

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе  
Сибирского отделения Российской академии наук

На правах рукописи

Шадрин Евгений Юрьевич

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ВИХРЕВЫХ И МНОГОФАЗНЫХ  
ПОТОКОВ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПЕРСПЕКТИВНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ  
ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы

Диссертация на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:  
Доктор физико-математических наук  
Шарыпов Олег Владимирович

Новосибирск 2022

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ .....	3
ГЛАВА 1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ .....	9
ГЛАВА 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ .....	34
2.1 Стенд для исследования внутренней аэродинамики моделей вихревых камер сгорания .....	34
2.2 Стенд для исследования характеристик газокапельного потока при распылении водоугольной суспензии .....	42
ГЛАВА 3 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ..	49
3.1. Структура потока в моделях вихревых камер сгорания .....	49
3.1.1 Камера сгорания с наклонными основными соплами и горизонтальными соплами вторичного дутья .....	49
3.1.2 Камера сгорания с вертикальными основными соплами и горизонтальными соплами вторичного дутья .....	59
3.1.3 Камера сгорания с наклонными основными соплами и вертикальными соплами вторичного дутья .....	61
3.1.4 Четырехвихревая камера сгорания .....	65
3.2 Характеристики газокапельного потока, формируемого пневматической вихревой форсункой для распыления водоугольной суспензии .....	72
3.3 Валидация результатов численного моделирования .....	81
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	86
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	88
ПРИЛОЖЕНИЕ Б .....	89
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ .....	94
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	96

## ВВЕДЕНИЕ

**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, определить эффективные способы управления аэродинамикой. Подробные и достоверные экспериментальные данные, полученные на изотермических моделях

топочных устройств, важны для валидации результатов численного моделирования, 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 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.

**Основные задачи исследования:**

- создание стендов для исследования структуры вихревых течений и характеристик газокапельных потоков, оснащенных современными измерительными системами и методиками, основанными на методах лазерной доплеровской анемометрии, цифровой трассерной визуализации, теневого метода;

- визуализация структуры изотермических закрученных течений, определение свойств вихревого ядра потока и уровня кинетической энергии турбулентности на основе бесконтактных методов измерения пространственного распределения осредненной и пульсационной составляющих скорости при различных условиях распределенного ввода потока в объем;

- выявление закономерностей влияния управляющих параметров на структуру исследуемых вихревых потоков;

- определение структуры и дисперсного состава газокапельного потока в зависимости от динамических условий;

- проведение валидации результатов численного моделирования на базе полученных экспериментальных данных;

- обоснование принципиальных технических решений и рекомендаций для разработки перспективного теплоэнергетического оборудования.

**Методика.** В работе использованы следующие основные 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.

**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 газокапельного 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.

**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.

Результаты диссертационной работы прошли **апробацию** в форме обсуждения докладов 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 коллоквиум 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.

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

## ГЛАВА 1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Уголь является ценным ископаемым, используемым в энергетике и химической промышленности. Угольное топливо остается одним из основных источников получения энергии на современных тепловых и электрических станциях. Согласно прогнозам Мирового Энергетического Агентства (World energy outlook 2019. International Energy Agency (IEA). <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/coal>), даже с учетом ужесточения климатической и экологической политики, роста потребления природного газа и использования возобновляемых источников энергии, спрос на уголь в перспективе до 2040 года будет сохраняться стабильным. На рисунке 1.1 представлен прогноз производства энергии от различных источников [1].

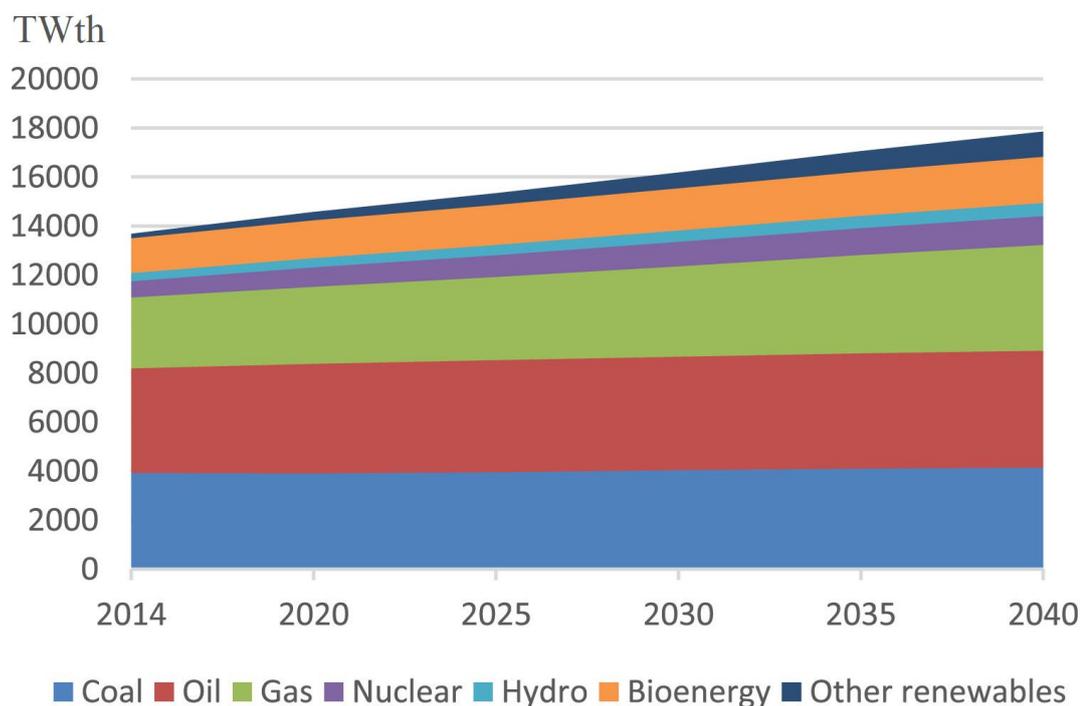


Рисунок 1.1 – Прогноз производства энергии от различных источников

В настоящее время технологии, применяемые на ТЭС, в основном ориентированы на использование высококачественных углей. Ограниченность запасов таких видов топлива определяет актуальность

задачи применения в энергетике низкосортных углей. В то же время, котельное оборудование, используемое на угольных станциях, разработано в середине прошлого века, что также актуализирует проблему модернизации имеющегося парка котлоагрегатов и создания новых. Как следствие – возникает необходимость разработки новых технологий сжигания, удовлетворяющих современным требованиям к энергоэффективности и экологической безопасности.

В зависимости от степени метаморфизма (углефикации) различают бурые угли, каменные угли, антрациты, графиты и др., теплотехнические характеристики которых существенно различаются, см. Таблицу 1. С этим связана проблема выбора оптимальной технологии (методов) сжигания того или иного типа угля.

Таблица 1. Теплотехнические характеристики угля

Тип угля	Влага рабочая, %	Зола, сухое состояние, %	Выход летучих, %	Высшая теплота сгорания, ккал/кг
Сланец	40-50	75-80	48-50	1600-2000
Лигнит	32-40	28-35	23-27	1900-2100
Бурый	25-35	15-20	35-50	3000-3800
Каменный	5-12	20-56	15-40	4000-5000
Антрацит	5-8	25-35	4-10	4300-6200

Среди методов сжигания угольного топлива, используемых в настоящее время, можно выделить несколько основных [2]: слоевое сжигание; сжигание в кипящем или псевдооживленном слое; факельное сжигание; вихревое сжигание.

Слоеое сжигание является самым древним и наиболее распространенным методом сжигания твердого топлива (рисунок 1.2). При

таким способом сжигания кусковое топливо (крупный помол) расположено на неподвижной (в некоторых случаях – подвижной) колосниковой решетке, через которую в область горения подается необходимый для сжигания воздух (окислитель).

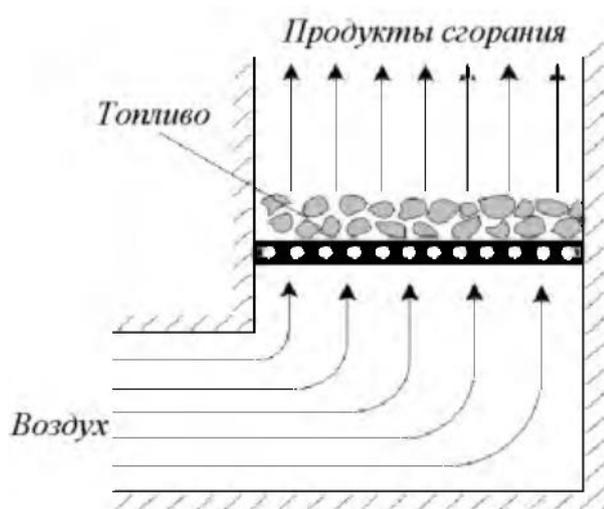


Рисунок 1.2 – Схема слоевого сжигания твердого топлива

Данный метод получил широкое распространение благодаря простоте в использовании и конструкции, в связи с чем он имеет низкую стоимость при создании агрегатов и их эксплуатации. Слоевое сжигание характеризуется быстрым зажиганием топлива и возможностью регулирования мощности котла в широком диапазоне. Отсутствие необходимости предварительной подготовки топлива также является преимуществом этого метода. К недостаткам метода слоевого сжигания относятся: высокие значения химического и механического недожога; высокий уровень выбросов в атмосферу вредных продуктов сгорания; невозможность использования в качестве топлива спекающихся углей и углей с высокой зольностью. Всё это обуславливает возможность использования в котлах со слоевым сжиганием только углей высокого качества и необходимость применения различных систем очистки, удовлетворяющих экологическим нормам. Несмотря на недостатки, метод слоевого сжигания остается наиболее широко

применяемым на промышленных предприятиях, тепловых станциях средней и малой энергетики. Однако во многих регионах высококачественный уголь малодоступен, что вынуждает использовать в качестве топлива угли более низкого качества с высоким содержанием золы и влаги. Предлагаются различные методы для их эффективного сжигания в слоевых топках. Одним из способов оптимизации процесса сжигания угля в таких топках является применение переталкивающих колосниковых решеток [3]. Непрерывное перемешивание горящего слоя позволяет добиться лучшего выгорания топлива и оперативного устранения золы из области горения, что позволяет использовать в котлах со слоевой схемой сжигания угля с высоким содержанием шлака, золы и исходной влаги. Использование каталитических присадок при сжигании низкосортного угля позволяет существенно повысить КПД котла, снизить потери тепла с механическим недожогом, обеспечить эксплуатационно-чистые режимы работы котла (поверхностей нагрева) [4].

В настоящее время в мире наблюдается тенденция к широкому внедрению котлов, использующих технологию сжигания в кипящем слое [5]. Дробленое топливо подается на решетку, где размещается слой дисперсного инертного материала (песок, известняк или др.). Воздух, подаваемый через решетку под давлением, приводит частицы во взвешенное состояние, образуя тем самым «кипящий» или «псевдооживленный» слой (рисунок 1.3).

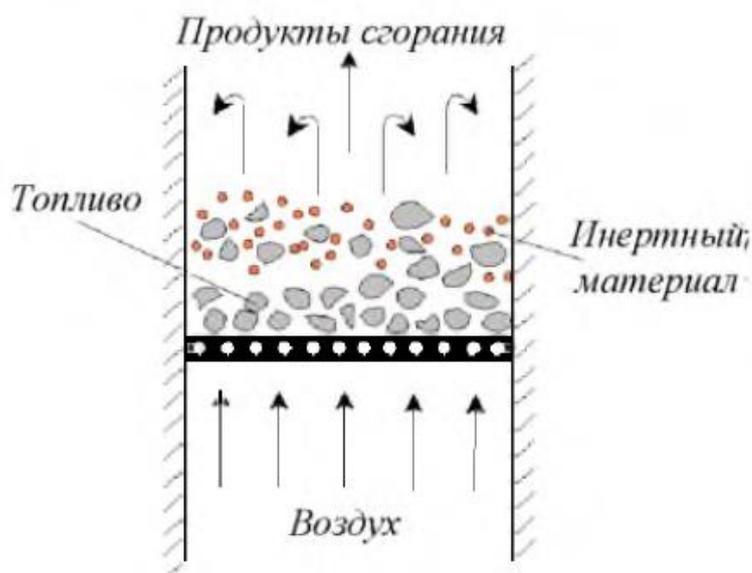


Рисунок 1.3 – Схема сжигания в стационарном кипящем слое

Благодаря наличию кипящего слоя обеспечивается интенсивное перемешивание свежих топливных частиц с реагирующей смесью и их подготовка к сжиганию, а также обеспечивается возможность эффективной очистки горячей смеси от золы и шлака. Таким образом, котлы с кипящим слоем позволяют использовать в качестве топлива низкосортные угли с повышенной зольностью, промышленные, бытовые и сельскохозяйственные отходы как отдельно, так и совместно [6-9]. Горение топлива в топках с кипящим слоем происходит при относительно низких температурах (800-900 С°), что препятствует образованию оксидов азота и серы, тем самым делая этот способ сжигания экологически безопасным.

В то же время сжигание в кипящем слое обладает рядом недостатков. Котлы, использующие данный метод сжигания, являются высокотехнологичными. Высокий уровень материальных затрат при производстве как самих топок, так и систем подготовки и подачи топлива [10] и золоуловителей, не позволяет использовать данную технологию повсеместно. Кроме того, существует ряд строгих требований к фракционному составу топлива: наличие крупных частиц может привести к заклиниванию решеток, подающих воздух, и последующим сбоям в работе

котла. Наличие же более мелких фракций приводит к их уносу из области горения, приводящему в свою очередь к существенному недожогу топлива.

Одним из способов решения этих недостатков является технология циркулирующего кипящего слоя (ЦКС). Отличительной особенностью ЦКС от стационарного кипящего слоя является наличие золоуловителей и систем возврата недогоревшего топлива в камеру сгорания (рисунок 1.4) [11].

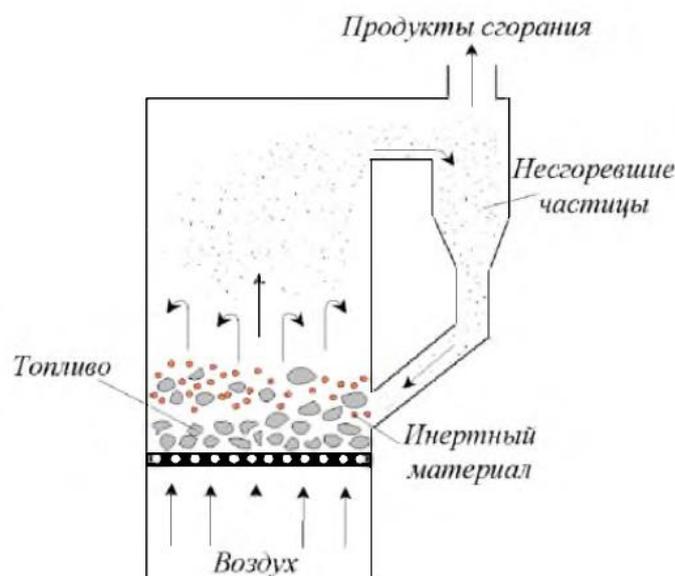


Рисунок 1.4 – Схема сжигания в циркулирующем кипящем слое

Более высокая скорость потока воздуха и наличие систем возврата недогоревшего топлива существенно смягчают требования к фракционному и химическому составу топлива и позволяют добиться еще более интенсивного перемешивания реагирующей смеси. Тем самым обеспечивается возможность уменьшения габаритов котла с ЦКС при сохранении номинальной производительности.

Метод факельного сжигания бы предложен в 20-30 гг. прошлого столетия как один из вариантов повышения мощности котельного оборудования при сохранении габаритов самого котла. В основе метода лежит подача в камеру сгорания через специальные горелки измельченного пылевидного топлива вместе с высокоскоростной воздушной струей

(рисунок 1.5). Топливо сгорает в нижней части топки, а продукты сгорания поднимаются вверх, где происходит теплосъем и очистка уходящих газов от вредных выбросов. Метод факельного сжигания, наряду с ЦКС, является высокотехнологичным методом. Определенные требования накладываются как на характеристики предварительно подготавливаемого топлива, так и на пылеугольные горелки, которые должны: обеспечивать эффективное перемешивание частиц топлива с воздухом и надежное воспламенение; полностью заполнять топочное пространство реагирующей смесью; обладать возможностью регулирования мощности котла в широком диапазоне.

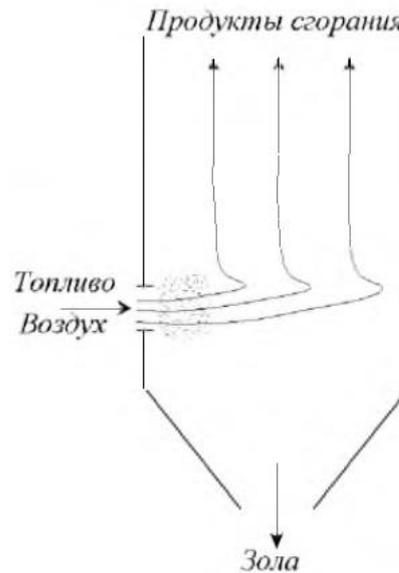


Рисунок 1.5 – Схема факельного сжигания

Основным преимуществом факельного метода является возможность использования тех видов топлива, которые проблематично сжигать в слое: низкокачественные угли, отходы производства, биомассу [12]. Главным недостатком метода является необходимость установки систем очистки уходящих газов в связи с высокой долей в них вредных веществ, например оксидов азота. Для решения этой проблемы используются различные методы, среди них: ступенчатое сжигание [13-15], заключающееся в стадийной подаче окислителя, что позволяет снизить температуру реагирующей смеси и

провести полное дожигание топлива; низкотемпературное факельное сжигание [16] с подачей в область горения воды или продуктов сгорания (с низким содержанием кислорода), что позволяет искусственно замедлить реакцию горения, и тем самым понизить температуру и уровень образования оксидов азота. Другим недостатком является высокий уровень мехнедожога при использовании трудно воспламеняемого и долго горящего топлива, так как топливные частицы за время нахождения в области горения не успевают сгореть полностью. Одним из способов устранения данного недостатка является специальная организация аэродинамики течения, благодаря которой увеличивается время пребывания топлива в топке путем многократной циркуляции топливных частиц в камере сгорания (циклонные или вихревые технологии).

Организация вихревого движения позволяет эффективно управлять процессами горения. Существуют различные способы формирования закрученного потока в камерах сгорания. В ряде вариантов вихревого сжигания пылевидное топливо вместе с несущим воздухом подается в зону горения, где формируется закрученное стабильное пламя. Закрутка осуществляется за счет основного потока воздуха, обеспечивающего разбавление топливовоздушной смеси до требуемого соотношения концентраций. По сравнению с традиционным слоевым сжиганием такая схема характеризуется лучшим смешиванием компонентов, повышенной эффективностью сгорания, меньшими выбросами загрязняющих веществ в атмосферу.

Вихревой способ сжигания был разработан в СССР в начале 30-х годов прошлого века. В котлах с вихревыми топками, как правило, используется мелкодисперсное пылевидное топливо. Применение вихревых технологий позволяет: достичь высокой полноты выгорания топлива за счет увеличения времени пребывания топливных частиц в области горения; стабилизировать процесс воспламенения и горения топлива, в том числе низкосортного;

понизить уровень вредных выбросов; обеспечить процесс эффективного улавливания золы в пределах топки. В настоящее время известен ряд принципиальных конструкций топок, использующих вихревую технологию сжигания [17]: топка МЭИ, гамма-топка ВТИ, низкотемпературная топка ЛПИ, топка ЦКТИ, гравитационно-рециркуляционная топка [18] и др.

На рисунке 1.6 представлена схема вихревой топki МЭИ с пересекающимися струями. Поток пылевоздушной смеси, подаваемый через прямооточные горелки по касательной к нижнему экрану пережима, совершает один оборот внутри камеры сгорания и выходит в камеру охлаждения через пространство между горелками. Наличие контакта между горячими продуктами сгорания и свежей топливно-воздушной струей обеспечивает необходимый подогрев подаваемого топлива для эффективного воспламенения и тем самым позволяет использовать в этой топке низкорекреационные топлива. В то же время наличие взаимодействия между топливно-воздушной струей и потоком уходящих продуктов сгорания приводит к интенсивному выносу частиц топлива в камеру охлаждения и, как следствие, к увеличению механического недожога топлива.

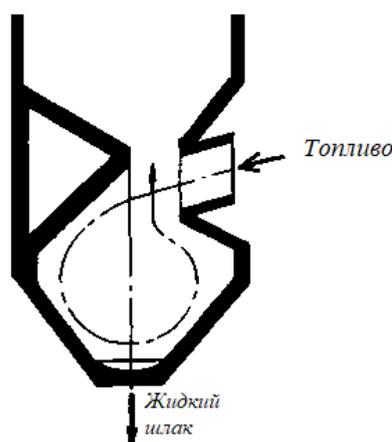


Рисунок 1.6 – Схема вихревой топki МЭИ с пересекающимися струями

Проведенные лабораторные и опытно-промышленные исследования аэродинамики и процессов сжигания в топке с пересекающимися струями

[19, 20] показали, что в данной топке действительно имеет место эффективное воспламенение подаваемого топлива. В то же время имеет место вынос недогоревших частиц топлива и летучих газов из камеры сгорания, что ведет к существенным потерям. Для решения этой проблемы был предложен ряд решений. Среди них: увеличение соотношения между скоростью подачи топлива и скоростью ухода из топки продуктов сгорания; изменение угла подачи пылевоздушной смеси и переход к так называемой схеме с частичным пересечением струй. Эти меры позволили незначительно улучшить показатели работы топки, но не позволили устранить недостатки полностью, поэтому топка МЭИ с пересекающимися струями рекомендуется только для сжигания серосодержащих газов и высокосернистых мазутов, поскольку позволяет существенно понизить уровень выбросов оксидов серы.

Представленная на рисунке 1.7 полуоткрытая топка ВТИ со встречно-наклонным расположением горелок является примером устройства с пересекающимися струями. Отличительной особенностью от топки МЭИ является двухфронтальное расположение горелок. Соударение горелочных струй, направленных к центру камеры, приводит к формированию двух потоков: восходящего и нисходящего. Нисходящий поток, доходя до низа камеры сгорания, разворачивается и выходит из неё вдоль боковых стенок топки, образуя тем самым петлеобразный закрученный поток. Главным преимуществом такой аэродинамической схемы является подача горячих продуктов сгорания к корню факела, что обеспечивает эффективное воспламенение и сжигание свежей пылевоздушной смеси.

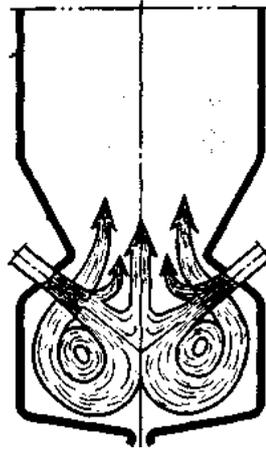


Рисунок 1.7 – Схема полукоткрытой топки ВТИ со встречно-наклонным расположением горелок

Основным недостатком представленной схемы является наличие в восходящем потоке недогоревшей топливно-воздушной смеси (наряду с продуктами сгорания), что приводит к выносу части топлива из камеры сгорания. Проведенные лабораторные исследования [21] позволили сформулировать требования к расходу смеси и углу наклона горелочных струй, при которых большая часть топлива направляется по петлеобразной траектории, а выносимое топливо полностью догорает на выходе из камеры сгорания. Проведенные опытно-промышленные испытания [22] показали, что при соблюдении рекомендаций достигается полнота выгорания топлива до 97%. В то же время при огрублении помола топлива наблюдается существенный рост мехнедожога и количества вредных выбросов, что накладывает ограничения на фракционный состав топлива и требует его предварительной подготовки.

Низкотемпературная вихревая топка ЛПИ [23, 24] была разработана в Ленинградском политехническом институте для сжигания бурых углей и горючих сланцев, сжигание которых в факельных топках приводит к зашлаковыванию поверхностей нагрева и потере тепла с механическим недожогом. Характерной особенностью топки ЛПИ, схема которой

представлена на рисунке 1.8, является наличие сопел подачи вторичного воздуха в нижней части камеры сгорания.

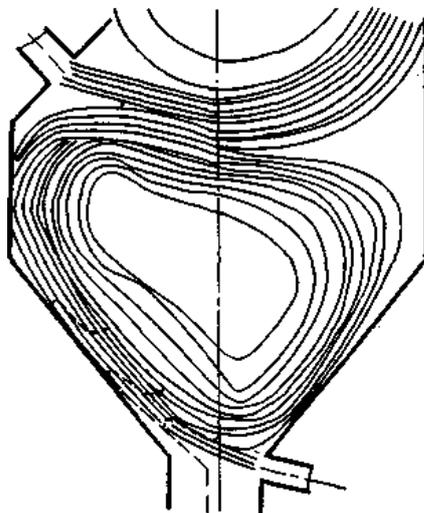


Рисунок 1.8 – Схема низкотемпературной вихревой топки ЛПИ

Использование дополнительного дутья обеспечивает многократную циркуляцию топливных частиц в области горения, что положительно сказывается на полноте выгорания топлива и воспламенении свежей топливно-воздушной смеси и позволяет использовать топливо грубого помола. Благодаря наличию нижнего дутья предотвращается шлакование теплообменных поверхностей, тем самым повышается эффективность котла и увеличивается длительность безостановочной эксплуатации котлоагрегата. В свою очередь, подача дополнительного воздуха в нижней части камеры сгорания обеспечивает стадийность сжигания топлива и позволяет снизить температуру в топке, что приводит к снижению уровня вредных выбросов в атмосферу. Опыт использования топки ЛПИ при сжигании бурых углей [25] выявил, в свою очередь, ряд недостатков: высокий механический недожог топлива; существенный износ поверхности фронтальных стен; невозможность снижения концентрации оксидов азота в продуктах сгорания до удовлетворительного уровня. В связи с этими недостатками

низкотемпературная вихревая топка ЛПИ не получила широкого распространения, а сама схема сжигания требует существенной доработки.

Гравитационно-рециркуляционная вихревая топка (ГРВТ) была разработана для сжигания высокозольного твердого топлива, сельскохозяйственных и древесных отходов [26, 27]. В основе ГРВТ использован принцип циклонного сепаратора твердых частиц. Суть данного метода заключается в ступенчатом сжигании топлива в последовательных цилиндрических камерах сгорания с увеличивающимся по высоте диаметром. В первой ступени происходит воспламенение измельченного топлива с применением газовых или мазутных горелок. При переходе на следующую ступень зола и шлак уходят к краям топки, откуда происходит их устранение. На третьей ступени подается вторичный воздух, используемый для дожигания топлива и летучих, после чего реагирующая смесь попадает на четвертую ступень, где происходит её полное сжигание и удаление оставшейся золы.

Лабораторные и промышленные опыты показали, что при недостаточной закрутке потока происходит вынос крупных топливных частиц вместе со шлаком, из-за чего имеет место существенный недожог топлива. Выявленный недостаток требует проведения дополнительных исследований по определению оптимальной закрутки потока, а также размера топливных частиц для эффективного использования в качестве энергетических топлив высокозольных бурых углей и возобновляемых топлив (биомассы).

Одной из перспективных топок, использующих закрученные потоки с пересекающимися струями, является вихревая топка ЦКТИ, схема которой представлена на рисунке 1.9.

