

АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени доктора философии (PhD)
8D05303 - Теплофизика и теоретическая теплотехника

ҚИСАБЕКОВА ПЕРИЗАТ ӘУЕЛҚЫЗЫ

Разработка и создание теплотметрического измерителя для контроля тепловых параметров энергетических объектов

Актуальность темы. В настоящее время одной из важнейших задач является обеспечение надежности и эффективности промышленных и энергетических систем. В частности, своевременное выявление дефектов и неисправностей в тепловых сетях позволяет снизить тепловые потери, продлить срок службы оборудования и повысить энергетическую эффективность.

Для решения этой задачи широко применяются методы неразрушающего контроля, так как они позволяют оценивать техническое состояние объекта без нарушения его целостности. Среди них тепловой метод контроля выделяется как эффективный инструмент для обнаружения скрытых дефектов путем анализа теплового потока и температурных изменений. Этот метод дает возможность точно диагностировать внутренние изменения в материалах и оборудовании, выявлять дефекты изоляции, утечки и другие неисправности.

Однако большинство существующих приборов для теплового контроля имеют ограничения по точности измерений, времени отклика и стабильности работы в широком диапазоне тепловых потоков. Поэтому актуальной задачей является разработка новых устройств, обладающих высокой чувствительностью, способных точно измерять плотность теплового потока и выявлять дефекты тепловых сетей на ранних стадиях.

В связи с этим разработка прибора, основанного на методе неразрушающего контроля и способного с высокой точностью проводить тепловые измерения, является актуальной научно-технической задачей. Создание такого устройства позволит повысить надежность и безопасность тепловых систем, сократить затраты на обслуживание и ремонт, а также улучшить энергоэффективность промышленных и энергетических объектов.

Целью диссертационной работы является улучшение метрологических и эксплуатационных характеристик теплотметрического измерителя на основе термоэлектрических преобразователей теплового потока для контроля тепловых параметров энергетических объектов.

Задачи исследования. В рамках проведения диссертационного исследования были поставлены следующие задачи:

- получить решение уравнения теплопроводности, описывающего температурное поле чувствительного элемента в сложной конструкции «полусфера-цилиндр»;

- получить аналитические решения, описывающие температурные поля в произвольной точке тела при различных значениях физических параметров (E , Q , α), с целью разработки универсальных расчетных формул $T_1(r, \varphi, z, t)$ и $T_2(r, \varphi, \mu, t)$. Эти формулы должны обеспечивать точное описание температурных распределений без необходимости численного моделирования, упрощая проектирование и калибровку термодатчиков в различных условиях эксплуатации;

– теоретически обосновать структуру термоэлектрических преобразователей теплового потока с улучшенными характеристиками чувствительности и точности;

– разработать и создать экспериментальный образец теплотрического измерителя для контроля тепловых параметров;

- разработка аттестационного стенда для проверки разработанного диагностического устройства и исследования его градуировочных характеристик;

– провести экспериментальные исследования по оценке точности, надежности и устойчивости работы разработанного измерителя тепловых параметров в лабораторных и промышленных условиях.

Объектами исследования являются процесс измерения тепловых величин и параметров энергетических объектов.

Методы исследования. В исследовании использованы аналитический метод, математическое моделирование, экспериментальные исследования, методы калибровки и градуировки, а также сравнительный анализ для оценки характеристик прибора и его эффективности в неразрушающем контроле теплового потока.

Научная новизна включает следующее:

1. Впервые получено решение задачи теплопроводности с учётом сферической и цилиндрической геометрии. Это решение основано на применении интегральных преобразований с использованием функций Бесселя и многочленов Лежандра и позволяет точно описывать динамику температурной разницы между сферической поверхностью полусферы и основанием цилиндра под воздействием внешнего теплового потока.

2. Впервые предложен метод усреднения температуры основания цилиндра по площади для расчёта температурной разницы ($\Delta T(t)$). Этот подход делает результат независимым от радиальной координаты и обеспечивает единое значение сигнала датчика, повышая точность модели и её практическую применимость в реальных условиях эксплуатации.

3. Использование встроенного нагревательного элемента, выполненного из тонкой медной фольги, который активируется только в режиме калибровки для создания эталонного теплового потока, что обеспечивает самокалибровку прибора без применения внешних устройств.

