

На правах рукописи



Шадрин Евгений Юрьевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ВИХРЕВЫХ И МНОГОФАЗНЫХ
ПОТОКОВ ПРИМЕНительно К ПЕРСПЕКТИВНЫМ
ТЕХНОЛОГИЯМ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

Специальность 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, доцент
Шарыпов Олег Владимирович

Официальные оппоненты:

Бородулин Владимир Иванович - доктор физико-математических наук, ФГБУН Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, ведущий научный сотрудник,

Матвиенко Олег Владимирович - доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет», кафедра автомобильных дорог, профессор.

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени Первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.

Защита состоится 26 октября 2022 года в 14.00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.129.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН) по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН и на официальном сайте в сети «Интернет» – <http://www.itp.nsc.ru>.

Отзыв на автореферат, оформленный в соответствии с требованиями Минобрнауки России, просьба отправлять в двух экземплярах по адресу: Институт теплофизики СО РАН, проспект Академика Лаврентьева, д. 1, г. Новосибирск, 630090. (e-mail: dissovet@itp.nsc.ru)

Автореферат разослан « ____ » _____ 2022 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.ф.-м.н., профессор РАН



Терехов Владимир Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования обусловлена задачами развития современной тепловой энергетики. В обозримой перспективе угольное топливо сохранит значительную долю в энергетическом балансе. Ограниченность запасов высококачественного угольного топлива ставит вопрос о вовлечении в сырьевую базу низкосортных высокозольных углей, что, в свою очередь, требует значительного повышения характеристик парогенераторов и совершенствования технологий сжигания, определяет необходимость применения новых подходов при разработке топочных и горелочных устройств.

К энергоэффективности и экологическим показателям технологий производства энергии во всём мире предъявляются всё более высокие требования. Одной из перспективных технологий является факельное сжигание пылеугольного топлива в вихревом потоке. Достижение высоких показателей сжигания топлива в значительной степени зависит от пространственной структуры закрученного потока в объеме топочного устройства. Организация внутренней аэродинамики влияет на равномерность распределения температуры и тепловых потоков, на время пребывания топлива в камере горения и полноту сгорания топлива, на шлакование теплообменных поверхностей и образование токсичных продуктов сгорания.

Необходимым этапом разработки перспективных конструкций вихревых камер сгорания, обеспечивающих высокую эффективность при соблюдении экологических нормативов, является исследование внутренней аэродинамики лабораторных моделей, которое при минимальных затратах позволяет изучить сложную пространственную структуру турбулентного закрученного потока в зависимости от режимных параметров и конструктивных особенностей камеры горения. Подробные и достоверные экспериментальные данные, полученные на изотермических моделях топочных устройств, важны для валидации и верификации разрабатываемых физико-математических моделей и кодов для расчета динамики и структуры пространственно неоднородных многофазных турбулентных реагирующих потоков.

Известно, что низкокачественное угольное топливо может использоваться в котлах ТЭС в виде водоугольной суспензии (ВУС). Такие технологии позволяют эффективно сжигать, в том числе отходы угледобычи, освобождая обширные территории от загрязняющих отвалов и снижая тем самым негативное воздействие на окружающую среду.

Использование ВУС перспективно, поскольку обладает по сравнению с традиционными технологиями сжигания пылеугольного топлива важными преимуществами, обеспечивая высокую степень выгорания топлива при сохранении относительно низкого уровня вредных выбросов. В то же время эффективное использование ВУС сопряжено с решением ряда специфических технологических задач, начиная с обеспечения стабильности ВУС при хранении и до создания стабильного мелкодисперсного потока при распылении ВУС форсунками горелочных устройств.

Целью работы является экспериментальное исследование структуры сложных турбулентных потоков в изотермических моделях энергетического оборудования, а именно:

- получение подробных и достоверных экспериментальных данных по структуре закрученного течения в ограниченном объеме с распределенным вводом потока и характеристикам высокоскоростной многофазной струи применительно к задачам современной теплоэнергетики;
- научное обоснование способов управления характеристиками потоков в элементах перспективного теплоэнергетического оборудования;
- применение полученных данных для валидации результатов численного моделирования.

Научная новизна основных положений, результатов и выводов, полученных в диссертации:

- впервые с использованием передовых бесконтактных методов измерений в широком диапазоне параметров детально исследованы структура течения в модификациях камеры сгорания с горизонтальной осью вихревого потока и характеристики газодаждельного потока при распылении водоугольной суспензии пневматической форсункой, формирующей высокоскоростной многофазный поток с кумулятивной струей и тороидальным вихрем;
- предложены оригинальные способы управления структурой вихревого течения за счет распределенного ввода в камеру сгорания;
- впервые на основе высокоточных оптических измерений получены зависимости характеристик многофазной струи от расхода конденсированной фазы и давления газа в пневматической форсунке для распыления водоугольной суспензии;

- обоснованы новые принципиальные технические решения, защищенные патентом РФ.

Теоретическая и практическая значимость проведенных исследований определяется:

- вкладом в развитие механики жидкости и газа, связанным с расширением эмпирической базы знаний о характеристиках сложных потоков;

- получением достоверной детальной информации о структуре потоков, необходимой для верификации физико-математических моделей и валидации результатов моделирования процессов в перспективных устройствах;

- возможностью применения полученных результатов при решении актуальных задач совершенствования технологий тепловой энергетики, использующих низкокачественное угольное топливо.

Методология и методы исследования.

В работе использованы следующие экспериментальные методы: лазерная доплеровская анемометрия (ЛДА); цифровая трассерная визуализация (Particle Image Velocimetry, PIV); теневая фотография (SP); анализ спектра пульсаций давления. Эксперименты проведены с применением автоматизированного сбора и компьютерной обработки данных. Разработаны и применены новые технические решения.

На защиту выносятся:

1. Полученные на основе применения высокоточных бесконтактных методов распределения скорости закрученного течения в изотермических моделях вихревых камер сгорания в зависимости от условий распределенного ввода потока.

2. Выводы о влиянии соотношения расходов на характер структуры закрученного течения в объеме камеры сгорания с распределенным вводом потока.

3. Результаты экспериментального исследования структуры и дисперсного состава потока, создаваемого пневматической форсункой для распыления водоугольной суспензии в широком диапазоне динамических условий и расхода конденсированной фазы.

4. Принципиальные технические решения и рекомендации для разработки перспективного теплоэнергетического оборудования.

Достоверность результатов обеспечивается использованием современных хорошо зарекомендовавших себя бесконтактных методов диагностики многофазных потоков и высокоточных измерительных систем, предварительной настройкой и калибровкой оборудования, методиками обработки и анализом полученных данных и подтверждается воспроизводимостью результатов с учетом рассчитанных погрешностей, сопоставлением результатов, полученных различными методами.

