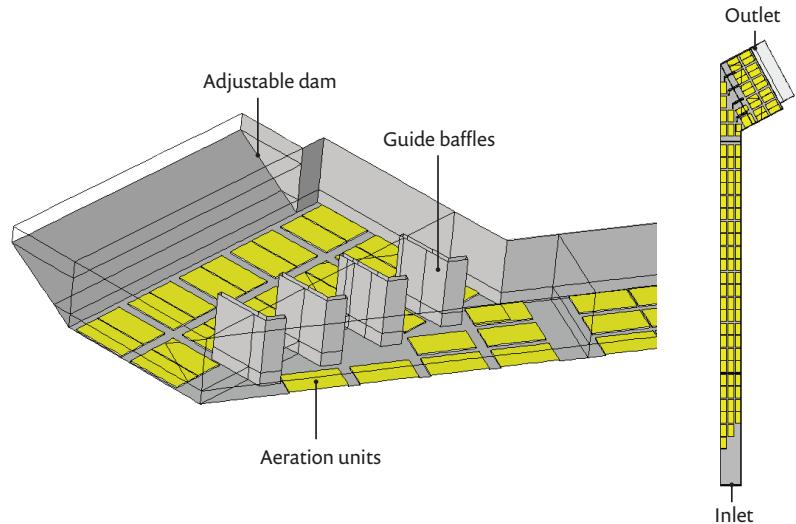


РИС. 4. Геометрия канала аэрации. Аэрационные установки отмечены желтым цветом.

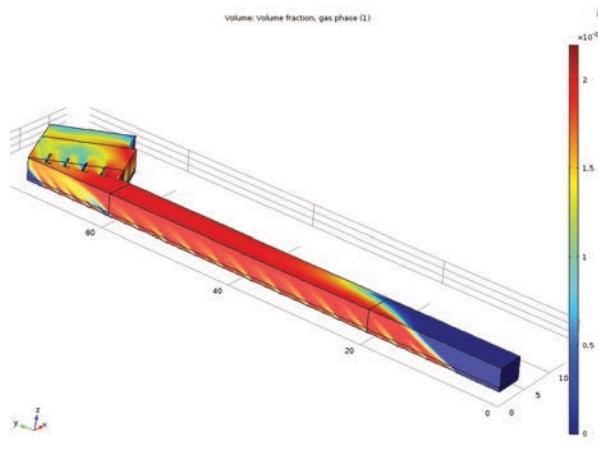


РИС. 5. Результаты численного гидродинамического моделирования, показывающие объемную долю газовой фазы в случае высокого уровня воды в реке Доммел.

В серии испытаний с помощью модуля CFD (Вычислительная гидродинамика) Берг исследовал влияние уровня воды в реке Доммел на профиль потока. Он также смог определить объемную долю газа в любой точке вдоль всего канала, что позволило понять, насколько эффективна система аэрации (рис. 5). Берг также оценил работу виртуальной аэрационной установки в сухую погоду, когда уровень воды в реке Доммел низкий. В случае низкого расхода все секции регулируемой плотины находятся на месте, что приводит к появлению обратного потока (рис. 6).

По результатам анализа профиля потока

с различными уровнями воды, высотой плотин и уровнем аэрации Берг в конечном итоге сделал несколько выводов. Он выяснил, что в случае высоких скоростей потока сточных вод аэрация незначительно влияет на структуру течения. При сухой погоде аэрация существенно влияет на профиль потока. Сопротивление,

«С помощью моделирования можно контролируемым образом регулировать параметры, что позволило нам найти наилучшее проектное решение до строительства. Это самым экономичным способом повышает качество воды, выходящей со станции очистки сточных вод города Эйндохвен.»

— РОННИ БЕРГ, КОНСУЛЬТАНТ КОМПАНИИ TAUW

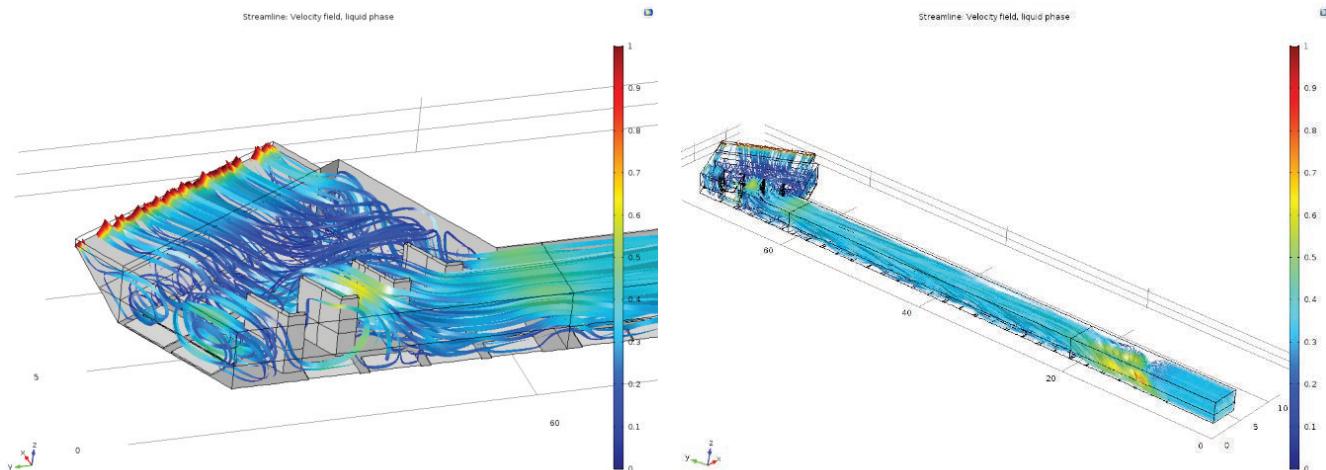


РИС. 6. Результаты численного гидродинамического моделирования, показывающие поле скоростей потока очищенной воды через систему аэрации в случае сухой погоды.



РИС. 7. Канал аэрации станции очистки сточных вод города Эйндховен в процессе эксплуатации, когда сточные воды насыщаются кислородом перед попаданием в реку Доммел. Слева: вид на регулируемую плотину на выходе из канала аэрации. Справа: вид на канал аэрации на входе.

создаваемое аэрацией, относительно невелико, что снижает риск попадания воды в осветлитель и риск загрязнения оттока.

Берг также исследовал эффект активации двух из трех секций регулируемой плотины. При использовании только двух секций поток был значительно выше во внешнем изгибе. Из-за этого вода застаивалась вблизи внутреннего изгиба, и эффективность аэрации падала. В целом лучший профиль потока соответствовал активации всех трех секций.

⇒ МОДЕЛИРОВАНИЕ — ИСТОЧНИК ДАННЫХ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ

Основываясь на результатах своего всестороннего вычислительного гидродинамического анализа, Берг рекомендовал Совету по водным ресурсам

реки Доммел не снимать направляющие экраны. Он также рекомендовал размещать элементы аэрации вверх по течению в линейной конфигурации, чтобы минимизировать затраты на строительство и обеспечить соответствие требованиям к качеству воды.

«С помощью моделирования можно контролировать устанавливаемые параметры, и это позволило нам найти наилучшее проектное решение до начала строительства, — говорит Берг. — Это самый экономичный способ повысить качество воды, выходящей со станции очистки сточных вод города Эйндховен». Рабочая система аэрации показана на рис. 7. «Как и ожидалось, система аэрации улучшает экосистему реки», — говорит Фламелинг. В ближайшие годы грамотно разработанная аэрационная установка будет поддерживать экосистему и обслуживать людей, живущих в бассейне реки Доммел. ❖



Ронни Берг, компания Tauw



Тони Фламелинг, Совет по водным ресурсам Эйндховена

МУЛЬТИФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ОБЛАСТИ БИОФАРМАЦЕВТИКИ

В компании Amgen используется набор разнообразных приложений для мультифизического моделирования, чтобы оптимизировать и улучшить рабочие процессы, а также обеспечить безопасность и эффективность лекарственных препаратов.

Автор **ЗАК КОНРАД**

В биофармацевтической промышленности приходится иметь дело с разнообразными лекарственными формами, различными функциями и этапами коммерциализации лекарств, поэтому необходимы разные инструменты моделирования, охватывающие широкий спектр вопросов и предлагающие продуманные методы решения конкретных задач.

Один из инструментов компании Amgen, ведущей биофармацевтической компании мирового масштаба, — мультифизическое моделирование, позволяющее обеспечить эффективность и безопасность лекарств на каждом этапе их производства. Миллионы людей по всему миру, страдающие серьезными заболеваниями, получают лекарства, произведенные этой компанией. Но за каждым лекарством стоит кропотливая работа, и компания Amgen использует разнообразный набор моделей процессов, чтобы повысить качество производства. В отрасли, где моделирование процессов более распространено, чем моделирование продуктов, такой набор моделей является ключевым. Пабло Роланди, директор по разработке процессов в компании Amgen, наблюдал за тем, как его работники использовали пакет COMSOL Multiphysics® в моделировании. «Программный пакет COMSOL — это зрелая платформа с современными принципами разработки, — объясняет Роланди. — Благодаря логичному и простому в использовании графическому интерфейсу, а также возможностям физического и мультифизического моделирования мы можем создавать разнообразные инструменты». Роланди и его

группа решают задачи, возникающие на этапе разработки, с помощью мультифизического моделирования. Во многих случаях эти решения отражаются также в приложениях для моделирования, которые можно создавать непосредственно из модели с помощью Среды разработки приложений. Благодаря отдельному пользовательскому интерфейсу специалисты могут получать аналитические результаты посредством моделирования, даже если они не являются экспертами в этой области. За последние полтора года были созданы хорошо организованные, простые и легко разворачиваемые пакеты приложений, помогающие компании в разработке процессов, эксплуатации и научно-исследовательской работе.

⇒ УСТРАНЕНИЕ «УЗКИХ МЕСТ» В ПРОИЗВОДСТВЕ

Оптимизация процесса сушки — отличный пример того, как группа Роланди разработала

специальное приложение, чтобы устранить проблему в рабочем процессе. Этот случай был связан с переносом производственного процесса по получению низкомолекулярного лекарственного вещества с предприятия контрактной производственной организации на завод компании Amgen в Сингапуре. Было выяснено, что сушка и отделение, выполняемые в фильтровальной сушилке с перемешиванием в процессе, аналогичном представленному на рис. 1, являются потенциально «узким местом» в производстве. Естественно, «узкое место» может представлять существенный риск для удовлетворения спроса на продукцию, поэтому Роланди и его группа решили смоделировать сушку и оптимизировать процесс. Поскольку контрактная организация использовала другой тип сушилки для первых трех этапов процесса (см. рис. 1), у них не было достаточных данных о характеристиках этого типа отделения, и они не могли создать точную модель и определить,

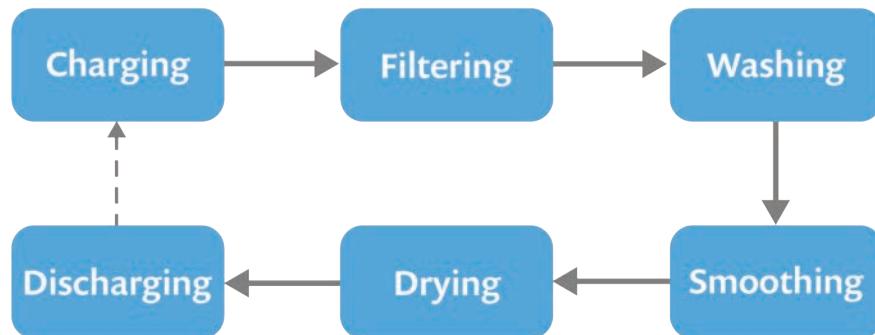


РИС. 1. Основные этапы типичного процесса периодического фильтрования и сушки для получения, или физического отделения, химического вещества.

как изменившиеся условия процесса повлияют на результат.

Были известны свойства материалов, геометрические параметры оборудования, а также условия эксплуатации, в том числе содержание влаги, температура, давление и параметры перемешивания. Однако Роланди все же необходимо было определить два критических фактора: скорость испарения и коэффициенты диффузии в новой фильтровальной сушилке с перемешиванием. Для этого был собран обширный набор данных и с помощью мультифизического моделирования вручную были оценены параметры регрессии, описывающие модель. После этого было создано и развернуто приложение для моделирования, вычисляющее время высыхания; его использовали инженеры-технологи, которые меняли производственные площадки на базовом этапе. Это приложение сыграло важную роль: конечные пользователи смогли наблюдать за влиянием изменившихся условий работы, как показано на рис. 2. В конечном счете было обнаружено, что перемешивание и применение нагревательной плиты сокращают время высыхания, что помогает устранить ограничения системы и повысить эффективность.

⇒ СОБЛЮДЕНИЕ СТАНДАРТОВ СТЕРИЛИЗАЦИИ

В другой ситуации одна из производственных групп компании Amgen столкнулась с проблемой стерилизации. Препараты с завода-изготовителя транспортировались в первичных контейнерах. Как правило, это флаконы, и их необходимо стерилизовать в соответствии с определенным стандартом, так как бактерии в лекарственных препаратах могут нести огромные риски для здоровья. Однако стандартный протокол стерилизации, основанный на диффузионном переносе этиленоксида, не соответствовал требованиям к новым контейнерам.

Естественно, процесс стерилизации необходимо было откорректировать, но, вместо того чтобы проводить неоправданные эксперименты и дорогостоящие итерации методом проб и ошибок, Роланди и его группа приступили к моделированию процесса диффузии этиленоксида во флаконах.

Приложение позволяет выбирать границы проникновения и загрязнения, вводить входную растворимость и константы диффузии, чтобы рассчитывать нестационарные профили концентрации этиленоксида (рис. 3). Инженеры-технологи могли использовать приложения, чтобы определять, достаточно ли концентрация этиленоксида для требуемого уровня стерилизации. В результате экспериментальная часть была либо сокращена, либо полностью исключена, что позволило ускорить разработку

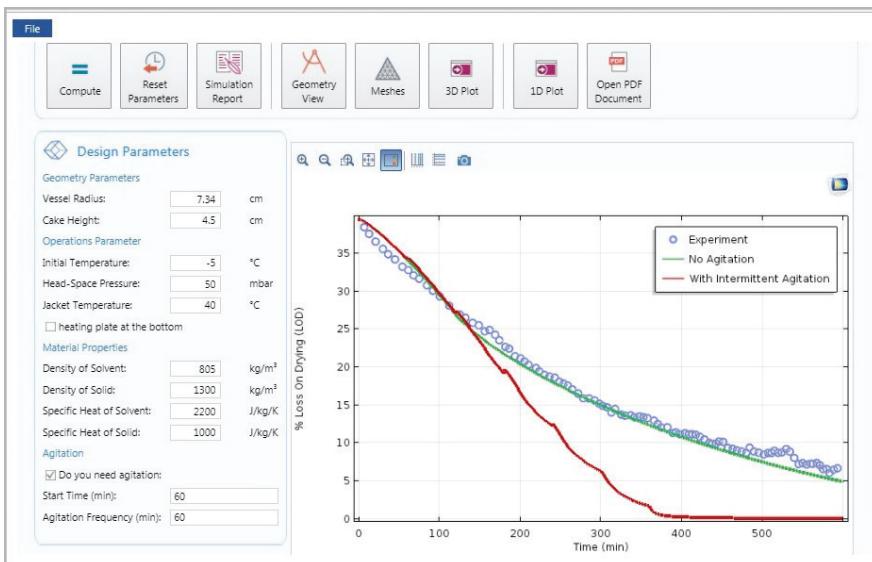


РИС. 2. Приложение для моделирования, которое вычисляет время высыхания для моделей без перемешивания (зеленый) и с прерывистым перемешиванием (красный) и сравнивает их с экспериментальными данными.

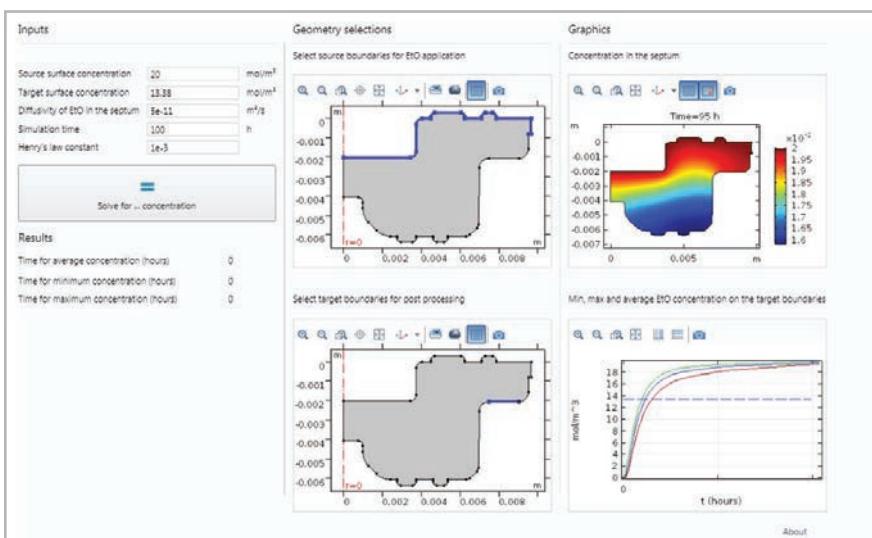


РИС. 3. Данное приложение для процесса стерилизации рассчитывает концентрацию этиленоксида.

на несколько месяцев. «В конце концов оказалось, что создавать приложения для моделирования намного эффективнее», — говорит Роланди.

⇒ ЗА ПРЕДЕЛАМИ МОДЕЛИРОВАНИЯ

«Я думаю не только о моделировании, но и о разработке и интеграции самых продвинутых приложений и методов», — говорит Роланди. — Я полагаю, что перед нами стоит стратегическая задача, и мы только начинаем». Одна из его целей — включить в модели компании фактор неопределенности данных. На практике параметры редко

известны точно, а рабочие условия меняются. Если учесть эти вариации в модели, результаты и их интерпретация в конкретной задаче станут более надежными.

Например, Роланди и его группа работают над автоинжектором — устройством, которое вводит лекарство пациенту без участия врача. Критический параметр инъекций — время доставки; его нужно контролировать очень точно, чтобы назначенный препарат действовал как надо. Проблема в том, что время доставки зависит от ряда факторов с различной степенью неопределенности, включая геометрию контейнера, вязкость и объем лекарственного средства, жесткость инжектора и коэффициенты трения поршня.

Если неопределенность в этих факторах не учитывается, то невозможно рассчитать дисперсию времени доставки без информации о том, насколько точно можно управлять временем доставки. При моделировании процесса особенно ценно получить распределение вероятностей ожидаемых результатов для лучшего понимания работы системы.

Чтобы лучше понять, как неопределенность этих параметров накапливается, Роланди и его группа использовали мультифизическое моделирование, с помощью которого провели глобальный анализ чувствительности и точно рассчитали влияние вариативности факторов. Анализ определяет индекс чувствительности для каждого параметра: дробное число, которое характеризует разброс целевой переменной в ответ на изменение параметра. Было обнаружено, что вязкость продукта, коэффициенты жесткости и геометрия иглы объясняют 90% дисперсии времени введения, и это позволило существенно упростить модель. Поскольку лишь несколько параметров значительно влияют на время впрыскивания, составление продуманных технических заданий для поставщиков компонентов серьезно облегчает управление неопределенностью и риском.

Подобно другим решениям, модель времени впрыскивания стала частью удобного и легко развертываемого приложения для моделирования. В приложении, показанном на рис. 4, пользователи могут задавать распределения, проводить анализ неопределенности и чувствительности, создавать автоматизированные отчеты и просматривать документацию по модели. Приложение сэкономило средства и время, а также позволило эффективнее управлять неопределенностью на протяжении всего процесса.

⇒ РАЗВЕРТЫВАНИЕ ПРИЛОЖЕНИЙ

Компания Amgen также использует локальную версию программы COMSOL Server™ для повышения доступности приложений для своих сотрудников. «Мы хотим, чтобы все в компании Amgen пользовались набором наших приложений, — говорит Роланди. — Я горжусь тем, что на данный момент сотрудники компании используют около дюжины приложений. Это стало возможным благодаря пакету COMSOL». С помощью сервера COMSOL

«Я горжусь тем, что на данный момент сотрудники компании используют около дюжины приложений. Это стало возможным благодаря пакету COMSOL.»

