

На правах рукописи



СОЛОВЬЁВА
Татьяна Алексеевна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА СЖИГАНИЯ
ПРИРОДНОГО ГАЗА В КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ
С ЦИКЛОННЫМИ ПРЕДТОПКАМИ**

05.14.04 - промышленная теплоэнергетика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2017

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет»
на кафедре Теплоэнергетики и теплотехники

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент
Штым Константин Анатольевич

Официальные оппоненты:

Пузырёв Евгений Михайлович, доктор технических наук, доцент;
ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им.
И. И. Ползунова», кафедра «Котло- и реакторостроение», профессор

Козлов Сергей Георгиевич, кандидат технических наук;
ООО «СибВТИ» (г. Красноярск), Котельный отдел, главный специалист

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт теплофизики им. С.С.
Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск

Защита диссертации состоится « 20 » сентября 2017 г. в 14⁰⁰ часов на заседании
диссертационного совета Д 212.099.07 на базе ФГАОУ ВО «Сибирский федера-
льный университет» по адресу: 660049, г. Красноярск, ул. Ленина, 70,
ауд. 204.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО
«Сибирский федеральный университет» <http://www.sfu-kras.ru>.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Сизганова Евгения Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы обусловлена требованиями совершенствования процесса сжигания природного газа в циклонно-вихревых предтопках (ЦВП), для увеличения эффективности работы котельных установок.

Основной целью энергетической стратегии России до 2035 г. является переход энергетического сектора страны через структурную трансформацию на качественно новый уровень, максимально содействующий динамичному социально-экономическому развитию. В этой связи необходимо изменение качественной и возрастной структуры производственных фондов за счёт ускоренной модернизации основного оборудования. При этом следует учесть и изменение топливной политики Дальневосточного региона: переход с угольного и мазутного топлива на природный газ. Износ энергетического оборудования тепловых электрических станций Дальневосточного федерального округа (ДФО), в частности, составляет в среднем от 60 до 70 %.

Исследованию специфики закрученных потоков и применению вихревых камер для интенсификации энерготехнологических процессов посвящены работы С.В. Алексеенко, К.А. Григорьева, А. Гупты, Г.Н. Делягина, Ш.А. Пиралишвили, Е. М. Пузырёва, В.В. Саломатова, Н. Сайреда, Ф.А. Серанта, А.Н. Штыма, Ю.В. Овчинникова, Satoru Ishizuka и др. В трудах Л.И. Мальцева, В.И. Мурко, А.Ф. Рыжкова, Э.И. Розенфельда, Л.М. Цирульниковой, S. Calvert, Н.М. Englund и др., отмечается, что качество сжигания топлива существенно зависит от его дисперсионных характеристик, температуры пламени, концентрации кислорода в зоне горения, времени пребывания продуктов сгорания в зоне высоких температур, а также способа сжигания. Эти условия в совокупности определяют режимы работы котла во всем диапазоне нагрузок, аэродинамикой факела в топке, которая зависит от совершенства конструкции горелочного устройства, геометрии топки, условий теплообмена и т.д. Однако указанные процессы изучены ещё не достаточно полно.

Дальнейшее совершенствование процессов сжигания топлива в котельных агрегатах возможно за счёт циклонно-вихревой технологии, которая зарекомендовала себя как высокоэффективная. Это позволит при надёжных условиях работы оборудования продлить его эксплуатационный ресурс, оптимизировать экологические и экономические параметры путём модернизации котельных агрегатов. В ДВПИ-ДВГТУ-ДВФУ многолетние исследования аэродинамики циклонно-вихревых камер привели к успешной реализации данной технологии для сжигания мазута на котлах двадцати четырёх типоразмеров в четырёх энергосистемах ДФО.

Объект исследования – циклонно-вихревые предтопки котельных агрегатов.

Предмет исследования – характеристики процесса сжигания природного газа в ЦВП.

Цель диссертационной работы заключается в усовершенствовании процесса сжигания природного газа в циклонно-вихревых предтопках для увеличения эффективности работы котельных установок.

Для достижения указанной цели в работе поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработать технические решения по оптимальному распределению газовых вводов (тангенциальных, торцевых и аксиальных сопел-вводов) в конструкции ЦВП.

2. Определить оптимальные режимы работы котла и ЦВП при различных условиях подачи газа (подвод газа тангенциально, через торцевые или аксиальные вводы, комбинирование ввода газа).

3. Исследовать изменение аэродинамических параметров закрученного потока в ЦВП без горения (холодные продувки) и при горении газа (горячие продувки).

4. Внедрить проекты модернизации котельных установок с ЦВП, сжигающих природный газ.

Научная новизна и основные положения, выносимые на защиту:

1. Впервые получены данные исследований газодинамики в камере сгорания (КС) промышленного ЦВП при горении природного газа, которые показали, что процесс сжигания существенно влияет на характер изменения осевой составляющей вектора скорости и статического давления закрученного потока, что позволит при проектировании более точно определить конструктивные и технологические параметры ЦВП.

2. Определены эмпирические зависимости для расчёта констант интегрирования, корректирующие осевую составляющую вектора скорости; предложены эмпирические формулы для определения статического давления.

3. Установлен усреднённый формпараметр m , характеризующий индивидуальные особенности промышленного ЦВП; предложены его численные значения при горении газа в ЦВП для квазипотенциальной и квазитвёрдой областей вращения потока, которые рекомендуется учитывать при аэродинамических расчётах в процессе проектирования.

Значение для теории. Предложенная корректировка методики аэродинамического расчёта ЦВП, а также эмпирические зависимости для расчёта констант интегрирования, корректирующие осевую составляющую вектора скорости и статического давления создают теоретическую основу для проектирования и разработки новых энергоэффективных методов и оборудования промышленных котельных.

Практическая значимость результатов работы заключается в повышении эффективности (скорости, достоверности и точности) определения технологических и режимных параметров ЦВП уже на стадии проектирования с учётом долговечности, надёжности и эффективности. Методы и подходы являются новыми в прикладной сфере и могут быть применены в других областях техники и технологии применения вихревого сжигания топлива.

Использование полученных результатов. Разработана и внедрена усовершенствованная конструкция ЦВП мощностью 65 МВт для сжигания основного топлива – природного газа и резервного – мазута.

Результаты работы использовались при реализации проектов модернизации котельного оборудования с установкой ЦВП на Охинской ТЭЦ в 1998 г. (котёл БКЗ-120-100), Якутской ТЭЦ в 2001 г. (котёл ПТВМ-100), Хабаровской ТЭЦ-2 в 2007 г. (два котла КВГМ-100-150). В рамках газификации энергетики Дальнего Востока в 2011 г. закончена реконструкция Владивостокской ТЭЦ-1 (три паровых котла БКЗ-75-16, два водогрейных котла КВГМ-100-150), ТЦ «Северная» (четыре водогрейных котла КВГМ-100-150) и ТЦ «Вторая речка» (три водогрейных котла ЭЧМ-25/35), переводом котлов на сжигание природного газа в воздухоохлаждаемых ЦВП.

Результаты диссертации применяются в учебном процессе для бакалавров, магистров и аспирантов направления «Теплоэнергетика и теплотехника».

