

*На правах рукописи*



ОСМАНОВ Виктор Викторович

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТОПОЧНОЙ ТЕПЛОМЕТРИИ НА ОСНОВЕ  
ГРАДИЕНТНЫХ ДАТЧИКОВ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА

Специальность 05.14.14 – Тепловые электрические станции,  
их энергетические системы и агрегаты

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2015

Работа выполнена на кафедре «Реакторные и котельные установки» в ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Научный руководитель

– *Григорьев Константин Анатольевич* – доктор техн. наук, доцент.

Официальные оппоненты:

– *Пилипенко Николай Васильевич* – доктор техн. наук, профессор, профессор кафедры компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»;

– *Беленький Михаил Яковлевич* – кандидат техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник отдела «Исследование и проектирование оборудования АЭС» «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И. И. Ползунова» (ОАО «НПО ЦКТИ») (Санкт-Петербург).

Ведущая организация – *ОАО «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени теплотехнический научно-исследовательский институт» (Москва)*.

Защита состоится «21» апреля 2015 г. в 16-00 на заседании диссертационного совета Д 212.229.04 при ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу:

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, в аудитории 411 ПГК

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» и на сайте <http://www.spbstu.ru/science/defences/details-0632.html>

Автореферат разослан «20» февраля 2015 г.

Отзыв на автореферат, заверенный печатью учреждения, в двух экземплярах просим направить по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Е-mail: [kg1210@mail.ru](mailto:kg1210@mail.ru)

Тел.: +7-960-261-7261

Ученый секретарь  
диссертационного совета



*Григорьев Константин  
Анатольевич*

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Совершенствование конструкций, оптимизация режимов работы энергетических котлов требует экспериментальных исследований процессов теплообмена. Определение тепловых потоков (теплометрия) на поверхностях теплообмена является важной составляющей теплотехнического эксперимента. Несмотря на бурное развитие цифровой измерительной техники, позволяющей регистрировать и обрабатывать большие массивы данных, в области топочной теплометрии наблюдается застой, и это связано, с одной стороны, с отставанием средств измерений (датчиков) от уровня преобразовательной техники, а с другой стороны, с высокой трудоемкостью и стоимостью работ.

Температурные вставки, используемые в топочной теплометрии, зарекомендовали себя как наиболее надежное и представительное средство измерения тепловых потоков, однако их применение требует вмешательства в герметичный водопаровой тракт высокого давления.

В 2007 г. в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете (СПбПУ) под научным руководством С.З. Сапожникова были созданы на основе анизотропных слоистых композитов термостойкие градиентные датчики теплового потока (ГДТП), применение которых в топочной теплометрии открывает новое перспективное направление в теплотехническом эксперименте.

Диссертация посвящена развитию нового направления – топочной теплометрии на основе ГДТП (топочной градиентной теплометрии).

Актуальность темы подтверждается поддержкой, оказанной работе Российским фондом фундаментальных исследований (проект 08-08-00969-а).

**Степень разработанности темы.** В работах С.З. Сапожникова, В.Ю. Митякова и А.В. Митякова разработаны основы теории ГДТП, позволяющие с единых позиций описывать и сопоставлять действия сплошных и слоистых датчиков, выбирать материалы для их создания, а также конструктивные и технологические параметры, прогнозировать вольт-ваттную чувствительность.

Первый в мировой практике опыт топочной теплометрии на основе термостойких ГДТП в промышленных условиях был успешно реализован СПбПУ совместно с Компанией «НТВ-энерго» в 2008 г. на котле БКЗ-210, установленном на ТЭЦ-4 г. Кирова. Эксперимент показал работоспособность

и информативность ГДТП, перспективность данного направления теплометрии, однако высветил недостатки и необходимость совершенствования конструкции измерительной ячейки.

**Целью** данной работы является обоснование, разработка и промышленное освоение нового метода топочной теплометрии на основе ГДТП.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Выполнить обзор методов измерения тепловых потоков, провести анализ рабочих условий в топках котлов, и на этой основе обосновать требования к топочной теплометрии на базе ГДТП;

2. Разработать технологию изготовления, создать и протестировать ГДТП для работы в топочных условиях;

3. Обосновать требования и отработать конструкцию измерительного зонда на основе ГДТП;

4. Разработать методику градуировки измерительных зондов на основе ГДТП с учетом условий промышленного эксперимента;

5. Создать и апробировать на промышленном объекте в условиях эксплуатации систему топочной теплометрии на основе ГДТП с цифровой регистрацией и обработкой данных.

Автором лично получены результаты, обладающие **научной новизной**:

1. Заложены методические основы топочной теплометрии на основе ГДТП;

2. Разработана технология изготовления, запатентована и апробирована в лабораторных и промышленных условиях конструкция измерительных зондов на основе ГДТП;

3. Освоена методика градуировки измерительных зондов на основе ГДТП;

4. Впервые спланирован и осуществлен масштабный промышленный эксперимент, в котором успешно апробирована система топочной градиентной теплометрии. Получены новые данные о тепловой разверке экранов вихревой топки.

**Практическая значимость** работы заключается в создании новой системы топочной теплометрии на основе ГДТП, прошедшей промышленное освоение и позволяющей определять неравномерность теплового потока на стенах топки, осуществлять диагностику топочного процесса в режиме реального времени.

**Методы исследования:** лабораторный и промышленный эксперимент, численное моделирование и методы математической статистики.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Конструкция, технология производства, градуировки и монтажа измерительных зондов на основе ГДТП, обеспечивающих выполнение топочной градиентной теплотометрии.

2. Новая система топочной теплотометрии на основе ГДТП и результаты промышленного использования метода как средства диагностики топочного процесса (в частности, определения неравномерности теплового потока на стенах топки и положения факела).

**Личный вклад** автора заключается в постановке задач исследований, планировании и организации основных этапов работы. Диссертанту принадлежат: совершенствование технологии изготовления, создание, градуировка и ресурсные испытания измерительных зондов на основе ГДТП; разработка и создание лабораторных стендов; разработка системы топочной градиентной теплотометрии, авторский надзор за ее монтажом и тестированием, обработка и обобщение экспериментальных данных промышленных испытаний. Часть работ выполнена совместно с сотрудниками кафедр «Реакторные и котельные установки» и «Теоретические основы теплотехники» ФГАОУ ВО «СПбПУ» и ООО «Компания «НТВ-энерго», чье участие отмечено в тексте диссертации.

**Достоверность результатов** подтверждается удовлетворительным согласованием экспериментальных данных автора с известными данными из литературных источников; согласованием показаний зондов с контрольными параметрами котла; использованием поверенной современной измерительной аппаратуры и привлечением к экспертизе свойств ГДТП широкого круга специалистов.

**Внедрение.** Результаты работы использованы в учебном процессе ФГАОУ ВО «СПбПУ», на Назаровской ГРЭС (г. Назарово Красноярского края) и в ООО «Компания «НТВ-энерго» (Санкт-Петербург).

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на VII школе-семинаре молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова (Казань, 2010); Международной конференции с элементами научной школы для молодежи «Инновационные разработки в области техники и физики низких температур» (Москва, 2010); XVIII школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика А.И. Леонтьева (Звенигород, 2011); V научно-практической конференции «Минеральная часть

топлива, шлакование, очистка котлов, улавливание и использование золы» (Челябинск, 2011); VII Международном симпозиуме по сжиганию угля (Пекин, 2012); VIII Всероссийской конференции с международным участием «Горение твердого топлива» (Новосибирск, 2012), XXXIX–XLI научно-практической конференции с международным участием «Неделя науки СПбГПУ» (Санкт-Петербург, 2010–2012).

Исследования автора получили поддержку и признание специалистов. Он награжден дипломами «Аспирант года» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета (2009, 2010); победитель конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга (2010); отмечен стипендией Президента Российской Федерации (2011). Работа диссертанта поддержана именной грантом Института Теплофизики СО РАН (2012) и отмечена дипломом на VIII Всероссийской конференции с международным участием «Горение твердого топлива» (г. Новосибирск, 2012).

**Публикации.** По результатам работы имеется 10 публикаций, в том числе две статьи в журналах из перечня ВАК и 1 патент Российской Федерации на полезную модель. Диссертант является соавтором четырех отчетов о НИР.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 131 источник, и трех приложений. Она изложена на 134 с. текста, имеет 105 рисунков и 18 таблиц. Общий объем диссертации – 158 с.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи работы, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** «Методы топочной теплотметрии» проведен анализ методов топочной теплотметрии, отмечены основные вехи становления теплотметрии на основе ГДТП и представлены результаты первого опыта топочной градиентной теплотметрии.