— ПАУЛО РОЛАНДИ, ДИРЕКТОР ПО РАЗРАБОТКЕ ПРОЦЕССОВ КОМПАНИИ AMGEN

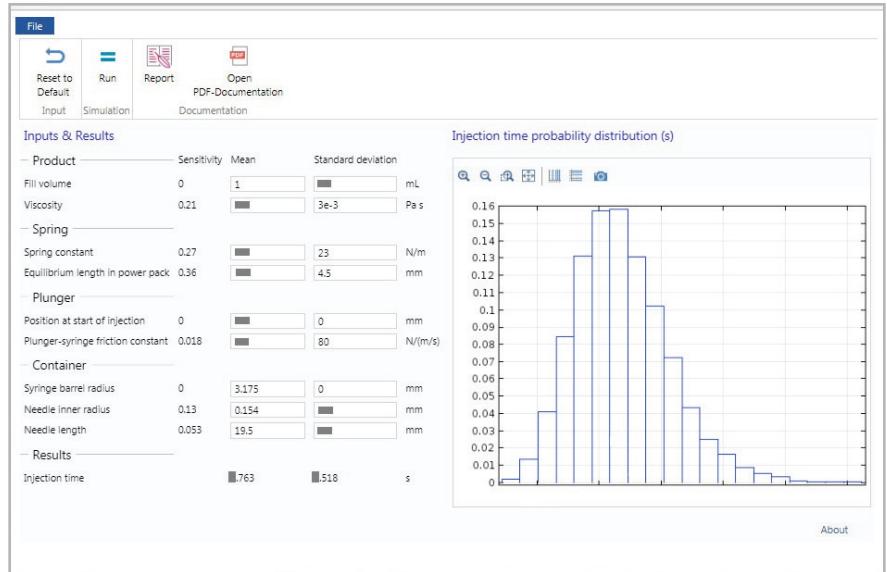


РИС. 4. Приложение для моделирования автоинъектора, которое показывает распределение вероятности времени впрыскивания. Конфиденциальные данные скрыты.

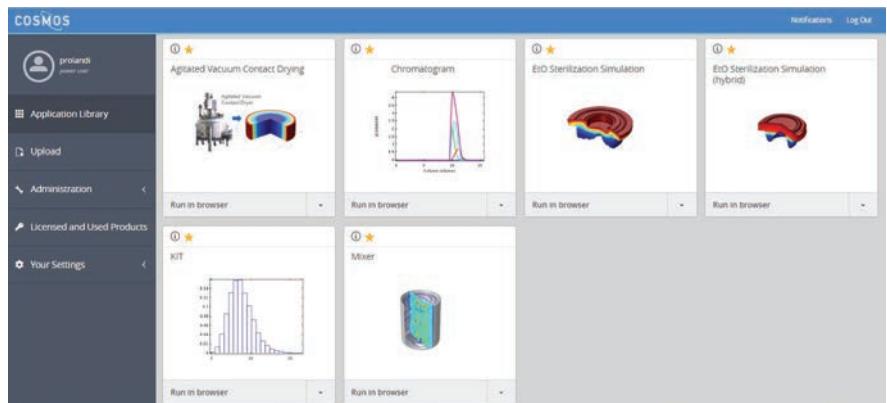


РИС. 5. Компания Amgen запатентовала свою библиотеку COMSOL Server, назвав систему COSMOS.

Server развертывание приложений упростилось, а управление жизненным циклом стало более эффективным. Пользователи могут просто войти в систему через веб-браузер, чтобы получить доступ к библиотеке приложений, разработанной группой Роланди. Также планируется усложнить систему, отказавшись от ручного ввода и рассматривая модели пакета COMSOL в качестве «вычислительного ядра». С помощью передовых алгоритмов этим моделям можно найти другое применение в инновационных исследованиях, что

ознаменовало бы важный шаг в использовании моделирования на уровне предприятия в целом и принесло бы выгоду многим пользователям и заинтересованным сторонам. ❖



Пауло Роланди, директор по разработке процессов компании Amgen

ОБЛЕГЧЕННЫЕ КОНСТРУКЦИИ ИЗ АЛЮМИНИЯ: ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОРРОЗИИ ПОМОГАЮТ СОЗДАВАТЬ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫЕ РЕШЕНИЯ

Ученые Национального исследовательского совета Канады (NRC) используют приложения для мультифизического моделирования, чтобы рассчитать и снизить риск гальванической коррозии в новых конструкциях, а также ускорить переход на алюминий в производстве легковых автомобилей.

Автор **САРА ФИЛДС**

Вес автомобилей уменьшается, поскольку производители и потребители озабочены проблемами эффективности автомобилей и охраной окружающей среды. Уменьшение веса транспортного средства на одну десятую может повысить его топливную эффективность на целых 8%. Для этого производители должны сочетать обычные материалы для автомобильных конструкций и корпусов, такие как конструкционная сталь, с более легкими материалами. Основным кандидатом на эту роль — алюминий (рис. 1): плотность алюминия в три раза меньше плотности стали, он стоек к воздействию атмосферы, его легко перерабатывать, алюминию легко придать

нужную форму, а также он выдерживает ударные нагрузки.

Однако разработка транспортного средства, сочетающего сталь и алюминиевые сплавы, сопряжена со многими проблемами. Среди основных проблем — разработка экономически эффективных технологий массового производства; создание многокомпонентной сборки с использованием алюминия для деталей, изначально спроектированных под другие материалы; уменьшение риска гальванической коррозии (рис. 2) при контакте различных металлов в присутствии электролита, например, противобледенительных солей, применяемых на дорогах.



РИС. 1. Алюминиевый сплав, полученный с помощью литья под высоким давлением (HPDC).

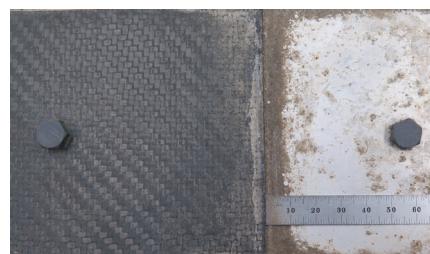


РИС. 2. Вверху: гальваническое коррозионное повреждение на перекрытии в многокомпонентной сборке, выполненной из армированного углеродным волокном полимера (CFRP) и алюминиевого сплава серии 6000, после одного года эксплуатации на транспортном средстве. Внизу: типичное положение образцов на транспортном средстве для проведения эксплуатационных испытаний.



Слева направо: Ричард Менини, Марио Патри, Сэнди Лаплант, Амели Рюст, Марк-Оливье Ганье, Аксель Гамбу-Боска, Филипп Трембле, Стефан Симар, Даник Галлан и Альбан Морель из Национального исследовательского совета Канады (NRC), Центр технологии алюминия.

Даник Галлан, технический руководитель в области исследований коррозии, проводимых Исследовательским центром автомобильного и наземного транспорта Национального исследовательского совета Канады (NRC), оказывает поддержку компаниям в разработке коррозионно-стойких компонентов и сборки.

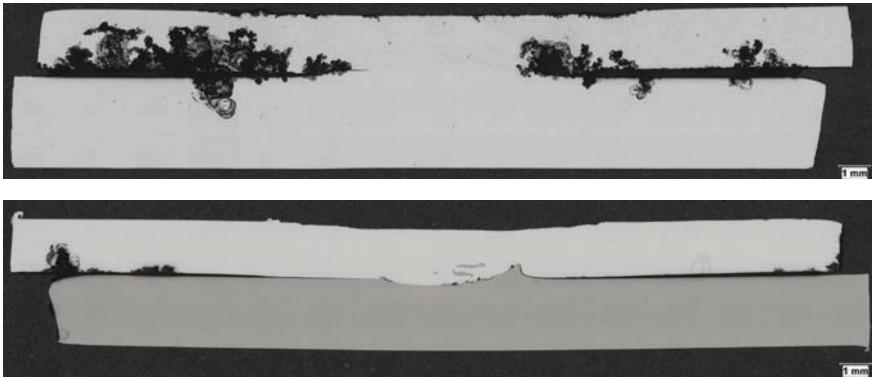


РИС. 3. Поперечное сечение многокомпонентной сборки, полученной с помощью ротационной сварки трением (FSW), после дорожных испытаний протяженностью 100 000 км между колесом и брызговиком. Вверху: основной механизм щелевой коррозии в FSW-сборке из алюминиевых сплавов серии AA7000 и серии AA6000. Внизу: основной механизм гальванической коррозии в FSW-сборке из алюминиевого сплава серии AA5000 и нержавеющей стали серии 300.

Даже при создании отдельного соединения промышленность сталкивается с проблемами, связанными с различными типами коррозии, такими как щелевая и гальваническая коррозия (рис. 3). Национальный исследовательский совет Канады (NRC) и его научно-исследовательская объединенная группа по алюминию ALTec (рис. 4) работают над расширением использования алюминия в качестве легкого материала, а также помогают транспортной промышленности реализовать практические решения этих проблем.

Компании, входящие в группу ALTec, ведут бизнес в различных областях, но исследования процессов коррозии привлекают внимание всех членов группы. Способность прогнозировать коррозию сборки имеет решающее значение; производители алюминиевых листов должны быть уверены, что их продукт используют правильно и требования к надежности сборки будут выполнены. Производителям, в свою очередь, необходимо гарантировать хорошие рабочие характеристики и высокую долговечность автомобилей.

⇒ КАК ИЗБЕЖАТЬ ГАЛЬВАНИЧЕСКОЙ КОРРОЗИИ

Существуют некоторые общие правила, которым проектировщики автомобилей могут следовать, чтобы уменьшить гальваническую коррозию. Например, (1) не использовать катод и анод сильно отличающихся размеров, (2) следовать схеме гальванической совместимости материалов, (3) избегать прямого контакта между разнородными металлами и (4) окрашивать оба материала, находящиеся в контакте, или только катод, но не только анод. Однако на практике применение каждого из этих правил может оказаться невозможным. Например, при использовании механических крепежных элементов, которые все чаще

используются в сборках из разнородных материалов, сложно избавиться от контакта между двумя металлами.

Физические испытания, которые включает в себя эксплуатацию в рабочих условиях на дороге, циклическую коррозию и электрохимические испытания, по-прежнему необходимы, чтобы понять поведение более сложных систем. На изучение различных



РИС. 4. Члены (слева) и партнеры (справа) научно-исследовательской объединенной группы по алюминию ALTec (по состоянию на 19 марта 2018 года).

воздействий в процессе эксплуатации автомобиля уходит много времени и денег; стандартные процедуры циклической коррозии переоценивают риски гальванической коррозии, а электрохимические испытания трудно интерпретировать, если в сложную геометрию входит несколько материалов.

Исследователи обнаружили, что мультифизическое моделирование — лучший вариант, позволяющий объединить результаты физического тестирования, решить задачи проектирования до создания полномасштабного физического прототипа и ускорить разработку коррозионно-устойчивой конструкции.

⇒ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОРРОЗИИ В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СБОРКАХ

Галлан и его группа используют результаты эксплуатационного тестирования, циклической коррозии и электрохимических испытаний, полученные при использовании пакета COMSOL Multiphysics®, для создания гибких математических моделей, способных рассчитывать коррозионные явления. «Для создания виртуальных прототипов, которые описывают то, что происходит

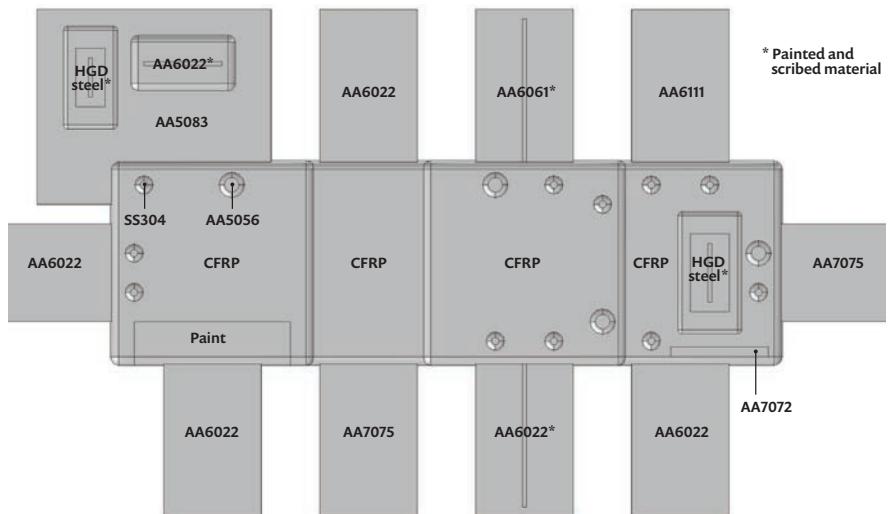


РИС. 5. Многокомпонентная сборка, показывающая, что численное моделирование коррозии позволяет заранее обнаруживать ненадлежащие конструкции.

в реальной жизни, разработанные модели откалиброваны с помощью серии датчиков, установленных на транспортных средствах», — объясняет Галлан. У группы есть доступ к высококачественным данным, из которых можно извлечь полезную информацию, а также опыт использования сложных процедур анализа данных и моделей машинного обучения. Учитывается каждый набор данных, в том числе температура поверхности под транспортными средствами, продолжительность воздействия влаги, состав и проводимость противобледенительных солей, нанесенных на поверхность транспортных средств, скорость транспортного средства и GPS-координаты.

В начале проекта Галлан рассмотрел различные программные пакеты для моделирования коррозии. Он обнаружил, что программное обеспечение COMSOL® позволяет ему задавать и контролировать все свойства модели, а не работать с ней, как с «черным ящиком», в котором есть контроль над входными данными, но природа внутренних вычислений остается скрытой, а возможность воздействия на них

отсутствует. «В программном пакете COMSOL можно импортировать геометрию из другого программного обеспечения и моделировать различные типы коррозии, тестируя разные гальванические комбинации. На основании этой информации можно заключить, геометрию каких конструкций нужно изменить, прежде чем перейти к созданию физического прототипа», — объясняет Галлан.

В качестве примера исследования и в качестве лабораторной демонстрации для потенциальных клиентов Национального исследовательского совета Канады (NRC) Галлан и его группа создали сложную сборку из более чем 10 различных материалов и покрытий (рис. 5). Коррозионные повреждения, возникающие во время интенсивного четырехдневного лабораторного испытания, хорошо согласуются с результатами моделирования. Это показывает, насколько точно модели коррозии, созданные Национальным исследовательским советом Канады (NRC) на основе пакета COMSOL Multiphysics, описывают явления коррозии в сложной сборке из разнородных материалов.

«В программном пакете COMSOL можно импортировать геометрию из другого программного обеспечения и моделировать различные типы коррозии, тестируя разные гальванические комбинации. На основании этой информации можно заключить, геометрию каких конструкций нужно изменить, прежде чем перейти к созданию физического прототипа.»

— ДАНИК ГАЛЛАН, ТЕХНИЧЕСКИЙ РУКОВОДИТЕЛЬ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА АВТОМОБИЛЬНОГО И НАЗЕМНОГО ТРАНСПОРТА

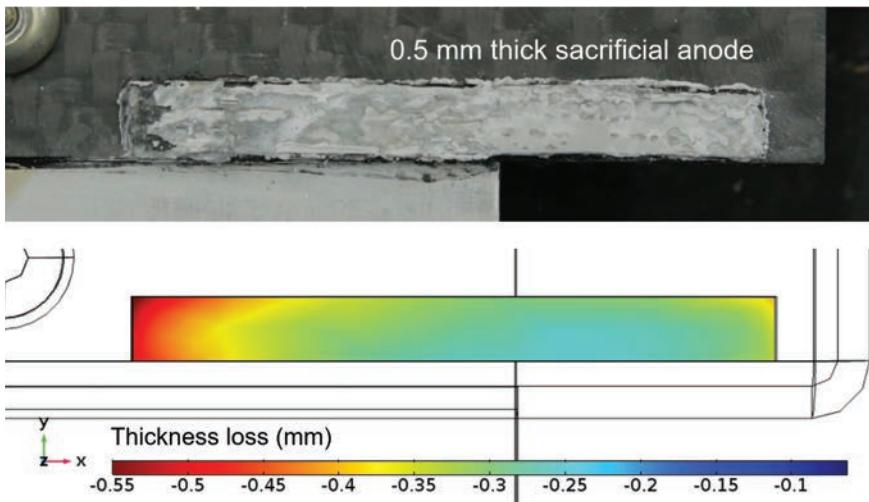


РИС. 6. Нестационарное исследование (внизу), используемое для расчета уменьшения толщины защитного анода во время лабораторных испытаний (вверху).

Для расчета уменьшения толщины защитного анода в ходе лабораторных испытаний (рис. 6) проводились нестационарные исследования в программном обеспечении COMSOL Multiphysics. Результаты эксперимента и результаты моделирования хорошо согласуются. Как видно из экспериментальных данных и результатов моделирования, растворение алюминиевой заклепки замедляется с левой стороны, поскольку рядом с ней расположены более крупные и более активные алюминиевые компоненты (рис. 7). С правой стороны заклепка корродирует из-за присутствия благородного материала из углепластика (CFRP). Группа опять обнаружила, что результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными.

⇒ ПРИЛОЖЕНИЯ ОБЕСПЕЧИВАЮТ ПРОРЫВ В МОДЕЛИРОВАНИИ

После выполнения численных расчетов Галлан с помощью Среды разработки приложений пакета COMSOL Multiphysics создает приложение для моделирования, которое могут использовать коллеги из Национального исследовательского совета Канады (NRC) и группы ALTec. Используя локальную версию сервера COMSOL Server™ (рис. 8), он может быстро развертывать приложения через веб-интерфейс, управлять профилями пользователей, добавлять индивидуальный фирменный стиль и обмениваться

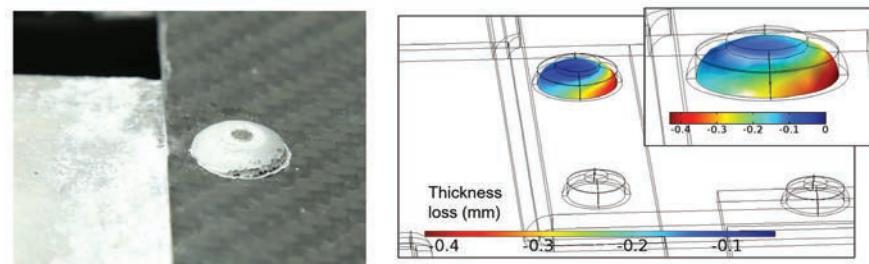


РИС. 7. Нестационарный анализ (справа) растворения алюминиевой заклепки (слева).

обновлениями, когда это необходимо. Его коллеги и клиенты могут в любое время получить доступ к приложениям через браузер, введя свои учетные данные.

Пример приложения для моделирования, используемого для расчета гальванической коррозии, которая будет происходить в сложной многокомпонентной сборке, показан на рис. 9. Пользователь приложения может выбрать компоненты сборки, определить толщину электролита, задать конвекцию и температуру. При запуске приложения пользователь может отобразить потенциал электролита, плотность тока и изменение толщины электрода. Индивидуальные файлы результатов также можно экспортировать для дальнейшего анализа данных с помощью скриптов для пакетов MATLAB® или RStudio®, написанных в Национальном исследовательском совете Канады (NRC) и приспособленных к требованиям заказчиков.

Приложения также облегчают общение между инженером, ответственным за работу всего транспортного средства, и специалистом по коррозии. До появления приложений инженеры могли не понимать всех преимуществ изменения геометрии или замены материала, если нововведение отличалось от привычных им изменений или требовало больших затрат. Но с появлением приложений специалист по коррозии может дать более четкое обоснование инженерам и ясно объяснить, где и почему возникает коррозия. «На следующем шаге мы дадим члену группы ALTeс возможность выбрать в приложении положение сборки внутри транспортного средства, что позволит им лучше описать электролит в модели, а также даст более удобный инструмент расчета. Возможности, предлагаемые сервером COMSOL, почти бесконечны, и его гибкость позволяет легко адаптироваться к требованиям конкретных клиентов», — объясняет Галлан.

