

На правах рукописи



ПРОСКУРИН ВЯЧЕСЛАВ МИХАЙЛОВИЧ

**ГРАДИЕНТНАЯ ТЕПЛОМЕТРИЯ
КАК МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ
ПЛАМЕННОГО НАГРЕВА**

1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидат технических наук

Санкт-Петербург

2024

Работа выполнена в Федеральном государственном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель: **Митяков Владимир Юрьевич**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Лукьянов Геннадий Николаевич**, доктор технических наук, профессор, доцент факультета систем управления и робототехники ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО», г. Санкт-Петербург

Золоторёв Николай Николаевич, кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник Лаборатории интенсификации процессов тепломассопереноса в многофазных системах, ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск

Ведущая организация **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева»**, г. Рыбинск

Защита состоится «21» июня 2024 года в 14 часов 00 минут на заседании Диссертационного совета У.1.3.14.07 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, Механический корпус, аудитория 14

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте www.spbstu.ru.

Автореферат разослан «____» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета У.1.3.14.07
к.т.н.



Сероштанов Владимир Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Устройства пламенного нагрева, в первую очередь, котельные установки, постоянно совершенствуются. Важно контролировать энергетические и экологические параметры их работы, обеспечивать стабильность и безопасность эксплуатации.

Важной составляющей теплотехнического исследования, мониторинга и оптимизации является теплотметрия – оценка тепловыделений от пламени и распределения плотности теплового потока по экранным трубам, стенкам и другим поверхностям нагрева этих объектов. В последнее время активно развивается цифровая измерительная техника, которая позволяет фиксировать и обрабатывать значительные информационные потоки. Однако в области теплотметрии ситуация иная. Новых прорывных технологий практически нет. Это связано, в первую очередь, с несовершенством первичных преобразователей.

Применяемые в топочной теплотметрии температурные вставки доказали свою надежность и репрезентативность, как информативное средство измерения тепловых потоков в топках котлов. Однако их использование требует врезки в элементы установок, находящихся под высоким давлением, что опасно для герметичности пароводяного тракта.

Степень разработанности темы исследования. Существенно большими возможностями обладает градиентная теплотметрия, методическую основу и элементную базу которой развивают в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого. Здесь с 2007 года в исследовании топочных процессов используют гетерогенные градиентные датчики теплового потока (ГГДТП), разработанные и созданные в университете. С их помощью исследованы тепловые потоки на поверхностях экранных труб и газоплотных топок в промышленных котлах; получены приоритетные результаты, имеющие теоретическое и практическое значение.

В 2008 году, впервые в мировой практике специалисты СПбПУ выполнили пилотную серию экспериментов по топочной теплотметрии на действующем промышленном котле БКЗ-210 (ТЭЦ-4, г. Киров) с применением термостойких ГГДТП. Эксперимент доказал высокую информативность и функциональность ГГДТП. Развитие топочной теплотметрии, как метода мониторинга процессов в теплоэнергетических объектах признано перспективным. В развитие этой темы были разработаны и применены в промышленных экспериментах модернизированные измерительные ячейки для газоплотных топок. Это решение оказалось удачным, но только для топок этого типа.

Сведений об удачном использовании теплотметрии в новых подходах к мониторингу огне-технических процессов в мировой практике не обнаружено.

Цель и задачи работы. Целью работы является обоснование, разработка и применение в лабораторных и промышленных условиях методов и средств на базе градиентной теплотметрии, позволяющих исследовать тепловыделения от факела и распределение плотности теплового потока по поверхностям теплообмена. При этом необходимо решить следующие задачи.

1. Выполнить обзор методов и средств теплотерии, применяемых или пригодных к применению в высокотемпературных установках.
2. Разработать технологию и создать ГГДТП для изучения тепловыделений пламени, выполнить их градуировку и оценить неопределенность градиентной теплотерии на этой элементной базе.
3. Разработать, изготовить и испытать трубчатый термозонд с ГГДТП, применить его в теплотехническом эксперименте.
4. Провести градиентную теплотерии с размещением ГГДТП на поверхностях теплообмена: обтекаемых пламенем экранных трубах котла ДКВр 10/13, а также на пластинемисени, нагреваемой газовым диффузионным факелом.
5. Выполнить зондовую градиентную теплотерии на стендах с факелами, использующими газовое и жидкое топливо, проверить работоспособность термозонда в условиях эксперимента.

Научная новизна диссертационной работы состоит:

- в разработке и реализации новой технологии, позволяющей производить ГГДТП из композиции медь + никель методом диффузионной сварки в среде аргона;
- в разработке, создании и апробации универсального трубчатого термозонда для градиентной теплотерии в топках и камерах установок с пламенным нагревом;
- в получении приоритетных данных о распределении плотности теплового потока на поверхности мишени, разогреваемой струей диффузионного газового пламени;
- в получении экспериментальных данных о тепловыделении от свободного факела, использующего газовое и дизельное топливо.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем:

- показана надежность и стабильность диффузионной сварки в среде аргона, впервые примененной для изготовления ГГДТП из композиции медь + никель;
- применен новый способ измерения плотности теплового потока на экранных трубах котла ДКВр 10/13 в процессе его отладки и эксплуатации; выявлены недостатки способа и определены пути его совершенствования;
- впервые реализована градиентная теплотерии на разогреваемых диффузионным газовым пламенем плоскостях, сочетаемая с тепловизионной диагностикой и использованием аналитического аппарата теории теплопроводности;
- показана надежность и информативность градиентной теплотерии, основанной на использовании трубчатого термозонда с ГГДТП при исследовании свободного пламени.

Методология и методы исследования включают градиентную теплотерии, контактную и бесконтактную термометрию, использование аналитического аппарата теории теплопроводности, оценку неопределенности измерений и расчетов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Технология производства ГГДТП из композиции медь + никель.

2. Конструкция, результаты испытаний и предложения по использованию трубчатого термозонда для градиентной теплометрии.

3 Результаты градиентной теплометрии на поверхностях теплообмена, разогреваемых в среде газового диффузионного пламени.

4 Результаты градиентной теплометрии тепловыделений от свободного горящего факела на газовом и жидком топливе.

Личный вклад соискателя. Автор принимал непосредственное участие в разработке и изготовлении установки, в отработке технологии производства ГГДТП из композиции медь + никель методом диффузионной сварки в среде аргона. Участвовал в разработке и конструировании трубчатого термозонда для градиентной теплометрии в топках и камерах установок с пламенным нагревом. Совместно с соавторами получил экспериментальные данные о тепловыделении от свободного факела, использующего газовое и дизельное топливо и приоритетные данные о распределении плотности теплового потока на поверхности, разогреваемой струей диффузионного газового пламени. Проанализировал и обобщил полученные данные. Принимал участие в подготовке статей, докладов и выступлений на семинарах и конференциях.

Достоверность полученных в работе результатов определяется:

- использованием метрологически аттестованных приборов;
- расчетом по действующим стандартам неопределенностей, характерных для выполненных измерений;
- качественным соответствием полученных результатов данным, приведенным в использованной литературе.