Апробация результатов. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на ведущих российских и международных конференциях: VIII Международная конференция «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках» (Москва, Россия, 2021), «XXXVII Сибирский теплофизический семинар» (Новосибирск, Россия, 2021), «XXXVI Сибирский теплофизический семинар» (Новосибирск, Россия, 2020), «XXXV Сибирский теплофизический семинар» (Новосибирск, Россия, 2019), The 5th International Workshop on Heat-Mass Transfer Advances for Energy Conservation and Pollution Control (Новосибирск, Россия, 2019), «Теплофизика и физическая гидродинамика» (Ялта, Республика Крым, Россия, 2018), «XXXIII Сибирский теплофизический семинар» (Новосибирск, Россия, 2017), «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках» (Новосибирск, Россия, 2017), Euromech Colloquium [581] “Dynamics of Concentrated Vortices” (Новосибирск, Россия, 2016), XV Минский международный форум по тепло- и массообмену (Минск, Беларусь, 2016), 8th International Symposium on Coal Combustion (Пекин, Китай, 2015), 9th International Conference on Advanced Computational Engineering and Experimenting (Мюнхен, Германия, 2015), 13th Asian Symposium on Visualization (Новосибирск, Россия, 2015), IV Минский международный colloquium по физике ударных волн, горения и детонации (Минск, Беларусь, 2015), Международная научная студенческая конференция МНСК-2015 (Новосибирск, Россия, 2015), Национальный конгресс по энергетике (Казань, Россия, 2014), XXXI Сибирский теплофизический семинар (Новосибирск, Россия, 2014), Международная научная студенческая конференция МНСК-2014 (Новосибирск, Россия, 2014), Международная научная студенческая конференция МНСК-2013 (Новосибирск, Россия, 2013).

Публикации. Полученные результаты представлены в 34 публикациях, в том числе в 11 статьях в ведущих рецензируемых

научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК. Получен патент РФ № 2585347 на изобретение «Вихревая топка».

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы из 104 наименований, 2 приложений; общий объем составляет 108 страниц, включая 55 рисунков, 2 таблицы.

Личный вклад автора. Автор внес определяющий вклад в создание экспериментальных стендов, постановку и проведение экспериментальных исследований, а также осуществленные с участием научного руководителя анализ результатов и подготовку публикаций. Результаты, выносимые на защиту, получены автором лично.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы исследования, характеризуется степень ее разработанности, осуществляется выбор предмета, объекта и методов исследования, определяются цель и задачи работы, формулируются положения, выносимые на защиту, их научная новизна, достоверность, теоретическая и практическая значимость.

В **первой главе** рассмотрены принципиальные подходы к организации сжигания угольного топлива, на основе обзора научно-технической литературы по теме исследования обоснована актуальность темы, определены задачи и научная новизна исследования, аргументирован выбор используемых методов. Основные выводы:

1. Угольное топливо остается одним из наиболее широко используемых и востребованных энергоресурсов. Повышение эффективности и экологической безопасности технологий сжигания углей с различным химическим составом и энергетической ценностью сохраняет актуальность и является важной научно-технической задачей.

2. Создание перспективных технологий эффективного использования низкосортного угольного топлива, отвечающих современным экологическим требованиям, нуждается в научном обосновании новых технических решений с применением современных экспериментальных методов и теоретических подходов. К таким технологиям, в частности, можно отнести факельное сжигание пылеугольного топлива в вихревой камере сгорания и сжигание водоугольных суспензий.

3. Задачами экспериментальных исследований как необходимого этапа выбора и обоснования новых технических решений служит изучение структуры потоков в лабораторных моделях вихревых камер сгорания пылеугольных котлов и характеристик газокапельных потоков при распылении ВУС в горелочных устройствах, поиск способов управления процессами, определяющими эффективность технологий.

4. Решение указанных задач требует применения современных высокопроизводительных измерительных систем, основанных на бесконтактных (оптических) методах, обеспечивающих получение детальной достоверной информации о структуре турбулентных потоков со сложной пространственной структурой, о дисперсном составе газокапельных потоков, о зависимости этих характеристик от режимных параметров и конструктивных особенностей оборудования. Результаты этих исследований, помимо практической важности, обеспечивают расширение эмпирической базы знаний о характеристиках сложных потоков, изучаемых в рамках механики жидкости и газа.

Вторая глава посвящена описанию используемых экспериментальных установок и применяемых измерительных методик.

Схема экспериментального стенда для исследования изотермической внутренней аэродинамики моделей вихревых камер сгорания представлена на рис. 1. Стенд оснащен современным измерительным оборудованием, обеспечивает расход воздуха до $500 \text{ м}^3/\text{ч}$. Характерное значение числа Рейнольдса, рассчитанное по диаметру вихревой камеры, $Re > 10^4$ лежит в диапазоне автомодельности потока, что обеспечивает подобие структуры закрученного потока в моделях камер сгорания структуре течения в полноразмерной топке при изотермических условиях.

На рис. 2 представлены схемы моделей усовершенствованных вихревых камер сгорания, изготовленных из прозрачного оргстекла в масштабе 1:25. На рис. 2-а-в представлены модификации конструкции вихревой топки ЦКТИ, принципиальным отличием которых является распределенный ввод потока. Модели различаются расположением сопел: а) камера сгорания с наклонными основными соплами и горизонтальными соплами вторичного дутья; б) камера сгорания с вертикальными основными соплами и горизонтальными соплами вторичного дутья; в) камера сгорания с наклонными основными соплами и вертикальными соплами вторичного дутья. На рис. 2-г – схема лабораторной модели усовершенствованной четырехвихревой камеры сгорания. Для изучения осредненных и пульсационных характеристик

скорости в объеме лабораторных моделей вихревых камер сгорания используются методы ЛДА и PIV, позволяющие получать поле скорости (и пульсаций скорости) в заданном объеме. Для выявления наличия или отсутствия периодических колебаний вихревого течения (прецессии вихревого ядра потока) были проведены измерения пульсаций давления при помощи анализатора пульсаций давления.