Методология и методы исследования. Работа выполнена с применением аналитического обобщения научных и технических решений, патентно-информационного анализа, методов математического моделирования, статистической обработки экспериментальных данных. Теоретической и методологической базой диссертационной работы являются законы аэродинамики и теплообмена. Для решения поставленных задач использованы пневмометрические, термометрические, газоаналитические методы исследований газодинамических и тепломассообменных процессов в промышленных ЦВП. Экспериментальные исследования проведены в промышленных условиях, результаты обобщены в размерном и безразмерном виде.

Достоверность полученных результатов базируется на основных положениях физики, гидрогазодинамики, теоретической теплотехники и подтверждается метрологическими характеристиками использованного оборудования, а также удовлетворительным совпадением расчётных данных с экспериментальными результатами, полученными на действующем промышленном оборудовании.

Апробация работы. Основные положения работы, результаты теоретических, вычислительных, экспериментальных исследований и внедрений докладывались и обсуждались на: «IV International Young Scholars From of the Asia-Pacific Region Countries» FESTU, (Vladivostok, 2001); Всероссийской конференции «Актуальные проблемы современной энергетики» (Екатеринбург, 2002 г.); ежегодных научно-практических конференциях «Вологдинские чтения» (Владивосток, 2002, 2004 гг.); V и VI Всероссийских научно-технических конференциях «Теплофизика процессов горения и охрана окружающей среды» (Рыбинск, 2004 г.); Всероссийском IV семинаре вузов Сибири и Дальнего Востока по теплофизике и теплоэнергетике (Владивосток, 2005 г.); 1-й и 2-ой научно-практической конференции ОАО «ДВУЭК» «Проблемы реформирования и особенности развития электроэнергетики Дальнего Востока» (Владивосток, 2005-2006 г.); Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири» (Иркутск, 2006 г.); VI Всероссийском семинаре вузов по теплофизике и энергетике (Красноярск, 2009 г.); Всероссийской конференции «Пути совершенствования работы теплоэнергетических устройств» (Владивосток, 2012 г.); 2nd International Conference Dynamics and Structure of

Combustion Waves (Vladivostok, 2014 г.); Eleventh International Conference on Flow Dynamics (ICFD 2014) (Sendai, Japan, 2014); Всероссийской конференции «XXXI Сибирский теплофизический семинар» (Новосибирск, 2014); международной научной конференции «Современные технологии и развитие политехнического образования» «ПОЛИТЕХ – ДВ – 2015» (Владивосток 2015 г.); VIII Международном симпозиуме «Горение и плазмохимия» и международной научно-технической конференции «ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ-2015» (Алматы, Казахстан, 2015 г.); Twelfth International Conference on Flow Dynamics (ICFD 2015) (Sendai, Japan, 2015); IX Всероссийской конференции «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения» (Новосибирск, 2015 г.); The 13th International Conference on Combustion & Energy Utilization (Taipei, Taiwan, 2016); Thirteenth International Conference on Flow Dynamics (ICFD 2016) (Sendai, Japan, 2016).

Личный вклад автора. Научные и практические результаты, положения, выносимые на защиту, разработаны и получены автором. Общая научная идея, направления и задачи исследований были сформулированы при участии научного руководителя. В совместных публикациях автору принадлежит основная часть результатов исследований.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 30 научных работ, из них: три статьи в периодических изданиях из перечня ВАК, две статьи в других изданиях, 25 работ - в трудах Международных и Всероссийских научно-технических конференций.

Объем и структура работы. Материалы диссертации изложены на 149 страницах основного текста, включающих 51 рисунок и 19 таблиц. Работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов и рекомендаций, списка использованных источников из 97 наименований и 5 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования. Отмечена научная новизна и практическая значимость работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе на основе аналитического обзора работ российских и зарубежных исследователей в области использования вихревого сжигания топлива установлено, что положительные результаты получены после детальных исследований аэродинамики закрученного потока в циклонно-вихревых камерах с воздушным охлаждением и комбинированной генерацией вихря. Технология сжигания жидкого топлива в ЦВП использует комбинированный закрученный ввод воздуха, облегченную внутреннюю обмуровку, применение многосопловых центробежных форсунок, впрыск замазочной или технической воды. При этом увеличивается теплопроизводительность котлоагрегатов на 10-20 %; снижается удельный расход топлива на выработку теплоты $\approx 1-4\%$; уменьшаются удельные затраты электроэнергии на тягу и дутье $\approx 10-20\%$; упрощается эксплуатация котлоагрегата; уменьшаются отложения на трубах и увеличивается срок службы поверхностей нагрева; снижаются выбросы загрязняющих веществ в атмосферу ниже нормируемых значений на 15-40 %; возрастает коэффициент полезного действия до 93,7 %.

Успешный опыт циклонно-вихревого сжигания мазута на водогрейных и паровых котлах является основанием для исследований и внедрения данной технологии при сжигании природного газа. Из статистического анализа котлоагрегатов, используемых в энергосистемах ДФО, следует, что целесообразна разработка конструкции предтопка мощностью 65 МВт, как унифицированного для модернизации котельных установок различной мощности.

Результаты анализа литературных источников подтверждают актуальность работы, аргументированность поставленных в диссертации задач и их решение теоретическими и экспериментальными методами.

Во второй главе рассмотрены и представлены результаты модернизации котельных установок в четырёх энергосистемах Дальнего Востока с применением циклонно-вихревой технологии для сжигания природного газа.

Техническое решение модернизации парового котла БКЗ-120-100 Охинской ТЭЦ включало в себя замену имеющихся на котле восьми вихревых горелок на два ЦВП мощностью 65 МВт каждый (рисунок 1), замену третьей ступени трубчатого воздухоподогревателя на дополнительную ступень экономайзера по условиям тепловой схемы ТЭЦ.

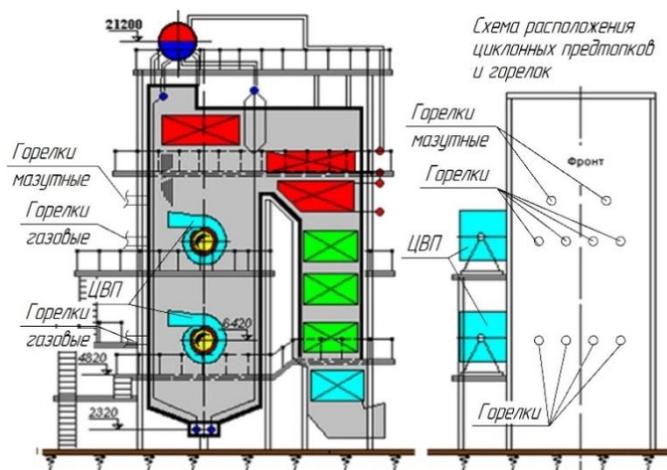


Рисунок 1 - Схема модернизированного парового котла БКЗ-120-100 Охинской ТЭЦ с горелочного на циклонно-вихревое сжигание природного газа

На водогрейном котле ПТВМ-100 Якутской ТЭЦ выполнена замена шестнадцати вентиляторов и горелок МГМГ-8 на два ЦВП мощностью 65 МВт каждый, вид котла до и после модернизации представлен на рисунке 2.

Трубная система топочной камеры реконструирована. Угол раскрытия пода уменьшен с 45° до 15° . В верхней части топки установлен дополнительный пакет из труб диаметром $\varnothing 38 \times 3$ мм, выполняющий две технико-экономические задачи: повышение экономичности котла и изменение его энергетической характеристики с пиковой практически на основную; повышение надежности работы нижнего пакета за счёт замены труб диаметром $\varnothing 28 \times 3$ мм на трубы диаметром $\varnothing 38 \times 3$ мм.