⇒ ПОБЕДА В ГОНКЕ ЗА ЛЕГКИМИ МАТЕРИАЛАМИ

Благодаря мультифизическому моделированию и имеющимся приложениям стало легче выбирать нужные материалы и геометрию на протяжении всего процесса проектирования, что значительно облегчает переход на алюминий при проектировании облегченных конструкций. Группа Национального исследовательского совета Канады и их промышленные партнеры смогут находить инновационные решения в сфере производства алюминия, приближая переход на алюминий в качестве легкого материала для автомобилей. ❖

Эл. адрес: Danick.Gallant@cnrc-nrc.gc.ca

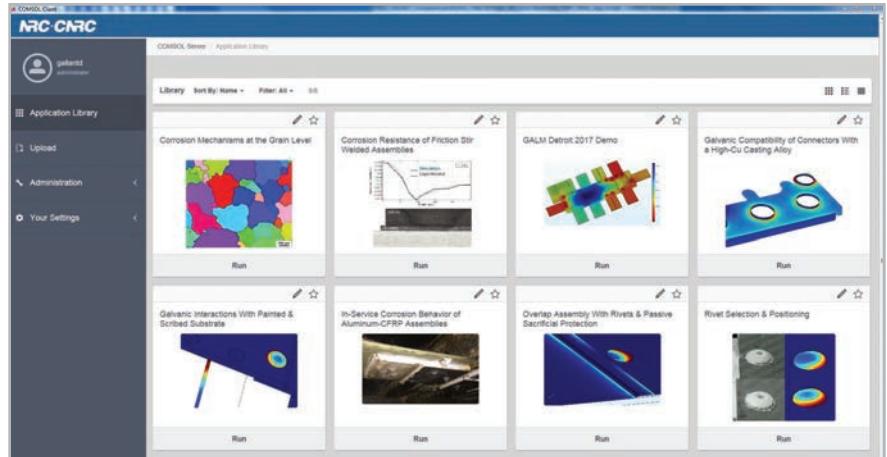


РИС. 8. COMSOL Server™ с корпоративным брендингом NRC, доступ к которому осуществляется через веб-браузер.

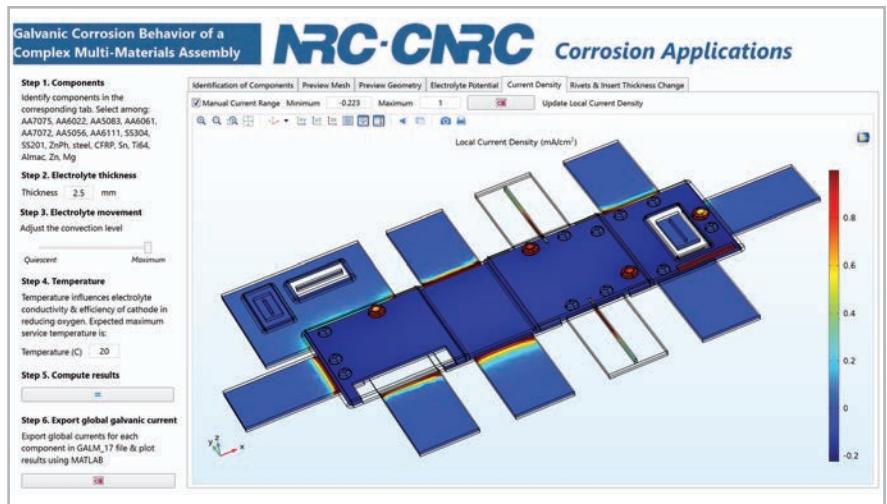
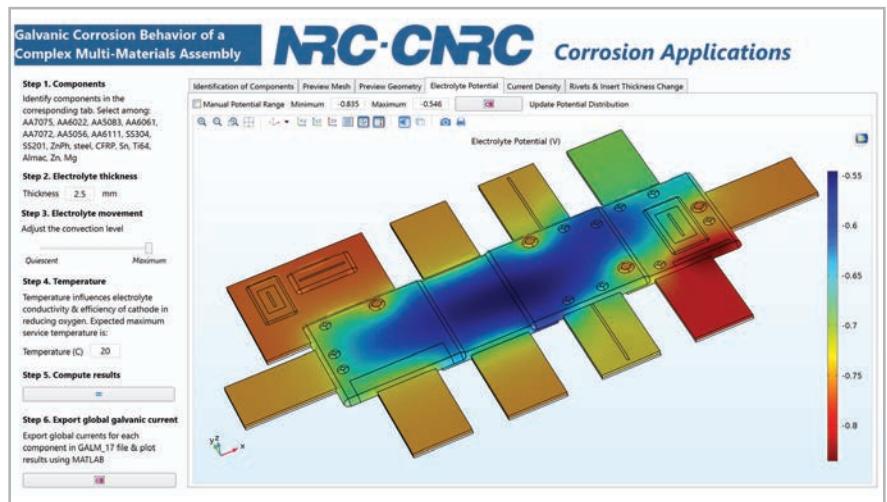


РИС. 9. Приложение для моделирования гальванической коррозии сложной многокомпонентной сборки. Вверху: визуализация потенциала электролита в сборке. Внизу: визуализация плотности тока в сборке.

Магнитные муфты увеличивают срок службы прибрежных ветряных электростанций

В компании Sintex мультифизическое моделирование используется для разработки и анализа бесконтактных магнитных муфт. Такие системы очень надежны, в них используется принцип разделения материалов, и их можно применять в прибрежных ветряных турбинах и химических насосных станциях.

Автор **ЗАК КОНРАД**

Независимо от того, имеем ли мы дело с автомобильным двигателем, ветряной турбиной или таким простым устройством, как наручные часы, во всех этих устройствах происходит преобразование крутящего момента и передача вращательной мощности.

Обычно передача осуществляется посредством ряда механических шестеренок или валов, расположенных на одной оси, которые передают крутящий момент и, следовательно, мощность. Но у механической передачи есть свои ограничения: чувствительность к трению, износу и перегрузке из-за постоянного контакта. И чем более суровыми являются условия окружающей среды, тем более серьезными сдерживающими факторами могут оказаться эти ограничения. В труднодоступных местах с суровыми условиями заменить вышедшее из строя муфту сложно и чрезвычайно дорого.

⇒ ПЕРЕДАЧА МОЩНОСТИ БЕЗ ТРЕНИЯ

Инженеры компании Sintex занимаются разработкой альтернативной инновационной технологии, которая обеспечивает прочность и надежность: речь идет о магнитных муфтах. Принцип действия этих муфт заключается в том, что передача мощности осуществляется с помощью магнитных, а не механических сил, что исключает контакт и износ, а также значительно увеличивает срок службы системы. Мощность передается посредством взаимосвязи крутящих моментов двух концентрических массивов постоянных магнитов (рис. 1). Источник питания заставляет один привод вращаться, при этом другой будет вращаться с той же скоростью благодаря взаимодействию магнитных полей. Эта система позволяет передавать энергию вращения так же, как и в механических передачах, но без трения и риска перегрузки. Если крутящий

момент, передаваемый от двигателя, слишком велик, муфта будет препятствовать приложению чрезмерных сил к валу. Это ограничение предотвращает превышение крутящего момента, приложенного к валу, что обеспечивает работу в оптимальных условиях.

Бесконтактные магнитные муфты от Sintex идеально подходят для компаний, использующих прибрежные ветряные турбины и работающих со сложными насосными системами. Ветряные электростанции становятся все важнее в производстве электроэнергии, но требуют высокого уровня надежности деталей, так как комплектующие трудно ремонтировать. В отдельных турбинах магнитные муфты передают энергию от двигателя к водяным насосам, которые круглосуточно охлаждают электрические компоненты. Поскольку эти системы расположены достаточно далеко от берега, их профилактическое обслуживание или ремонт трудоемки и дороги, поэтому надежность магнитных муфт становится ценным преимуществом. Кроме того, в воздушный зазор между приводами легко помещается сепаратор (рис. 2), что позволяет разделить материалы и использовать закрытые системы в химической и пищевой промышленности. Полностью герметичные системы откачки имеют важное значение для транспортировки, смешивания, перемешивания и измельчения химических веществ и токсичных материалов.

⇒ МАГНИТНЫЕ МУФТЫ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ЗАДАЧ И ПРИМЕНЕНИЙ

Магнитные муфты компании Sintex применяются в различных отраслях промышленности, они кастомизируются под индивидуальные требования к весу, материалу,

а также геометрическим размерам. В процессе проектирования инженеры должны иметь возможность менять формы и материалы магнитов для реализации технических требований своих клиентов без необходимости физического прототипирования, поскольку оно достаточно затратно с точки зрения финансов и времени. Для исследования различных конфигураций и создания виртуальных прототипов устройств компания Sintex использует мультифизическое моделирование, что существенно экономит время. Флемминг Буус Бендиксен, старший специалист по магнитным технологиям в компании Sintex, использует метод конечных элементов в течение двадцати лет, и пакет COMSOL Multiphysics® стал его основным инструментом и выбором в последнее десятилетие.

«Одно из главных преимуществ пакета COMSOL, с моей точки зрения, заключается в том, что он позволяет реализовывать различные проекты, комбинируя и настраивая взаимосвязи между разными областями физики», — отмечает Бендиксен. У его группы за время работы сформировалась огромная

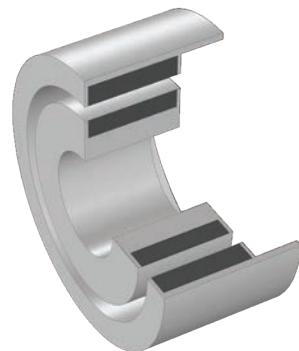


РИС. 1. Схема магнитной муфты.

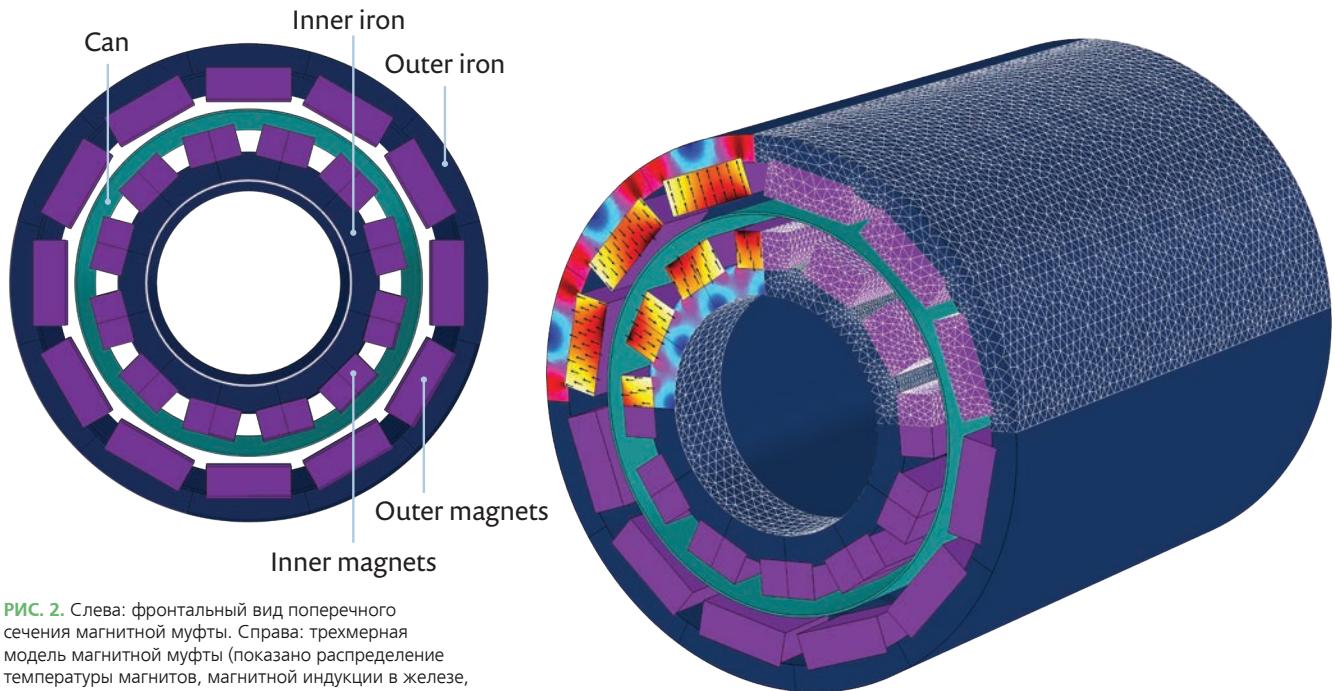


РИС. 2. Слева: фронтальный вид поперечного сечения магнитной муфты. Справа: трехмерная модель магнитной муфты (показано распределение температуры магнитов, магнитной индукции в железе, а также используемая конечно-элементная сетка).

база комплексных проработанных моделей, которые прошли процесс тщательной верификации и валидации, что позволяет использовать их с полной уверенностью. Это не только экономит время, но и снижает цену для клиентов, а также позволяет углубиться в детали.

⇒ УСТРАНЕНИЕ РИСКОВ В НОВЫХ ПРОЕКТАХ

Используя мультифизическое моделирование, Бендиксен изучает взаимодействие между приводами магнитной муфты и рассчитывает передачу крутящего момента от внешнего к внутреннему приводу. Поскольку основной задачей магнитных муфт является передача максимального крутящего момента и мощности вдоль оси, передача крутящего момента является самой важной характеристикой. Она вычисляется несколькими методами: на основе тензора напряжений Максвелла, интегральными методами в процессе постобработки и с помощью метода Арккио. Расчеты проверяются с помощью

экспериментов и дают погрешность не более 1%, что является лучшим доказательством точности и корректности модели. В процессе новой разработки численные модели могут использоваться для определения максимального крутящего момента, передаваемого в определенной конфигурации.

Поскольку поля постоянных магнитов создают многочисленные побочные эффекты, Бендиксен прилагает значительные усилия для их моделирования и исследования. В металлических деталях, в частности в стальном сепараторе муфты, внешние магнитные поля наводят вихревые токи, что приводит к электрическим потерям. «Перемещение северного и южного полюсов создает в стальном сепараторе электрическое напряжение; сталь проводит электричество, и это рассеивает энергию системы», — объясняет Бендиксен. Эти потери, называемые потерями на сепараторе, рассчитываются на выходе модели и должны быть максимально снижены. Группа также недавно разработала установку, которая экспериментально измеряет потери сепаратора в разных прототипах,

и эмпирические проверки подтвердили численные расчеты с точностью до нескольких процентов.

«Наша цель состояла в полноценном описании полностью нелинейного характера магнитных явлений, и с помощью программного пакета COMSOL мы смогли добиться этого и при этом рассчитать и определить оптимальную намагниченность массива», — говорит Бендиксен. Задавая и используя в процессе моделирования данные о нелинейных кривых магнитного гистерезиса и зависимость магнитных свойств от температуры материала, они смогли определить режимы работы предотвращающие перегревание магнита и его необратимое размагничивание, что имеет первостепенное значение для обеспечения надежности продуктов компании. «Очень важно знать температуру, которую способны выдерживать магниты, и я могу рассчитать ее достаточно точно», — добавляет Бендиксен. — Если магниты становятся слишком горячими, они могут частично размагничиваться».

Бендиксен использует все возможные преимущества пакета, в том числе его гибкость и кастомизацию. Так, он импортировал и использует собственную библиотеку магнитных материалов, собранную компанией Sintex.

⇒ КНОПКА, УПРОЩАЮЩАЯ ПРОЦЕСС МОДЕЛИРОВАНИЯ

После того как эксперты и специалисты по моделированию компании Sintex убедились в достаточном уровне детализации

«Одно из главных преимуществ пакета COMSOL, с моей точки зрения, заключается в том, что он позволяет реализовывать различные проекты, комбинируя и настраивая взаимосвязи между разными областями физики»

— ФЛЕММИНГ БУС БЕНДИКСЕН, СТАРШИЙ СПЕЦИАЛИСТ ПО МАГНИТНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ В КОМПАНИИ SINTEX

своих моделей, они стали их использовать для более широкого спектра задач и предоставили доступ к моделям для коллег, не имеющих опыта моделирования. Раньше, когда сотрудникам отдела продаж и другим работникам, которые не разбирались в методиках проектирования и моделирования, нужно было протестировать разработку, они обращались к Бендиксену, чтобы он провел все расчеты. Бендиксен создал приложения для моделирования, основанные на своих мультифизических моделях, и поднял производительность и удобство моделирования на рекордно высокий уровень. В настоящее время у компании Sintex есть десять различных приложений для моделирования, с которыми одновременно могут работать до 20 пользователей. Приложения создаются непосредственно в пакете COMSOL Multiphysics® с помощью Среды разработки приложений, доступ к приложениям возможен через веб-браузер при подключении и использовании платформы COMSOL Server™. Упрощенный графический интерфейс и быстрое развертывание приложений дают возможность всем сотрудникам легко ими пользоваться. Доступ к этим приложениям и их вычислительным мощностям предоставляется и некоторым клиентам. «Я создал приложения, потому что некоторые из моих коллег не так хорошо разбираются в программном обеспечении для численного моделирования, но хотели бы сами проводить моделирование и тестирование систем, и приложения позволяют им легко это сделать», — говорит Бендиксен.

Приложения для моделирования позволяют пользователю изменять заранее предустановленные параметры, не меняя лежащую в основе вычислительную модель. «Сотрудники отдела продаж могут просто поменять размеры и выполнять моделирование в процессе разговора с клиентом по телефону, чтобы убедиться, что модель соответствует запросу заказчика», — объясняет Бендиксен. Но, несмотря на простоту интерфейса, гибкость приложения и платформы позволяет заниматься разработкой инновационных решений. Приложения компании Sintex позволяют пользователю подстраивать как геометрические, так и магнитные параметры. Затем модель вычисляет критические значения температуры магнитов, распределение остаточной намагниченности и магнитной индукции, крутящий момент и потери на сепараторе. На рис. 4 приведен пример приложения, которое позволяет моделировать вихревые токи, генерируемые в стальном сепараторе. Полученная информация может использоваться для вычисления итоговых потерь мощности. Теперь практически все сотрудники могут внести свой вклад в процесс проектирования на различных этапах разработки и помочь максимально повысить надежность продуктов компании.



РИС. 3. Стандартные магнитные муфты.

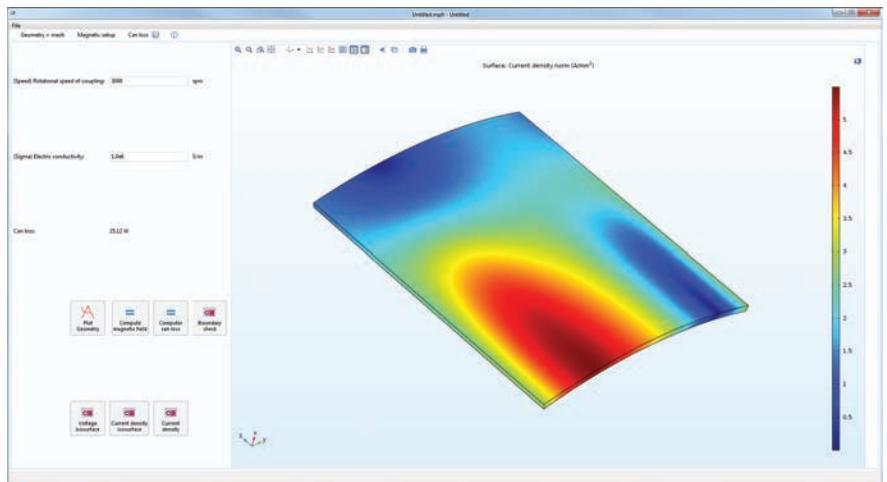
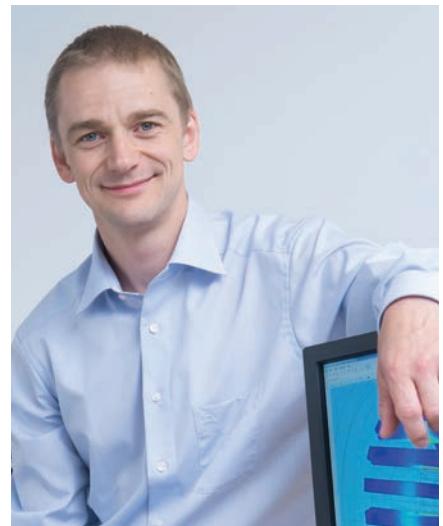


РИС. 4. Внешний вид приложения для моделирования, которое позволяет рассчитать плотность индуцированного вихревого тока в стальном сепараторе и вычислить итоговые потери энергии.