Анализ методов теплотметрии показал, что все они основаны на термометрии, при этом применение стационарных методов теплотметрии осложнено трудоемкими монтажными операциями, вынужденным внедрением в контур циркуляции котла, а переносных методов теплотметрии – громоздкостью средств измерения.

Выполнено сравнение современных датчиков теплового потока (ДТП) и

исследуемого в данной работе ГДТП по вольт-ваттной чувствительности  $S_0$ , измеряемой плотности теплового потока  $q$  и рабочей температуре  $T$  (рисунок 1).

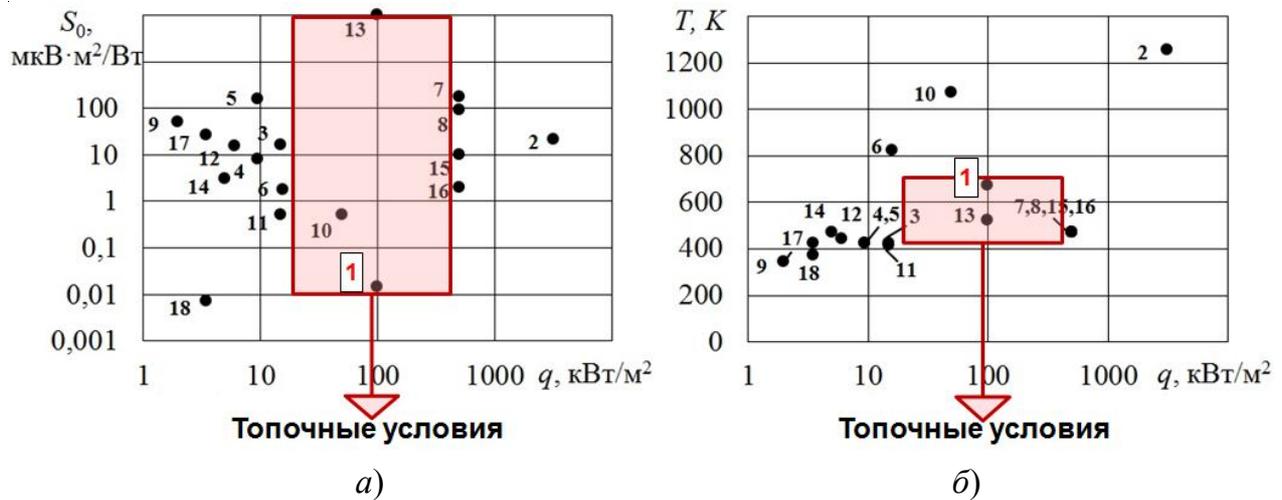


Рисунок 1 – Сравнение характеристик современных ДТП и ГДТП по вольт-ваттной чувствительности (а) и рабочей температуре (б).

Цифрами обозначены датчики: **1** – ГДТП из композиции Ni + сталь 12X18H10T; **2** – ITIC (HT-50); **3** – Wuntronic (HFT); **4** – Wuntronic (FM, FRM); **5** – Wuntronic (F); **6** – Wuntronic (FCR); **7** – Captec (HFS); **8** – Captec (UFRFS); **9** – Hukseflux (HFP 01); **10** – Hukseflux (HF 01); **11** – Hukseflux (HF 02); **12** – Hukseflux (HF 05); **13** – Tfx-Technology (TFX-191); **14** – Tfx-Technology (TFX-156); **15** – Sequoia (RHF); **16** – Sequoia (SHF); **17** – Эталон (ДТП 0924); **18** – НПО ИТ (ФОА 020)

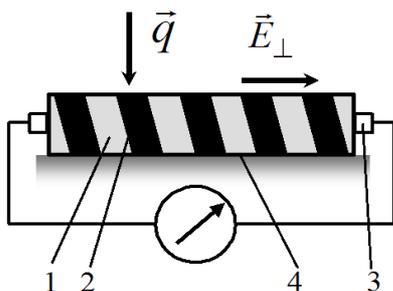


Рисунок 2 – Устройство ГДТП:  
1, 2 – слои различных металлов или сплавов; 3 – электрический контакт; 4 – поверхность теплоотвода

Не все ДТП могут использоваться в топках по условию высоких рабочих температур, плотностей теплового потока, конструктивного исполнения (не пригодного для установки на топочные экраны) и цены (от 300 USD). В связи с этим предложено использовать ГДТП (себестоимостью не более 30 USD), как средство прямого измерения воспринятой плотности теплового потока.

ГДТП (рисунок 2) представляет собой искусственный многослойный термоэлемент, обладающий анизотропией тепло- и электропроводности. В сечениях датчика, нормальных вектору теплового потока  $\vec{q}$ , возникает разность температур и генерируется пропорциональная этой разности

сти термоЭДС  $\vec{E}_\perp$  (поперечный эффект Зеебека). Вольт-ваттная чувствительность ГДТП  $S_0 = \frac{E}{q \cdot F}$ , мкВ/Вт, где  $F$  – площадь ГДТП в плане, м<sup>2</sup>.

Значительный вклад в становление теплотетрии на основе ГДТП внесли Л. Гайлинг (1947), О.А. Геращенко (1971), И.М. Пилат (1974), фирма ForTech HTS (с 1994), С.В. Ордин (1996), С.З. Сапожников, В.Ю. Митяков и А.В. Митяков (с 1998), Н.П. Дивин (1999), А.Б. Опаричев (2006) и др. Однако только с созданием принципиально новых термостойких ГДТП на основе анизотропных слоистых композитов, в конструкции которых использованы металлы и сплавы, появилась возможность реализации топочной теплотетрии на основе ГДТП.

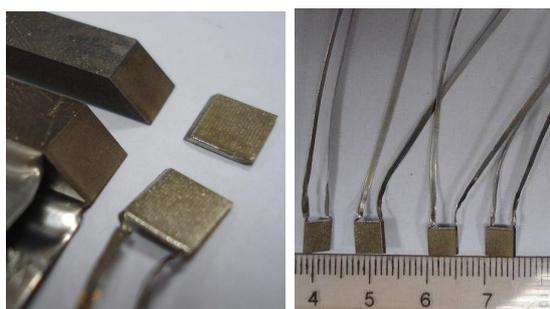
В первом промышленном эксперименте использовались ГДТП, выполненные из композиции никель + сталь 12Х18Н9Т. Толщина слоев составляла 0,1 мм, угол разреза –  $45 \pm 5^\circ$  к плоскости заготовки, толщина датчика – 0,2 мм, размеры в плане –  $7 \times 10$  мм. В качестве исходного макета для создания измерительной ячейки использовалась доработанная температурная вставка ЦКТИ, на которую монтировались ГДТП.

Апробация ГДТП проведена на котле БКЗ-210 (ст. № 9) ТЭЦ-4 г. Кирова. Котел БКЗ-210 (номинальной паропроизводительностью  $D_{\text{ном}} = 58,3$  кг/с, с параметрами перегретого пара: давлением 13,8 МПа и температурой 813 К; тепловой мощностью 143 МВт) с естественной циркуляцией, оснащен газоплотной вихревой топкой. Предварительно отградуированные измерительные ячейки с ГДТП были установлены в вихревой зоне активного горения (ЗАГ).

В ходе длительного эксперимента (более четырех месяцев) котел эксплуатировался в диапазоне паровых нагрузок  $(0,5 \dots 1,2)D_{\text{ном}}$  на различных режимах и трех видах топлива (кузнецком каменном угле марок Г и Д, фрезерном торфе и природном газе). Тепловое напряжение топочного объема изменялось в пределах  $75 \dots 180$  кВт/м<sup>3</sup>, а средние значения тепловосприятия стенами топки составили  $72 \dots 155$  кВт/м<sup>2</sup>. Данные об изменении местной плотности теплового потока во времени, полученные с помощью ГДТП и термовставок ЦКТИ, качественно близки и согласуются с изменениями режима работы котла. При работе котла на твердом топливе установлено влияние загрязнения топочных экранов на показания ГДТП, что позволяет использовать ГДТП для диагностики шлакования. Таким образом, промышленным экспериментом подтверждена работоспособность ГДТП на огневой поверхности топки и их

высокая информативность. Однако этот эксперимент показал, что конструкция ГДТП нуждается в доработке, измерительная ячейка на основе термовставок не удовлетворяет современным требованиям, а опыт топочной теплотометрии на основе ГДТП требует развития.