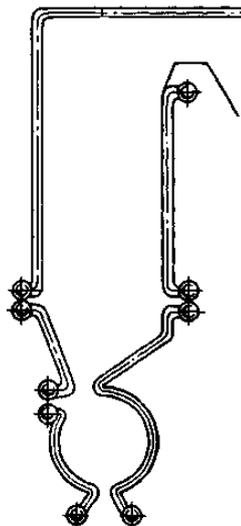


Рисунок 1.9 – Схема вихревой топки ЦКТИ

Данная топка была разработана для сжигания высокозольных углей, а также с целью уменьшить габариты котлоагрегата. Основными элементами являются: цилиндрическая камера сгорания, выполненная из огнеупорных материалов; прямоточные горелки, расположенные на фронтальной стенке; система жидкого удаления шлака в нижней части камеры сгорания; камера охлаждения и газоход. Топливо-воздушная смесь тангенциально подается в камеру сгорания, где происходит воспламенение и горение в интенсивно закрученном потоке. Это обеспечивает многократную циркуляцию топливных частиц и их полное выгорание. Главным отличием от традиционных циклонных предтопок [28], которые не получили широкого распространения для сжигания твердых топлив, является тот факт, что продукты сгорания удаляются из области горения не по оси цилиндрической камеры, а через пространство между прямоточными горелками, попадая в камеру охлаждения, где происходит улавливание летучей золы и вредных веществ.

Заводом «Красный котельщик» был создан опытно-промышленный котел ТПЕ-427 для сжигания назаровского бурого угля на Новосибирской ТЭЦ-3. Опыт эксплуатации показал, что даже при минимальной нагрузке температура газов превышала расчетную, что свидетельствовало о

загрязнении теплообменных поверхностей. Визуальный осмотр топки после работы котла без систем очистки показал наличие шлаковых отложений на большинстве поверхностей. В итоге котел ТПЕ-427 не был рекомендован к серийному производству.

С целью определения причин недостатков и возможностей их устранения за счет оптимизации конструктивных и режимных параметров этого котла в ИТ СО РАН были проведены экспериментальные и численные исследования аэродинамики вихревой топki ЦКТИ. Исследования изотермической лабораторной модели, проведенные на основе современных бесконтактных оптических методов диагностики потоков [29-31] позволили сделать вывод о несовершенстве организации внутренней аэродинамики, вызывающем негативные эффекты (рисунок 1.10). Среди них: «прилипание» струи уходящих газов к стенкам топочных экранов (эффект Коанда), что приводит интенсивному шлакованию поверхностей; наличие застойных зон и возвратных течений, что негативно сказывается на выгорании топлива и т.д. Полученные экспериментальные данные, детально характеризующие внутреннюю аэродинамику вихревой топki ЦКТИ, были использованы при верификации математических моделей для расчета процессов тепломассопереноса и горения в реальном котле. Проведенные экспериментальные и численные исследования привели к постановке задач поиска путей усовершенствования конструкции вихревой топki ЦКТИ и обоснования способов управления структурой потока, решению которых посвящена часть представленной диссертационной работы.

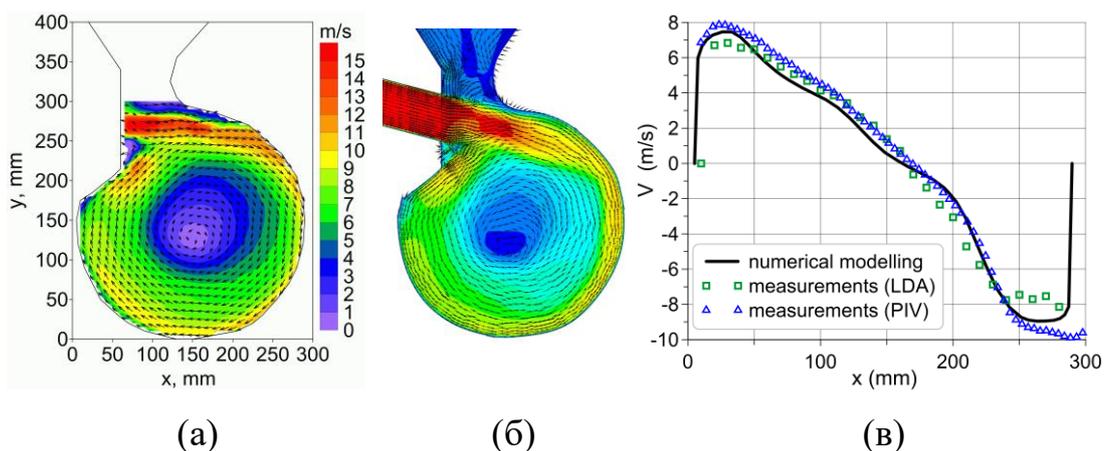


Рисунок 1.10 – Результаты исследования аэродинамики вихревой топки ЦКТИ [31]: (а) экспериментальное исследования изотермической лабораторной модели; (б) численные расчеты; (в) сопоставление экспериментов и численных расчетов

С целью вовлечения низкокачественных углей в топливно-сырьевой баланс, наряду с некоторыми из перечисленных выше методов, в XX веке была разработана и применена технология, связанная с переводом котлов на сжигание топлива в виде водоугольной суспензии (ВУС) [32-34]. Использование ВУС по сравнению с традиционными способами сжигания угля имеет ряд преимуществ: выгорание горючей массы до 95-99%, повышение КПД котлов до 80-85%, снижение себестоимости единицы вырабатываемой тепловой энергии в 1,5-5 раз (в зависимости от соотношения цен на уголь и другие энергоносители); возможность частичного или полного отказа от использования мазута и другого углеводородного топлива; возможность утилизации угольных шламов и отходов углеобогащения; снижение взрывопожароопасности; возможность транспортировать ВУС по трубопроводам, в том числе, на дальние расстояния; сокращение эксплуатационных затрат на хранение и транспортировку по сравнению с углем; снижение вредных выбросов в атмосферу (оксидов азота, окиси углерода, частиц летучей золы). Использование ВУС позволяет: повысить эффективность сжигания

низкосортных углей; сократить основные статьи расходов на 30–40%; утилизировать отходы угледобычи и освободить обширные территории от загрязняющих захоронений; снизить негативное воздействие на окружающую среду [33-35]. Наиболее перспективным является применение ВУС в малой энергетике благодаря низким капитальным затратам на реконструкцию котлов и коротким срокам окупаемости.

В то же время у этой технологии есть и недостатки: требуется применение пластификаторов для предотвращения расслоения ВУС, наличие воды создает угрозу замерзания такого топлива в соответствующих климатических условиях; в сравнении с углем ВУС обладает меньшей удельной теплотой сгорания; высокая обводненность может осложнять зажигание и требует предварительного разогрева топki [35]; могут возникать проблемы, связанные с запирианием и эрозией топливных форсунок [36, 37]. Указанные недостатки приводят к снижению эффективности технологии, но не создают принципиальных ограничений для её практического применения.

В рамках механики многофазных сред наибольшее внимание привлекает задача эффективного распыления ВУС и повышения надежности работы топливных форсунок, которые должны создавать в горелочном устройстве стабильный мелкодисперсный газочапельный поток. На сегодняшний день известно большое число форсунок, использующих гидравлические, механические, пневматические, акустические, электростатические, ультразвуковые, пульсационные и другие принципы распыливания жидкостей [38-41]. В работе [42] исследуется эффективность распыления ВУС различными типами форсунок (multistage nozzle, effervescent nozzle, internal-mixing nozzle). Для распыления суспензионных топлив на основе угля и продуктов углеобогащения обычно используются пневматические форсунки – в силу их относительной конструктивной и эксплуатационной простоты. Эффективное диспергирование достигается за счет повышения давления на входе в форсунку и скорости потока в узких каналах. Наличие в

потоке твердой фракции ограничивает надежность и ресурс форсунки, влияет на дисперсный состав, форму и стабильность истекающей затопленной струи. Поэтому для распыления ВУС важное значение имеет выбор конструкции форсунки, устойчивой к эрозии и запырению каналов, и определение в широком диапазоне расхода топлива режимных параметров, обеспечивающих требуемые характеристики газочапельного потока в горелочном устройстве. Диссертационная работа включает экспериментальное исследование структуры и дисперсного состава потока, формируемого разработанной в ИТ СО РАН пневматической форсункой для распыления ВУС, а также режимов сжигания ВУС совместно с пылеугольным топливом.

В настоящее время существует широкий спектр методов изучения структуры и динамики неоднородных турбулентных потоков, характерных в том числе для элементов энергетического оборудования (топки, горелочные устройства, форсунки и т.д.). Каждый из методов обладает своими преимуществами и недостатками. Выделяют два основных класса таких методов: контактные (термоанемометр, электродиффузионный метод, анализатор пульсаций давления и др.) и бесконтактные оптические методы (ЛДА, PIV, теневая визуализация и др.), которые в свою очередь делятся на точечные (локальные) и панорамные (полевые).

Одним из распространенных и известных контактных методов является термоанемометрия. Он основан на измерении электрического сопротивления открытой тонкой металлической проволоки, помещенной в поток и нагретой выше температуры окружающей среды. Сопротивление зависит от температуры, которая определяется локальной скоростью потока (при фиксированных параметрах окружающей среды). Основным недостатком этого метода является то, что он вносит возмущения в поток. Кроме того, погрешность измерения скорости связана с возможным непостоянством параметров среды. Являясь локальным, этот метод обладает низкой

производительностью. Нагреваемая проволока может оказывать влияние на скорость протекающих реакций. Тем не менее, несмотря на недостатки, имеется опыт использования термоанемометрических измерений в топках. Например, в [43] приведены результаты исследования осредненной скорости и пульсаций скорости в ряде точек модели вихревой топки конструкции ЦКТИ. Там же приведено сравнение этих измерений с результатами математических расчетов, которые имеют хорошее качественное совпадение, однако количественное отличие составляет более 30%. В работах [44-46] представлен опыт использования термоанемометров для измерения средней скорости и пульсаций скорости, а также изучения структуры потоков, в том числе закрученных.

Электродиффузионный метод [47], используемый для измерения скорости потока жидкости, также является точечным и вносит возмущения в исследуемый поток.

Метод лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА) – бесконтактный оптический метод. Метод получил широкое распространение в диагностике потоков [48], успешно применяется в экспериментальной аэро- и гидродинамике. Основным преимуществом метода является отсутствие возмущений, вносимых в поток. Также среди преимуществ можно отметить высокую производительность, широкий динамический диапазон, высокую точность, возможность одновременного определения осредненных и пульсационных характеристик трёх компонент скорости. Главным недостатком метода ЛДА является то, что он является точечным, что не позволяет получать информацию о «мгновенном» распределении скорости потока в заданной области.

При изучении газочастичных потоков также используется оптическая диагностика. Для определения размеров капель используются методы, основанные на дифракции лазерного излучения (Laser Diffraction Spray Analyzer, LDSA) [49] или на эффекте Доплера (Phase Doppler Particle

Analyzer, PDPA) [50-52]. Эти методы обладают высокой точностью, позволяют идентифицировать капли с размерами от сотен нанометров до миллиметра с высокой скоростью (тысячи частиц в секунду). Основным недостатком этих методов является то, что они позволяют определять характеристики только в локальной области.

Для исследования аэродинамики турбулентных потоков широко используются «панорамные» методы диагностики. Одним из самых распространенных и простых методов является классическая визуализация с фоновой подсветкой. Так, в [43] приводится пример визуализации закрученного течения в гидродинамической модели вихревой топки ЦКТИ с использованием в качестве подсветки «лазерного ножа». Данный метод позволяет получать данные о «мгновенной» структуре исследуемого течения в выделенной плоскости. Одной из разновидностей этого метода является теневая фотография [53]. В данном методе исследуемый поток помещается между источником плоскопараллельного излучения и регистрирующим оборудованием. Метод позволяет изучать структуру исследуемого потока, имеющиеся плотностные неоднородности, взвешенные в потоке частицы (их размер и положение). Например, в работе [54] с использованием данного метода исследована структура и динамика газокапельной струи дизельного топлива. Для сверхзвуковых, газокапельных и др. потоков применяется высокоскоростная визуализация с фоновой подсветкой (High-speed Backlight Imaging) [55-58].

С развитием производительности вычислительного оборудования широкое распространение получили оптические методы цифровой визуализации, при которой получаемое цифровое изображение подвергается компьютерной обработке с использованием специальных алгоритмов. Одним из таких методов является цифровая трассерная визуализация (Particle Image Velocimetry, PIV и Particle Tracking Velocimetry, PTV) [58]. Данные методы позволяют построить мгновенное поле скорости в заданной области

исследуемого потока путем определения перемещения частиц-трассеров, подмешанных в поток. Положение трассеров в моменты последовательных вспышек «лазерного ножа» регистрируется цифровой камерой. Полученные изображения проходят цифровую обработку с использованием специализированного программного обеспечения. Также метод PIV широко используется для исследования структуры и скорости газочапельных потоков, формируемых форсунками различной конфигурации [59-61]. Метод позволяет детально исследовать характеристики турбулентных потоков [57]. Погрешность метода PIV во многом определяется характеристиками измерительной системы и параметрами эксперимента. Точность измерения перемещений трассеров зависит от локальных параметров потока и получаемого изображения, по которому это смещение рассчитывается, поэтому в общем случае указывается только характерное значение погрешности. Основной вклад в погрешность PIV-измерений вносит точность определения перемещений частиц, на которую в свою очередь влияют следующие факторы [62]: локальные градиенты скорости, абсолютная величина смещения трассеров, разрядность цифровой камеры, фоновые шумы изображения, размер частиц на изображении, эффективное количество частиц, оптические эффекты, размер и плавучесть трассеров. При учете всех факторов, как правило, характерная погрешность измерений не превышает 10%.

Сведения, представленные в настоящем разделе, позволяют заключить, что закрутка потока при высоком уровне кинетической энергии турбулентности способствует интенсивному воспламенению топлива за счет перемешивания и увеличивает время пребывания топливных частиц в компактной камере сгорания, повышая полноту сгорания. Тем самым, технологии факельного сжигания в закрученном потоке обладают важными преимуществами при правильной организации внутренней аэродинамики, когда сводятся к минимуму возможные негативные эффекты, в том числе

связанные с неоднородностью структуры потока в камере сгорания. Особый интерес вызывает задача получения дополнительных возможностей управления структурой закрученного течения за счет распределенного ввода потока в вихревую камеру, что требует проведения детальных исследований.

На стадии разработки перспективного оборудования, в первую очередь, необходимы экспериментальные данные, получаемые на лабораторных моделях и основанные на современных бесконтактных методах диагностики потоков, таких как лазерная доплеровская анемометрия и цифровая трассерная визуализация. Высокопроизводительные и точные оптические измерительные системы позволяют вывести лабораторные исследования внутренней аэродинамики камер сгорания на принципиально новый уровень по сравнению с методами, применявшимися ранее, такими как термоанемометрия, электродиффузионный, тепловое «подкрашивание», которые не обеспечивают получение достаточного объема достоверной информации и позволяют получать лишь качественные характеристики структуры потока. Применявшиеся ранее методы не отвечают и современному уровню развития численного моделирования, так как не обеспечивают проведение верификации моделей на должном количественном уровне. Применение современных методов, в том числе позволяет ставить и успешно решать в лабораторных условиях задачи научного обоснования путей принципиального усовершенствования конструкций вихревых камер сгорания и эффективных способов управления процессами переноса.

Тем самым, современная методология разработки новых устройств для производства энергии требует, чтобы полномасштабным испытаниям и опытно-промышленной эксплуатации оборудования обязательно предшествовали взаимосвязанные стадии физического и численного моделирования. При проведении экспериментальных исследований на лабораторных моделях необходимо учитывать возможность применения

полученных результатов для полномасштабных камер сгорания. Благодаря автомодельности выводы о структуре изотермического течения, полученные при числе Рейнольдса выше  $10^4$ , могут быть применены к устройствам реального масштаба, а полученная на моделях точная количественная информация востребована для верификации математических моделей, которые, в свою очередь, могут применяться для моделирования реагирующего потока. При этом, несмотря на дополнительные физические эффекты, связанные с горением, именно внутренняя аэродинамика камеры сгорания во многом определяет эффективность и показатели работы котла, обеспечивая равномерность заполнения объема реагирующей смесью, полноту сгорания топлива, однородность распределения температуры, тот или иной уровень производства оксидов азота, эффективное омывание тепловоспринимающих поверхностей и тому подобное. С научной точки зрения важно, чтобы результаты проводимых лабораторных исследований, наряду с точной информацией о течении, необходимой для валидации результатов численного моделирования, позволяли обосновать эффективные способы управления структурой потоков.

Другой вывод, который следует из обзора литературы, заключается в том, что можно ожидать возрождения интереса к технологии производства тепловой энергии с использованием низкокачественных углей и отходов в виде водоугольной суспензии. Показано, что эта технология позволяет: повысить эффективность сжигания низкосортных углей; существенно сократить расходы; утилизировать отходы угледобычи; снизить негативное воздействие на окружающую среду. У этой технологии имеются и определенные недостатки, к числу которых относятся проблемы эффективного распыления ВУС, требующие проведения исследований с использованием современных высокопроизводительных измерительных.

Проведенный обзор научно-технической литературы по теме исследования позволяет обосновать актуальность темы, определить задачи исследования и аргументировать выбор используемых методов.

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 газочастичных 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 газочастичных потоков, о зависимости этих характеристик от режимных параметров и конструктивных особенностей оборудования. Результаты этих исследований, помимо практической важности, обеспечат расширение эмпирической базы

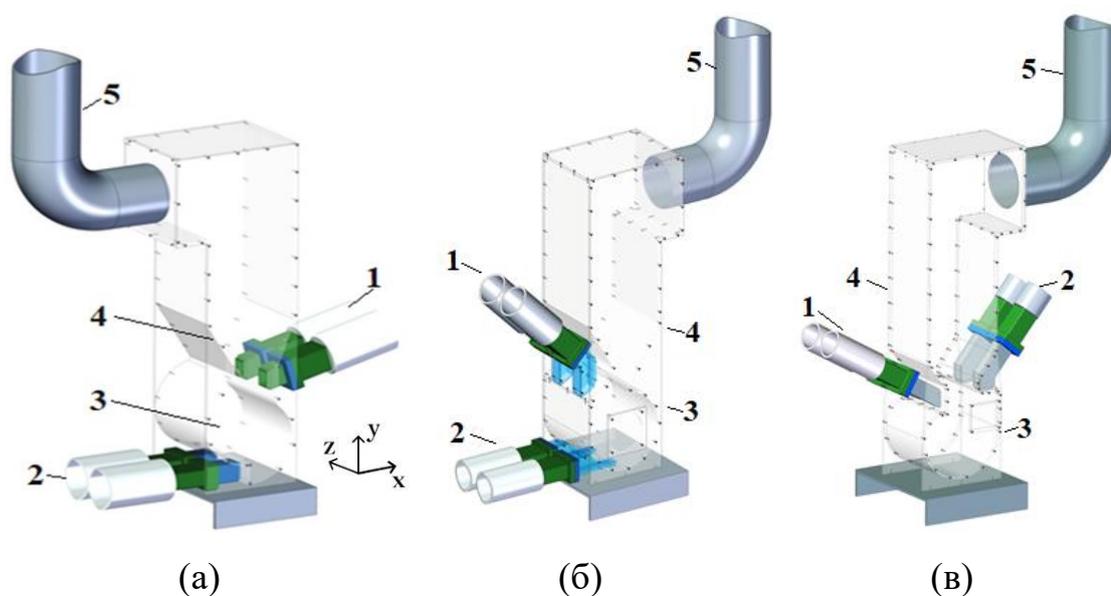
знаний о характеристиках сложных потоков, изучаемых в рамках механики жидкости и газа.

## ГЛАВА 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ

### 2.1 Стенд для исследования внутренней аэродинамики моделей вихревых камер сгорания

Экспериментальные исследования внутренней аэродинамики вихревых камер сгорания пылеугольных котлов выполнены в изотермических условиях на ряде моделей, изготовленных из прозрачного оргстекла для проведения оптических измерений.

На рисунке 2.1 представлены схемы моделей секций вихревых топок с горизонтальной осью вращения потока: (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. Основными элементами моделей являются: камера, имеющая форму, близкую к цилиндрической; основные сопла и сопла подачи вторичного воздуха, обеспечивающие распределенный ввод потока; камера охлаждения; газоход. Данные камеры сгорания являются модификациями вихревой топки ЦКТИ, их принципиальным отличием служит распределенный ввод потока в объем. Целью исследования внутренней аэродинамики является обоснование способа управления структурой потока путем регулирования расходов через разные сопла. Помимо чисто научного интереса, результаты могут иметь и практическое значение для устранения выявленных недостатков за счет конструктивных особенностей и задания определенных режимных параметров работы вихревой камеры сгорания.



1 – основные сопла; 2 – сопла вторичного дутья; 3 – камера сгорания;  
4 – камера охлаждения; 5 – газоход

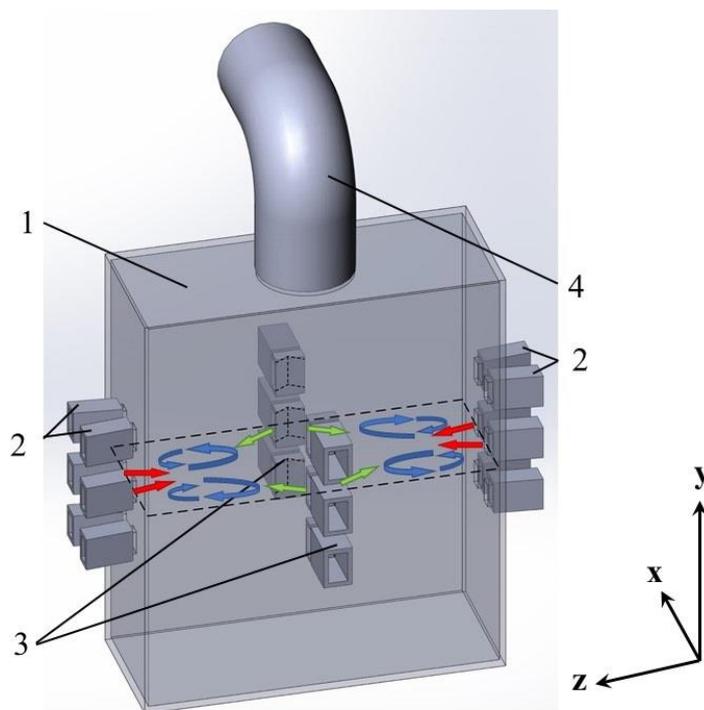
Рисунок 2.1 – Схемы лабораторных моделей секций вихревых топков с горизонтальной осью вращения потока: (а) камера сгорания с наклонными основными соплами и горизонтальными соплами вторичного дутья; (б) камера сгорания с вертикальными основными соплами и горизонтальными соплами вторичного дутья; (в) камера сгорания с наклонными основными соплами и вертикальными соплами вторичного дутья

Модели изготовлены в масштабе 1:25 относительно прототипа, характерный диаметр камеры сгорания 300 мм. Значение числа Рейнольдса, рассчитанное по диаметру вихревой камеры и скорости потока на выходе из сопла  $Re > 10^5$ , лежит в диапазоне, который обеспечивает режим автомодельности потока [63]. Таким образом, структура турбулентного закрученного потока в моделях вихревых топков подобна структуре течения в полноразмерной топке при изотермических условиях. При горении скорость потока возрастает (в основном за счет теплового расширения), что приводит к количественным отличиям от характеристик изотермического течения, однако основные качественные особенности внутренней аэродинамики топки

сохраняются [64], что позволяет переносить результаты изотермического моделирования на случай реагирующего потока.

На рисунке 2.2 представлена схема модели усовершенствованной четырехвихревой камеры сгорания, прототипом которой служат модернизированные топки котлов БКЗ-640-140ПТ Гусиноозерской ГРЭС и БКЗ-320-140 ст. № 18 Красноярской ТЭЦ-1. Модель изготовлена из прозрачного оргстекла в масштабе 1:25 (внутренние размеры 290x880x730 мм, здесь и далее указаны размеры для исследуемой модели). Топка представляет собой прямоугольную камеру сгорания, которая изначально была разработана для факельного сжигания топлива через прямоочные фронтальные сопла. Для перехода на вихревое сжигание на боковых стенках топки в три яруса установлены по два диагонально направленных сопла (соответствующие горелочным амбразурам, размеры 28x50 мм) под углом  $6^\circ$  так, что их оси ориентированы горизонтально и направлены к центральной вертикальной оси топки. Такое направление потоков обеспечивает интенсивное перемешивание и воспламенение подаваемой смеси. Фронтальные сопла (соответствующие подаче вторичного воздуха, размеры 23x66 мм) также установлены в три яруса на передней и задней стенках (на той же высоте, что и боковые сопла). Исходящие из них потоки ориентированы к боковым стенкам под углом  $20^\circ$ . Взаимодействие с потоками, подаваемыми через боковые сопла, обеспечивает закрутку потока в камере сгорания, а также интенсивное омывание фронтальных стенок для предотвращения шлакования. Размеры сопел выбраны из соображения подобия лабораторной модели полноразмерным топкам. Средний ярус сопел располагается на полувысоте камеры сгорания. Основным отличием усовершенствованной конструкции (модели) от прототипов (топок котлов БКЗ-640-140ПТ Гусиноозерской ГРЭС или БКЗ-320-140 ст. № 18 Красноярской ТЭЦ-1) является симметричное расположение фронтальных горелок. Сопла подачи третичного воздуха, установленные в такой топке на

задней стенке, заменены соплами подачи вторичного воздуха, симметрично соплам, установленным на передней стенке. Таким образом, за счет симметрии камеры сгорания создаются предпосылки для формирования регулярной вихревой структуры потока.

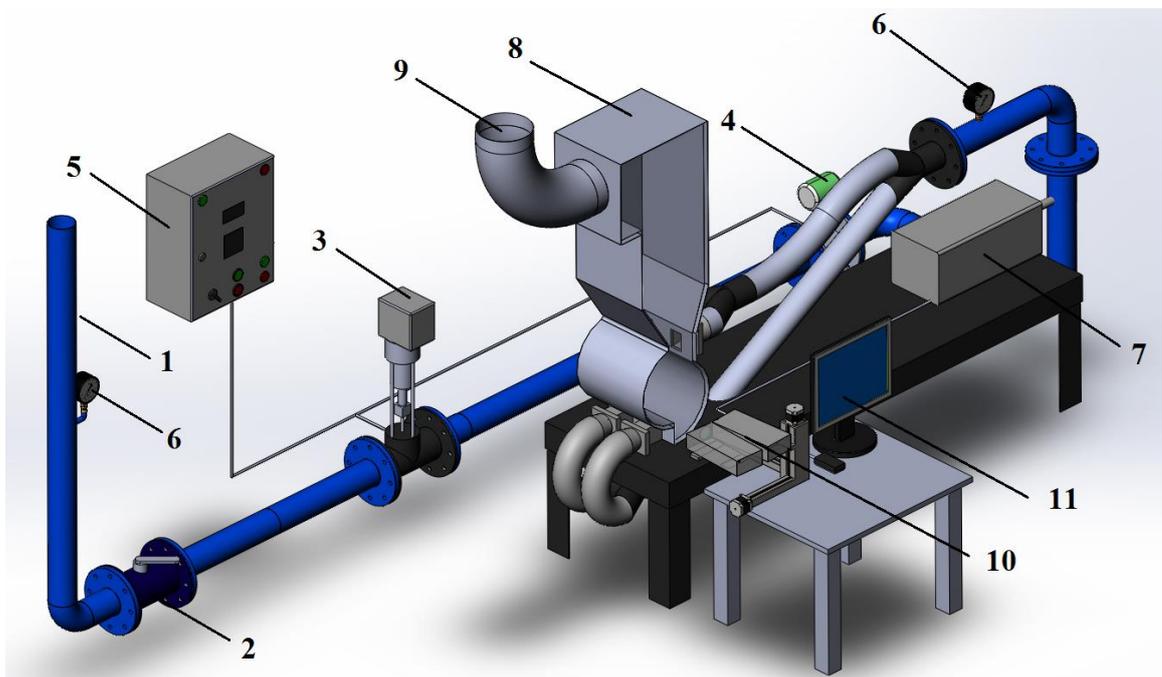


1 – камера сгорания; 2 – боковые сопла; 3 – фронтальные сопла;  
4 – вентиляция

Рисунок 2.2 – Схема лабораторной модели усовершенствованной четырехвихревой камеры сгорания. Стрелками показаны направления потоков и формируемые вихревые структуры

Измерения проводились на экспериментальном стенде ИТ СО РАН для исследования аэродинамики и процессов смешения в моделях энергетического оборудования. Схема стенда представлена на рисунке 2.3. Основными элементами стенда являются: автоматизированный комплекс контроля и регулирования подачи сжатого воздуха; модель вихревой камеры сгорания; устройство засева потока трассерами (генератор дыма

MartinMagnum 1800); контрольно-измерительные приборы; вентиляционный газоход. Система подачи сжатого воздуха позволяла создавать поток со скоростью до 20 м/с на входе в объем камеры сгорания. Поток сжатого воздуха (1) из магистрали по системе трубопроводов подается в модель вихревой камеры сгорания (8) через шаровый кран (2) и запорно-регулирующий клапан с электроприводом (3), сигнал от преобразователя расхода вихревого типа (4) поступает в блок автоматики (5), управляющий клапаном (3) и обеспечивающий автоматическое поддержание заданного расхода воздуха (с погрешностью не более 1 %). Давление контролируется манометрами (6). До входа в модель через отверстие в трубопроводе к потоку воздуха примешиваются трассеры – создаваемые дымогенератором (7) микрокапли специальной жидкости на основе глицерина.