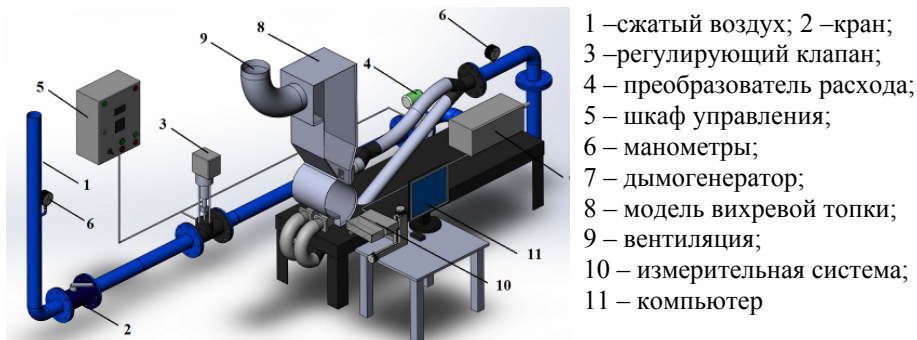


Рисунок 1 – Схема экспериментального стенда

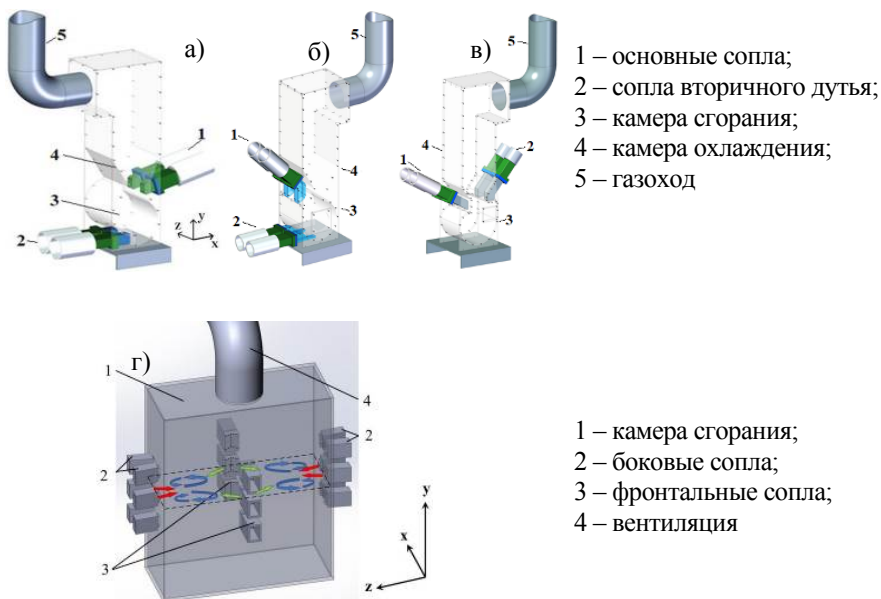
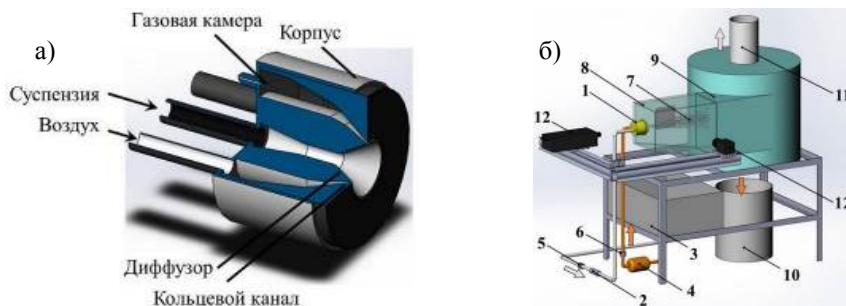


Рисунок 2 – Схемы лабораторных моделей вихревых камер сгорания



- 1 – пневматическая вихревая форсунка; 2 – измеритель расхода воздуха;
 3 – ёмкость для хранения свежего ВУС; 4 – дозирующий насос ВУС;
 5 – игольчатый кран для подачи воздуха; 6 – шаровый кран для регулировки подачи ВУС; 7 – газокапельный поток; 8 – измерительный участок;
 9 – система улавливания ВУС; 10 – ёмкость для сбора использованного ВУС,
 11 – вентиляция, 12 – измерительная система

Рисунок 3 – Схема экспериментального стенда по распылению ВУС

Для исследования газокапельного потока, формируемого при распылении ВУС пневматической вихревой форсункой (рис. 3-а), был разработан и создан экспериментальный стенд, схема которого представлена на рис. 3-б. Основные характеристики потока (дисперсный состав, положение и скорость капель) определялись с использованием прямого теневого метода.

В **третьей главе** описаны результаты проведенного комплексного экспериментального исследования внутренней аэродинамики изотермических моделей вихревых камер сгорания: распределение осредненной скорости и турбулентных пульсаций (кинетической энергии турбулентности), анализ пространственной структуры закрученного течения при различных режимных параметрах; результаты экспериментальных исследований характеристик газокапельного потока, формируемого пневматической вихревой форсункой для распыления ВУС.

На рис. 4 представлены векторные поля осредненной скорости в модели с горизонтальными вторичными соплами (рис. 2-а), полученные методом ЛДА в вертикальном сечении, проходящем через центры сопел, для разных значений $\gamma = V_0/V_1$, где V_0 и V_1 – среднерасходное значение скорости на выходе из основных и вторичных сопел, соответственно. Течение имеет сложную пространственную структуру. Струя, истекающая из верхней горелки, снизу подпирается тангенциально входящим потоком,

отклоняется вверх от исходного направления и натекает на противоположную стенку камеры сгорания (КС), растекается вдоль нее вниз и создает интенсивно закрученное течение, пересекаясь со струей, выходящей из нижней горелки. В области над верхней горелкой имеют место возвратные течения и рециркуляционные зоны. Устраняется характерное для топки ЦКТИ проявление эффекта Коанда, заключающегося в «прилипании» потока к одной из стенок на выходе из КС. Негативным эффектом при $\gamma = 1$ является частичный вынос входящего потока из КС. Этот эффект отсутствует при $\gamma = 3$. Таким образом, распределенный ввод потока обеспечивает дополнительные возможности управления структурой течения в КС за счет выбора отношения расходов через сопла. На практике это способствует предотвращению выноса части топлива из КС, увеличивает время пребывания топлива в КС и тем самым повышает полноту выгорания топлива.

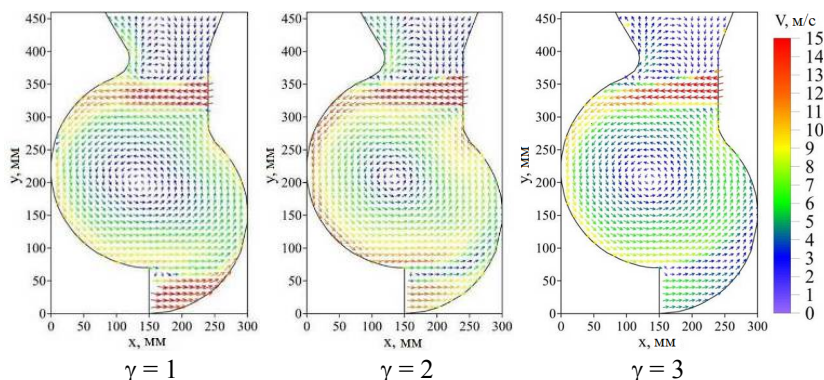


Рисунок 4 – Векторное поле осредненной скорости, полученное методом ЛДА в вертикальном сечении по центру сопла

На рис. 5 представлены результаты PIV-измерений в том же сечении при $\gamma = 1$, а также их сопоставление с данными ЛДА, погрешность которых не превышала 3,5 %. Видно, что оба метода хорошо воспроизводят все качественные особенности распределений проекций скорости (характерные перегибы, экстремумы и т.п.). Сопоставление результатов измерений показывает, что метод PIV обеспечивает приемлемую точность для исследования внутренней аэродинамики КС.

