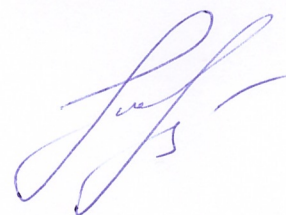


**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

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

*Гореликов Евгений Юрьевич*



**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД**

об основных результатах подготовленной научно-квалификационной работы  
(диссертации)

*«Физическое моделирование закрученных потоков в элементах энергетических  
установок»*

Направление подготовки:

03.06.01 – Физика и астрономия

Специальности подготовки: 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника

Научный  
руководитель  
д.ф.-м.н  
*Шторк С.И.*

Новосибирск 2020

## Актуальность исследования

Около 70 % всей генерируемой мощности в России приходится на тепловые электрические станции, сжигающие ископаемое органическое топливо (согласно информационно-аналитическому докладу «ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА И ЦЕНТРАЛИЗОВАННОЕ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ РОССИИ», ФГБУ «РЭА» Минэнерго России, 2018). Основным топливом в теплоэнергетике и теплоснабжении является газовое топливо (74 %). Доля твердого топлива составляет  $\approx 21,5$  %, нефтетоплива  $\approx 2,8$  %, прочих видов топлива всего  $\sim 1,6$  %. В Сибирском и Дальневосточном федеральных округах преобладает твердое топливо. В недавно принятом документе «Энергетическая стратегия России на период до 2035 года» (распоряжение Правительства РФ от 9 июня 2020 г. № 1523-р) в направлениях развития энергетики указано «уменьшение негативного воздействия отраслей ТЭК (топливно-энергетического комплекса) на окружающую среду и адаптацию их к изменениям климата», а в качестве приоритета государственной энергетической политики «переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике» и «энергетическая эффективность». Таким образом, перед энергетикой стоит задача повышения эффективности и экологичности сжигания ископаемого топлива. Для достижения поставленных задач необходимо применять комплексные подходы, включающие в себя как конструктивные, так и аэродинамические способы, направленные на интенсификацию смесеобразования воздух-топливо. [1]

Закрученные потоки широко используются во многих промышленных установках, в том числе в гидротурбинных агрегатах для производства электроэнергии [2], в циклонных установках для удаления частиц из жидкости посредством вихревого разделения, в солнечных реакторах для повышения эффективности преобразования энергии [3], в вихревых горелках для лучшего перемешивания топлива. Особенно важны закрученные потоки для камер сгорания, поскольку размер зоны горения может быть значительно уменьшен за счет формирования тороидальной зоны рециркуляции, что делает возможным

проектирование более компактных устройств [4]. Вихревые горелочные устройства получили широкое распространение в энергетике. Закрутка горелочных струй улучшает воспламенение топливовоздушной смеси, повышает устойчивость горения и полноту выгорания топлива. С увеличением параметра крутки увеличивается угол раскрытия струи и расширяются её границы, возрастает количество газов, рециркулирующих к устью факела. Одновременно уменьшается дальнобойность факела. При вихревом способе сжигания не только повышается эффективность горения, но и снижается концентрация вредных выбросов.

В процессе горения в факеле, имеющем высокую температуру, определяющим фактором являются аэродинамические параметры, отвечающие за подвод окислителя к поверхности горячей частицы. Поэтому в современных камерах сгорания широко используются аэродинамические методы стабилизации пламени, такие как, завихрение топливовоздушной смеси. Центральная зона рециркуляции образуется в закрученном потоке, что позволяет продуктам несгоревшего топлива возвращаться в область высоких температур, что, в свою очередь, стабилизирует горение. Формирование центральной зоны рециркуляции почти всегда сопровождается нестационарным вихревым явлением - прецессирующим вихревым ядром (ПВЯ). В ряде случаев, повышенный уровень турбулентности, вызванный ПВЯ, улучшает смешение топлива с окислителем, дополнительно повышая стабильность процессов воспламенения и горения топлива. Таким образом, кинетика проходящих в топочной камере реакций тесно связана с аэродинамикой пылеугольного факела.

Активно наряду с методами экспериментального моделирования развиваются методы вычислительной гидродинамики, описывающие численные решения уравнений Навье-Стокса при заданных граничных условиях и различных допущениях. В зависимости от поставленной задачи используют разные модели турбулентности (RANS, LES, DES и т.д.). Главным преимуществом использования численного моделирования является получение информации о структуре течения в областях недоступных для экспериментальных методов диагностики потоков.

Применение расчетных методов в элементах энергетического оборудования связано с решением сопряженных задач со сложным теплообменом в реагирующем потоке. Тем не менее методы имеют ряд ограничений, а также требуют постоянной верификации экспериментом.

## **Цель и задачи**

Целью работы является развитие методов экспериментального комплексного изучения явлений на базе газовых и угольных горелок и получение новой экспериментальной информации о структуре закрученного реагирующего потока.

В соответствии с целью работы были поставлены следующие **задачи**:

Разработка автоматизированного комплекса по сбору экспериментальных данных с использованием современных экспериментальных методик: система высокоскоростной съёмки, измерительный комплекс ЛДА, прецизионные датчики давления, температуры, комплекс для анализа продуктов горения.

Получение комплексной информации о структуре закрученного реагирующего потока в модельной газовой горелке в широком диапазоне чисел Рейнольдса и варьировании закрутки потока.

Получение комплексной информации о структуре закрученного реагирующего потока в модели двухступенчатой пылеугольной горелки при варьировании закрутки потока (созакрутка и противокрутка).

## **Научная новизна**

Применение современной автоматизированной измерительной системы ЛДА для изучения закрученного течения, где в качестве источника Доплеровского сигнала используются частицы твердого топлива. Таким образом, это позволило получить средние профили скоростей внутри факела, которые характеризуют именно движение реагирующих частиц.

Изучена динамика и область применимости интегрального параметра закрутки потока при варьировании расхода и изменении угла поворота лопаток завихрителя.

Получены обширные массивы экспериментальных данных, необходимые для верификации численных и аналитических расчётов, которые включают распределения скоростей, распределения СКО пульсаций скоростей, температуры на стенке и в факеле, высокоскоростную визуализацию в различных режимах горения.

Полученные данные в эксперименте на модели двухступенчатой пылеугольной горелки подтвердили проведенные ранее изотермические опыты. Было показано, что комбинирование направления закрутки в основной и поджиговой секциях позволяет аэродинамическими методами эффективно формировать структуру результирующего потока. В частности, было показано, что противокрутка обеспечивает эффективное взаимодействие горелочной струи поджиговой секции с потоком, формируемым в основной секции.

## **Теоретическая и практическая значимость**

В рамках ПНИР «Разработка технологий, направленных на повышение энергоэффективности факельного сжигания низкосортных углей и отходов их переработки в энергетических котлах с использованием механохимической и электрохимической активации углей» проведены экспериментальные исследования экспериментальных образцов с использованием лабораторного стенда тепловой мощностью 50 кВт для определения основных характеристик факела, динамики воспламенения и выгорания угля при различных способах его

механохимической активации. Выполнен анализ результатов для исследования процессов воспламенения и горения низкосортных углей и отходов их переработки при различных способах механохимической активации угля.

Также экспериментальные данные, были использованы для построения полезной модели. Получен патент **RU 191614 U1** «Двухступенчатая вихревая горелка со ступенью для генерации стационарного спирального вихря» Шторк Сергей Иванович, Гореликов Евгений Юрьевич, Литвинов Иван Викторович, Гешева Елизавета Сергеевна, Алексеенко Сергей Владимирович.

Результаты работ с использованием лабораторного стенда тепловой мощностью 50 кВт, полученные при выполнении хоз. договора с ТКЗ “Красный котельщик” активно используются для верификации численных расчётов на предприятии заказчика.

### **Степень достоверности результатов.**

Достоверность результатов обеспечивалась использованием современных хорошо зарекомендованных себя измерительных методик (ЛДА, прецизионные датчики давления, температуры и комплекса для анализа продуктов горения), предварительной настройкой и калибровкой оборудования, а также воспроизводимостью результатов с учетом рассчитанных погрешностей и сопоставлением с результатами других исследователей.

### **Апробация результатов**

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на ведущих российских и международных конференциях: XIX Международная конференция по методам аэрофизических исследований (ICMAR Новосибирск, 2018), 9<sup>th</sup> European Postgraduate Fluid Dynamics Conference, (Ильменау, Германия 2019), 25<sup>th</sup> International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (Милан, Италия 2020) (Submitted ICTAM2020+1, 2021, Milano, Italy), «XXXIV Сибирский теплофизический семинар», (Новосибирск, 2018 г), X Всероссийская конференция

с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения» (Новосибирск, 2018 г), "Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках" (Рыбинск, 2019 г). По теме работы опубликовано 12 статей в печатных изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, рекомендованных ВАК. Получен патент.

**Положения, выносимые на защиту:**

- результаты исследования влияния закрутки потока на эффективность горения предварительно перемешанной топливно-воздушной смеси;
- результаты адаптации и верификации полуэмпирической модели, позволяющей количественно оценить интегральный параметр закрутки потока;
- результаты исследования закрученного потока при горении угольного топлива на стенде тепловой мощностью 50 кВт при варьировании закрутки потока (созакрутка и противозакрутка).

**Личный вклад автора** заключается в модернизации экспериментальных стендов и проведении пусконаладочных работ, адаптации измерительного оборудования к условиям экспериментов, составление ТЗ для написания компьютерных программ управления и сбора экспериментальных данных, проведение экспериментальных исследований закрученного потока на различных модельных установках, обработке и анализе экспериментальных данных, а также подготовке публикаций.



## Методология и методы исследования

Исследования проводились на двух экспериментальных стендах ИТ СО РАН: лабораторный стенд тепловой мощностью 50 кВт (рисунок 1); горелочное устройство с радиальным завихрителем (ГУРЗ-50) (рисунок 2). Ввиду невозможности проведения экспериментальных исследований на реальных энергетических котлах используются упрощенные уменьшенные модели.

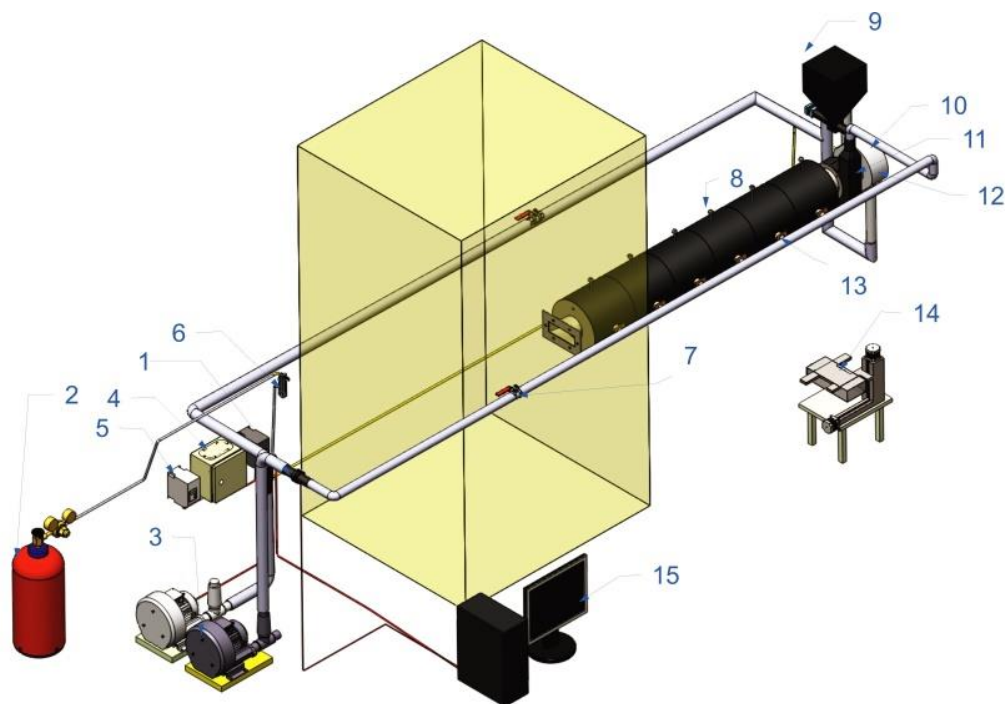


Рисунок 1. Лабораторный стенд тепловой мощностью 50 кВт 1 – расходомеры, 2 – газовый баллон, 3 – воздуходувка, 4 – частотный преобразователь, 5 – блок сбора данных, 6 – ротаметре, 7 – вентили, 8 – термопары, 9 – питатель, 10 – ЗЗУ, 11 – улиточный завихритель, 12 – аксиальный завихритель, 13 – смотровые окна, 14 – система ЛДА, 15 – ПК.