**Во второй главе** «Создание и исследование ГДТП для топочной теплотометрии» проведен анализ топочных условий, на основе которого разработаны требования к ГДТП, усовершенствована конструкция, технология изготовления и градуировки ГДТП из композиции никель + сталь 12Х18Н10Т.



а) б)

Рисунок 3 – ГДТП:

а) – в процессе изготовления;

б) – ГОТОВЫЕ (шкала в сантиметрах)

При разработке технологии изготовления и методики градуировки ГДТП учтен положительный опыт предыдущих работ. Усовершенствован способ приварки проводов к ГДТП (методом диффузионной сварки) (рисунок 3). Изготовлены ГДТП размером в плане  $5,1 \times 5,7$  мм и толщиной 0,5 мм.

Отградуированы ГДТП абсолютным (джоуль-ленцевым) методом в стационарном тепловом режиме на специально

созданном стенде (рисунок 4) при разной температуре ГДТП (373, 473, 573 и 673 К).

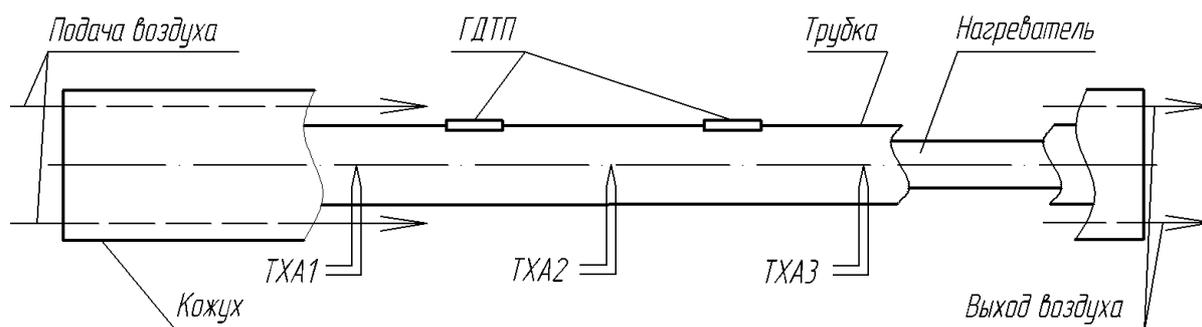


Рисунок 4 – Схема стенда для градуировки ГДТП

Градуировочный стенд представляет собой трубку с установленными на ней градуируемыми ГДТП и тремя термопарами для контроля температуры стенки трубки и самих ГДТП. Термические сопротивления датчика со слоем компаунда и трубки близки и составляют  $9,4 \cdot 10^{-6}$  и  $6,6 \cdot 10^{-6}$   $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$  соответственно; поэтому температура ГДТП оценивалась как осредненная темпера-

тура по трем термопарам. Внутри *трубки* коаксиально расположен электрический *нагреватель*, снаружи – защитный *кожух*. В зазоре между *трубкой* и *кожухом* прокачивался холодный воздух с регулируемым расходом для поддержания заданной температуры ГДТП независимо от тепловыделения *нагревателя*. ГДТП закреплены на *трубке* с помощью теплопроводного электроизолирующего термостойкого (до 1800 К) компаунда. Опыты повторялись три раза. Тепловой поток изменялся в пределах  $q = 10 \dots 75 \text{ кВт/м}^2$ . Сигналы ГДТП и термопар регистрировались с помощью 24-разрядных аналого-цифровых преобразователей ZET 220.

Результаты градуировки представлены на рисунке 5. Установлена линейная зависимость термоЭДС ГДТП от воспринятой плотности теплового потока. Зависимость вольт-ваттной чувствительности ГДТП от его температуры незначительная, поэтому влиянием температуры можно пренебречь.

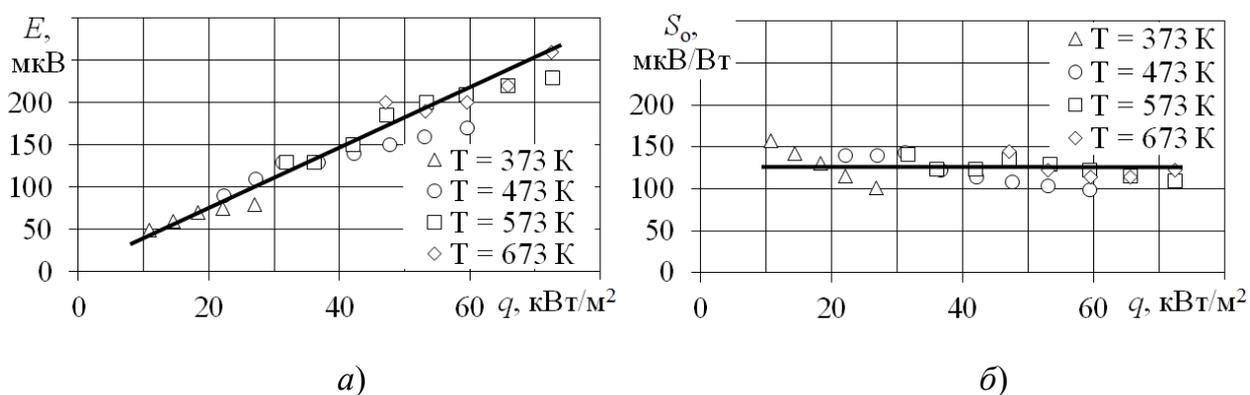


Рисунок 5 – Зависимость термоЭДС (а) и вольт-ваттной чувствительности (б) ГДТП от воспринятой плотности теплового потока при различной температуре

Среднее значение вольт-ваттной чувствительности составило  $125 \pm 25 \text{ мкВ/Вт}$  ( $3,6 \pm 0,73 \text{ мкВ} \cdot \text{м}^2/\text{кВт}$ ) с относительной неопределенностью отдельного измерения не более 5 %.

**В третьей главе** «Создание и исследование зондов на основе ГДТП для топочной теплотрии» сформулированы требования к измерительному зонду на основе ГДТП, описана технология изготовления и градуировки зондов, на основе численного моделирования установлено влияние зонда на тепловое состояние газоплотного топочного экрана, представлены результаты ресурсных испытаний зондов на многоцикловый нагрев-охлаждение.

Разработан специальный корпус зонда, в котором размещается ГДТП с отводящими проводами (рисунок б), для установки на резьбовом соединении в плавниках газоплотных топочных экранов, что позволяет не нарушать гер-

метичность контура циркуляции котла при монтаже и осуществлять замену зонда на работающем котле.

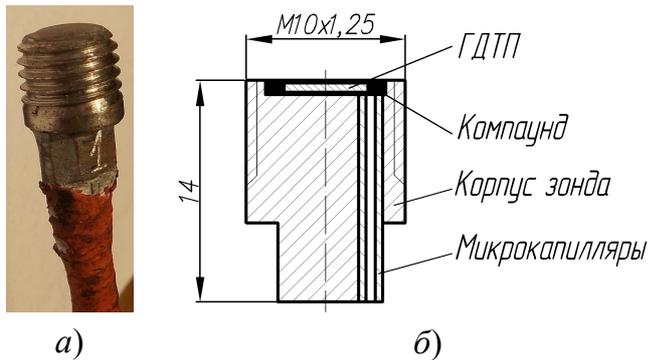


Рисунок 6 – Зонд на основе ГДТП:  
а) – внешний вид; б) – устройство

Тепловой поток воспринимается торцевой поверхностью зонда, проходит через ГДТП и отводится через резьбовое соединение к плавникам экранных труб. При монтаже зонда на резьбу наносится графитная смазка.

Учитывая возможность загрязнения межтрубного пространства при сжигании сильношлакующих углей, предложено два способа монтажа зондов (рисунок 7). Вывод проводов от зондов через обмуровку котла осуществляется внутри защитной трубки.