1 – магистраль подачи сжатого воздуха; 2 – запорный кран; 3 – запорно-регулирующий клапан с электроприводом; 4 – преобразователь расхода; 5 – шкаф управления; 6 – манометры; 7 – дымогенератор; 8 – модель вихревой камеры сгорания; 9 – вентиляция; 10 – измерительная система; 11 – компьютер

Рисунок 2.3 – Схема экспериментального стенда

Подача трассеров осуществлялась через трубу Вентури, установленную в канал основного потока до входа в модель. Их концентрация регулировалась уровнем мощности дымогенератора. Малая инерционность микрокапель (характерный размер 1–5 мкм) обеспечивает соответствие их скорости параметрам потока воздуха. Поток направляется из модели в вентиляционную шахту (9). Разделение потока к верхним и нижним соплам осуществляется распределителем. Диагностика потока осуществляется через плоскую оптически прозрачную торцевую стенку модели (8) измерительной системой (10). Управление экспериментом и сбор данных происходит при помощи компьютера (11).

Оптические измерения проводились с использованием современных бесконтактных методов диагностики потоков: лазерная доплеровская анемометрия (ЛДА) и цифровая трассерная визуализация (Particle Image Velocimetry, PIV).

Для проведения экспериментов с использованием метода ЛДА использовалась лазерно-доплеровская измерительная система ЛАД-06, разработанная в ИТ СО РАН. В составе системы: координатно-перемещающее устройство (КПУ), оптоэлектронный модуль, компьютер со специализированным программным обеспечением. В оптоэлектронном модуле реализована оптическая схема с рассеянием назад, использующая полупроводниковый лазер. В основе метода ЛДА лежит измерение скорости микрочастиц, взвешенных в потоке (трассеры). Лазерный пучок расщепляется акустооптическим модулятором на два пучка, которые пересекаются в потоке и формируют интерференционное поле, имеющее известную периодическую структуру. Его изображение в рассеянном назад свете формируется оптическими элементами на светочувствительной поверхности фотоприемника. Пересекающие интерференционное поле трассеры генерируют оптический сигнал, частота которого прямо пропорциональна их скорости. Концентрация трассеров обеспечивала

регистрацию измерительной системой 300–500 частиц в секунду. Использование данной измерительной системы позволило получить информацию о распределении двух компонент средней скорости и пульсаций скорости в камере сгорания в узлах пространственной решетки с шагом 5 мм по трём направлениям.

Основной вклад в ошибку измерения среднего значения скорости вносят пульсации скорости. Доверительный интервал в относительных величинах, приведенных к измеренной средней скорости потока в данной точке  $\bar{U}$ , выражается формулой:

$$U = \bar{U} \pm \Delta U = \bar{U} \left( 1 \pm \frac{t(\alpha, N)S}{\bar{U}\sqrt{N}} \right), \quad (1)$$

где  $\Delta U$  – погрешность измерения скорости,  $N$  – количество измерений,  $S$  – СКО скорости,  $t(\alpha, N)$  – коэффициент Стьюдента. Автоматизированный эксперимент был спланирован так, чтобы среднее значение скорости в каждой точке определялось на основе не менее 1000 измерений (по  $N = 500$  для каждой компоненты). Для  $\alpha = 0,95$  и  $N > 25$   $t(\alpha, N) \approx 2$ . Отношение стандартного отклонения к среднему значению для каждой точки не превышало  $S/\bar{U} < 0,35$ . Тогда  $\frac{t(\alpha, N)S}{\bar{U}\sqrt{N}} < 0,035$ , и 95-процентный доверительный интервал для каждой точки не превышал 3,5 % от вычисленного локального значения средней скорости.

Метод ЛДА позволяет с высокой точностью и производительностью определять значение осредненных компонент скорости и пульсаций скорости, однако является точечным. Поэтому для изучения пространственной структуры потока (как мгновенной, так и средней) использован двухкомпонентный метод PIV, позволяющий построить векторные поля скорости в заданном сечении модели. Для проведения измерений на основе метода PIV использовалась PIV-система «Полис», которая включает в себя: двойной импульсный Nd:YAG лазер QuantelEVG с

энергией в импульсе 145 мДж; объектив для формирования лазерного ножа; цифровую кросс-корреляционную камеру Видеоскан 4021 с разрешением 2048×2048 пикселей; широкоугольный объектив Nikon 28 mm F/2.8 D; синхронизирующий процессор; персональный компьютер с программным обеспечением ActualFlow.

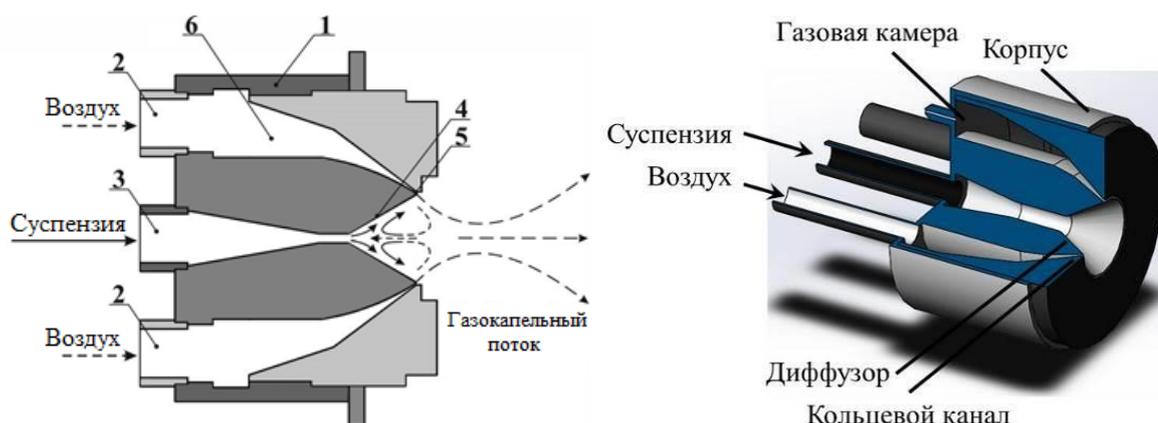
Принцип метода PIV состоит в следующем. Импульсный лазер создает тонкий световой нож и освещает мелкие частицы (трассеры), взвешенные в исследуемом потоке. Положения трассеров в моменты двух последовательных вспышек лазера регистрируются на два кадра цифровой камеры. Локальная скорость потока определяется расчетом перемещений частиц за время между вспышками лазера. Определение перемещения основано на применении корреляционных методов к трассерным картинкам с использованием регулярного разбиения на элементарные подобласти. Варьирование времени задержки между вспышками лазера позволяет измерять скорость в диапазоне от долей миллиметра в секунду до сверхзвуковых значений. Вклад в погрешность PIV-измерений вносит целый ряд факторов: локальный градиент скорости, относительное перемещение трассеров, разрядность цифровой камеры, фоновые шумы, реальный размер трассеров и их размер на изображении, концентрация трассеров и т.д. Анализ влияния этих факторов приведен в [65]. Соблюдение рекомендаций при проведении экспериментов позволяет обеспечить погрешность измерений на уровне не более 10-15%.

Для визуализации вихревого ядра потока с использованием критериев визуализации вихревых структур ( $\lambda_2$ ,  $Q$  и «минимума полного давления») [66, 67] применялась доукомплектованная до трехкомпонентной конфигурации система ЛАД-056, использующая два регистрирующих блока, установленных под заданным углом друг к другу. В результате компьютерной обработки производится восстановление информации о распределении трех компонент скорости в исследуемой области.

Для определения возможных периодических колебаний вихревого течения (прецессии вихревого ядра потока) проведены измерения пульсаций давления при помощи анализатора пульсаций Bruel&Kjaer (давление до 103,5 кПа, частота измерений 4 Гц – 20 кГц, чувствительность 54,9 мВ/Па) аналогично [68]. Измерения проведены при различных значениях полного расхода, соответствующих заданной скорости на выходе из сопел в диапазоне 1-20 м/с для различных моделей. Датчик помещался в измерительный объем при помощи отборника – тонкостенной металлической трубки диаметром 2,2 мм и длиной 160 мм. Передаточная функция отборника представлена в работе [69], где показана его применимость без корректировки до частот  $\sim 100$  Гц. Измерения проводились вблизи условного центра вихревой камеры при различных режимных параметрах. Сигнал обрабатывался с помощью АЦП (L-CARD E14-440) и раскладывался в спектр с использованием быстрого преобразования Фурье.

## **2.2 Стенд для исследования характеристик газочапельного потока при распылении водоугольной суспензии**

В ИТ СО РАН разработана пневматическая вихревая форсунка [70] для распыления водоугольной суспензии, основанная на использовании свойств пристенных и кумулятивных струй и эффекта Коанда. Её конструкция удовлетворяет требованиям, предъявляемым к устройствам для распыления ВУС. Схематично устройство форсунки показано на рисунке 2.4.



1 – корпус; 2 – патрубок для подачи газа; 3 – труба для подачи жидкости (водоугольной суспензии); 4 – диффузорное сопло; 5 – кольцевое газовое сопло (ширина 0,8 мм, диаметр 28 мм); 6 – газовая камера

Рисунок 2.4 – Схема пневматической вихревой форсунки

Струя газа, истекающая из конического щелевого сопла (6), образует за пределами форсунки сходящийся струйный кольцевой газовый поток. В результате конвергенции конической струи образуется течение вдоль оси форсунки в прямом направлении, и формируется высокоскоростная возвратная струя типа кумулятивной. Подача под напором по центральной трубе (3) жидкого топлива приводит к формированию струи, истекающей из горловины диффузорного сопла (4). Благодаря эффекту Коанда, поток жидкости отклоняется к стенкам диффузорного сопла (4) и растекается вдоль них тонким слоем. Нарушению целостности струи жидкости способствует высокоскоростная возвратная струя газа. Наряду с эффектом Коанда, это приводит к равномерному распределению жидкости по стенкам диффузора в виде тонкой пленки. При этом возвратная газовая струя после соударения с жидкостью еще раз изменяет свое направление на противоположное, растекается вдоль стенок диффузора и ускоряет поток жидкости. Внутри конуса в потоке газа формируется тороидальный вихрь. В результате взаимодействия потоков газа и жидкости на выходе из диффузора образуется мелкодисперсный газокапельный поток. Часть мелких капель жидкости

попадает в возвратную газовую струю. При этом увеличивается средняя плотность возвратного потока по сравнению с чистым газом, и эффективность разрушения концентрированной струи жидкости возрастает.

Эффективность работы данной форсунки определяется организацией аэродинамики. Хотя данная форсунка находит применение на промышленных объектах энергетики, тем не менее, отсутствуют достоверные данные о структуре потока, создаваемого данной форсункой в различных режимах эксплуатации. Для обоснования способов управления процессом диспергирования ВУС, в том числе для получения зависимостей угла раскрытия струи (факела) и дисперсного состава газочапельного потока от режимных параметров необходимы экспериментальные исследования. Полученные данные востребованы для верификации математических моделей диспергирования. В рамках диссертационной работы проведено экспериментальное исследование структуры газочапельного потока при его истечении из пневматической вихревой форсунки при различных режимных параметрах.

Структура газочапельного потока исследована на экспериментальном стенде (схема которого представлена на рисунке 2.5), оснащенном измерительной системой на основе метода PIV (см. раздел 2.1). Методика проведения эксперимента заключалась в следующем. Поток сжатого воздуха подается из магистрали через регулятор расхода, давление контролируется манометром. С использованием компрессора через сопло Ласкина в поток подмешиваются трассеры. Воздух поступает в газовую камеру пневматической форсунки (см. рисунок 2.4). Жидкость подается в форсунку при помощи насоса, расход контролируется ротаметром. При избыточном давлении в кольцевой камере до 6 атм установка позволяет получать на выходе из форсунки турбулентный газочапельный поток со скоростью несущей фазы (воздух) до 500 м/с.

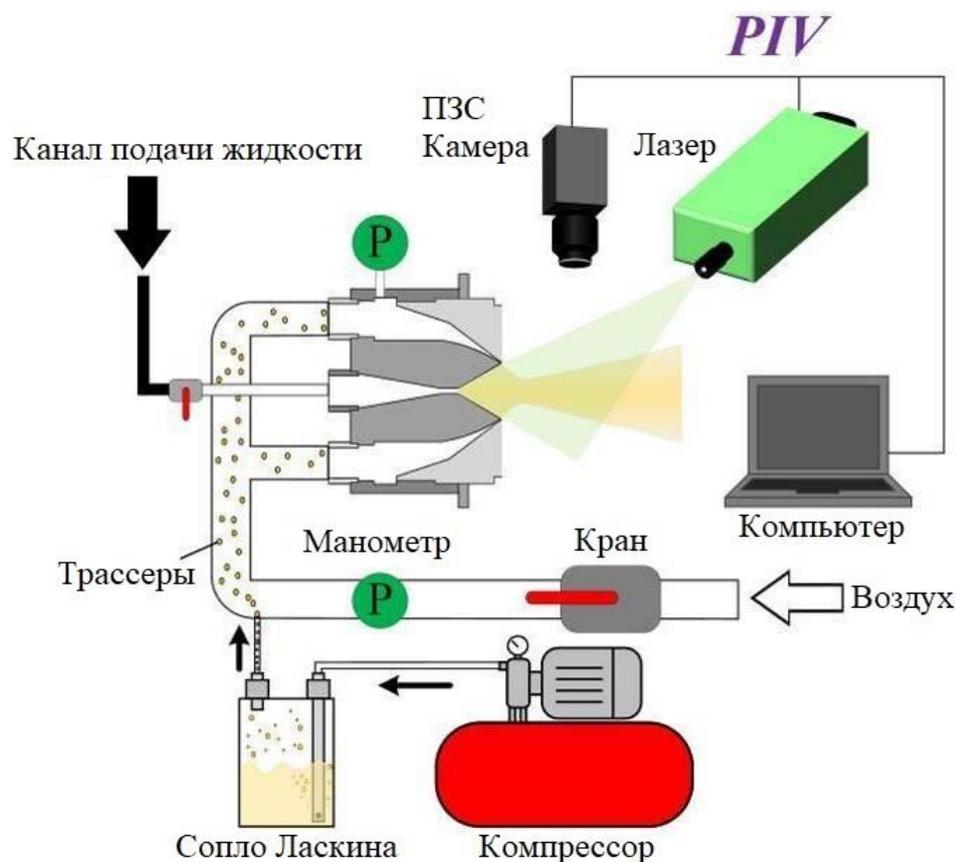
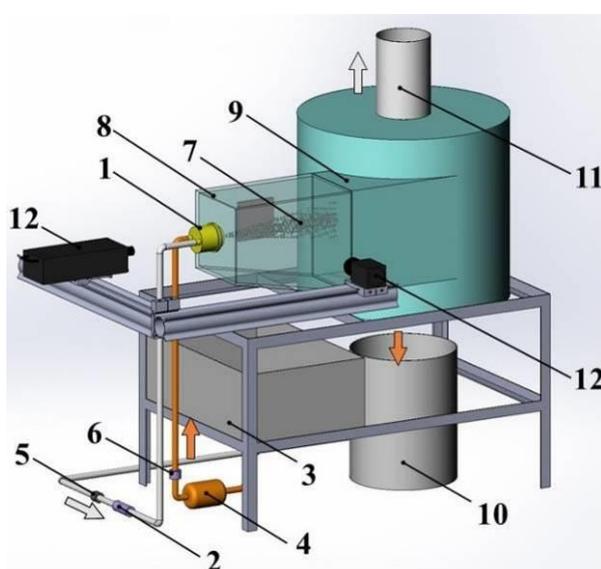


Рисунок 2.5 – Схема экспериментального стенда для исследования методом PIV структуры потока, формируемого пневматической вихревой форсункой

Показатели горения конденсированного топлива в значительной степени зависят от дисперсного состава топливно-воздушной смеси. Для изучения влияния режимных параметров работы пневматической вихревой форсунки на характеристики газочапельного потока при распылении ВУС проведены экспериментальные исследования дисперсного состава и структуры газочапельного потока на установке, показанной на рисунке 2.6. Установка работает следующим образом. Поток сжатого воздуха в форсунку (1) подается из магистрали через измеритель расхода (2). Избыточное давление воздуха ( $p$ ) в форсунке (1) контролируется манометром. Жидкость подается в центральный канал форсунки (1) из хранилища (3) при помощи

насоса (4), расход измеряется расходомером. Расходы воздуха ( $Q_a$ ) и жидкости ( $Q_l$ ) регулируются с помощью кранов (5, 6). Газокапельный поток (7), формируемый в форсунке (1), подается через измерительный участок (8) в систему улавливания жидкости (9). В системе улавливания (9) поток фильтруется с помощью специальных сеток: жидкость стекает в емкость для сбора (10), а воздух поступает в систему вентиляции (11). Установка оснащена измерительной системой (12).



(а)



(б)

1 – пневматическая вихревая форсунка; 2 – измеритель расхода воздуха;  
 3 – ёмкость для хранения свежего ВУС; 4 – дозирующий насос ВУС;  
 5 – игольчатый кран для регулировки 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  
 $\Rightarrow$  – направление потока воздуха,  $\rightarrow$  – направление потока ВУС

Рисунок 2.6 – Экспериментальная установка: (а) схема; (б) фото

Для исследования характеристик распыления и горения ВУС использовалась суспензия, приготовленная следующим образом. Каменный

уголь (длиннопламенный бурый уголь марки Д Кузнецкого бассейна) был перемолот с использованием дезинтегратора до размеров частиц 10-150 мкм. Полученный угольный порошок перемешивался с водой в пропорциях 55:45 (по массе). Полученная смесь подвергалась обработке в механическом кавитаторе с целью дополнительного измельчения угольных частиц и получения однородной суспензии. После кавитационной обработки проведена микроскопическая визуализация полученной суспензии с использованием инвертированного оптического микроскопа Zeiss Axio Observer.Z1 с объективом 40x/NA = 0.5 в проходящем свете. Регистрация изображений проводилась цифровой КМОП камерой с разрешением 1,3 МПикс. Пространственное разрешение составило 0,323 мкм/пиксель.

Для измерения дисперсного состава и структуры газочапельного потока применялся теневой метод (Shadow Photography, SP), основанный на регистрации объекта, имеющего коэффициент преломления, отличный от окружающей среды [71]. За исследуемым объектом (относительно камеры) располагается диффузный источник света с равномерным пространственным распределением интенсивности. Плоскость фокусировки объектива камеры находится в непосредственной близости к объекту исследования – для получения наибольшей четкости теневой фотографии. Цифровой анализ теневого изображения позволяет определить положение и границу объекта. Данный метод позволяет измерять размеры частиц в диапазоне 10–1000 мкм.

С использованием скоростной съемки проведена визуализация процесса дробления ВУС на выходе из форсунки. Для этого была использована видеокамера Photron FASTCAM Nova S12 type 1000K-M-32GB, которая позволяет регистрировать изображения с частотой до 1 МГц при экспозиции от 0,2 мкс и разрешении до 1 МПкс. На камеру был установлен макроскопический объектив Tamron SP AF 180 mm, размер регистрируемой области составлял 50×50 мм.

Для проведения экспериментов использовался измерительный комплекс «Полис», включающий в себя: CCD камеру ImperX B6620 (разрешение 6600×4400 пикс, частота съемки 1 Гц) и макрообъектив Tamron SP AF с фокусным расстоянием 180 мм, что позволяло проводить измерения с хорошим пространственным разрешением (увеличение 1:1). В качестве источника света использовался фоновый экран с люминесцентным покрытием на основе родамина, предварительно освещаемый расфокусированным лучом импульсного лазера Nd:YAG QuanteLEVG (длина волны – 532 нм, энергия в импульсе – до 145 мДж, длительность импульса – 10 нс). Для повышения контрастности теневой фотографии использовался пороговый светофильтр (560 нм), полоса пропускания которого соответствует длине волны света, переизлучаемого родамином. Основным источником ошибки измерения диаметра капель методом SP является погрешность определения границы образа капли при цифровой обработке, которая оценивается на уровне 0,5 пикс, что соответствует 3,6 мкм при имеющемся оптическом увеличении.

Для цифровой обработки полученных теневых изображений использовался алгоритм «Bubbles Identification», реализованный в программном обеспечении ActualFlow, включающий в себя: алгоритм высокочастотной (high-pass) фильтрации с целью выделения границ образов зарегистрированных на изображении объектов; алгоритм бинаризации по пороговому значению; алгоритм определения положения и диаметра сферических капель. Для каждого исследованного режима была проведена серия по 100 измерений. При обработке учитывалось суммарное распределение частиц по всем изображениям, нормированное на общее количество идентифицированных частиц.

## **ГЛАВА 3 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

### **3.1. Структура потока в моделях вихревых камер сгорания**

В настоящем разделе изложены результаты экспериментального исследования внутренней аэродинамики представленных в разделе 2.1 изотермических моделей усовершенствованных вихревых камер сгорания пылеугольных котлов с обоснованием способов управления структурой закрученного потока за счет выбора режимных параметров при распределенном вводе потока в объем камеры сгорания.

В подразделах 3.1.1-3.1.3 представлены результаты исследований для модификаций конструкции вихревой топки ЦКТИ, различающихся расположением основных сопел и сопел вторичного дутья. Рассмотрены принципиальные возможности устранения негативных факторов, связанных с проявлением эффекта Коанда, формированием застойных зон и выносом недогоревших частиц из камеры сгорания. В подразделе 3.1.4 приведены результаты для модели усовершенствованной четырехвихревой камеры сгорания, проанализированы условия формирования регулярной структуры потока, обеспечивающей на практике снижение неконтролируемого шлакования поверхностей.

#### **3.1.1 Топка с наклонными основными соплами и горизонтальными соплами вторичного дутья**

Схема секции модифицированной вихревой топки ЦКТИ с применением дополнительных горизонтальных сопел вторичного дутья для обеспечения распределенного ввода потока показана на рисунке 2.1-а.

В экспериментах задавались следующие входные условия: рабочая среда – сжатый воздух; скорость воздуха на выходе из сопла 5–20 м/с. Размер

сопла на входе в камеру сгорания  $40 \times 50$  мм. Угол наклона оси верхней горелки (основное сопло) к горизонту (плоскости  $XZ$ ) составляет  $\beta = 15^\circ$ , а ось нижней горелки (сопло вторичного дутья) расположена горизонтально. Для ослабления негативных для практики эффектов отношение ширины горловины диффузора к диаметру камеры сгорания уменьшено до 0,4. Отношение расходов через верхние и нижние горелки ( $\gamma = V_0/V_1$ , где  $V_0$  и  $V_1$  – среднерасходное значение скорости на выходе из основных и вторичных сопел, соответственно) варьировалось в интервале от 1 до 3 с использованием расходных шайб различного диаметра.

Измерения методами ЛДА [72–82] и PIV [83–85] проведено в трех вертикальных сечениях: возле фронтальной стенки ( $z = 15$  мм); в сечении, проходящем через центры сопел ( $z = 80$  мм); в плоскости симметрии между соплами ( $z = 150$  мм). На рисунке 3.1 представлены векторные поля осредненной скорости, полученные методом ЛДА в заданных сечениях для значения  $\gamma = 1$  (скорость через верхние и нижние сопла – 15 м/с) [72, 73].

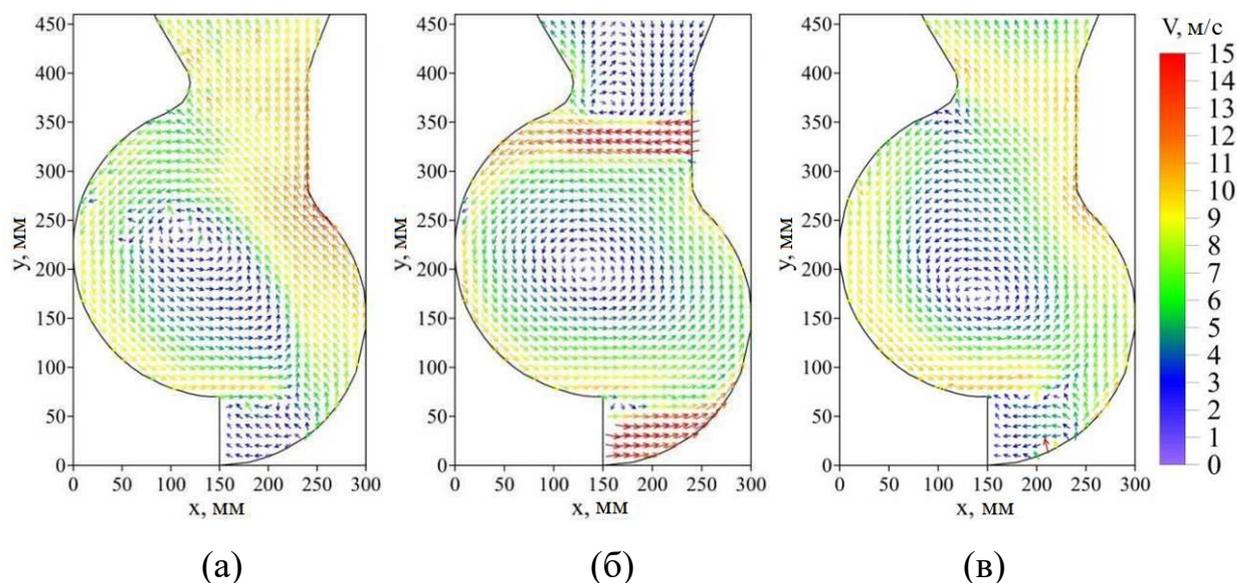


Рисунок 3.1 – Векторное поле осредненной скорости, полученное методом ЛДА в трех вертикальных сечениях: (а) возле фронтальной стенки; (б) по центру сопел; (в) между соплами.  $V_0 = 15$  м/с,  $\gamma = 1$

Результаты визуализации демонстрируют сложную пространственную структуру течения – координаты «центра» вихря зависят от выбора сечения, т.е. от  $z$ , что свидетельствует об искривлении вихревой оси. Струя, истекающая из верхней горелки, снизу подпирается тангенциально входящим потоком. Из-за этого она несущественно отклоняется вверх от исходного направления и натекает на противоположную стенку камеры сгорания, растекается вдоль нее вниз и создает интенсивно закрученное течение, пересекаясь со струей, выходящей из нижней горелки. Поток в виде струи выходит из камеры сгорания через диффузор в плоскости симметрии между горелками, а также вблизи торцевой стенки модели. В области над верхней горелкой имеют место возвратные течения и рециркуляционные зоны, в тоже время в нижней части камеры сгорания располагаются застойные зоны, в которых проекция скорости близка к нулю. Снижается проявление эффекта Коанда, заключающееся в «прилипании» потока к одной из стенок на выходе из камеры сгорания, характерный для топки ЦКТИ. Негативная для практики особенность структуры течения при  $\gamma = 1$  заключается в том, что поток, выходящий из сопла в нижней части камеры, подпирает поток, подаваемый через верхние горелки, что может приводить к частичному выносу несгоревшего топлива из камеры сгорания.