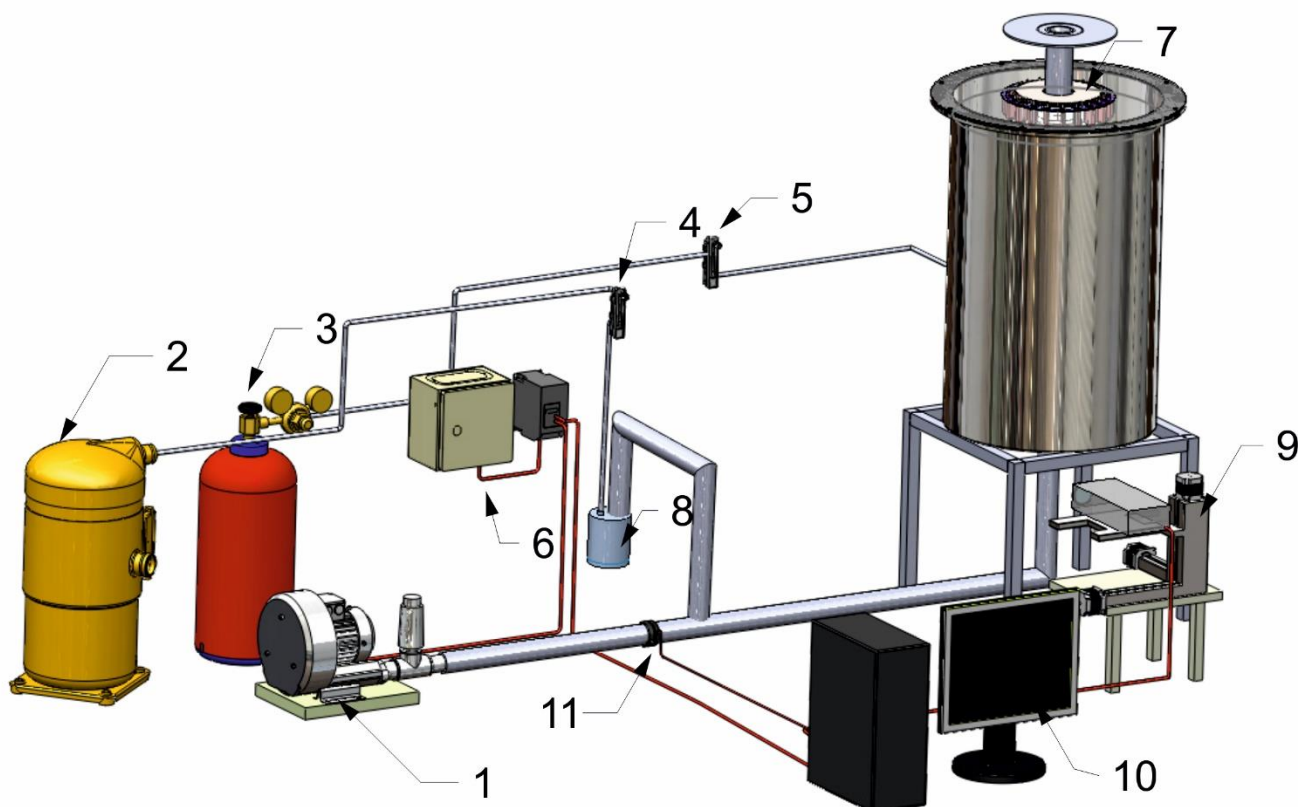


Рисунок 2. Горелочное устройство с радиальным завихрителем (ГУРЗ-50): 1 – воздуходувка, 2 – воздушный компрессор, 3 – баллон с пропаном, 4 – ротаметр для воздуха, 5 – ротаметр для пропана, 6 – система управления и сбора данных, 7 – радиальный завихритель, 8 – атомайзер, 9 – ЛДА, 10 – ПК, 11 – ультразвуковой расходомер.

Оба экспериментальных стенда оснащены воздуходувками, расходомерами и частотными преобразователями, что позволяет управлять рабочими режимами. Стенды оснащены системой газового анализа «Тест-1» и восьмиканальными модулями ОВЕН с термопарами К и S – типа.

Лабораторный стенд тепловой мощностью 50 кВт оснащен системой расхода воздуха на газовую и угольную ступень, которая позволяет посредством частотных преобразователей управлять роторными воздуходувками. Такая система позволяет управлять расходом воздуха в диапазоне от 0 до 100 м<sup>3</sup>/ч на каждую из ступеней стенда. Шнековый питатель так же оснащен частотным преобразователем и установлен на платформенных весах и обеспечивает максимальный расход пылеугольного топлива до 25 кг/ч. Основными режимными параметрами являются

расход твердого топлива, расход воздуха на угольную ступень и ориентация ступеней (созакрутка и противокрутка).

Горелочное устройство с радиальным завихрителем так же оснащен системой расхода воздуха, которая позволяет при помощи частотного преобразователя управлять роторной воздуходувкой. Расход горючего газа (пропана) контролируется при помощи ротаметра фирмы Aalborg, который имеет калибровочные кривые для данного типа газа. Система поворота лопаток оснащена шаговым двигателем с системой позиционирования лопаток по концевым датчикам. Положение срабатывание датчика соответствует максимальному углу поворота лопатки. Основными режимными параметрами являются расход воздуха и угол поворота лопатки завихрителя.

На обоих экспериментальных стендах применяется метод лазерно-доплеровской анемометрии для построения профилей скорости в реагирующем потоке. Отличие заключается в том, что в лабораторном стенде тепловой мощностью 50 кВт источниками доплеровского сигнала являются частицы твердого топлива, а в стенде ГУРЗ-50 используется оксид титана в качестве трассеров для засеивания потока.

Интегральный параметр закрутки потока [5], [6] обычно вводят как:

$$Sp = \frac{\int_0^{\infty} (\rho u w + \rho \overline{u' w'}) r^2 dr}{R \int_0^R [\rho u^2 + \rho \overline{u'^2} + (p - p_{\infty})] r dr}$$

Или опуская члены с давлением и пульсационными составляющими:

$$S = \frac{\int_0^{\infty} \rho u w r^2 dr}{R \int_0^R \rho u^2 r dr}$$

где  $\rho$  – плотность,  $u$  – аксиальная скорость потока  $w$  – тангенциальная скорость потока,  $r$  – радиус сопла.

В рамках работы произведен анализ соответствующих упрощений в выборе параметра закрутки потока, а также области его применимости.

Для геометрии улиточного завихрителя согласно ОСТ 24.030.26-72 для расчета применяется геометрический параметр крутки  $Sn$ .

$$Sn = \frac{\pi A D_{pv}}{lb}$$

где  $D_{pv} = \sqrt{d^2 - D^2}$  – диаметр круга, равновеликого выходному сечению кольцевого канала,  $b$  – ширина подводящего патрубка,  $A$  – расстояние от оси горелки до оси патрубка,  $l$  – длина подводящего патрубка.

Для геометрии тангенциальных лопаточных завихрителей согласно ОСТ 24.030.26-72 при количестве лопаток более 16 штук для расчета геометрического параметра крутки с хорошей точностью можно применять формулу:

$$Sn = \frac{D_{pv}}{2b_l} \tan \beta_l$$

где  $D_{pv} = \sqrt{d^2 - D^2}$  – диаметр круга, равновеликого выходному сечению кольцевого канала,  $b_l$  – ширина лопатки,  $\beta_l$  – угол образованный плоскостью лопатки.

Лабораторный стенд тепловой мощностью 50 кВт подключен к камере дожигания. Горячие дымовые газы проходят через центробежно-барботажный аппарат (ЦБА), очищаются от золы и механического недожога и через дымосос выбрасываются в атмосферу. Таким образом камера дожигания находится под разрежением 5–10 мм водяного столба.

Оптические измерения проводились с использованием современной измерительной системы лазерно-доплеровской анемометрии (ЛДА) ЛАД 06-и, разработанной в ИТ СО РАН. Метод ЛДА основан на измерении доплеровского сдвига частоты лазерного света который рассеивается на специальных частицах – трассер добавленных в поток. В экспериментах использовались угольные частицы размерами 30–180 мкм, а также порошок оксида титана 1–5 мкм. ЛАД 06И позволяет измерять две проекции вектора скорости (тангенциальную, осевую) при перемещении позиционирующего устройство вдоль радиуса от ближней стенки до центральной оси. Размер измерительного объёма в воздухе 0,1×0,1×0,5 мм. В

каждой измерительной точке набиралась статистика 1000 вспышек для каждой компоненты скорости. Это обеспечивало необходимую достоверность измерений (~ 95 %) скорости в турбулентном закрученном потоке.

Также для визуализации режимов горения использовалась цифровая фотокамера Canon7D.

## Глава 1. Режимы горения в устройстве с радиальным завихрителем ГУРЗ-50

В работе использовалось горелочное устройство с завихрителем радиального типа рисунок 3.

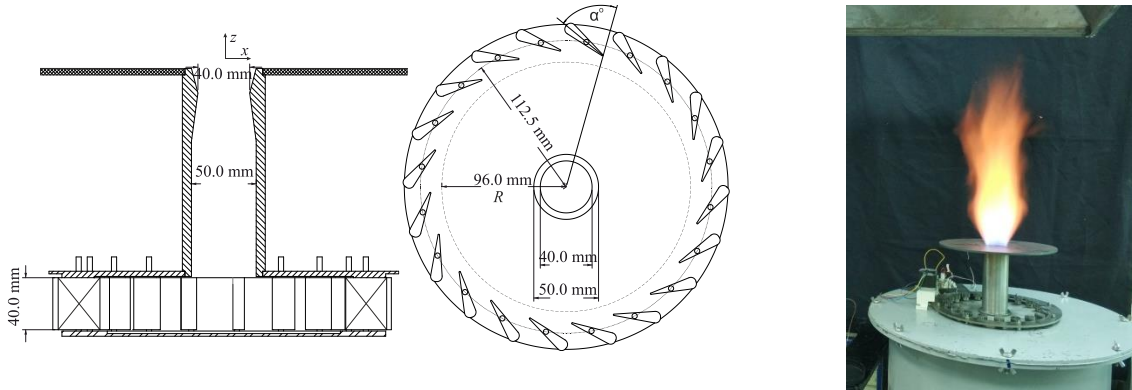


Рисунок 3. Эскиз и фотография, разработанного горелочного устройства радиального типа с возможностью непрерывного варьирования параметра закрутки.

Геометрия горелочного устройства схожа с конструкциями типичных моделей газотурбинных установок [7,8]. Воздух подается воздуходувкой и измеряется ультразвуковым расходомером в пределах погрешности 1,5 %. Воздух подается в успокоительную камеру диаметром 500 мм и высотой 800 мм. На входе в успокоительную камеру дополнительно установлена выравнивающая сетка. Далее поток закручивается с помощью направляющего аппарата (НА) и через сопло смешения выходит в открытое пространство. На срезе сопла установлен защитный экран диаметром 250 мм для исключения инжекции воздуха снизу. Направляющий аппарат состоит из 20 лопаток с длиной 36,5 мм и шириной 9 мм, радиус округления задней части равен 4,5 мм. Между лопатками НА есть возможность подавать газообразное топливо, которое эффективно перемешивается закрученным потоком.