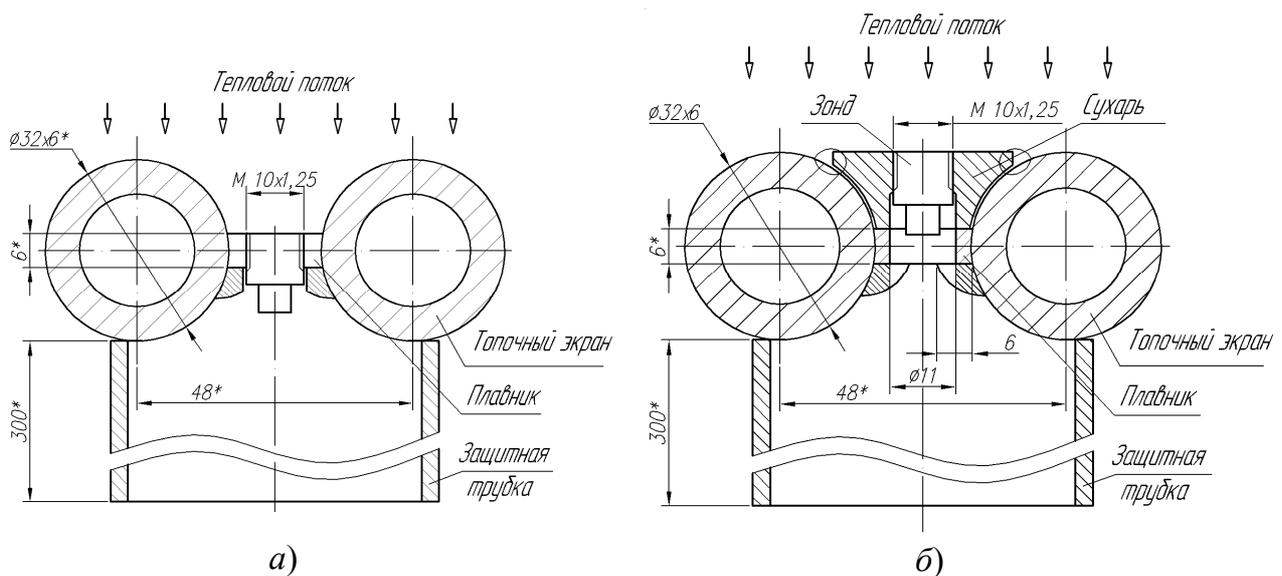


Рисунок 7 – Способы монтажа зондов на плавнике (а) и сухаре (б)

Вклад зонда в искажение теплового состояния топочного экрана оценен с помощью численного моделирования. Объектом моделирования являлся фрагмент газоплотного топочного экрана (далее экран).

Физическая картина моделирования (рисунок 8) представляла собой систему «излучатель – экран». От излучателя (полукруглой пластины с температурой  $T_{\text{изл}}$ ) на экран направлен тепловой поток  $q_{\text{изл}}^{\rightarrow}$ , который воспринимается наружной поверхностью экрана (границей  $\Gamma_q$ ) и отводится через внутреннюю

поверхность труб (границей  $\Gamma_T$ ). Температура внутренней поверхности труб  $T_{тр}$  на границе с рабочим телом (водой) задана постоянной.

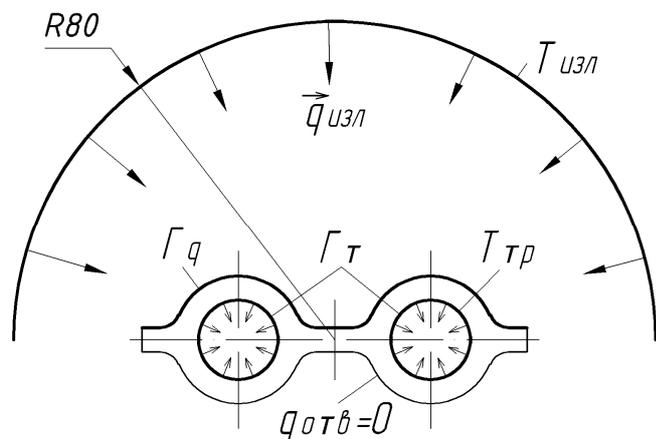


Рисунок 8 – Физическая картина моделирования

С тыльной стороны объекта отвода теплоты нет ( $q_{отв} = 0$ ). Граничные условия:  $T_{тр} = 673$  К;  $T_{изл} = 1573$  К, что соответствует  $q_{изл} = 344$  кВт/м<sup>2</sup>; степень черноты излучателя – 0,99, экрана (поверхности  $\Gamma_q$ ) – 0,72; остальные поверхности – адиабатические.

Расчеты проведены с помощью программного комплекса ANSYS (лицензионное соглашение

от 22.03.2007, номер клиента 420725, владелец –СПБПУ). Использован закон излучения Стефана-Больцмана, рассмотрена стационарная плоская задача теплопроводности, математической основой решения являлся метод конечных элементов. Структурированная сетка конечных элементов построена автоматически. На основе исследования сеточной сходимости принят размер ячейки 1×1 мм.

В таблице 1 представлены результаты оценки средних  $T_{ср}$  и максимальных  $T_{max}$  температур, средних  $q_{ср}$  и максимальных  $q_{max}$  воспринятых плотностей теплового потока, а также коэффициентов неравномерности тепловосприятия  $\eta$  плавником, трубой и сухарем относительно среднего тепловосприятия в объекте исследования.

Таблица 1 – Результаты численного моделирования

Величина	Экран без зонда			Зонд на плавнике			Зонд на сухаре			
	Труба	Плавник	Экран	Труба	Плавник	Экран	Труба	Плавник	Сухарь	Экран
$T_{ср}$ , К	687	721	692	687	722	693	687	711	738	698
$T_{max}$ , К	720	743	743	720	743	743	721	745	781	781
$q_{ср}$ , кВт/м <sup>2</sup>	162	166	163	166	153	164	147	134	207	158
$q_{max}$ , кВт/м <sup>2</sup>	363	282	363	366	284	366	389	278	334	389
$\eta$	1,00	1,02	–	1,01	0,93	–	0,93	0,85	1,31	–

Разработана методика индивидуальной градуировки зондов, вызванная их конструктивной нетождественностью. Зависимость для индивидуальных

коэффициентов зондов имеет вид  $a = E_{\text{зонд}}/q_{\text{зонд}}$ , мкВ·м<sup>2</sup>/Вт, где  $E_{\text{зонд}}$  – термоЭДС зонда, мкВ;  $q_{\text{зонд}}$  – воспринятая зондом плотность теплового потока, определенная балансовым методом при охлаждении градуировочного стенда водой, Вт/м<sup>2</sup>. Проведены 4 серии опытов, в каждой из которых зонды нагревались из холодного состояния; индивидуальные коэффициенты зондов определены методом усреднения результатов измерений.

Отградуированы зонды абсолютным методом в стационарном тепловом режиме на специально созданном огневом стенде, представляющем собой фрагмент газоплотного топочного экрана (рисунок 9), выполненного из стали 12Х1МФ. Регулирование тепловосприятия экрана осуществлялось изменением

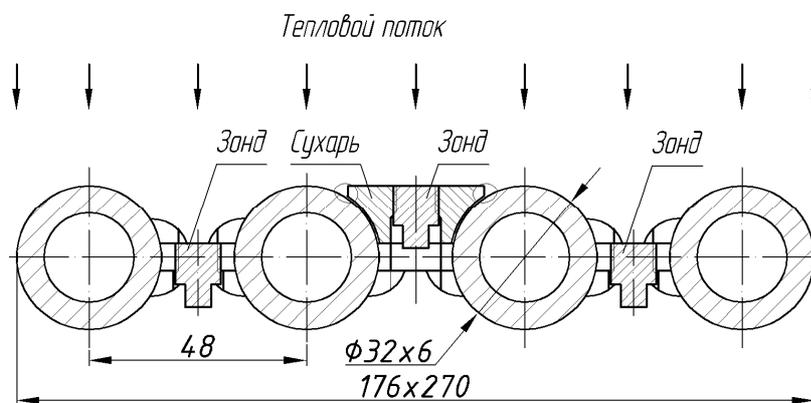


Рисунок 9 – Схема стенда для градуировки зондов

расстояния между ним и горелкой. С тыльной стороны экран теплоизолирован.

На рисунке 10 приведен характерный результат градуировки одного из зондов. Подтверждена линейная зависимость термоЭДС

зондов от воспринятой плотности теплового потока.