Для анализа влияния распределенного ввода воздуха были проведены измерения при различных значениях параметра  $\gamma$ . На рисунках 3.2 и 3.3 приведены данные, полученные при  $\gamma = 2$  и  $\gamma = 3$ , соответственно. Видно, что при  $V_0$  в диапазоне 15-20 м/с течение с изменением параметра  $\gamma$  остается интенсивно закрученным, но абсолютное значение скорости в некоторых областях значительно изменяется. Анализ результатов, представленных на рисунках 3.1–3.3, показывает, что структура течения существенно зависит от параметра  $\gamma$ .

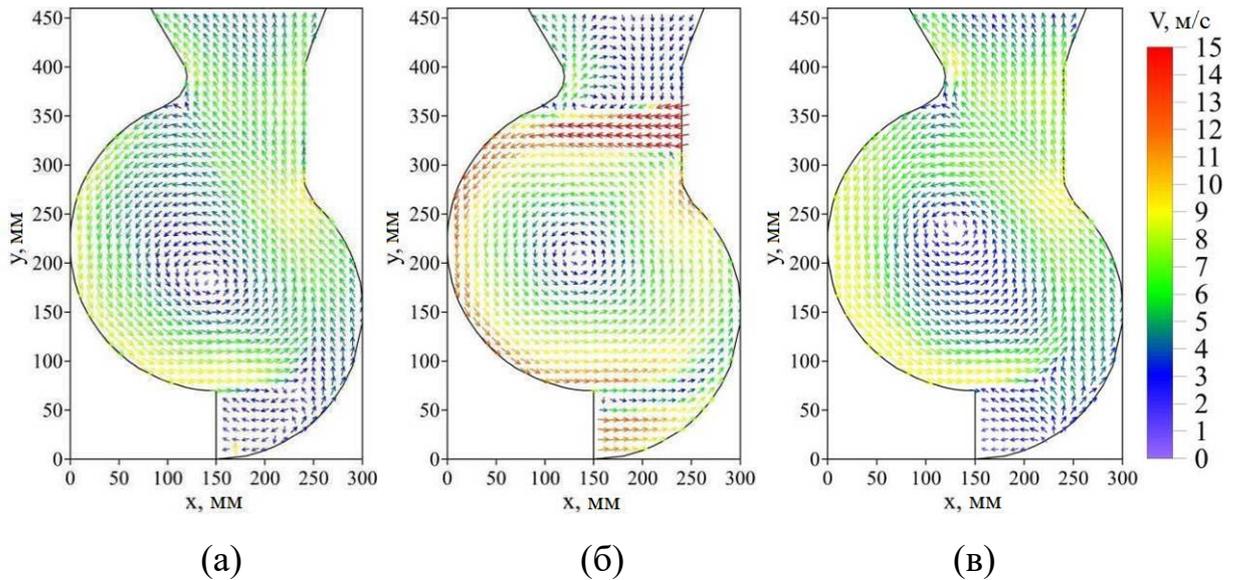


Рисунок 3.2 – Векторное поле осредненной скорости, полученное методом ЛДА в трех вертикальных сечениях: (а) возле фронтальной стенки; (б) по центру сопел; (в) между соплами.  $V_0 = 20$  м/с,  $\gamma = 2$

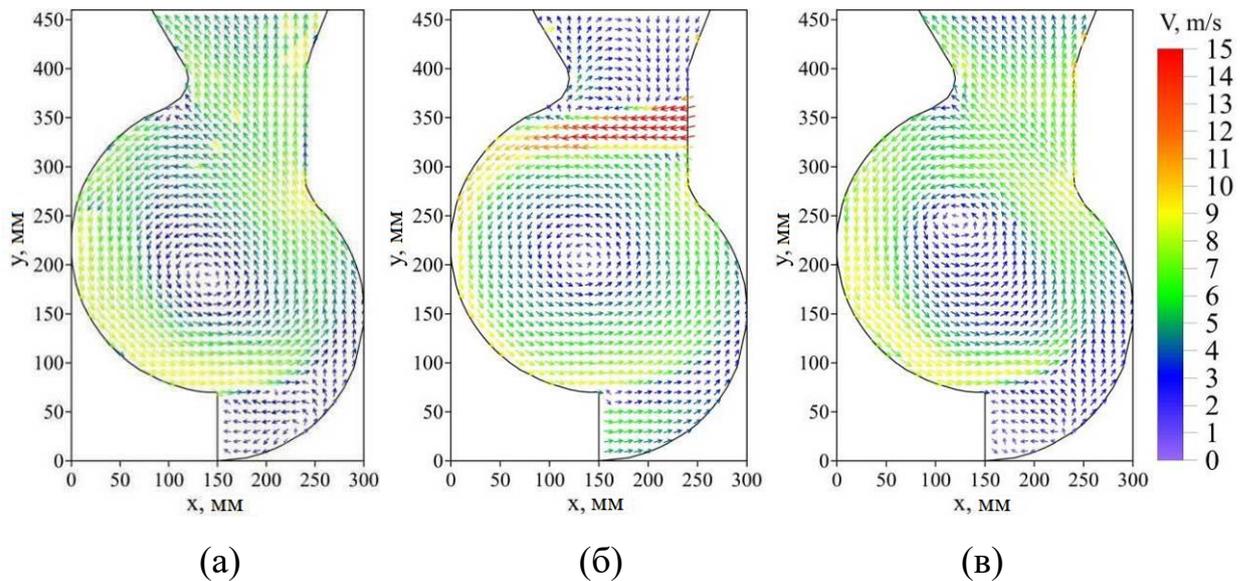


Рисунок 3.3 – Векторное поле осредненной скорости, полученное методом ЛДА в трех вертикальных сечениях: (а) возле фронтальной стенки; (б) по центру сопел; (в) между соплами.  $V_0 = 15$  м/с,  $\gamma = 3$

При  $\gamma = 3$  предотвращается отклонение потока, выходящего из верхних горелок, от своего первоначального направления из-за подпирания потоком, подаваемым через нижние горелки. На практике это способствует

предотвращению выноса части топлива из камеры сгорания, увеличивает время пребывания топлива в камере сгорания и тем самым повышает полноту выгорания топлива. Таким образом, распределенная подача топливовоздушной смеси обеспечивает дополнительные возможности управления структурой течения в камере сгорания за счет выбора отношения расходов через сопла.

На основе обработки результатов ЛДА-измерений получено распределение удельной кинетической энергии турбулентности (КЭТ)  $k_t$  в трехмерном потоке, которая вычислялась по двум измеренным компонентам пульсаций скорости с использованием предположения об изотропности турбулентности, откуда следует выражение для второго момента  $z$ -компоненты пульсаций:

$$\overline{W'^2} = \frac{1}{2}(\overline{U'^2} + \overline{V'^2}) \quad (2)$$

Тогда

$$k_t = \frac{3}{4}(\overline{U'^2} + \overline{V'^2}) \quad (3).$$

На рисунке 3.4 показаны распределения КЭТ, полученные по ЛДА-измерениям  $U'$ ,  $V'$  по вышеприведенной формуле, для режима, при котором  $\gamma = 1$ ,  $V_0 = 15$  м/с. Из рисунка 3.4-а видно, что максимальный уровень КЭТ имеет место вблизи правой стенки модели ( $x = 300$  мм). Это вызвано «размыванием» входной струи, создающей закрутку потока. Высокий уровень КЭТ способствует более эффективному перемешиванию топлива с окислителем. По направлению к левой стенке уровень КЭТ понижается, что, возможно, обусловлено центробежным эффектом при течении вдоль вогнутой стенки. Профиль кинетической энергии турбулентности вдоль центральной вертикальной линии (рисунок 3.4-б) имеет максимум в области входных струй, что связано с их размыванием при входе в камеру сгорания.

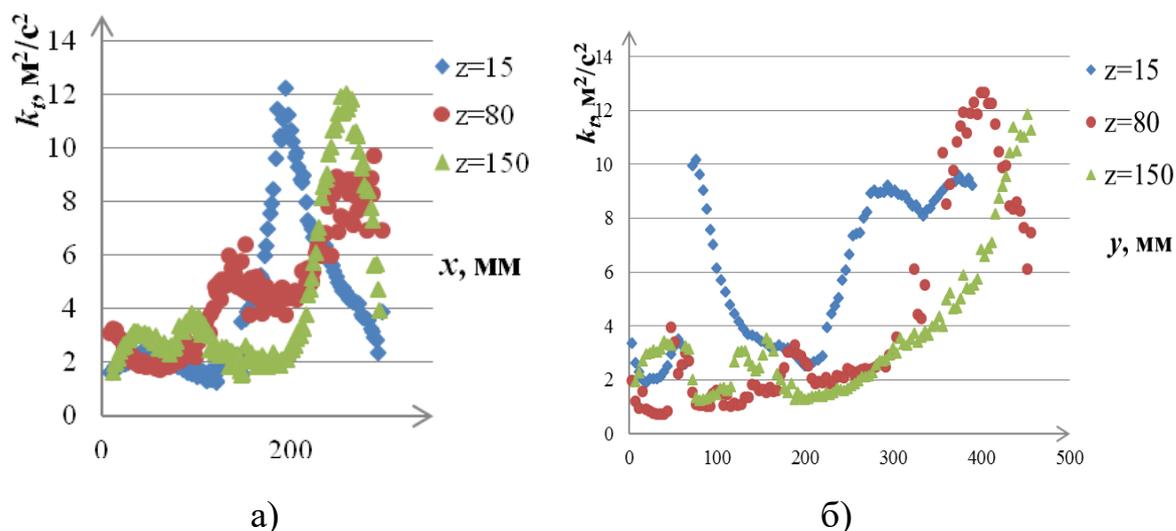


Рисунок 3.4 – Распределение КЭТ при  $\gamma = 1$ ,  $V_0 = 15 \text{ м/с}$   
 в разных сечениях: а) вдоль горизонтальной линии  $y = 185 \text{ мм}$ ;  
 б) вдоль вертикальной линии  $x = 160 \text{ мм}$

Для визуализации вихревого ядра потока с использованием трехкомпонентной системы ЛАД-056 были проведены измерения трех компонент осредненной скорости в области его локализации, определенной по двухкомпонентным измерениям. На рисунке 3.5 представлено векторное поле скорости, построенное по полученным данным для режима, при котором  $\gamma = 1$ ,  $V_0 = 15 \text{ м/с}$ .

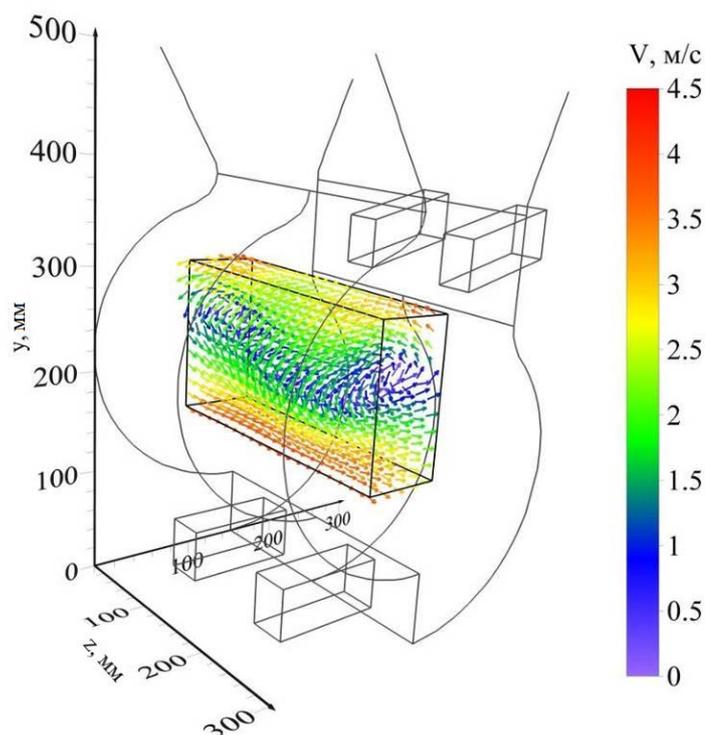


Рисунок 3.5 – Векторное поле скорости, полученное методом 3D-ЛДА  
вблизи оси вихревого потока.  $V_0 = 15$  м/с,  $\gamma = 1$

Наличие информации о трех компонентах скорости позволяет визуализировать вихревое ядро потока с использованием критерия «минимума полного давления». При обработке полученных данных предполагалось, что статическое давление в центральной области вихревого потока изменяется слабо и минимум полного давления определяется динамическим давлением ( $p_{\text{дин}} = \rho u^2/2$ , где  $\rho$ ,  $u$  – плотность и скорость газа, соответственно). На рисунке 3.6 представлены изоповерхности динамического давления [80–82]. Полученные результаты подтверждают, что положение центра вихря зависит от координаты  $z$ . Течение имеет ярко выраженную V-образную форму, что согласуется с результатами численных расчетов [80].

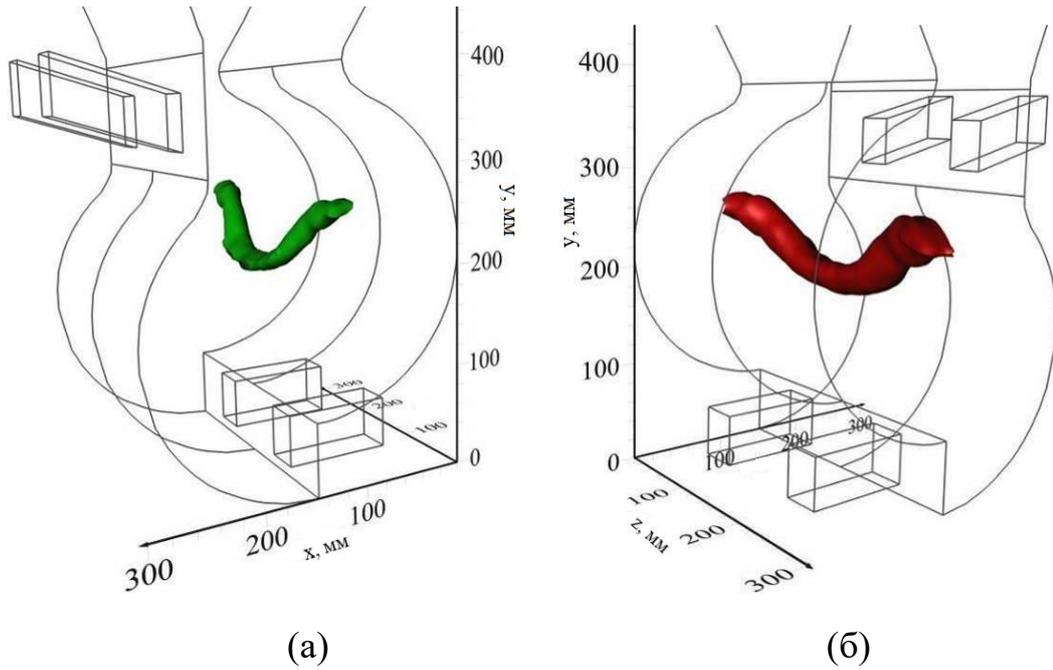


Рисунок 3.6 Изоповерхности динамического давления ( $V_0 = 15$  м/с,  $\gamma = 1$ ):

(а)  $p_{\text{дин}} = 1$  Па; (б)  $p_{\text{дин}} = 2$  Па (показаны разные ракурсы)

Наряду с лазерной доплеровской измерительной системой (ЛДИС), для исследования структуры закрученного течения в модели вихревой топки была использована измерительная PIV-система «Полис». Известно, что основным преимуществом полевых методов является их высокая производительность за счет регистрации поля скорости одновременно во всей измерительной области. На рисунке 3.7 приведены результаты измерений для  $\gamma = 1$  [83–85].

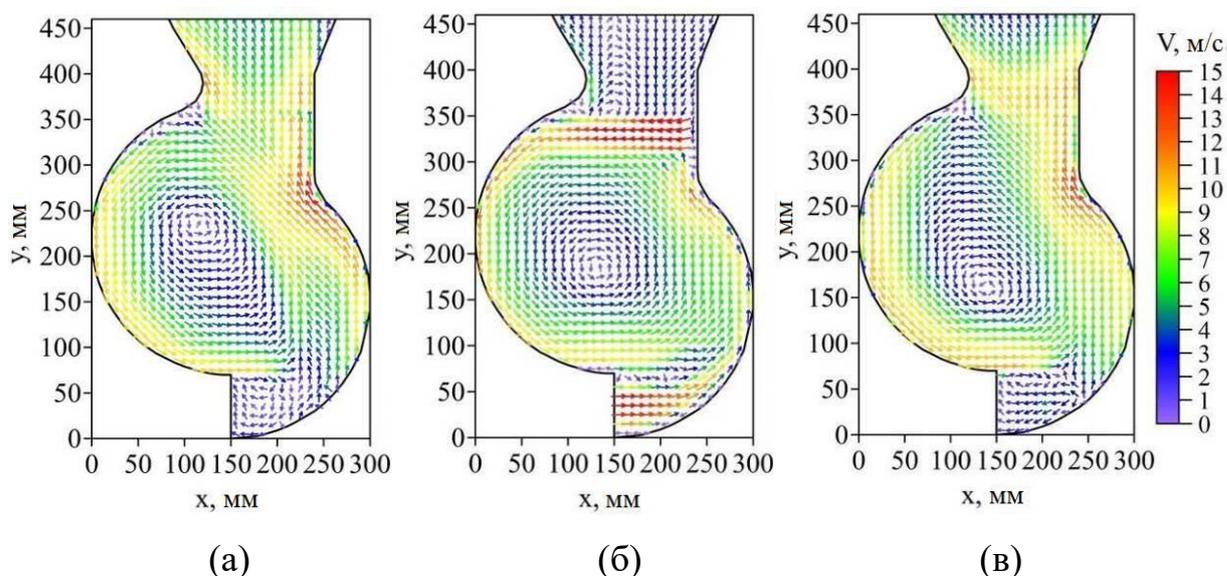


Рисунок 3.7 – Векторное поле осредненной скорости, полученное методом PIV в трех вертикальных сечениях: (а) возле фронтальной стенки; (б) по центру сопел; (в) между соплами.  $V_0 = 15$  м/с,  $\gamma = 1$

На рисунке 3.8 результаты PIV-измерений сопоставлены 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, полученных двумя независимыми оптическими методами диагностики потоков, показывает, что в данном случае метод PIV обеспечивает приемлемую точность и может быть применен для исследования внутренней аэродинамики вихревых камер сгорания.

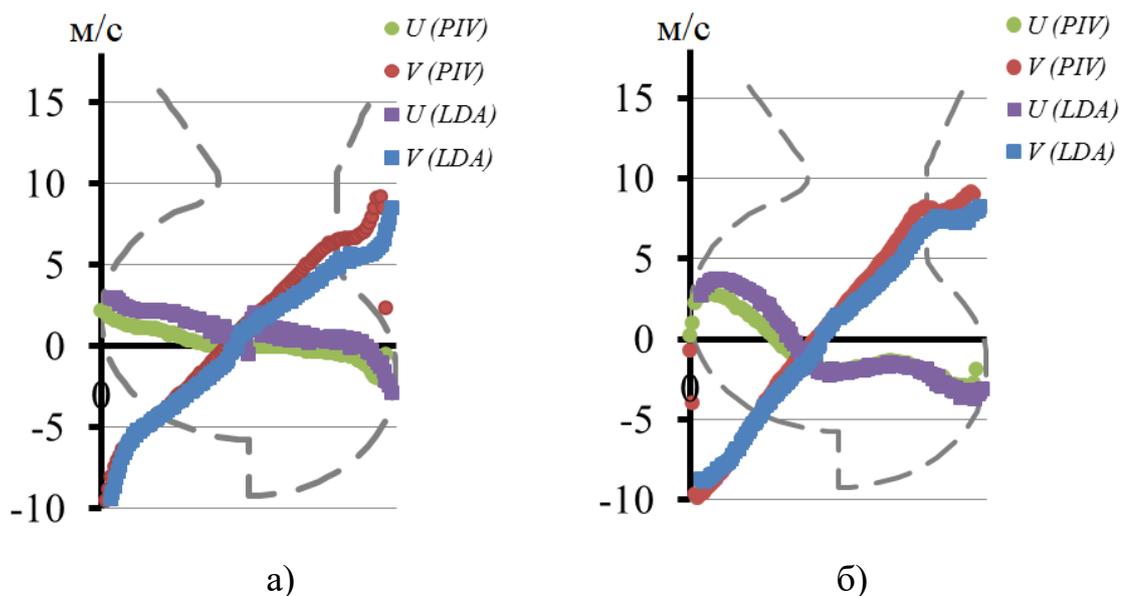


Рисунок 3.8 – Измеренные с помощью методов ЛДА и PIV горизонтальная ( $U$ ) и вертикальная ( $V$ ) компоненты вектора скорости вдоль линии  $y = 185$  мм, проходящей через условный центр камеры сгорания:  
а)  $z = 80$  мм; б)  $z = 150$  мм

Для выявления возможных крупномасштабных колебаний вихревого потока измерены пульсации давления в камере сгорания. Эксперименты проведены при различном расходе воздуха, что означало существенное изменение скорости потока на срезе горелок в диапазоне 5–20 м/с. На рисунке 3.9 приведены спектры пульсаций давления при различном значении скорости входящего потока. В спектрах имеются резонансные 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 (ПВЯ) потока и являются характерными для данной модели как для акустического резонатора. Таким образом, выраженных пиков, которые свидетельствовали бы о существовании периодических колебаний вихревого потока не обнаружено.

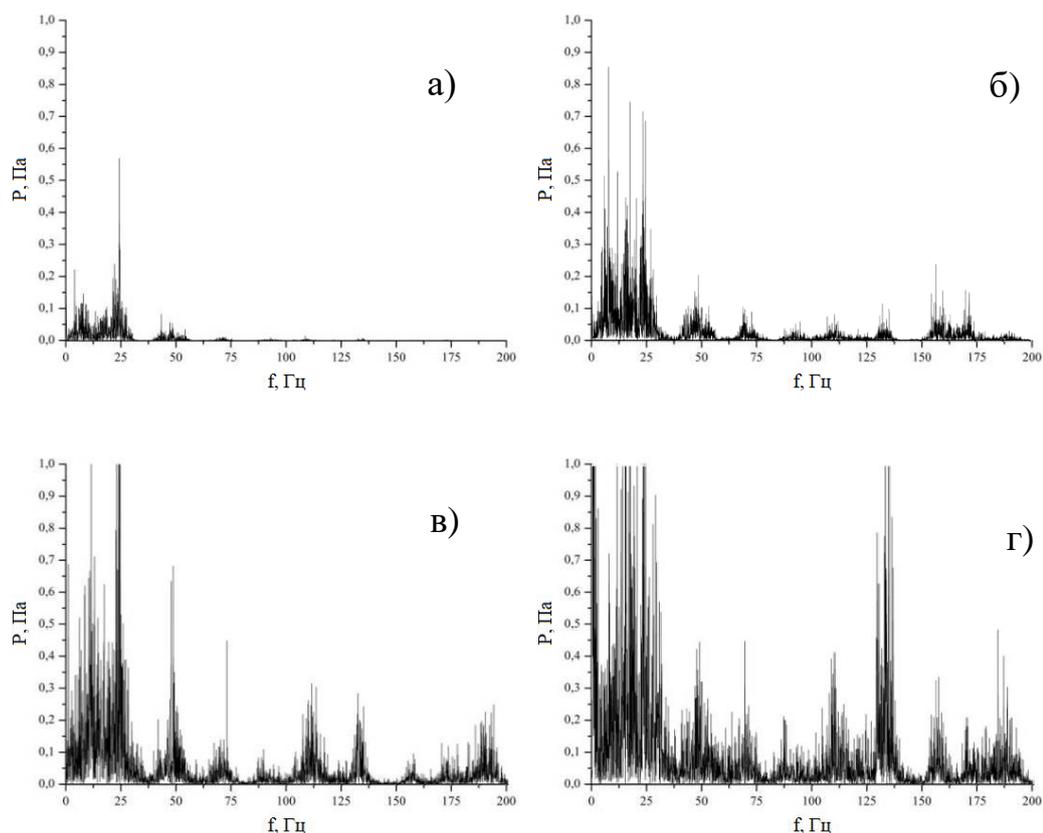


Рисунок 3.9 – Спектры пульсаций давления при различной скорости  $V_0$ :  
 (а) 5 м/с; (б) 10 м/с; (в) 15 м/с; (г) 20 м/с.  $\gamma = 1$

### 3.1.2 Камера сгорания с вертикальными основными соплами и горизонтальными соплами вторичного дутья

Структура потока в модели вихревой камеры сгорания с распределенным вводом потока через вертикальные основные сопла и горизонтальные сопла вторичного дутья (см. рисунок 2.1-б) исследована при помощи метода PIV. На рисунках 3.10 и 3.11 представлены полученные результаты [86].

Из полученных векторных полей скорости видно, что в данной камере сгорания интенсивно закрученное течение не образуется. При различных значениях параметра  $\gamma$  значительная часть потока совершает один неполный оборот в камере сгорания и выходит в камеру охлаждения. Это можно видеть по условным траекториям частиц в потоке (см. рис 3.10-г), построенным как линии, для которых измеренные проекции скорости (рис. 3.10-б) 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 камеры сгорания не перспективна с практической точки зрения.