Апробация работы проводилась на семинарах и конференциях:

- на III международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики», Москва, 19-23 октября 2020;
- на XXIII Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А. И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках», 24-28 мая 2021, Екатеринбург;
- на Международной научно-практической конференции для представителей сообщества молодых инженеров ТЭК «Развивая энергетическую повестку будущего», 10-11 декабря 2021, Санкт-Петербург;
- на X Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных с международным участием «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве» ТИМ'2022, Екатеринбург, 19 - 20 мая 2022;
- на Всероссийской конференции «XXXVIII Сибирский теплофизический семинар», Новосибирск, 29 – 31 августа 2022;
- на XIV Международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиноведения» (научные чтения, посвященные Павлу Осиповичу Сухому), Гомель, 27-28 октября 2022;

- на восьмой Российской национальной конференции по теплообмену РНКТ-8, Москва, 17 – 22 октября 2022;
- на XXIV Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика А. И. Леонтьева, посвященной 100-летию академика РАН В.Е. Алемасова «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках», 23 – 27 мая 2023, Казань.

Основные результаты диссертации опубликованы в 8 печатных работах, в том числе в 1 журнале из перечня ВАК и в 3 изданиях, индексируемых базами данных Scopus и Web of Science и 4 работах, индексируемых базой РИНЦ.

Диссертация включает введение, 4 главы основного текста, заключение и список литературы. Она состоит из 170 страниц основного текста, 140 рисунков и 5 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, описана степень ее разработанности, сформулированы цели и задачи исследования, его научная новизна, теоретическая и практическая ценность, методология, а также положения, выносимые на защиту. Обоснована достоверность результатов; представлены сведения об апробации и публикациях по теме диссертационной работы.

В первой главе представлен обзор литературы, посвященной определению местной плотности теплового потока в камерах сгорания энергетических котлов. Описаны современные методики топочной теплотометрии, используемые в экспериментальных исследованиях, их преимущества и недостатки. Отмечено, что большинство методик сводится, к термометрии с последующей обработкой данных путем расчета или численного моделирования, что приводит к неустрашимым недостаткам. Выполнен аналитический обзор работ, посвященных методике и элементной базе градиентной теплотометрии.

Особое внимание уделено экспериментам по топочной теплотометрии с применением гетерогенных градиентных датчиков теплового потока (ГГДТП), которые не имеют аналогов в мировой практике.

Быстродействие ГГДТП существенно выше, чем термопар, поэтому измеренный ими тепловой поток не сглаживается по амплитуде. Это основное преимущество градиентной теплотометрии, как метода исследования.

В завершении главы, очерчен круг задач, решение которых составляет основное содержание диссертации.

Во второй главе описана элементная база и техника градиентной теплотометрии, а также новая технология изготовления ГГДТП.

Для производства слоистых датчиков традиционно используют диффузионную сварку в вакууме, основанную на экспериментально подобранном сочетании температуры, давления и времени выдержки. Её реализация требует сложного и дорогостоящего оборудования, тщательной обработки свариваемых поверхностей. При изготовлении ГГДТП желательно обойти эти сложности.

Впервые реализованный в работе вариант предусматривает диффузионную сварку в среде аргона.

При участии автора сконструирована установка для диффузионной сварки горизонтального типа, с возможностью точной регулировки следующих параметров:

- сварочного давления на образец;
- температуры сварки;
- времени сварочного процесса.

Установка (рисунок 1) состоит из механической части и нагревателя (горизонтальная печь МТП-2МР-50-500) с точной регулировкой температуры. Цифровой контроллер БУ-7-4 позволяет задавать и поддерживать температуру в печи до 1100 °С с границами стабилизации ± 3 °С.

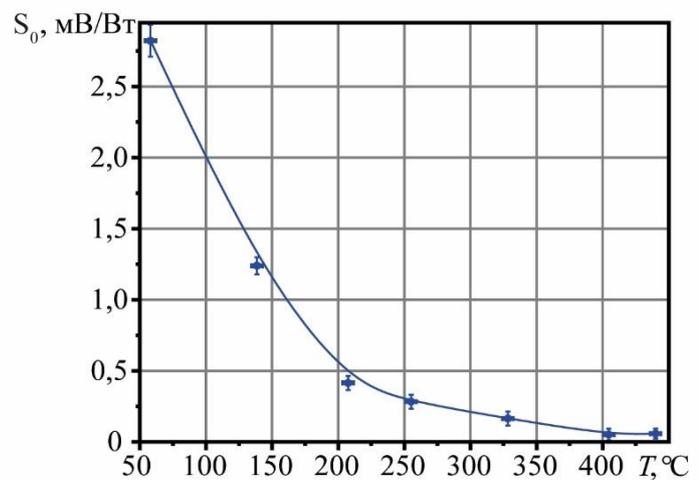


Рисунок 1 – Общий вид установки для диффузионной сварки в среде аргона

На созданной установке изготовлены ГГДТП из композиции медь + никель (рисунок 2, а). Они имеют по четыре провода: два хромелевых и два алюмелевых. При съеме сигнала с двух однотипных проводов получаем термоЭДС, пропорциональную тепловому потоку, а при съеме с двух разнородных – температуру в зоне размещения ГГДТП, осредненную по его площади (достаточно малой). Четвертый провод является резервным.



а)



б)

Рисунок 2 – ГГДТП с тоководами (а) и зависимость вольт-ваттной чувствительности ГГДТП из композиции медь + никель от температуры (б)

Технология реализована при изготовлении семи заготовок из композиции медь + никель. Вольт-ваттная чувствительность серии из 7 ГГДТП, изготовленных по данной технологии, различается на 5 – 10%.

Индивидуальная абсолютная градуировка датчиков по Джоуль-Ленцову тепловому потоку проводилась на специальном градуировочном вакуумном стенде. Получена зависимость вольт-ваттной чувствительности ГГДТП из композиции медь + никель от температуры (рисунок 2, б).

ГГДТП из композиции медь + никель работоспособен до температуры 500 °С. В наших опытах этого достаточно.

Относительная расширенная неопределенность тепло-и термометрии, рассчитанная по ГОСТ 34100.3 – 2017/ISO/IEC, не превышает 7 %.

