

На правах рукописи

ДОРЖ Даваацэрэн

**ГАЗОДИНАМИКА И ТЕПЛООБМЕН ПРИ СОУДАРЕНИИ
ЗАКРУЧЕННЫХ ГАЗОВЫХ СТРУЙ**

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2015

Работа выполнена на кафедре теплоэнергетики и теплотехники ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Жилкин Борис Прокопьевич

Официальные оппоненты: **Сэрээтэр Батмунх**, доктор технических наук, академик МАН, профессор, Монгольский государственный университет науки и технологий (г. Улан-Батор, Монголия), профессор кафедры «Тепловые электрические станции»;

Маркович Дмитрий Маркович,
доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН, профессор,
ФГБУН «Институт теплофизики им.
С.С. Кутателадзе» Сибирского отделения РАН,
заместитель директора по научной работе

Ведущая организация: ФГБУН Специальное конструкторско-технологическое бюро «Наука» Красноярского научного центра Сибирского отделения РАН, г. Красноярск

Защита состоится 10 декабря 2015 года в 12:00 ч на заседании диссертационного совета Д 212.285.07 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»: <http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?id=51&rid=247276>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Аронсон Константин Эрленович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В различных технологических процессах широко применяются встречные закрученные струи с низкой и высокой температурой. Например, в низкотемпературном случае они применяются в сушильных установках, а в высокотемпературном – в топках энергетических и промышленных котлов.

Актуальность темы исследования. В литературе данная проблема рассматривается весьма поверхностно, узкоприменительно к технологическим целям, что сдерживает совершенствование технологических процессов, влияет на качество продукции.

Во многом это объясняется сложностью как теоретического анализа, так и экспериментальных исследований данных турбулентных потоков.

Анализ показал, что наиболее эффективным является структурный подход в описании турбулентных потоков, который дает на этой основе представление о гидромеханических условиях теплопереноса.

Степень разработанности темы исследования: состоит в том, что теоретические аспекты изучения процессов при соударении закрученных газовых струй разработаны весьма слабо, поскольку главное внимание исследователей было удалено практическому применению (совершенствованию технологии) в промышленных агрегатах.

Цель работы и задачи исследования: целью работы было получение информации о динамических характеристиках процессов переноса, происходящих при соударении закрученных газовых струй. В теоретическом аспекте стояла задача установить гидромеханические факторы теплового (энергетического) взаимодействия встречных закрученных низко- и высокотемпературных струй, а в практическом (технологическом) – разработать концепцию автоматизированных систем управления такими потоками для технологического применения.

Объекты исследований: гидромеханика и процесс теплообмена при соударении низко- и высокотемпературных газовых струй в условиях, возникающих в промышленных установках.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- уточнены методики идентификации когерентных структур с целью применения их для соударяющихся закрученных газовых потоков;
- выявлены режимы термомеханического взаимодействия закрученных встречных потоков, во многом отличающиеся от существующих представлений;
- определены критерии существования этих режимов;
- найдены характеристики теплообмена при ударном смешении встречных закрученных потоков;
- показана эффективность сочетания различных методов анализа для идентификации структур, а именно: комплекса из частотно-фазового анализа, вейвлет-анализа и метода главных компонент;
- обнаружено, что при горении в условиях соударения факелов существуют области, в которых пульсирует температура с одинаковой частотой, но в разных фазах;
- разработаны алгоритмы двухпараметрической защиты от срыва газового факела и управления местоположением зоны соударения закрученных встречных факелов в технологическом пространстве;
- предложен новый тип аксиального завихрителя, позволяющий расширить диапазон устойчивых режимов горения в вихревых аппаратах.

Теоретическая и практическая значимость. Теоретическое значение работы заключается в углублении понимания механизма процессов переноса при соударении закрученных газовых струй. Практическая значимость состоит в следующем:

- разработаны методики идентификации когерентных структур применительно к закрученным газовым потокам;

- выявлены режимы термомеханического взаимодействия закрученных встречных потоков, которые во многом отличны от существующих представлений;

- найдены критерии существования этих режимов;

- определены характеристики теплообмена при ударном смешении встречных закрученных потоков;

- показана эффективность сочетания различных методов анализа для идентификации структур, а именно: частотно-фазового анализа, вейвлет-анализа и метода главных компонент;

- обнаружено, что при горении в условиях соударения факелов существуют области, которых температура пульсирует с одинаковой частотой, но в разных фазах;

- разработан алгоритм двухпараметрической защиты от срыва газового факела и управления местоположением зоны соударения закрученных встречных факелов в технологическом пространстве;

- предложен новый тип аксиального завихрителя, позволяющий расширить диапазон устойчивых режимов горения в вихревых аппаратах.

Методология и методы исследования: использованы методы тепловизионной диагностики для низкотемпературных и высокотемпературных газовых потоков. Применено сочетание различных методик обработки тепловизионных фильмов, а именно сочетание фазочастотного, вейвлет-анализа и метода анализа главных компонент.

Положения, выносимые на защиту:

- уточненная методика идентификации структуры течения в зоне взаимодействия встречных закрученных низко- и высокотемпературных газовых струй и полученные при помощи этого метода результаты;

- эмпирические зависимости для количественной оценки теплопереноса при соударении встречных закрученных газовых струй и для локальной теплонапряженности;

– алгоритмы и структурные схемы автоматики для управления местоположением зоны соударения в рабочем пространстве технологического агрегата и защиты от срыва факелов.

Достоверность результатов основывается на том, что в экспериментальной установке использованы сертифицированные современные высокочувствительные измерительные приборы и сенсоры, а также применено сочетание независимых методик исследования, кроме того данные пилотных экспериментов согласуются с результатами других авторов, поверки и тарировки показали достаточную надежность результатов.

Апробация работы. Основные результаты исследований докладывались и были представлены: на международной конференции ИСКИ 2011 (г. Улан-Батор, Монголия 2011), на XVIII Всероссийской научно-практической конференции «Энергетика: эффективность, надежность, безопасность 2012» (г. Томск), на семинарах в Энергетическом институте Монгольского университета науки и технологии (г. Улан-Батор, Монголия, 2013 и 2014), в научно-техническом совете Специального конструкторского технологического бюро Сибирского отделения РАН (г. Красноярск, 2014), в научно-техническом совете Института теплотехники и промэкологии (г. Улан-Батор, Монголия, 2014), в научно-техническом совете предприятия «УралОРГРЭС» (подразделение ОАО «Инженерный центр энергетики Урала», г. Екатеринбург, 2014), «Национальном конгрессе по энергетике 2014» (г. Казань), «Энергия 2015. X Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых» (г. Иваново, 2015).

Результаты диссертационной работы опубликованы в 8 печатных работах, в том числе 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК, получены 2 патента РФ на изобретения и 1 патент Монголии.

Реализация работы. Результаты диссертационной работы автора приняты к внедрению на Улан-Баторской ТЭС-2 при модернизации котла БКЗ-75-39/КС (г. Улан-Батор, Монголия).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, содержащего 125 наименований, и 7

приложений. Диссертация изложена на 143 страницах, компьютерного набора 14 шрифтом Times new roman с полуторным интервалом, снабжена по тексту в количестве 90 рисунками и 3 таблицами.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснованы выбор направления исследования, а именно газодинамика и теплообмен соударяющихся закрученных газовых струй, и его цели, описана актуальность проблемы, определены основные задачи исследований, обозначены ожидаемые научные результаты и их возможное научно- практическое применение, приведены главные положения, выносимые на защиту.