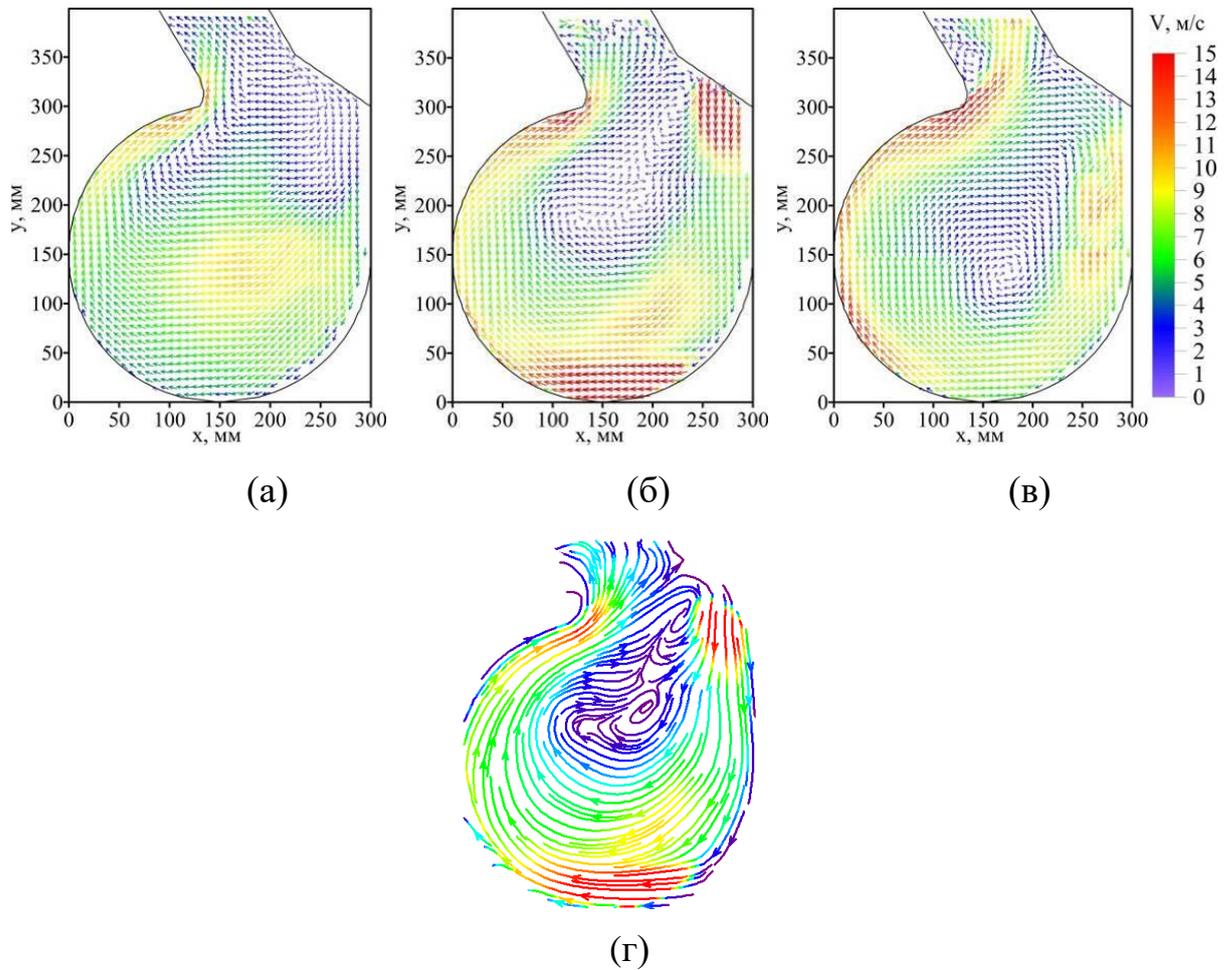


Рисунок 3.10 – Векторное поле осредненной скорости, полученное методом PIV в трех вертикальных сечениях: возле фронтальной стенки (а); по центру сопел (б); между соплами (в). Условные траектории частиц в сечении по центру сопел (г).  $V_0 = 15$  м/с,  $\gamma = 1$

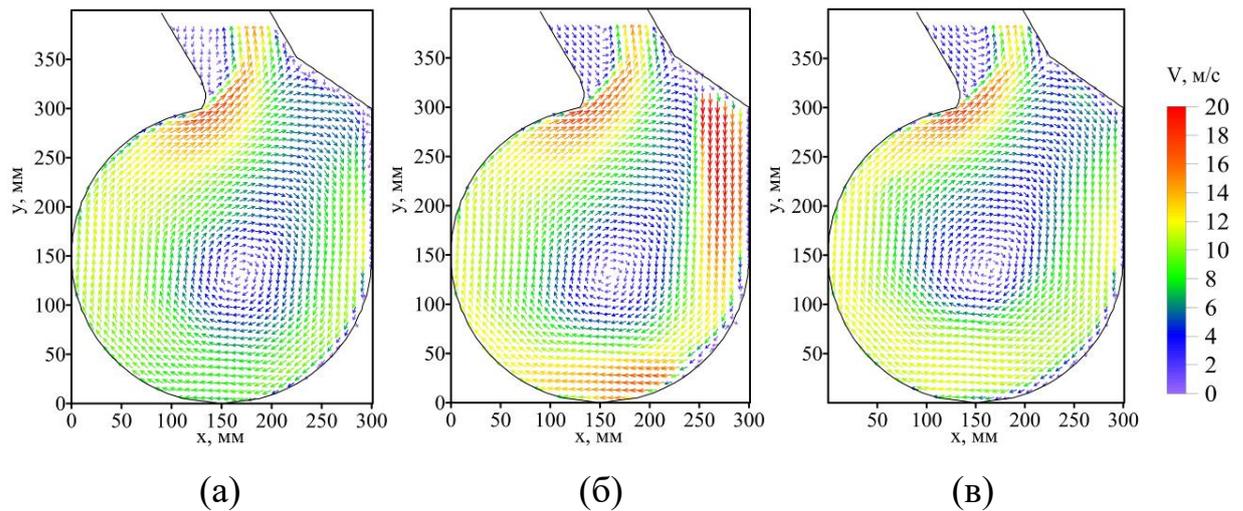


Рисунок 3.11 – Векторное поле осредненной скорости, полученное методом PIV в трех вертикальных сечениях: возле фронтальной стенки (а); по центру сопел (б); между соплами (в).  $V_0 = 20$  м/с,  $\gamma = 2$

### 3.1.3 Камера сгорания с наклонными основными соплами и вертикальными соплами вторичного дутья

Еще одной изученной моделью является конфигурация с вертикальным расположением сопел вторичного дутья (схема представлена на рисунке 2.1-в). Принципиальным отличием предложенной конструкции вихревой топки является вертикальная ориентация вторичных сопел. Наличие данных сопел обеспечивает дополнительную закрутку потока и позволяет управлять структурой закрученного течения внутри камеры сгорания за счет выбора режимных параметров. Новое техническое решение запатентовано [87, Приложение А].

Для этой модели вихревой камеры сгорания при помощи метода PIV в различных режимах получены распределения двух компонент осредненной скорости в трех сечениях: возле фронтальной стенки ( $z = 15$  мм); в сечении, проходящем через центры сопел ( $z = 65$  мм); в плоскости симметрии между соплами ( $z = 125$  мм). На рисунках 3.12–3.14 представлены векторные поля осредненной скорости, построенные по результатам измерений для значений  $\gamma = 1, 2$  и  $3$ , соответственно [88].

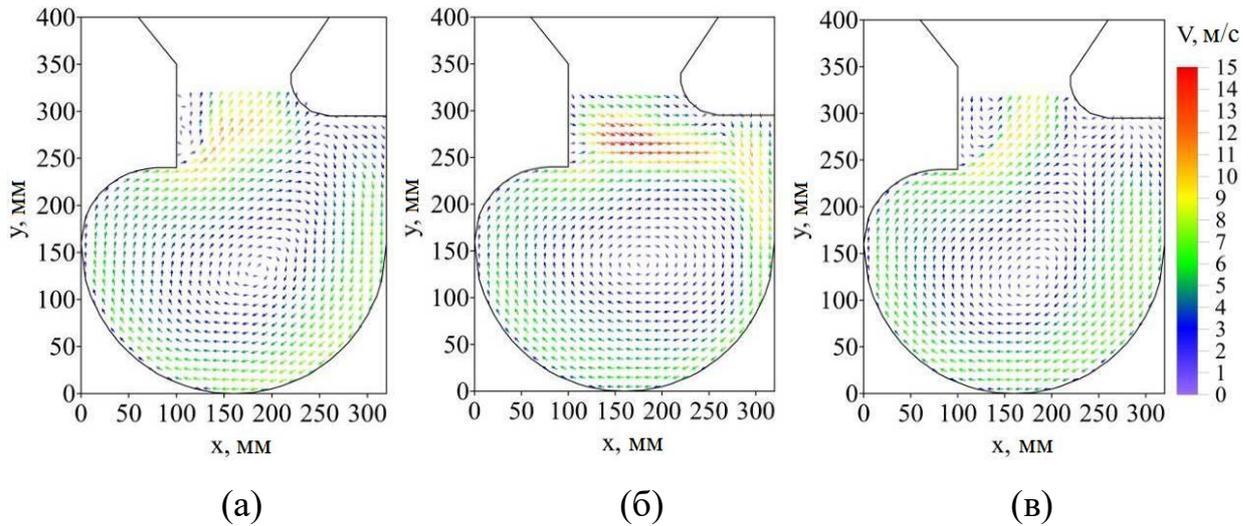


Рисунок 3.12 – Векторное поле осредненной скорости, полученное методом PIV в трех вертикальных сечениях: (а) возле фронтальной стенки; (б) по центру сопел; (в) между соплами.  $V_0 = 15$  м/с,  $\gamma = 1$

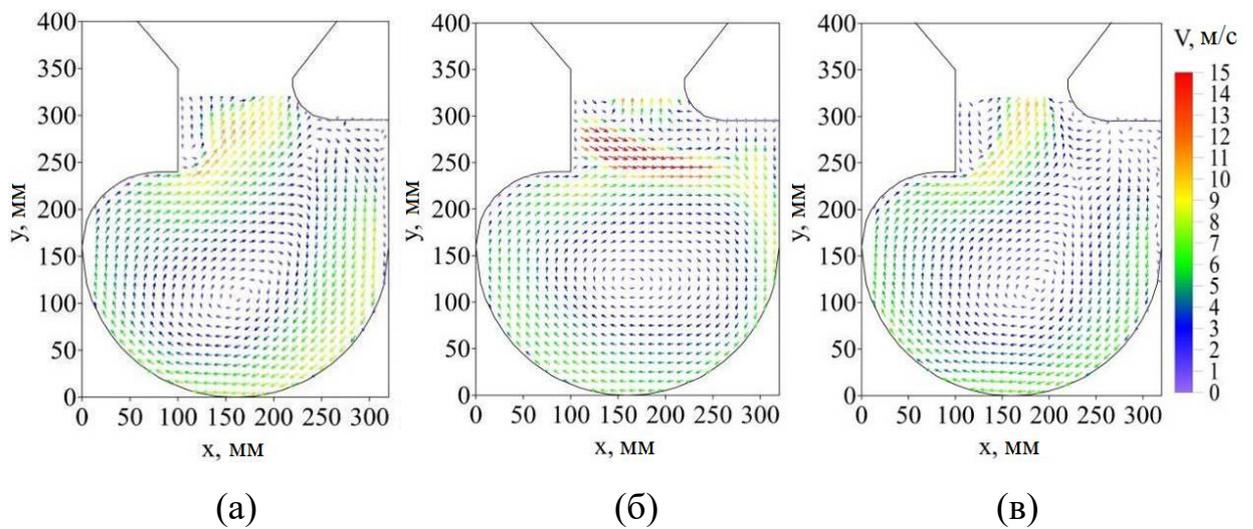


Рисунок 3.13 – Векторное поле осредненной скорости, полученное методом PIV в трех вертикальных сечениях: (а) возле фронтальной стенки; (б) по центру сопел; (в) между соплами.  $V_0 = 20$  м/с,  $\gamma = 2$

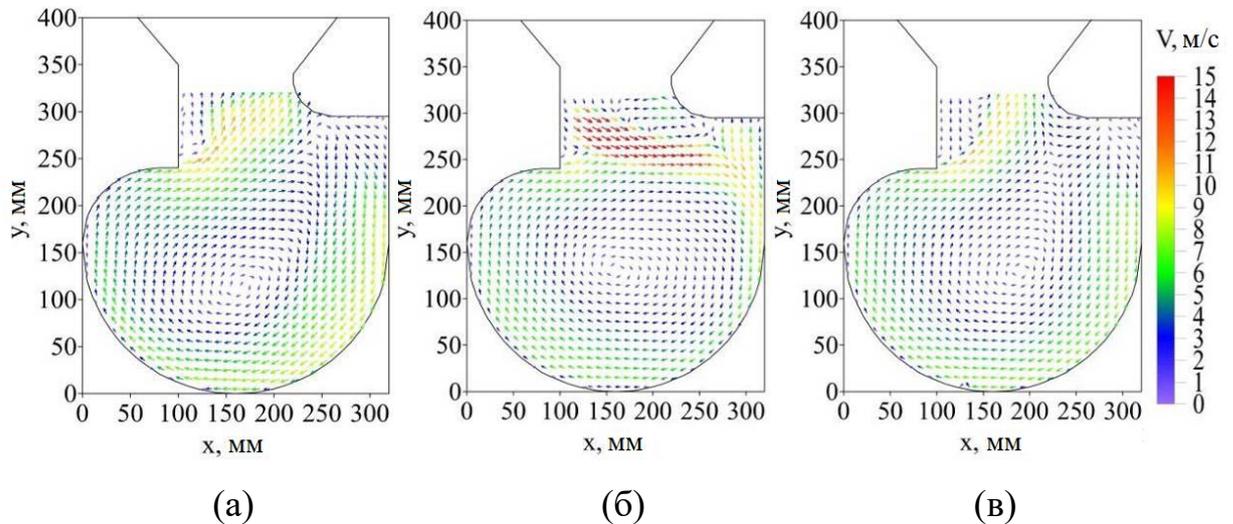


Рисунок 3.14 – Векторное поле осредненной скорости, полученное методом PIV в трех вертикальных сечениях: (а) возле фронтальной стенки; (б) по центру сопел; (в) между соплами.  $V_0 = 22,5$  м/с,  $\gamma = 3$

Результаты демонстрируют интенсивно закрученное течение с многократной циркуляцией потока в камере сгорания. Отклонение основного потока от первоначального направления за счет подпирания вторичным воздухом, характерное для модели с горизонтальным расположением вторичного дутья, отсутствует при всех режимах, что является положительным свойством исследуемой конструкции. Течение обладает сложной пространственной структурой: положение центра вихря зависит от координаты  $z$ . Поэтому особый интерес представляет форма вихревого ядра и его стационарность.

По аналогии с моделью с горизонтальным расположением сопел вторичного дутья проведена визуализация вихревого ядра потока с использованием критерия «минимума полного давления». Данные о распределении трех компонент скорости получены с использованием методов 3D-ЛДА и Stereo-PIV. На рисунке 3.15 представлены изоповерхности динамического давления  $p_{\text{дин}} = 0,25$  Па [89].

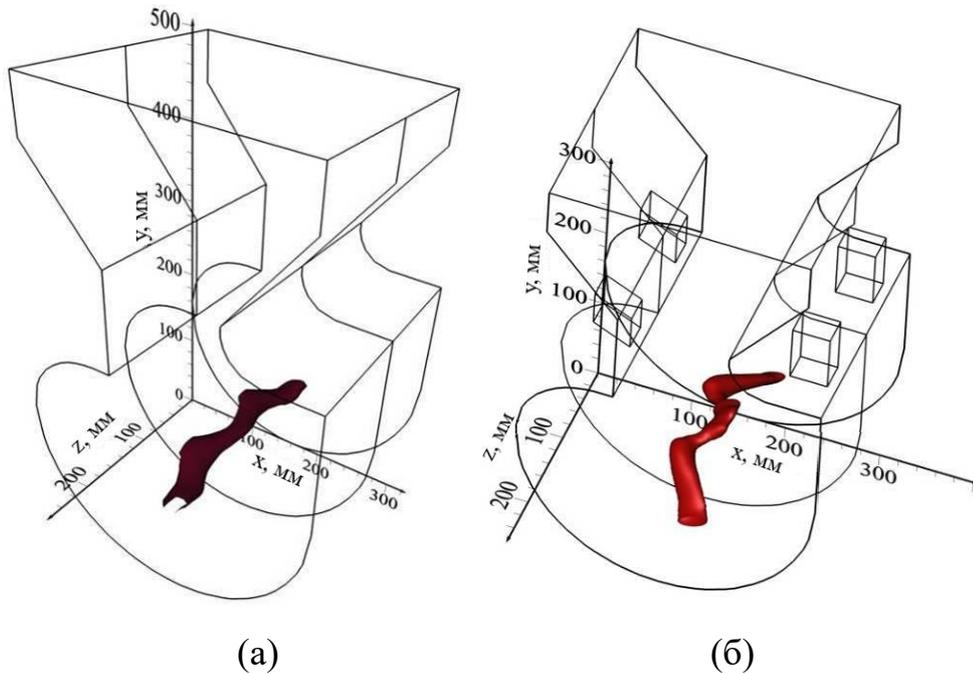


Рисунок 3.15 – Изоповерхность динамического давления, полученная по результатам измерений 3D-ЛДА (а) и Stereo-PIV (б).  $V_0 = 15$  м/с,  $\gamma = 1$

В данной конструкции камеры сгорания вихревое ядро потока имеет специфическую W-образную форму. Для анализа устойчивости проведены исследования пульсаций давления в объеме модели [90–94] представлены на рисунке 3.16. Полученные спектры характеризуются высоким уровнем акустических колебаний. Положения пиков не зависят от значения скорости (расхода), что говорит об отсутствии прецессии вихревого ядра потока, что на практике является важным свойством, гарантирующим стационарность режима работы вихревой топки.



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  $\beta$  характерно для режима работы реального котла.

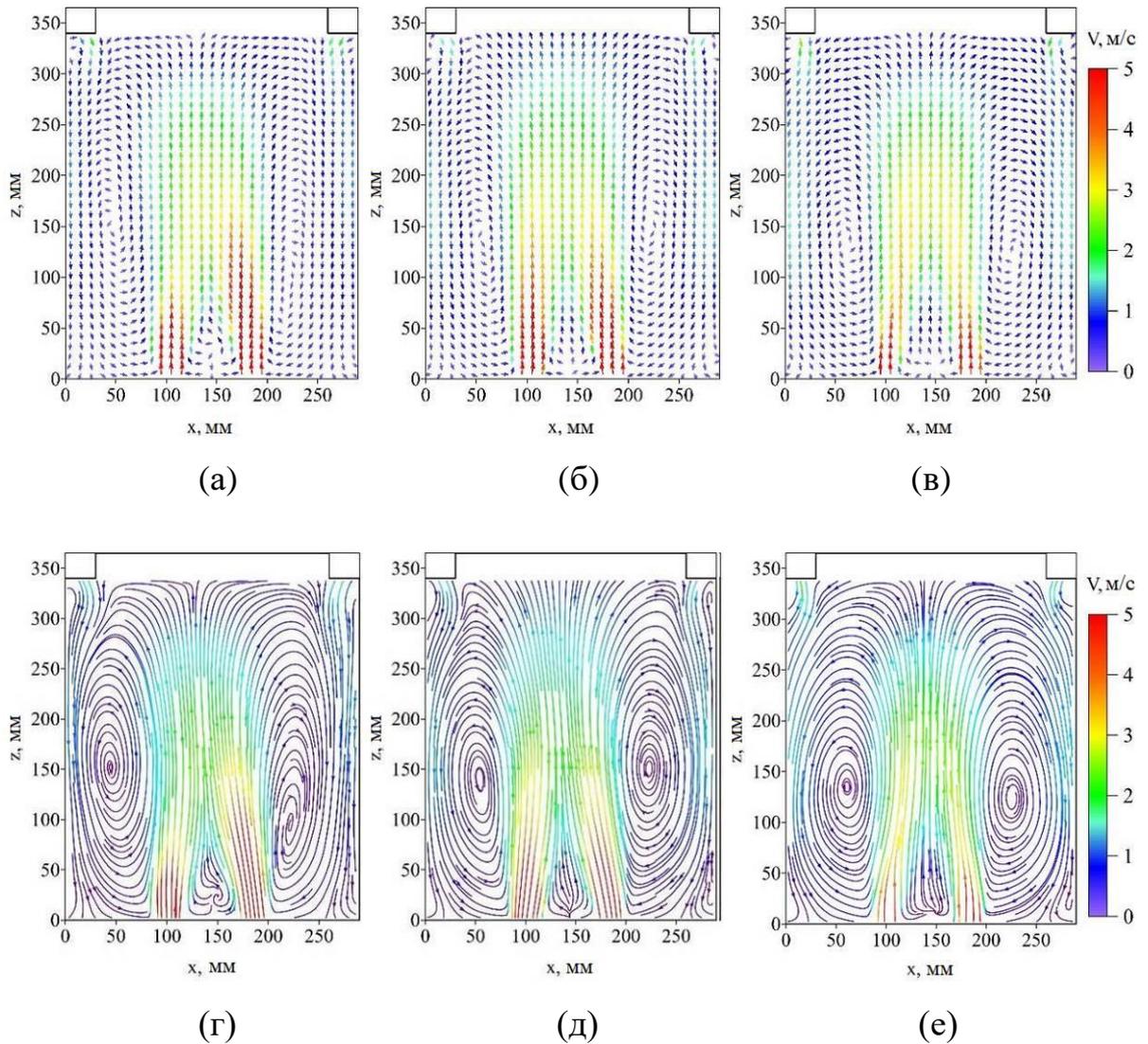


Рисунок 3.17 – Векторное поле скорости (а-в) и соответствующие условные траектории (г-е) при начальном значении скоростей 5 и 1 м/с на выходе из боковых и фронтальных сопел в различных сечениях: (а, г) – нижний ярус; (б, д) – средний ярус; (в, е) – верхний ярус.  $\beta = 5$

Течение характеризуется следующими особенностями. Потоки, выходящие из боковых сопел в направлении к центру камеры сгорания,

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 при работе котла предотвращает шлакование теплообменных поверхностей. На рисунке 3.18 представлено поле пульсаций  $z$ -компоненты скорости ( $V_z'$ ) в верхнем сечении для режима  $\beta=5$ , вычисленное по полученным PIV данным. В области смешения струй, подаваемых через боковые сопла, пульсации достигают 2 м/с (40% от начальной скорости). Высокий уровень пульсаций обеспечивает интенсивное перемешивание, что способствует эффективному воспламенению пылеугольной смеси в реальном котле.

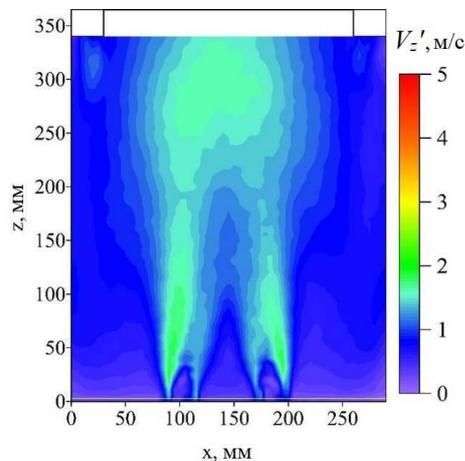


Рисунок 3.18 – Поле пульсаций  $z$ -компоненты скорости в сечении, проходящем через середину верхнего яруса, для режима  $\beta=5$

На рисунке 3.19 приведены условные траектории для режимов при  $\beta = 2$ ,  $\beta = 1$  и  $\beta = 0,5$ . Данные режимы реализуются при одинаковом суммарном расходе воздуха  $Q_0 = 350 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Для  $\beta = 2$  (рисунки 3.19-а, 3-19-г) всё ещё характерна регулярная четырёхвихревая схема. При  $\beta = 1$  (рисунки 3.19-б, 3.19-д) имеет место асимметрия потока: один из четырех основных

вихрей распадается на два (в правой части топки). При дальнейшем уменьшении значения  $\beta$  структура становится всё более нерегулярной (рисунки 3.19-в, 3.19-е). При этом структура течения сильно зависит от координаты  $y$ . Неоднородность приводит к существованию локальных зон с недостаточным омыванием теплообменных поверхностей.

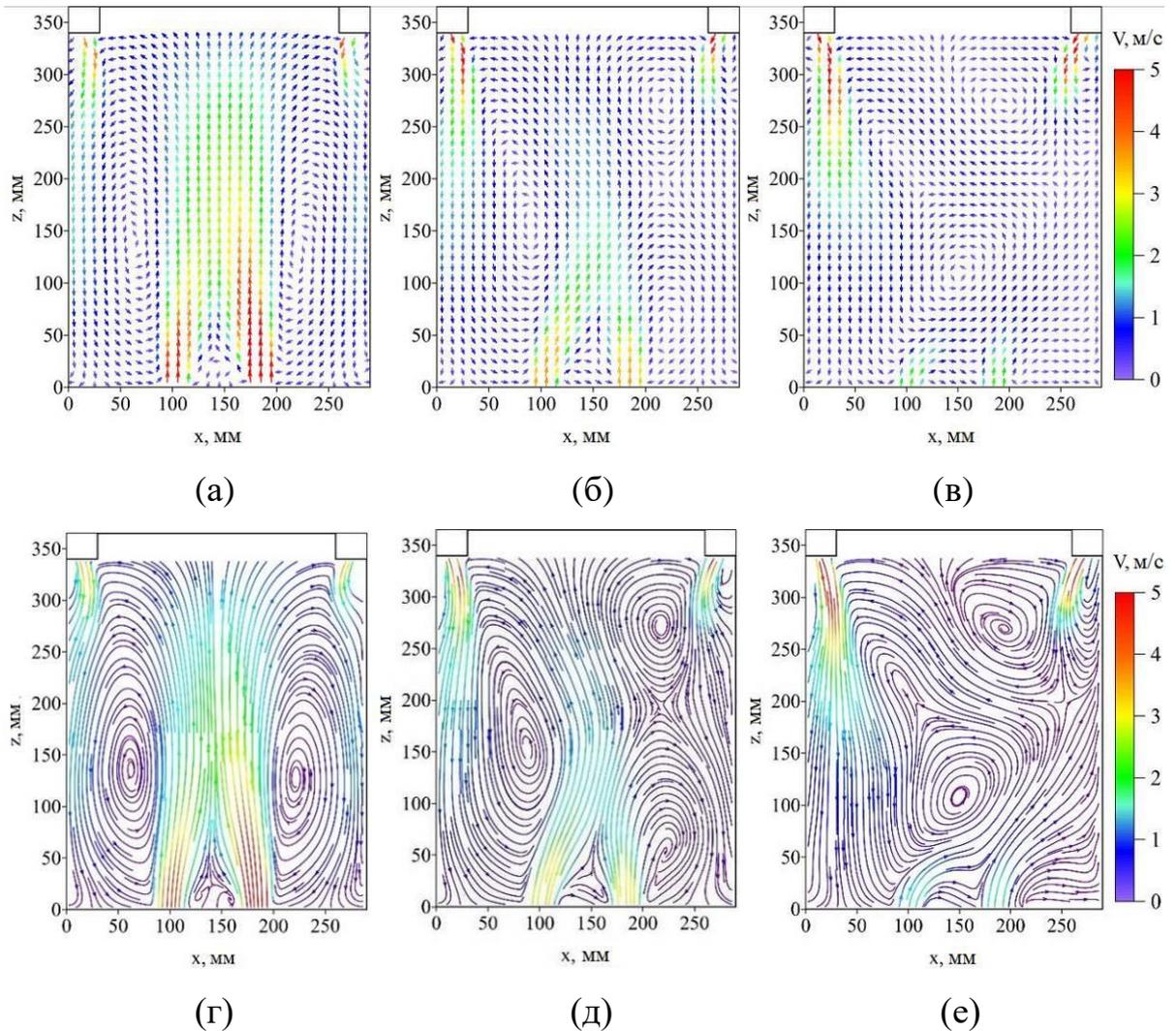


Рисунок 3.19 – Векторное поле скорости (а-в) и условные траектории (г-е) в верхнем ярусе ( $Q_0 = 350 \text{ м}^3/\text{ч}$ ):  $\beta = 2$  (а, г); 1 (б, д); 0,5 (в, е)

Таким образом, режимы сжигания топлива при  $\beta < 2$  являются неблагоприятными с практической точки зрения, поскольку для них невозможно организовать однородное эффективное омывание стенок, что

приведет к локальному шлакованию теплообменных поверхностей и снижению эффективности работы котельного оборудования.

Для анализа динамики исследуемого течения была проведена обработка данных, полученных в различные моменты времени для одного режима. Для этого из полной серии экспериментов были взяты 3 серии по 200 снимков (при частоте съемки 1 Гц соответствует 200 с) в разные моменты времени для режима  $\beta = 0,5$ . На рисунке 3.20 приведены условные траектории. Несмотря на незначительные различия, все качественные особенности (положение вихревых зон и др.) сохраняются. Таким образом, можно сделать вывод, что течение является квазистационарным даже для режимов с нерегулярной структурой течения.

