

## От термометра к датчику теплового потока



Исследователи Высшей школы атомной и тепловой энергетики Института энергетики СПбПУ создали метод градиентной теплотрии для изучения процесса теплообмена.

Новый подход к контролю параметров процесса теплообмена позволит повысить энергоэффективность генерирующих мощностей АЭС, ТЭС и котельного оборудования, благодаря оптимизации их работы на этапе генерации. Недавно Высшая школа получили три гранта Российского научного фонда (РНФ) на развитие этого направления.

Сегодня наш собеседник – Андрей Владимирович Митяков, доктор технических наук, профессор Высшей школы атомной и тепловой энергетики Института энергетики СПбПУ.

**- В сфере ЖКХ часто употребляют термины «тепло» или «тепловая энергия», почему вы считаете их некорректными?**

- Мы эти термины стараемся не использовать, так как они противоречат представлениям термодинамики и молекулярно-кинетической теории газов. Есть такая физическая величина, называемая «тепловой поток».

Вся наша жизнь и существование человека как организма основаны на законах термодинамики и теплообмена. Мы выделяем теплоту, обмениваемся ею, как нагретое тело, с окружающей средой.

Человечество более 100 лет тому назад научилось измерять температуру. Температура – следствие передачи теплоты, передачи энергии, но не причина. Практически никто не измеряет тепловой поток. Мы с коллегами изобрели и создали устройство под названием «датчик теплового потока» – прибор, первичный преобразователь, который вырабатывает электрический сигнал, измеряемый с помощью аппаратуры, и этот сигнал пропорционален именно тепловому потоку. За последние 25 лет мы существенно улучшили конструкцию нашего датчика, и должен сказать, что разработка уникальна в мировом масштабе, так как принцип, который реализован в нашем устройстве, не имеет аналогов. А конкурентов в мире всего пять. Часть из них – научные центры, часть – коммерческие организации: научные школы по направлению «теплотрия» находятся в США, Германии, Швейцарии, Голландии и на Украине. Но все наши конкуренты измеряют разность температур на известном расстоянии и по этой разности температур, основываясь на законах теплопроводности, определяют тепловой поток. Потому что теплопроводность напрямую связывает разность температур и тепловой поток.

Мы работаем с веществом, которое дает нам выходной сигнал, пропорциональный градиенту температуры (это отношение в пределе разности температур к расстоянию между точками), и наш датчик получается очень точным и выдает показания мгновенно. Мы назвали его «градиентный датчик теплового потока» (ГДТП или GHFS – gradient heat flux sensor).

Чтобы понять разницу между температурой и тепловым потоком человеку, далекому от науки, скажу по секрету, что даже многие коллеги в научных кругах не понимают разницу между температурой и тепловым потоком. Они, например, по нашей просьбе опробовать датчик сунули его в кипяток – и он ничего не показал... Вот если бы они наклеили датчик снаружи чайника, тогда измерили бы тепловой поток, а внутри чайника можно измерить лишь температуру.

Само по себе распределение теплового потока важно не как самоцель, а потому, что все больше и больше работ во всех областях ведется численными методами с использованием компьютерных программ, моделирующих работу устройств, в том числе очень модная тема цифровых двойников. Чтобы любую компьютерную программу проверить, нужно получить в физическом, реальном эксперименте для этой программы реперные точки и произвести верификацию, сопоставив результаты расчетов с результатами эксперимента.

#### **- Когда появились датчики измерения теплового потока?**

- Термоэлектрический эффект – эффект Зеебека – был открыт в 1821 году немецким физиком из Ревеля Томасом Зеебеком.

В 1947 году немецкий ученый Людвиг Галлинг теоретически предсказал возможность измерения теплового потока с помощью датчиков, сделанных из анизотропных материалов. Это такие материалы, свойства которых зависят от направления. Например, дерево – анизотропный материал, а большинство металлов и сплавов – изотропные материалы.

Первые датчики наши коллеги сделали еще в 70-х годах XX века, но лишь в качестве демонстрационных образцов для школьных опытов на уроках физики. Эти датчики были выполнены из металла висмута (в чистом виде он существует как поликристалл), а если сделать его в виде монокристалла, то у него появляется как раз та особенность – при прохождении теплового потока через монокристалл появляется электрический сигнал, пропорциональный тепловому потоку.