В результате модернизации, аэродинамический стенд был дополнен контроллером расхода для точного регулирования расхода пропана, пультом управления контроллера, а также двигателем вместе с оригинальным программным обеспечением для варьирования параметра крутки в режиме реального времени. Таким образом, стенд позволяет в автоматизированном режиме задавать и

поддерживать расход воздуха, пропана, а также варьировать параметр крутки с помощью ПК. В качестве трассеров в изотермическом случае использовались капельки растительного масла, получаемые в генераторе Ласкин. Для реагирующего случая был разработан генератор частиц оксида титана, работающий на сжатом воздухе.

Распределения скорости измерялись с помощью лазерно-доплеровского анемометра (ЛДА) «ЛАД 06–и». В каждой измерительной точке набиралась статистика 5000 вспышек. В качестве трассеров использовались капли растительного масла, генерируемых в сопле Ласкина и подмешивающихся в поток с учтённым расходом воздуха 0,3 л/с. Частота периодических пульсаций давления измерялась с помощью двух отборников давления и измерительных микрофонов Behringer ECM 8000, установленных на срезе сопла горелочного устройства с двух противоположных сторон по аналогии с работой [9]. Показано с помощью ЛДА симметрия потока. Для изотермического случая распределения средней скорости при варьировании угла установки лопаток направляющего аппарата представлены на рисунок 4.

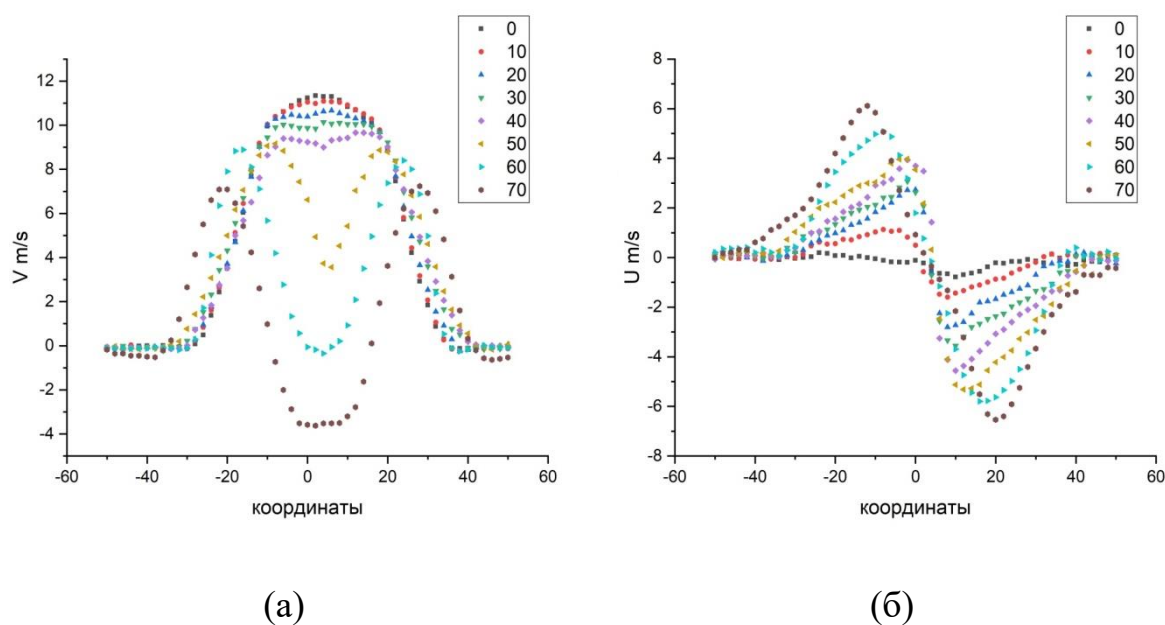


Рисунок 4. Профили средней (а) аксиальной и (б) тангенциальной скорости в изотермическом случае в зависимости от угла поворота лопатки.

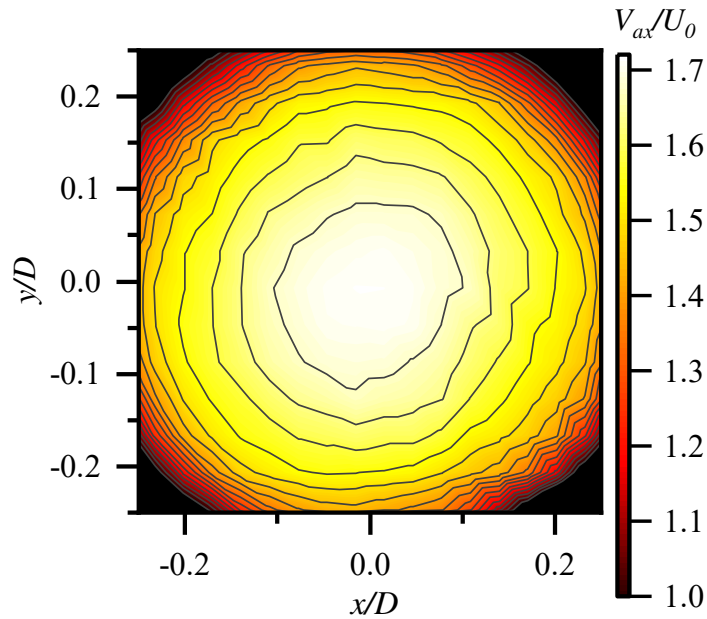


Рисунок 5. Распределение средней аксиальной скорости на высоте  $z/D = 0.34$  ( $\alpha=0^\circ$ ), иллюстрирующий равномерность распределения.

Была показана удовлетворительная равномерность потока (Рисунок 5).

Рассмотрены различные варианты определения интегрального параметра крутки, в том числе показана их корреляция с геометрическим параметром крутки и простым соотношением максимальных скоростей в профиле  $0,75 S_{max}$ . Показано, что такая корреляция перестает выполняться для  $S_p > 0,6$ , а в потоке при таких значениях параметра крутки возникает ЦРЗ (центральная рециркуляционная зона) и ПВЯ (прецессирующие вихревое ядро). Показано, что число Струхалия представляет собой нелинейную зависимость от параметра крутки (Рисунок 6).

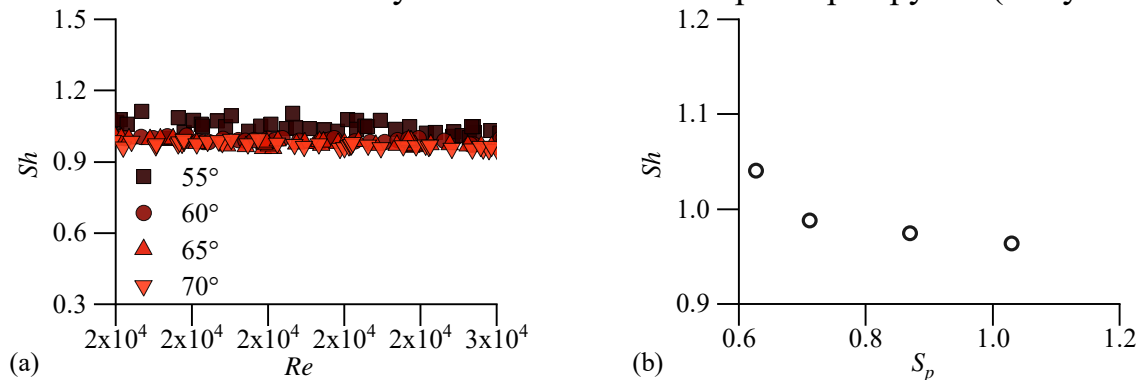


Рисунок 6. (a) Независимость числа Струхалия  $Sh$  от Рейнольдса  $Re$ , (b) число  $Sh$  как функция параметра закрутки  $S_p$ .



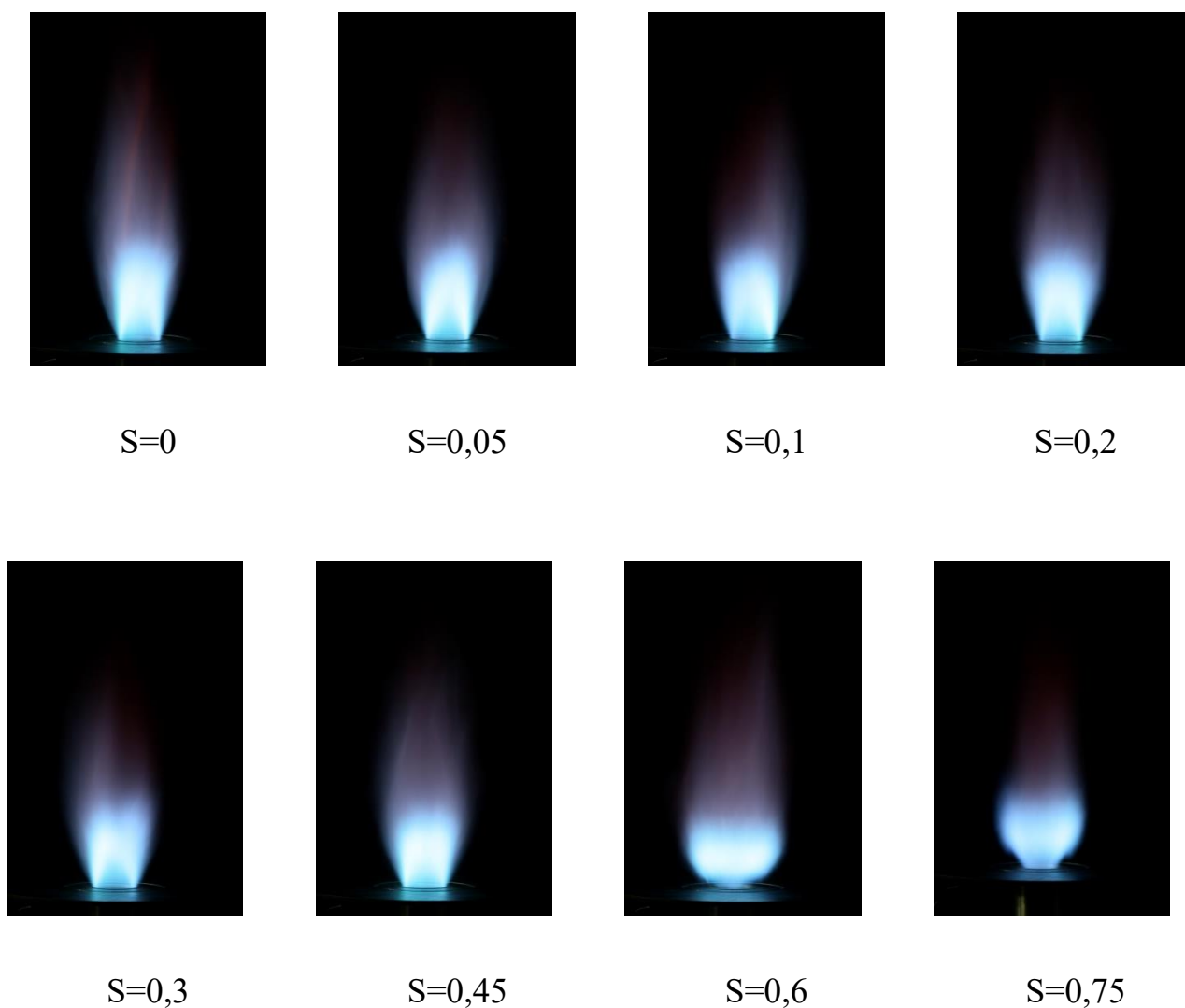


Рисунок 7. Визуализация пламени в зависимости от крутки (коэффициент избытка топлива  $\Phi=0,6$ ,  $Q_{air}=24 \text{ м}^3/\text{ч}$ ).

При рассмотрении реагирующего потока, было проведено исследование диапазонов работы горелочного устройства. Построены карты режимов устойчивого горения, границ срывов пламени, проскоков и других нештатных режимов при горении предварительно перемешанной топливно-воздушной смеси. На Рисунке 7 показана серия фотографий устойчивого горения предварительно перемешанной топливно-воздушной смеси при варьировании параметра закрутки  $S$  при фиксированном расходе смеси.