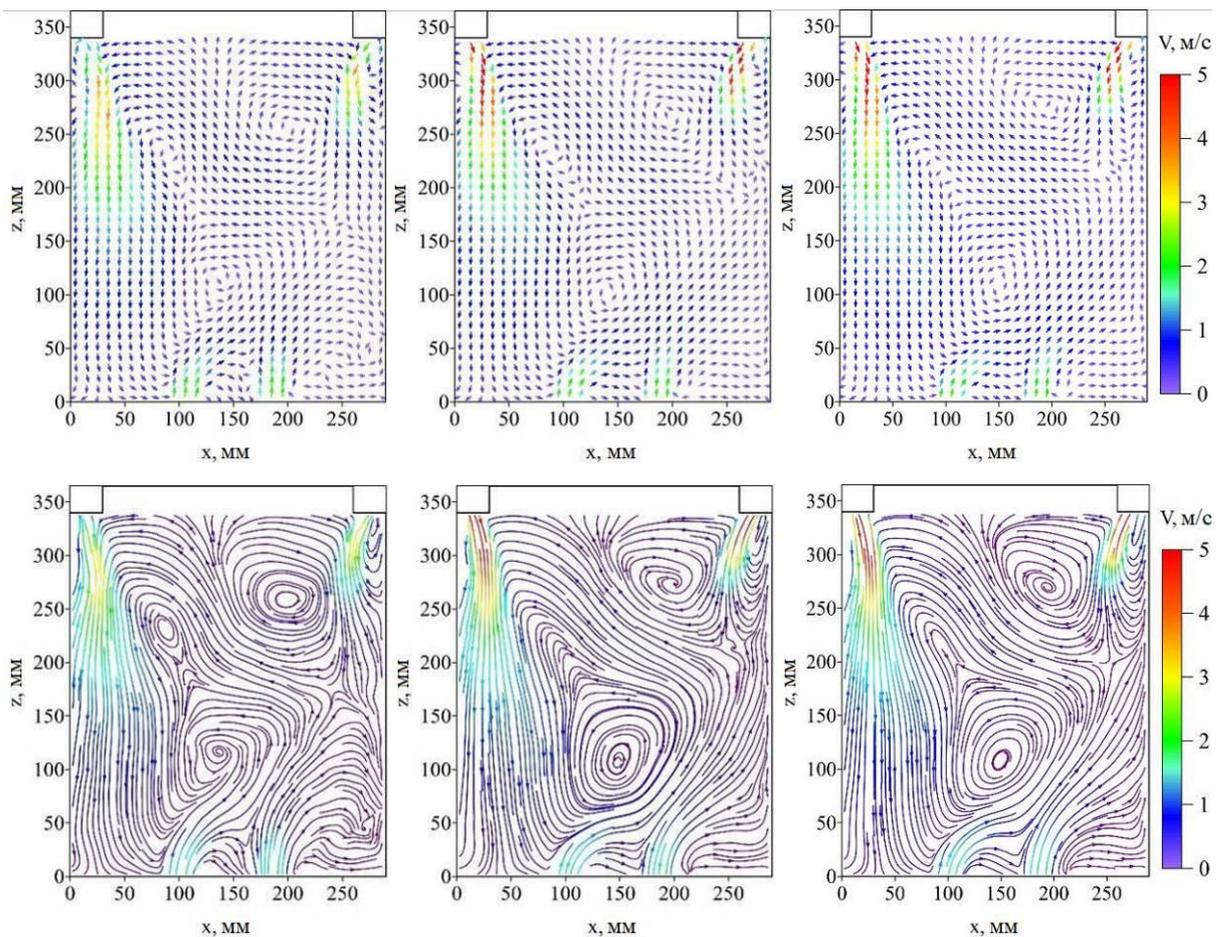


Рисунок 3.20 – Векторные поля скорости и условные траектории в верхнем ярусе в различные моменты времени.  $Q_0 = 350 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $\beta = 0,5$

На рисунке 3.21 представлено распределение  $z$ -компоненты скорости вдоль линий  $z = 150$  мм в горизонтальном сечении, проходящем через центры верхних сопел, для четырех исследованных режимов. Для режимов  $\beta = 5$ ,  $\beta = 2$  и  $\beta = 1$   $z$ -компонента скорости дважды меняет знак, что подтверждает вывод о наличии двух вихрей. Вблизи координаты  $x = 145$  мм (что соответствует середине между боковыми соплами) на этой линии располагается зона с максимальным значением  $V_z$ , что свидетельствует о слиянии потоков, подаваемых через боковые сопла, в единую струю. График имеет вид, близкий к симметричному относительно линии  $x = 145$  мм. Для режима  $\beta = 0,5$  характерна асимметрия течения.

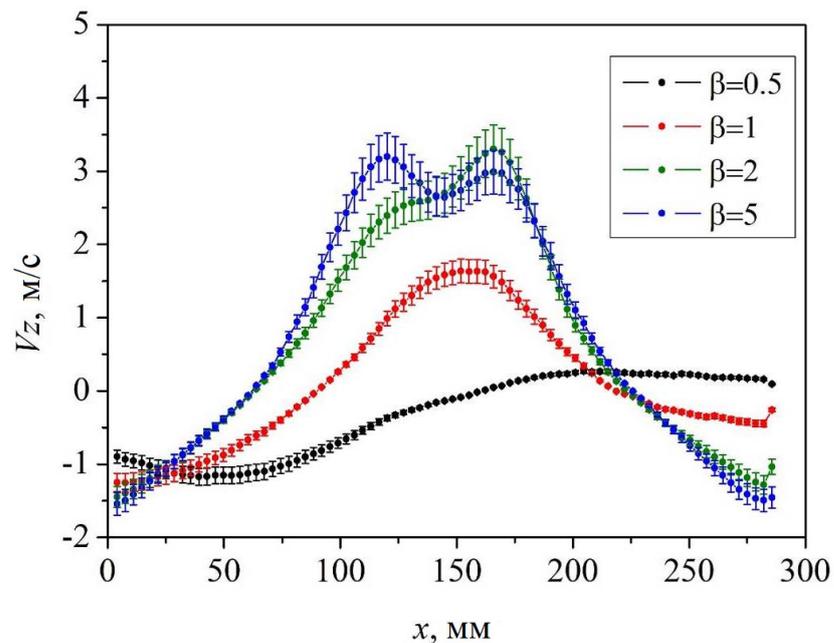


Рисунок 3.21 – Распределение  $z$ -компоненты скорости вдоль линий  $z = 150$  мм в верхнем горизонтальном сечении для различных режимов

На основе проведенных измерений полей осредненной скорости построена карта режимов (рисунок 3.22) с различной характерной структурой потока, демонстрирующая области существования четырехвихревой схемы в исследуемом диапазоне расходов. Символами « $\oplus$ » обозначены режимы,

представленные на рисунках 3.17-3.21 и соответствующие одному и тому же суммарному расходу  $Q_0 = 350 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; символами «+» обозначены остальные исследованные режимы. Для значения  $\beta \geq 2$  (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.

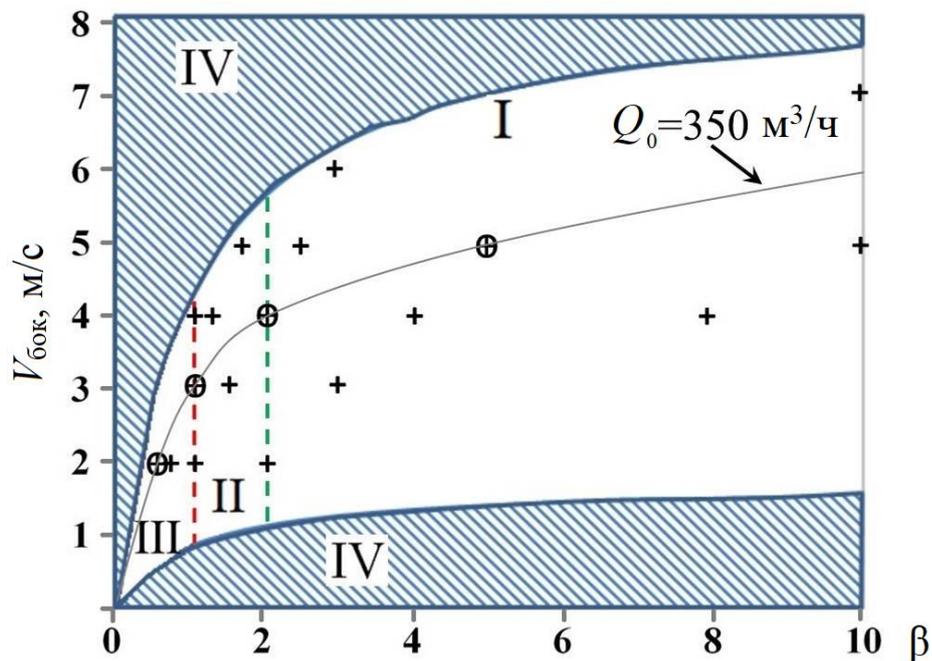


Рисунок 3.22 – Карта режимов закрученного течения в модели четырёхвихревой камеры сгорания: I – область существования регулярной четырёхвихревой схемы потока; II – переходный режим; III – отсутствие регулярной четырёхвихревой схемы; IV – режимы, не реализуемые в данной экспериментальной установке

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  $y$ ). Для области II ( $1 < \beta < 2$ ) характерно развитие несимметричности течения с распадом вихревых

структур в различных сечениях на несколько более мелких вихрей, поэтому данный диапазон режимов можно обозначить как переходный.

Область IV лежит вне пределов измерений на экспериментальной установке: нижняя граница соответствует минимальной пропускной способности системы регулировки, при которой может быть поддержан фиксированный расход (суммарный объемный расход воздуха  $Q_0 = 100 \text{ м}^3/\text{ч}$ ); верхняя граница соответствует максимальной производительности системы подачи сжатого воздуха ( $Q_0 = 500 \text{ м}^3/\text{ч}$ ). Линии, ограничивающие область IV на рисунке 3.22, построены по формуле

$$V_{\text{бок}} = \beta V_0 / (\beta + 1), \quad (4)$$

где  $\beta = V_{\text{бок}} / V_{\text{фр}}$ , исходя из того, что суммарная площадь сечения боковых и фронтальных сопел почти одинакова (разница менее 10%), т.е. условие

$$Q_0 = Q_{\text{бок}} + Q_{\text{фр}} \quad (5)$$

сводится к условию

$$V_0 = V_{\text{бок}} + V_{\text{фр}}. \quad (6)$$

Для условий эксперимента максимальное значение суммарной скорости через боковые и фронтальных сопла для этих пределов по объемному расходу составляет  $V_{0\text{min}} = 1,66 \text{ м/с}$  и  $V_{0\text{max}} = 8,33 \text{ м/с}$ , соответственно.

### **3.2 Характеристики газочапельного потока, формируемого пневматической вихревой форсункой для распыления водоугольной суспензии**

В разделе 2.2 описана конструкция оригинальной пневматической вихревой форсунки, основанной на использовании свойств пристенных и кумулятивных струй и эффекта Коанда, приводящих к специфической тороидальной структуре потока на выходе из форсунки. Данная форсунка успешно применяется в горелочных устройствах котлов для распыления водоугольной суспензии, горение которой определяется качеством

диспергирования. Для изучения влияния режимных параметров на характеристики потоков, создаваемых форсункой, проведены экспериментальные исследования структуры и дисперсного состава потоков с использованием бесконтактных методов [97-104].

В первую очередь, с использованием метода PIV исследована структура однофазного газового потока, истекающего из пневматической вихревой форсунки при различном давлении воздуха в форсунке. На рисунке 3.23 представлены полученные векторные поля скорости ( $z=0$  соответствует срезу кольцевого канала).

Результаты экспериментов показали, что структура течения существенно зависит от давления в форсунке: с повышением давления поток локально становится сверхзвуковым. На рисунке 3.23-а показано распределение скорости при избыточном давлении в газовой камере форсунки  $p_0 = 1$  атм. В этом режиме 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). Прямая осевая струя расширяется, течение в ней становится дозвуковым, с числом Маха  $M \approx 0,6$ .

При увеличении избыточного давления до  $p_0 = 3$  атм (рис. 3.23-б) 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.

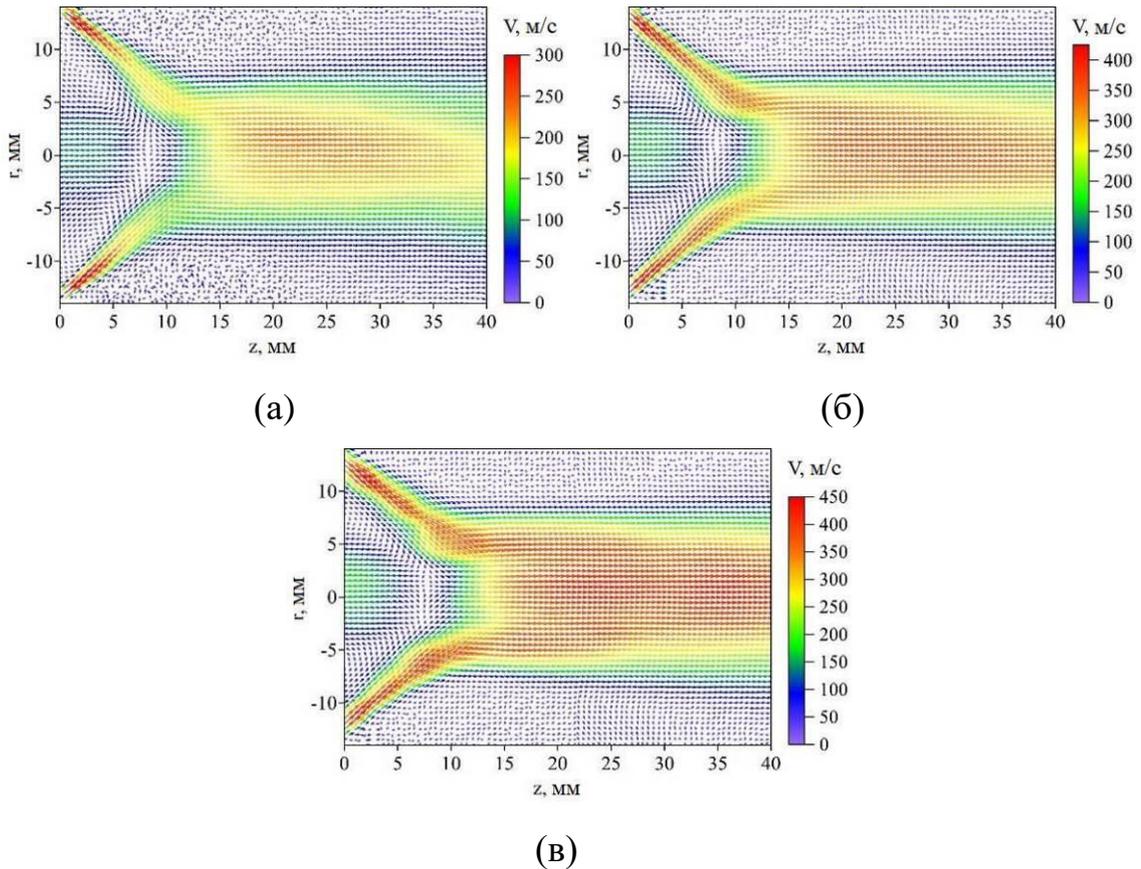


Рисунок 3.23 – Векторное поле средней скорости газа, истекающего из пневматической вихревой форсунки,  $p_0=1$  атм (а); 3 атм (б); 5 атм (в)

Испытания форсунки и отладка измерительной методики проведены с использованием воды в качестве распыляемой жидкости (без частиц угля). Измерение дисперсного состава осуществлялось с применением метода прямой теневой фотографии. Исследования проведены в диапазоне расхода жидкости  $Q_l = 36 \div 360$  кг/ч и избыточного давления воздуха в кольцевой камере  $p_0 = 0,5 \div 6,0$  атм. Верхний предел диапазона режимных параметров соответствуют рабочим условиям на реальном котле.

На рисунке 3.24 представлены теневые фотографии газокапельного потока, создаваемого на выходе из форсунки при различных начальных параметрах. При  $p_0 < 3$  атм структура газокапельного потока неустойчива: наблюдаются пульсации струи в поперечном направлении, поток содержит крупные капли (больше 1 мм), полный угол раскрытия газокапельной струи

достигает  $30^\circ$  (рисунок 3.24-а). Такой характер потока сохраняется во всем исследуемом диапазоне расхода жидкости. При  $p_0 > 3$  атм поток становится более устойчивым и однородным. При этом угол раскрытия составляет приблизительно  $20^\circ$  и слабо зависит от расхода жидкости.

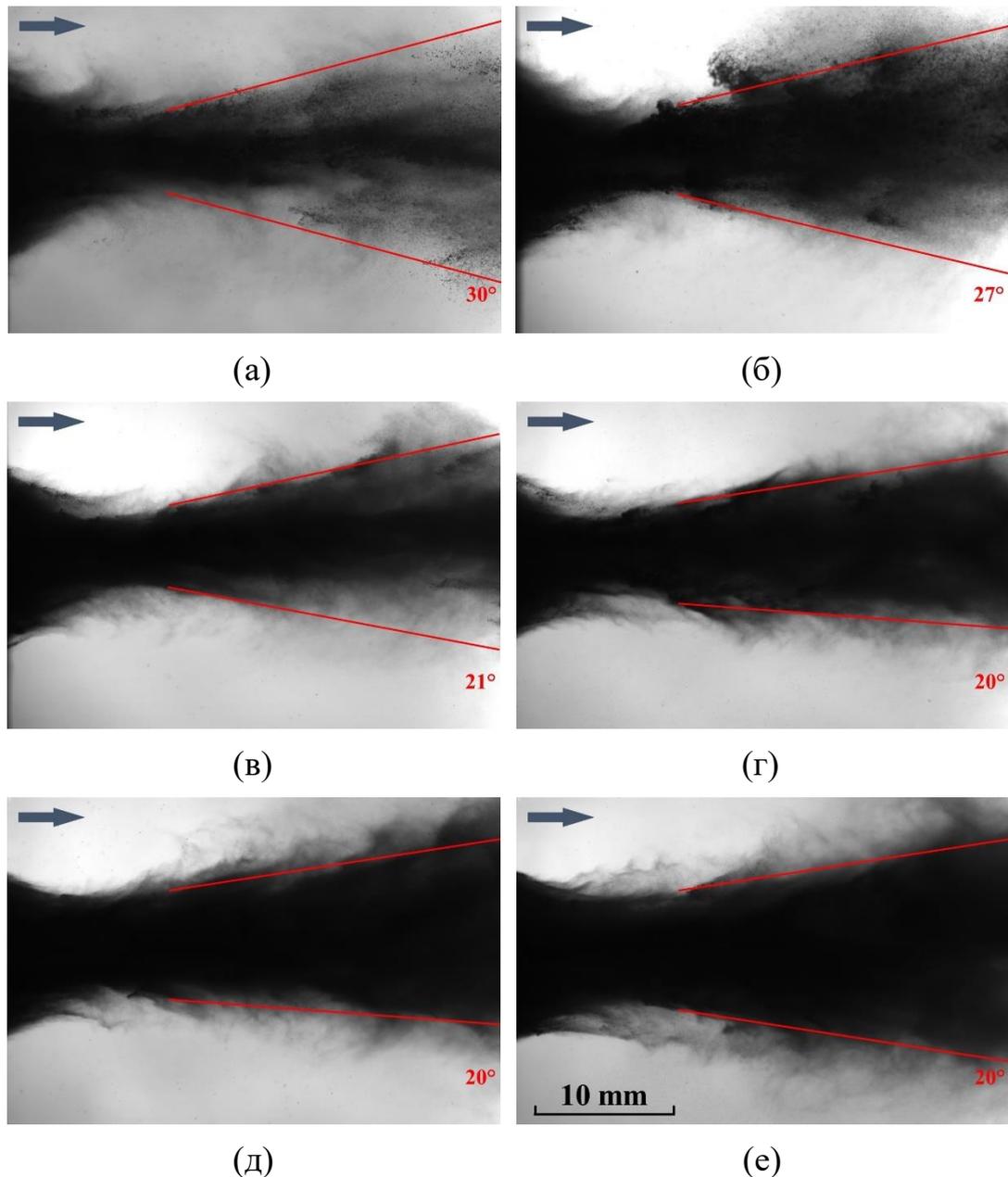


Рисунок 3.24 – Теневые фотографии газодисперсного потока на выходе из форсунки: (а)  $p_0=0,5$  атм,  $Q_f=180$  кг/ч; (б)  $p_0=1$  атм,  $Q_f=180$  кг/ч; (в)  $p_0=3$  атм,  $Q_f=180$  кг/ч; (г)  $p_0=3$  атм,  $Q_f=216$  кг/ч; (д)  $p_0=5$  атм,  $Q_f=288$  кг/ч; (е)  $p_0=5$  атм,  $Q_f=360$  кг/ч

В качестве измерительной области для определения дисперсного состава выбрана область (размером 6,6×4,4 мм) на оси потока на расстоянии 35 см от форсунки. Эта область соответствует зоне воспламенения факела в топке, поэтому важно измерять размеры капель именно здесь. На рисунке 3.25 представлена характерная теневая фотография. На увеличенном фрагменте показан пример обработки изображения алгоритмом для идентификации сферических капель. Определенный в результате обработки изображений дисперсный состав двухфазного потока при распылении воды сверхзвуковым газовым потоком в исследуемой форсунке для суспензионного топлива представлен на рисунке 3.26. Основная часть (90%) общего количества капель имеет размер  $d$  менее 10 мкм, наиболее представительный размер составляет 3 мкм. В диапазоне давления воздуха 4÷6 атм и расхода жидкости 180÷360 кг/ч дисперсный состав остается практически неизменным. Тем самым, экспериментальные данные показали, что при  $p_0 > 3$  атм на исследуемой форсунке обеспечивается режим эффективного диспергирования жидкости.

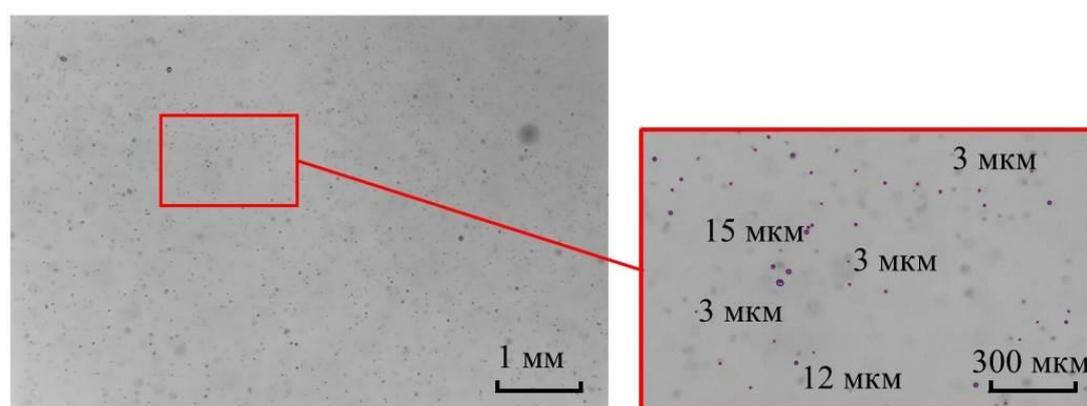
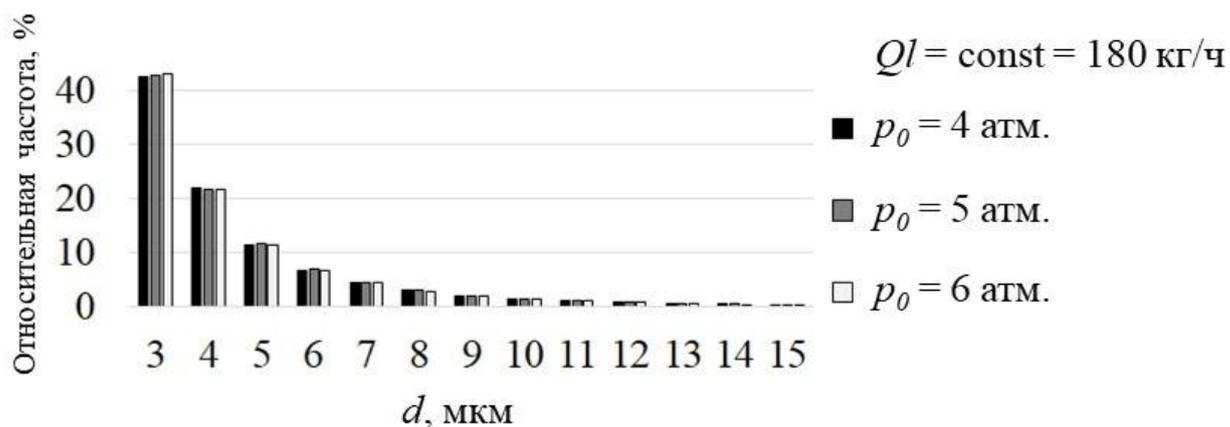
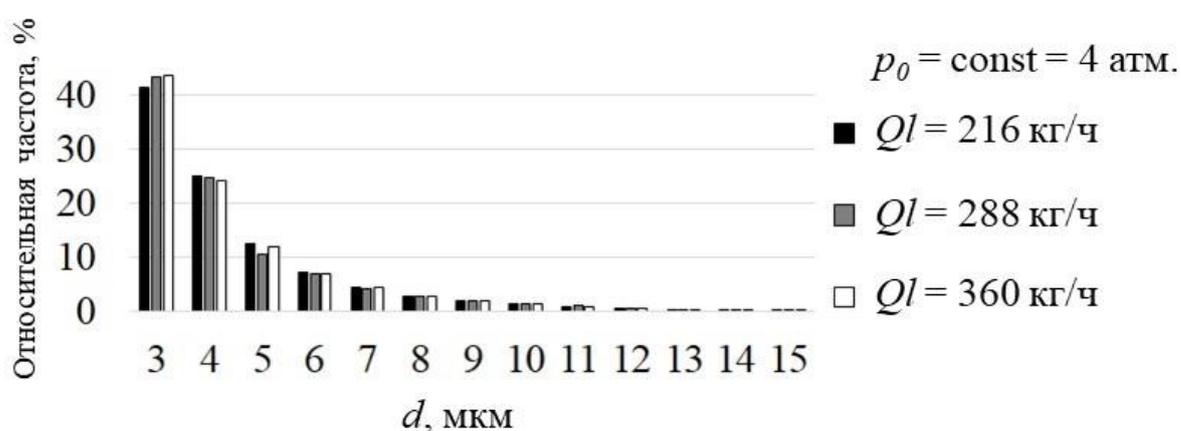


Рисунок 3.25 – Характерная теневая фотография газокapельного потока с увеличением 7:1,  $p_0 = 3$  атм,  $Q_l = 180$  кг/ч



(a)



(б)

Рисунок 3.26 – Дисперсный состав газокапельного потока при разном давлении в форсунке (а); при разном расходе жидкости (б)

Для исследования процессов диспергирования и горения ВУС использовалась суспензия, приготовленная по методике, описанной в разделе 2.2. Массовое содержание воды составляло 45%. Характерное микроскопическое изображение приготовленной ВУС представлено на рисунке 3.27. В потоке имеются частицы, достигающие 200 мкм, но основная часть частиц имеет размеры менее 120 мкм.