Поработав с датчиком на основе висмута, мы продолжили свои исследования. Висмут всем хорош, но у него есть один недостаток – при температуре 271°C он просто плавится. Это температура его плавления. Использовать такие измерительные средства в большой энергетике крайне проблематично, но в сфере ЖКХ он вполне может найти применение.

Мы с коллегами пошли дальше и разработали из специальных материалов новый тип датчика, который может измерять тепловой поток при температуре окружающей среды до 2000°C. Научные эксперименты прошли успешно, и мы приступили к промышленным опытам в большой энергетике – измеряли тепловой поток на котлах высотой 30 метров в Кировской области. Также провели измерения внутри автомобильного дизеля, в электрогенераторе 160 МВт.

#### **- Какое ключевое отличие датчика теплового потока от других измерителей?**

- У всей измерительной аппаратуры можно выделить две важных характеристики: уровень выходного сигнала (чтобы его можно было измерить электронной аппаратурой, оцифровать) – это чувствительность. Второй важный параметр – быстродействие (или постоянная времени) – насколько быстро преобразователь реагирует на изменения измеряемой величины.

Созданный нами датчик показывает уникальное быстродействие. Опыты, специально проведенные в Политехе, в научных центрах в Новосибирске и Штутгарте, показали: быстродействие наших датчиков составляет порядка 10 наносекунд. Такого быстродействия не может достигнуть ни один датчик конкурентов, измеряющий тепловой поток.

Зарубежные образцы имеют быстродействие порядка 10 секунд. Для ЖКХ этого достаточно, но как показал наш опыт, когда раньше люди измеряли тепловой поток такими датчиками, они думали, что процесс, который они изучают, стационарный. Но этот вывод основан на той основе, что быстродействие датчиков 10 секунд. Когда похожие процессы стали изучать с помощью наших быстродействующих датчиков, то увидели, что все очень нестационарно, даже в области, например, строительных конструкций.

#### **- Как на практике использовать датчик теплового потока?**

- Порядка 70 различных научных промышленных экспериментов было выполнено за последние 25 лет с разными организациями и научными центрами в России и за рубежом по измерению теплового потока в разных задачах. Например, выполняли работы по измерению теплового потока в модели ядерного реактора, в силовой электронике, которая выделяет теплоту в зависимости от силы протекающего в ней тока. Проводили контроль литий-ионных аккумуляторных батарей, которые выделяют тепло не только в процессе разряда, но и в процессе заряда.

Мы увидели, например, что результаты мониторинга тепловыделения аккумуляторных батарей с помощью наших датчиков позволяют нам перейти к интересной фундаментальной термодинамической величине нашей Вселенной – мы научились измерять изменение энтропии в данном случае аккумуляторной батареи, по которой мы определяем известный для батарей параметр state of health (SOH) – показатель годности (здоровья) батареи.

Лет 10 назад в одном американском научно-популярном издании опубликовали статью, в которой приводились примеры использования измерения теплового потока: представьте себе, что мы находимся в пасмурную прохладную погоду в комнате, в которой работает отопление, вдруг туча уходит, и в окна начинает светить солнце, вместе с его лучами поступает достаточно большой тепловой поток. (Например, на широте Санкт-Петербурга эта величина составляет примерно 1 кВт на 1 квадратный метр.) Если в этот момент с помощью быстродействующего датчика теплового потока зафиксировать поступление и количество поступающей теплоты, и в комнате заранее выключить отопление, и запустить кондиционер, потому что с поступлением такого количества энергии скоро надо будет комнату охлаждать, то можно сэкономить. Это хорошо вписывается в концепцию «умного» дома. А сейчас человек просто открывает окно, энергия улетает в атмосферу безвозвратно.

В американском издании также написали, что когда автомобили въезжают в туннель при работающем кондиционере, то надо сразу включить отопление, потому что такое управление с опережением снизит затраты на отопление либо кондиционирование на 25%, если делать это упреждающе. И даже назвали эту систему по аналогии с известным термином feed forward control –

упреждающее управление.