Рисунок 8. Визуализация проскока пламени внутрь камеры (аварийный режим работы).

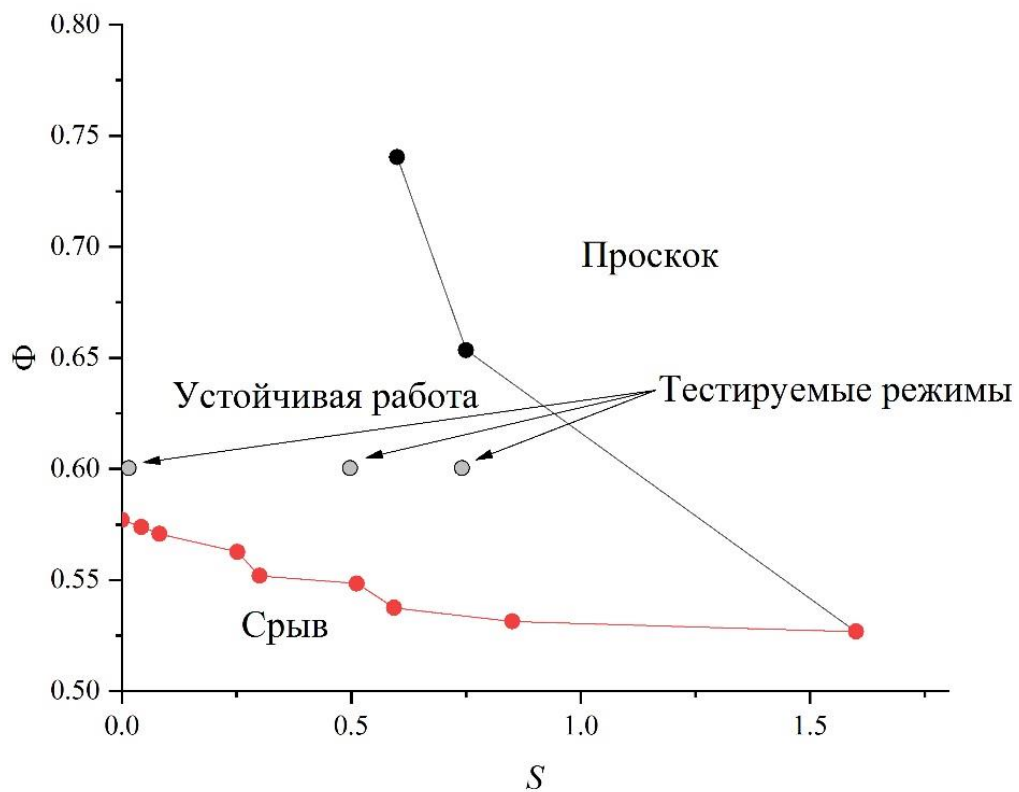


Рисунок 9. Диаграмма устойчивой работы радиального горелочного устройства.

Измерения проводились при одинаковых расходах воздуха  $Q_{\text{air}} = 24 \text{ м}^3/\text{ч}$  и пропана  $Q_{\text{gas}} = 0,6 \text{ м}^3/\text{ч}$ , что соответствует коэффициенту избытка топлива  $\Phi=0,6$ ,

т.е. обедненному горению. Как видно, из визуализации при увеличении крутки факел становится более компактным и значительно сокращает свою длину. Сначала за счёт формирования точки остановки в центре закрученного течения, а потом, при увеличении закрутки более чем  $S > 0,6$ , уже за счёт ярко выраженный центральной рециркуляционной зоны. При превышении параметра закрутки более, чем  $S > 1,1$  происходил проскок пламени внутрь сопла вихревой камеры. Этот режим считался аварийным или внештатным, так как пламя горит вблизи завихрителя. Его визуализация приведена на рисунке 8.

На Рисунке 9 приведена обобщенная диаграмма устойчивой работы горелочного устройства. Сверху – кривая проскока пламени при высоких коэффициентах избытка топлива и высокой степени закрутки. Снизу – диапазон устойчивой работы ограничен срывом пламени вверх по потоку. Свежая смесь, при отсутствии этого очага воспламенения, поднималась выше по потоку без воспламенения.

Из диаграммы видно, что при увеличении параметра крутки область устойчивой работы представляет собой весьма узкую область по коэффициенту избытка топлива, соответствующему обедненным режимам горения. Именно такие режимы интересны, как наиболее оптимальные по выбросам  $\text{NO}_x$  вблизи границы обедненного срыва пламени.

Проведены опыты по анализу газового состава продуктов сгорания и построение полей средней температуры в потоке. Для измерения распределения температуры внутри факела использовалась термопара типа S (платина – 30 %, родий – 6 %). Термопары, установленные на дистанционной решетке, использовались для измерения среднего распределения температуры. Решетка перемещалась с помощью координатного устройства. Диаметр термопары составляет 2,5 мм, расстояние между термопарами составляет 20 мм. Измерения проводились с шагом по координате 4 мм. Профили температуры позволяют

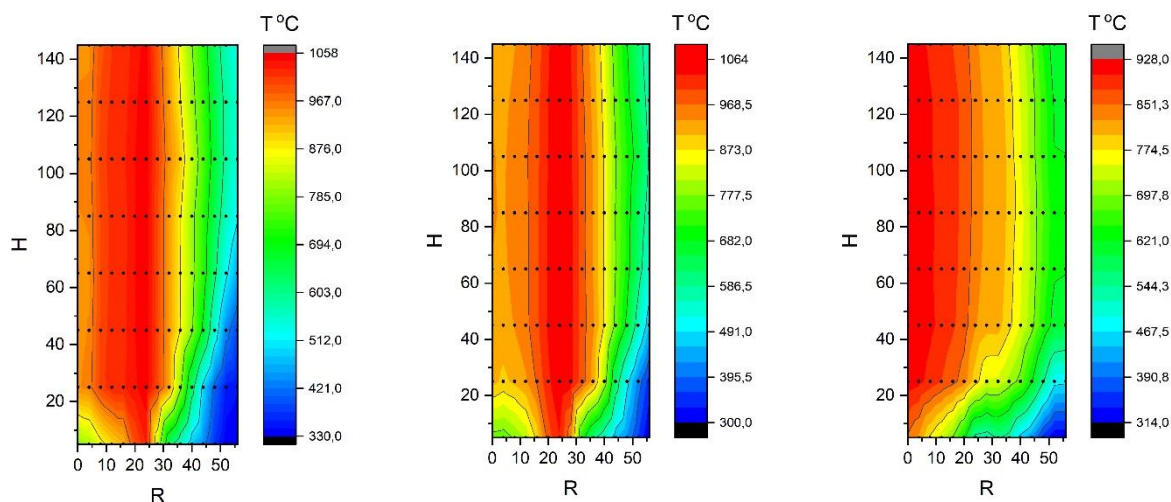


Рисунок 10. Поле температур для трех выделенных режимов  $S=0, 0,5$  и  $0,75$ .

определить примерную границу фронта пламени, которая сдвигается в положительном радиальном направлении при перемещении вверх, что соответствует геометрии видимого фронта пламени, имеющего, как ранее отмечалось на основе визуальных данных, форму перевернутого конуса.

Максимальные температуры в зоне реакции не превышают значения  $1050^{\circ}\text{C}$ . Из рисунка 10 видно, что при увеличении параметра закрутки формируется более равномерное распределение средней температуры в центре струи, скорее всего за счёт формирования области рециркуляции и ПВЯ, и хорошего перемешивания смеси.

Также понижается среднее значение температуры в целом, что, в частности, должно гарантировать предельно низкий уровень образования  $\text{NO}_x$ . После измерения распределения температуры проведены измерения газового состава продуктов горения. Отборник находился вблизи вытяжки, при этом факел, в момент измерения накрывался металлическим кожухом, чтобы исключить вторичное попадание воздуха. Газовая проба охлаждалась и поступала на анализ в газоанализатор «Тест-1». На рисунке 11 приведены результаты по газовому анализу, продемонстрировано снижение выбросов  $\text{NO}_x$  при параметре крутки больше  $S>0,4$ .

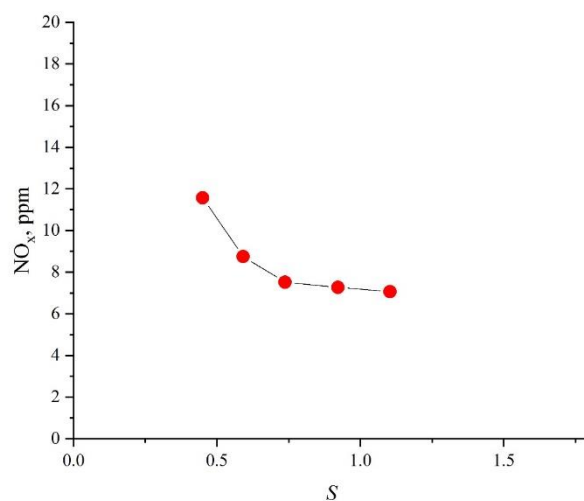
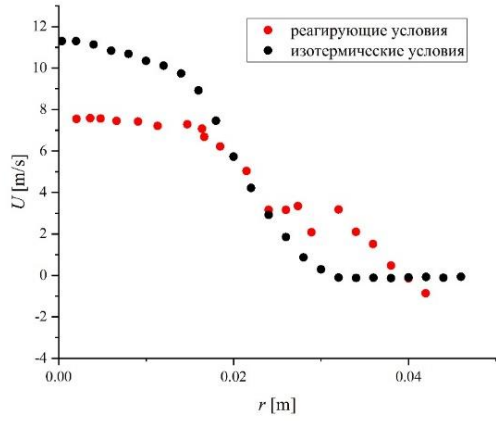


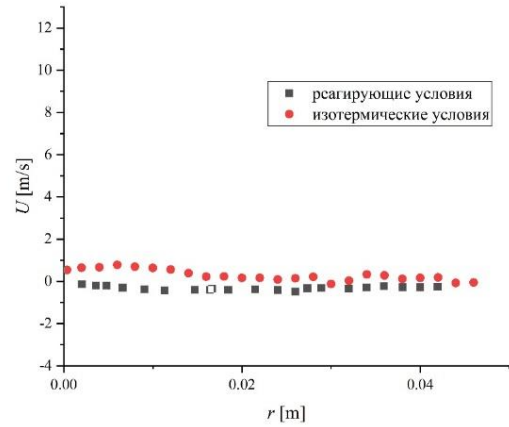
Рисунок 11. Концентрация  $\text{NO}_x$  при варьировании параметра крутки  $S$ .

Проведены экспериментальные исследования потока с помощью ЛДА совместно с датчиками пульсаций давления в присутствии горения. Характерные осредненные профили скорости при варьировании параметра закрутки приведены на рисунке 12. Там, в частности, показана разница в распределениях скорости при реагирующих и изотермических условиях. Основное отличие от изотермического режима заключалось в наполнении зоны рециркуляции продуктами сгорания, и увеличением объемного расхода газа, протекаемого через измерительное сечение.

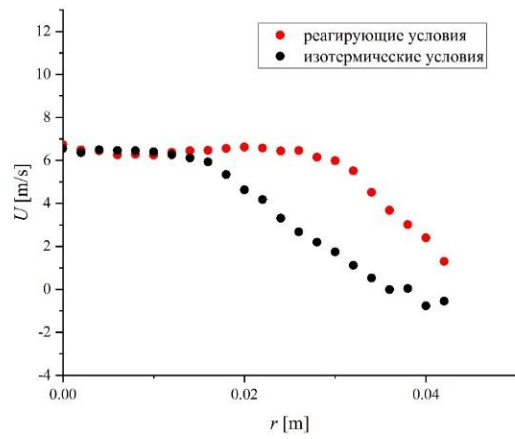
Также получены фазоосредненные распределения скорости, «привязанные» к конкретной фазе вихря при горении для  $S=0,75$ . Для этого сигнал пульсаций давления, измеренный с помощью шумомера Bruel&Kjaer и специального отборника [10], помещался вблизи сопла горелочного устройства, минимально возмущая поток. После этого при условии квазипериодичности потока можно перейти от временной координаты к пространственной азимутальной и визуализировать прецессирующую вихревую структуру.