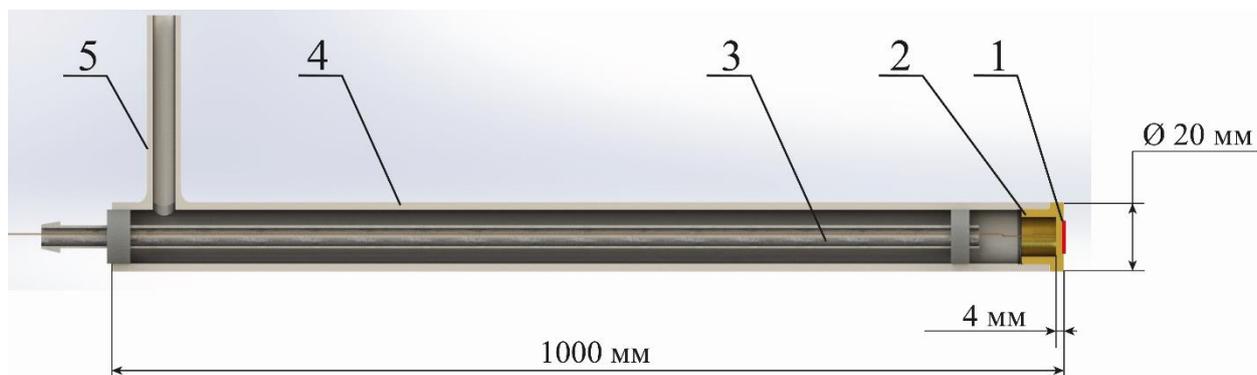
Для градиентной теплотметрии в различных устройствах создан термозонд с ГГДТП, который позволяет проводить градиентную теплотметрию на действующем оборудовании в режиме реального времени. Фотография и схема конструкции зонда представлена на рисунках 3 и 4, соответственно.



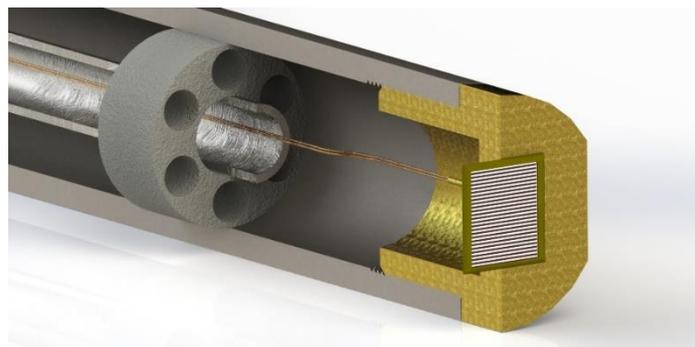
Рисунок 3 – Фото термозонда

Зонд выполнен по схеме труба в трубе с водяным охлаждением, что позволяет измерять плотность теплового потока при воздействии высоких температур. Он состоит из внешнего трубчатого кожуха 4 и внутренней трубки 3 для подачи охлаждающей воды. Кожух и внутренняя трубка изготовлены из нержавеющей стали 12Х18Н9Т. Трубка кожуха имеет наружный диаметр 20 мм, толщину стенки 2 мм и длину 1000 мм, а внутренняя трубка – наружный диаметр 10 мм, толщину стенки 1,5 мм и длину 1000 мм. Внутренняя трубка 3 установлена таким образом, что вода подается в зону измерительной вставки диаметром 20 мм и длиной 21 мм, выполненной из латуни Л59С1. Для отвода охлаждающей воды во внешний кожух 4 врезан штуцер 5. Датчик теплового потока 1 фиксируется с помощью высокотемпературного компаунда. В зоне установки ГГДТП закреплены хромель-алюмелевая термопара 2 для контроля температуры вставки снаружи и такая же термопара 3 внутри зонда. Для защиты от высоких температур провода от ГГДТП и термопары помещены в защитные керамические трубки.

В зависимости от условий эксперимента в измерительных вставках зонда возможно применение ГДТП из висмута и ГГДТП из композиций медь + никель, никель+сталь, медь+полупроводник и др. Для точной теплотметрии в зонде использовался ГГДТП из композиции медь+никель; для пилотных опытов на горелке OILON KP-6 использован ГДТП из монокристаллического висмута.



а)



б)

1 – ГДТП; 2 – измерительная вставка; 3 – трубка для подачи охлаждающей воды;
4 – внешний кожух; 5 – штуцер для отвода охлаждающей воды

Рисунок 4 – Конструкция термозонда (а) и измерительной вставки с ГДТП (б)

Проверка работоспособности схемы проводилась с использованием бытовой газовой горелки. Горизонтально установленный зонд обдувался потоком горящего газа. В результате была получена временная теплограмма на поверхности измерительной вставки. Рассчитанная по известным температурам на передней и задней стенках измерительной вставки плотность теплового потока сопоставима с измеренной с помощью ГДТП.

Для градиентной теплотрии, позволяющей оценить тепловыделения от дизельного факела, изготовлен стенд.

В пилотной серии опытов при измерениях плотности теплового потока, создаваемого факелом на жидком топливе, использовалась горелка Oilon KP-6, оснащенная форсункой DANFOSS. Тепловая мощность горелки, в зависимости от используемого типоразмера форсунки, варьируется от 42 до 120 кВт. Мощность горелки регулировалась в ручном режиме. Полнота сгорания дизельного топлива обеспечивалась регулировкой объема воздуха, подаваемого вентилятором в воздушный тракт пламенной головы.

Для регистрации данных применялись вторичные преобразователи: цифровые мультиметры FLUKE 287, FLUKE 289, аналогово-цифровой преобразователь NI 9216 с использованием шасси модели DAQ 9185, комбинированный осциллограф Tektronix MS044.

В третьей главе описаны результаты экспериментального исследования процессов теплообмена на мишени и в топке парового котла ДКВр 10/13 методом градиентной теплотметрии.

В первых двух сериях опытов исследовано распределение температуры и плотности теплового потока, создаваемого пламенем диффузионной газовой горелки, по поверхности мишени, для чего был создан экспериментальный стенд (рисунок 5).