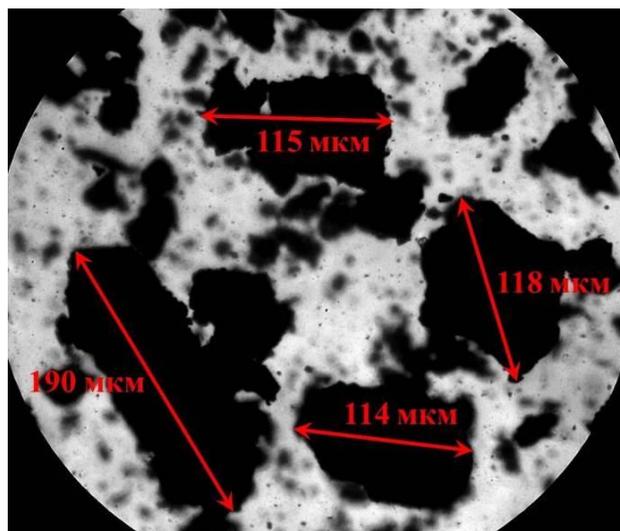


Рисунок 3.27 – Микроскопическая фотография ВУС

На рисунке 3.28 представлен характерный вид газочапельного потока, формируемого при распылении ВУС пневматической вихревой форсункой. На рисунке отмечены две измерительные области: область проведения скоростной визуализации; область определения дисперсного состава

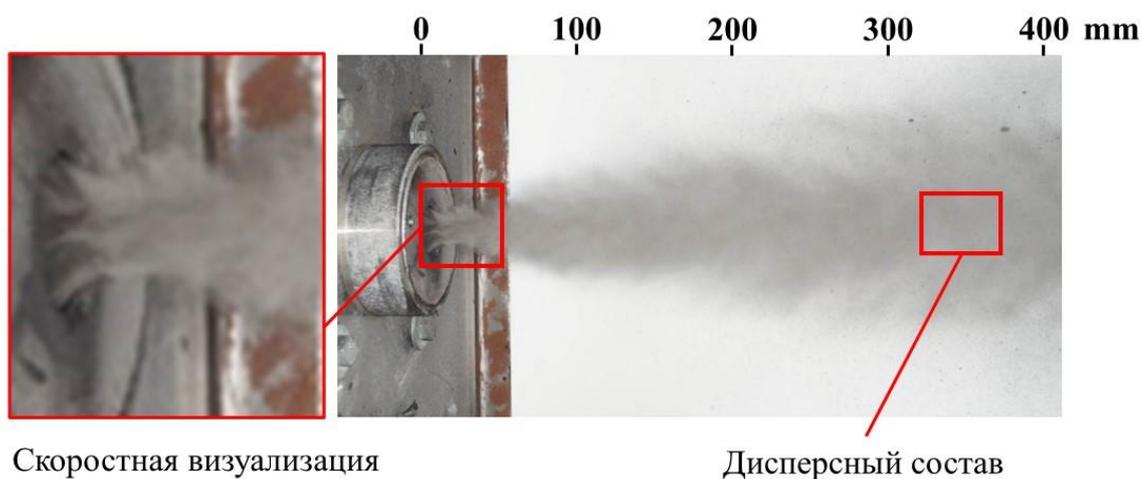


Рисунок 3.28 – Характерный вид газочапельного потока, формируемого при распылении ВУС пневматической вихревой форсункой

На рисунке 3.29 представлены кадры скоростной визуализации в момент начала подачи суспензии: частота съемки – 10 кГц, время экспозиции кадра – 33 мкс. В начале подачи ВУС видно, как происходит дробление

потока ВУТ. С продолжением подачи ВУС происходит формирование плотного газочапельного потока. Скорость движения угольных частиц в области пережима струи, оцененная по длине треков, составляет  $\sim 150$  м/с. Угол раскрытия газочапельной струи составляет  $20^\circ$ .

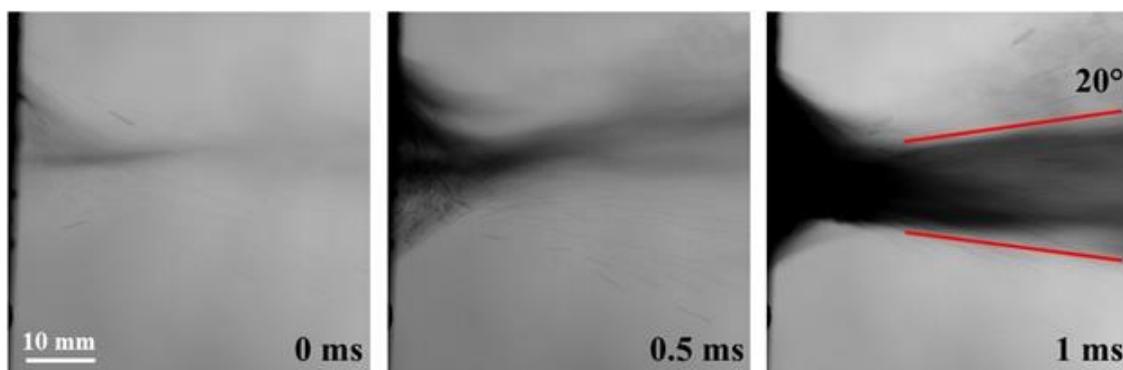


Рисунок 3.29 – Скоростная визуализация процесса распыления ВУТ,  
 $p_0 = 2$  атм,  $Q_I = 180$  кг/ч

С использованием метода теневой фотографии исследован дисперсный состав газочапельного потока при распылении ВУС пневматической вихревой форсункой. На рисунке 3.30 представлена характерная теневая фотография.

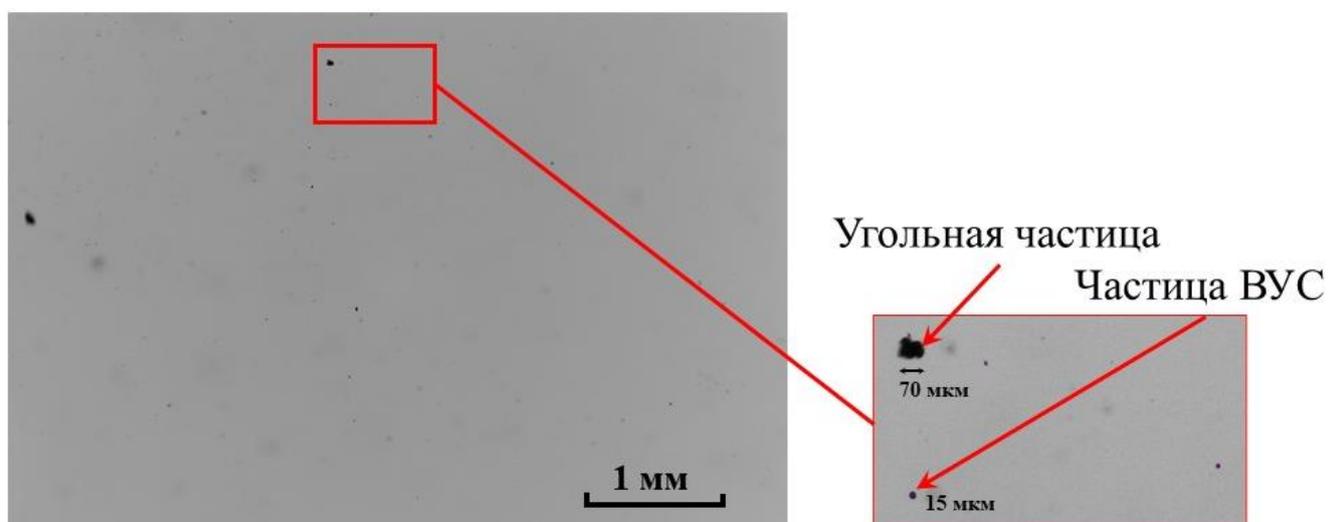


Рисунок 3.30 – Теневая фотография при распылении ВУС  
 пневматической вихревой форсункой,  $p_0 = 2$  атм

На рисунке 3.31 показана гистограмма, полученная для газокапельного потока при распылении ВУС. Характерный размер частиц в исследуемом потоке 10-20 мкм (~60 % от числа идентифицированных частиц). Этот результат близок к результату распыления чистой воды (рисунок 3.26). В то же время видно (рисунок 3.29), что в потоке присутствуют угольные частицы, которые не являются сферическими, и поэтому не могут быть идентифицированы алгоритмом обработки.

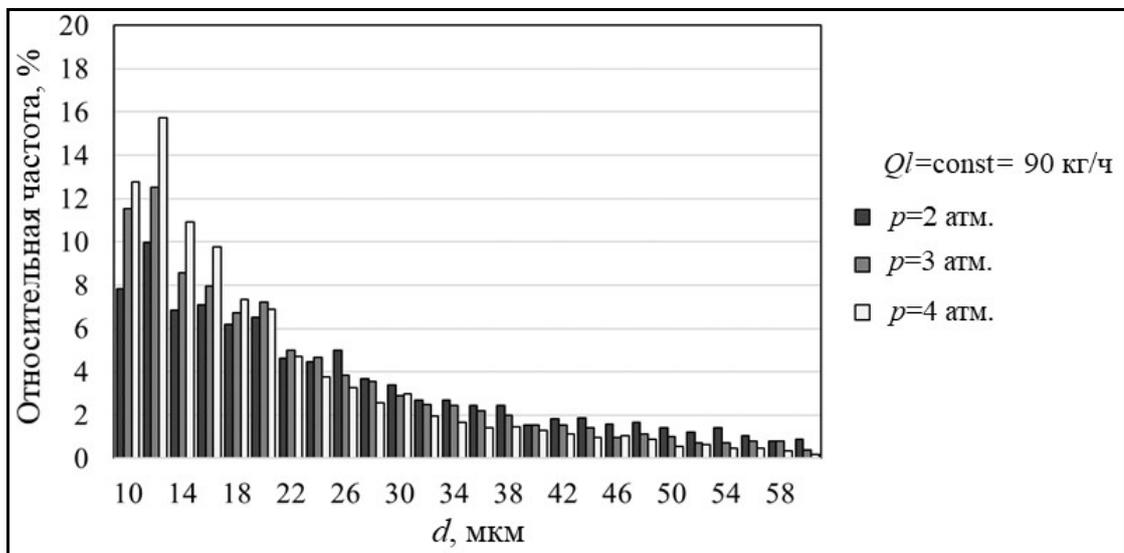


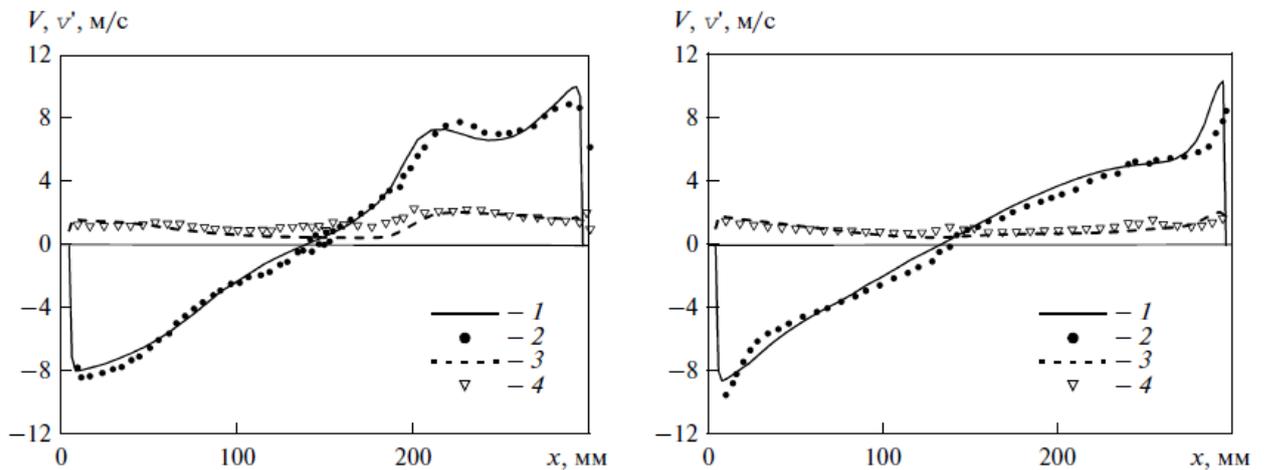
Рисунок 3.31 – Дисперсный состав газокапельного потока

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.

### 3.3 Валидация результатов численного моделирования

Полученные экспериментальные данные были использованы для верификации физико-математических моделей, которые применяются для полномасштабного численного моделирования процессов в пылеугольных котлах, включая горение. В рамках выполнения диссертационного исследования автор принял непосредственное участие в валидации результатов расчетов на основе полученных экспериментальных данных.

В частности, проведено сопоставление экспериментальных результатов с результатами численного моделирования для вихревой камеры сгорания, описанной в разделе 3.1.1 [73]. На рисунке 3.32 приведены профили осредненной и пульсационной составляющих вертикальной компоненты скорости, полученные экспериментально (методом ЛДА) и численно. Сравнение демонстрирует хорошее качественное и количественное соответствие.



1, 3 – расчеты; 2, 4 – ЛДА-измерения

Рисунок 3.32 – Профили вертикальной компоненты осредненной по времени скорости и среднеквадратичного значения ее турбулентных пульсаций вдоль горизонтальной линии  $y = 185$  мм: в сечении вблизи торцевой стенки

$z = 15$  мм (а); в сечении по центру горелок  $z = 80$  мм (б)

Измерение турбулентных пульсаций скорости потока с помощью 3D ЛДА позволило визуализировать вихревое ядро потока для разных камер сгорания (рисунки 3.6 и 3.15) и провести на качественном уровне сопоставление с результатами расчетов [80], показанными на рисунке 3.33.

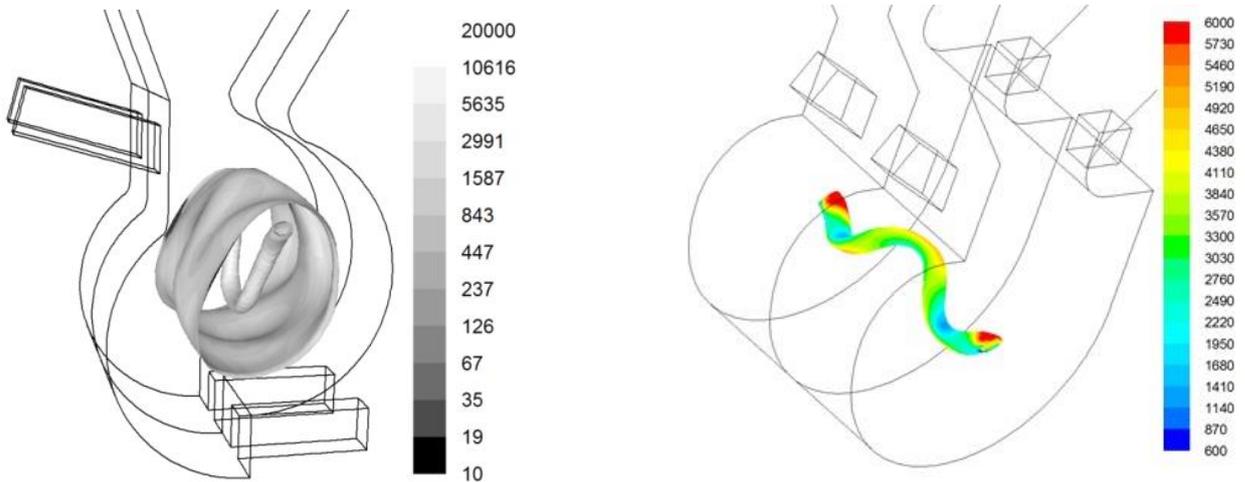
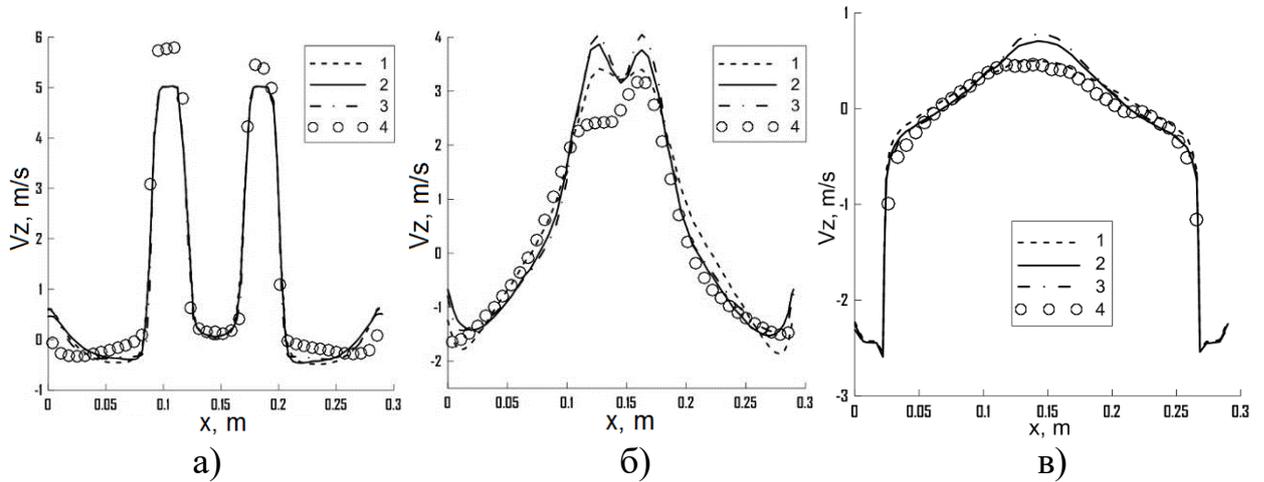


Рисунок 3.33 – Форма вихревого ядра потоков в разных камерах сгорания, расчеты [80]

Проведено сопоставление полученных экспериментальных данных и численных результатов для четырехвихревой камеры сгорания [95]. На рисунке 3.34 представлены профили  $z$ -компоненты скорости вдоль различных горизонтальных линий, построенные по результатам расчетов на основе различных моделей, символами отмечены экспериментальные данные. Наблюдается удовлетворительное количественное соответствие результатов.



1 – URANS k-w SST, 2 – URANS RSM, 3 – DES, 4 – эксперимент

Рисунок 3.34 – Распределение  $z$ -компоненты скорости

вдоль горизонтальных линий: а)  $z=10$  мм; б)  $z=150$  мм; в)  $z=340$  мм

Сделанный на основе серии экспериментов вывод о том, что изменение отношения расходов ( $\beta$ ) позволяет управлять характером вихревого потока в четырехвихревой камере сгорания (см. рисунки 3.17, 3.19, 3.20) находится в хорошем соответствии с результатами расчетов, представленными на рисунке 3.35.

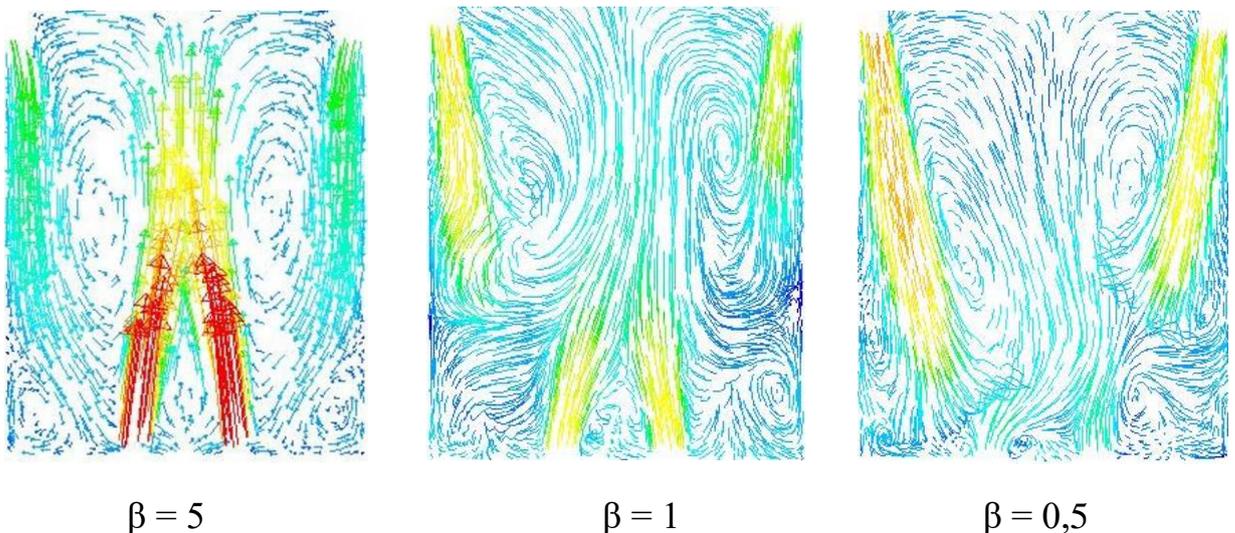


Рисунок 3.35 – Структура течения в четырехвихревой камере сгорания при различных отношениях скоростей через боковые и фронтальные сопла, расчет [95]

Проведено количественное сопоставление расчетов структуры газокапельного потока, формируемого пневматической вихревой форсункой, с данными PIV-измерений. Пример сравнения аксиальной скорости на разном расстоянии от форсунки приведен на рисунке 3.36. На основании сравнения сделан вывод о преимуществе модели 2D-RSM для данной задачи.

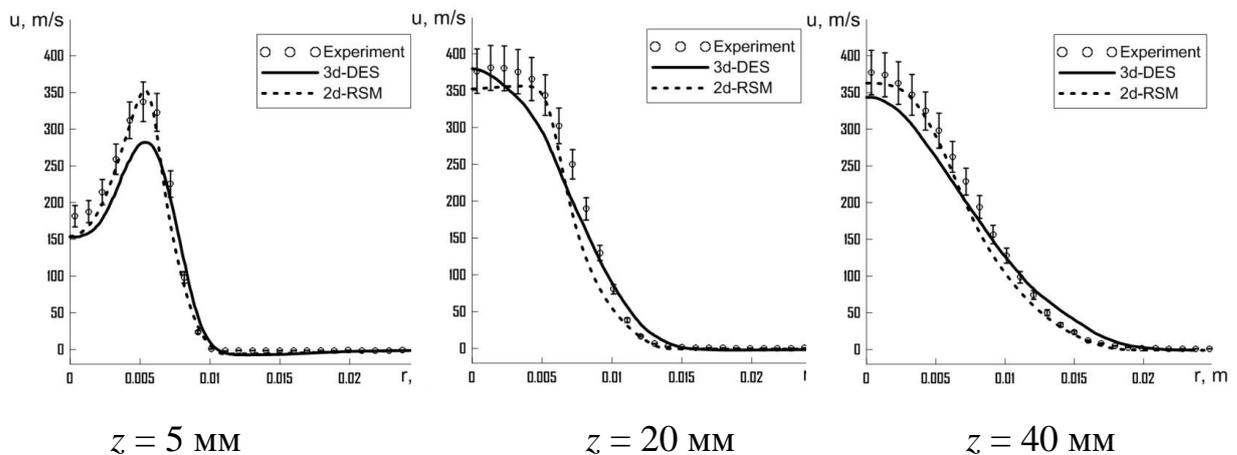


Рисунок 3.36 – Профили аксиальной скорости на разном расстоянии от форсунки,  $p_0 = 3$  атм. Сопоставление результатов расчетов [97] (линии) с полученными экспериментальными данными (символы)

Таким образом, экспериментальные данные, полученные с использованием высокоточных методов, позволили провести детальное количественное сопоставление результатов физического и численного моделирования внутренней аэродинамики различных вихревых камер сгорания. Валидация результатов расчетов в ряде случаев позволяет обосновать выбор математической модели для дальнейшего применения её в полномасштабных расчетах, в том числе для математического моделирования режимов с горением. В свою очередь, расчеты изотермического течения в пылеугольных котлах подтвердили возможность

масштабирования результатов экспериментальных исследований структуры потока в лабораторных моделях на камеры сгорания реального размера.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На созданных стендах, оснащенных оптическими измерительными системами, выполнены исследования структуры вихревых течений в ограниченных объемах с распределенным вводом потока и характеристик высокоскоростных газочапельных 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 газочапельного 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.

Исследования выполнены в 2012–2021 гг. в рамках Программы фундаментальных научных исследований (государственное задание ИТ СО РАН), ряд задач решен при поддержке РФФИ и РНФ, результаты исследований распыления водоугольной суспензии получены в рамках выполнения Крупного научного проекта «Фундаментальные исследования процессов горения и детонации применительно к развитию основ энерготехнологий» (Соглашение от 29.09.2020 № 075-15-2020-806).

Автор выражает признательность научному руководителю д.ф.-м.н. О.В. Шарыпову, а также академику РАН С.В. Алексеенко, д.т.н. И.С. Ануфриеву, д.т.н. А.А. Дектереву, к.т.н. Е.П. Копьеву, к.т.н. Е.Б. Бутакову, к.т.н. Д.В. Красинскому, М.С. Вигриянову за помощь в выполнении работы.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2585347

ВИХРЕВАЯ ТОПКА

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2015125503

Приоритет изобретения 26 июня 2015 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 05 мая 2016 г.

Срок действия патента истекает 26 июня 2035 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

*Г.П. Ивлиев*



## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Испытания пневматической форсунки для сжигания ВУС проводились в опытной топке мощностью до 5 МВт в ИТ СО РАН. Опытная топка цилиндрической формы (длина 5 м), расположена горизонтально и разделена на отсеки разной длины и диаметра. Первый отсек (внутренний диаметр камеры 0,3 м, длина 2 м) предназначен для воспламенения и первичного сжигания топлива, а также проведения визуальных наблюдений; во втором отсеке (внутренний диаметр камеры 1 м, длина 3 м) происходит догорание топлива. Корпус топки выполнен из стали толщиной 5 мм, внутри топка теплоизолирована шамотом толщиной 125 мм. Топка может работать как с вихревой тангенциальной подачей распыленного топлива (уголь, газ), так и в прямоточном режиме (ВУС). Топка огневого стенда неохлаждаемая, поэтому имеются ограничения на продолжительность его работы (20 мин при полной мощности 5 МВт). Основными элементами топки являются (рисунок 4.1): тангенциальный завихритель первичной пылеугольной смеси (или газа), в котором происходит смешение топлива с воздухом и воспламенение смеси; прямоточная горелка для ВУС, расположенная горизонтально на оси топки; камера сгорания с измерительными датчиками и смотровыми окнами; камера догорания с тангенциальной подачей вторичного воздуха; дымосос.

Запуск топки и ее нагрев происходит на каменном угле, поступающем в камеру сгорания тангенциально в виде пылевоздушной смеси через завихритель. Воспламенение угля осуществляется с использованием газового запального устройства. Пропан подается вместе с пылевоздушной смесью на начальном этапе. Одновременно в камеру догорания подается вторичный воздух (примерно такое же количество, как в завихритель). Коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  варьируется от 0,4 до 0,5 в камере сгорания и от 0,8 до 0,9 в камере дожигания. При достижении вблизи внутренних стенок камеры сгорания температуры 1200°C, достаточной для устойчивого горения

пылеугольного топлива (квазистационарный режим), подача пропана прекращается и в камеру сгорания вдоль оси топки подается ВУС, которая, смешиваясь с горящим пылеугольным потоком, воспламеняется. Далее происходит совместное сжигание угля и ВУС при различном массовом соотношении.

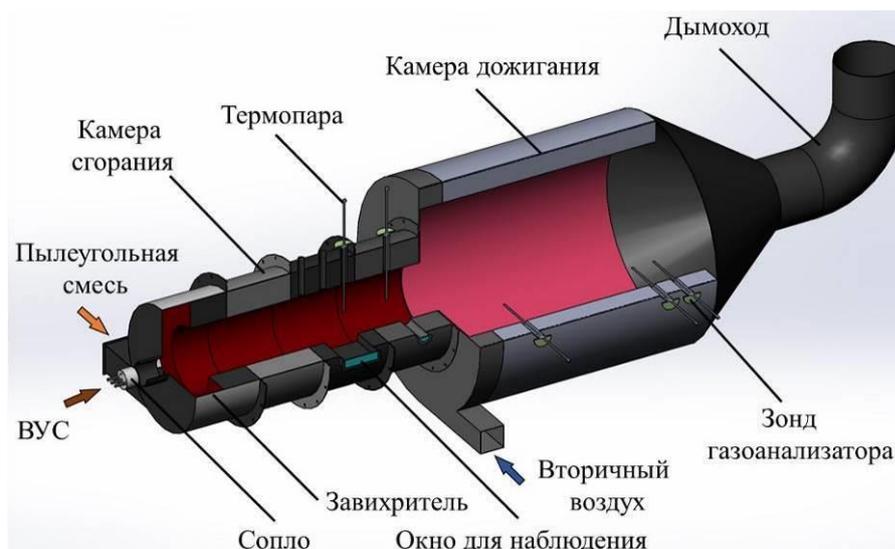


Рисунок 4.1 – Схема экспериментального стенда для исследования горения ВУС

Ввиду высокой влажности и низкой теплотворной способности ВУС в качестве вспомогательного топлива использовался уголь.