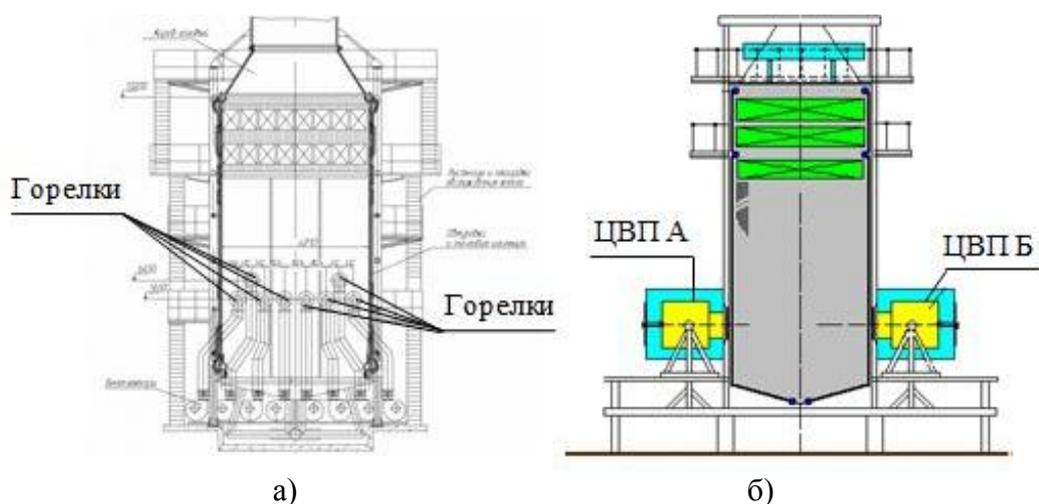


Рисунок 2 - Водогрейный котёл ПТМВ-100 ст.№2В Якутской ТЭЦ: а – схема котла до модернизации; б – схема модернизированного котла

В 2007 г. два водогрейных котла марки КВГМ-100-150 Хабаровской ТЭЦ успешно переведены с циклонно-вихревой технологии сжигания мазута на циклонно-вихревую технологию сжигания природного газа как основного вида топлива. На основании этих работ и опыта эксплуатации модернизированных котлов предложено при газификации энергетического оборудования Дальнего Востока выполнять модернизацию котлов заменой горелок на ЦВП.

Конструкция ЦВП мощностью 65 МВт с воздушным охлаждением и комбинированной генерацией вихревого движения представлена на рисунке 3. Основное сжигаемое топливо – природный газ, резервное – мазут. Разработанная конструкция ЦВП взята за основу при переводе в 2011 г. всех котельных установок Владивостокской ТЭЦ-1 и ТЦ «Северная» с мазутного топлива на газообразное, а именно: шесть водогрейных котлов КВГМ-100-150 МЦ (рисунок 4), три паровых котла БКЗ-75-16 и три водогрейных котла ЭЧМ-25/35.

Дополнительно на котлах КВГМ-100-150 (г. Владивосток) разработана и реализована схема циркуляции котловой воды – «противоток» с возможностью перехода на «прямоток». При работе котла по схеме «прямоток» КПД котла достигает 94,1 %, что выше нормативного значения 92,7 % (при работе на природном газе). При работе по схеме «противоток» достигнут КПД котла 96,1 %.

Режимно-технологические мероприятия, заключающиеся в перераспределении расхода газа по вводам, являются гарантированным механизмом в снижении оксидов азота за котлом, которые при $\alpha = 1,4$ во всем диапазоне нагрузок ниже нормируемого значения (125 мг/м^3) на 10-25 %.

В третьей главе представлена методика проведения исследований в промышленном ЦВП с целью определения влияния неизотермичности на параметры закрученного потока при горении («горячий» поток) и без горения («холодный» поток). Исследования проводились на ЦВП водогрейного котла КВГМ-100-150 ст. № 5 Владивостокской ТЭЦ-1, схема с расположением экспериментальных сечений представлена на рисунке 5. При выполнении пневмометрических исследований получены следующие данные: направление и значение вектора скорости закрученного «холодного» и «горячего» потоков, статическое и динамическое давление потоков, температура. При проведении «горячих» про-

дувок определялся состав газов на содержание O_2 . Производились замеры параметров, характеризующих балансовые ТЭП работы котла.