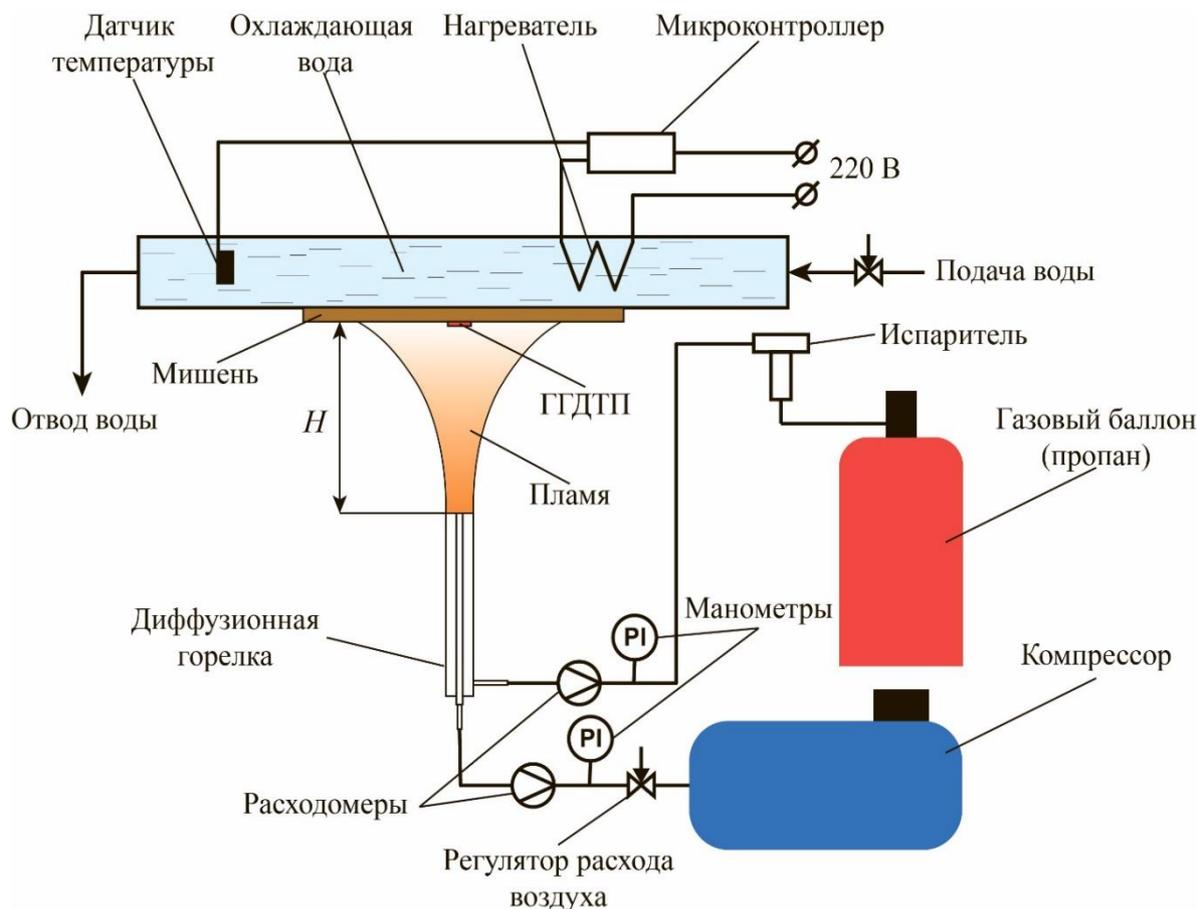


Рисунок 5 – Схема экспериментального стенда

Диффузионная горелка, представляла собой коаксиальную трубу, по внутренней трубке которой подается воздух, а по кольцевому каналу – топливо.

На поверхности пластины смонтирован ГГДТП из композиции медь + никель размерами $5 \times 5 \times 0,2$ мм. Температуру пламени контролировали с помощью термопары платина-платинородий ТПР 5.182.003 с диаметром термоэлектродов 0,25 мм.

На рисунке 6, в качестве примера, показано влияние коэффициента избытка воздуха α и числа Рейнольдса Re на плотность теплового потока в центре мишени при соотношении $H/d = 7,5$. Число Рейнольдса $Re = W \cdot d / \nu$ определяли по диаметру воздушного канала $d = 6$ мм и по скорости воздуха W , определяемой расходомером.

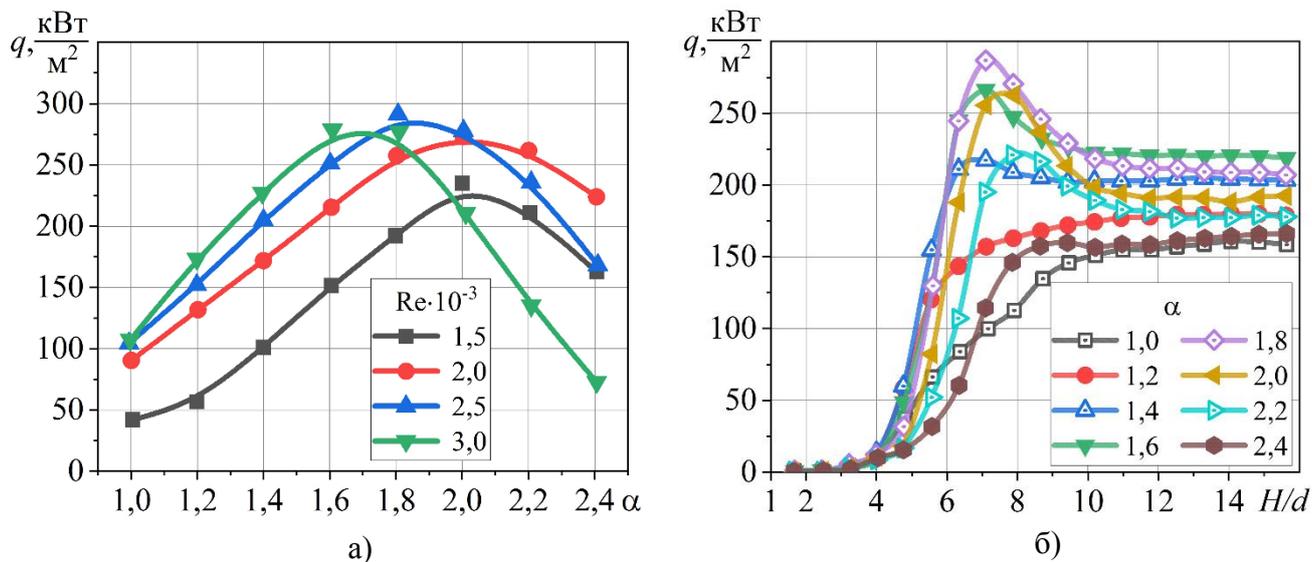


Рисунок 6 – Результаты градиентной теплотометрии:

при различных числах Рейнольдса Re в зависимости от коэффициента избытка воздуха (а),
при различных коэффициентах избытка воздуха α в зависимости от расстояния H/d (б)

Результаты серии опытов сводятся к следующему.

1. Диффузионное пламя включает зону захвата и зону смешения и горения. При низких значениях α наблюдается синее пламя с короткой зоной смешения и горения, при высоких – желтое, с длинной второй зоной. Длина зоны захвата зависит от Re и α слабо.
2. Термометрия выявила холодную сердцевину пламени при малых значениях H/d . С ростом H/d холодная зона исчезает, максимум температуры приходится на центр пятна нагрева; температура монотонно снижается по мере роста H/d .
3. Плотность теплового потока в центре пятна зависит от сочетания Re , α и H/d . Максимум нагрева достигается при подборе α и Re , когда расстояние H/d зафиксировано. С ростом числа Рейнольдса Re пик плотности теплового потока достигается при меньших значениях α и H/d .
4. Радиальное распределение плотности теплового потока также зависит от Re , α и H/d . Рост числа Рейнольдса Re увеличивает плотность теплового потока монотонно, а при низких α и H/d обеспечивает максимум нагрева при определенном подборе этих величин. При малых H/d холодное ядро пламени смещает максимум плотности теплового потока от центра пятна; при более высоких H/d этот максимум возвращается к центру.

В третьей серии экспериментов оценено влияние завихрителей, установленных в воздушный канал диффузионной горелки, на плотность теплового потока. Экспериментальная установка аналогична представленной на рисунке 4. Различия заключались в том, что в качестве мишени применяли кварцевую пластину, а для измерения поля температуры применяли тепловизор FLIR P640.

Опыты проводились при числах Рейнольдса, определенных так же, как и в первой серии опытов: $Re = 10^3 \dots 2,5 \cdot 10^3$ при $H/d = 2 \dots 20$.