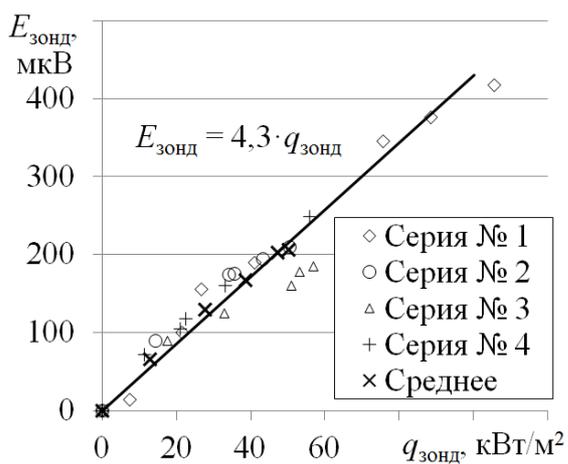


Рисунок 10 – Характерный результат градуировки зонда

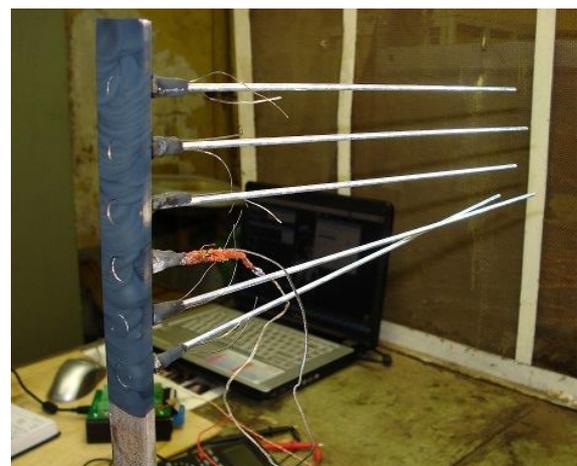


Рисунок 11 – Стенд для ресурсных испытаний зондов

Определены индивидуальные коэффициенты зондов, которые укладываются в диапазон  $a = 4...10$  мкВ·м<sup>2</sup>/кВт при относительной неопределенности градуировки не более 4,65 %.

Проведены ресурсные испытания зондов на специально созданном стенде (рисунок 11) при рабочей температуре 670 К с целью исследования надежности их конструкции при многоцикловом нагреве-охлаждении при воздействии струи воды при температуре 300 К на рабочую поверхность зондов. После 100 циклов нагрева-охлаждения (термошок составлял 190 К) подтверждена работоспособность зондов в существенно нестационарных тепловых условиях.

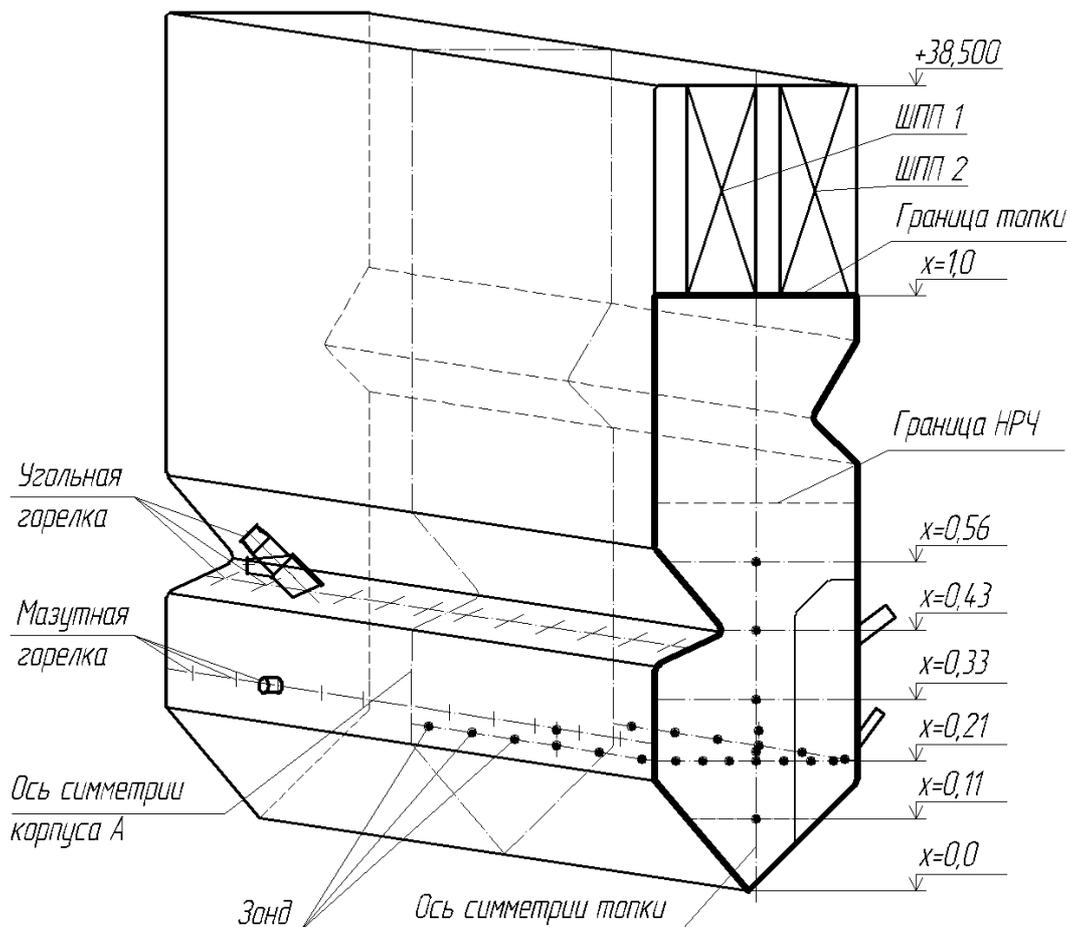
В результате исследований отработана конструкция зонда, пригодная для промышленного внедрения.

**Четвертая глава** «Топочная теплотметрия на основе ГДТП» посвящена разработке системы топочной градиентной теплотметрии и ее апробации на промышленном котле П-49 (ст. № 7) Назаровской ГРЭС (г. Назарово Красноярского края).

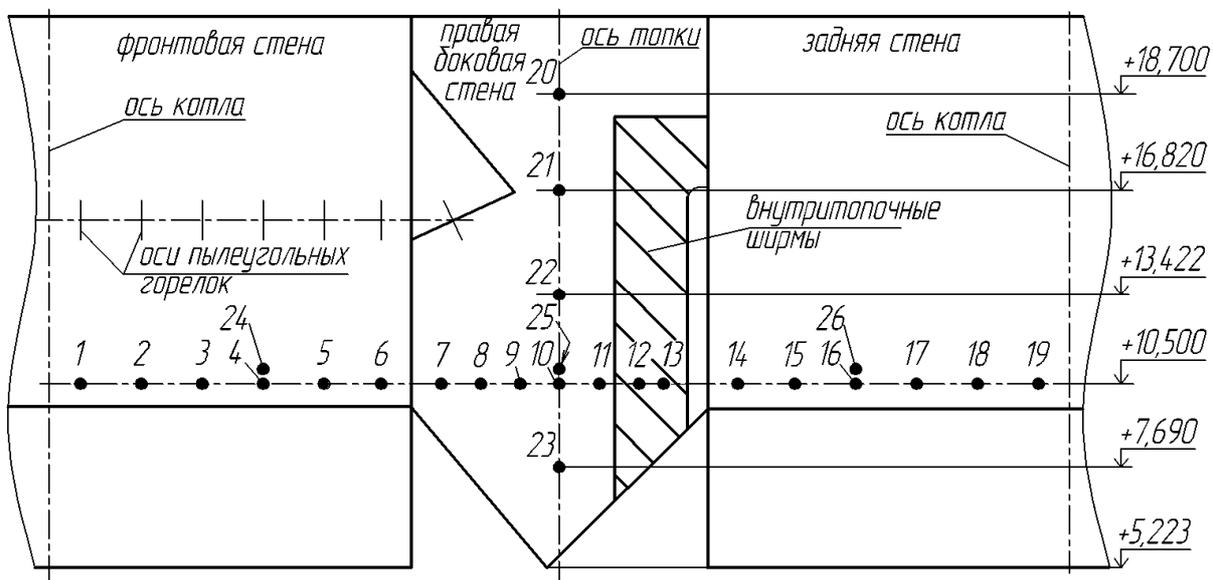
Паровой котел П-49 входит в состав энергоблока электрической мощностью 500 МВт, прямоточный, состоит из двух корпусов (А и Б). Общая номинальная производительность корпусов по первичному пару  $D_{\text{ном}} = 444$  кг/с; давление перегретого пара – 25,5 МПа и его температура – 818 К. В 2013 г. завершено техническое перевооружение обоих корпусов котла с организацией твердого шлакоудаления и низкотемпературного вихревого (НТВ) сжигания назаровского бурого угля (марки 2Б Канско-Ачинского бассейна), зола которого обладает сильными шлакующими свойствами.