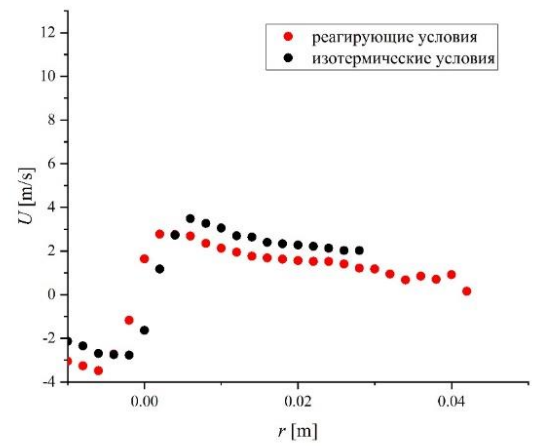
(a)



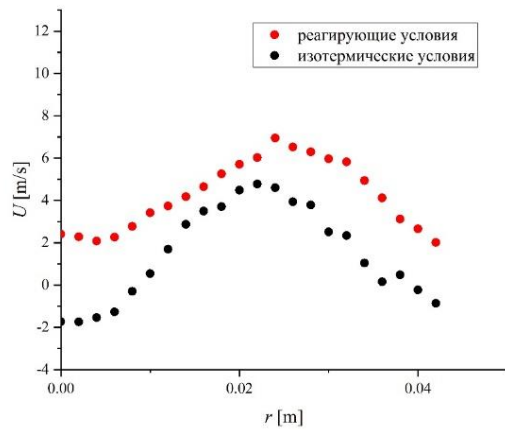
(б)



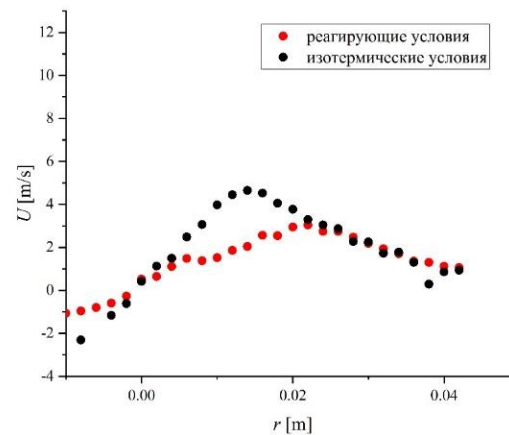
(в)



(г)



(д)



(е)

Рисунок 12. Профили скорости, измеренные на высоте  $h=10$  мм над соплом, для различных параметрах крутки (слева – аксиальная компонента, справа – тангенциальная компонента): а,

б –  $S=0$ ; в, г –  $S=0,5$ ; и д, е –  $S=0,75$

На рисунке. 13 представлено полученное распределение трех компонент скорости в измерительной плоскости на высоте над соплом  $h=10$  мм.

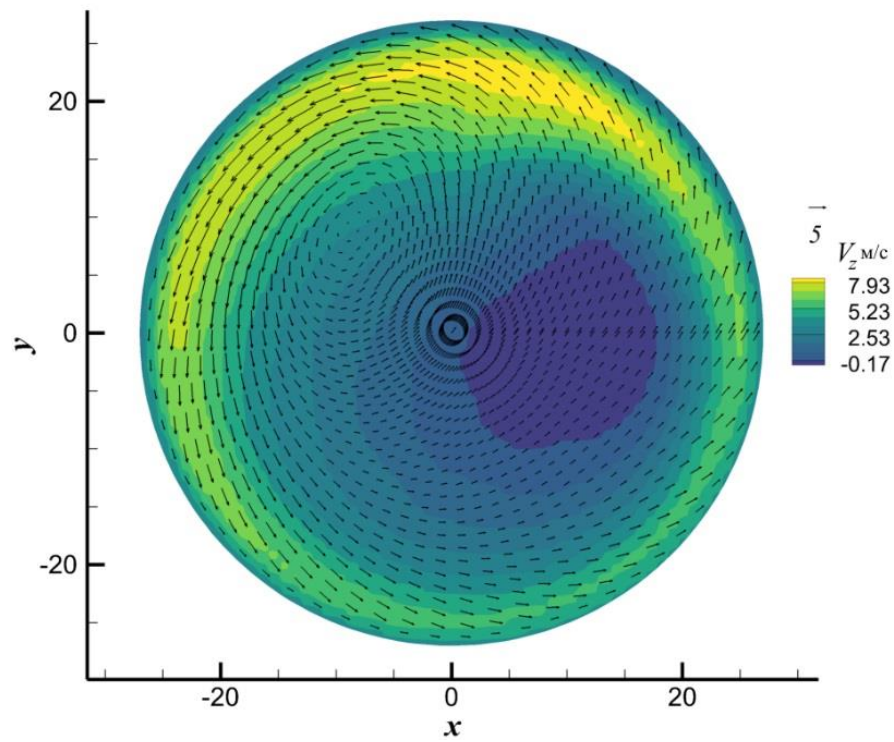


Рисунок 13. Фазовоосредненное распределение скорости в случае горения для  $S=0,75$ .

## Глава 2 Лабораторный стенд тепловой мощностью 50 кВт

Вихревой способ сжигания относится к перспективным способам сжигания, так как можно обеспечить практически неограниченное время пребывания угольных частиц разных фракций в горячем объеме топочной камеры. При этом за счёт изменения соотношения подачи вторичного воздуха и уровня закрутки потока можно эффективно управлять пылеугольным факелом [11, 12].

На рисунке 14 показана модель двухступенчатой пылеугольной горелки. Топочном объем состоит из 7 муфелизированных секций внутренним диаметром 100 мм и длиной 150 мм. Стенки муфеля выполнены из огнеупорной смеси «Мертель» с добавлением пластифицирующих добавок. В центре каждой секции предусмотрен круглый канал для установки кварцевого смотрового стекла, которое обеспечивает оптический доступ к топочному объему. Горелка для сжигания угольного топлива состоит из двух ступеней. Первая ступень представляет собой тангенциальную камеру смешения, в которую аксиально установлено защитно-запальное устройство. Смесь пропана и воздуха заводилась в первичный тангенциальный завихритель, имеющий два тангенциальных входа с первичным воздухом. Предварительно измельченный уголь с характерным размером зерен 40-60 микрон загрузался в шнековый питатель. Подача угольной пыли осуществлялась из бункера в воздушную линию улиточного завихрителя, контроль расхода угольной пыли осуществляется при помощи весов с погрешностью измерения массы в 1 грамм. С помощью сопутствующего воздуха угольная пыль транспортировалась в горелку. Расход воздуха на тангенциальный и улиточный завихритель контролируется при помощи сужающих устройств и измерителей перепада давления. Такой способ измерения дает ошибку не более 4 %. Пылеугольная смесь закручивалась с помощью улиточного завихрителя и поджигалась пилотным пламенем, полученным от поджога пропана в первой ступени. Для изменения температуры на стенках и по центру камеры в каждой секции, а также в улиточном завихрителе, установлены подвижные термопары К-типа и S- типа соответственно. Сбор данных с термопар осуществлялся



восьмиканальными измерителями температуры со встроенным интерфейсом RS-485, по которому осуществлялся обмен с персональным компьютером.

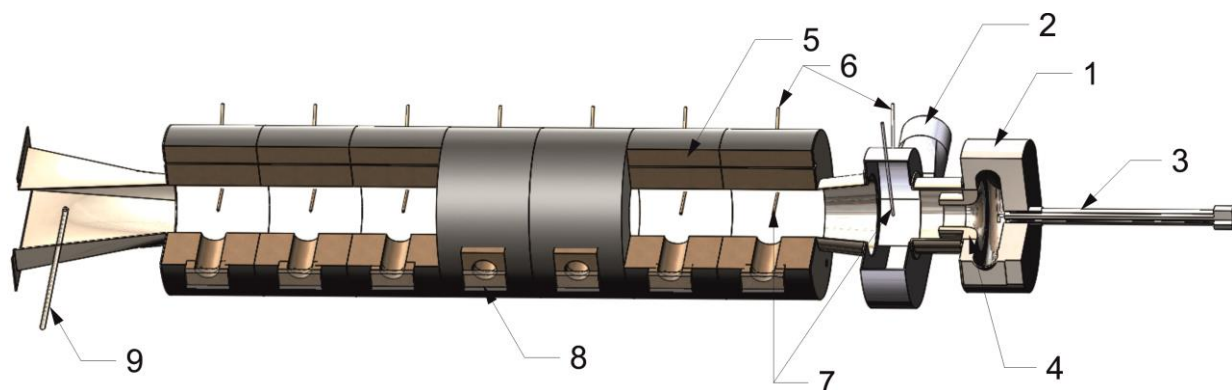


Рисунок 14. Модель двухступенчатой горелки 1 – тангенциальный завихритель, 2 – улиточный завихритель, 3 – ЗЗУ, 4 – профилированное сопло, 5 – муфель, 6 – термопары на стенке, 7 – термопары по центру, 8 – смотровые окна, 9 – отбор дымовых газов.

Выбор геометрии вызван простотой геометрии завихрителей тангенциального и улиточного типа, которая часто используется при сжигании различных видов топлива, в том числе твердого. С помощью измерителя перепада давления ПРОМА-ИДМ-016 (до 16 кПа) с RS-485 и сужающих устройств вычислялся расход воздуха, подаваемого на первую и вторую ступень горелочного устройства. Напольные весы ПВм-3/150 с цифровым выходом использовались для точного контроля расхода подаваемого угля. Газоаналитический комплекс «ТЕСТ- 1» регистрировал показания  $O_2$ ,  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $NO$  и  $SO_2$  на выходе горелочного устройства.

Все измерительные приборы на данном стенде интегрированы в единое программное обеспечение, которое позволяет получать экспериментальные данные в едином файле с привязкой к времени эксперимента. Для сбора экспериментальных данных и регулирования режимных параметров была написана программа для измерения и управления стендом. Программа реализована на языке Python. В программе реализована функция управления режимными параметрами стенда: расход воздуха  $Q_1$  на газовую ступень управляется частотным преобразователем ATV212-HU55 и  $Q_2$  на угольную ступень частотным преобразователем ATV212-HD18. Изменение расхода угольного топлива

управляется изменением скорости вращения шнекового питателя, управление которым осуществляется при помощи частотного преобразователя ATV212-H075. Полная схема организации лабораторного стенда тепловой мощностью 50 кВт приведена на рисунке 15.