Результаты, полученные при $Re = 2000$, $\alpha = 1,1$ и различных H/d , представлены на рисунке 7.

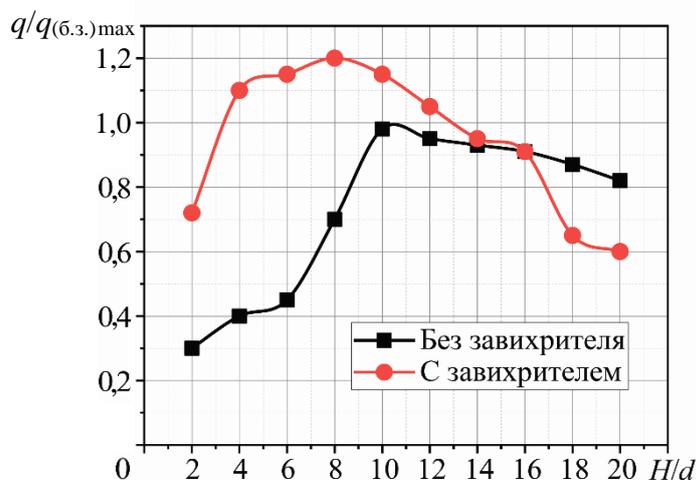


Рисунок 7 – Плотность теплового потока для коаксиальной горелки с завихрителями и без завихрителей для $\alpha = 1,1$ и $Re = 2000$ при различных H/d

Результаты экспериментов показали:

1. Меньшая плотность теплового потока вблизи центрального пятна наблюдается при столкновении с незакрученным пламенем ввиду того, что мишени касается середина воздушной струи.
2. Сравнение средних плотностей теплового потока показывает, что закрученный поток улучшает сгорание за счет быстрого перемешивания воздуха с топливом. При $\alpha = 1,1$ и $H/d = 4$ средняя плотность теплового потока от пламени вихревой горелки при $Re = 2000$ в 1,8 раза выше, чем от горелки без скручивания – несмотря на то, что смесь без скручивания более насыщена.
3. При $Re = 2000$ и $\alpha = 1,1$ в диапазоне $H/d = 2 \dots 20$ максимум плотности теплового потока достигается при $H/d = 8$ для завихренной и $H/d = 10$ для гладкой струи. Средняя плотность теплового потока в этом режиме выше у завихренной струи, однако при $H/d = 18 \dots 20$ она уменьшается из-за укорочения пламени.
4. Информативность результатов обеспечена тестированием аналитического решения по данным градиентной теплотметрии. Однако прямое измерение с помощью ГГДТП, размещенных на поверхности теплообмена, дает приемлемую надежность результатов только в лабораторных условиях. Вызывает сложности и вывод проводов от ГГДТП в условиях, когда на пластину падает струя высокотемпературного газа.

Завершают главу результаты градиентной теплотметрии на поверхностях нагрева парового котла ДКВр 10/13, установленного в Центральной котельной Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Целью опытов стала оценка применимости ГГДТП при мониторинге горения в котлах с экранными трубами без плавников, а также отработка методики в котлах данного типа.

Выполнено три серии опытов в топочном пространстве. В первой серии ГГДТП устанавливались на экранные трубы котла стационарно.

В отличие от методов монтажа датчиков, представленных в литературе, наш метод исключает врезку в водяной тракт высокого давления котла, поскольку ГГДТП монтировались на поверхностях экранных труб. Пример установки ГГДТП на трубу котла показан на рисунке 8.

ГДТП из композиции медь+никель монтировались на высоте, соответствующей оси сопла горелки. Обработка результатов первой серии опытов показала, что получен стабильный сигнал приемлемого уровня.

Во второй серии экспериментов был применен новый способ крепления ГГДТП, который заключался в следующем: на зачищенную поверхность экранной трубы, покрытую слоем термопасты, укладывалась прослойка из слюды, на которую крепился ГГДТП с помощью термопасты. ГГДТП на поверхности дополнительно фиксировались проволокой из нихрома.



Рисунок 8 – ГГДТП на экранной поверхности трубы

Провода ГГДТП, защищенные керамическими трубками, выводились через технологическое отверстие в обмуровке котла, которое затем заделывается огнеупорным раствором. Место контакта проводов и ГГДТП защищалось высокотемпературным компаундом, который при достижении температуры в топке в 800°C затвердевает и по свойствам приближается к керамике, обеспечивая фиксацию проводов и их защиту от окисления. Схема установки и пример крепления ГГДТП представлены на рисунке 9. В начале опыта ГГДТП №2 вышел из строя.

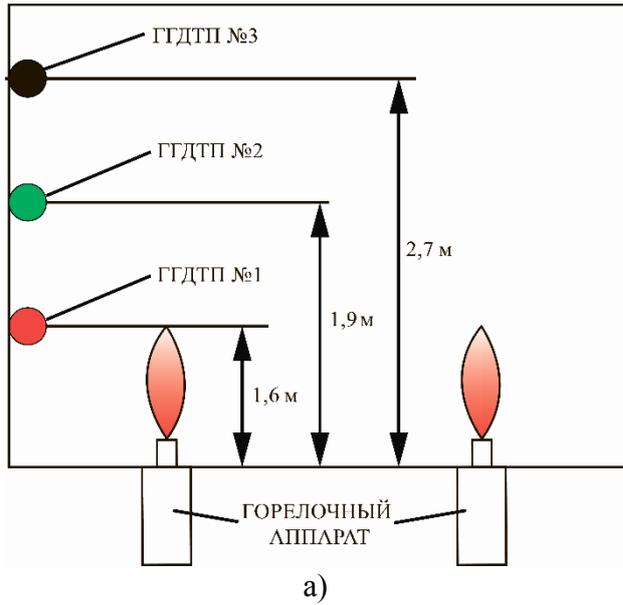


Рисунок 9 – Схема расположения ГГДТП в топке котла ДКВр 10/13 (а), пример установки ГГДТП на экранные трубы (б)

Данные о плотности тепловых потоков в двух других точках бокового экрана представлены на рисунке 10.