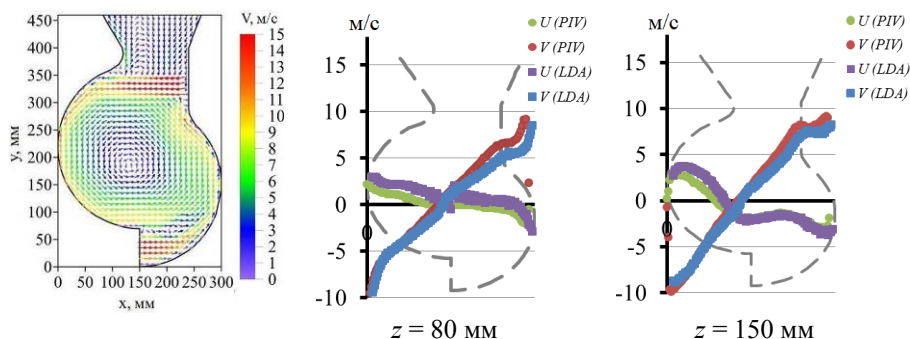


Рисунок 5 – Векторное поле осредненной скорости, полученное методом PIV и сопоставление измеренных с помощью методов ЛДА и PIV горизонтальной (U) и вертикальной (V) компонент вектора скорости вдоль линии, проходящей через условный центр камеры сгорания

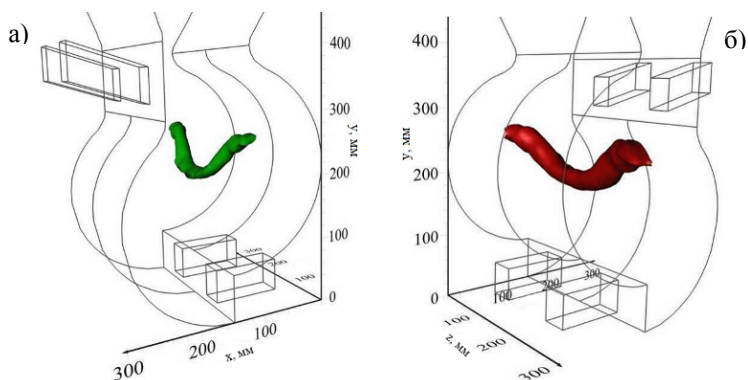


Рисунок 6 – Исоповерхности динамического давления:
а) $p_{\text{дин}} = 1$ Па; б) $p_{\text{дин}} = 2$ Па, $\gamma = 1$ и $V_0 = 15$ м/с

Применение трехкомпонентной системы ЛАД-056 обеспечивает информацию о трех компонентах скорости и позволяет визуализировать вихревое ядро потока с использованием критерия «минимума полного давления». При обработке данных предполагается, что статическое давление в центральной области является постоянным, и на рис. 6 представлены isoповерхности динамического давления: $p_{\text{дин}} = \rho u^2/2$, где ρ , u – плотность и скорость газа. Положение центра вихря зависит от координаты z и вихревое ядро имеет выраженную V-образную форму.

Для выявления возможных колебаний вихревого потока были измерены пульсации давления в камере сгорания при различных значениях скорости потока на срезе горелок в диапазоне 5–20 м/с. На рис. 7 приведены спектры пульсаций давления, в которых имеются пики на частоте 24 Гц и кратных ей. Положение этих пиков не зависит от расхода (скорости) воздуха, что говорит о том, что они не связаны с прецессией вихревого ядра потока и характерны для КС как акустического резонатора. Таким образом, периодические колебания вихревого потока не обнаружены.

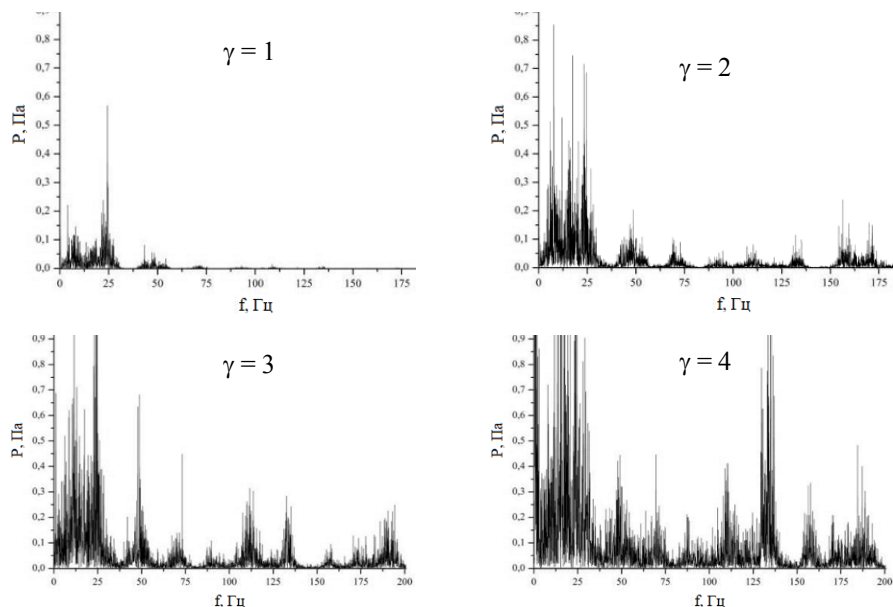


Рисунок 7 – Спектры пульсаций давления

Структура потока в модели вихревой камеры сгорания с распределенным вводом потока через вертикальные основные сопла и горизонтальные сопла вторичного дутья (см. рис. 2-б) исследована при помощи метода PIV. Анализ представленных на рис. 8 векторных полей скорости показывает, что при различных значениях γ в данной КС не образуется интенсивно закрученное течение, значительная часть потока совершает один неполный оборот в КС и выходит в камеру охлаждения (см. условные траектории, построенные как линии, для которых измеренные проекции скорости являются касательными). На практике это

будет негативно сказываться на полноте выгорания топлива и процессе сжигания в целом. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что данная конструкция вихревой топки не перспективна с практической точки зрения.