⇒ ВЗГЛЯД В БУДУЩЕЕ

Компания Sintex также разрабатывает новые электромагнитные передачи для широкого спектра применений. Помимо обеспечения надежной, бесконтактной магнитной передачи крутящего момента, эти передачи могут изменять скорость или крутящий момент между приводами, создавая выигрыш в силе при фиксированных коэффициентах передачи. Одна из уникальных конструктивных особенностей решения заключается в том, что данные электромагнитные передачи включают в себя всего один постоянный магнит с намагниченностью, направленной параллельно оси валов, что значительно упрощает сборку и позволяет подстраивать ее под конкретную задачу. При наличии приложений для моделирования, с помощью которых все больше людей участвуют в решении задач, Бендиксен может потратить больше времени на последовательное усовершенствование магнитных технологий компании. ❖



Флемминг Буус Бендиксен, старший специалист по магнитным технологиям в компании Sintex

Как плыть по течению: ОПТИМИЗАЦИЯ расходомеров

Разработчики компании Endress+Hauser работают над улучшением чувствительности расходомеров и датчиков потока для измерения плотности, вязкости, массового расхода и температуры текучей среды, которые применяются в водохозяйственной, пищевой, фармацевтической и нефтегазовой отраслях.

Автор **ВАЛЕРИО МАРРА**

Когда вы заводите автомобиль, наливаете стакан воды из-под крана или пьете сок из коробки, вы используете жидкость, которую получили, тщательно обработали и проверили на соответствие стандартам качества. Высокие технологии, лежащие в основе производства таких жидкостей для широкого потребления, часто не очевидны, однако требуют проведения высокоточных измерений и мониторинга.

Если вы обрабатываете фармацевтические продукты, как вы узнаете, соответствует ли жидкость заданному высокому уровню качества? Если вы работаете с углеводородами, как вы сможете определить объемы нефтедобычи? Если вы транспортируете воду, как вы узнаете скорость потока и объемное распределение?

Именно с такими задачами, от которых зависят доходы и репутация водопроводных, фармацевтических, продовольственных и нефтегазовых компаний, сталкиваются производители расходомеров, находящихся внутри трубопроводов и другого оборудования. В компании Endress+Hauser инженеры неустанно разрабатывают и обслуживают точные датчики для самых разнообразных веществ, которые требуют разных методов измерения.

⇒ ИЗМЕРЕНИЕ СИЛЫ КОРИОЛИСА

Для определения свойств жидкости, движущейся в трубе, датчики, разработанные в компании Endress+Hauser, измеряют влияние силы Кориолиса в устройстве, вставленном в трубопровод и состоящем из одной или нескольких колеблющихся измерительных трубок.

До поступления жидкости в устройство трубку приводят в движение. Если устройство заполнено покоящейся жидкостью, трубка колеблется равномерно. Как только жидкость начинает течь через колеблющуюся трубку, она начинает действовать на ее стенки. Колебание измерительной трубки приводит к вращению частиц жидкости вокруг оси. Поскольку частицы жидкости проходят в движущейся системе отсчета, они испытывают влияние инерционной силы, действующей перпендикулярно направлению их движения и оси вращения. Данная сила носит название силы Кориолиса. Поскольку входная и выходная секции колеблющейся трубки индуцируют противоположное вращательное движение, индуцированные силы изгибают трубку асимметрично, вызывая фазовый сдвиг или временную задержку вдоль трубки.

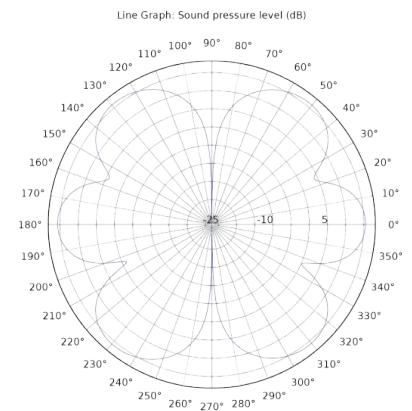
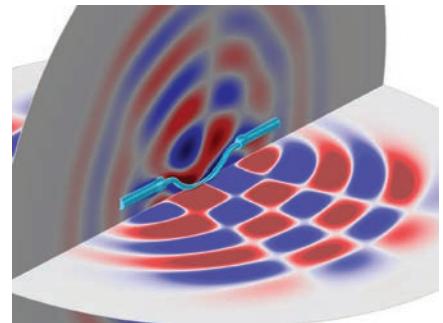
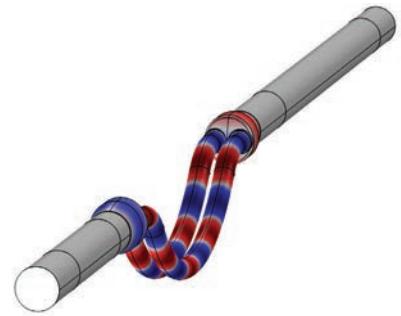


РИС. 2. Модель, показывающая акустическое поле внутри и вокруг колеблющейся трубки (вверху и в центре), и график уровня звукового давления в децибелах (внизу).

Различные секции трубки начинают колебаться с временной задержкой или фазовым сдвигом, вызванным скручивающей составляющей движения трубы. Этот фазовый сдвиг и новая частота колебаний трубки зависят от массового расхода в трубках и плотности жидкости. Следовательно, сигналы от счетчика можно рассматривать как показатель массового или объемного расхода, на основе которого определяется, что необходимое количество жидкости прошло по трубе.

Аналогичным образом увеличение вязкости жидкости приводит к более сильному затуханию колебаний. Частота колебаний в основном является прямым показателем плотности жидкости. Колебания будут чаще, но будут и быстрее затухать, например, в веществе типа нефти (более низкая плотность и более высокая вязкость), чем в жидкости типа воды



РИС. 1. Корриолисов расходомер, разработанный в компании Endress+Hauser.

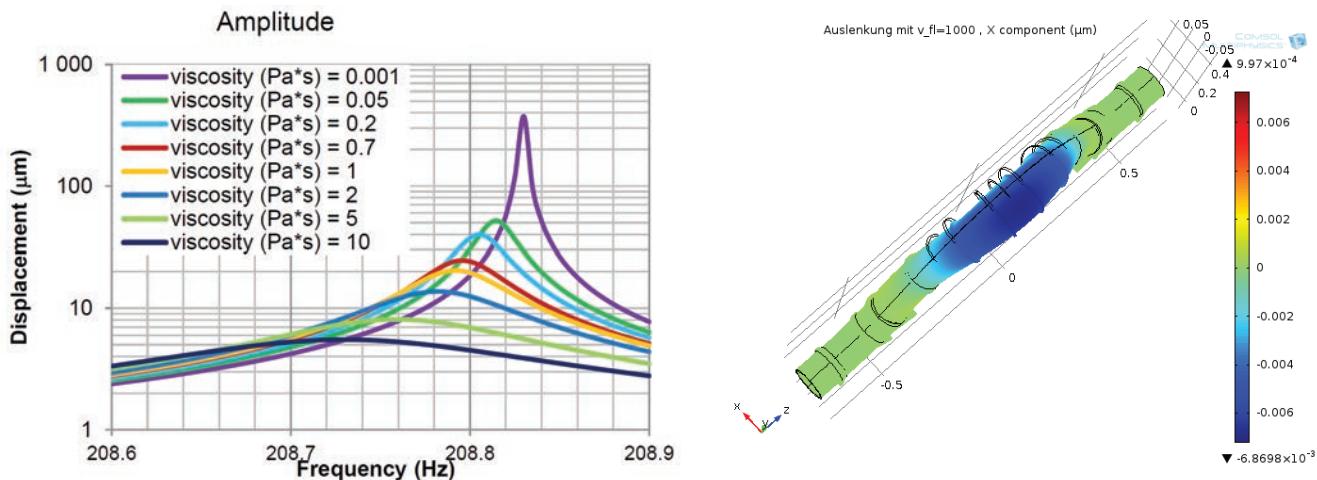


Рис. 3. Результаты расчетов, демонстрирующие изменение частоты колебаний трубки и величину механических колебаний для различной вязкости жидкости. Справа: наглядный пример деформации трубки вследствие колебательного движения.

(более высокая плотность и более низкая вязкость). Измерение частоты и затухания колебаний позволяет определить плотность и вязкость, а также контролировать качество технологического процесса, связанного с потоком жидкости. Те же самые физические эффекты применимы к объекту, колеблющемуся в движущейся жидкости, например, к балке (кантилеверу).

⇒ УЧЕТ ВЯЗКИХ ПОТЕРЬ В АКУСТИЧЕСКИХ РАСЧЕТАХ

Вивек Кумар, старший специалист по численному моделированию в компании Endress+Hauser Flowtec AG, филиала Endress+Hauser, который производит расходомеры (рис. 1), занимается оптимизацией датчиков. Расчеты и численные модели доктора Кумара помогли членам его группы глубже понять и проанализировать акустические, механические, а также гидродинамические эффекты, происходящие в расходомерах. Понимание того, как взаимодействие жидкости и твердых тел (FSI) и виброакустические эффекты влияют на работу датчика, позволило им внести различные поправки в конструкцию для повышения эффективности и качества прибора.

Группа начала свой численный анализ с акустической модели с учетом вязких потерь, чтобы разобраться с влиянием данного демпфирования, происходящего, когда вязкая жидкость течет через колеблющуюся трубку. Они исследовали взаимосвязь механических колебаний стенок трубок и распространение акустических волн в жидкости, моделируя взаимодействие

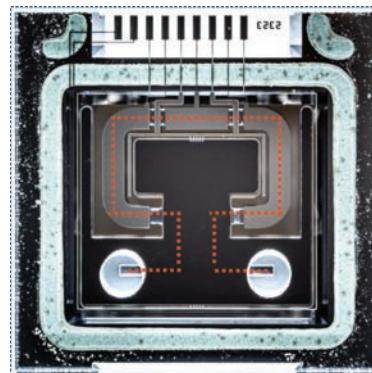
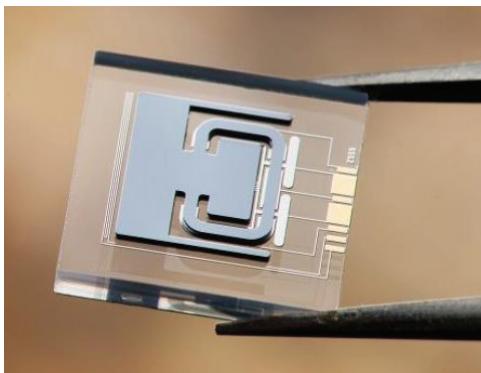


Рис. 4. Микросхема с МЭМС-датчиком эффекта Кориолиса, используемая для измерения плотности и вязкости. Слева: готовый датчик, удерживаемый пинцетом. Справа: расположение микросхемы внутри устройства.

жидкости и конструкции (FSI) в частотной области, что позволило спрогнозировать реакцию расходомера на различные жидкости. На рис. 2 показано распределение акустических полей, создаваемое вибрирующей трубкой с турбулентным потоком жидкости, в окружающем пространстве. «С помощью пакета COMSOL

Multiphysics мы проводим оценку влияния шума, вызванного осциллирующей трубкой с потоком, на окружающую среду и на сам расходомер», — комментирует команда разработчиков.

Исследователи проанализировали влияние вязкости жидкости на частоту колебаний трубки. На рис. 3 показаны результаты моделирования, иллюстрирующие резонансную частоту, а также смещение трубки для жидкостей различной вязкости. Имея в руках инструмент для моделирования и разбираясь в физических явлениях, которые вызывают сдвиг частоты на выходе расходомера, группа получила возможность использовать эти явления для повышения производительности датчиков, например, отфильтровывая нежелательные эффекты. В представленном примере изменение затухания колебаний трубки используется для компенсации влияния вязкости на погрешность измерения плотности.

«Мы хотели понять, как разные жидкости влияют на работу датчика, —

«Используя численное моделирование, мы смогли проанализировать различные варианты и в конечном итоге оптимизировать конструкцию и режимы работы нашего устройства, чтобы помочь нашим клиентам определять свойства жидкостей, которые они используют или извлекают.»

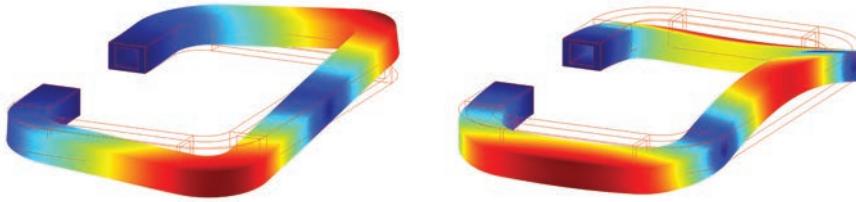


РИС. 5. Две собственные моды вибрирующего микроканала. Цвет отражает относительные уровни смещения различных областей канала.

комментируют исследователи. — Используя численное моделирование, мы смогли проанализировать различные варианты и в конечном итоге оптимизировать конструкцию и режимы работы нашего устройства, чтобы помочь нашим клиентам определять свойства жидкостей, которые они используют или извлекают».

⇒ РАСЧЕТ МИКРОДАТЧИКОВ

Специалисты TrueDyne Sensors AG, дочерней компании Endress+Hauser Flowtec AG, разрабатывают микроэлектромеханические устройства на основе аналогичной концепции. Они проектируют и проводят испытания вибродатчиков колебаний для измерения термофизических свойств жидкостей для различных применений и прикладных задач своих клиентов. Крайне важной для них является информация о том, какой тип резонаторов обеспечит лучшую чувствительность в каждом конкретном случае.

Микросхема с МЭМС-датчиком эффекта Кориолиса (рис. 4) использует свободностоящий вибрирующий микроканал и работает по тому же принципу, что и кориолисов расходомер большего размера. Численные расчеты позволяют провести анализ вибраций для определения основных собственных мод и скоростей колебаний на разных концах микроканала (рис. 5). Данный конкретный датчик используется для оценки плотности и вязкости таких сред, как инертные газы, сжиженный нефтяной газ, углеводородное топливо или охлаждающие смазки. Благодаря своим размерам датчик подходит для измерения очень малых объемов текучих сред.

В таком маленьком приборе возникает проблема повышения температуры, которое может быть вызвано высоким напряжением, приложенным к датчику в случае сбоя электрооборудования. Для анализа безопасности работы устройства исследователи провели дополнительный тепловой расчет (рис. 6), чтобы определить, где и как тепло рассеивается в микросхеме, а также будет ли это приводить к высокому нагреву среды. Как оказалось, температура не превышала предельной величины благодаря окружающей канал вакуумной камере, которая снижала теплообмен между электродами и гидродинамической средой.

⇒ НА БЛАГО КОМПАНИИ И КЛИЕНТОВ

Обе группы отмечают универсальность пакета COMSOL Multiphysics®, благодаря чему удалось с легкостью адаптировать и доработать расходомеры для работы с максимальной производительностью в самых разных условиях. Мультифизический анализ взаимодействия физических явлений дает возможность сократить время и усилия, затраченные на тестирование и прототипы, и позволяет создавать датчики самого высокого качества.

Кристоф Хубер вдохновлен тем, что видит реальный эффект своей работы, так как благодаря усилиям команды конструкции устройств улучшаются, о чем свидетельствуют

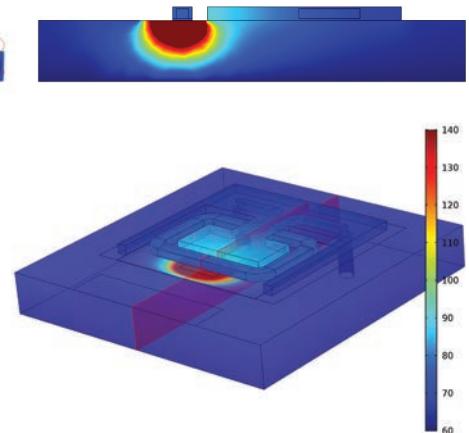
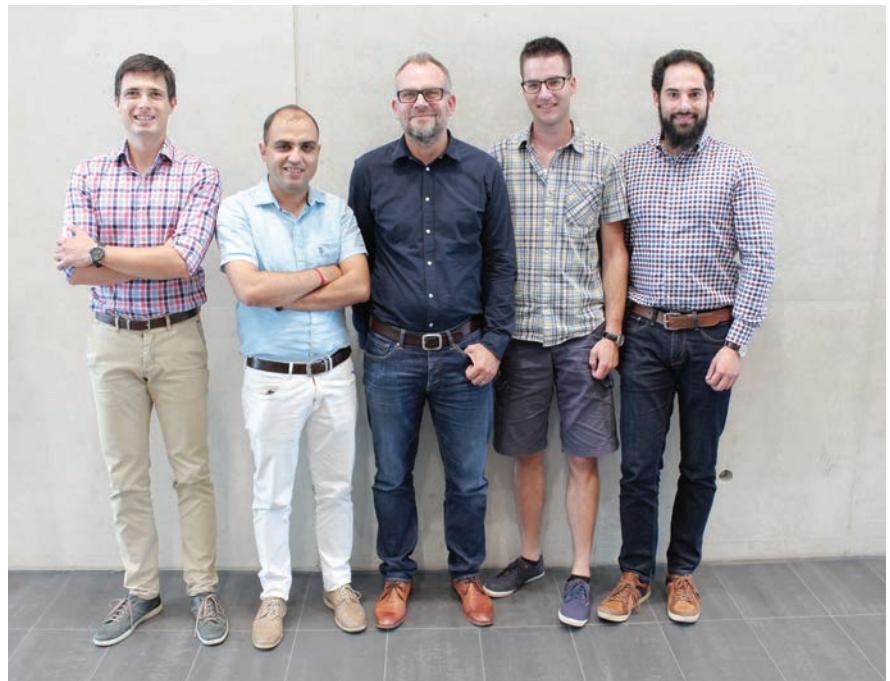


РИС. 6. Результаты теплового анализа: распределение температуры в микросхеме с МЭМС-датчиком эффекта Кориолиса.

отзывы довольных продуктами компании Endress+Hauser клиентов. «Софт и наши численные расчеты используются для решения задач заказчиков. Мы на практике видим результаты применения наших инновационных продуктов и технологий. Мы видим плоды своего труда, что мотивирует нас продолжать разработку и исследования».



Слева направо: Анастасиос Бадарлис, доктор Вивек Кумар, доктор Кристоф Хубер, Беньямин Швентер и Патрик Райт.

E+H Flowtec AG является компанией группы Endress+Hauser со штаб-квартирой в городе Райнах, Швейцария. Truedyne Sensor AG является дочерней компанией Endress+Hauser Flowtec AG.



Приложения для моделирования способствуют успехам исследований в области трибологии

Исследователи из Центра исследований механизмов (FZG) Мюнхенского технического университета (TUM) в Германии превратили свою мультифизическую модель в приложение для моделирования зубчатых контактов с термической эластогидродинамической смазкой. Их история — это пример решения сложных взаимосвязанных мультифизических задач, которые сочетают механику конструкций и теорию теплопередачи с вычислительной гидродинамикой.

Автор **ВАЛЕРИО МАРРА**

Эластогидродинамическая смазка — хороший пример того, как сложны проблемы инженерного моделирования в 21-м веке. Эластогидродинамическая теория смазки описывает взаимосвязь между деформациями двух сопрягаемых поверхностей, таких как подшипники и шестерни, и гидродинамикой, ведущей к разделению обеих поверхностей. Если учитывать тепловые эффекты, то эту задачу называют термической эластогидродинамической теорией смазки. Толщина слоя смазки обычно составляет порядка нескольких микрон или меньше, что достаточно для обеспечения низкого трения и износа. Подробный анализ механизмов термической эластогидродинамической смазки позволяет повысить удельную мощность, улучшить КПД и снизить уровень шума, вибрации и жесткости приводов.