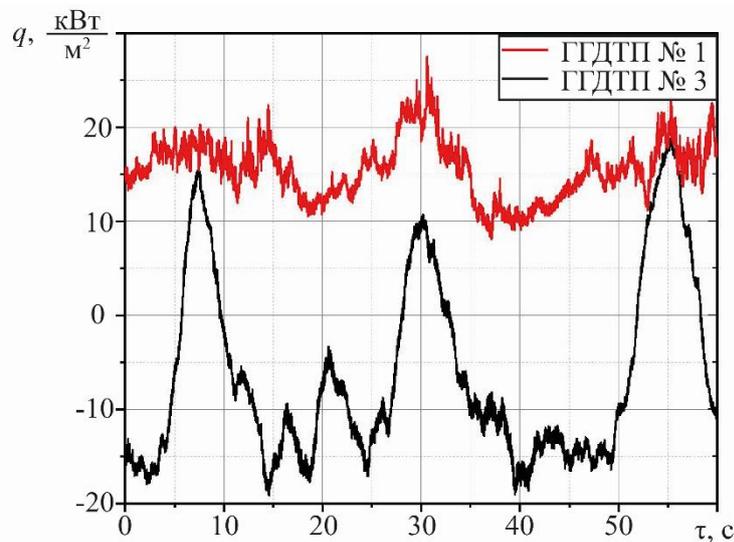


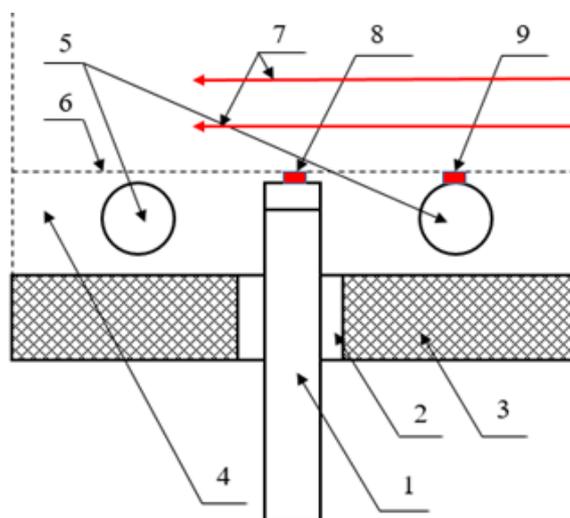
Рисунок 10 – Временная теплограмма в двух точках левого экрана котла ДКВр 10/13

Полученные значения плотности теплового потока на боковых экранах котла с негазоплотной топкой хорошо согласуются с данными других авторов при сходном позиционировании первичных преобразователей в топках котлов с газоплотными экранами. На графике наблюдаются пульсации плотности теплового потока, что является следствием пульсаций факела при нестационарном режиме работы горелки.

Значения температуры на стенках экранных труб, измеренной с помощью термодатчиков групп ГГДТП и дополнительных термопар, согласуются с рабочим режимом котловых труб и составляют $120 \pm 15^\circ\text{C}$.

Показано, что ГГДТП применимы при высокотемпературной теплотерии на экранных трубах котла с негерметичной топкой. В водотрубных котлах типа ДКВр целесообразно применение ГГДТП при режимной наладке.

Для отработки зондовой теплотерии была проведена третья серия опытов в котле ДКВр 10/13. ГГДТП зонда располагался там же, где раньше стояли стационарные датчики. Котел работал в режиме, аналогичном второй серии экспериментов. Замеры плотности теплового потока с помощью зонда 1 выполнялись через смотровой люк 2 (рисунок 11). Во время плановой остановки котла был выполнен замер расстояния от плоскости смотрового люка до плоскости экранных труб, поэтому во время эксперимента ГГДТП зонда 8 располагался в соответствии с положением стационарных датчиков 9.



- 1 – переносной зонд, 2 – смотровой люк, 3 – обмуровка котла, 4 – топка котла,
 5 – трубы бокового экрана, 6 – плоскость ГГДТП, 7 – тепловой поток от горелки,
 8 – ГГДТП зонда, 9 – стационарный ГГДТП на экранной трубе

Рисунок 11 – Схема эксперимента в котле ДКВр 10/13 с использованием термозонда

На рисунке 12 сопоставлены результаты теплотерии с помощью стационарного ГГДТП и термозонда.

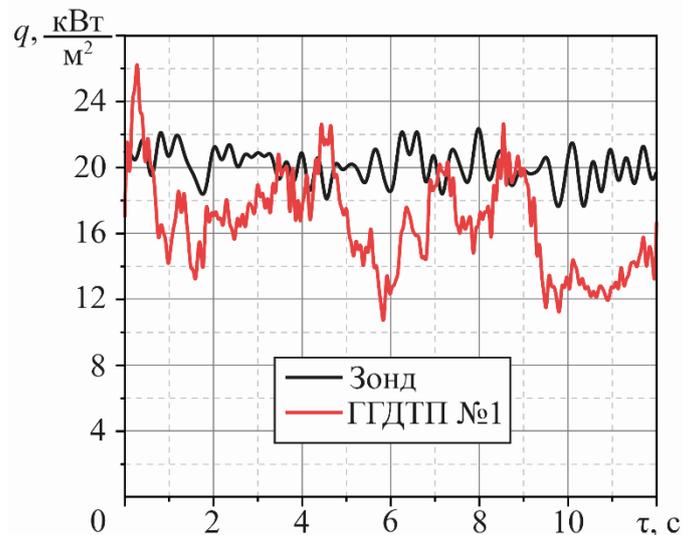


Рисунок 12 – Сравнение показаний ГГДТП, установленных на экранной поверхности, и ГГДТП на зонде

Средний уровень плотности теплового потока, зафиксированный зондом и датчиком на экранной поверхности, сопоставим (отклонение 12 %). ГГДТП № 1 фиксирует пульсации плотности теплового потока, а датчик на зонде их сглаживает. Это связано с массивностью вставки, на которой установлен датчик. В дальнейших опытах толщина металла под датчиком уменьшена с 11 мм до 2 мм.

Данные, полученные с помощью зонда согласуются с результатами серии экспериментов по теплотрии в топке котла ДКВр 10/13 с помощью стационарных ГГДТП, что говорит о применимости термозонда при измерении местной плотности теплового потока в топке котла с негерметичным экраном.

В четвертой главе представлены результаты экспериментов, выполненных с помощью высокотемпературного зонда, имевшего ГГДТП из композиции медь+никель.

Вначале было детально исследовано распределение местной плотности теплового потока по длине факела. Источником служили горелки, работающие на газовом и дизельном топливе.

Для экспериментов с газовым топливом применялась горелка OILON GP-6.10. Режим сжигания газа подбирался таким образом, чтобы получить устойчивое горение (расход топлива 7,8 кг/ч, расход окислителя 122,6 кг/ч). При этом режиме обеспечено эффективное сжигание газа, для которого при оптимальном стехиометрическом соотношении, характерно отсутствие излучения в видимом спектре. Результаты измерения местной плотности теплового потока от газового факела представлены на рисунке 13.