В **первой** главе приведен аналитический обзор литературных источников, которые посвящены современному состоянию исследований в выбранном научном направлении и опытному определению характеристик процесса тепломассообмена. Рассмотрены проблемы управления технологическими процессами, основанными на соударении газовых струй.

На основе анализа литературных данных были сформулированы следующие задачи исследования:

1. Установить газодинамические (структурные) условия теплообмена при соударении закрученных струй.

2. Уточнить методику количественной оценки интенсивности теплообмена при смещении соударяющихся закрученных потоков.

3. Модернизировать методику оценки определения локальной теплонапряженности среды в области взаимодействия для случая встречных закрученных факелов;.

4. Создать общую концепцию автоматического управления строением, местоположением зоны соударения закрученных потоков в рабочем пространстве, а также защиты на случай срыва факелов в промышленных агрегатах.

Во второй главе описаны основные методики проведения опытов и идентификации термической структуры, представлены экспериментальные установки, рассматриваются найденные закономерности структурообразования в области соударения низко- и высокотемпературных встречных закрученных газовых струй.

Изучение закрученных встречающихся низкотемпературных струй проводилось на экспериментальной установке, схема которой приведена на рисунке 1.

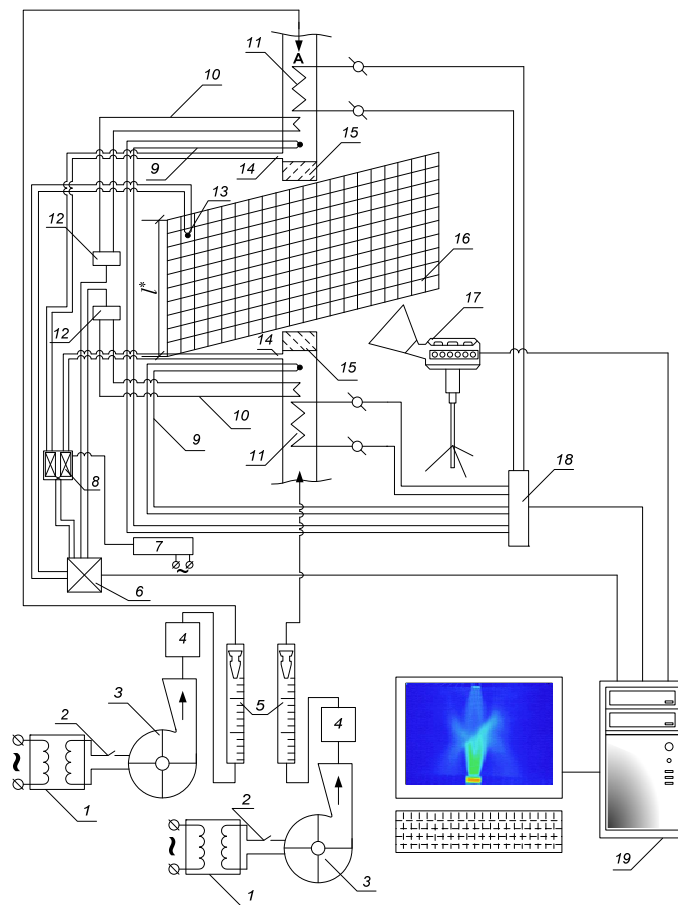


Рисунок 1 – Принципиальная схема экспериментальной установки: 1 – автотрансформатор; 2 – выключатель; 3 – вентилятор; 4 – демпфирующий бак; 5 – ротаметр; 6 – АЦП; 7 – блок питания; 8 – коммутационная панель; 9 – термопара; 10 – датчик термоанемометра; 11 – электронагреватели; 12 – электронный блок термоанемометра; 13 – термопара для калибровки тепловизора; 14 – мини-канал для измерения давления; 15 – струйный аппарат (с завихрителем); 16 – термовизуализирующая сетка; 17 – тепловизор; 18 – автоматическая система управления нагревом воздуха; 19 – компьютер

При тепловизионном определении мгновенных температурных полей для низкотемпературных закрученных потоков использовался метод термовизуализирующей сетки – МТС, который заключается в размещении в

потоке сетки из нитей. Метод идентификации структур низкотемпературного газового потока основан на анализе полей дисперсии температуры, частоты и фазы пульсации температуры [1–3, 8–10]. Для измерения исходных полей температуры применялся тепловизор NEC TH9100. Обработка полученных данных производилась в среде MathWorks-MATLAB версии R2012b.

Максимальная неопределенность (погрешность) измерения температуры газового потока составила 5.46 %, частоты пульсации температуры – 5.69 %, стандартного отклонения температуры – 5.83 %.

Экспериментальная установка для высокотемпературных встречных струй представлена на рисунке 2. В качестве топлива использовался технически чистый бутан.

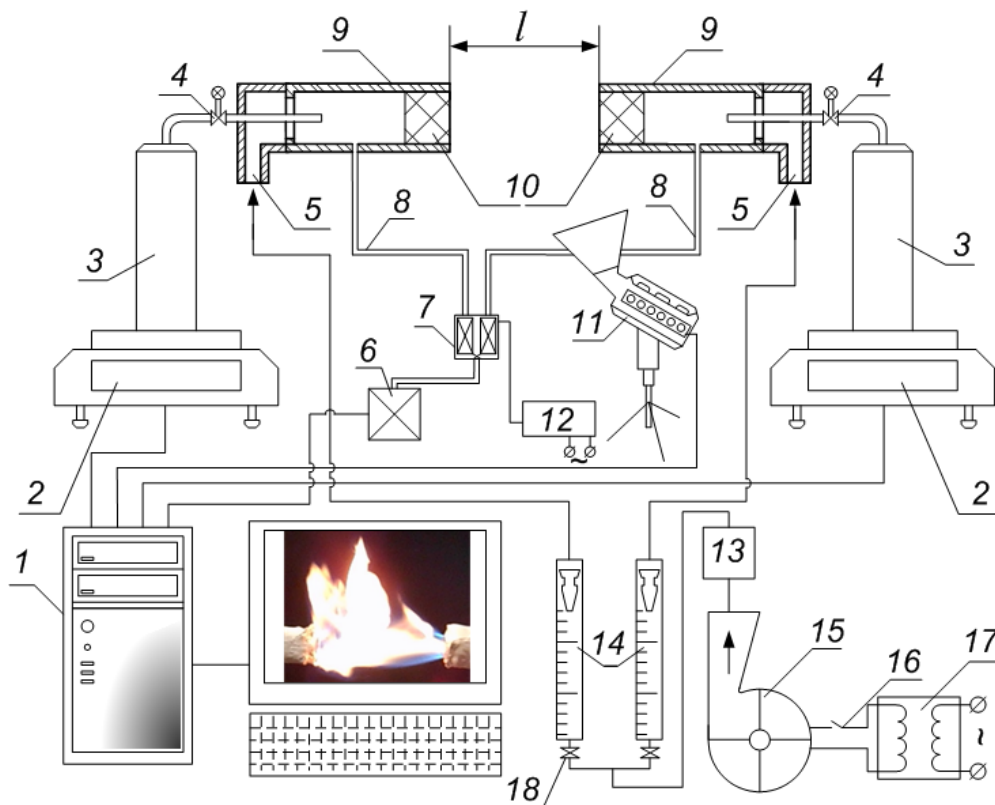


Рисунок 2 – Принципиальная схема экспериментальной установки для изучения встречных факелов: 1 – компьютер; 2 – электронные весы; 3 – баллон с топливом; 4 – газовый вентиль; 5 – воздушный канал; 6 – АЦП; 7 – панель с датчиками давления; 8 – мини-канал для измерения давления; 9 – эжекционная горелка; 10 – завихритель; 11 – тепловизор; 12 – блок питания; 13 – демпфирующий бак; 14 – ротаметр; 15 – вентилятор; 16 – выключатель; 17 – автотрансформатор; 18 – вентиль

Основу этой экспериментальной установки составляли две инжекционные оригинальные горелки 9 с аксиальными завихрителями без центральной втулки [6]. Применение такого завихрителя обусловлено тем, что

он создает более мощную зону обратных токов, чем традиционные аксиальные завихрители.