Для эксперимента был выбран корпус А (далее котел); в процессе монтажа новой газоплотной топки в ее вихревой зоне активного горения (ЗАГ) были установлены предварительно отградуированные измерительные зонды (рисунок 12). Помимо зондов система включала специально подобранные коммутационные кабели и преобразовательную технику.

Исследования проводились во время пуско-наладочных работ и эксплуатации котла (более года). В этот период общая наработка котла составила более 1500 ч; количество пусков-остановов – 35, в том числе из холодного состояния – 28; два зонда были заменены. Для анализа выделялись периоды работы котла в диапазоне паровых нагрузок  $(0,3 \dots 1,05)D_{\text{ном}}$  на различных режимах при сжигании мазута и угля; при этом тепловое напряжение ЗАГ изменялось в пределах 175...550 кВт/м<sup>3</sup>, а топки – 70...225 кВт/м<sup>3</sup>; средние значения теплового потока на поверхностях теплообмена топки, определенные по балансу, составили 30...140 кВт/м<sup>2</sup>.



а)



б)

Рисунок 12 – Схема размещения зондов на котле П-49 (корпус А):  
 а) – общий вид; б) – развертка правой полутопки. Цифрами указаны номера зондов

Показания зондов сопоставлялись с контрольными величинами (тепловосприятием поверхностей нагрева, температурой дымовых газов, паровой нагрузкой котла и др.). Относительная неопределенность измерений тепловых потоков зондами не превысила 11,3 %, а контрольных параметров котла – 5,6 %.

В работе подробно рассмотрено три наиболее интересных опыта:

Опыт 1 – растопка и работа на мазуте, работа на угле с подсветкой факела мазутом, останов котла;

Опыт 2 – работа на угле при стационарной нагрузке, близкой к номинальной;

Опыт № 3 – набор-сброс нагрузки при работе на угле.

Условия проведения опытов сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Условия проведения промышленных испытаний

Наименование	Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3
Длительность, мин	960	180	100
Количество измерений каждым зондом	288000	54000	30000
Интервал усреднения, мин	20	3	2
Паропроизводительность, % (от номинала)	30...60**	100...105	65...105
Теплонапряжение объема топки, кВт/м <sup>3</sup>	70...100*	210...225	135...225
Теплонапряжение объема ЗАГ, кВт/м <sup>3</sup>	175...245*	515...550	330...545
Теплонапряжение сечения ЗАГ, МВт/м <sup>2</sup>	1,4...2,0*	4,1...4,4	2,6...4,3

\*при работе на мазуте;

\*\*большее значение при совместном сжигании мазута и угля

Результаты промышленных испытаний сведены в таблицу 3.

В ходе длительного эксперимента подтверждена работоспособность измерительных зондов; датчики адекватно реагировали на изменение режима работы котла и показали хорошее согласование с его контрольными параметрами (см. рисунок 13).

Характер распределения местных тепловых потоков на поверхностях теплообмена топки (см. рисунок 14) хорошо согласуется с физическими представлениями о процессах в вихревой топке (аэродинамикой, полем температуры и др.).

Наиболее важным результатом топочной теплотриии являются данные о неравномерности тепловосприятия стенами топки.

Таблица 3 – Результаты промышленных испытаний

Наименование	Обозначение	Опыт 1*	Опыт 2**	Опыт 3**
Нагрузка котла (относительная)	$D/D_{\text{ном}}$	0,4	<b>1,0</b>	0,85
Средневзвешенное (по измерениям зондами) тепловосприятие стен в горизонтальном сечении топки на относительной высоте $x = 0,21$ , кВт/м <sup>2</sup> :				
фронтной	$\bar{q}_{\text{фр}}$	43	72	48
боковой	$\bar{q}_{\text{бок}}$	33	73	60
задней	$\bar{q}_{\text{зад}}$	34	130	112
среднее по стенам	$\bar{q}_{(0,21)}$	37	92	73
Распределение тепловосприятия по стенам в сечении топки на высоте $x = 0,21$ (по измерениям зондами):				
фронтной	$\eta_{\text{фр}}$	1,2	<b>0,8</b>	0,7
боковой	$\eta_{\text{бок}}$	0,9	<b>0,8</b>	0,8
задней	$\eta_{\text{зад}}$	0,9	<b>1,4</b>	1,5
Среднее тепловосприятие стен (по балансу), кВт/м <sup>2</sup> :				
фронтной	$q_{\text{фр}}$	29	73	46
задней	$q_{\text{зад}}$	41	140	127
Расхождение данных по тепловосприятию стен, определенных по показаниям зондов и балансам, кВт/м <sup>2</sup> (%):				
фронтная стена	–	15 (51)	1 (1)	2 (4)
задняя стена	–	7 (17)	10 (7)	15 (12)

\* работа на мазуте при стационарной нагрузке;

\*\* работа на угле.

Установлено (рисунок 15), что для НТВ-топки при работе на угле с ростом тепловой мощности в пределах  $(0,6...1,05)D_{\text{ном}}$  коэффициент неравномерности тепловосприятия фронтной стены повышается, задней – уменьшается, а боковой – остается постоянной. Эти данные позволяют повысить точность теплогидравлических расчетов и оценок надежности поверхностей нагрева при определении температуры стенки металла труб.

Сравнение результатов топочной градиентной теплотометрии котла П-49 с экспериментальными данными, полученными В.В. Митором и СибВТИ (Красноярский филиал) на котлах с технологией проточного факела, показало (см. рисунки 16 и 17), что уровень тепловых потоков сопоставим, а неравномерность тепловосприятий у НТВ-топки ниже.

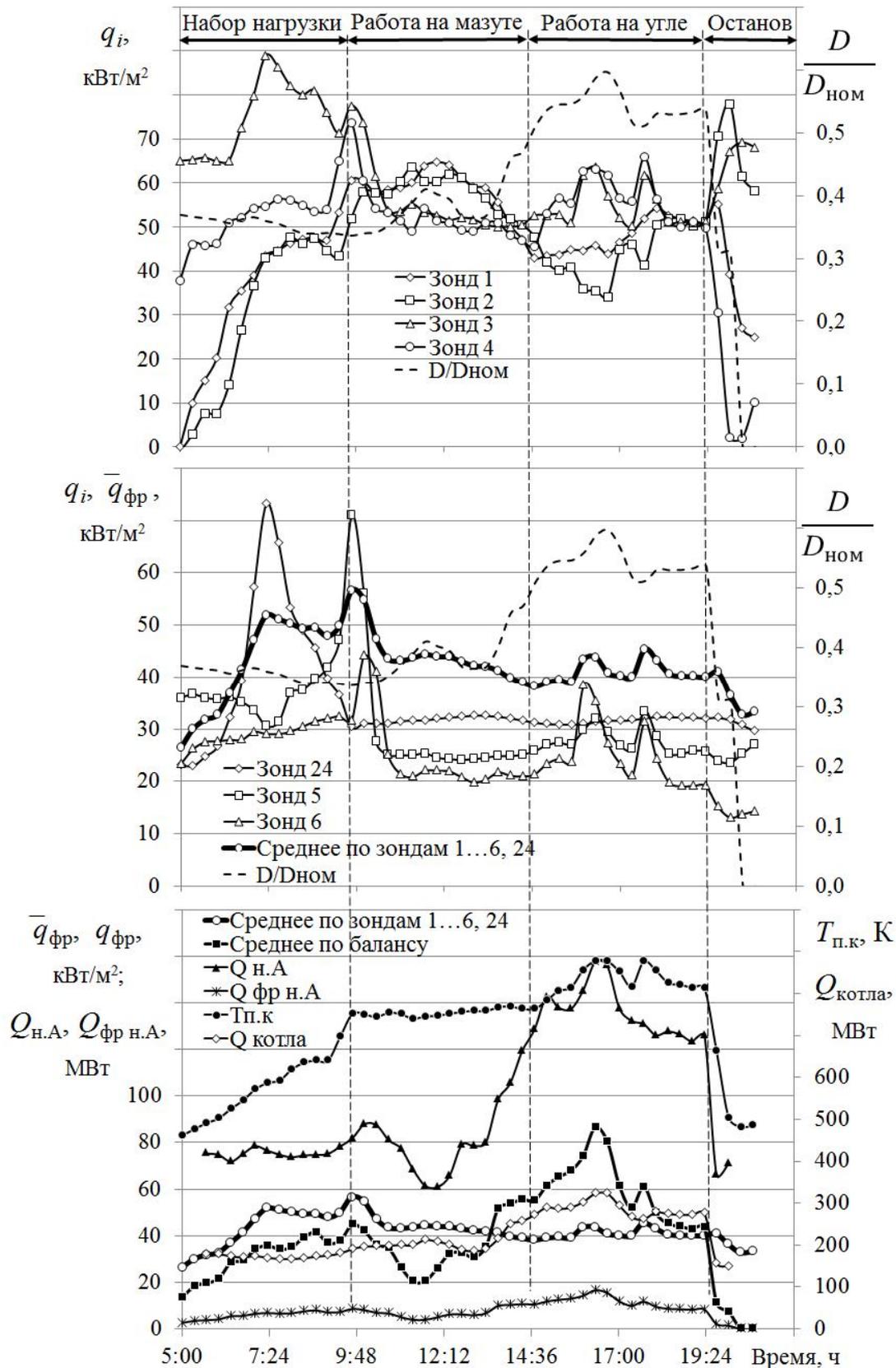


Рисунок 13 – Сопоставление результатов измерений тепловых потоков  $q_i$  с контрольными параметрами котла (Опыт 1, фронтальная стена, типичный пример):