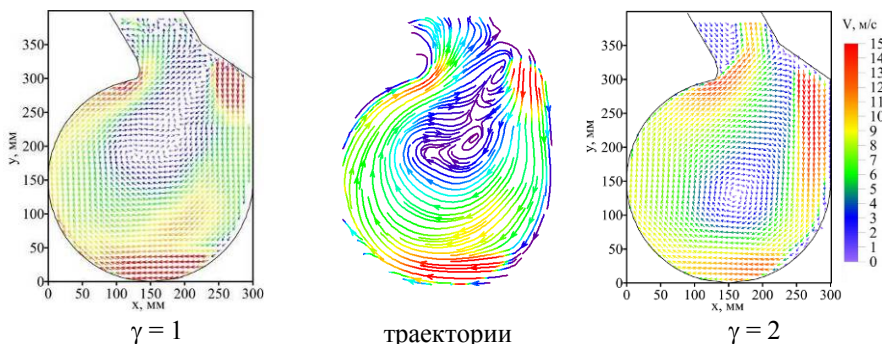


Рисунок 8 – Структура потока (вертикальное сечение по центру сопел)

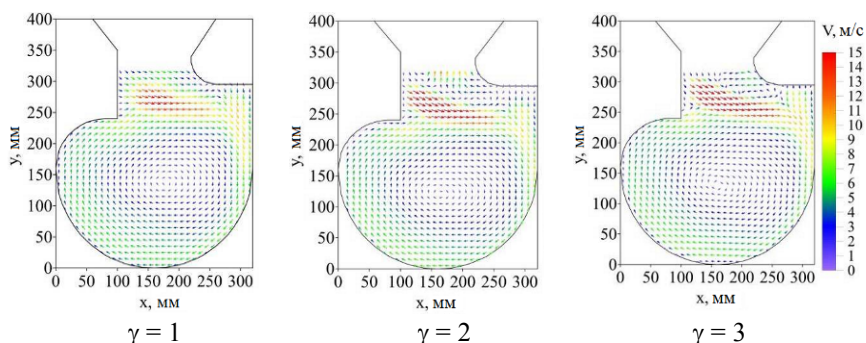


Рисунок 9 – Векторное поле осредненной скорости, полученное методом PIV в вертикальном сечении по центру сопла

Вертикально ориентированные вторичные сопла (см. рис. 2-в). позволяют устранить указанную специфику структуры потока (данное техническое решение запатентовано [12]). На рис. 9 представлены векторные поля осредненной скорости, построенные по результатам измерений для значений $\gamma = 1, 2$ и 3. Наблюдается интенсивно закрученное течение с многократной циркуляцией потока в камере сгорания. Отклонение основного потока от первоначального направления и вынос из КС за счет подпирания вторичным потоком отсутствует при всех

режимах. Течение обладает сложной пространственной структурой: положение центра вихря зависит от координаты z . На основе данных о распределении трех компонент скорости, полученных на основе методов 3D-ЛДА и Stereo-PIV, проведена визуализация вихревого ядра потока с использованием критерия «минимума полного давления». На рис. 10-а представлена изоповерхность динамического давления $p_{\text{дин}} = 0,25$ Па для режима $\gamma = 1$. Вихревое ядро потока имеет характерную W-образную форму. Положения пиков в спектре пульсаций давления, представленных на рис. 10-б,в, не зависят от скорости (расхода), то есть периодическая динамика отсутствует, что на практике является важным свойством, гарантирующим стационарность режима работы КС.

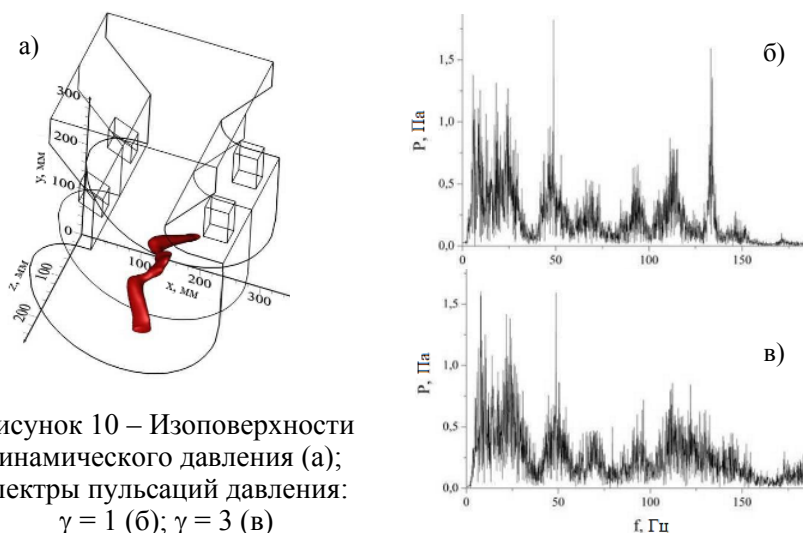


Рисунок 10 – Изоповерхности динамического давления (а); спектры пульсаций давления: $\gamma = 1$ (б); $\gamma = 3$ (в)

Данные о структуре течения в модели четырехвихревой камеры сгорания (см. рис. 2-г) получены с использованием метода PIV при различной скорости потока на выходе из боковых ($V_{\text{бок}}$) и фронтальных ($V_{\text{фр}}$) сопел и при разных отношениях этих скоростей, $\beta = V_{\text{бок}} / V_{\text{фр}}$. С учетом симметрии измерения методом PIV проведены в половине горизонтальных сечений, проходящих через центры ярусов сопел. Измерены две компоненты скорости, лежащие в этих плоскостях. На рис. 11 представлены полученные векторные поля и построенные по ним условные траектории (которые, строго говоря, не соответствуют физическим траекториям, а являются линиями, касательными к которым

являются проекции скорости на рассматриваемую плоскость). Представлен режим, при котором скорости на выходе из боковых и фронтальных сопел равны 5 и 1 м/с, соответственно ($\beta = 5$). Такое значение β характерно для режима работы реального котла. Потoki, выходящие из боковых сопел, взаимодействуют с потоками, подаваемыми через фронтальные сопла, и потоками, подаваемыми через противоположные боковые сопла, разворачиваются и замыкаются, образуя интенсивно закрученное течение с четырьмя сопряженными вихрями. Положение центров вихрей зависит от координаты y , что свидетельствует об искривлении осей вихревых структур. Имеет место интенсивное омывание фронтальных стенок, что для условий работы котла предотвращает шлакование теплообменных поверхностей.