Мы очень плотно работаем с одним из подразделений нашего университета – Топливо-энергетической службой – ведем научные исследования по применению датчиков теплового потока в топках котлов. Обычно измеряется температура воды на входе и на выходе. И по этим интегральным параметрам определяется, работает котел или нет: если холодно – добавили топлива, если горячо – убавили. А как происходит распределение пламени внутри, возможно, его надо как-то менять, чтобы котел работал более эффективно. Мы сейчас начинаем бороться за проценты КПД в энергетике, ведь они приносят серьезный возврат средств. С помощью наших датчиков мы можем контролировать и оптимизировать распределение факела в топке котла. С помощью датчика мы можем определить, что снизился тепловой поток у котла, например, из-за отложений шлака, и нужно заняться профилактической чисткой агрегата, а не увеличивать расход топлива.

#### **- В медицине можно найти применение датчику?**

- Недавняя работа с зарубежными коллегами показала, что даже человеческий организм мы можем изучать с помощью нашей разработки. Мы просто наклеили датчик теплового потока на запястье человека там, где находится артерия. Записали сигнал, который получили с этого датчика. Этот график теплового потока я показал коллеге – врачу. Он ответил: «А что ты мне показываешь обычную картинку из медицинского учебника “пульсация давления в сосуде”? Я говорю: “Это не давление! Это тепло, выражаясь бытовым языком”». То есть быстродействие и чувствительность датчика настолько высоки, чтобы «увидеть» свежую порцию крови, более насыщенную кислородом, температура которой выше на какие-то доли градуса, чем только что прошедшая до этого. И получившаяся диаграмма соответствует классическим представлениям о полной форме кривой пульсации давления в сосуде. Измерить пульсацию давления очень сложно, не внедряясь, неинвазивно – практически невозможно. А мы измеряем тепловой поток неинвазивно с помощью накладной системы, она может быть интегрирована, например, в часы или смарт-браслет.

#### **- Имеется ли опыт практического применения в промышленности и теплоэнергетике?**

- Лет 10 лет назад я общался с высокопоставленным работником крупной немецкой компании, которая занимается производством котельного оборудования. Рассказал ему о наших возможностях, разработках. Он отвел меня в сторону и сказал: «Мне все понравилось, все очень хорошо. Но, понимаешь, мы закупает датчики температуры у голландской компании, на которой работает 2 000 человек. Если я заменю их датчики на вашу разработку, то эти люди станут никому не нужны. А мы у них закупает продукцию уже 50 лет и планируем это делать и дальше».

То есть никто не хочет вносить изменения в отлаженный бизнес, приносящий хорошие дивиденды. Поэтому мы постоянно ищем партнеров среди отечественных и иностранных компаний-производителей, ставящих на внедрение перспективных инноваций. Сейчас одной из проблем, тормозящих внедрение нашего датчика, является отсутствие сертификата на средство измерения. Но средств на сертификацию у нас пока нет, а отечественные предприятия не готовы вкладывать дополнительные деньги.

Сейчас мы активно развиваем сотрудничество с очень крупным производителем котельного оборудования французской компанией De Dietrich, основанной в середине XVII века. Между Политехническим университетом и холдингом, в который входит сейчас эта компания (по данным на 2019-2020 год занимает 60% рынка России по поставкам котельного оборудования), подписано соглашение. В рамках этого договора мы создаем на территории Политеха совместную учебную научно-исследовательскую лабораторию площадью 45 квадратных метров, которая будет иметь 15 котлов, работающих на газе. Проект полностью готов, и в январе-феврале 2022-го начнутся общестроительные работы.

С представителями компании De Dietrich мы будем проводить эксперименты с использованием наших датчиков теплового потока на серийных котлах, чтобы предоставить данные по возможному улучшению их оборудования. Компания De Dietrich ставит оборудование безвозмездно, обязуется его обслуживать и оперативно менять линейку по мере выхода новых моделей. Компания сможет использовать площадку в качестве Северо-Западного учебного центра для обучения специалистов пользователей и повышения их квалификации. А мы сможем обучать студентов на действующем новейшем котельном оборудовании. Так что это комплексное решение вопроса.

В этой области Высшая школа атомной и тепловой энергетики также развивает сотрудничество с Комитетом по топливно-энергетическому комплексу и Центром энергосбережения Ленинградской области, которые заинтересованы во внедрении современного эффективного энергосберегающего оборудования.