Ключ к пониманию конструкции смазываемых контактов механизма в том, чтобы рассматривать сам смазочный материал в качестве элемента механизма. Моделирование термической эластогидродинамической смазки способствует

глубокому пониманию работы смазываемых контактов и уменьшает количество прототипов. Мультифизическое и компьютерное моделирование контактов с термической эластогидродинамической смазкой — лучший способ понять суть проблемы (рис. 1).

⇒ СЛИШКОМ МАЛ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ

Когда толщина слоя смазки и деформация твердых тел составляет несколько микрон, чрезвычайно трудно получить информацию о термической эластогидродинамической смазке, помещая датчик в область контакта. «Толщина слоя смазки между двумя профилями зубцов составляет несколько микрон, то есть примерно одну десятую от диаметра человеческого волоса. Типичное давление в месте контакта достигает 2 ГПа, что соответствует давлению 30 пассажирских вагонов на площадь размером с ноготь большого пальца», — поясняет Томас Лонер, руководитель отдела изучения контактного взаимодействия и эффективности эластогидродинамической смазки в Центре

исследований механизмов Мюнхенского технического университета.

Используя численное моделирование, инженеры могут проектировать контакты термической эластогидродинамической смазки, чтобы выбирать подходящие комбинации поверхностей зубчатых колес и смазки. Трудность состоит в том, что задача моделирования термической эластогидродинамической смазки связывает

«Пакет COMSOL — идеальный выбор для моделирования взаимосвязанных физических процессов.»

— ТОМАС ЛОНЕР, РУКОВОДИТЕЛЬ ОТДЕЛА ИЗУЧЕНИЯ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛАСТОГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ СМАЗКИ

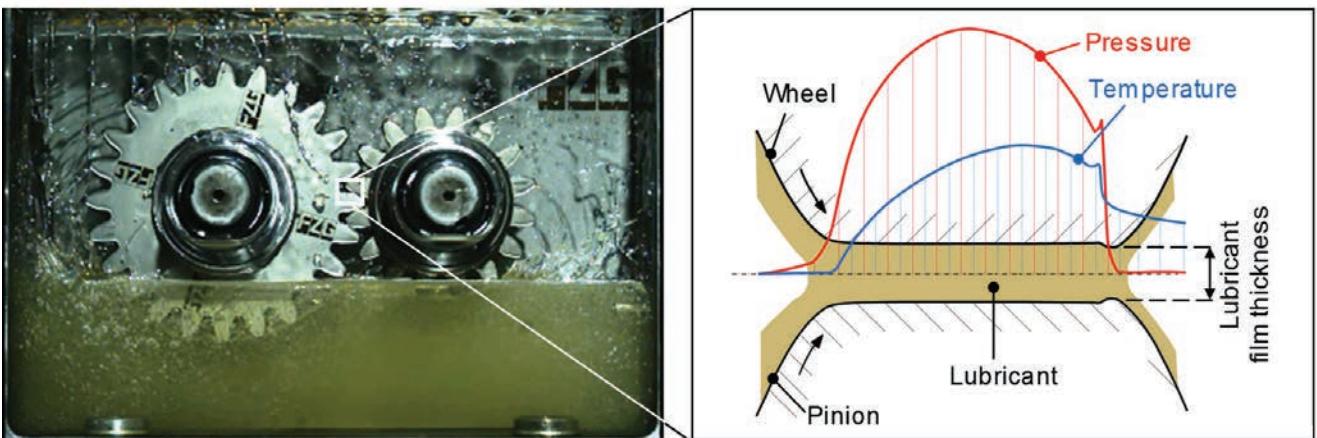


РИС. 1. Высокоскоростная фотография зубчатой пары со смазкой погружением (слева) и схематическое изображение контакта термической эластогидродинамической смазки (справа).

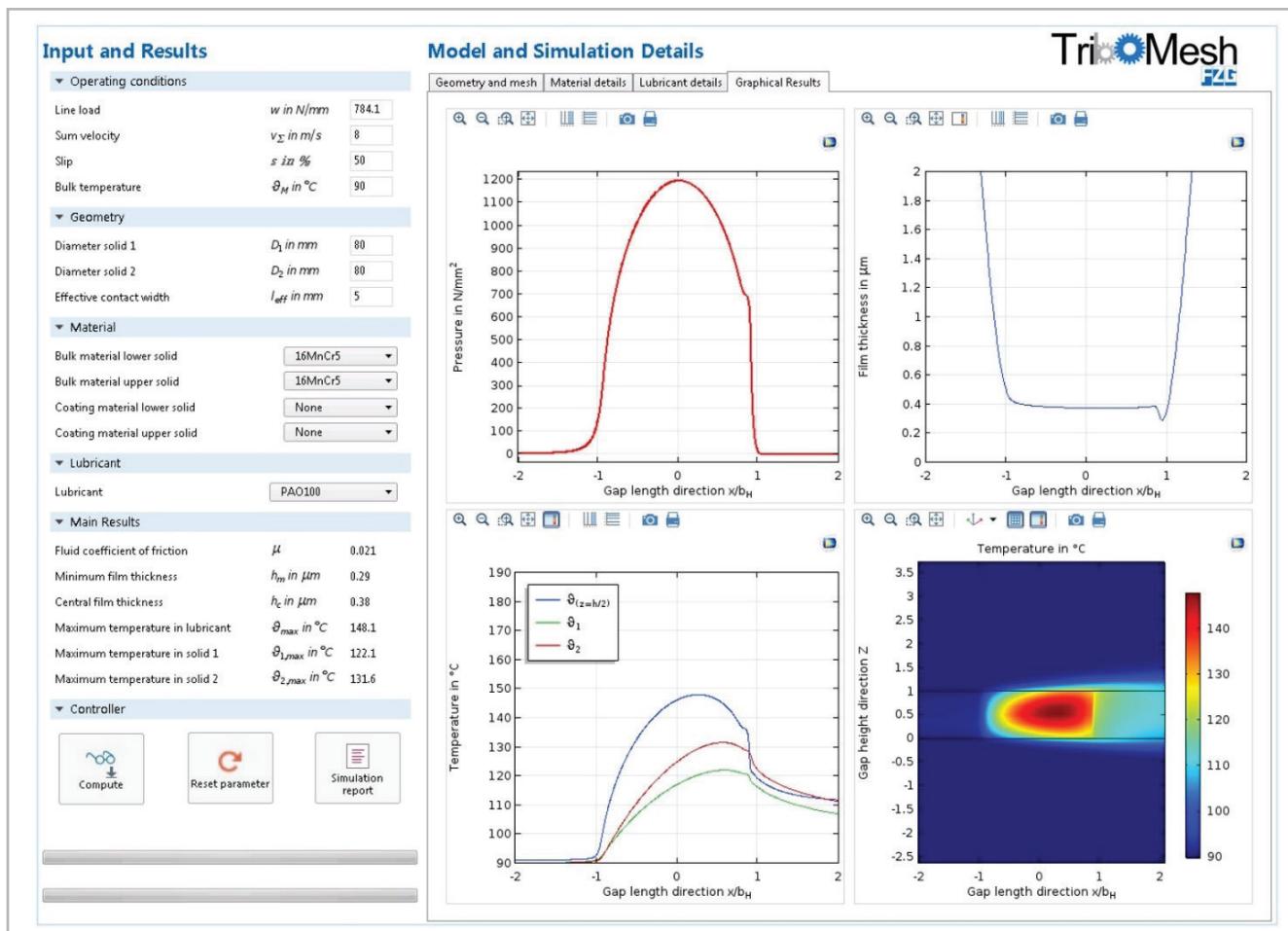


РИС. 2. Данное пользовательское приложение для моделирования решает комплексную задачу взаимосвязи физических процессов для термической эластогидродинамической смазки и является доступным инструментом для всех сотрудников исследовательского центра.

несколько разделов физики. Смазка является жидкостью, поэтому для модели требуется вычислительная гидродинамика (CFD), для которой часто используется модифицированное уравнение Рейнольдса — частный случай уравнений Навье — Стокса. Такие свойства смазки, как вязкость, сильно зависят от изменений давления и температуры. Кроме того, поведение потока смазки становится нелинейным на высоких скоростях сдвига. Тепло, выделяемое в месте контакта, создается при сдвиге и сжатии тонкого слоя смазки и распространяется благодаря конвекции и теплопроводности. При изменении температуры меняются свойства смазки, что влияет на гидродинамику и в конечном счете на упругую деформацию, которая, в свою очередь, влияет на выделение тепла. Каждая величина влияет на другую, что приводит к итерационному циклу с высокой степенью нелинейности, который включает упругую деформацию поверхности зубчатых колес, описываемую с помощью анализа взаимосвязанных явлений механики конструкций.

⇒ ОТ ТЕОРИИ К МОДЕЛИ И ПРАКТИКЕ

Лонер и его группа разработали приложение, которое основано на методе решения, опубликованном их коллегой, профессором Вассимом Хабчи из Ливанско-американского университета в городе Библ, Ливан [1]. Однако публикация — это еще не готовое приложение для расчета ответов. «Мы реализовали решение с помощью программного обеспечения COMSOL Multiphysics, которое оказалось очень удобным», — поясняет Лонер. — Это позволило нам внести необходимые изменения в уравнение Рейнольдса и связать его с другими разделами физики для создания нашей математической модели термической эластогидродинамической смазки. Пакет COMSOL — идеальный выбор для моделирования взаимосвязанных физических процессов».

Основное преимущество программного обеспечения — возможность выбирать физику, добавлять настраиваемые уравнения, а затем объединять все вместе, чтобы

создавать рабочее решение [2], не вдаваясь в детали численных методов решения, а уделяя все внимание моделированию. «Наш исследовательский центр специализируется на разработке и оптимизации элементов механизмов, в частности, зубчатых передач, — поясняет Лонер. — Мультифизический интерфейс пакета COMSOL позволил нам сосредоточиться на технических проблемах, а не на численных алгоритмах для решения задачи. Кроме того, новые разработки и обновления программного обеспечения идут нам на пользу». Для расчета давления и толщины пленки исследователи использовали интерфейс Weak Form Boundary PDE (Граничное дифференциальное уравнение в частных производных в слабой форме) для ввода обобщенных уравнений Рейнольдса [1]. Для расчета температуры использовались в основном заранее заданные интерфейсы, доступные в программном обеспечении [2].

Лонер и его группа создали приложение для моделирования под названием TriboMesh (рис. 2), которое упростило их работу и открыло возможности для всех сотрудников

исследовательского центра. Для этого они использовали Среду разработки приложений, входящую в программное обеспечение. Приложения позволяют их коллегам применять моделирование на практике для поиска новых решений.

Некоторые коллеги уже использовали приложение для моделирования, развернутое на локальных рабочих станциях. В будущем коллеги и партнеры по проекту смогут также пользоваться приложением с помощью продукта COMSOL Server™, который позволяет запускать приложения через веб-браузер.

Одна из задач приложения состоит в анализе применения алмазоподобного покрытия для улучшения эффективности работы зубчатой передачи. «Мы провели эксперименты на испытательных установках, которые показали, что коэффициент трения намного ниже для зубчатых колес с алмазоподобным покрытием по сравнению с элементами без покрытия», — поясняет Лонер. Но почему? Покрытие было на поверхности — как оно могло повлиять на смазку? При запуске приложения со всеми физическими данными, полученными на испытательной установке, оказалось, что алмазоподобное покрытие удерживает тепло в контактной области с термической эластогидродинамической смазкой, снижая вязкость смазки и уменьшая трение (рис. 3) [3]. «Алмазоподобное покрытие обеспечивает теплоизоляцию, и мы не смогли бы обосновать наши гипотезы без моделирования. Мы получили подробное представление о тепловых потоках в системе и об итоговых свойствах смазки», — говорит Лонер.

⇒ СОВЕТЫ ДРУГИМ: НАЧНИТЕ С МАЛОГО И НАРАЩИВАЙТЕ ОБЪЕМЫ

Для тех, кто использует мультифизическое моделирование и соответствующие приложения, Лонер и его группа предлагают ценные советы на основании своего опыта.

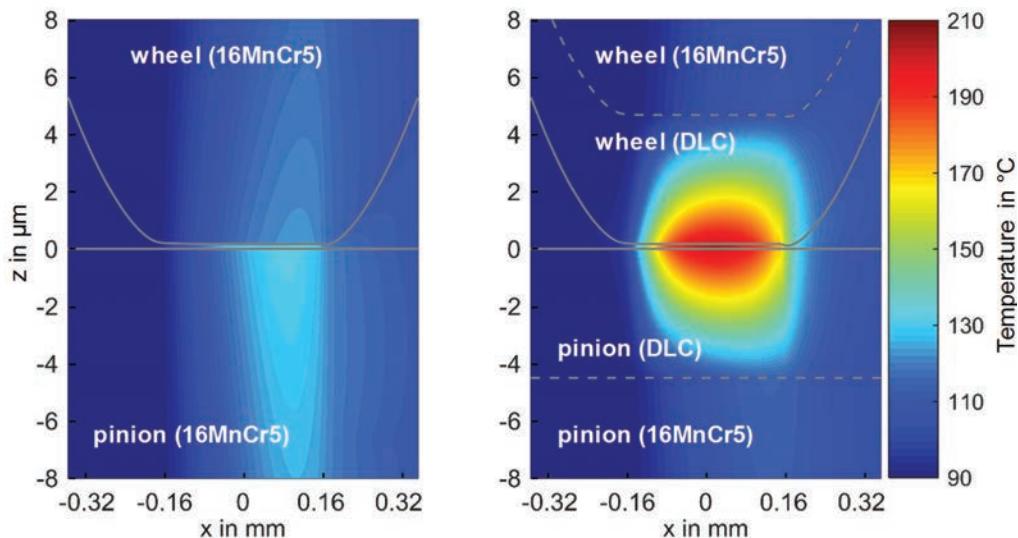


РИС. 3. Результаты моделирования термической эластогидродинамической смазки: распределение температуры в зубчатой паре без покрытия (слева) и с алмазоподобным покрытием (справа).

«Если вы начинаете работать над очень сложной задачей, практически невозможно сразу же решить ее полностью», — говорит Лонер. — В первую очередь нужно видоизменить проблему, чтобы сделать ее максимально простой». Чтобы упростить задачу, разработчики изменили уравнение Рейнольдса, связав его с простыми уравнениями упругости и игнорируя тепловые эффекты. «Затем мы шаг за шагом переходили к более сложным эффектам», — рассказывает Лонер. — Вы можете моделировать самые сложные задачи в пакете COMSOL и добавлять сложные эффекты к вашему решению по мере необходимости». Он предупреждает, что простой в использовании программный пакет еще не означает, что задачу будет просто решить. «Из-за того что задача сложна, вам действительно нужно двигаться вперед методично, шаг за шагом. Вы должны убедиться в правильности предыдущих шагов, прежде чем перейти к следующему», — говорит Лонер. ❖

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. W. Habchi. A full-system finite element approach to elastohydrodynamic lubrication

problems: application to ultra-low-viscosity fluids (Комплексный конечно-элементный подход к задачам эластогидродинамической смазки применительно к текучим средам сверхнизкой вязкости), диссертация, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (Национальный институт прикладных наук в Лионе), Лион, Франция, 2008.

2. Thomas Lohner, Andreas Zieglertrum, Johann-Paul Stemplinger and Karsten Stahl. Engineering software solution for thermal elastohydrodynamic lubrication using multiphysics software (Программное обеспечение для решения технических задач по применению термической эластогидродинамической смазки на основе мультифизического моделирования), Advances in Tribology, Volume 2016 (2016), Article ID 6507203.

3. Andreas Zieglertrum, Thomas Lohner, Karsten Stahl. TEHL simulation on the influence of lubricants on the frictional losses of DLC coated gears (Моделирование влияния термической эластогидродинамической смазки на потери на трение в зубчатых колесах с алмазоподобным покрытием), Lubricants, Volume 6 (2018), DOI:10.3390/lubricants6010017.



Члены исследовательской группы по изучению контактного взаимодействия и эффективности эластогидродинамической смазки в Центре исследований механизмов Мюнхенского технического университета, Германия: (слева направо) Андреас Цигльтрум, научный сотрудник; Энцо Майер, научный сотрудник; Томас Лонер, руководитель отдела; Карстен Шталь, профессор и директор Центра исследования механизмов.

Первоклассное звучание благодаря численному моделированию акустических метаповерхностей

Акустические метаповерхности разрабатываются и используются для управления, наведения и манипулирования звуковыми волнами с целью получения специфических акустических свойств (например, отрицательный показатель преломления), которые не встречаются в природе. Исследовательская группа из Федеральной политехнической школы Лозанны (EPFL) в Швейцарии смоделировала новую «активную» акустическую метаповерхность, которая может использоваться для улучшения акустики концертных залов и звукоизоляции домов или для поглощения раздражающих звуков двигателя во время полета.

Автор **ДЖЕММА ЧЕРЧ**

Основной недостаток традиционных акустических покрытий в том, что их размеры ограничивают их частотный диапазон (чем тоньше, тем хуже характеристики на низких частотах). Кроме этого, для усиления акустического эффекта в таких устройствах используют резонансные эффекты, что, как следствие, приводит к очень узким диапазонам рабочих частот. Например, мембранный поглотитель (басовая ловушка), расположенный в углу студии звукозаписи для поглощения низкочастотных звуков, которые накапливаются и мешают качеству создаваемого аудио, влияет только на ограниченный диапазон вблизи своей резонансной частоты. Однако эти низкочастотные помехи обычно охватывают диапазон от 20 до 200 Гц, и одно акустическое устройство не может поглотить весь этот диапазон частот.

⇒ НАПРАВЛЯЯ ДВИЖЕНИЕ ВОЛНОВЫХ ФРОНТОВ

Устройства, обеспечивающие звукопоглощение на низких частотах, нецелесообразно разрабатывать ввиду громоздкости и сложности оптимизации. Эрве Лиссек, руководитель акустической группы в EPFL, отмечает: «Обычный мембранный резонатор работает в диапазоне нескольких герц, что ограничивает его применение. Наша же идея заключалась в разработке широкополосного и активного устройства». Это привело к появлению концепции активного электроакустического резонатора (AER), в котором в качестве мембранного поглотителя используется обычный громкоговоритель, чьи акустические характеристики как резонатора можно менять электрическими средствами (рис. 1).

Развивая идеи и знания, полученные в результате изучения электроакустического резонатора, Лиссек и его группа занялись изучением акустических метаповерхностей. Акустическая метаповерхность представляет собой поверхность, состоящую из небольших акустических элементов (мембраны, небольшие перфорации, полости и так далее), которые в совокупности создают новые акустические свойства, при том что каждый отдельный элемент сам по себе такими свойствами не обладает. В концепции метаповерхности сборка приобретает акустические свойства на тех длинах волн, которые намного больше размера каждого элемента (а элементарные ячейки, таким образом, оказываются «субволновыми»). Метаповерхность можно спроектировать так, чтобы либо обеспечить поглощение звука, либо направлять волновые фронты, отраженные метаповерхностью, под определенным углом.

⇒ АКТИВНАЯ ПОДСТРОЙКА ДЛЯ СОЗДАНИЯ «РАДУГИ ЗВУКОВ»

Для моделирования акустической метаповерхности необходимо перейти на уровень субволновых элементарных ячеек, чтобы искусственно перестраивать акустический волновой фронт и получать желаемый результат. Активная акустическая метаповерхность, предложенная Лиссеком и его группой, состоит из двумерного массива субволновых диафрагм громкоговорителей, каждая из которых имеет настраиваемый индивидуальный активный акустический импеданс, что позволяет локально управлять различными фазами отражения над метаповерхностью.



РИС. 1. Прототип электроакустического резонатора. Изображение предоставлено: EPFL / Ален Герцог.