В третьей главе обсуждаются результаты идентификации строения зоны соударения низкотемпературных закрученных потоков, выходящих из классических аксиальных закручивающих аппаратов. Были выявлены два основных режима взаимодействия (рисунки 3 и 4), разделенные переходным режимом. Был выявлен критерий режимов в виде термомеханического параметра крутки $K_{tm,h}^*$, определяемого по уравнению

$$K_{tm,h}^* = \theta^{0.48} (a \cdot n_{CR.B} + b \cdot n_{CR.M}); \quad (1)$$

где
$$\theta = \frac{t_h - t_c}{t_h - t_{o.c}}, \quad (2)$$

$n_{CR.B}$, $n_{CR.M}$ – конструктивно-режимный параметр крутки n_{CR} (соответственно наибольшее и наименьшее значения по завихрителям); a , b – геометрические коэффициенты, зависящие от длины межлопаточного канала завихрителя; t_h – температура горячей струи; t_c – температура холодной струи; $t_{o.c}$ – температура окружающей среды.

Тепловизионное изображение и поле стандартного отклонения температуры в первом режиме показаны на рисунке 3.

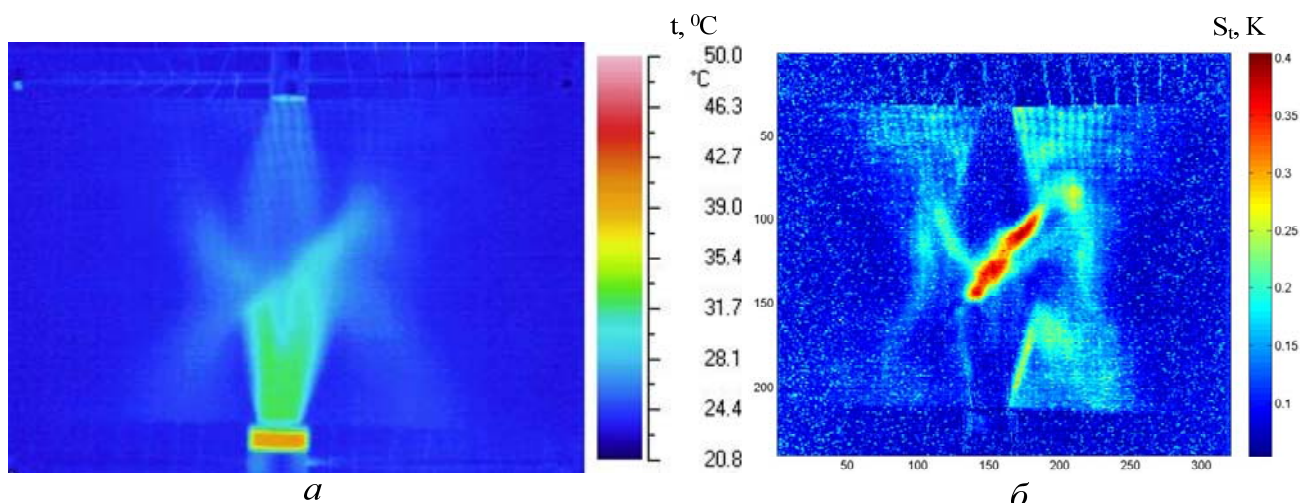


Рисунок 3 – Характерное строение зоны соударения закрученных струй в первом режиме: a – исходное тепловое изображение (один кадр); b – поле стандартного отклонения температуры S_t . Скорость струй: горячей $w_h = 26.3$ м/с, холодной $w_c = 25.6$ м/с. Температура сред: $t_h = 45.4$ °C, $t_c = 33.8$ °C, $t_{o.c} = 23$ °C, $\gamma_1 = 15^\circ$, $\gamma_2 = 15^\circ$. Режимные параметры: $K_{tm,h}^* = 0.78$, $l^* = 32.3$

Первый режим ($0,52 < K_{tm,h}^* < 1,13$) характеризуется тем, что образуется единая монозона взаимодействия (рисунок 3).

В диапазоне $K_{tm,h}^* = 0,38 \div 0,52$ наблюдается переходный режим. Следует отметить, что в данной работе не изучался переходной режим.

Во втором режиме ($K_{tm,h}^* < 0,38$) образуется дискретная зона взаимодействия. Исходное тепловизионное изображение и поле стандартного отклонения температуры для этого режима показаны на рисунке 4.

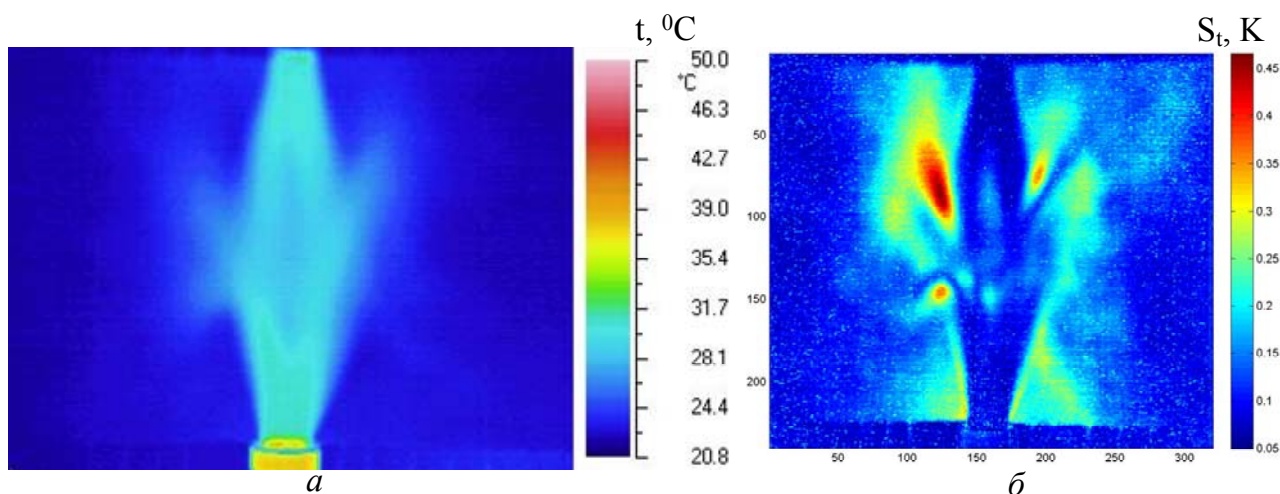


Рисунок 4 – Структура зоны соударения закрученных струй ($\gamma_1 = 15^\circ$, $\gamma_2 = 15^\circ$) во втором режиме: *a* – исходное тепловое изображение; *b* – поле стандартного отклонения температуры S_t . Скорость струй: $w_h = 36.4$ м/с, $w_c = 25.9$ м/с. Температура сред: $t_h = 45.11$ °С, $t_c = 44.15$ °С, $t_{o,c} = 22$ °С. Режимные параметры: $K_{tm,h}^* = 0.2$, $l^* = 32.3$

В обоих случаях при определении конфигурации и размеров зоны взаимодействия использовался один и то же метод: в зону взаимодействия включались те пиксели, в которых дисперсия температуры S_t составляла 60 % от максимальной.