$Q_{фр н.А}, Q_{н.А}, Q_{котла}$  – тепловосприятие фронтальной стены, водопарового тракта по нитке А и котла по первичному пару, соответственно, МВт;  
 $T_{п.к}$  – температура газов в поворотной камере, К

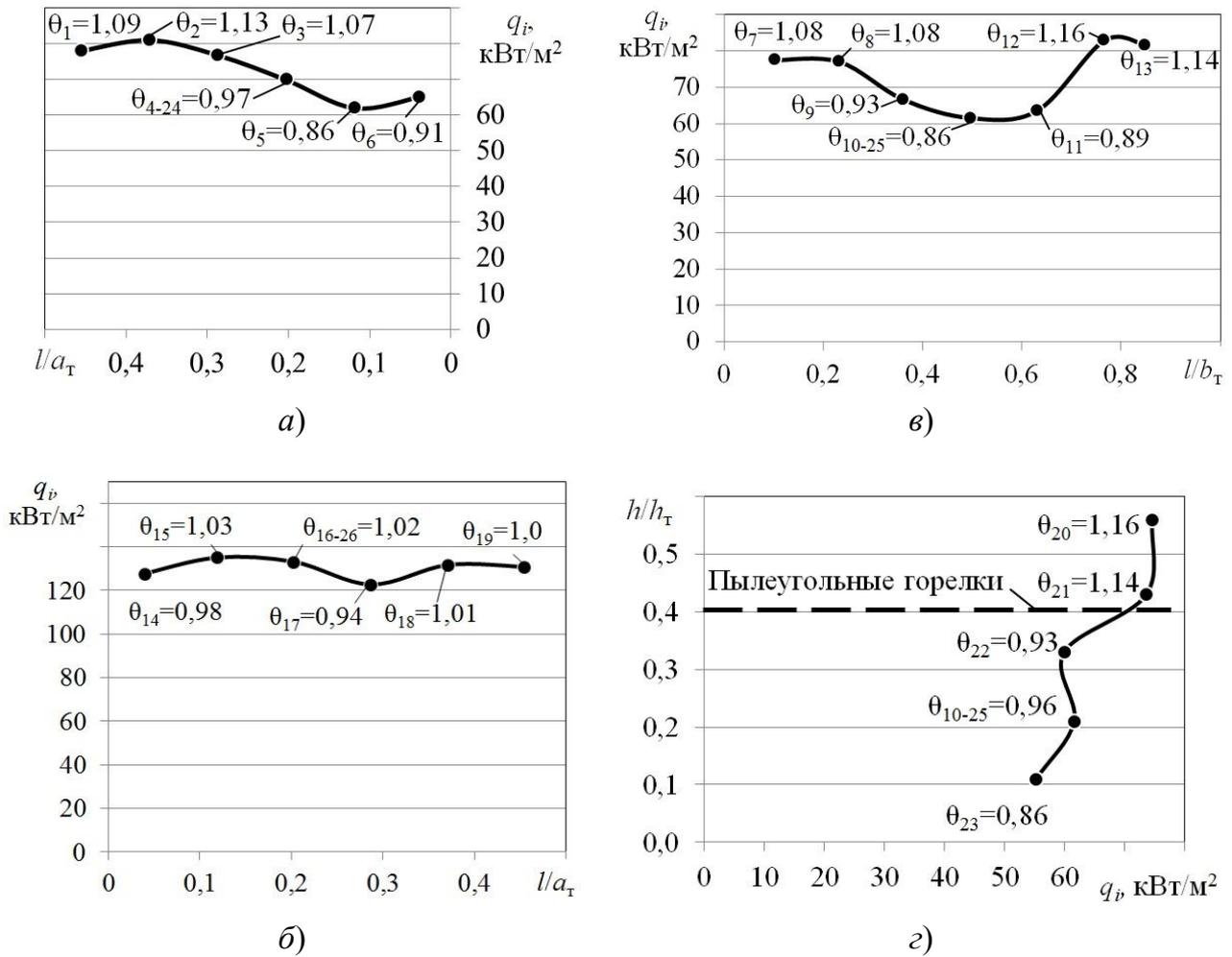


Рисунок 14 – Распределение тепловых потоков  $q_i$  в сечении топки (на высоте  $x = h/h_T = 0,21$ ) на фронтальной (а), задней (б) и боковой (в) стенах и по высоте на боковой стене (г) (Опыт 2, нагрузка котла близкая к номинальной):

$\Theta_i$  – относительное отклонение местного теплового потока от средневзвешенного по зондам на соответствующей стене;  $l, h$  – текущие координаты установки зондов в горизонтальном сечении и по высоте топки, соответственно, м;  $a_T$  и  $b_T$  – ширина и глубина топки, соответственно, м

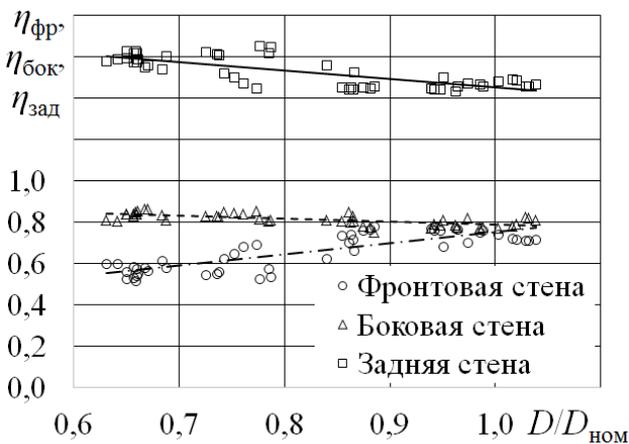


Рисунок 15 – Изменение тепловосприятости стенами топки в горизонтальном сечении вихревой зоны в зависимости от нагрузки котла

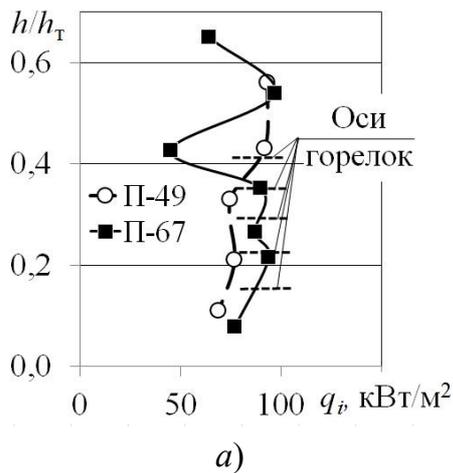


Рисунок 16 – Изменение теплового потока по высоте топки в абсолютных  $q_i$  (а) и безразмерных  $\Theta$  (б) величинах