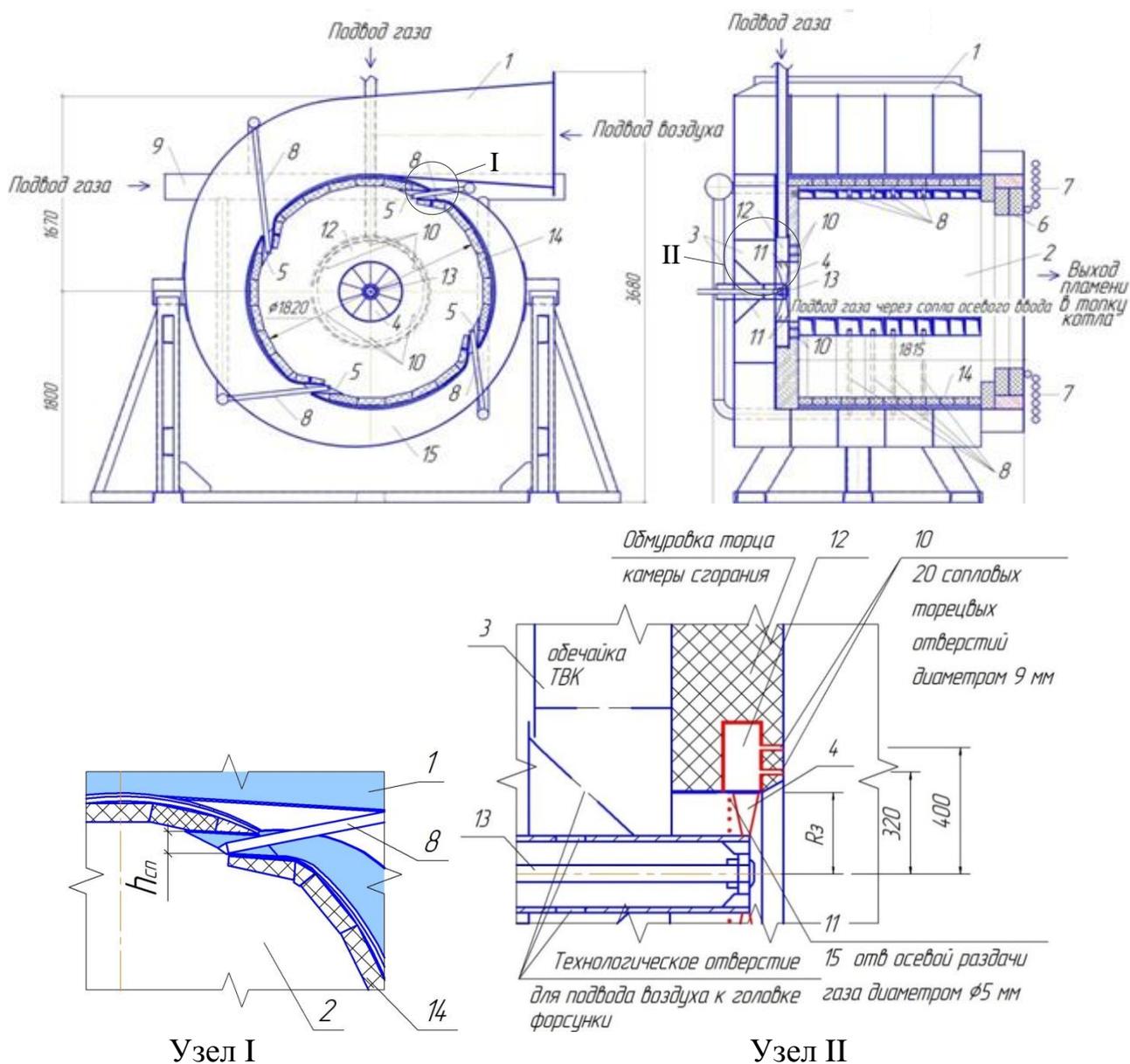


Рисунок 3 - Конструкция газо-мазутного ЦВП мощностью 65 МВт (поперечный и продольный разрезы): 1 – распределительный короб воздуха; 2 – камера сгорания; 3 – торцевая вихревая камера; 4 - аксиальный завихритель; 5 – сопла тангенциального ввода воздуха; 6 – пережим; 7 – поверхности нагрева котла; 8 – сопла тангенциального ввода газа; 9 – тангенциальный газовый коллектор; 10 – сопла торцевого ввода газа; 11 – сопла осевого ввода газа; 12 – торцевой газовый коллектор; 13 – центробежная форсунка; 14 - обмуровка; 15 – «улитка»

Для определения влияния условий ввода газа на формирование закрученных потоков проведены исследования при комбинировании ввода газа в ЦВП. Исследования проводились на следующих режимах:

- режим 1 – основной режим работы. Подвод газа осуществляется через тангенциальные, аксиальные и торцевые вводы газа;
- режим 2 – исследовательский. Газ распределяется тангенциально;
- режим 3 – растопочный. Газ подводится через осевые и торцевые вводы.

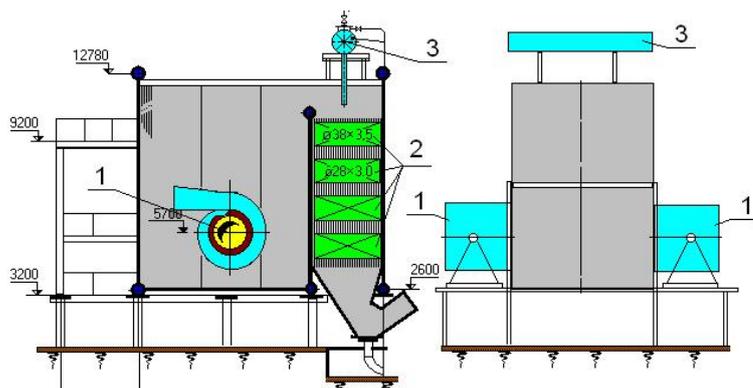


Рисунок 4 –Водогрейный котельный агрегат КВГМ-100-150: 1-ЦВП; 2-конвективные поверхности нагрева; 3- пневмоимпульсная очистка

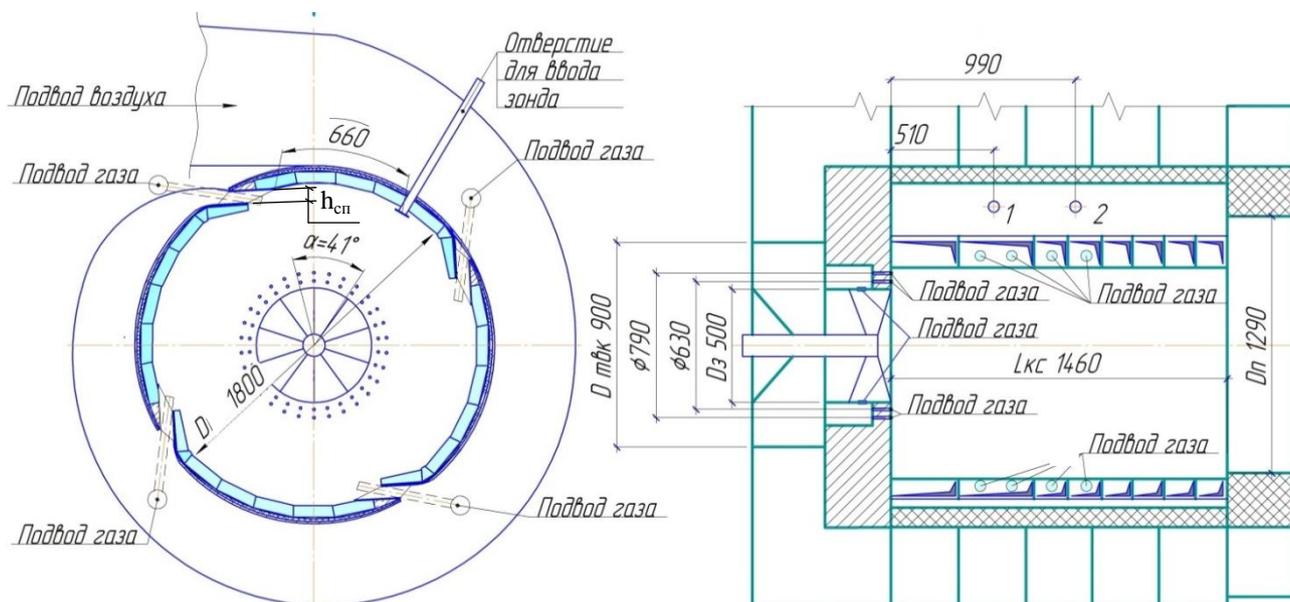


Рисунок 5 - Схема расположения экспериментальных сечений в ЦВП

Проведена оценка величины неисключённой систематической погрешности и рассчитана погрешность косвенных измерений, которая свидетельствует о достаточной (не более 10%) точности экспериментальных данных.

В четвертой главе приводится сравнительный анализ результатов исследований параметров закрученного в ЦВП потока без горения и при горении природного газа в размерном и безразмерном виде. Отмечается характерная особенность структуры закрученного потока (см. рисунок б) при холодных и при горячих продувках – это возрастание тангенциальной составляющей вектора скорости W_φ от пристенной области КС до максимальной $W_{\varphi\max}$ (квазипотенциальная область) и последующее снижение к оси камеры до значений скорости W_φ , равных нулю (квазитвёрдая область). При горении изменение профиля тангенциальной составляющей скорости аналогично изменению профиля W_φ холодного вихря, но при этом имеются области деформации W_φ как в квазипотенциальной, так и в квазитвёрдой областях, связанные с влиянием тангенциального ввода газа и аксиального ввода воздуха и газа.

Четырёхсторонний тангенциальный ввод воздуха и газа в ЦВП способст-

вует формированию осесимметричного вихря как при горении, так и без горения газа в предтопке. Отклонение аэродинамической оси вращения закрученного потока от геометрической оси камеры при горении составляет 7,7 % при первом и третьем режимах горения и 14,4 % при втором режиме горения газа.