В обоих режимах был обнаружен эффект капсуляции струй с малым импульсом с более мощной струей, имеющей больший импульс.

Примерные результаты идентификации структуры зоны соударения факелов при помощи комплекса методов, а именно сочетания фазочастотного анализа, вейвлет-анализа и метода главных компонент показаны соответственно на рисунках 5-7.

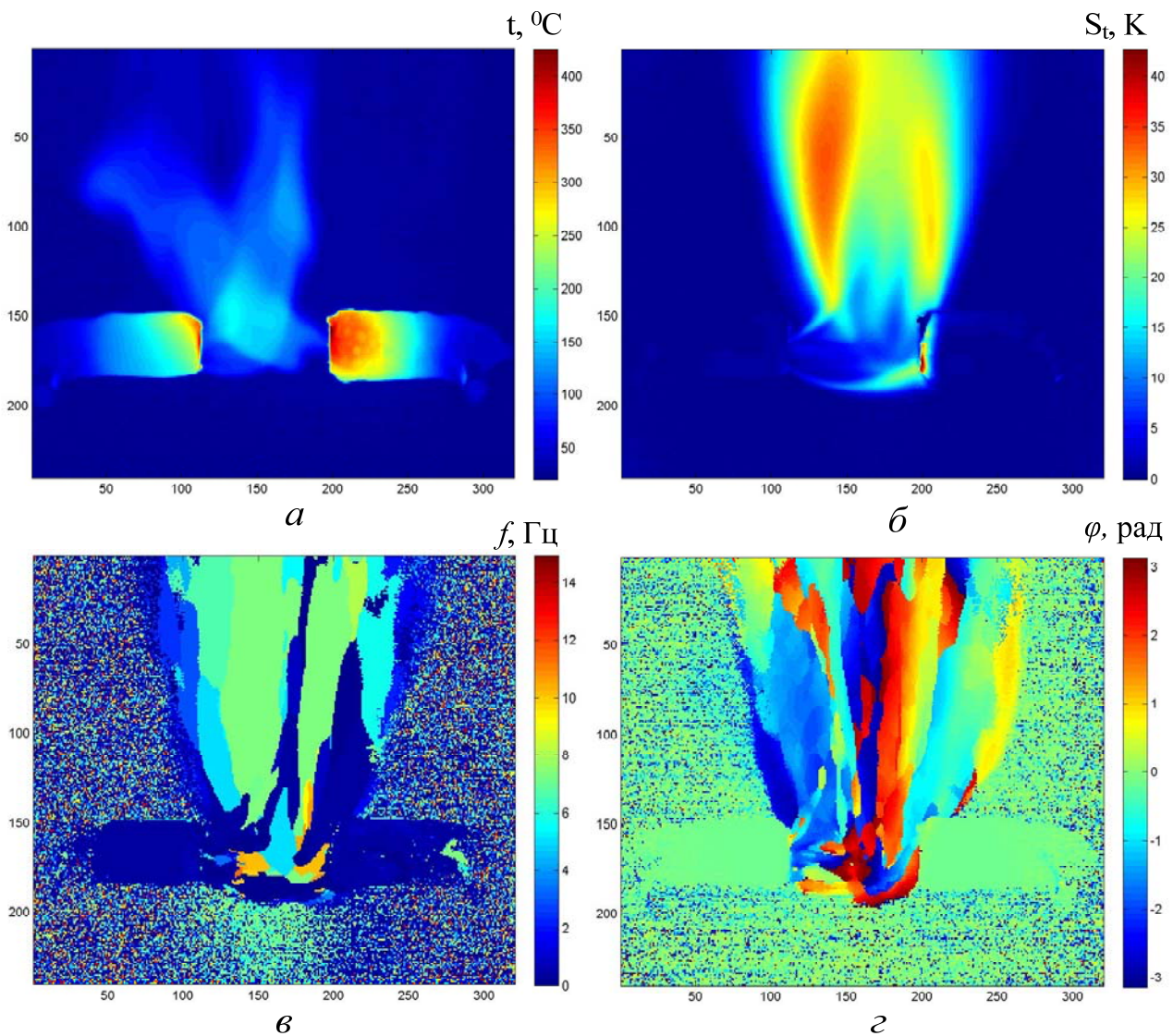


Рисунок 5 – Типичная структура зоны соударения инжекционных факелов: *a* – исходное тепловизионное изображение; *б* – поле дисперсии температуры S_t ; *в* – поле характерных частот пульсаций f ; *г* – поле фаз пульсаций ϕ . Топливо – бутан 100 %, $\gamma_1 = \gamma_2 = 15^{\circ}$, $l = 50$ мм; массовый расход: $G_1 = 26$ мг/с (горелка слева), $G_2 = 26,0$ мг/с (горелка справа). На этом и последующих рисунках для факелов шкала температур условна

Необходимо подчеркнуть, что вейвлет-анализ позволяет получить информацию о более мелких вихрях и определять границы фазовых изменений.