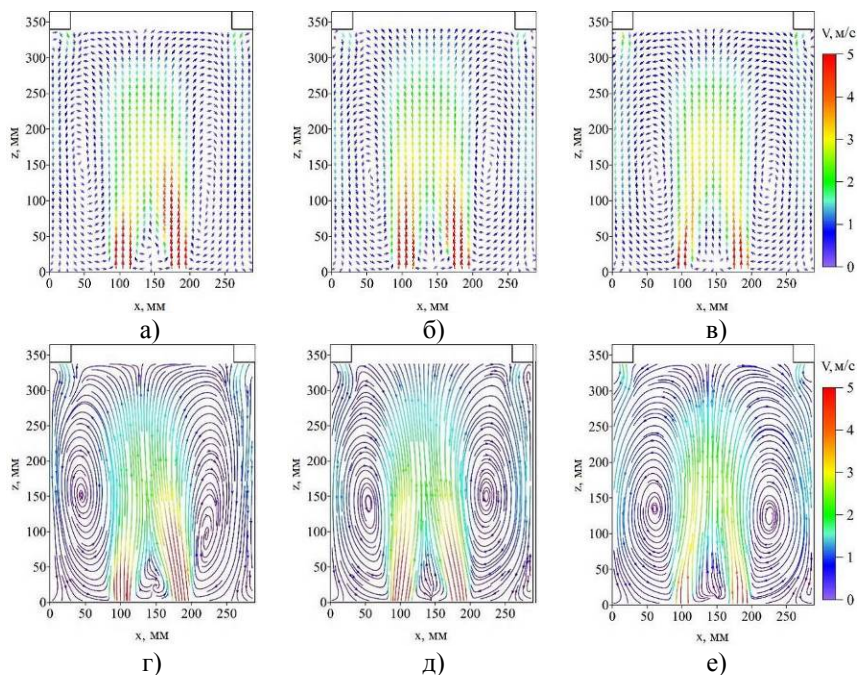


Рисунок 11 – Векторное поле скорости (а-в) и соответствующие условные траектории (г-е) в горизонтальных сечениях:
(а, г) – нижний ярус; (б, д) – средний ярус; (в, е) – верхний ярус

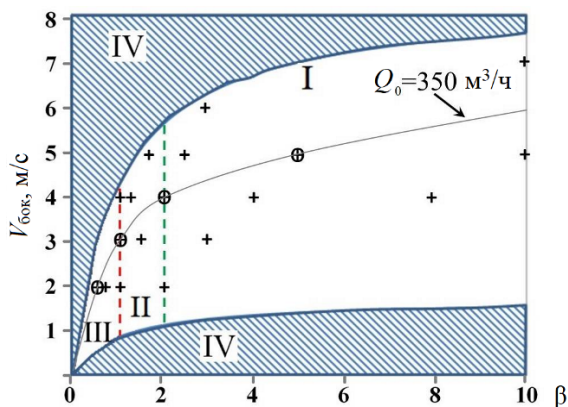


Рисунок 12 – Карта режимов течения
в модели четырёхвихревой камеры
сгорания

На основе проведенных измерений полей осредненной скорости построена карта режимов (рис. 12) с различной характерной структурой потока. Символами « $\oplus$ » обозначены режимы, соответствующие одному и тому же суммарному расходу $Q_0 = 350 \text{ м}^3/\text{ч}$; символами «+» обозначены остальные исследованные режимы. Для значения $\beta > 2$ (область I) характерно

наличие четырех симметричных сопряженных вихревых структур с вертикальными осями вращения потока. Таким образом, данная область соответствует диапазону режимов с регулярной четырёхвихревой схемой течения. В области III ($\beta < 1$) наблюдается полное разрушение регулярной четырёхвихревой схемы. Течение приобретает нерегулярный характер с большим количеством мелких вихрей, которое зависит от расположения исследуемого сечения (от координаты y). По мере изменения β от 2 до 1 асимметричность течения усиливается, регулярная вихревая структура распадается на более мелкие вихри, диапазон режимов $1 < \beta < 2$ (область II) можно обозначить как переходный.

Для изучения влияния режимных параметров на характеристики потоков, создаваемых пневматической вихревой форсункой (ПВФ) при распылении ВУС, проведены экспериментальные исследования структуры и дисперсного состава потоков с использованием бесконтактных методов. В первую очередь, с использованием метода PIV исследована структура однофазного газового потока, на рис. 13 представлены полученные векторные поля скорости при избыточном давлении в газовой камере форсунки $p_0 = 1$ и 3 атм ($z = 0$ соответствует срезу кольцевого канала).

При $p_0 = 1$ атм на выходе из кольцевого сопла формируется газовая струя, число Маха на срезе сопла составляет $M \approx 1$. В зоне пересечения (при $z = 10$ мм вблизи оси симметрии) сходящаяся кольцевая струя воздуха переходит в концентрированную и формирует прямую осевую струю и возвратную (кумулятивную). При увеличении избыточного давления до $p_0 = 3$ атм кольцевая струя расширяется быстрее. Начиная с избыточного давления $p_0 = 3$ атм, прямая осевая струя становится сверхзвуковой с числом Маха $M \approx 1,3$. Формируется возвратная струя со значением скорости до 200 м/с на оси форсунки, что должно обеспечивать эффективное дробление жидкости, подаваемой по центральному каналу. При дальнейшем увеличении давления картина течения качественно остается такой же.

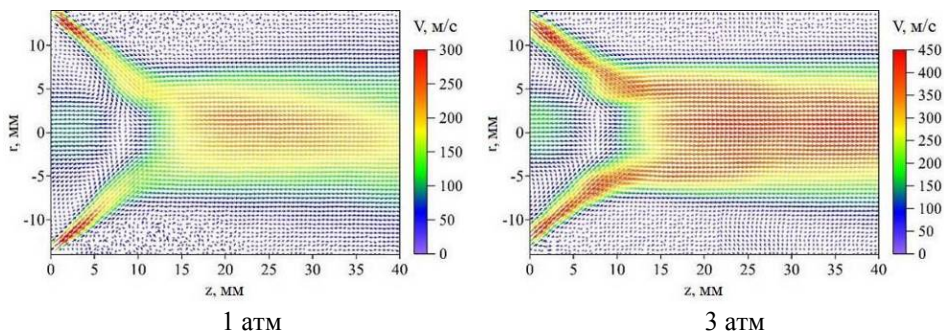


Рисунок 13 – Векторное поле средней скорости газа, истекающего из ПВФ

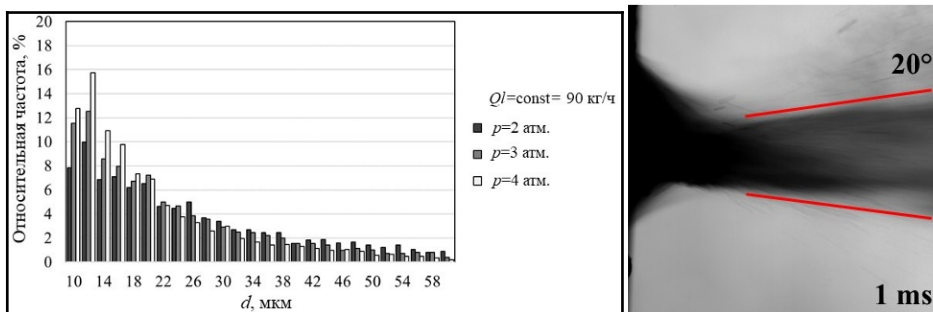


Рисунок 14 – Дисперсный состав потока (слева). Скоростная визуализация распыления ВУС, $p_0 = 2$ атм, $Q_l = 180$ кг/ч (справа)