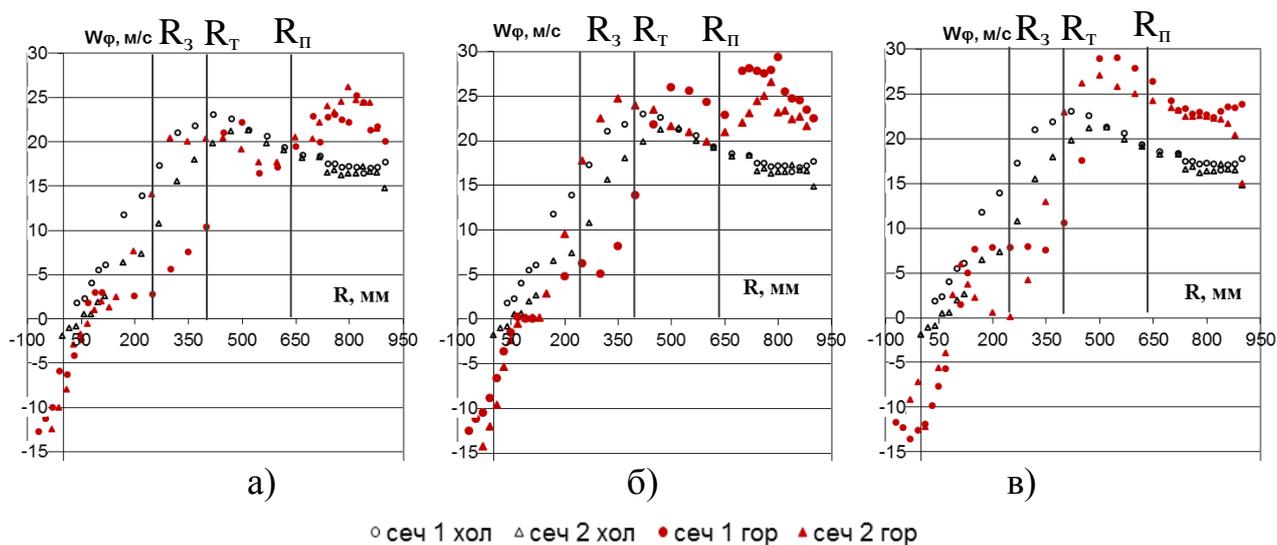


Рисунок 6 – Изменение W_ϕ потока: а) режим 1; б) режим 2; в) режим 3; R_3 – радиус завихрителя; R_T – радиус торцевых сопел; R_Π – радиус пережима

Максимальные значения тангенциальной составляющей скорости W_ϕ совпадают с областями возрастания температур, это наглядно показано на графиках (рисунки 6 и 7). За счёт воздушного охлаждения внутренней обмуровки обеспечена надёжность работы ЦВП на трёх режимах, так как значения температур потока около стенки не превышают 250 °С.

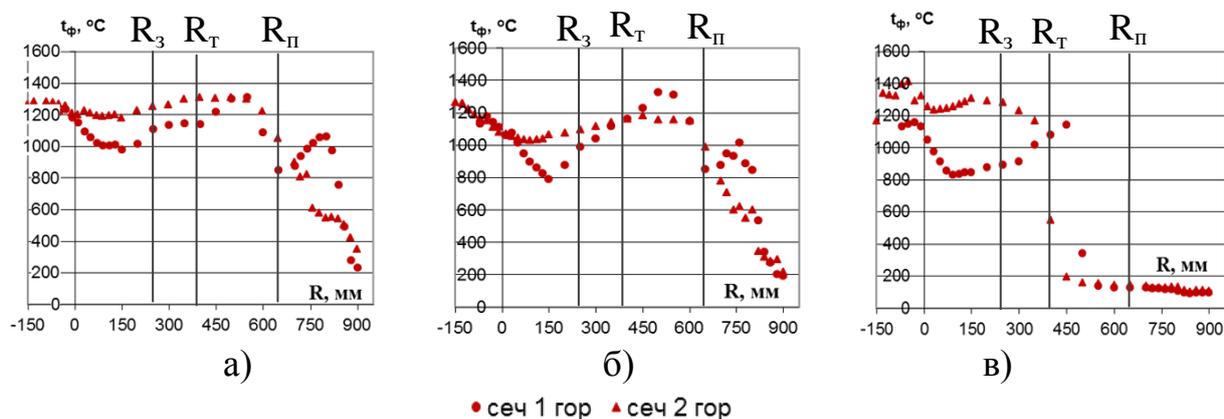


Рисунок 7 – Изменение температуры закрученного потока: а) режим 1; б) режим 2; в) режим 3; R_3 – радиус завихрителя; R_T – радиус торцевых сопел; R_Π – радиус пережима

Значения температур “горячего” закрученного потока в ЦВП указывают на стабильное и качественное сгорание основной части топлива в предтопке. Равномерностью распределения расхода газа по тангенциальным вводам создаются условия качественного перемешивания газовых сред, формирующих высокотемпературное замыкающееся кольцо. Процесс горения в предтопке интенсифицирует массо- и теплообмен между перемешивающимися потоками, что подтверждают результаты математического моделирования (рисунок 8).

Моделирование процессов вихревого горения газа производилось в программе Fluent с учётом турбулентности, теплообмена и химических реакций. Для описания турбулентного переноса используется RNG k-ε модель. Для расчёта горения применяется модель «Species Transport». Достоверность результатов моделирования проверена сопоставлением расчётных и опытных данных.

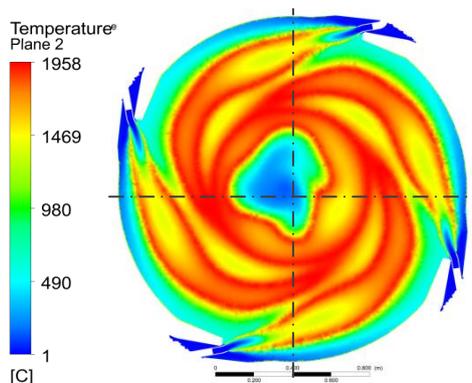


Рисунок 8 – Распределение температуры закрученного потока при четырёхстороннем тангенциальном вводе газа в предтопок

Третий режим работы рекомендуется использовать как растопочный до 15 % нагрузки котла, так как он обеспечивает прогрев ЦВП и котла за 30 минут. Распределение газа при третьем режиме обеспечивает заполнение камеры предтопка факелом на 20 % от общего объёма предтопка. Рост нагрузки котла осуществляется увеличением расхода газа, подаваемого тангенциально – режим 1 и режим 2. Заполнение объёма КС факелом при первом режиме составляет 80 %, а при втором 65-70 %.

Скорость горячего потока, в направлении выхода из предтопка, увеличивается по мере возрастания его температуры (рисунок 9). В пристенной области осевые перемещения «горячего» потока в среднем в 2 раза больше, чем W_x «холодного» потока. В сравнении со значениями W_x «холодного» потока, горение способствует увеличению в квазитвёрдой области осевой скорости потока в 2 раза в первом сечении и в 3,3-11 раз во втором сечении на трёх режимах.

Следствием изменения скорости потока является изменение статического давления в камере предтопка при горении (рисунок 10). При первом и втором режимах горения газа практически отсутствуют приосевые области отрицательных давлений $P_{ст}$, закрученный «горячий» поток истекает в топку котла (рисунок 9 а, б). При организации третьего режима горения, за счёт отрицательных $P_{ст}$ в приосевой зоне, возникают обратные токи из топки котла (рисунок 9 в), что приводит к возрастанию температуры потока в этой области до 1400 °С (рисунок 7 в).