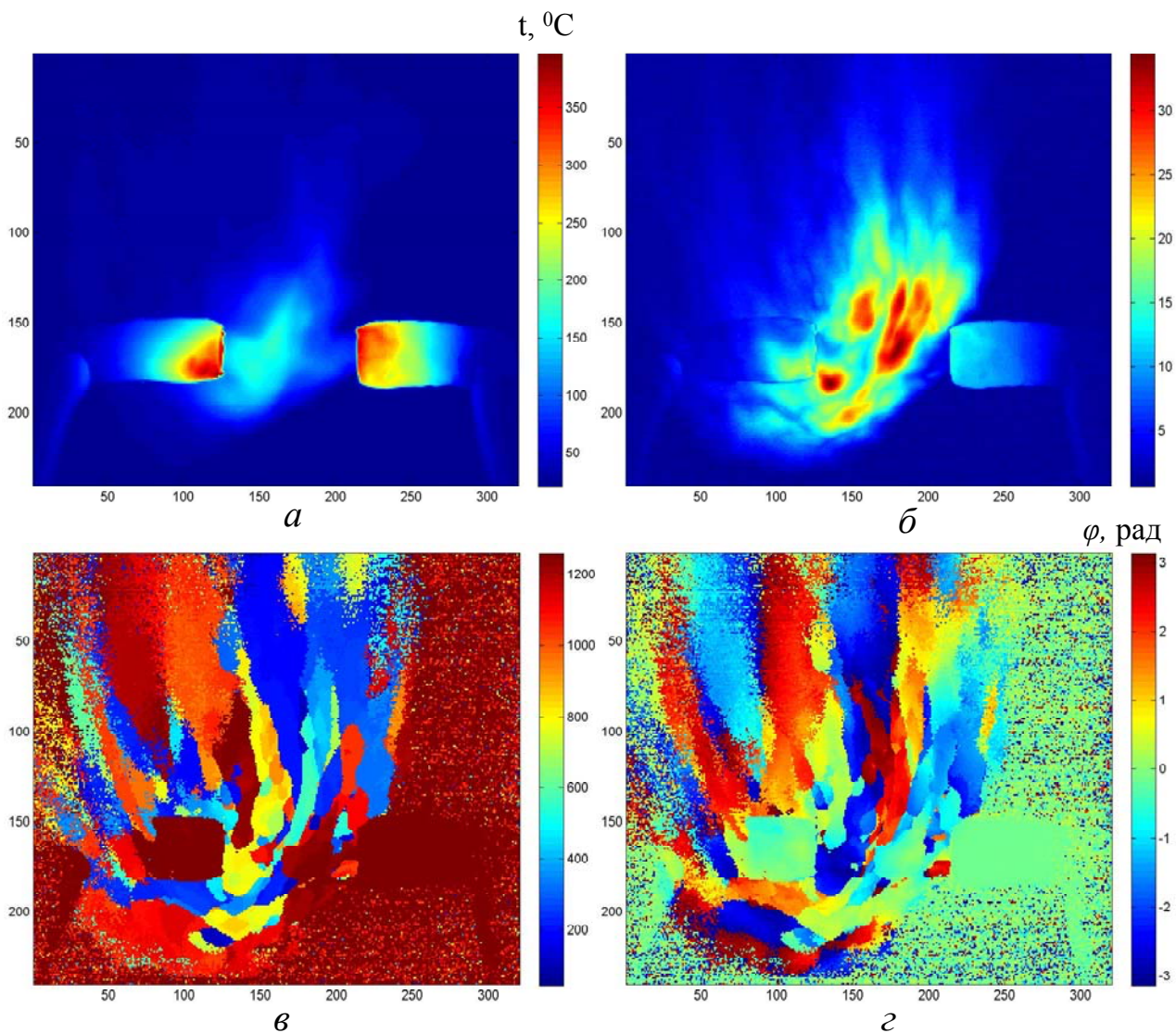


Рисунок 6 – Результаты вейвлет-анализа встречных закрученных факелов (режим с принудительной подачей воздуха): *а* – исходная термограмма; *б* – поле амплитуд; *в* – скейлограмма; *г* – фазограмма. Топливо – бутан 100 %, $\gamma_1 = 15^\circ$, $G_{Г1} = 18.3$ мг/с, $G_{в1} = 1.63$ нм³/ч (горелка слева), $\gamma_2 = 30^\circ$, $G_{Г2} = 18.4$ мг/с, $G_{в2} = 1.49$ нм³/ч (горелка справа), $l^* = 13.34$

В заключение следует констатировать, что ни один метод идентификации структуры турбулентных газовых потоков не является альтернативным: каждый способ обработки позволяет выявить свои особенности динамической когерентной структуры течения, поэтому рациональным является комплексный анализ, сочетающий различные методы. Тем не менее для задач данного исследования наиболее подходит МАГК, результаты которого представлены на рисунке 7.

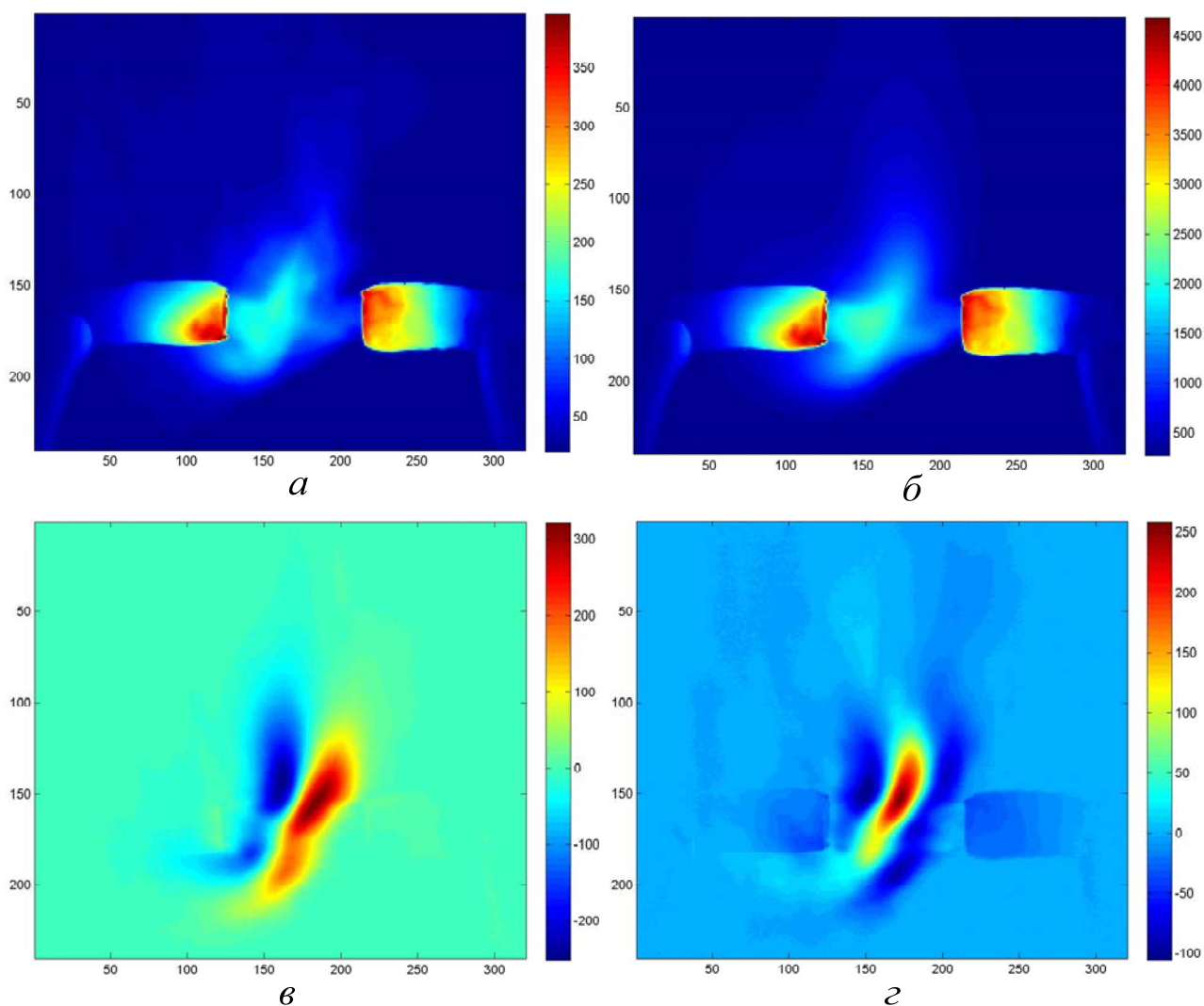


Рисунок 7 – Визуализация полей главных компонент встречных закрученных факелов с сочетанием средней и слабой крутки (режим с принудительной подачей воздуха): *a* – исходное тепловизионное изображение; *б* – первая компонента; *в* – вторая компонента; *г* – третья компонента. Топливо – бутан 100 %, $\gamma_1 = 15^\circ$, $G_{r1} = 18.3$ мг/с, $G_{в1} = 1.63$ нм³/ч (горелка слева), $\gamma_2 = 30^\circ$, $G_{r2} = 18.4$ мг/с, $G_{в2} = 1.49$ нм³/ч (горелка справа), $\bar{t}^* = 13.34$

Фазочастотный анализ показал, что в соударяющихся факелах существуют области, в которых температура среды пульсирует с одинаковой частотой, но в разных фазах. Кроме того был обнаружен эффект пространственно-временной перемежаемости, когда в одной и той же области исходно существуют когерентные структуры, пульсирующие с какой-либо одной частотой, которые по истечении некоторого времени заменяются образованием, пульсирующим с другой частотой, а затем первая структура вновь возвращается. Что касается трактовки физического смысла структур, выявляемых вейвлет-анализом и МАГК, то он общепринятого толкования не

имеет, его еще предстоит разработать. Но уже сейчас можно сказать, что структурная турбулентность при соударении факелов имеет многоуровневый характер.