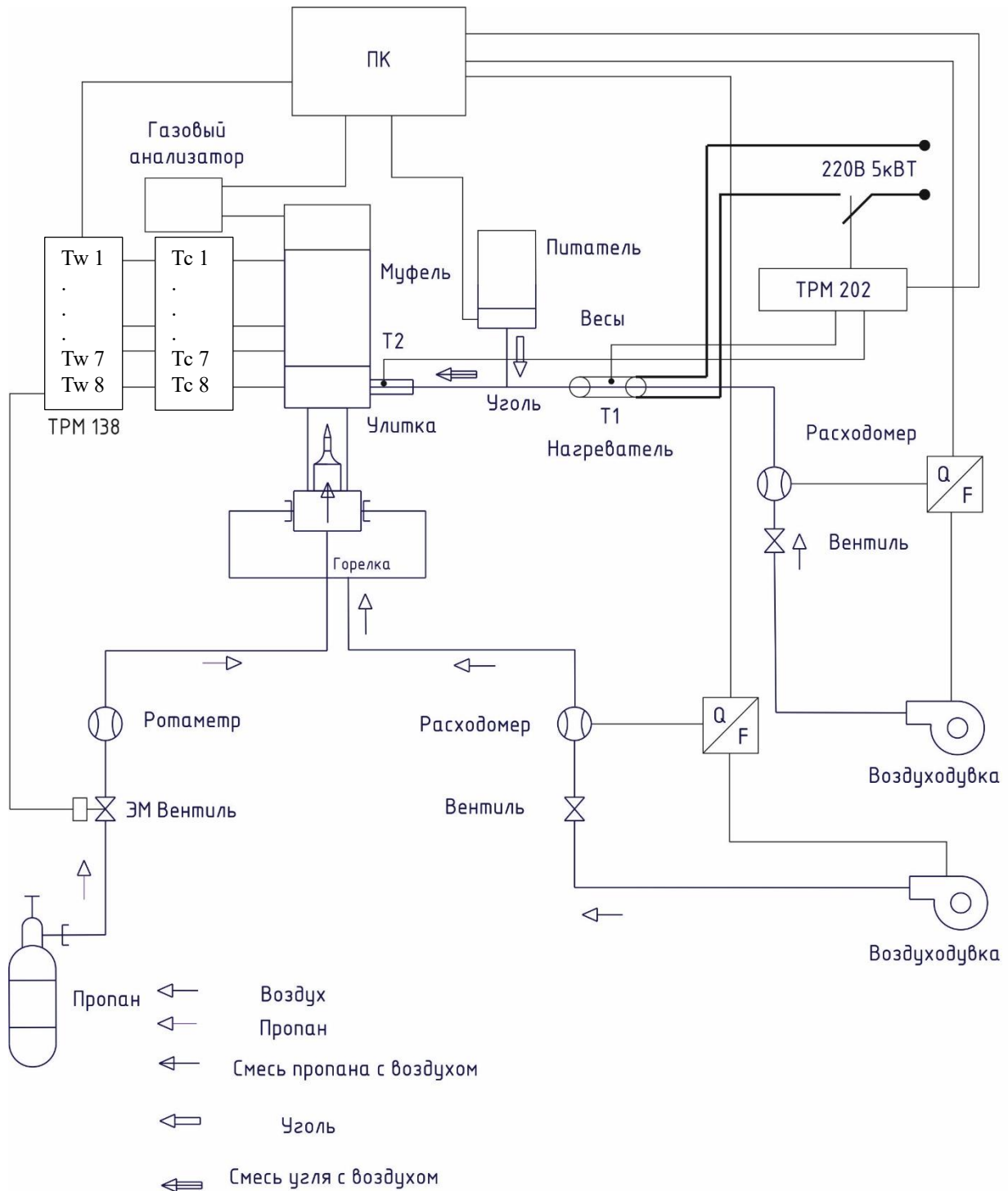


Рисунок 15. Схема организации лабораторного стенда тепловой мощностью 50 кВт.



Рисунок 16. Внешний вид керамического нагревательного элемента 5 кВт

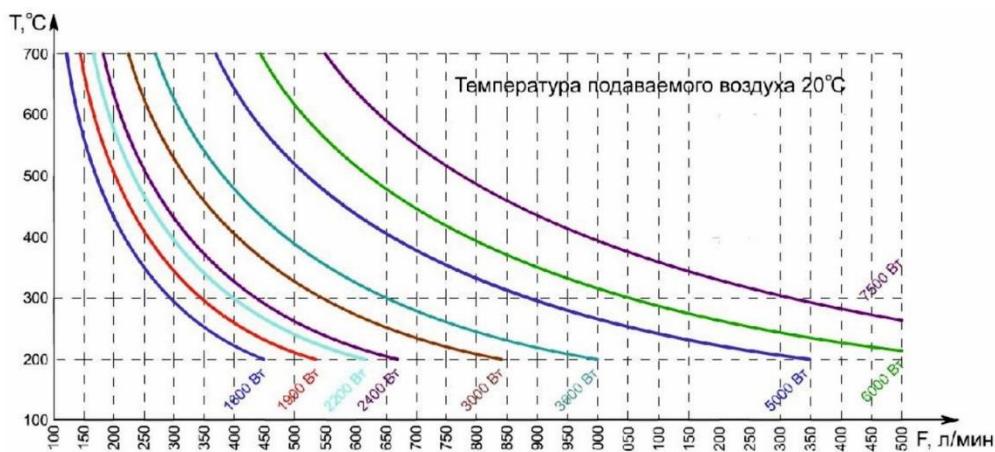


Рисунок 17. Расчетная характеристика горячего воздуха Т от расхода воздуха.

Экспериментальный стенд оборудован нагревательным элементом Forsthoff F3200 мощностью 5 кВт 220 В. Он предназначен для подогрева транспортного воздуха, который поступает во вторую ступень стенда. Внешний вид нагревательного элемента приведен на рисунке 16

Номинал нагревательного элемента выбран исходя из расчетных характеристик, приведенных на рисунке 17.

Температура нагревательного элемента контролируется термопарой ДТПК344- 07.130/1,0С.1 (Т1), которая подключена к измерителю-регулятору ТРМ- 202 (рисунок 18). Температура потока воздуха на входе в улитку контролируется термопарой ДТПК054- 00.60/1 (Т2), которая так же подключена к измерителю-регулятору. ТРМ-202 подключен к твердотельному реле SSR-40D, который осуществляет коммутацию питающего напряжения 220 В на нагревательный элемент.



Рисунок 18. Измеритель-регулятор ТРМ-202

Данный измеритель регулятор позволяет управлять нагревательным ТЭНом в установленных пределах температур и защищает нагревательный элемент от перегрева по средствам верхней установки температуры. При помощи второй термопары производится контроль температуры угольно воздушной смеси, поступающей в улиточный завихритель (рисунок 19).

Измерения скорости в пылеугольном факеле проводились с помощью двухкомпонентного лазерно-доплеровского анемометра ЛАД 06-и. ЛАД 06-и может применяться для прецизионного бесконтактного измерения и визуализации вектора скорости газожидкостных многофазных потоков с ограниченной

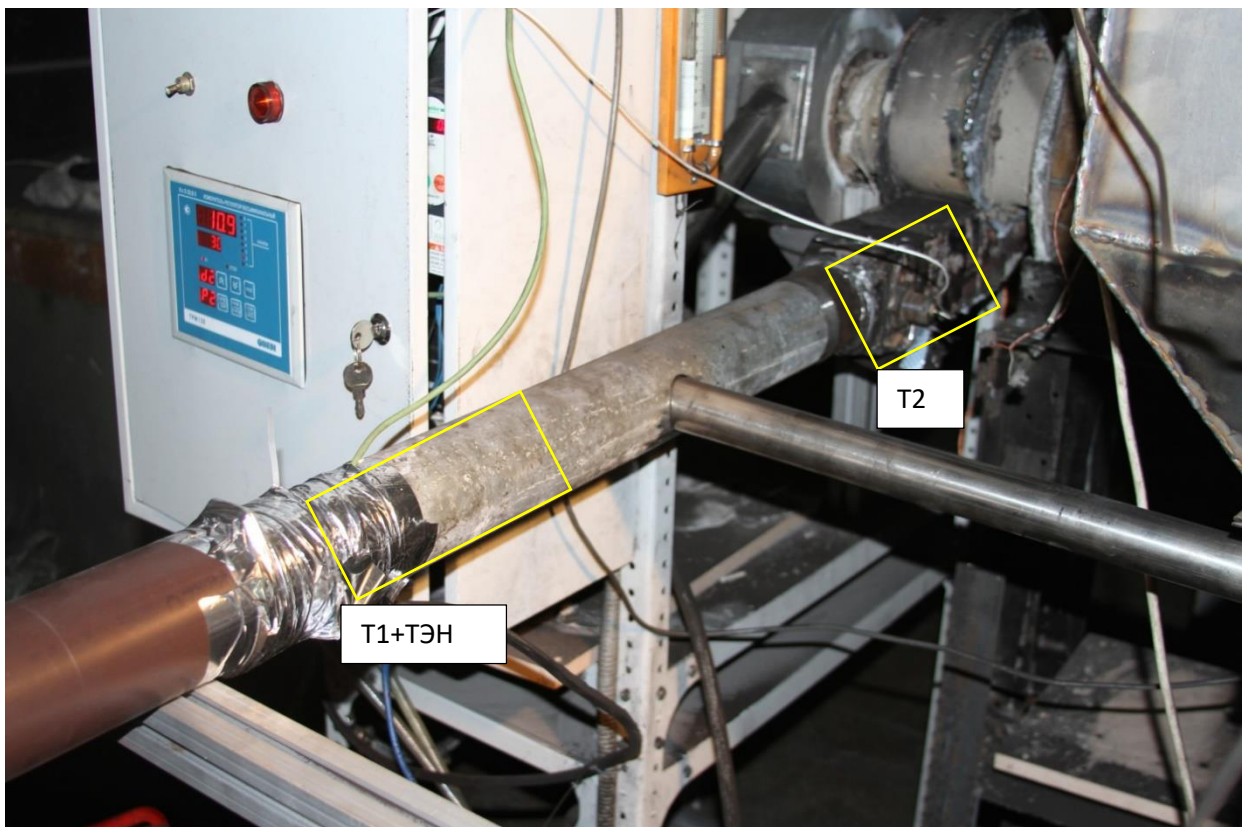


Рисунок 19. Место установки керамического ТЭНа и термопар T1 и T2.

оптической прозрачностью в режиме обратного светорассеяния, а также для измерения концентрации светорассеивающих частиц (рисунок 20). В каждой измерительной точке набиралась статистика равная 5000 доплеровских вспышек. По результатам статистики измерений высчитывалось среднее значение скорости в точке [13-18].

Источником доплеровского сигнала являются частицы твердого топлива, движущиеся в топочном объеме. Измерения распределений скорости производятся по оси камеры сгорания, по центру измерительного окна. Ноль системы координат соответствует центру камеры, так как геометрия экспериментального стенда обладает осевой симметрией.

Информация о скорости получается при измерении доплеровского сдвига частоты лазерного света, рассеянного взвешенными в потоке и движущимися вместе с ним малыми частицами и фазовыми неоднородностями.

Основные технические характеристики:

- Диапазон измеряемых скоростей  $\pm 0,01 \dots 30$  м/с,
- Погрешность измерения средней скорости  $\pm 0,5$  %,
- Статическая погрешность отслеживания спектрального пика доплеровского сигнала, не хуже  $\pm 0,1$  %,
- Максимальная частота коммутации измерительных каналов 300 кГц,
- Фокусное расстояние выходных сменных объективов (F) 0,25, 0,5, 1,0 м,
- Размер зондирующего оптического поля, (F=0,5 м;  $\lambda=0,685$  мкм)  $\varnothing 0,05 \times 1$  мм.

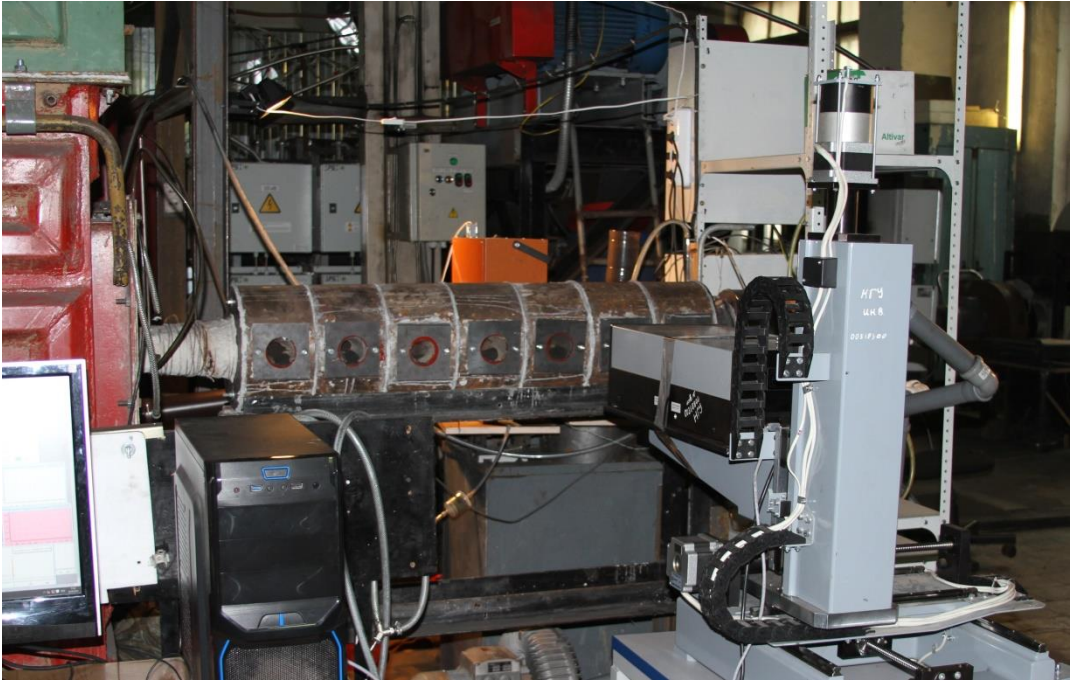


Рисунок 20. Измерение скорости ЛАД-06и на стенде 50 кВт.