В работе проведён сравнительный анализ результатов исследований закрученного в ЦВП потока без горения и при горении природного газа в безразмерном виде. За основу принята методика аэродинамического расчёта ЛПИ-ДВПИ, которая оправдала себя при обобщении полей скорости и давлений в циклонно-вихревых камерах различного назначения при $\rho = \text{const}$. За масштабные величины принята максимальная тангенциальная составляющая вектора скорости - $W_{\phi\text{max}}$ (м/с) и радиус $R_{\phi\text{max}}$ (м).

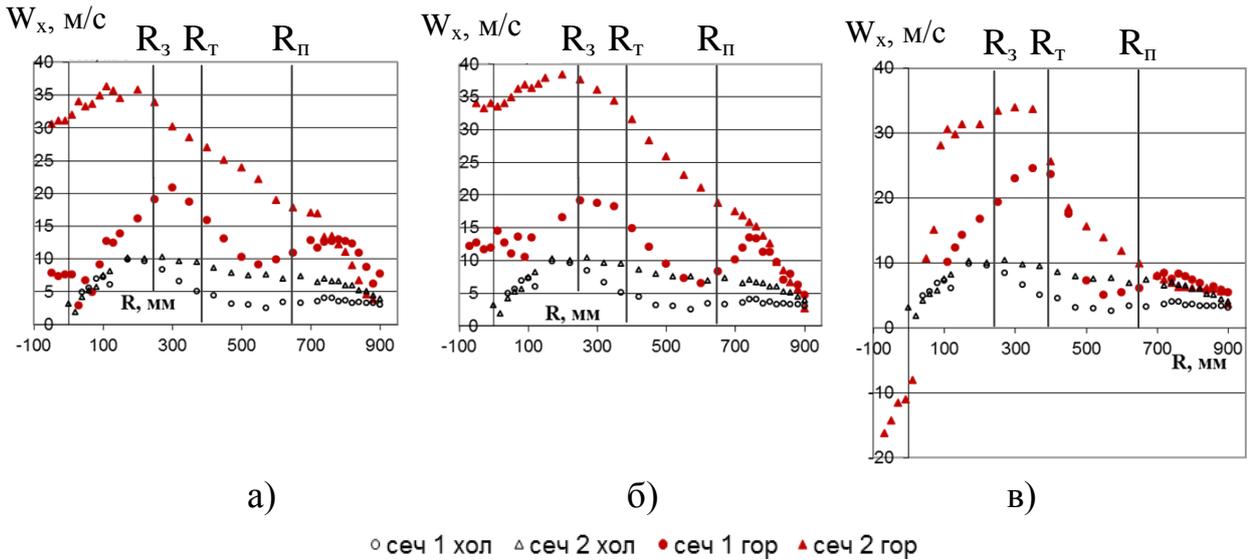


Рисунок 9 – Изменение W_x потока: а) режим 1; б) режим 2; в) режим 3; R_3 – радиус завихрителя; R_T - радиус торцевых сопел; R_Π – радиус пережима

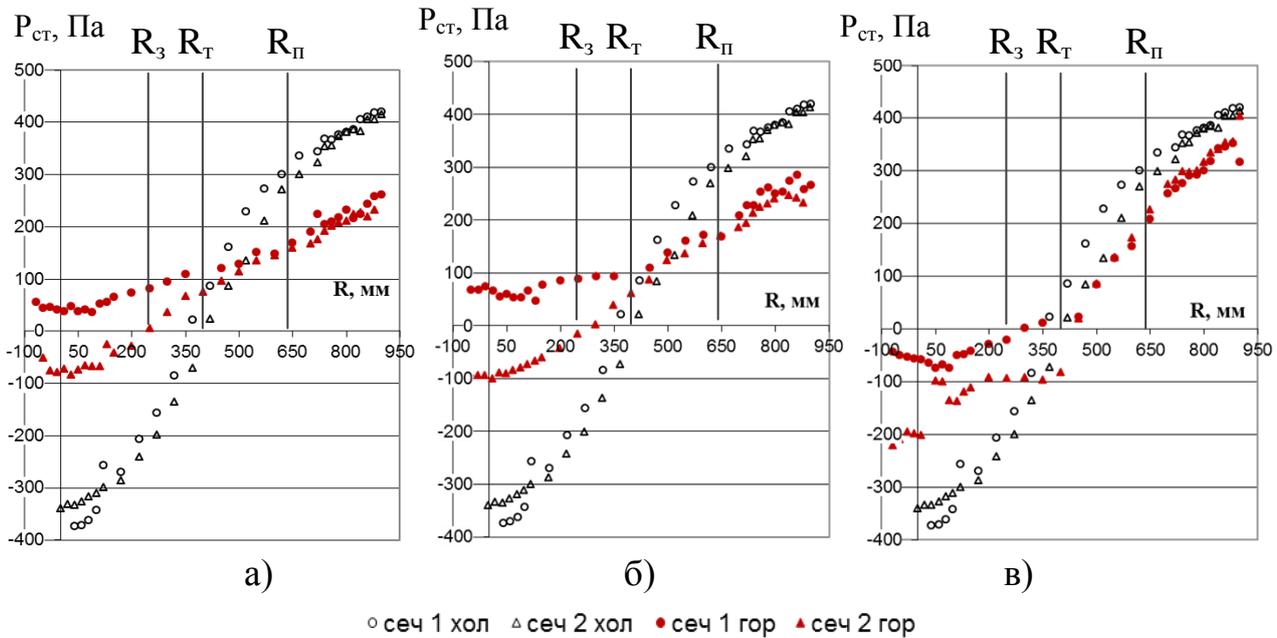


Рисунок 10 – Изменение $P_{ст}$ потока: а) режим 1; б) режим 2; в) режим 3; R_3 – радиус завихрителя; R_T - радиус торцевых сопел; R_Π – радиус пережима

Расчётные безразмерные значения тангенциальной составляющей вектора скорости вычисляются по формуле:

$$\bar{W} = \left(\frac{2 \cdot \eta}{1 + \eta^2} \right)^m, \tag{1}$$

где m – формпараметр; $\eta = \frac{R_i}{R_{\varphi max}}$ - безразмерный радиус, R_i – радиус на котором выполняются замеры в экспериментальном сечении, м.

На рисунке 11 представлены экспериментальные и расчётные \bar{W} на расстоянии $\bar{x}_1 = \frac{510}{1800} = 0,28$ и $\bar{x}_2 = \frac{990}{1800} = 0,55$ от торца камеры диаметром 1,8 м.

Формпараметр m - величина, зависящая от условий генерации закрученного потока, геометрических характеристик, режима работы и других факторов. При комбинированном вводе воздуха m рассчитывается по формуле:

$$m = \frac{\eta_j^2 + 1}{\eta_j^{2,4} - 1}, \quad (2)$$

где η_j – безразмерный радиус границы ядра.

В экспериментах формпараметру m , равному 1,42, соответствует безразмерный радиус границы ядра R_j потока «холодного» вихря $\eta_j = \frac{R_j}{R_{\phi max}} = 1,76$.

Формпараметр m «горячего» вихря определялся для двух основных режимов работы ЦВП при сжигании природного газа. Формпараметр m с учётом процесса горения рассчитан средний для квазитвёрдой области и средний для квазипотенциальной зоны. Значения усреднённого расчётного формпараметра m для режимов 1 и 2, представлены в таблице 1.