В четвертой главе рассматриваются вопросы и локальной теплонапряженности теплообмена в зоне соударения струй.

Для количественной оценки теплопереноса был применен средний поверхностный коэффициент теплового взаимодействия K_F [Вт/(м²·К)], определяемый как

$$K_F = \frac{Q_{1-2}}{(t_h - t_c) \cdot F}, \quad (3)$$

где F – условная площадь зоны взаимодействия, м²; t_h, t_c – исходная температура струи перед завихрителем соответственно горячей и холодной, °С; Q_{1-2} – передаваемый тепловой поток, [Вт], вычисляемый по тепловому балансу.

Величина площади F вычислялась способом, описанным в 3-й главе.

Для обобщения данных была введена безразмерная интенсивность теплового взаимодействия LN , определяемая как

$$LN = \frac{K_F \cdot L}{\bar{\lambda}_c}, \quad (4)$$

где L – периметр продольного сечения зоны взаимодействия, который был принят в качестве определяющего линейного размера, м; $\bar{\lambda}_c$ – средний коэффициент теплопроводности среды в зоне взаимодействия [Вт/(м·К)], определяемый по средней температуре среды в зоне взаимодействия (исходится по термограммам).

Число Рейнольдса для струи газа вычислялось общепринятым способом, а именно

$$Re = \frac{w_x \cdot d_{\text{э}}}{\nu}, \quad (5)$$

где w_x – среднерасходная скорость газа в канале перед завихрителем, м/с;
 x – индекс струи: 1 – горячая, 2 – холодная; d_3 – эквивалентный диаметр завихрителей (определяющий размер), м; ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с при определяющей температуре – температуре газа перед завихрителем.

Зависимости безразмерной интенсивности теплообмена от числа Рейнольдса холодной струи ($x = 2$) представлены на рисунке 8.

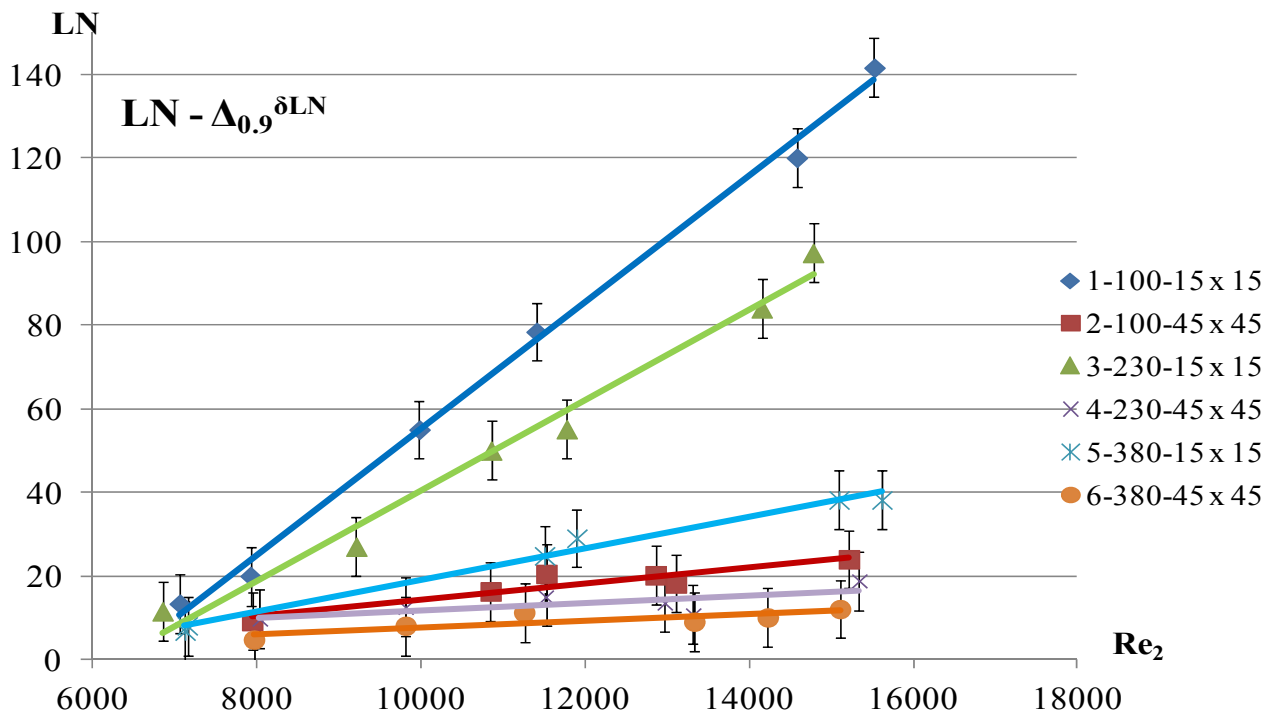


Рисунок 8 – Зависимости безразмерной интенсивности теплообмена LN от числа Рейнольдса холодной струи Re_2 при различных расстояниях l^* : 1 – $l^* = 14.05$; 2 – $l^* = 11.52$; 3 – $l^* = 32.32$; 4 – $l^* = 26.5$; 5 – $l^* = 53.4$; 6 – $l^* = 43.79$

После обобщения экспериментальных данных для низкотемпературных струй получено следующее критериальное уравнение:

$$LN = 4.83 \cdot 10^{-3} \cdot Re_h^{0.07} \cdot Re_c^{0.9} \cdot (K_{tm,h}^*)^{-6.15} \cdot (ip_{hc}^*)^{0.6} \cdot (l^*)^{-0.4} \cdot \theta^2, \quad (6)$$

где ip_{hc}^* – безразмерное соотношение скоростных напоров, определяемое как

$$ip_{hc}^* = \frac{\rho_h \cdot w_h^2}{\rho_c \cdot w_c^2}, \quad (7)$$

где ρ_h, ρ_c – плотности в сред горячей и холодной струи, кг/м^3 ;
 w_h, w_c – среднерасходная скорость горячей и холодной струи, м/с ; \bar{l}^* – среднее
 безразмерное расстояние между завихрителями, вычисляемое как

$$\bar{l}^* = \frac{l}{0.5 \cdot (d_{\text{экв.}h} + d_{\text{экв.}c})}, \quad (8)$$

где l – линейное расстояние между завихрителями, м ;
 $d_{\text{экв.}h}, d_{\text{экв.}c}$ – эквивалентные диаметры завихрителей, м .

Уравнение (6) получено со среднеквадратичной неопределенностью (погрешностью), равной 15,62 %. Диапазон его применения: $\text{Re}_h = 6.1 \cdot 10^3 \dots 18.34 \cdot 10^3$; $\text{Re}_c = 6.34 \cdot 10^3 \dots 16.51 \cdot 10^3$; $K_{tm,h}^* = 0,08 \dots 1,0$;
 $ip_{hc}^* = 0,18 \dots 5,55$; $\bar{l}^* = 11,52 \dots 53,4$; $\theta = 1,5 \cdot 10^{-3} \dots 0,992$

В технологической практике необходимо знать не осредненную по объему топочного пространства теплонапряженность, а фактическую локальную теплонапряженность, поскольку именно она определяет физикохимический механизм процесса. Определение локальной теплонапряженности в зоне соударения закрученных факелов было одной из ключевых целей данной работы.

Для характеристики энергетической локализации был введен локальный коэффициент теплонапряженности K_r [12], определяемый как

$$K_r = \frac{q_\phi}{q_n}, \quad (9)$$

где q_ϕ – фактическая теплонапряженность, Вт/м^3 ; q_n – нормативная теплонапряженность, Вт/м^3 .