Результаты измерения аэродинамики закрученного потока приведена на рисунке 21. Закрутка потока по мере продвижения по камере уменьшается, в первом окне определяется концентрированный вихрь с радиусом 25 мм, который существует до 5 окна, потом происходит диссипация вихря. Профиль аксиальной скорости становится более равномерным, отсутствует область рециркуляции потока. Крутка потока составляет  $S=1,5$ .

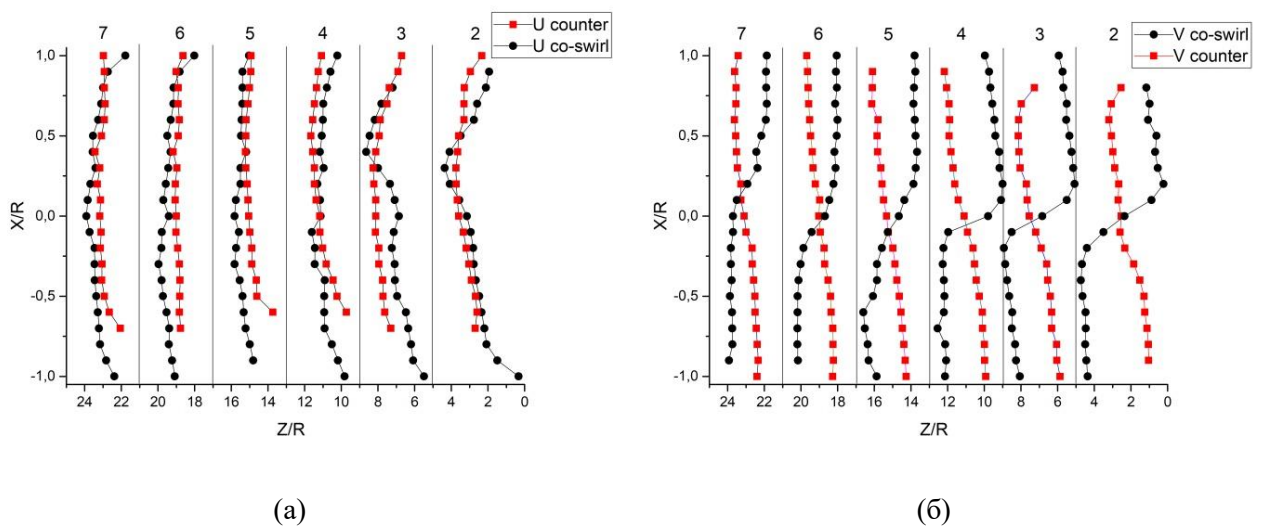


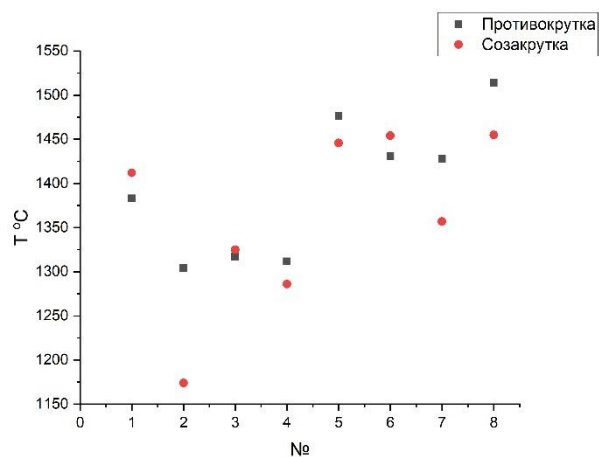
Рисунок 21. Профили аксиальной (а) и тангенциальной (б) скорости при созакрутке и противокрутке

Для проведения исследования влияния созакрутки и противокрутки на воспламенение и горение пылеугольного топлива проведены эксперименты с различным расходом пылеугольного топлива. Расходные характеристики эксперимента представлены в таблицу 1. Расход твердого топлива принимали 12, 14, 16 кг/ч. На первом этапе производится прогрев стенда горячим воздухом до температуры 130-150 °С, включается ЦБА и проверяется разряжение, затем подается пропан-бутановая смесь и производится прогрев стенок муфеля до 400-600. Затем из питателя подается пылеугольное топливо. После выхода стенда на стационарный режим по температуре муфельной стенки эксперимент продолжают еще примерно 10 минут.

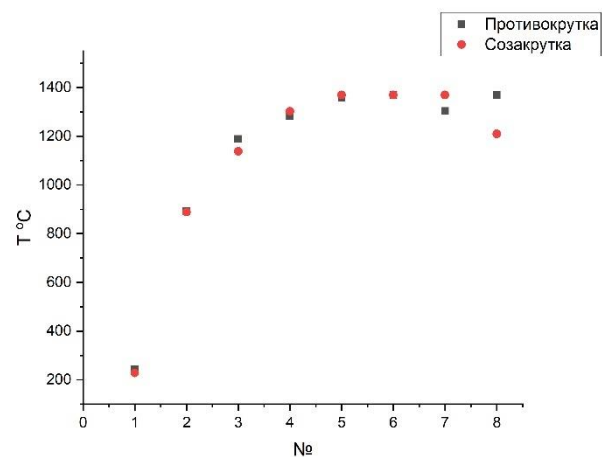
Таблица 1 -Расходные характеристики в экспериментах

Параметр	Температура воздуха (уголь Т2)	Расход воздуха на вторую ступень	Расход воздуха на первую ступень	Расход пропан-бутана	Температура воздуха (газ)
Размерность	С	м <sup>3</sup> /ч	м <sup>3</sup> /ч	л/мин	С
Значение	135	70	24	15	22

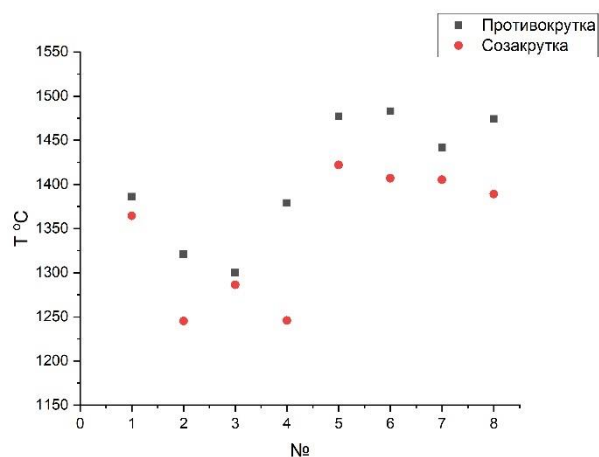
Результаты измерений максимальных температур по центру и на стенке стенда в режиме созакрутки и противокрутки приведены на рисунке 22. Установлено, что пылеугольное топливо воспламеняется в 4 и последующих муфельных секций.



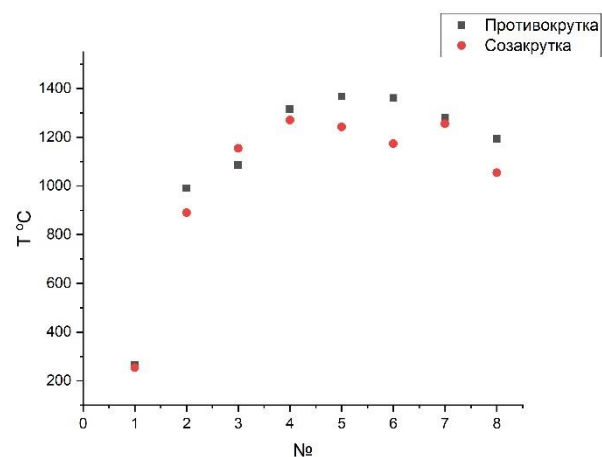
(а)



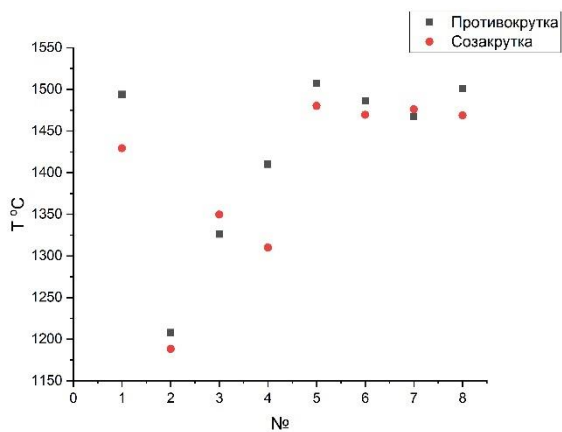
(б)



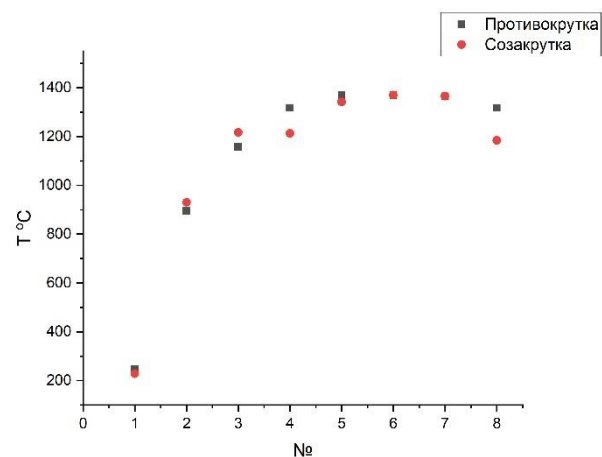
(в)



(г)



(д)



(е)

Рисунок 22. Максимальные температуры по центру и на стенке камеры по длине станда полученные при созакрутке и противокрутке при различном расходе твердого топлива (слева – температура в центре, справа – температура на стенке): а, б – 12 кг/ч; в, г – 14 кг/ч; и д, е – 16 кг/ч.



Полученные результаты показывают, что в режиме противокрутке температура в секции №4 при всех расходах выше, чем в режиме созакрутке. Распределения температур на стенке в обоих режимах одинаково и имеет одинаковый характер. Это позволяет сделать вывод о том, что процесс горения вышел на стационарный режим по температуре. Проба уходящих дымовых газов через отборник (9) поступала в водоохлаждаемый щуп и далее через систему фильтров проходила на газоанализатор «Тест-1» [19-21]. На рисунке 23 приведены концентрация кислорода и углекислого газа в пробах дымовых газов полученных при созакрутке и противокрутке при расходе твердого топлива 12 кг/ч, 14 кг/ч и 16 кг/ч соответственно.