Для управления фазой отражения над метаповерхностью используется методика активного контроля и управления. Она основана на концепции электроакустического резонатора, который можно настраивать или модифицировать с помощью схем электроакустического управления (рис. 3). Лиссек объясняет: «Мы можем управлять реакцией этой метаповерхности на звуковой профиль, выполняя электрическую настройку мембран. Кроме того, мембраны могут активно адаптироваться под падающий звуковой сигнал. Например, если вы пытаетесь замаскировать шум двигателя самолета, активная акустическая метаповерхность будет подстраиваться к изменяющейся частоте двигателя на разных этапах полета в диапазоне от нескольких сотен до нескольких тысяч герц». Известно, что контроллер электроакустического резонатора может изменять акустический импеданс одиночной диафрагмы громкоговорителя, используемой в качестве акустического резонатора, и смещать ее резонансную частоту более чем на одну октаву.

Можно даже использовать эту идею для отражения звуковых волн определенным образом. Лиссек добавляет: «Если широкополосный шум (акустический аналог белого света) падает на акустическую метаповерхность, то акустическая метаповерхность может разложить сигнал, действуя как акустическая призма, и каждая составляющая частота будет отражаться в своем направлении. С художественной точки зрения мы получим радугу звука. Это открывает самые благоприятные перспективы, но самые ожидаемые приложения этой техники в первую очередь связаны с шумоподавлением».

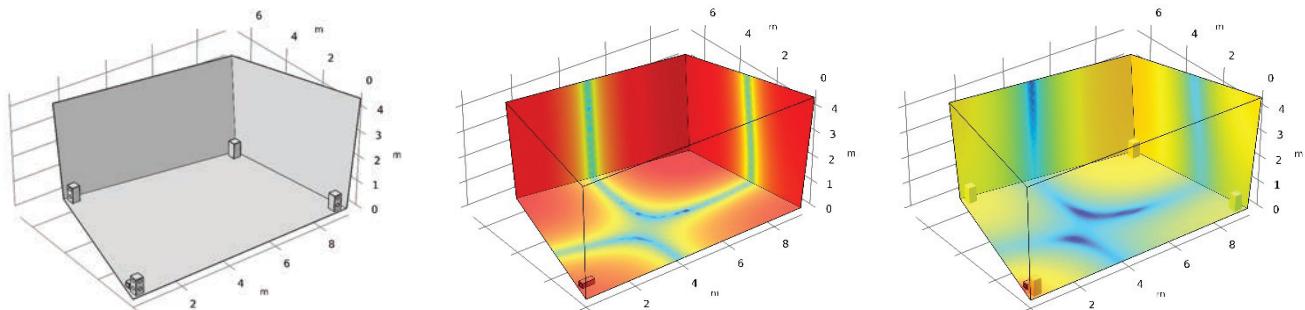


РИС. 2. Слева: геометрия эхокамеры с четырьмя прототипами электроакустического резонатора, расположенными по четырем углам помещения. В центре и справа: распределение уровня звукового давления в камере для моды [110] на частоте 35,3 Гц без поглотителей и с поглотителями соответственно.

⇒ КОНТРОЛЬ АКУСТИЧЕСКОЙ РАЗРАБОТКИ С ПОМОЩЬЮ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

При моделировании акустической метаповерхности и окружающей акустической среды необходимо учитывать множество сложных явлений. По словам Лиссека, «пакет COMSOL Multiphysics дает возможность оценивать акустические характеристики разрабатываемых устройств. Более того, он дает точное представление о физике устройств, которые невозможно оценить экспериментально».

Вернемся к нашему предыдущему примеру студии звукозаписи и расширим его, предположив, что в углах комнаты находятся четыре небольших активных поглотителя (рис. 2), способных поглощать низкочастотные звуки. Чтобы смоделировать, как эти устройства будут поглощать звук и влиять на акустику помещения, необходимо знать звуковое давление в разных точках комнаты. Лиссек поясняет: «С помощью мультифизического

моделирования мы можем мгновенно получить распределение частот в помещении в присутствии активных поглотителей и без них. Затем мы можем смоделировать распределение звука в помещении, чтобы изучить такие важные параметры, как время затухания (или реверберации), то есть время рассеивания звука на резонансных частотах».

«Мы можем сделать это всего за десять секунд, используя программное обеспечение. Нам не нужно проводить акустические измерения в каждой точке пространства. Мы можем легко визуализировать распределение звукового давления, когда перемещаем поглотители внутри комнаты, и сразу проанализировать изменения», — добавляет Лиссек.

⇒ УПРАВЛЕНИЕ НАПРАВЛЕННОСТЬЮ С ПОМОЩЬЮ АКТИВНОЙ МЕТАПОВЕРХНОСТИ

Лиссек и его группа смоделировали и проанализировали множество различных типов акустических метаповерхностей. В их числе спиральные акустические элементарные ячейки, резонаторы Гельмгольца и активные акустические метаповерхности.

Для определения индивидуальных параметров и алгоритмов управления каждой элементарной ячейкой электроакустического резонатора сначала были заданы свойства отражения. Затем определенные параметры управления были применены к элементарной ячейке электроакустического резонатора на основе готовых электродинамических громкоговорителей, чтобы экспериментально оценить возможность получения нужных фаз отражения вдоль метаповерхности, состоящей из 32 элементов (рис. 4). После проверки целевых коэффициентов отражения был произведен численный расчет метаповерхности в полноволновой формулировке. «Отдельные элементы движутся как поршни. Нет смысла для каждого детально рассчитывать динамику, поэтому мы просто задали реально достижимую величину акустического импеданса каждой мембраны в модели», — объясняет Лиссек.

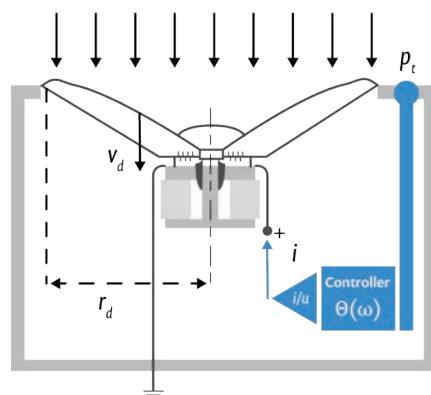


РИС. 3. Иллюстрация принципа действия активных электроакустических резонаторов.

Для случая плоской волны, падающей на поверхность под углом -45° , было проведено два расчета. Целевой угол для волны, отраженной от метаповерхности, задавали равным 60° и 0° , что нарушает классический закон отражения Снеллиуса. Результаты расчетов в формате распределения уровня звукового давления в плоскости xz для двух исследованных углов при частоте $f = 350$ Гц представлены на рис. 5 и рис. 6. Полученные изображения наглядно иллюстрируют тот факт, что акустический импеданс, заданный для элементарных ячеек метаповерхности, фактически позволяет управлять волновыми фронтами и задавать угол отражения.

Рис. 5 и рис. 6 показывают, что существует хорошее соответствие между достигнутыми результатами и целевыми (заданными) углами отражения. Это подтверждает способность когерентно управлять акустическими волнами в относительно широкой полосе частот (почти на октаву вблизи 350 Гц) с помощью электроакустического резонатора. Исследователи доказали эффективность активных акустических метаповерхностей в большем диапазоне частот и смогли продолжить свои исследования с использованием численного моделирования. Лиссек добавляет: «Я не считаю себя специалистом в области конечно-элементного моделирования. Пакет

«Пакет COMSOL Multiphysics дает возможность оценивать акустические характеристики разрабатываемых устройств. Более того, он дает точное представление о физике устройств, которые невозможно оценить экспериментально.»

— ЭРВЕ ЛИССЕК, РУКОВОДИТЕЛЬ АКУСТИЧЕСКОЙ ГРУППЫ В ФЕДЕРАЛЬНОЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОЙ ШКОЛЕ ЛОЗАННЫ (EPFL)



РИС. 4. Прототип акустической рассеивающей призмы. Изображение предоставлено: EPFL / Алэн Герцог.

COMSOL Multiphysics полезен мне во многом потому, что он содержит простой, удобный и мощный набор легкодоступных и понятных инструментов».

⇒ ДАЛЬНЕЙШЕЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТАПОВЕРХНОСТЕЙ

Исследователи планируют перейти к полному трехмерному моделированию акустической метаповерхности. Лиссек отмечает: «Для этого предварительного исследования мы использовали упрощенную постановку, предполагая, что метаповерхность имеет бесконечный размер вдоль оси y , что ускоряет

вычисления. Но модель, учитывающая реальную двумерную метаповерхность в полноценной трехмерной акустической области, должна дать больше информации о свойствах отраженных волн. Например, усечение решетки по осям x и y должно увеличить направленность отраженной волны». Для большей детализации расчета решетки электроакустических резонаторов ученые работают над интеграцией в свою модель описания электрических сосредоточенных цепей и элементов, чтобы лучше понять связь между акустическим расчетом и электрическими величинами, используемыми в активном управлении, например, влияние электрического тока, текущего в отдельных электроакустических

резонаторах. Это может помочь им в разработке передовых алгоритмов управления, например, в случае полной электрической взаимосвязи всех электроакустических резонаторов.

В будущем, Лиссек и его группа планируют заняться исследованием интеграции таких акустических метаповерхностей в проекты помещений. «Например, представьте себе театр или концертный зал, оснащенный акустическими метаповерхностями, где звуковыми отражениями можно управлять, обеспечивая высокое качество звучания. Электронное управление распространением звука в комнате — это святой Грааль для любого профессионала в области акустики», — подводит итог Лиссек. ❖

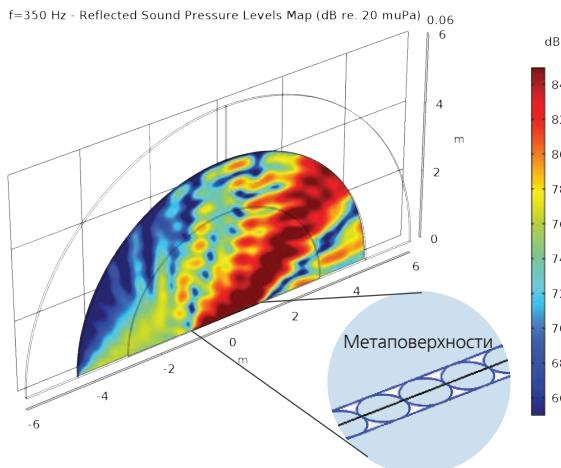


РИС. 5. Уровень давления отраженного звука для массива элементарных ячеек 32×32 , $f = 350$ Гц при заданном угле отражения 60° .

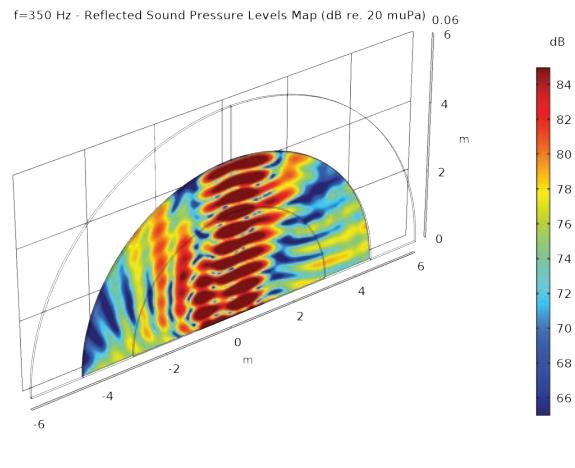


РИС. 6. Уровень давления отраженного звука для массива элементарных ячеек размером 32×32 , $f = 350$ Гц при заданном угле отражения 0° .

УЛУЧШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СПЕКАНИЯ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ РУД

Инженеры-технологи, используя мультифизическое моделирование, разрабатывают быстрый, экономичный и экологически безопасный способ массового производства стали.

Автор **ЗАК КОНРАД**

В основе любого производства лежит постоянная работа по повышению эффективности и качества. Это ярко видно на примере сталелитейной промышленности. Так как производство стали состоит из длительной цепочки процессов, есть много возможностей для их улучшения. Промышленно-исследовательский институт Общества немецких металлургов (VDEh-BFI), один из ведущих научно-исследовательских институтов Европы в области технологий выплавки чугуна и стали, использует мультифизическое моделирование для оптимизации своих установок и исследований.

⇒ ПОДГОТОВКА АГЛОМЕРАТА ДЛЯ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Важный этап производства стали — процесс спекания, в котором смесь тонко измельченной железной руды и других материалов готовится к выплавке в доменной печи, что в конечном итоге позволяет получить сталь. При спекании смесь порошков под воздействием высоких температур превращается в пористую массу, которая затем помещается в доменную печь. Как показано на рис. 1, исходная смесь, состоящая из тонко измельченной железной руды, кокса (топлива) и флюса (известняка), подается в установку для переработки и воспламеняется, при этом снизу всасывается воздух для ускорения процесса воспламенения кокса, а также для улучшения частичного плавления, затвердевания, кальцинирования и сушки руды.

Повышение эффективности, особенно в производстве, часто заключается в сокращении времени производственного цикла. «Если мы сможем ускорить процесс и сократить время производственного цикла, эффективность будет возрастать, — объясняет Ялчин Каймак, научный сотрудник BFI. — Более высокая эффективность позволит повысить нашу производительность, сберечь энергию и даже уменьшить выбросы». В процессах спекания уменьшение времени производственного цикла достигается благодаря ускорению сгорания смеси. Общая эффективность также зависит от таких факторов, как проницаемость и пористость смеси, скорость потока, распределение температуры и общая прочность агломерата. Доктор Каймак, доктор Хаук из BFI и доктор Хиллерс из компании Shuangliang Clyde Bergemann изучают влияние всех этих факторов с помощью численного моделирования.

Одно из возможных решений, которое изучала компания BFI, — аэрация сырьевой смеси во время подачи с использованием горизонтальных и (или) вертикальных стержней проницаемости (рис. 2). По мере перемещения конвейерной ленты горизонтальные стержни проницаемости создают горизонтальную область локальной аэрации овальной формы. Вертикальные стержни проницаемости разделяют уплотненный слой для создания прямоугольной области аэрации. В этом случае область расположена в вертикальной плоскости вдоль вертикальной оси стержня. Стержни проницаемости увеличивают пористость слоя, тем самым улучшая подачу воздуха к топливу, ускоряя горение и повышая эффективность. Основное внимание было уделено определению оптимальной конфигурации стержней, которая приведет к наиболее существенному увеличению пористости.

включающая множество подпроцессов, в том числе теплопередачу, химические реакции плавления и затвердевания и физику потока пористой среды. Для эффективного соединения этих физических процессов используется мультифизическое моделирование. «Пакет COMSOL Multiphysics быстро работает и легко настраивается под конкретные задачи, — говорит доктор Каймак. — Вы можете редактировать выражения и управлять сеткой в соответствии с вашими потребностями». Большое преимущество состоит в том, что в модели можно самостоятельно задавать выражения, описывающие распределение проницаемости. Это важный шаг в описании локальной проницаемости базовой смеси. Для определения этих распределений проводятся экспериментальные измерения скорости воздуха при заданных условиях. При прохождении воздуха через смесь можно

⇒ МУЛЬТИФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СПЕКАНИЯ

Математическая модель, необходимая для имитации сжигания во время спекания железной руды, — действительно мультифизическая задача,

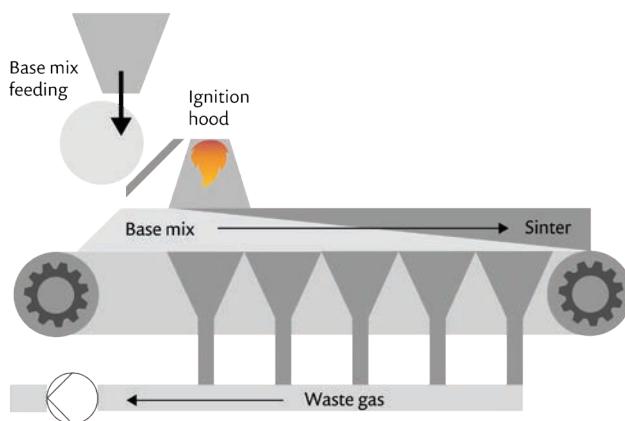


РИС. 1. Схема процесса спекания.

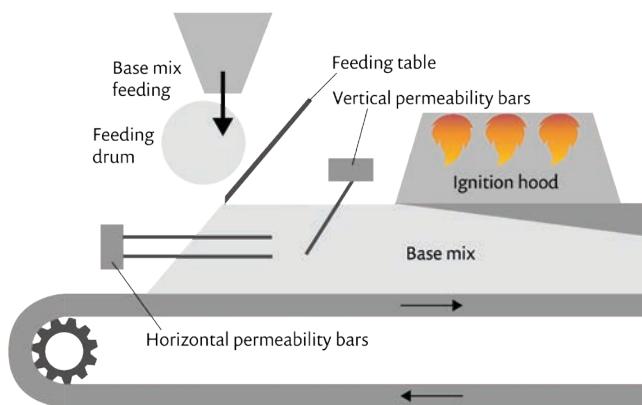


РИС. 2. Схема процесса спекания с добавлением стержней проницаемости.

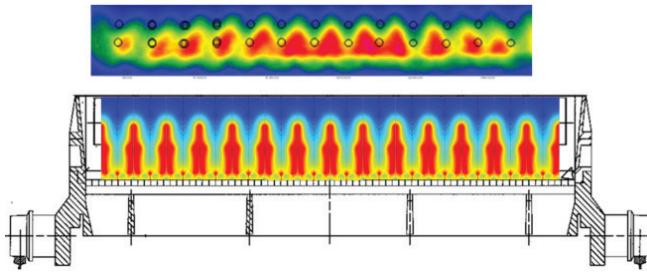


РИС. 3. Измеренная фактическая (вверху) и смоделированная (внизу) зона высокой температуры на выходе.

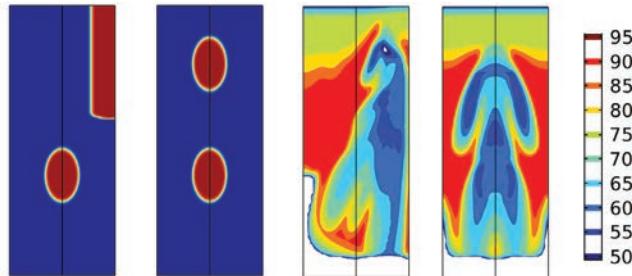


РИС. 4. Оценка качества для двух конфигураций стержней проницаемости.

измерить соответствующие скорости движения воздуха, а затем установить распределение проницаемости и ввести эти данные непосредственно в программное обеспечение.

Тщательно изучив распределение проницаемости и перенеся его в общую модель, можно смоделировать переходный процесс спекания, рассчитать профиль температуры и подробно изучить различные конфигурации. Кроме того, для вычисления многочисленных соответствующих параметров используется функция интегрирования по времени для обыкновенных дифференциальных уравнений в общем виде, что дает возможность всесторонне охарактеризовать влияние различных конфигураций на процесс спекания. Эти параметры включают полную величину энергии на входе и выходе, содержание влаги, общее количество вводимых веществ, общее потребление энергии на входе зажигателя, общее количество веществ на выходе и общий объем газа.

Поскольку горение является важной частью процесса спекания, профиль температуры определенной конфигурации напрямую влияет на время завершения спекания и прочность агломерата. Прочность — ключевой показатель качества агломерата, поскольку высокая прочность агломерата означает, что он может выдерживать суровые условия доменной печи. Прочность агломерата измеряется с помощью испытаний на удар и обычно увеличивается со временем, проведенным при температуре выше точки плавления. Таким образом, локальные нестационарные профили температуры можно использовать для оценки местной прочности в холодном состоянии. Это приводит к разному качеству агломерата в поперечном сечении, как показано в верхней части рис. 3.

Профили температуры, полученные в результате моделирования, точно соответствовали данным на выходе из установки, наблюдаемым с помощью инфракрасной термографии. Небольшие круги на термограмме на рис. 4 показывают положение горизонтальных стержней проницаемости. Легко понять, что положения стержней проницаемости совпадают с областями низкой температуры. Такая же тенденция наблюдается в процессе моделирования.