Фактическая теплонапряженность находится по выражению

$$q_\phi = \frac{Q_n^p \cdot G_2}{V_{з.с}}, \quad (10)$$

где Q_n^p – низшая рабочая теплота сгорания газового топлива, МДж/кг; G_2 – общий (суммарный по двум струям) массовый расход газового топлива, кг/с; $V_{3,c}$ – объем зоны соударения струй, м³.

Нормативное значение q_n было принято из [47, 48] равным 407.4 кВт/м³.

В наших опытах эксперименты проводились в режимах инжекционном и принудительной подачи воздуха в горелке.

Для инжекционного режима при разнонаправленной крутке факелов после обобщения экспериментальных данных была получена следующая зависимость:

$$K_r = 886 \cdot 10^{-3} \cdot (\bar{n}_A \cdot l^*)^{-2.2} \cdot (Q^*)^{3.7}, \quad (11)$$

где \bar{n}_A – средний конструктивно-режимный параметр крутки; l^* – безразмерное расстояние между горелками; Q^* – безразмерное количество теплоты, равное

$$Q^* = \frac{Q_2}{E_{вн}}, \text{ при этом } Q_2 \text{ – теплота, выделяющая при сгорании газового топлива,}$$

Дж; $E_{вн}$ – энергия, вносимая средами в зону взаимодействия:

$$E_{вн} = \sum_{i=1}^2 c_{p_{\theta_i}} \cdot t_{\theta_i} \cdot G_{\theta_i} + \sum_{i=1}^2 c_{p_{2_i}} \cdot t_{2_i} \cdot G_{2_i}, \quad (12)$$

где $c_{p_{\theta}}$, c_{p_2} – удельные массовые теплоемкости воздуха и газа, кДж/(кг·К); t_{θ} , t_2 – температуры воздуха и газа перед завихрителями, К; G_{θ} , G_2 – массовые расходы воздуха и газа, кг/с.

Среднеквадратичная неопределенность (погрешность) этого выражения составляют 11,0 % при применении в соединяющем диапазоне: $\bar{n}_A = 0,23 \dots 0,85$; $l^* = 8,1 \dots 16,1$; $Q^* = 3,8 \dots 24,8$.

На рисунке 9 приведена зависимость K_r от количества введенной теплоты в разных режимах.

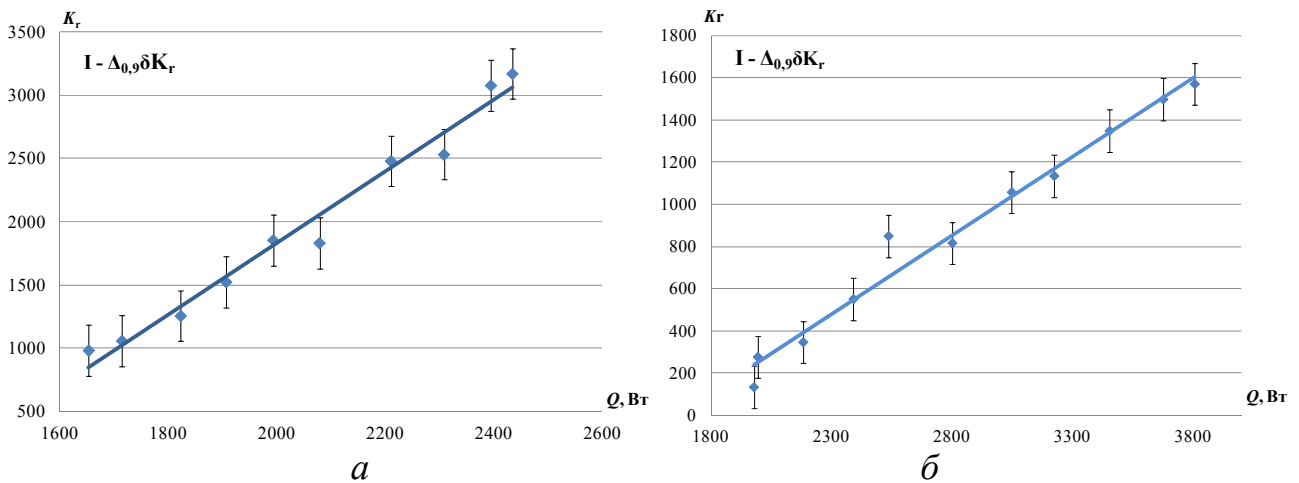


Рисунок 9 – Зависимость безразмерного локального коэффициента теплонпряженности K_r струй от количества введенной теплоты Q при инжекционном режиме (а) и режиме принудительной подачи воздуха на горелку (б): $l^* = 8,1 \dots 16,2$

Для случая режима принудительной подачи воздуха (вихревая горелка) и разнонаправленной крутки факелов обобщение экспериментальных данных дало следующую зависимость:

$$K_r = 992 \cdot 10^{-3} \cdot (\bar{n}_A \cdot l^*)^{-3.3} \cdot (Q^*)^{6.42}, \quad (13)$$

Неопределенность (погрешность) уравнения (13) составляет 11,9 % при применении в следующем диапазоне: $\bar{n}_A = 0,23 \dots 0,85$; $l^* = 8,1 \dots 16,1$; $Q^* = 3.83 \dots 10.2$.

В пятой главе обсуждаются вопросы практической реализации результатов исследования.

Была разработана система контроля положения области соударения в рабочем пространстве, которая защищена патентом РФ [4].

Патентом Монголии [6] была защищена конструкция горелки завихрителем без центральной втулки. Также были разработаны алгоритм и принципиальная схема двухпараметрической защиты от срыва факела, представленная на рисунке 10.