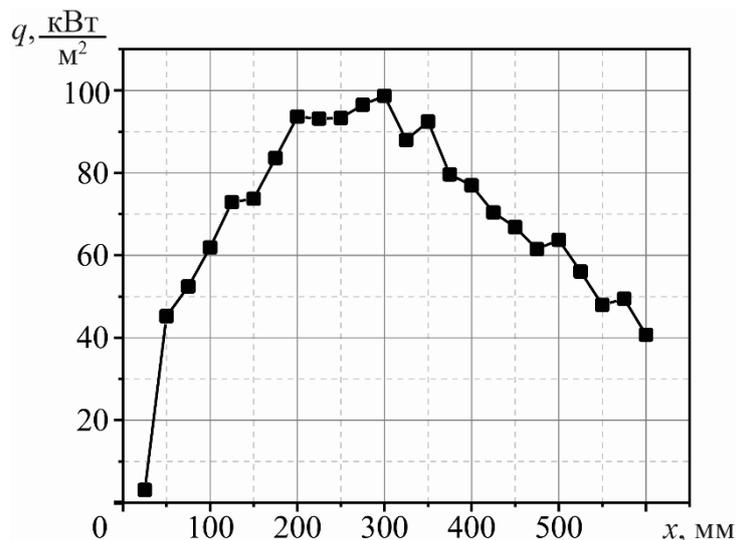


Рисунок 13 – Местная плотность теплового потока от газового факела

На диаграмме можно выделить три зоны горения. Для зоны «холодного» пламени (0 – 150 мм от сопла горелки) характерно активное смешивание топлива с окислителем. В этой зоне наблюдается горение незначительной части топлива. Зона активного горения расположена в интервале 150 – 300 мм от сопла. Здесь достигается максимальное тепловыделение. Соотношение топливо-окислитель имеет оптимальные значения. Плотность теплового потока достигает максимума. Догорание остатков топлива происходит в хвостовой зоне (350 мм от сопла и далее).

Значение плотности теплового потока $q_{\text{экс}}$, измеренное в эксперименте, составило $71,7 \text{ кВт/м}^2$. При теоретическом расчете получено значение $q_{\text{теор}} = 73,6 \text{ кВт/м}^2$. Результат свидетельствует о работоспособности методики в исследованиях горения при факельном сжигании топлива.

Следующий этап исследований связан с горением дизельного топлива. Здесь основную проблему представляет распыление капель в зоне горения.

В пилотном опыте расход топлива составил $7,1 \text{ кг/ч}$, угол распыла 60° , расход воздуха $166,5 \text{ кг/ч}$. Температура окружающей среды $0 \text{ }^\circ\text{C}$.

В первом приближении рассмотрено излучение от пламени как от твердого тела с температурой, равной температуре на периферии факела со степенью черноты, близкой к 1,0. При расчете по формуле Стефана-Больцмана получено значение $q_{\text{расч}} = 31,6 \text{ кВт/м}^2$, а среднеинтегральное значение плотности теплового потока, полученное экспериментально, составило $q_{\text{экс}} = 28,6 \text{ кВт/м}^2$. Отклонение в 9,5% можно считать удовлетворительным.

Теплометрия проводилась в диапазоне расходов $6,49 \dots 8,46 \text{ кг/ч}$, обеспечивающих устойчивое горение. Результаты теплометрии, полученные в опытах при разных режимах работы горелки представлены на рисунке 14. По аналогии с газовым факелом, можно выделить три зоны горения: зону «холодного пламени», зону «активного горения» и хвостовую зону.

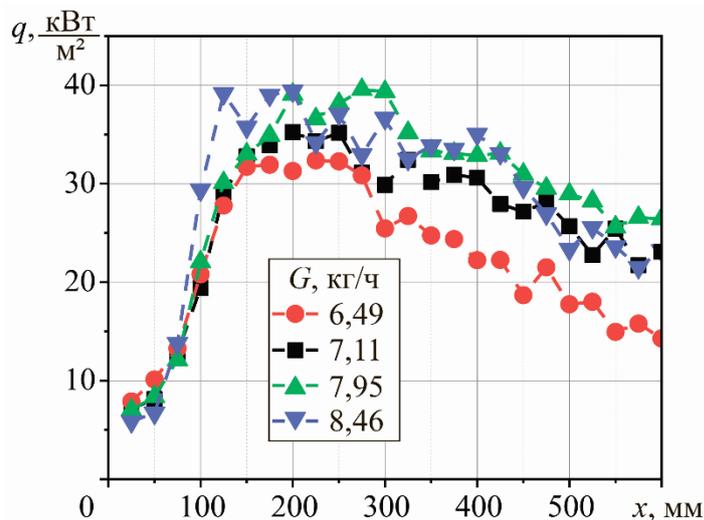


Рисунок 14 – Изменение плотности теплового потока по длине факела в зависимости от расхода топлива

При повышении расхода топлива средняя плотность теплового потока растет до расхода, равного 7,95 кг/ч, а затем, при дальнейшем увеличении расхода топлива – уменьшается: повышается неустойчивости факела, особенно в хвостовой части. При этом режиме на теплограмме в хвостовой части наблюдается неравномерность тепловыделения.

Следующий этап экспериментов был связан с повышением эффективности сжигания дизельного топлива. В дизельной горелке установлен направляющий аппарат для закрутки потока окислителя, что повышает эффективность сжигания. В качестве дополнительного турбулизатора использовалась решетка с шагом 20 мм и толщиной прутьев 1,5 мм, перекрывающая все сечение пламенной головы и приставленная вплотную к ней. Внесение в пламя решетки-турбулизатора увеличивает светимость факела. Решетку целесообразно ставить в начале зоны «холодного пламени» ($0 < x < 25$ мм), где температура пламени не превышает 250 °С. Изменение плотности теплового потока представлено на рисунке 15.

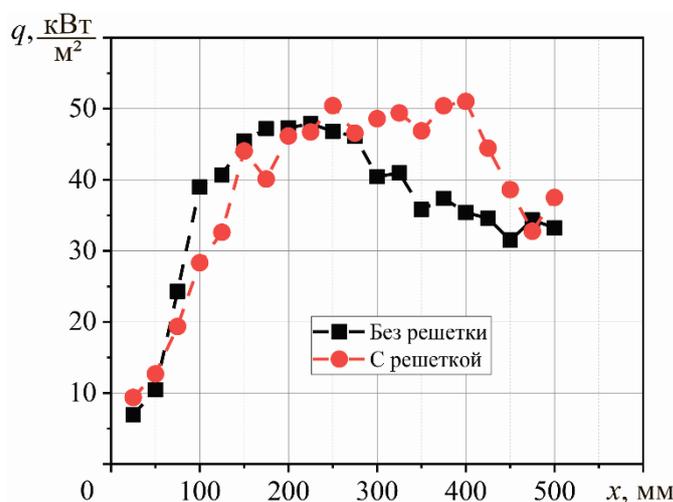


Рисунок 15 – Изменение плотности теплового потока от дизельного факела при использовании решетки-турбулизатора ($G = 7,95$ кг/ч)

Решетка-турбулизатор позволила расширить зону активного горения в 4 раза и снизить уровень пульсаций. Удалось повысить интенсивность перемешивания и уменьшить зону «холодного пламени». Значение средней плотности теплового потока от факела выросло на 9,7 %.

В настоящее время активно развивается би-топливное сжигание. Ввиду невозможности сжигать чистый водород его подмешивают в различные топлива для повышения эффективности горения. Повсеместно применяют впрыск газа в пылеугольный факел. Это позволяет повысить тепловыделение и снизить количество вредных выбросов.

Выполнен пилотный эксперимент по сжиганию дизельного топлива с добавлением в зону «холодного пламени» пропана. Для ввода газа потребовалось модернизировать горелку OILON КР-6. В непосредственном контакте с форсункой был установлен патрубок подвода газа. При таком способе подачи газ практически не влияет на структуру потока основного топлива.