4. Интеграция теплопроводной алюминиевой пластины (теплопроводность ~ 200 Вт/м·К) и теплопроводной пасты, обеспечивающих равномерное распределение теплового потока и минимизацию тепловых потерь (падение температуры менее $0,2$ °С на контактных слоях), что

повышает чувствительность прибора к дефектам, таким как трещины или утечки тепла.

5. Заливка рабочей поверхности термоэлектрического батарейного преобразователя эпоксидной смолой с добавлением 5–10% угольного порошка обеспечивает коэффициент поглощения около 0,9, увеличивая чувствительность к тепловому потоку.

6. Разработанная модель прибора для измерения теплового потока с коэффициентом термоЭДС 5,415 мВ/°С, обеспечивает высокую чувствительность и точность при определении дефектов теплоносителей и конструкций в рабочем диапазоне температур от -30 °С до 100 °С.

Универсальность прибора обусловлена его способностью создавать эталонный тепловой поток, что делает его гибким инструментом для калибровки и измерений в различных условиях, включая полевые. Конструкция включает нагревательный элемент и термоэлектрический охладитель, которые позволяют генерировать контролируемый тепловой поток через термоэлектрический батарейный преобразователь. Это даёт возможность калибровать прибор непосредственно на месте эксплуатации, без необходимости использования стационарного лабораторного оборудования.

Основные результаты включают следующее:

1. Разработана аналитическая методика расчета разности температур ($\Delta T(t)$) в датчике теплового потока с чувствительным элементом «полусфера-цилиндр», основанная на решении уравнений теплопроводности с учетом непрерывности температуры и теплового потока на границе полусфера-цилиндр, обеспечивающая высокую точность оценки динамики нагрева датчика.

2. Разработанный прибор для измерения теплового потока, использующее метод неразрушающего контроля, оснащено термоэлектрическим батарейным преобразователем с коэффициентом термоЭДС 5,415 мВ/°С и обеспечивает высокую чувствительность и точность при выявлении дефектов в теплоносителе в температурном диапазоне от -30 °С до 100 °С.

3. Разработанный прибор для измерения теплового потока обеспечивает высокую точность и надежность, измеряя плотность теплового потока в диапазоне от 10 до 900 Вт/м² с коэффициентом преобразования 2,408 Вт/(м²·мВ) и систематической погрешностью не более 3%, что подтверждается экспериментальными исследованиями и соответствует требованиям промышленного применения.

Научно-практическая значимость работы заключалась в следующем: разработанный прибор, может быть использован для диагностики тепловых сетей, а также для диагностики промышленного и теплоэнергетического оборудования. Разработанные в ходе выполнения исследования лабораторные стенды могут служить студентам физико-технического факультета в качестве учебной базы, а также использоваться для выполнения дипломных и научно-исследовательских работ.

Проведены производственные испытания прибора на тепловых сетях и теплотехнических объектах. По результатам научно-исследовательских и технологических работ оформлен акт испытаний на предприятии города ТОО «Энергосервис LTD».

Апробация работы. Основные результаты диссертации обсуждались на научных семинарах кафедры инженерной теплофизики имени профессора Ж.С. Акылбаева и докладывались на конференциях международного уровня: XI-й Международной научной конференции «Хаос и структуры в нелинейных системах. Теория и эксперимент» (Караганда, 2019); Ninth International Conference “Modern Trends in Science” FMNS-2021 (Болгария, 2021).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 11 работ, в том числе 4 работы в изданиях входящие в базу данных Scopus; 3 работы в изданиях из перечня, утвержденного Комитетом по контролю в сфере образования и науки МНиВО РК, 2 работы в сборниках материалов международных конференций, 1 работа в издании, входящего в базу данных РИНЦ, и получен патент Республики Казахстан на полезную модель «Прибор для измерения теплового потока» №6393 от 03.09.2021.

Структура и объем работы. Структура диссертационной работы определена поставленными задачами и состоит из введения, четыре раздела, заключения, библиографии и приложения. Она изложена на 121 страницах машинописного текста, иллюстрируется 42 рисунками, 12 таблицами, содержит список использованной литературы из 118 наименований.