⇒ РЕЗУЛЬТАТЫ И БУДУЩАЯ РАБОТА

Из результатов моделирования видно, что при оптимальной конфигурации стержней проницаемости скорость спекания может быть увеличена до 40 %. Такие оптимальные конфигурации состоят

из двух уложенных в штабель рядов горизонтальных стержней или вертикальных стержней с горизонтальными стержнями между ними. Конфигурация с двумя рядами горизонтальных стержней показана на рис. 5. Теперь, поскольку VFI стремится усложнить модель и расширить сферу ее применения, институт будет работать над сохранением качества и прочности в процессе спекания.

Чтобы повысить точность и увеличить мощности производства, планируется расширить модель, чтобы в уравнениях конвекции учитывать явления диффузии и дисперсии, а также выбросы оксидов азота (NOx). Также планируется использовать Среду разработки приложений для создания и внедрения удобных приложений для моделирования, чтобы помочь операторам, работающим на установке. Опытные пользователи приложения могут настраивать интерфейс и управлять исходной информацией и результатами, отображаемыми на экране, что позволит работникам без опыта моделирования полностью сосредоточиться на управлении соответствующими параметрами. Эти приложения могут быть развернуты с помощью продукта

COMSOL Server™ для работников в рамках всей организации, что расширит возможности для мультифизического моделирования. Особый интерес

«Пакет COMSOL Multiphysics быстро работает и легко настраивается под конкретные задачи.»

— ЯЛЧИН КАЙМАК, НАУЧНЫЙ СОТРУДНИК VFI

для них представляют удельный расход энергии, температура подложки, температура выхлопных газов, потребление кокса, кальцинирование, сульфатирование, конденсация и качество агломерата. «Операторы не имеют опыта моделирования или не знают деталей программного обеспечения, — поясняет доктор Каймак. — Однако с помощью удобного приложения они могут экспериментировать с важными для них параметрами, быстро менять модель и сразу видеть результаты».



РИС. 5. Система подачи смеси в агломерационной установке с двумя рядами горизонтальных стержней проницаемости.

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ПАССАЖИРСКИХ АВТОМОБИЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ПРИЛОЖЕНИЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Компания Mahindra обратилась к приложениям для моделирования, чтобы ускорить процесс разработки своих продуктов и стимулировать развитие культуры сотрудничества.

Автор **АДИТИ КАРАНДИКАР**

Разработка продукта в современной автомобильной промышленности — это итерационный процесс, требующий тесного сотрудничества между специалистами по системам инженерного анализа (CAE), конструкторами, производственной группой и поставщиками. С учетом того, как быстро новые модели автомобилей сегодня выводятся на рынок, оптимизация итерационного процесса и сохранение конкурентного преимущества в сегодняшнем потребительском ландшафте возможны только при условии эффективного сотрудничества. Для достижения своих целей такие компании, как Mahindra, стремятся обновить процесс производства, а также обеспечить ожидаемый уровень качества, безопасности и надежности для потребителей их продукции. Важными для успеха группы являются приложения для моделирования, которые делают процесс разработки более доступным и надежным.

⇒ ТРУДНОСТИ РАЗРАБОТКИ ПРОДУКТА

Сотрудничество — трудоемкий процесс, в котором разные группы должны использовать свой опыт самым рациональным и эффективным образом. Конструкторам требуется оценить новые идеи или откорректировать существующие разработки, что может оказаться затруднительным из-за сложности связанных с ними физических явлений. У специалистов системы инженерного анализа имеется опыт моделирования, и они способны справляться со сложными и многоуровневыми задачами. Они могут помочь оценить новые идеи, проведя компьютерный инженерный анализ. Но из-за ограниченного числа аналитиков и растущего объема запросов эти оценки становятся все труднее получить вовремя.

Время разработки для отдельной детали транспортного средства зависит от количества повторных итераций, необходимых для ее завершения, и в некоторых случаях может занять

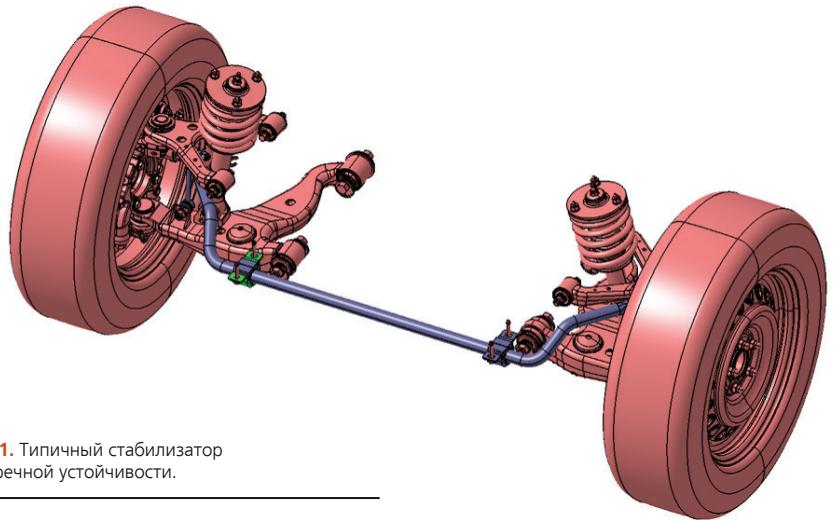


РИС. 1. Типичный стабилизатор поперечной устойчивости.

несколько месяцев. В зависимости от сложности представленного проекта только инженерный анализ может занять несколько недель или месяцев. Основываясь на результатах моделирования, разработчики вносят определенные изменения и снова ожидают результатов повторного инженерного анализа. Эти итерации имеют решающее значение для безопасности и надежности транспортного средства.

Чтобы решить проблему дефицита времени, специалисты по численным методам компании Mahindra изучили Среду разработки приложений, доступную в пакете COMSOL Multiphysics®. Они рассмотрели различные варианты конструкции стабилизатора и шасси с помощью приложений для моделирования. Приложения позволили значительно сократить

продолжительность этапов разработки по сравнению с традиционным подходом.

⇒ ИННОВАЦИОННЫЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ СТАБИЛИЗАТОРА

Критическим компонентом подвески, используемым для ограничения крена транспортного средства, является стабилизатор, показанный на рис. 1. Конструкция обычно представляет собой полую или сплошную балку со множеством изгибов. Чтобы точно смоделировать деформации и напряжения в таком компоненте, разработчики должны убедиться, что стабилизатор имеет соответствующую жесткость и уровень напряжений. Для этого они либо обращаются к специалистам по компьютерному инженерному анализу, либо получают соответствующее подтверждение от поставщиков. После проверки модели и установления соответствия результатов и экспериментальных данных было создано приложение для моделирования.

В приложении для моделирования стабилизатора можно опробовать разнообразные конструкции, в которых

« Приложения позволили значительно сократить продолжительность этапов разработки по сравнению с традиционным подходом. »

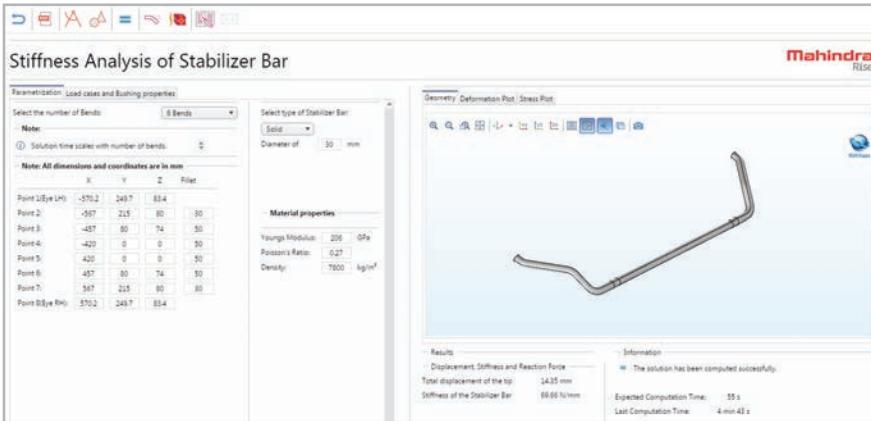


РИС. 2. Приложение для моделирования, которое позволяет создавать геометрию и вычислять жесткость и смещение стабилизатора.

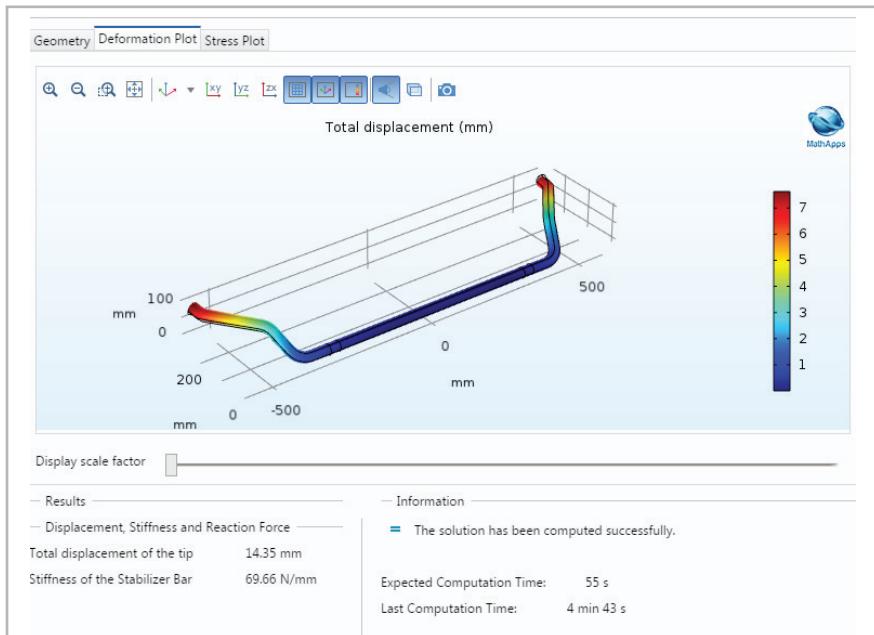


РИС. 3. Результаты, полученные с помощью приложения, которое вычисляет жесткость конкретной конструкции стабилизатора.

число изгибов может достигать пятнадцати и есть возможность использования полой или сплошной балки, как показано на рис. 2. Конечный пользователь, как правило, один из разработчиков, вводит координаты изгибов для определения геометрии стабилизатора и указывает местоположение подшипника, жесткость втулки и параметры поперечного сечения. Специалист по компьютерному инженерному анализу заранее вводит ограничения в приложении, что позволяет разработчикам быстро и просто выполнять точное моделирование, вычислять жесткость стержня, а также моделировать напряжения для стандартных нагрузок, как показано на рис. 3. Расчет в приложении обычно занимает несколько минут, что позволяет разработчикам запускать последовательные итерации и получать

результаты, которые можно использовать для следующего этапа разработки. Зная, что приложение для моделирования основано на проверенной мультифизической модели, разработчики уверены в результатах, даже если они не учились компьютерному моделированию. Специалисты компании Mahindra убедились, что приложения позволяют значительно экономить время и способствуют сотрудничеству. Кроме того, благодаря новой культуре сотрудничества работники больше вовлечены в процесс создания готового продукта, поскольку разработка стала занимать один-два дня и меньше зависит от поставщиков.

⇒ УМЕНЬШЕНИЕ ЧИСЛА ЭТАПОВ РАЗРАБОТКИ ШАССИ

Шасси — еще один важный несущий элемент, который обеспечивает жесткость автомобиля и служит основой для монтажа других компонентов, таких как двигатель и трансмиссия. Распространенная конструкция шасси — рама лестничного типа с двумя длинными боковыми элементами и несколькими поперечинами (рис. 4). Количество, размер, положение и форма поперечных элементов — важные параметры, которые задаются на ранней стадии процесса разработки.

Нагрузка, которую несет шасси, подразумевает сочетание изгибающих и крутящих нагрузок, для которых нет простых аналитических решений. Традиционный подход к решению этой проблемы — оценить несколько конструкций шасси на основе требований к компоновке, а затем для завершения проектирования выполнить множество итераций компьютерного инженерного анализа. Правильная компоновка означает, что все детали работают вместе без каких-либо помех, и гарантирует удобный

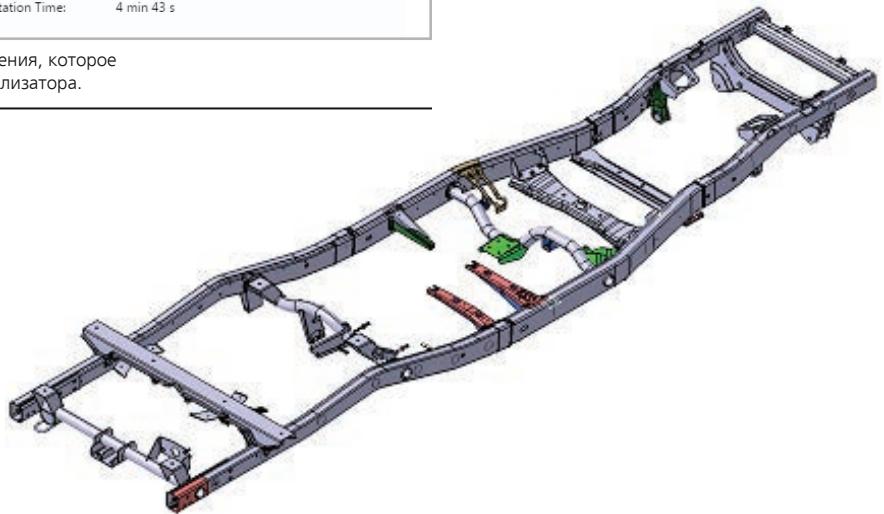


РИС. 4. Геометрия, созданная в программном пакете CATIA®, представляющая конструкцию шасси обычного грузопассажирского автомобиля.

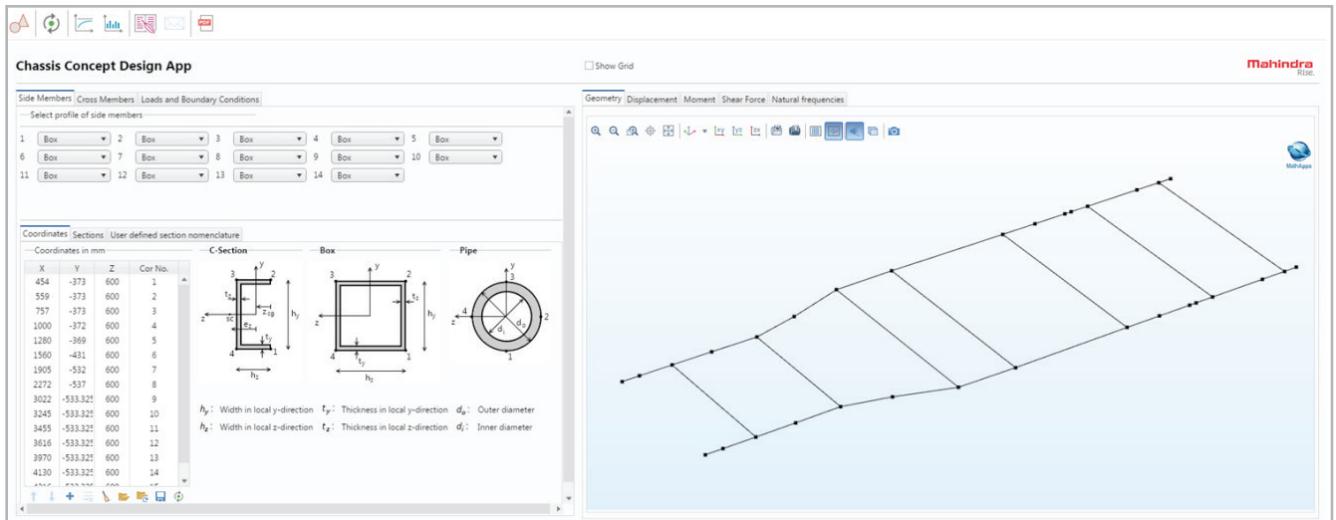


РИС. 5. Пользовательский интерфейс приложения для моделирования шасси, доступного на внутреннем портале компании Mahindra под названием MathApps.

доступ для сборки и разборки шасси. Оптимальная конструкция должна быть механически надежна и одновременно отвечать требованиям к компоновке. С учетом соображений компоновки каждый полный этап инженерного анализа включает в себя три отдельных типа анализа: на сопротивление изгибу, на жесткость при кручении и модальный анализ. Этот подход требует от трех до четырех полных этапов инженерного анализа, каждый из которых обычно занимает от двух до трех недель.

Используя пакет COMSOL Multiphysics, инженеры смогли объединить три разных типа анализа, в результате чего потребовался всего один или два полных этапа инженерного анализа, что позволило сэкономить драгоценное время. Затем они продолжили создание приложения для моделирования шасси на основе одномерных балок (рис. 5) и теории упругости Тимошенко. Конечному пользователю не обязательно знать, что лежит в основе математической модели, чтобы пользоваться приложением. Моделирование может быть выполнено за считанные секунды даже для сложной конструкции шасси с различными поперечными сечениями и элементами. Балочный анализ обеспечивает быстрые и надежные результаты для большого набора конструкций и позволяет вычислить жесткость при кручении, сопротивление изгибу и смещение, как показано на рис. 6. Приложение для моделирования используется группой разработки подвески шасси, отвечающей за конструкцию шасси и стабилизатора. Приложение удобно тем, что позволяет оценить параметры конструкции с помощью простых текстовых полей вместо создания модели в CAD-системе для каждой конструкции, что экономит время и специалиста по компьютерному инженерному анализу, и инженера разработки подвески шасси.

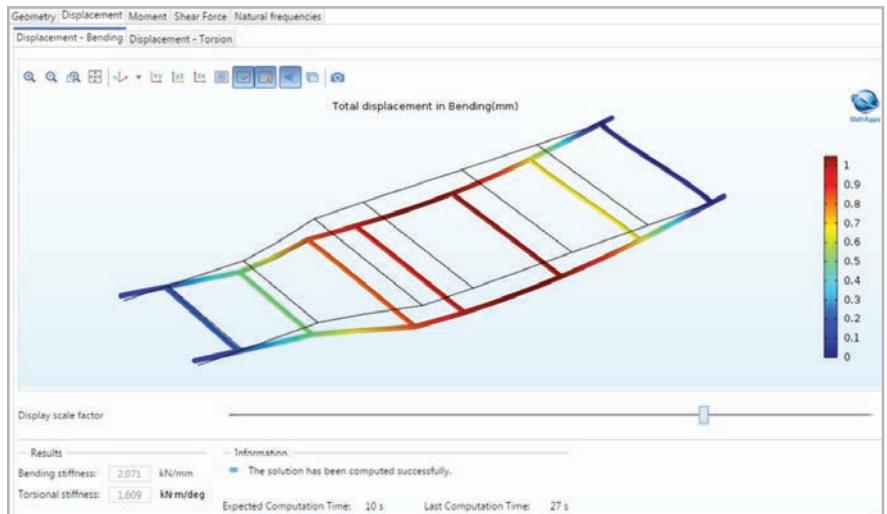


РИС. 6. Результаты, полученные с помощью приложения для моделирования шасси для конкретной конструкции.

⇒ ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПЛАНЫ НА БУДУЩЕЕ

Уникальность приложений, используемых в компании Mahindra, заключается в их способности обрабатывать широкий диапазон параметров, физических явлений и граничных условий. Это позволило инженерам изучить различные варианты конструкции на ранней стадии разработки продукта, не полагаясь на специалистов по компьютерному инженерному анализу и не тратя время на дополнительную подготовку по численному моделированию. Результаты параметрических исследований представлены в виде руководства по проектированию, что позволяет создавать эффективные и экономичные продукты.

Приложения для моделирования были разработаны по результатам подробных обсуждений с разработчиками и специалистами по инженерному анализу, а затем внедрены в различных отделах компании Mahindra через локальную установку продукта COMSOL Server™. Сложные конструкции, ранее находившиеся в ведении специалистов по компьютерному инженерному анализу, стали доступны конструкторам в удобной и простой в использовании форме. С помощью мультифизического моделирования и соответствующих приложений компания Mahindra расширила возможности моделирования, и в будущем сможет включать в анализ виброакустические и термочностные процессы. ❖

МУЛЬТИФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НА ЗАЩИТЕ ВЕТРЯНЫХ ТУРБИН ОТ МОЛНИЙ

Мультифизическое моделирование помогает инженерам компании NTS понять, что происходит, когда молния ударяет в ветряную турбину.