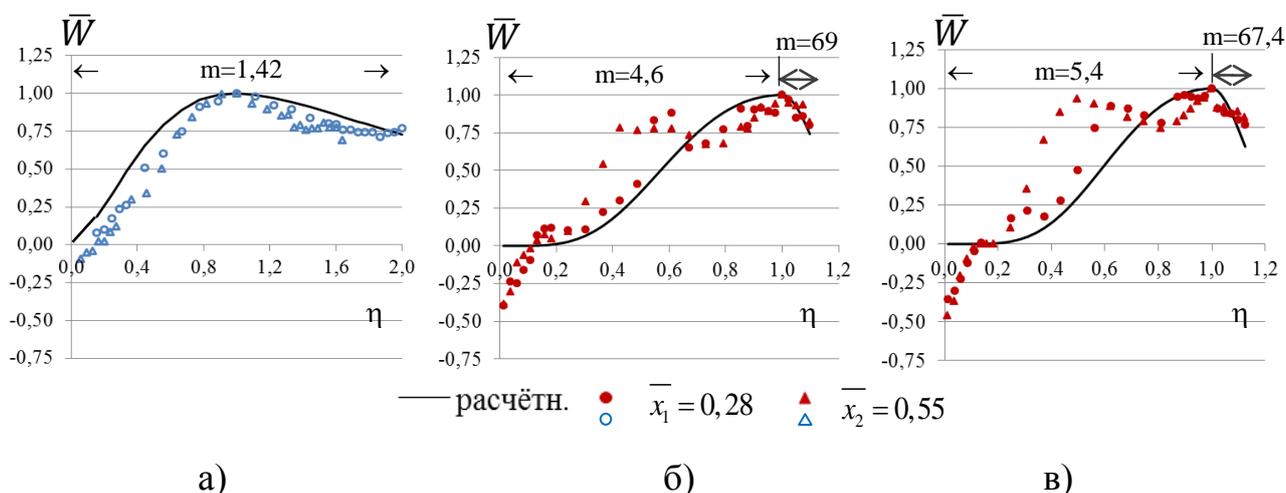


Рисунок 11 - Сопоставление экспериментальных и расчётных распределений \bar{W} по сечениям ЦВП: а) режим «холодных» продувок; б) режим 1; в) режим 2

Таблица 1 – Значения усредненного расчётного формпараметра m

Режим	Квазипотенциальная область	Квазитвёрдая область
Режим 1	69	4,6
Режим 2	67,4	5,4

Расчётные безразмерные значения осевой составляющей вектора скорости определялись по формуле:

$$U = \frac{W_x}{W_{\phi \max}} = - \frac{2\alpha}{\eta \cdot (1 + \eta^2)^3} \cdot \left(\frac{2\eta}{1 + \eta^2} \right)^m \cdot [(m + 1)^3 \cdot (1 - \eta^2)^3 + 6m^2\eta^2 \cdot (\eta^4 - 1) - 8m\eta \cdot (1 + 2\eta^2) + 2\eta^6 + 6\eta^2] \cdot \xi + C(\eta), \quad (3)$$

где $\alpha = Ro_r \cdot \frac{d_n \cdot m}{4 \cdot L \cdot K_q \cdot (m^2 - 1)} \cdot \frac{\rho_x}{\rho_r}$ коэффициент, характеризующий турбулентную структуру ядра потока, определен из материального баланса камеры с учётом процесса горения $\frac{\rho_x}{\rho_r}$; ρ_x – плотность «холодного» вихря; ρ_r – плотность «горя-

чего» вихря; $\xi = \frac{x}{R_{\phi \max}}$ – безразмерная осевая координата; x – расположение сечения от торца камеры (рисунок 5); $C(\eta) = 0$ – константа интегрирования.

На рисунке 12 представлены экспериментальные, расчётные и откорректированные профили осевой скорости U для первого сечения $\bar{x}_1 = 0,28$ и для второго сечения $\bar{x}_2 = 0,55$.

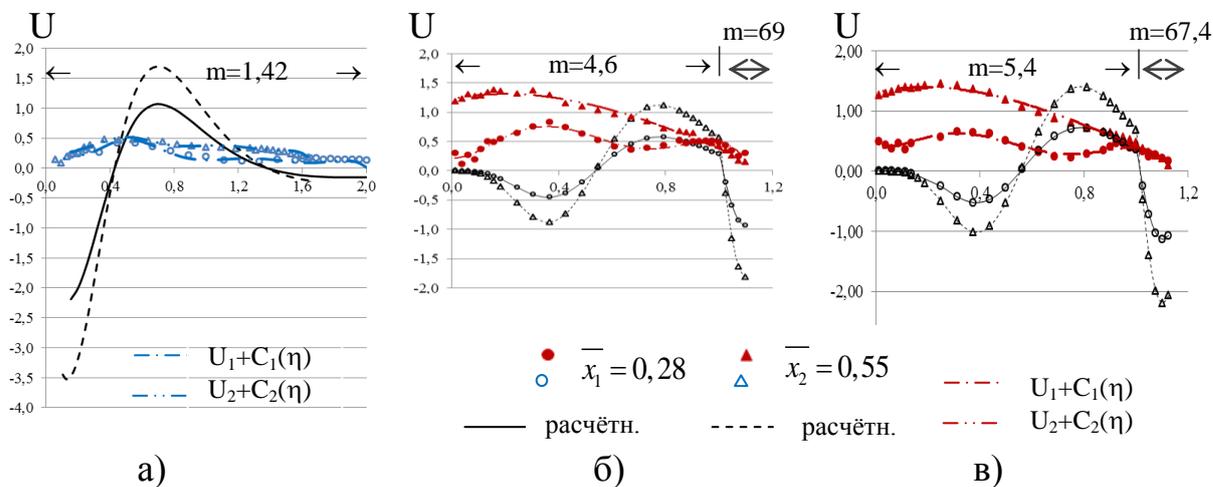


Рисунок 12 – Сопоставление экспериментальных и расчётных U по сечениям ЦВП: а) режим «холодных» продувок; б) режим 1; в) режим 2

Расчётные безразмерные значения статического давления $\bar{\Delta P}$, вычислялись по формуле:

$$\bar{\Delta P} = 2^{2m} \sum_{i=0}^{\infty} (-1)^{i+1} \cdot \frac{(m-i)!}{i! (m+i) \cdot (1+\eta^2)^{m+i}} + C, \quad (4)$$

где $C = 0$ – константа интегрирования.

Расчётный профиль $\bar{\Delta P}$ «горячего» вихря с учётом усредненного значения формпараметра m в квазитвёрдой и в квазипотенциальной областях отличается от характера изменения экспериментального профиля (рисунок 13). Сравнительный анализ результатов исследований закрученного в ЦВП потока без горения в безразмерном виде показал хорошую согласованность расчётных и экспериментальных данных для W_{ϕ} и $\bar{\Delta P}$. С учётом влияния горения газа расчётные и экспериментальные значения для W_{ϕ} , $\bar{\Delta P}$ и U практически не коррелируются. Несоответствие рассчитанных по методике аэродинамического расчёта ЛПИ-ДВПИ и экспериментальных значений параметров «холодного» (для U) и «горячего» потока объясняется двумя основными причинами:

- в формулах не учтено влияние осевого ввода воздуха в камеру ЦВП;
- распределение $U = f(\varphi, \eta, m, \xi)$ дано при $C(\eta) = 0$, а распределение $\bar{\Delta P}$ дано при $C = 0$.