Измерение газового состава осуществлялось газоанализатором Тест-1 (российского производства): CO (0-100 % об.), H<sub>2</sub> (0-40 % об.), CH<sub>4</sub> (0-30 % об.), CO<sub>2</sub> (0-30 % об.), O<sub>2</sub> (0-30 % об.), NO (0-3000 ppm), NO<sub>2</sub> (0-1000 ppm). Для измерения O<sub>2</sub>, NO и NO<sub>2</sub> в устройстве установлены электрохимические сенсоры (абсолютная погрешность 0,2 % об.), H<sub>2</sub> – полярографический сенсор (относительная погрешность 5 %), CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> – каждая компонента определяется оптическим сенсором с абсолютной погрешностью 0,2 % об. при измерении до 5 % об. (для CO<sub>2</sub> до 7 % об.), свыше этого значения основной погрешностью сенсора является относительное отклонение в

пределах 5 %. Проводился непрерывный отбор газа в конце камеры догорания.

Температура измеряется хромель-алюмелевыми термопарами T1-T4, подключенными к автоматизированной системе сбора данных. Термопары в камере сгорания размещались вблизи стенок камеры. Погрешность измерения температуры термопарами такого типа оценивается на уровне 2,5 °С (при температуре до 1300 °С).

Для визуализации процесса в камере сгорания через специальные окна использовалась цифровая фотокамера Canon DS126071 с объективом Canon EFS 18-55 mm.

Режимные параметры показаны в Таблице 2. Выбор расхода угля основан на обеспечении необходимой тепловой мощности для разогрева камеры сгорания и устойчивого воспламенения и горения ВУС. Расход воздуха выбирался исходя из условий, необходимых для транспортировки пылеугольного топлива в камеру сгорания и обеспечения коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  от 0,4 до 0,5 в камере сгорания и от 0,8 до 0,9 в камере дожигания.

Таблица 2. Режимные параметры при сжигании угля и ВУС

	Расход топлива, кг/ч	Мощность, МВт	Расход первичного воздуха, кг/ч	Расход вторичного воздуха, кг/ч	$\alpha$ , камера сгорания	$\alpha$ , камера дожигания
Уголь	144	0,95	373	420	0,5	0,9
Уголь + ВУС	110 + 90	1,0	360	420	0,5	0,8
			114 (в форсунке)			

На рисунке 4.2 показаны фотографии в камере сгорания при сжигании угля и при совместном сжигании угля и ВУС. При горении угля без ВУС наблюдается однородное ярко-желтое свечение во всем объеме камеры сгорания. При подаче ВУС пламя становится менее ярким, заметны отдельно

горящие частицы оранжевого цвета. Это свидетельствует о понижении температуры.

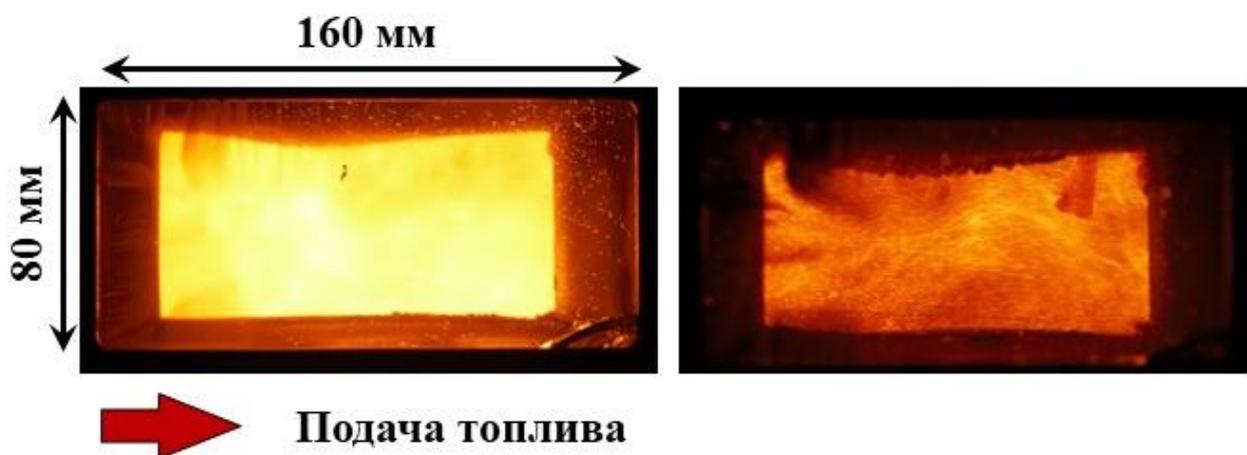


Рисунок 4.2 – Горение угля (слева) и совместное сжигание угля и ВУС (справа) в экспериментальной топке

На рисунке 4.3 показаны зависимости температуры в камере сгорания и газового состава на выходе из камеры дожигания от времени. Запуск котла на угле происходит около 5 мин. При достижении температуры 1200 °С подается ВУС. Совместная подача ВУС и угля приводит к снижению температуры на 50 градусов, выход на стационарный режим обеспечивается за 1,5 мин. Объемная концентрация в камере сгорания при совместном сжигании ВУС и угля составляет:  $\text{NO}_x$  0,03%,  $\text{CO}_2$  7%,  $\text{O}_2$  15%. Коэффициент избытка воздуха в камере сгорания (с учетом воздуха через форсунку) равен 0,5 (см. Таблицу 2). В течение всего эксперимента содержание  $\text{NO}_x$  в камере дожигания не превышает 300 ppm, что удовлетворяет требованиям по ПДК для угольных котлов. Содержание  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$  в камере сгорания близко к нулю. При попытке сжигания ВУС без угля (с подачей первичного воздуха в завихритель) факел потухает.

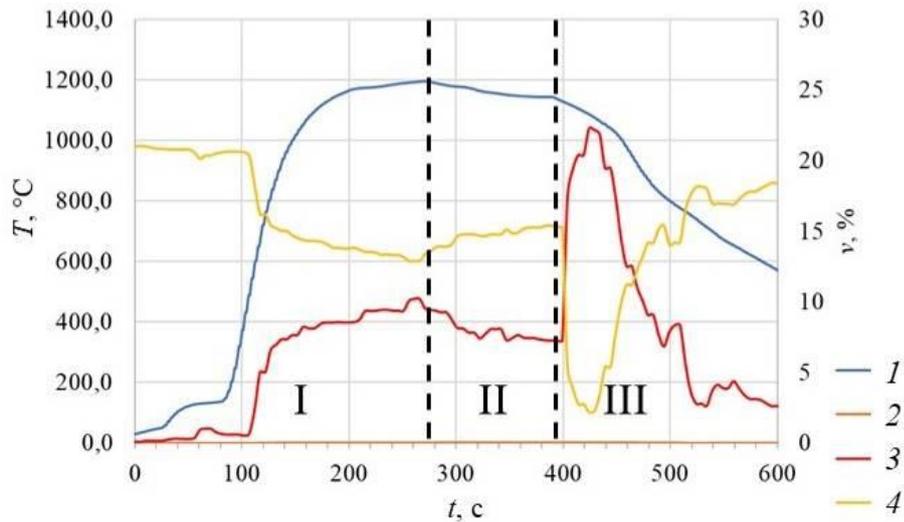


Рисунок 4.3 – Зависимость от времени температуры вблизи стенок в камере сгорания топки (1) и газовой состава продуктов сгорания на выходе из камеры дожигания (2-4): 2 – NO<sub>x</sub>, 3 – CO<sub>2</sub>, 4 – O<sub>2</sub>

Таким образом, показана возможность совместного эффективного сжигания ВУС и пылеугольного топлива с использованием разработанной форсунки в опытной топке при мощности 1 МВт и массовом содержании воды в ВУС 45%.

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

- ВТИ – Всероссийский теплотехнический институт;
- ВУС – водоугольная суспензия;
- ГРВТ – гравитационно-рециркуляционная вихревая топка;
- ГРЭС – государственная районная электростанция;
- КМОП – комплементарная структура металл-оксид-полупроводник;
- КПД – коэффициент полезного действия;
- КПУ – координатно-перемещающее устройство;
- КЭТ – кинетическая энергия турбулентности;
- ЛДА – лазерная Доплеровская анемометрия;
- ЛПИ – Ленинградский политехнический институт;
- МЭИ – Московский энергетический институт;
- СКО – среднеквадратичное отклонение;
- ТЭС – тепловая электростанция;
- ТЭЦ – теплоэлектроцентраль;
- ЦКС – циркулирующий кипящий слой;
- ЦКТИ – Центральный котлотурбинный институт;
- IEA – International Energy Agency;
- LDSA – Laser Diffraction Spray Analyzer;
- $k_t$  – удельная кинетическая энергия турбулентности,  $\text{м}^2/\text{с}^2$ ;
- PDPA – Particle Doppler Phase Analyzer;
- PIV – Particle Image Velocimetry;
- PTV – Particle Tracking Velocimetry;
- $p_0$  – избыточное давление в пневматической вихревой форсунке, Па;
- $p_{\text{дин}}$  – динамическое давление, Па;
- $Q$  – критерий визуализации вихревых структур;
- $Q_a$  – расход воздуха в пневматической вихревой форсунке, кг/ч;
- $Q_l$  – расход жидкости в пневматической вихревой форсунке, кг/ч;
- $Q_0$  – расход воздуха в вихревых камерах сгорания,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;

$Re$  – число Рейнольдса

SP – Shadow Photography;

$U$  –  $x$ -компонента скорости, м/с;

$U'$  – пульсации  $x$ -компоненты скорости, м/с;

$V$  –  $y$ -компонента скорости, м/с;

$V'$  – пульсации  $y$ -компоненты скорости, м/с;

$V_0$  – среднерасходная скорость на выходе из основного сопла вихревой камеры сгорания, м/с;

$V_{бок}$  – начальная скорость на выходе из боковых сопел четырехвихревой камеры сгорания, м/с;

$V_{фр}$  – начальная скорость на выходе из фронтальных сопел четырехвихревой камеры сгорания, м/с;

$W$  –  $z$ -компонента скорости, м/с;

$W'$  – пульсации  $z$ -компоненты скорости, м/с;

$\beta$  – отношение скоростей потоков через боковые и фронтальные сопла четырехвихревой камеры сгорания;

$\gamma$  – отношение скоростей потоков через основные и вторичные сопла вихревых камер сгорания с горизонтальной осью закрученного потока;

$\lambda_2$  – критерий визуализации вихревых структур;

$\rho$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Gonzalez-Salazar M.A., Kirsten T., Prchlik L. Review of the operational flexibility and emissions of gas- and coal-fired power plants in a future with growing renewables // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2018. – Vol. 82. – P. 1497-1513.
2. Башкова М.Н., Казимиров С.А., Темлянцев М.В., Багрянцев В.И., Рыбушкин А.А., Слажнева К.С. Практика и перспективы применения различных способов сжигания твердого топлива в теплоэнергетических установках // *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. – 2014. – № 2 (8). – С. 24-32.
3. Бабенко Г.С., Захаров Г.А., Сопова В.Н., Цыганкова К.В. Слоевое сжигание низкосортных углей с высоким влагосодержанием в механизированных топках водогрейных котлов малой мощности // *Вестник инженерной школы ДВФУ*. – 2017. – № 4 (33). – С. 44-55.
4. Мурко В.И., Карпенко В.И., Федяев В.И., Черных Д.А., Зеликов Е.Н., Соловьев А.В., Жаворонков А.Н. Результаты испытаний топливной присадки на котле со слоевым сжиганием угля // *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии*. – 2017. – Т. 10, № 8. – С. 993-999.
5. Singh R.I., Kumar R. Current status and experimental investigation of oxy-fired fluidized bed // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – № 61. – P. 398–420.
6. Sher F., Pans M.A., Sun C., Snape C., Liu H. Oxy-fuel combustion study of biomass fuels in a 20 kW fluidized bed combustor // *Fuel*. – 2018. – № 215. – P. 778–786.
7. Duan F., Chyang C., Zhang L., Yin S. Bed agglomeration characteristics of rice straw combustion in a vortexing fluidized-bed combustor // *Bioresource Technology*. – 2015. – № 183. – P. 195–202.

8. Бурдуков А.П., Матузов С.В. Сжигание отходов углепереработки в котле кипящего слоя // Уголь. – 2012. – № 12. – С. 69–72.
9. Шемякин В.Н., Карапетов А.Э., Фрайман Г.Б., Пудовкин Е.М. Сжигание горючих сланцев в котлах с топками низкотемпературного кипящего слоя // Уголь. – 2004. – № 9. – С. 26–30.
10. Лейкин В.З. Создание оборудования и отработка технологии подготовки топлива для сжигания и газификации в циркулирующем и стационарном кипящем слое // Теплоэнергетика. – 2008. – № 1. – С. 71–80.
11. Рябов Г.А., Фоломеев О.М., Шапошник Д.А. Исследование систем улавливания и возврата золы на установках с циркулирующим кипящим слоем // Теплоэнергетика. – 2002. – № 8. – С. 18–24.
12. Алехнович А.Н., Богомоллов В.В., Артемьева Н.В. Совместное факельное сжигание биомасс с углем // Теплоэнергетика. – 2001. – № 2. – С. 26–33.
13. Котлер В.Р. Ступенчатое сжигание - основной метод подавления оксидов азота на пылеугольных котлах // Теплоэнергетика. – 1989. – № 8. – С. 41–44.
14. Котлер В.Р. Усовершенствованный метод двухступенчатого сжигания топлива // Теплоэнергетика. – 2007. – 2. – С. 73–75.
15. Архипов А.М., Путилов В.Я. Ступенчатое факельное сжигание кузнецких углей на ТЭС // Теплоэнергетика. – 2009. – № 8. – С. 52–57.
16. Осинцев К.В. Классификация и анализ эффективности методов низкотемпературного факельного сжигания угольной пыли на котлах // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2010. – № 32. – С. 20–26.
17. Котлер В.Р. Специальные топки энергетических котлов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 104 с.
18. Петрик П.Т., Афанасьев Ю.О., Богомоллов А.Р., Козлова Г.С., Дадонов П.В. Гравитационно-рециркуляционная вихревая топка для сжигания

высокозольного топлива // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2009. – № 2. – С. 136–139.

19. Ковалев А.П., Ипполитов А.С. Исследование двухкамерной циклонной топки с пересекающимися струями // Энергомашиностроение. – 1960. – № 11. – С. 16–20.

20. Белосельский Б.С., Ипполитов А.С., Быстрицкий Г.Ф. Исследование сжигания твердых топлив в условиях пересекающихся струй // Теплоэнергетика. – 1965. – № 10. – С. 38–41.

21. Котлер В.Р., Миронов С.Н. Исследование полуоткрытой топки с встречно-наклонным расположением горелок // Теплоэнергетика. – 1972. – № 3. – С. 76–78.

22. Миронов С.Н., Котлер В.Р. Исследование работы гамма-топки при сжигании канско-ачинских углей // Энергетическое использование углей Канско-Ачинского бассейна. – Москва: Энергия, 1970.

23. Померанцев В.В., Кортиков Н.Н., Ветрова Н.В. Исследование аэродинамики нижнего дутья для организации многократной циркуляции частиц топлива в вихревой топке котла БКЗ-210-140Ф Тюменской ТЭЦ // Энергомашиностроение. – 1978. – № 10. – С. 1–3.

24. Рундыгин Ю.А., Шестаков С.М., Ахмедов Д.Б. и др. Освоение и исследование котла БКЗ-420-140-9 с вихревой топкой ЛПИ // Теплоэнергетика. – 1988. – № 1. – С. 12–16.

25. Серант Ф.А., Шестаков С.М., Померанцев В.В. и др. Сжигание немолотых азейских бурых углей в низкотемпературной вихревой топке по схеме ЛПИ-ИТЭЦ-10 // Теплоэнергетика. – 1983. – № 7. – С. 36–41.

26. Афанасьев Ю.О., Петрик П.Т., Пермякова Г.С., Кочетков В.С. Разработка конструкции гравитационно-рециркуляционной вихревой топки // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2006. – № 6.2. – С. 120–122.

27. Петрик Ю.О., Афанасьев П.Т., Богомолов А.Р., Козлова Г.С., Дадонов П.В. Гравитационно-рециркуляционная вихревая топка для сжигания высокозольного топлива // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2009. – № 2. – С. 136–139.
28. Штым А.Н., Штым К.А., Рудницкий В.А., Маняхин Ю.И., Обухов И.В. Циклонный предтопок. Патент РФ № 2190154. Зарегистрирован: 19.10.2000.
29. Саломатов В.В. Научные основы создания и малозатратной реконструкции угольных парогенераторов под вихревую технологию сжигания // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324. – № 4. – С. 25–37.
30. Саломатов В.В., Красинский Д.В., Аникин Ю.А., Ануфриев И.С., Шарыпов О.В., Энхжаргал Х. Экспериментальное и численное исследование аэродинамических характеристик закрученных потоков в модели вихревой топки парогенератора // Инженерно-физический журнал. – 2012. – Т. 85, №. 2. – С. 266–276.
31. 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.
32. Cheng J., Zhou J., Li Y., Liu J., Cen K. Effects of pore fractal structures of ultrafine coal water slurries on rheological behaviors and combustion dynamics // Fuel. – 2008. – Vol. 87, No. 12. – P. 2620–2627.
33. Vershinina K.Y., Glushkov D.O., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Differences in the ignition characteristics of coal–water slurries and composite liquid fuel // Solid Fuel Chemistry. – 2016. – Vol. 50, No. 2. – P. 88–101.
34. Kurgankina M.A., Nyashina G.S., Strizhak P.A. Prospects of thermal power plants switching from traditional fuels to coal-water slurries containing

petrochemicals // *Science of The Total Environment*. – 2019. – Vol. 671. – P. 568–577.

35. Glushkov D.O., Strizhak P.A., Vershinina K.Yu. Minimum temperatures for sustainable ignition of coal water slurry containing petrochemicals // *Applied Thermal Engineering*. – 2016. – Vol. 96. – P. 534–546.

36. Khodakov G.S. Coal-water suspensions in power engineering // *Thermal Engineering*. – 2007. – Vol. 54, No. 1. – P. 36–47.

37. Strizhak P.A., Vershinina K.Yu. Maximum combustion temperature for coal-water slurry containing petrochemicals // *Energy*. – 2017. – Vol. 120. – P. 34–46.

38. Wang R., Liu J., Gao F., Zhou J., Cen K. The slurring properties of slurry fuels made of petroleum coke and petrochemical sludge // *Fuel Processing Technology*. – 2012. – Vol. 104. – P. 57–66.

39. Chen X., Zhao L., Zhang X., Qian C. An investigation on characteristics of coal–water slurry prepared from the solid residue of plasma pyrolysis of coal // *Energy Conversion and Management*. – 2012. – Vol. 62. – P. 70–75.

40. Tu Y., Xu Z., Wang W. Method for evaluating packing condition of particles in coal water slurry // *Powder Technology*. – 2015. – Vol. 281. – P. 121–128.

41. He Q., Xie D., Xu R., Wang T., Hu B. The utilization of sewage sludge by blending with coal water slurry // *Fuel*. – 2015. – Vol. 159. – P. 40–44.

42. Yuan K., Chen L., Wu C. Study on characteristics of different types of nozzles for coal-water slurry atomization // *J. Therm. Sci.* – 2001. – Vol. 10. – P. 331–335.

43. Саломатов В.В. Природоохранные технологии на тепловых и атомных электростанциях. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – 853 с.

44. Болтенко Э.А. Методы исследования теплогидравлических характеристик и структуры закрученных потоков // *Теплоэнергетика*. – 2008. – № 12. – С. 44–49.

45. Коротков М.А., Адаев И.С., Левин И.А. Измерение параметров воздушного потока в системах вентиляции и кондиционирования // Мир измерений. – 2007. – № 10. – С. 40–44.
46. Филиппов В.М. Пульсационные характеристики потока в низкотурбулентной аэродинамической трубе малых скоростей Т-124 // Ученые записки ЦАГИ. – 2008. – № 1-2. – С. 68–80.
47. Накоряков В.Е., Бурдуков А.П., Кашинский О.Н., Гешев П.И. Электродиффузионный метод исследования локальной структуры турбулентных течений. – Новосибирск: Институт теплофизики СО АН СССР, 1986. – 247 с.
48. Ринкевичус Б.С. Лазерная диагностика потоков. – Москва: Изд-во МЭИ, 1990. – 63 с.
49. Fan Y., Hashimoto N., Nishida H., Ozawa Y. Spray characterization of an air-assist pressure-swirl atomizer injecting high-viscosity Jatropha oils // Fuel/ - 2014/ - Vol. 121. – P. 271–283.
50. Breitenbach J., Kissing J., Roisman I.V., Tropea C. Characterization of secondary droplets during thermal atomization regime // Exp. Therm. Fluid Sci. – 2018. – Vol. 98. – P. 516–522.
51. Wang Z., Xu H., Jiang C., Wyszynski M.L. Experimental study on microscopic and macroscopic characteristics of diesel spray with split injection // Fuel. – 2016. – Vol. 174. – P. 140–152.
52. Chen B., Gao D., Liang Y., Zhao J., Sun Y. Experimental investigation of atomization and droplet turbulence characteristics of a twin-fluid nozzle with different self-excited vibrating cavity structures // Exp. Therm. Fluid Sci. – 2018. – Vol. 99. – P. 525 – 536.
53. Васильев Л.А. Теневые методы. – Москва: Изд-во Наука, 1968. – 400 с.
54. Ghiji M., Goldsworthy L., Garaniya V., Brandner P.A., Hield P., Novozhilov V., Moinuddin K., Joseph P. Effect of residual air bubbles on diesel spray structure at the start of injection // Fuel. – 2019. – Vol. 241. – P. 25–32.

55. Wu S., Yang S., Wooldridge M., Xu M. Experimental study of the spray collapse process of multi-hole gasoline fuel injection at flash boiling conditions // *Fuel*. – 2019. – Vol. 242. – P. 109–123.
56. Liu F., Li Z., Wang Z., Dai X., He X., Lee C. Microscopic study on diesel spray under cavitating conditions by injecting fuel into water // *Applied Energy*. – 2018. – Vol. 230. – P. 1172–1181.
57. Ochoterena R., Lif A., Nydén M., Andersson S., Denbratt I. Optical studies of spray development and combustion of water-in-diesel emulsion and microemulsion fuels // *Fuel*. – 2010. – Vol. 89. – P. 122–132.
58. Алексеенко С.В., Бильский А.В., Маркович Д.М. Применение метода цифровой трассерной визуализации для анализа турбулентных потоков с периодической составляющей // *Приборы и техника*. – 2004. – № 5. – С. 145–153.
59. Gad H.M., Ibrahim I.A., Abdel-baky M.E., Abd El-samed A.K., Farag T.M. Experimental study of diesel fuel atomization performance of air blast atomizer // *Exp. Therm. Fluid Sci*. – 2018. – Vol. 99. – P. 211–218.
60. Payri R., Viera J.P., Wang H., Malbec L. Velocity field analysis of the high density, high pressure diesel spray // *Int. J. Multiphase Flow*. – 2016. – Vol. 80. – P. 69–78.
61. Si Z., Ashida Y., Shimasaki N., Nishida K., Ogata Y. Effect of cross-flow on spray structure, droplet diameter and velocity of impinging spray // *Fuel*. – 2018. – Vol. 234. – P. 592–603.
62. Scarano F., Riethmuller M.L. Advances in iterative multigrid PIV image processing // *Experiments in Fluids*. – 2000. – Vol. 29, No. 7. – P. 51–60.
63. Кутателадзе С.С. Анализ подобия и физические модели. – Новосибирск: Наука, 1986. – 295 с.
64. Красинский Д.В. Численное моделирование двухфазных турбулентных реагирующих течений при сжигании пылеугольного топлива в топочных

камерах вихревого типа: дисс. канд. техн. наук: 05.13.16. – Новосибирск, 1999 г. – 145 с.

65. Токарев М.П., Маркович Д.М., Бильский А.В. Адаптивные алгоритмы обработки изображений частиц для расчета мгновенных полей скорости // Вычислительные технологии. – 2007. – Т. 12, № 3. – С. 109–131.

66. Jeong J., Hussain F. On the identification of a vortex // J. Fluid Mech. – 1995. – Vol. 285. – P. 69–94.

67. Dubief Y, Delcayre F. On coherent-vortex identification in turbulence // Journal of Turbulence. – 2000. – Vol. 11. – P. 22.

68. Литвинов И.В., Шторк С.И., Алексеенко С.В. Экспериментальное исследование сильнозакрученного течения в тангенциальном завихрителе // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2012. – № 3(91). – С. 129–135.

69. Litvinov I.V., Shtork S.I., Kuibin P.A., Alekseenko S.V., Hanjalic K. Experimental study and analytical reconstruction of precessing vortex in a tangential swirler // International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2013. – № 42. – P. 251–264.

70. Мальцев Л.И. Пневматическая форсунка. Патент РФ на изобретение № 2346756. 2007.

71. Gobyzov O., Lozhkin Yu., Ryabov M., Markovich D. Experimental study of submillimeter droplets dynamics and breakup in continuous supersonic flow terminated by shock wave // EPJ Web of Conf. – 2016. – Vol. 114. – Article No. 02031.

72. 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.

73. 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.
74. 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>
75. Шадрин Е.Ю. Исследование пространственной структуры закрученного потока в модели вихревой топки нового типа бесконтактными оптическими методами // Материалы 51-ой международной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс»: Физика сплошных сред / Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2013. 103 с. – С. 34.
76. 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.
77. Шадрин Е.Ю. Исследование пространственной структуры турбулентного изотермического потока в моделях вихревой топки // Материалы 52-ой международной студенческой конференции МНСК-2014: Физика сплошных сред / Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2014. – 75 с. – С. 72.
78. Шадрин Е.Ю., Ануфриев И.С. Пространственная структура потока в вихревой топке // Тезисы докладов XIII Всероссийской школы-конференции молодых ученых с международным участием «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики», Новосибирск, 2014. – С. 186.

79. Anufriev I.S., Shadrin E.Yu., Sharypov O.V. Swirl flow structure in a novel vortex furnace design // Abstract book. 9<sup>th</sup> International Conference on Advanced Computational Engineering and Experimenting, Munich, Germany, 2015. – P. 85.
80. 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.
81. Шадрин Е.Ю. Исследование пространственной структуры турбулентного изотермического потока в модели вихревой топки // Материалы 53-ей международной студенческой конференции МНСК-2015: Физика сплошных сред / Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2015. – 84 с. – С. 80.
82. 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.
83. Ануфриев И.С., Кузнецов Г.В., Шадрин Е.Ю., Шарыпов О.В., Аникин Ю.А. и др. Исследование структуры течения в новой конструкции вихревой топки методом цифровой трассерной визуализации // Известия Томского политехнического университета. Энергетика. – 2013. – Т. 322, № 4. – С. 31–35.
84. 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.
85. 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.
86. 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>

87. 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.

88. 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.

89. 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.

90. 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. – Vol. 159. – Article No. 0045. DOI: 10.1051/epjconf/201715900045

91. 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 13<sup>th</sup> Asian Symposium on Visualization (ASV 13), Novosibirsk, Russia. – Article No. 137. <http://itam.nsc.ru/conferences/13asv/>

92. Шадрин Е.Ю., Ануфриев И.С., Папулов А.П. Исследование структуры потока и нестационарных эффектов в модели вихревой топки нового типа // Тезисы докладов XIV Всероссийской школы-конференции молодых ученых с международным участием «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики». – Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2016. – 209 с. – С. 109–110.

93. 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.

94. 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.

95. 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

96. 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

97. 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

98. 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

99. 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

100. 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
101. 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
102. 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
103. 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
104. 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.