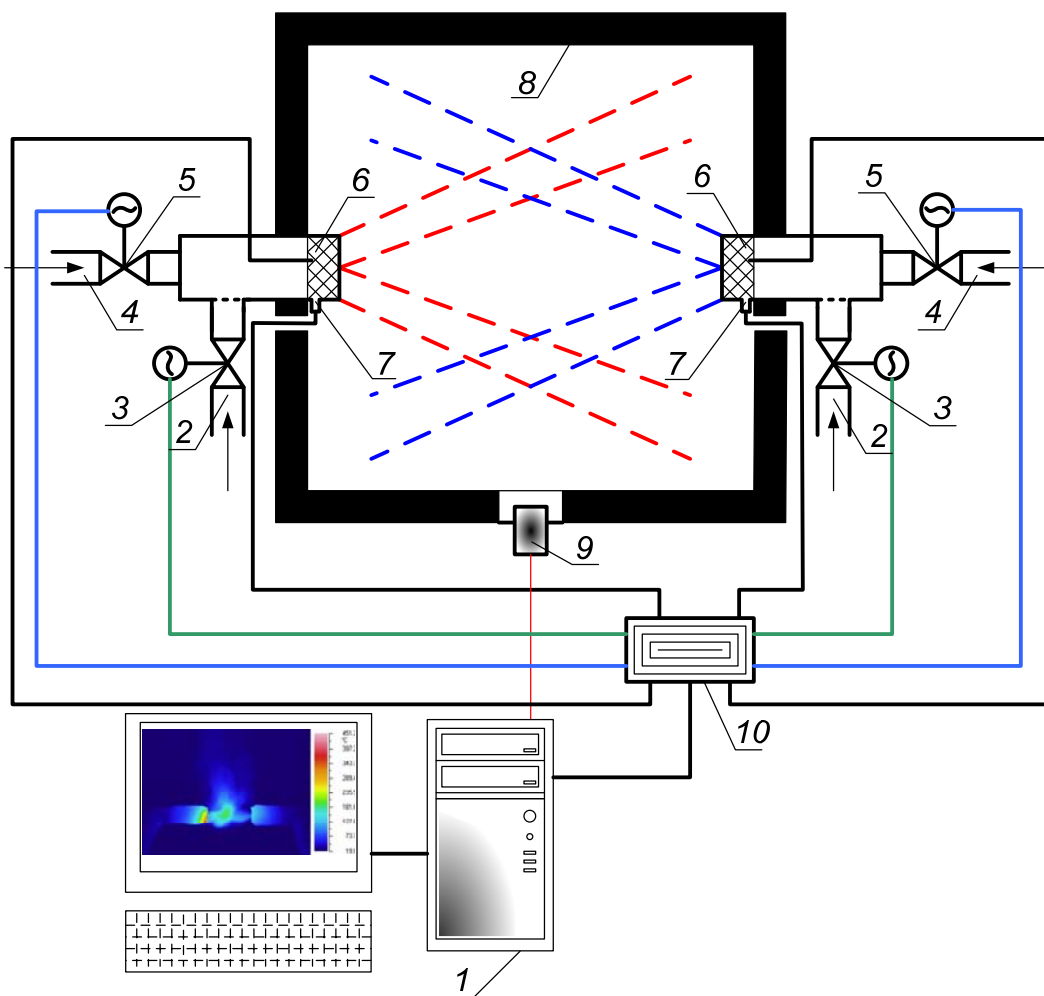


Рисунок 10 – Принципиальная схема (с двойными сигналами) системы управления положением зоны соударения закрученных факелов: 1 – компьютер; 2 – подвод топлива; 3, 5 – автоматические клапаны; 4 – подвод воздуха; 6 – струйный аппарат с завихрителем; 7 – датчики давления; 8 – граничная поверхность; 9 – тепловизор и фотодатчик; 10 – контроллер и управляющий блок

В этой системе в качестве второго контрольного параметра используются пульсации давления потока перед завихрителем.

Применение этой системы позволяет повысить надежность системы защиты от нарушения технологического процесса.

Кроме того на основе результатов с составными (сотовыми) соударяющимися струями был сконструирован контактный теплообменный аппарат со струйной насадкой [5].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ литературных данных и полученные результаты проведенных исследований позволяют сделать вывод о перспективности использования

разработанных методик для идентификации термической структуры низко- и высокотемпературных струй и определения характеристик теплового взаимодействия встречных закрученных газовых потоков, а также усовершенствовать управление технологическими процессами, построенными на встречных газовых струях.

Получены следующие основные результаты:

1. Уточнен метод идентификации газодинамической структуры в случае соударения закрученных газовых струйных потоков.
2. Выявлены термомеханические режимы взаимодействия встречных закрученных струй, определены критерии существования этих режимов.
3. Показана эффективность комплексного применения различных методик для идентификации структурного строения течения при соударении струй.
4. Усовершенствованы методы количественной оценки интенсивности теплообмена при смешении встречных закрученных газовых струй и локальной теплонапряженности в зоне взаимодействия.
5. Получены эмпирические уравнения для оценки интенсивности теплового взаимодействия при смешении встречных закрученных струй, а также для коэффициента, позволяющего оценить локализацию теплонапряженности в зоне взаимодействия.
6. Разработаны практические рекомендации, их конструктивное оформление для внедрения результатов исследований в промышленности.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

Статьи в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК:

1. Дордж Д. О применении видео- и тепловизионного контроля для управления топочными процессами в энергетических котлах / Д. Дордж (Д. Дорж), Н. С. Зайков, Б. И. Зыскин, А. Ю. Кисельников, П. Ю. Худяков // Электрические станции. 2012. № 10. С. 34 – 35 (0,125 п. л. / 0,025 п. л.).

2. Дорж Д. Ж. Особенности термомеханического взаимодействия встречных газовых струй / Д. Ж. Дорж, П. Ю. Худяков, И. А. Берг, Б. П. Жилкин // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 2. Режим доступа: URL: www.science-education.ru/116-12978 (дата обращения: 14.09.2015).

3. Дорж Д. Дорж Д. Применение вейвлет-анализа для идентификации строения газовых факелов / Д. Дорж, П. Ю. Худяков, Б. П. Жилкин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». 2014. Т. 14. № 4. С. 5–10 (0,375 п. л. / 0,125 п. л.).

Патенты:

4. Патент 129230 РФ. Система управления положением зоны соударения газовых струй и контроля поля температуры струй / П. Ю. Худяков, Б. П. Жилкин, Д. Доржд, Н. С. Зайков; заявл. 10.01.2013; опубл. 20.06.2013, Бюл. № 17.

5. Патент 146879 РФ. Контактный теплообменный аппарат со струйной насадкой / Д. Дорж, И. А. Берг, П. Ю. Худяков, Г. И. Худякова, Б. П. Жилкин; заявл. 29.04.2014; опубл. 22.09.2014, Бюл. № 29.

6. Патент № 4179 Монголии. Вихревая газовая горелка с завихрителем без центральной втулки / Д. Дорж, Б. Ганбаатар, Б. П. Жилкин, П. Ю. Худяков; заявл. 22.05.2014; опубл. 13.04.2015, Бюл. №5347.

Другие публикации:

7. Davaatseren D. Thermal imaging diagnostics of the brickwork of the boiler BKZ-75-39 FB, Darkhan TPP in Mongolia / D. Davaatseren, N. S. Zaikov, P. Yu. Hudyakov, A. Yu Keselnokov // The International Conference on Knowledge Based Industry. (ICKI 2011). ISBN: 978-99929-991-0-1. DDC:342.085'014, 2011. P. 442–443 (0,125 п. л. / 0,03 п. л.).

8. Применение тепловизионных технологий для управления процессами в энергетическом оборудовании / П. Ю. Худяков, Д. Дорж, Б. П. Жилкин, Н. С. Зайков, А. Ю. Кисельников // Энергетика: эффективность, надежность, безопасность: сборник докладов XVIII Всероссийской научно-практической

конференции, 3 – 7 дек. 2012 г. Томск : ТПУ, 2012. С. 137–139 (0,188 п. л. / 0,038 п. л.).

9. Даваацэрэн Д. Хийн түлшний дөлний мөргөлдөлтийн бүс дэх энергийн (дулааны) шугаман хүчдэл / Д. Даваацэрэн, П. Ю. Худяков, Б. П. Жилкин // Монгольский научный журнал «Эрчим хүч & Engineering». 2014-10. № 128. С. 22–26 (0,313 п. л. / 0,104 п. л.).

10. Дорж Д. Режимы термомеханического взаимодействия встречных струй / Д. Дорж, П. Ю. Худяков, Б. П. Жилкин // Национальный конгресс по энергетике 2014, 8–9 сент. 2014 г. Казань : КГЭУ, 2014. С. 89–92 (0,25 п. л. / 0,083 п. л.).

11. Дорж Д. Эмпирическое уравнение для теплонапряженности в зоне взаимодействия газовых факелов / Д. Дорж, Б. П. Жилкин // Сборник докладов X Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 21–23 апр. 2015 г. Иваново : ИГЭУ, 2015. С. 121–122 (0,125 п. л. / 0,06 п. л.).

Формат 60x84 1/16

Бумага писчая

Плоская печать

Усл. печ. л. 1,4

Уч.-изд. л. 1,375

Тираж 100 экз

Редакционно-издательский отдел ФГАОУ ВПО
«УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19
Ризография НИЧ ФГАОУ ВПО «УрФУ имени
первого Президента России Б.Н.Ельцина»
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19