Автор **ГЭРИ ДЕГЕСТАЙН**

По мере того как во всем мире пытаются уменьшить количество потребляемого ископаемого топлива на основе углеводородов, глобальный рынок ветряных турбин растет и, по прогнозам, в ближайшие несколько лет достигнет объема около 70 миллиардов долларов в год. Несмотря на то что такой рост является огромным достижением, другая мощная сила природы — молния — мешает развитию потенциала ветроэнергетики.

Удары молнии — самая частая причина незапланированных простоев ветряных турбин, что приводит не только к потере неисчислимых мегаватт мощности, но и к огромным затратам на эксплуатацию и техническое обслуживание.

Ветряные турбины особенно чувствительны к ударам молнии из-за того, что обычно строятся на открытых местах, а также из-

за их большой высоты и больших вращающихся лопастей. Молния может нанести серьезный ущерб, как прямо, так и косвенно, практически всем компонентам ветряных турбин, включая лопасти, системы управления и другие электрические компоненты. Ремонт не только дорого стоит, но и физически сложен из-за логистических ограничений.



РИС. 1. Высоковольтный генератор (генератор Маркса на 2,4 МВ), используемый в компании NTS.

Компания Lightning Technologies из группы компаний NTS — лидер в разработке и валидации сложных систем молниезащиты для аэрокосмической промышленности, в том числе самолетов, космических аппаратов и пусковых установок. Компания также разрабатывала системы защиты для ветряных электростанций, промышленных комплексов, полей для гольфа, парков аттракционов и других объектов, часто поражаемых молниями.

Инженеры компании NTS принимают активное участие в работе комитетов Международной электротехнической комиссии (МЭК), которые определяют стандарты, связанные с разными степенями удара молнии и условиями, которые должны выдерживать лопасти. Согласно отраслевым нормативам, таким как МЭК 62305, производители ветряных турбин должны включать систему молниезащиты в конструкцию самих лопастей. Для максимальной защиты важно знать, какой силы ток может протекать через лопасть после удара и где именно он будет течь. Проблема в том, что простые приблизительные оценки действия тока грозового разряда часто приводят к неточным выводам.

⇒ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОКА ГРОВОГО РАЗРЯДА

Компании NTS принадлежит одна из самых мощных лабораторий моделирования удара молнии площадью 1672 кв. м (18000 фут²) в Питтсфилде, штат Массачусетс, США, с генераторами молнии высотой 4,3 и 7,6 метра, способными создавать разряд напряжением до 2,4 МВ (рис. 1).

В течение десятилетий компания NTS участвовала в исследованиях и разработке проектов защиты лопастей ветряных турбин. Поскольку лопасти ветряных турбин работают как аэродинамические профили, компания может напрямую применять свой обширный опыт в области аэрокосмического моделирования.

Джастин Маккеннон, возглавляющий группу моделирования и численного анализа в компании NTS, поясняет, что традиционные системы защиты ветряной турбины включают в себя слой защитного покрытия поверх легких высокопрочных композитных лопастей из углеродного волокна. Часто слой защитного покрытия состоит из проводящей сетки, предназначенной для безопасного перенаправления тока разряда от точки попадания в лопасть к заземлению.

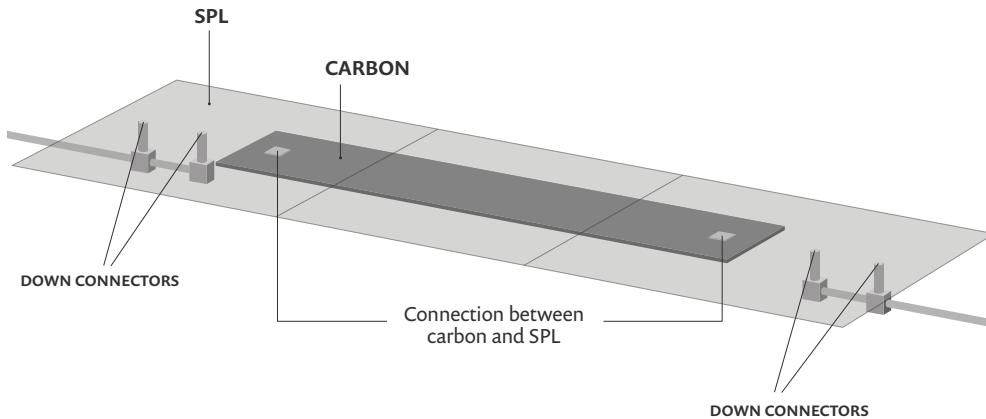


РИС. 2. Геометрия тонкого алюминиевого слоя защитного покрытия, размещенного поверх углеродного слоя.

«Конструкция многих лопастей состоит из слоев углеродного волокна, идущих параллельно слою защитного покрытия, с периодическими электрическими перемычками между углеродным слоем и слоем защитного покрытия по всей длине лопасти, — объясняет Маккеннон. — Это делается для того, чтобы не допустить появления высоковольтного потенциала между слоями, в противном случае это приведет к возникновению электрической дуги, которая может повредить лопасть. Однако, хотя эти электрические перемычки могут снизить напряжение, они также позволяют току протекать через углеродный материал, что требует дополнительных конструктивных решений».

Анализ способности углеродного слоя пропускать различное количество тока, а также учет других факторов, например, вероятных точек попадания молнии и потенциальной возможности пробоя, — задача нетривиальная. Маккеннон поясняет, что из-за затрат на реальную проверку этих лопастей, некоторые из которых составляют 70 или более метров в длину, численное моделирование влияния электрического разряда молнии стало важной частью цикла разработки.

«Из-за комплексной природы физических явлений легко сделать неправильные предположения, которые могут серьезно повлиять на точность моделей», — говорит Маккеннон.

⇒ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОКРАЩАЕТ ПЕРЕИНЖЕНЕРИНГ

Есть частое, но неправильное мнение, что электропроводность углеродных слоев одинакова во всех направлениях, хотя на самом деле электропроводность углерода в разных направлениях может существенно различаться.

На рис. 2 показана геометрия углеродного слоя, размещенного на 5 мм ниже сетки защитного покрытия толщиной 500 мкм, изготовленного,

в свою очередь, из алюминиевого листа, электропроводность которого определяется на основе экспериментальных измерений. Электропроводность углерода также задается в соответствии с экспериментальными значениями, и его идеальное изотропное и реальное анизотропное поведение было смоделировано с помощью пакета COMSOL.

Наша способность быстро создавать и модифицировать модели значительно снижает риск программных сбоев и позволяет получать инженерные данные для прототипа практически по первому требованию.

Для описания тока, входящего с одной стороны слоя защитного покрытия, используется аналитическое представление формы сигнала по стандарту МЭК. Ток выходит с противоположной стороны через токоотвод,

который сделан из меди, как и все соединения с углеродным слоем.

Решая волновое уравнение для магнитного векторного потенциала во временной области в программном обеспечении COMSOL Multiphysics®, Маккеннон рассчитал распространение электромагнитного импульса в рассматриваемой топологии защитного слоя. Результаты позволили ему определить распределения токов, электрических полей и других величин, в том числе в точках подключения, что дало детальное понимание общего поведения тока во всей системе.

В изотропной модели снижается величина тока, проходящего через слой защитного покрытия, поскольку предполагается, что больше тока проходит через углеродный слой, а не через слой защитного покрытия (рис. 3). Углеродный материал состоит из множества слоев отдельных волокон. Он хорошо проводит ток

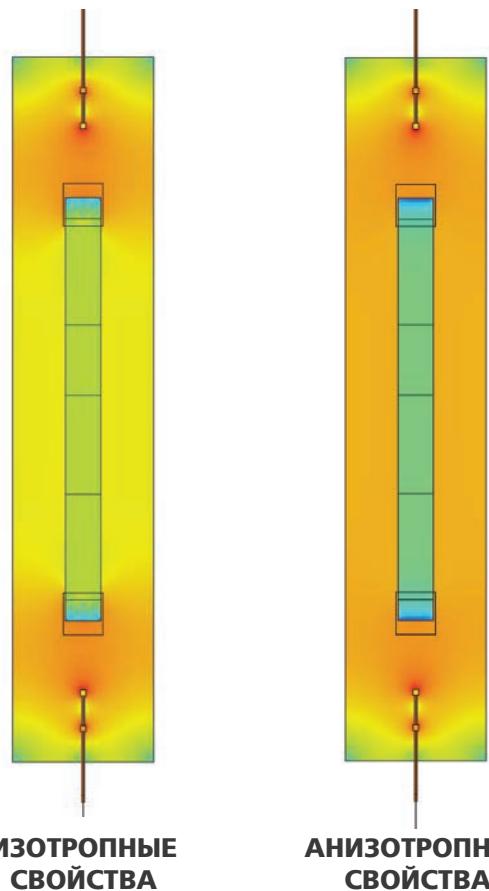


РИС. 3. Результаты расчетов, показывающие, что величина тока в слое защитного покрытия в случае идеальной изотропной модели значительно меньше, чем в реалистичной анизотропной модели.

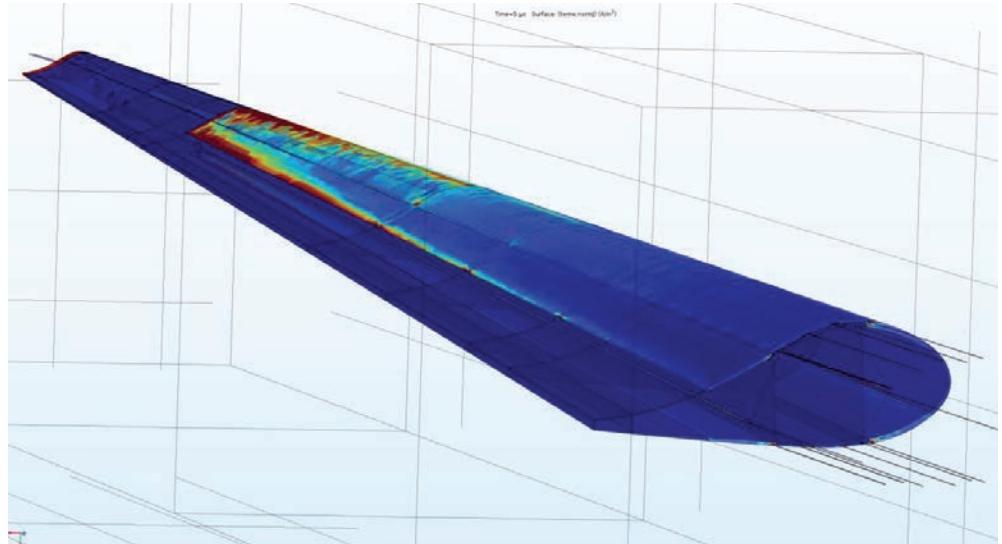


РИС. 4. Распределение плотности тока на образце лопасти ветряной турбины, состоящей из нескольких углеродных слоев.

в направлении волокна, но внутрь волокон ток проходит с трудом. Если слишком большое количество тока проходит через границу углеродного и другого материала, множество углеродных волокон сгорает при нагревании и (или) из-за электрической дуги (рис. 4). Углеродный материал несет основную механическую нагрузку, и повреждения в этой области значительно сокращают срок службы лопасти, а в некоторых случаях могут привести к ее полному разрушению. Инженеры обычно стараются снизить прохождение тока через углеродный материал.

В изотропной модели количество тока в углероде сильно завышено, так как не учитывается фактическая зависимость сопротивления в углеродном материале от ориентации волокон (рис. 5). Таким образом, с учетом его большого объема и сопоставимой длины слой углерода считается более предпочтительным путем для течения тока, чем слой защитного покрытия, хотя в реальности все не так. Такая неверная оценка привела бы к тому, что инженеры стали бы решать несуществующую проблему, замедляя процесс разработки и создавая чересчур сложный продукт.

Маккеннон поясняет: «При моделировании такого сложного физического явления действительно необходимо понимать, что важно, а что просто является посторонним шумом; необходимо тщательно и поэтапно строить модель, чтобы избежать ошибок или ложных предположений, которые могут существенно повлиять на результаты».

⇒ НАДЕЖНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДЛЯ БИЗНЕСА И КЛИЕНТОВ

«Наша способность быстро создавать и модифицировать модели значительно снижает риск программных сбоев и позволяет получать инженерные данные для прототипа практически по первому требованию, — говорит Маккеннон. — Вместо того чтобы тратить значительное количество времени и денег на создание сложных тестовых прототипов, мы можем использовать программный пакет COMSOL для моделирования физических явлений, резко сокращая необходимость эмпирических проверок. Во многих случаях важные данные просто нельзя получить на физических прототипах в условиях теста, и только численное моделирование спасает в таких ситуациях».

«Время в нашей отрасли — это деньги, и наши клиенты очень довольны услугами, которые мы можем предоставить благодаря таким возможностям, — продолжает Маккеннон. — На самом деле некоторые клиенты настолько уверены в правильности наших моделей, что начали делать оптовые закупки, основанные исключительно на наших результатах, с небольшой экспериментальной проверкой. Когда на карту поставлено так много, мы просто не можем позволить себе ошибаться, и мы доверяем программному пакету COMSOL, с помощью которого можем обеспечить высокую точность моделирования.» ❖

Current flowing through carbon

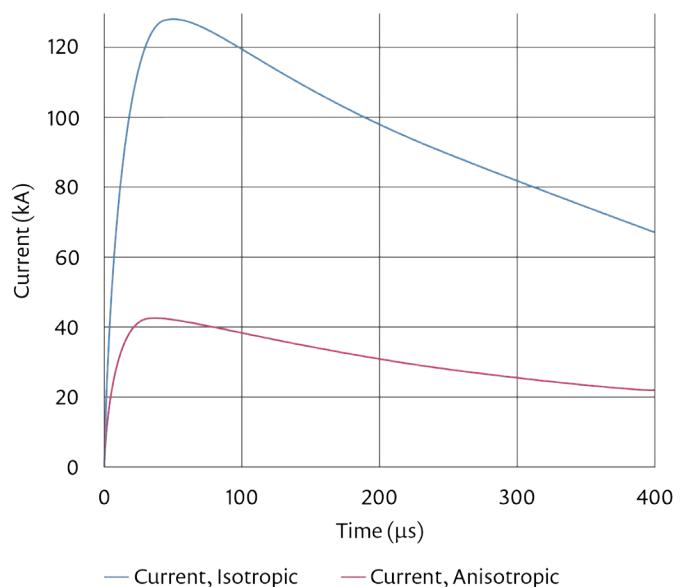


РИС. 5. Уровень тока в изотропной и анизотропной модели углеродного материала.



Джастин Маккеннон, руководитель группы моделирования и численного анализа компании NTS

Научно-техническое образование: приложения для моделирования дают знания, которые будут востребованы вне учебного класса

Автор **ИВАНА МИЛАНОВИЧ, УНИВЕРСИТЕТ ХАРТФОРДА**

Когда-то преподавать было легко: в классе была доска и мел, ученики решали практические задачи и получали домашние задания. Мало что менялось на протяжении многих десятилетий, независимо от того, с какими инструментами мы работали: будь то карандаш, логарифмическая линейка или калькулятор. Для того чтобы знакомить студентов с новейшими достижениями науки и рассказывать им о самых востребованных навыках, в учебные программы бакалавриата по инженерным дисциплинам включались курсы по выбору и курсы магистерского уровня. Профессора читали лекции в стиле диалогов Сократа или без дискуссионной составляющей, а также выводили множество формул.

Нашей целью было повысить эффективность обучения и подготовить будущих выпускников к профессиональной деятельности, поэтому мы разработали новые педагогические модели, такие как проблемно ориентированное, проектное и исследовательское обучение. Тем не менее такие исследования требуют значительных временных затрат как в учебной аудитории, так и за ее пределами.

Но времени в рамках лекционных курсов, где количество тем для изучения строго регламентировано, на это обычно не хватает. Как же повысить качество научно-технического образования на уровне бакалавриата?

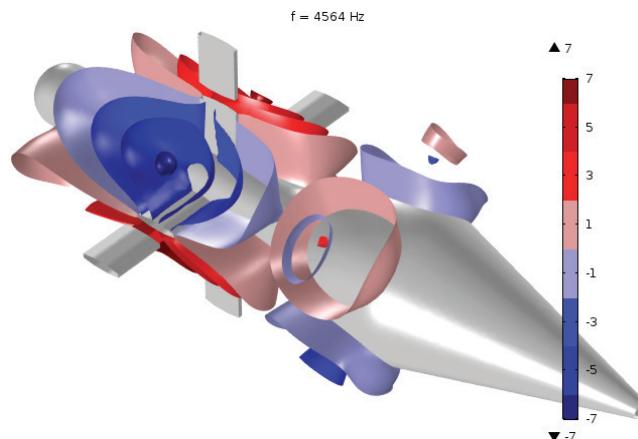
«Наш опыт показывает, что объединение в учебном процессе методик математического и инженерного моделирования и инструментов визуализации значительно повышает производительность студентов в классе и, кроме того, положительно сказывается на их карьере.»

Наш подход сочетает в себе методы проблемно ориентированного и исследовательского обучения, численное моделирование и создание приложений на основе программного обеспечения COMSOL Multiphysics®. При этом мы делаем акцент на внеклассное обучение с опорой на эффективные справочные материалы и советы кураторов. Теперь в основе обучения не стандартные лекции, а материал, знание которого имеет ключевое значение для достижения профессионального успеха в будущем. В итоге студенты стали более заинтересованы в процессе обучения, что сказалось на их отметках.

В Университете Хартфорда мы внедрили элементы проектирования и моделирования и методику исследовательского обучения в два последовательных курса лекций для студентов-третьекурсников: по гидродинамике и теплопередаче. Оба курса были модифицированы таким образом, чтобы студенты имели возможность участвовать в тематических учебных проектах по моделированию. Они учатся создавать приложения, приобретают более глубокие знания по теплогидродинамике, решая технические задачи, а также практикуются в написании исследовательских отчетов — все это дает студентам реальный опыт технического моделирования и разработки. Приложения включают упрощенный интерфейс, который позволяет эффективно использовать возможности модели, не посвящая конечного

пользователя во все сложности. Чтобы достичь этого, мы решили отказаться от оценки домашних заданий и средних баллов. Студенты осваивают теорию и решают аналитические задачи посредством обсуждения в классе и самостоятельно, а оценка теоретических знаний и аналитических навыков базируется на экзаменах в течение семестра.

Требования к аккредитации и экономические ограничения приводят к тому, что учебные программы для инженеров редко включают курс вычислительной гидродинамики. Однако, как показывает наш опыт, объединение в учебном процессе методик математического и инженерного моделирования и инструментов визуализации значительно повышает производительность студентов в классе и, кроме того, положительно сказывается на их карьере.



Изоповерхности давления в типичном многопоточном сопле реактивного двигателя. Изображение предоставлено профессором Иваной Миланович из Университета Хартфорда, Хайрулом Заманом и Кристофером Миллером из Исследовательского центра Гленна при НАСА. Resonance & Tones in Multi-Stream Nozzle Flows (Резонансы и тоны в многопоточных соплах), отчет NASA за 2017 год. Студенты бакалавриата Илиана Альбион-Полес и Джеффри Северино продолжают эту работу, поддерживаемую грантом штата Коннектикут для университетских исследований для аэрокосмических приложений.



ОБ АВТОРЕ

Ивана Миланович — профессор в области машиностроения в Университете Хартфорда. Автор более 90 журнальных статей, отчетов НАСА, статей для конференций и обзоров программного обеспечения и релизов. Доктор Миланович является членом Академии наук и техники штата Коннектикут — организации ученых и инженеров, которая оказывает поддержку и предоставляет экспертные советы государственным учреждениям и законодательным органам. Она получила степень кандидата технических наук (PhD) в Технической школе Тандонов в Нью-Йоркском университете, а также степени магистра (MS) и бакалавра (BS) в Белградском университете в Сербии.