С использованием метода теневой фотографии исследован дисперсный состав потока при распылении ВУС пневматической вихревой форсункой и угол раскрытия струи при различных режимах, см. рис. 14. Характерный размер частиц в исследуемом потоке 10-20 мкм (~60 % от числа идентифицированных частиц). В результате проведенных на основе оптических методов исследований структуры и дисперсного состава газокапельного потока определен диапазон динамических условий и расхода, обеспечивающий эффективное диспергирование жидкости оригинальной пневматической форсункой. Сведения о применении результатов для сжигания ВУС приведены в Приложении Б.

Экспериментальные данные, полученные с использованием высокоточных методов, позволили провести детальное количественное сопоставление результатов физического и численного моделирования структуры потоков. В частности, для вихревой КС (см. рис. 2.-а) сопоставлены профили осредненной и пульсационной составляющих вертикальной компоненты скорости. Получено качественное соответствие вихревого ядра потоков V- и W-образной формы. Профили z-компоненты скорости вдоль различных горизонтальных линий. Для в четырехвихревой КС сопоставлены с результатами расчетов, полученными на основе различных моделей. Показано, что сделанный на основе серии экспериментов вывод о том, что изменение отношения расходов (β) позволяет управлять характером вихревого потока в четырехвихревой КС, находится в хорошем соответствии с результатами расчетов. Количественное сопоставление данных PIV-измерений распределения аксиальной скорости на разном расстоянии от форсунки с расчетами структуры газокапельного потока, формируемого ПВФ, позволил сделать вывод преимуществе модели 2D-RSM для данной задачи перед 3D-DES.

Проведенная валидация результатов расчетов в ряде случаев позволила обосновать выбор математической модели для дальнейшего применения в полномасштабных расчетах, в том числе для режимов с горением. В свою очередь, расчеты изотермического течения в КС реального размера подтвердили возможность масштабирования результатов экспериментальных исследований структуры потока в лабораторных моделях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На созданных стендах, оснащенных оптическими измерительными системами, выполнены исследования структуры вихревых течений в ограниченных объемах с распределенным вводом потока и характеристик высокоскоростных газодаждельных потоков применительно к элементам перспективного теплоэнергетического оборудования.

2. С использованием современных бесконтактных методов диагностики потоков (лазерная доплеровская анемометрия, цифровая трассерная визуализация) получена детальная информация о турбулентных закрученных течениях в лабораторных изотермических моделях вихревых камер сгорания с распределенным вводом потока: получены поля трех компонент осредненной скорости, а также кинетической энергии турбулентности; в диапазоне автомодельности визуализирована структура течений и определены свойства вихревого ядра потока.

3. В результате обобщения полученных данных показано, что при распределенном вводе потока в вихревую камеру отношение расходов позволяет управлять важными для практики особенностями структуры исследуемых закрученных течений, в том числе для предотвращения проявления негативных для практики эффектов.

4. С применением оптических методов (цифровая трассерная визуализация, теневой метод) определена структура и дисперсный состав газодаждельного потока в широком диапазоне динамических условий и расхода.

5. На основе полученных детальных экспериментальных данных осуществлена валидация результатов численного моделирования исследуемых течений.

6. Обоснованы принципиальные технические решения и рекомендации для повышения показателей работы перспективного теплоэнергетического оборудования.

Список публикаций автора по теме диссертации

1. **Shadrin E.Yu.**, Anufriev I.S., Butakov E.B., Kopyev E.P., Alekseenko S.V., Maltsev L.I., Sharypov O.V. Coal-water slurry atomization and combustion in a low-power industrial burner // *Fuel*. – 2021. – Vol. 303. – Article No. 121182. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.121182 (Из перечня ВАК)

2. Anufriev I.S., **Shadrin E.Y.**, Kopy'ev E.P., Maltsev L.I., Sadkin I.S., Sharypov O.V. Spraying Liquid Using Pneumatic Nozzle for Suspension Fuel // *Journal of Engineering Thermophysics*. – 2020. – Vol. 29, Issue 4. – P. 542–548. DOI: 10.1134/S1810232820040025 (Из перечня ВАК)

3. Alekseenko S.V., Anufriev I.S., Dekterev A.A., **Shadrin E.Y.**, Kuznetsov V.A., Sharypov O.V., Boyko E.E., Naumov I.V., Kabardin I.K. Investigation of transfer processes in swirling flows in application to vortex furnaces for coal fuel // International Journal of Thermal Sciences. – 2021. – Vol. 161, Article No. – 106715. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2020.106715 (Из перечня ВАК)

4. Alekseenko S.V., Anufriev I.S., Dekterev A.A., Kuznetsov V.A., Maltsev L.I., Minakov A.V., Chernetskiy M.Y., **Shadrin E.Y.**, Sharypov O.V. Experimental and numerical investigation of aerodynamics of a pneumatic nozzle for suspension fuel // International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2019. – Vol. 77. – P. 288–298. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2019.04.013 (Из перечня ВАК)

5. Ануфриев И.С., Куйбин П.А., **Шадрин Е.Ю.**, Шараборин Д.К., Шарыпов О.В. Изучение аэродинамической структуры потока в модели вихревой топки стереоскопическим методом цифровой трассерной визуализации // Теплофизика и аэромеханика. – 2016. – Т. 23, № 4. – С. 645–648. (Из перечня ВАК)

6. Ануфриев И.С., Стрижак П.А., Чернецкий М.Ю., **Шадрин Е.Ю.**, Шарыпов О.В. Аэродинамика перспективной конструкции вихревой топки // Письма в Журнал Технической Физики. – 2015. – Т. 41, № 15. – С. 25–32. (Из перечня ВАК)

7. Ануфриев И.С., Красинский Д.В., **Шадрин Е.Ю.**, Шарыпов О.В. Визуализация структуры потока в вихревой топке // Письма в Журнал технической физики. – 2014. – Т. 40, №. 19. – С. 104–110. (Из перечня ВАК)