Профиль плотности теплового потока при впрыске газа для расхода дизельного топлива 7,95 кг/ч представлен на рисунке 16.

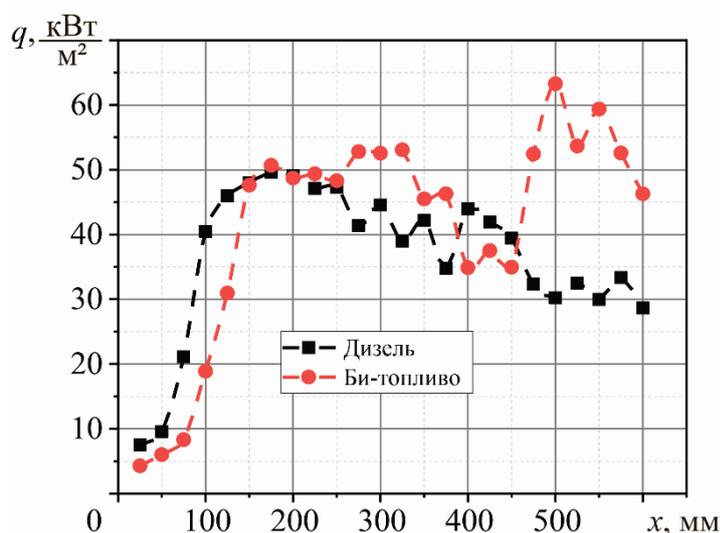


Рисунок 16 – Местная плотность теплового потока от дизельного факела при попутном подводе газа ($G = 7,95$ кг/ч)

Подвод газа влияет на факел сходно с тем, как влияет на него решетка-турбулизатор: профили температуры и плотности теплового потока в зоне развитого горения становятся более равномерными. Однако в хвостовой части факела наблюдается непостоянное вторичное воспламенение.

Оптимальным, определенным с помощью градиентной теплотометрии, является режим с расходом жидкого топлива 7,95 кг/ч. Он обеспечивает не только максимальную плотность теплового потока в зоне активного горения, но и наиболее равномерное ее распределение в топочном пространстве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показано, что из множества методов и технических средств, используемых при мониторинге тепловыделений от пламени в топках котлов и других высокотемпературных объектов, особые преимущества даёт градиентная теплотметрия на основе гетерогенных градиентных датчиков теплового потока (ГГДТП).
2. Разработана и реализована технология, позволяющая произвести, отградуировать и использовать ГГДТП на основе композиции медь+никель. Показано, что относительная расширенная неопределенность измерений с применением таких датчиков не превышает 6,24%.
3. Разработана конструкция, изготовлен и успешно испытан трубчатый термозонд, позволивший исследовать тепловыделения от факела горелки, работающей на пропан-бутане и дизельном топливе.
4. Исследовано распределение плотности теплового потока на поверхностях, обтекаемых нормально направленной струёй газового пламени. Предложена методика, позволившая выделить конвективную и радиационную составляющие теплового потока и проанализировать процессы тепловыделения от факела и нагрева поверхностей теплообмена.
5. Выполнена градиентная теплотметрия в топке котла ДКВр 10/13 на стадии отладки горелочных устройств и при эксплуатации в штатном режиме. Установлена стабильность и информативность методики. Одновременно установлено, что для мониторинга тепловых процессов в топке требуется диагностика с использованием термозонда.
6. Исследованы тепловыделения от факела, образованного с помощью горелки Oilon GP-6.10 при сжигании пропан-бутана и Oilon KP-6 при сжигании легкого дизельного топлива. Получено поле температуры в факеле и распределение плотности теплового потока по его длине.
7. Результаты выполненных экспериментов показали работоспособность, информативность и оперативность градиентной теплотметрии при исследовании процессов в котельных установках.

Основные научные публикации по теме диссертации

В журналах, входящих в перечень ВАК

1. Митяков В. Ю., **Проскурин В. М.**, Сапожников С. З., Павлов А. В., Бобылев П. Г. Градиентная теплотметрия при мониторинге топочных процессов // Тепловые процессы в технике. 2024. Т. 16. № 1. С. 42–51.

В рецензируемых научных изданиях, входящих в международную базу данных Scopus:

1. Yu. V. Andreev, M. A. Grekov, **V. M. Proskurin** and O. V. Novikova. Reliability and efficiency of heat supply systems in the Leningrad region. Journal of Physics: Conference Series this link is disabled, 2020, 1683(4), 042027, doi:10.1088/1742-6596/1683/4/042027;
2. S. Z. Sapozhnikov, V. Yu. Mityakov, A. V. Pavlov, P. G. Bobylev, Yu. V. Andreev, **V. M. Proskurin** and M. D. Vinogradov. Enhancement of heat transfer for boiling in nanofluid. Journal of Physics: Conference Series this link is disabled, 2021, 2039(1), 012030. DOI 10.1088/1742-6596/2039/1/012030;
3. Bobylev, P.G.; Pavlov, A.V.; **Proskurin, V.M.**; Andreyev, Y.V.; Mityakov, V.Y.; Sapozhnikov, S.Z. Gradient Heatmetry in a Burners Adjustment. Inventions 2022, 7, 122. <https://doi.org/10.3390/inventions7040122>.

В других изданиях:

1. В. Ю. Митяков, А. В. Митяков, **В. М. Проскурин** и др. Градиентная теплотметрия в исследовании факельного сжигания дизельного топлива // Материалы Восьмой Российской национальной конференции по теплообмену: Материалы конференции. В 2-х томах, Москва, 17–22 октября 2022 года. Том 2. – Москва: Национальный исследовательский университет "МЭИ", 2022. – С. 153-154;
2. В. Ю. Митяков, А. В. Митяков, Ю. В. Андреев, **В. М. Проскурин** и др. Интенсификация теплообмена при факельном сжигании дизельного топлива // Материалы Восьмой Российской национальной конференции по теплообмену: Материалы конференции. В 2-х томах, Москва, 17–22 октября 2022 года. Том 2. – Москва: Национальный исследовательский университет "МЭИ", 2022. – С. 71-72.
3. А. В. Бикмулин, П. Г. Бобылев, **В. М. Проскурин**, В. Ю. Митяков. Влияние расхода окислителя на местные значения плотности теплового потока от дизельной горелки OILON KP-6 // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: Тезисы докладов XXIV Школы семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А. И. Леонтьева, посвященной 100-летию академика РАН В. Е. Алемасова, Казань, 23–27 мая 2023 года. – Казань: АО Информационно-издательский центр, 2023. – С. 228-229;
4. В. Ю. Митяков, **В. М. Проскурин**, А. В. Бикмулин, А. В. Павлов. Создание и градуировка гетерогенных градиентных датчиков теплового потока для экспериментов в топке котла ДКВР 10/13 // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: Тезисы докладов XXIV Школы семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А. И. Леонтьева, посвященной 100-летию академика РАН В. Е. Алемасова, Казань, 23–27 мая 2023 года. – Казань: АО Информационно-издательский центр, 2023. – С. 408-409