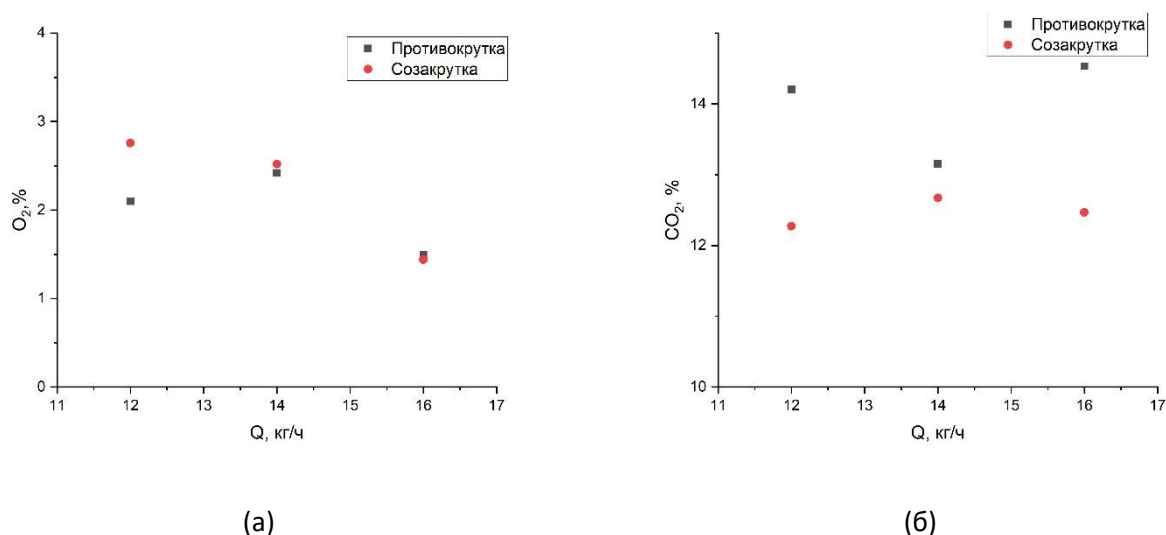


Рисунок 23. Концентрация (а) кислорода и (б) углекислого газа в пробе дымовых газов полученные при созакрутке и противокрутке при различном расходе твердого топлива.

Полученные результаты так же показывают, что в режиме противокрутке концентрация кислорода ниже при тех же расходах, а концентрация углекислого газа выше, чем в режиме созакрутке.

При помощи фотоаппарата получены визуализации горения при созакрутке и противокрутке. Из анализа данных ЛДА при созакрутке ступеней вдоль центра камеры возникает осесимметричная вихревая структура с размером вихревого ядра около  $0,4R$ , что согласуется с визуализацией данного режима [22]. Пылеугольный

факел занимает пространство вокруг газового факела, который диффузионно горит в центре топочной камеры, как видно на рисунке 24 а.

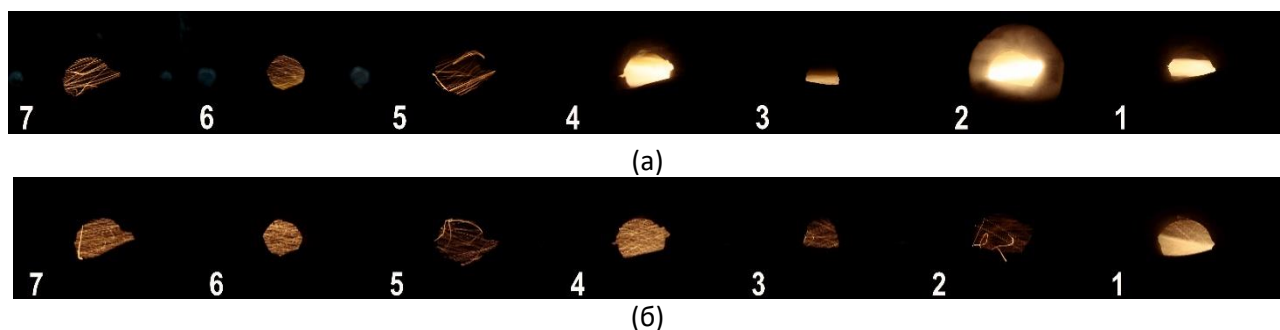


Рисунок 24. Визуализация горения пылеугольного факела: (а) созакрутка; (б) противокрутка

В случае противокрутки видно, что закрутка меняет знак. При этом не возникает ярко выраженного вихревого ядро от газового факела, так как пылеугольная смесь из второй ступени полностью перемешана с потоком, выходящим из первой ступени рисунок 24 б. При этом распределения тангенциальной скорости более равномерные.

Таким образом, на основе результатов исследований, можно заключить, что в центре завихрителя второй ступени, где воспламенилось пылевидное угольное топливо, температура на оси камеры превышала  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что является достаточным для воспламенения смеси измельченного угольного топлива. Максимальная температура на стенке муфеля достигалась 4-той и последующих секциях, что свидетельствует об активном воспламенении пылеугольной смеси. В целом можно констатировать, что выбранный в качестве основного варианта режим с противокруткой потоков первой и второй ступенях является вполне приемлемым для организации устойчивого воспламенения угольного топлива, подаваемого во вторую ступень. Полученные результаты подтверждают ранее проведенные работы по изотермическому моделированию, описанные в работе [23].

## Заключение

1. Проведено исследование диапазонов устойчивой работы горелочного устройства при горении пропана в условиях предварительно перемешанной топливно-воздушной смеси. Построены карты режимов устойчивого горения, границ срывов пламени, проскоков и других нештатных режимов при горении предварительно перемешанной топливно-воздушной смеси. Продемонстрировано, что с помощью увеличения параметра закрутки можно в режиме реального времени управлять длиной и формой факела.
2. Выявлены особенности распределения скорости, и пульсаций скорости в режимах с большой остаточной закруткой потока. Зона возвратного течения, формирующаяся начиная с  $S > 0,6$ , с ростом параметра закрутки увеличивается.
3. Рассмотрены различные варианты определения интегрального параметра закрутки, в том числе показана их корреляция с геометрическим параметром закрутки и простым соотношением максимальных скоростей в профиле  $0,75 S_{max}$ . Показано, что такая корреляция перестает выполняться для  $S_p > 0,6$ .
4. Пространственные распределения аксиальной и тангенциальной компоненты скорости реагирующего пылеугольного факела измерены в топочной камере стенда тепловой мощностью 50 кВт. В качестве твердого топлива и трассеров доплеровского сигнала использовались частицы твердого топлива. Варьирование аэродинамики реагирующего потока осуществлялось с помощью изменения ориентации улиточного завихрителя (сокрутка и противокрутка относительно первой ступени камеры).
5. Показано, что в условиях противокрутки поток равномерно распределяется по ширине топочной камеры, подача пылеугольной смеси во вторую ступень полностью перемешана с «горячим» потоком, выходящим из первой ступени, что положительно повлияло на стабильность горения пылеугольного факела в данном режиме.

6. Апробирована методика измерения аэродинамики пылеугольного факела методом ЛДА где в качестве источников доплеровского сигнала выступали частицы твердого топлива.

**Список использованной литературы**

- [1] В. Л. Шульман Общая энергетика: развитие топочных технологий в 2 ч. Часть 2 : учебное пособие для вузов, под научной редакцией Б. В. Берга. — Москва : Издательство Юрайт, 2019
- [2] Dörfler P., Sick M. and Coutu A. Flow-Induced Pulsation and Vibration in Hydroelectric Machinery (London: Springer London), 2013.
- [3] Chinnici A., Arjomandi M., Tian Z. F. and Nathan G. J. A Novel Solar Expanding-Vortex Particle Reactor: Experimental and Numerical Investigation of the Iso-thermal Flow Field and Particle Deposition Sol. Energy 133 451–464, 2016.
- [4] Cazan R. and Aidun C. K. Experimental investigation of the swirling flow and the helical vortices induced by a twisted tape inside a circular pipe Phys. Fluids 21 037102, 2009.
- [5] N. A. Chigier and A. Chervinsky, “Experimental Investigation of Swirling Vortex Motion in Jets,” J. Appl. Mech., vol. 34, no. 2, p. 443, 1967.
- [6] N. A. Chigier and J. M. Beér, “The Flow Region Near the Nozzle in Double Concentric Jets,” J. Basic Eng., vol. 86, no. 4, p. 797, 1964.
- [7] Cala, C.E., Fernandes, E.C., Heitor, M.V., Shtork, S.I., 2006. Coherent structures in unsteady swirling jet flow. Experiments in Fluids 40, 267–276.
- [8] Candel, S., Durox, D., Schuller, T., Bourgoïn, J.-F., Moeck, J.P., 2014. Dynamics of swirling flames. Annual review of fluid mechanics 46, 147–173.
- [9] Litvinov, I., Shtork, S., Gorelikov, E., Mitryakov, A., Hanjalic, K., 2018. Unsteady regimes and pressure pulsations in draft tube of a model hydro turbine in a range of off-design conditions. Experimental Thermal and Fluid Science 91, 410–422.
- [10] Litvinov, I.V., Shtork, S.I., Kuibin, P.A., Alekseenko, S.V., Hanjalic, K., 2013.

- Experimental study and analytical reconstruction of precessing vortex in a tangential swirler. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 42, 251–264.
- [11] Эффективное сжигание низкосортных углей в энергетических котлах / Мадоян А.А., Балтян В.Н., Гречаный А.Н. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 200 с.
- [12] Бурдуков А.П., Попов В.И., Чернова Г.В., Чернецкий М.Ю., Дектерев А.А., Чернецкая Н.С., Маркова В.М., Чурашев В.Н., Юсупов Т.С. «Разработка технологии использования механоактивированных углей микропомола для розжига и подсветки угольных котлов действующих ТЭС» *Теплоэнергетика*, 2013, № 12, с. 40–46
- [13] Sung, Y., &Choi, G. Non-intrusive optical diagnostics of co-and counter-swirling flames in a dual swirl pulverized coal combustion burner. *Fuel*, 174, 76-88, 2016.
- [14] Weidmann, M., Honoré, D., Verbaere, V., Boutin, G., Grathwohl, S., Godard, G., Scheffknecht, G. (2016). Experimental characterization of pulverized coal MILD flame less combustion from detailed measurements in a pilot-scale facility. *Combustion and Flame*, 168, 365-377.
- [15] Hwang, S. M., Kurose, R., Akamatsu, F., Tsuji, H., Makino, H., &Katsuki, M. (2005). Application of optical diagnostics techniqueto a laboratory-scale turbulent pulverized coal flame. *Energy & fuels*, 19(2), 382-392.
- [16] Balusamy, S., Schmidt, A., & Hochgreb, S. (2013). Flow field measurements of pulverized coal combustion using optical diagnostic techniques. *Experiments in Fluids*, 54(5), 1534.
- [17] Sung, Y., &Choi, G. (2016). Non-intrusive optical diagnostics of co-and counter-swirling flames in a dual swirl pulverized coal combustion burner. *Fuel*, 174, 76-88.
- [18] Wu, Y., Wu, X., Yao, L., Xue, Z., Wu, C., Zhou, H., &Cen, K. (2017). Simultaneous particle size and 3D position measurements of pulverized coal flame

- with digital in line holography. *Fuel*, 195, 12-22.
- [19] Zhang LA, Binner E, Qiao Y, Li CZ. In sit diagnostics of Victorian brown coal combustion in O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> mixtures in drop-tube furnace. *Fuel*2010;89:2703–12.
- [20] Friedemann J, Wagner A, Heinze A, Krzack S, Meyer B. Direct optical observation of coal particle fragmentation behavior in a drop-tube reactor. *Fuel*2016;166:382–91.
- [21] Elorf, A., Koched, N. M., Boushaki, T., Sarh, B., Chaoufi, J., Bostyn, S., &Gokalp, I. (2016). Swirl Motion Effects on Flame Dynamic of Pulverized Olive Cake in a Vertical Furnace. *Combustion Science and Technology*, 188(11-12), 1951-1971.
- [22] Гешева Е. С., Литвинов И. В., Шторк С. И., Алексеенко С. В. «Анализ аэродинамической структуры закрученного течения в моделях вихревых горелочных устройств» *Теплоэнергетика*, 2014, №9, с. 33–41.
- [23] Yusupov R.R.; Litvinov I.V.; Gorelikov E.Y.; Shtork S.I.; Nikolaev A.A. Isothermal modeling of an adaptive burner for low-grade fuel combustion *J. Phys.:* Conf. Ser. 1105 012031