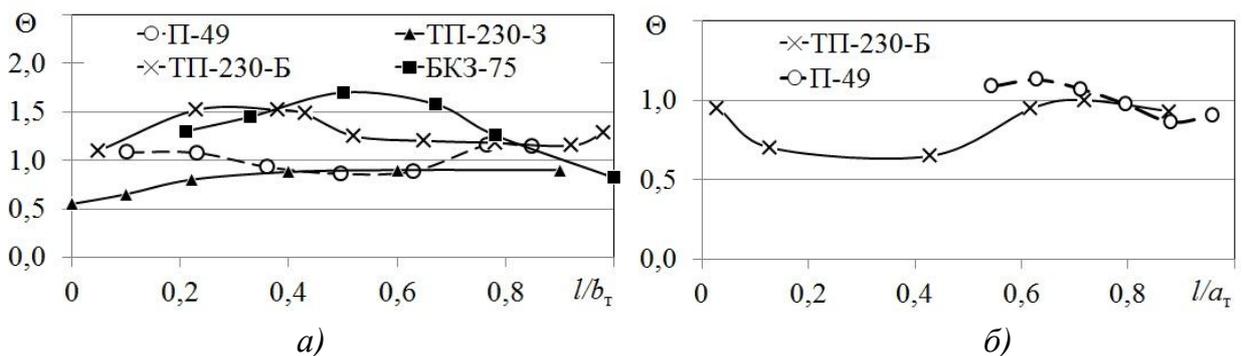
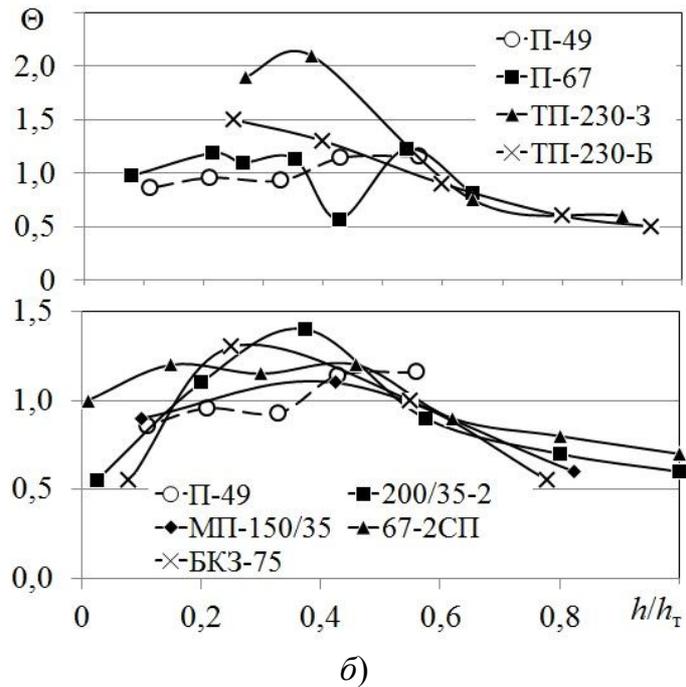


Рисунок 17 – Изменение теплового потока по глубине (а) и ширине (б) топок

Технико-экономическая оценка показала, что топочная теплотометрия на основе ГДТП рентабельна, срок окупаемости составил менее 1 года.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы сводятся к следующему:

1. Показано, что термостойкие на основе анизотропных слоистых композитов ГДТП, реализующие поперечный эффект Зеебека, имеют существенные преимущества перед аналогами, позволяющие использовать их в топочной теплотометрии при исследовании, оптимизации и эксплуатации котельных установок.

2. Созданы термостойкие ГДТП на основе композита Ni + сталь 12X18H10T с усовершенствованной технологией приварки отво-

дящих проводов с помощью диффузионной сварки. Определена вольт-ваттная чувствительность ГДТП ( $125 \pm 25$  мкВ/Вт) в пределах изменения теплового потока  $10 \dots 75$  кВт/м<sup>2</sup> и температуры 373...673 К. Получена линейная зависимость термоЭДС ГДТП от теплового потока. Результаты градуировки показали, что ГДТП отвечают требованиям топочной теплотметрии.

3. Разработаны конструкция, технология изготовления, методика градуировки и технология монтажа измерительных зондов на основе ГДТП, обеспечивающих выполнение топочной теплотметрии. Опытами на огневом стенде подтверждена линейная зависимость термоЭДС зондов от воспринятой плотности теплового потока (в пределах  $10 \dots 110$  кВт/м<sup>2</sup>). Ресурсные испытания на многоциклоый нагрев-охлаждение подтвердили работоспособность и надежность показаний зондов в существенно нестационарных тепловых условиях.

4. Предложена новая система теплотметрии на основе ГДТП в топках промышленных котлов, исключающая использование термовставок и нарушение герметичности водопарового тракта. Экспериментально доказана работоспособность измерительных зондов на основе ГДТП в условиях длительной эксплуатации.

5. Впервые топочная градиентная теплотметрия успешно использована на котле П-49 (энергоблока 500 МВт сверхкритического давления), установленном на Назаровской ГРЭС (г. Назарово Красноярского края).

6. Впервые для вихревой топки получены экспериментальные данные о неравномерности тепловосприятия поверхностями теплообмена в зоне активного горения (в сечении и по высоте) в диапазоне нагрузок  $(0,6 \dots 1,05)D_{\text{ном}}$  при сжигании назаровского бурого угля. Показано в ходе эксплуатации, что такая система может являться средством диагностики шлакования теплообменных поверхностей.

Основные материалы диссертации опубликованы в следующих работах.

**Ведущие рецензируемые научные журналы из перечня ВАК:**

1. Османов, В.В. Градиентные датчики теплового потока для теплотметрии в топках котлов / В.В. Османов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013.– № 4–1 (183).– С. 100-104.
2. Григорьев, К.А. Разработка и промышленные испытания системы теплотметрии на основе градиентных датчиков теплового потока в топке котла П-49 / К.А. Григорьев, Ю.А. Рундыгин, В.Ю. Митяков, В.В. Османов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2014.– № 1 (190).– С. 61-69.

**Патент:**

3. Пат. на пол. модель 96654 России. Датчик теплового потока / В.Ю. Митяков, С.З. Сапожников, А.В. Митяков, К.А. Григорьев, Ю.А. Рундыгин, В.Е. Скудицкий, В.В. Османов.– № 2010115436/28; Заявлено 19.04.2010; Опубл. 10.08.2010. Бюл. № 22. 8 с.

**Публикации в трудах, материалах международных и всероссийских конференций, в научных изданиях:**

4. Османов, В.В. Градиентная теплотметрия в вихревой топке модернизированного котла БКЗ-210 / В.В. Османов, К.А. Григорьев, А.В. Митяков // Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении: Материалы докладов VII школы-семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова (Казань, 15–17 сентября 2010 г.).– Казань: Изд-во Казанск. унта, 2010.– С. 277-280.
5. Митяков, В.Ю. Градиентная теплотметрия и ее перспективы в холодильной технике / В.Ю. Митяков, В.В. Османов // Тез. докл. Междунар. конф. с элементами научной школы для молодежи "Инновационные разработки в области техники и физики низких температур" (Москва, 8–10 декабря 2010 г.). (CD).
6. Митяков, В.Ю. Градиентная теплотметрия в радиационном и сложном теплообмене / В.Ю. Митяков, В.В. Османов // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в новых энергетических технологиях: Тез. докл. XVIII Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика А.И. Леонтьева, Звенигород, 23–27 мая 2011 г.
7. Сапожников, С.З. Диагностика топочных процессов на основе градиентной теплотметрии / С.З. Сапожников, К.А. Григорьев, В.Ю. Митяков, А.В. Митяков, Ю.А. Рундыгин, В.В. Османов // Проблемы и совершенствование угольной энергетики : Сборник докладов V научно-практической конференции "Минеральная часть топлива, шлакование, очистка котлов, улавливание и использование золы" (Челябинск, 7–9 июня 2011 г.). Т. III.– Челябинск: ОАО "ИЦЭУ", 2011.– С. 249-258.
8. Sapozhnikov, S.Z. Development and Application of Gradient Heat Flux Measurement for Industrial Boiler Furnaces / S.Z. Sapozhnikov, K.A. Grigoryev, V.Yu. Mitiakov, A.V. Mitiakov, Yu.A. Roundyguine, V.V. Osmanov // Cleaner Combustion and Sustainable World: Proceedings of the 7th International Symposium on Coal Combustion / Editors: Haiying Qi, Bo Zhao.– Tsinghua University Press, Beijing and Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012.– P. 504-506.
9. Сапожников, С.З. Разработка градиентных датчиков теплового потока для теплотметрии в камерах сгорания / С.З. Сапожников, В.Ю. Митяков, А.В. Митяков, К.А. Григорьев, Ю.А. Рундыгин, В.В. Османов // Горение твердого топлива: Тез. докл. VIII Всерос. конф. с междунар. участием, Новосибирск, 13–16 ноября 2012 г. (CD).
10. Османов, В.В. Экономическая оценка внедрения градиентных датчиков теплового потока для теплотметрии в камерах сгорания / В.В. Османов, Д.О. Глушков, И.А. Брикман, М.Ю. Чернецкий // Всероссийский журнал научных публикаций. 2013. № 5 (15). С. 43–45.