8. Ануфриев И.С., Шарыпов О.В., **Шадрин Е.Ю.** Диагностика течения в вихревой топке нового типа методом цифровой трассерной визуализации // Письма в Журнал технической физики. – 2013. – Т. 39, №. 10. – С. 36–43. (Из перечня ВАК)

9. Аникин Ю.А., Ануфриев И.С. Красинский Д.В., Саломатов В.В., **Шадрин Е.Ю.**, Шарыпов О.В. Физическое и численное моделирование внутренней аэродинамики вихревой топки с рассредоточенным тангенциальным вводом горелочных струй // Вестник Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. – 2013. – Т. 8, №. 2. – С. 86–94. (Из перечня ВАК)

10. **Шадрин Е.Ю.**, Ануфриев И.С., Шарыпов О.В. Исследование процесса распыления и сжигания водоугольного топлива с использованием пневматической форсунки // Прикладная механика и техническая физика. – 2021. – Т. 62, № 3. – С. 165–171. (Из перечня ВАК)

11. Красинский Д.В., Саломатов В.В., Ануфриев И.С., Шарыпов О.В., **Шадрин Е.Ю.**, Аникин Ю.А. Моделирование топочных процессов при сжигании распыленного угля в вихревой топке усовершенствованной конструкции. Часть 1. Аэродинамика течения в вихревой топке // Теплоэнергетика. – 2015. – № 2. – С. 41–46. (Из перечня ВАК)

12. Вихревая топка. Патент РФ на изобретение № 2585347. Патентообладатель: ИТ СО РАН. Авторы: Ануфриев И.С., Красинский Д.В., Саломатов В.В., **Шадрин Е.Ю.**, Шарыпов О.В. Зарегистрирован 05.05.2016. Приоритет от 26.06.2015.

13. Ануфриев И.С., Красинский Д.В., **Шадрин Е.Ю.**, Шарыпов О.В. Глава 6. Моделирование процессов переноса в пылеугольных топках с горизонтальной осью вихревого потока. В кн.: Вихревые явления и их влияние на процессы переноса / под ред. С.В. Алексеенко и И.В. Наумова; Ин-т теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН. – Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2018. – 366 с. – С. 221-265.

14. **Shadrin E.Y.**, Anufriev I.S., Kopyev E.P., Maltsev L.I., Sharypov O.V. Investigation of characteristics of a pneumatic nozzle as applied to coal-water fuel spraying // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1677, Issue 1. – Article No. 012116. DOI: 10.1088/1742-6596/1677/1/012116

15. Anufriev I.S., Kopyev E.P., Maltsev L.I., **Shadrin E.Yu.**, Sharypov O.V. Investigating the gas-droplet flow generated by a pneumatic nozzle for a coal-water slurry // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1369, Issue 1. – Article No. 012031. DOI: 10.1088/1742-6596/1369/1/012031

16. Ануфриев И.С., **Шадрин Е.Ю.**, Шарыпов О.В. Исследование пульсационных характеристик потока в модели усовершенствованной вихревой топки // Инновационная наука. – 2016. – № 3-4. – С. 17–20.

17. Alekseenko S.V., **Shadrin E.Y.**, Anufriev I.S., Boyko E.E. Investigation of aerodynamics of improved four-vortex furnace device // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1382, Issue 1. – Article No. 012141. DOI: 10.1088/1742-6596/1382/1/012141

18. Kuznetsov V., Shebelev A., Anufriev I., **Shadrin E.**, Minakov A. Verification of the calculation modeling methods of the atomizing of a gas and gas-liquid stream from a pneumatic nozzle // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1261, Issue 1. – Article No. 012019. DOI: 10.1088/1742-6596/1261/1/012019

19. Anufriev I.S., Maltsev L.I., **Shadrin E.Yu.**, Sharypov O.V. Investigating characteristics of a gas-droplet flow under different conditions of liquid dispersion by a pneumatic nozzle // Journal of Physics: Conference

Series. – 2018. – Vol. 1128, Issue 1. – Article No. 012045. DOI: 10.1088/1742-6596/1128/1/012045

20. **Shadrin E.Yu.**, Anufriev I.S., Papulov A.P. Identification of possible non-stationary effects in a new type of vortex furnace // EPJ Web of Conferences. – 2017. – Vol. 159. – Article No. 0045. DOI: 10.1051/epjconf/201715900045

21. **Шадрин Е.Ю.**, Ануфриев И.С., Глушков Д.О., Папулов А.П. Экспериментальное исследование характеристик закрученного потока в модели вихревой топки // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 9. – С. 194–198.

22. Anufriev I.S., Krasinsky D.V., **Shadrin E.Yu.**, Sharypov O.V. Visualization of the flow structure in a perspective vortex furnace // Proceedings of The 13th Asian Symposium on Visualization (ASV 13), Novosibirsk, Russia. – Article No. 137. <http://itam.nsc.ru/conferences/13asv/>

23. Ануфриев И.С., Красинский Д.В., **Шадрин Е.Ю.**, Шарыпов О.В. Визуализация пространственной структуры потока в вихревой топке // Сборник докладов Всероссийской конференции «XXXI Сибирский теплофизический семинар», Новосибирск, 2014. – С. 150–156.

24. Ануфриев И.С., Шарыпов О.В., **Шадрин Е.Ю.**, Красинский Д.В. PIV-измерения структуры закрученного течения в модели вихревой топки // Сборник материалов докладов Национального конгресса по энергетике: в 5 томах. Т. I. / Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2014. – С.46–51.

25. Ануфриев И.С., **Шадрин Е.Ю.** PIV-измерения скорости закрученного потока в модели вихревой топки // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5. <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=15154>

26. Ануфриев И.С., Аникин Ю.А., Копьев Е.П., Красинский Д.В., Саломатов В.В., **Шадрин Е.Ю.** Управление аэродинамикой закрученного потока в вихревой топке // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 5. <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=10326>

27. Ануфриев И.С., Аникин Ю.А., Красинский Д.В., Саломатов В.В., **Шадрин Е.Ю.**, Шарыпов О.В. Управление аэродинамикой закрученного потока в вихревой топке // Сборник трудов IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий» / Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – С. 222–226.

28. Ануфриев И.С., Кузнецов Г.В., **Шадрин Е.Ю.**, Шарыпов О.В., Аникин Ю.А., Двойнишников С.В., Куликов Д.В., Рахманов В.В.

Исследование структуры течения в новой конструкции вихревой топки методом цифровой трассерной визуализации // Известия Томского политехнического университета. Энергетика. – 2013. – Т. 322, № 4. – С. 31–35.