В диссертационной работе приводятся формулы для расчёта констант интегрирования $C(\eta)$ для U и приводятся эмпирические зависимости $\bar{\Delta P} = f(\eta)$. В таблице 2 приведены формулы $C(\eta)$ для корректировки (3), которые находятся из условия соответствия эмпирическим данным для первого режима (основной)

распределения газа в ЦВП. На рисунке 12 представлены экспериментальные, расчётные и откорректированные профили осевой скорости U .

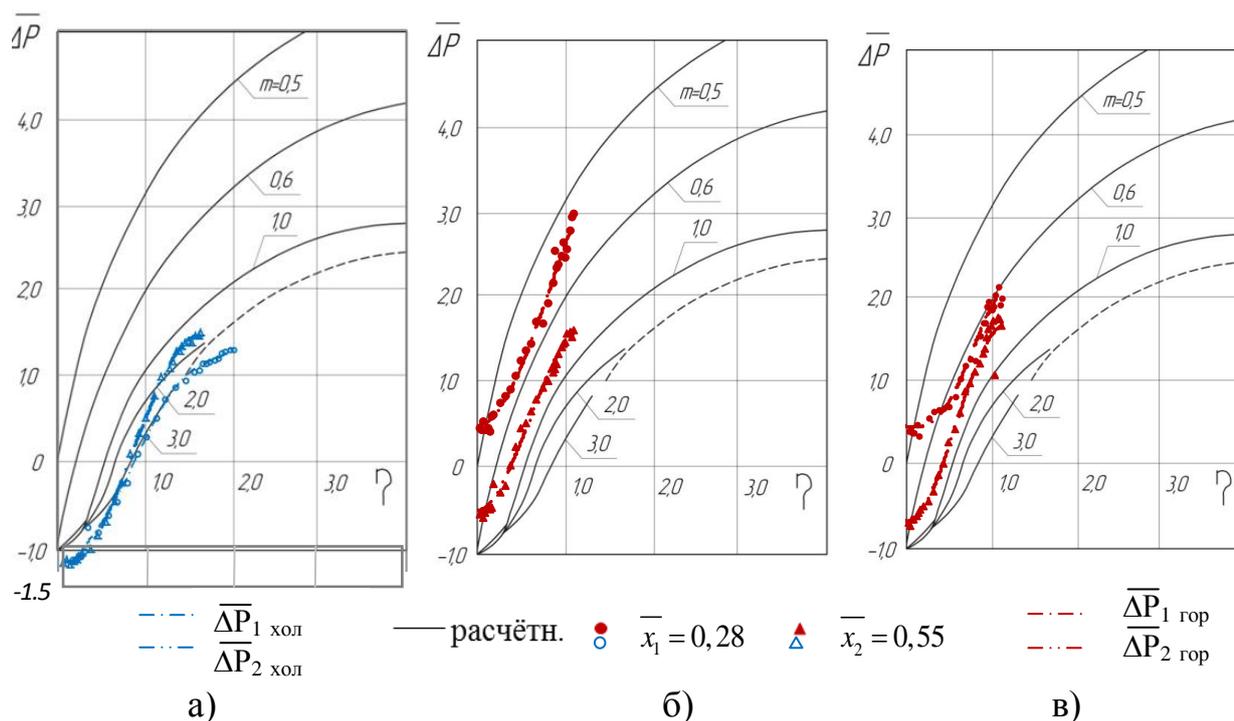


Рисунок 13 – Сопоставление экспериментальных и расчётных $\overline{\Delta P}$ по сечениям ЦВП: а) режим «холодных» продувок; б) режим 1; в) режим 2

Таблица 2 - Функция $C(\eta) = f(\eta)$ к формуле (3)

Наименование	Безразмерная осевая скорость U_1 в сечении 1	Безразмерная осевая скорость U_2 в сечении 2
Безразмерное расстояние от торца камеры до сечения	$\overline{x}_1 = \frac{x_1}{D} = 0,28$	$\overline{x}_2 = \frac{x_2}{D} = 0,55$
Режим 1 – основной, комбинированный режим (ввод газа через тангенциальные, торцевые и осевые сопла), $C(\eta) = f(\eta)$	$C_1(\eta) = -47,2 \cdot \eta^5 + 140,9 \cdot \eta^4 - 134,8 \cdot \eta^3 + 42,7 \cdot \eta^2 - 0,93 \cdot \eta + 80,2$ при $\eta \geq 1$, $m = 69$ $C_1(\eta) = -122,9 \cdot \eta^6 + 260,5 \cdot \eta^5 - 131,5 \cdot \eta^4 - 35,4 \cdot \eta^3 + 29,9 \cdot \eta^2 - 0,99 \cdot \eta + 0,2$ при $\eta \in (0; 1)$, $m = 4,6$	$C_2(\eta) = -204,3 \cdot \eta^2 + 450,2 \cdot \eta - 246$ при $\eta \geq 1$, $m = 69$ $C_2(\eta) = -177,4 \cdot \eta^6 + 414,1 \cdot \eta^5 - 283,2 \cdot \eta^4 + 27,6 \cdot \eta^3 + 7,1 \cdot \eta^2 + 0,1 \cdot \eta + 1,2$ при $\eta \in (0; 1)$, $m = 4,6$

Предлагаемый подход обобщения газодинамических данных и расчёт параметров закрученного потока может быть использован для случая организации вихревого движения «горячего» потока.

Основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Впервые проведены исследования газодинамики в камере сгорания промышленного ЦВП при горении природного газа, которые выявили, что при горении существенно изменяются параметры закрученного потока по сравнению с изменением параметров холодного потока.

2. Выявлены области интенсивного смесеобразования и горения топливно-воздушной смеси. Определены режимы оптимальной работы ЦВП и котельной установки в целом.

3. Предложены формулы для расчёта констант интегрирования (из условия соответствия эмпирическим данным), корректирующих безразмерную осевую скорость закрученного потока, и эмпирические формулы для расчёта безразмерного статического давления с учётом влияния осевого ввода воздуха и горения газа в предтопке. Уточнены численные значения формпараметра m закрученного потока при горении газа в ЦВП для квазипотенциальной и квазитвёрдой областей, позволяющие рассчитывать безразмерные аэродинамические параметры закрученного потока.

4. Циклонно-вихревая технология сжигания природного газа повышает КПД котла до 96,1 %, снижает выбросы NO_x во всём диапазоне нагрузок ниже нормируемого значения (125 мг/м^3 при $\alpha = 1,4$) на 10-25 %.

5. Разработана и внедрена усовершенствованная конструкция ЦВП мощностью 65 МВт для сжигания основного топлива – природного газа и резервного – мазута. Получен акт внедрения.

6. На циклонно-вихревую технологию сжигания газа переведено 16 паровых и водогрейных котлов со значительным экологическим и экономическим эффектом.

7. Газификацию и модернизацию котельных установок на Дальнем Востоке предлагается осуществлять за счёт замены горелочных устройств на газомазутные циклонно-вихревые предтопки. На изготовление котельными заводами газомазутного ЦВП единичной мощностью 25, 35 и 65 МВт получен сертификат.

Основное содержание диссертации отражено в публикациях:

статьи, опубликованные в изданиях из перечня, рекомендованного ВАК:

1. Соловьёва, Т. А. Моделирование горения газа в циклонно-вихревом предтопке / С.В. Головатый, К.А. Штым, Т.А. Соловьёва // Научное обозрение. – 2013. - №6. – С. 56-62.

2. Соловьёва, Т. А. Особенности теплообмена в топках котлов с вихревыми предтопками / К.А. Штым, Е.Ю. Дорогов, Т.А. Соловьёва. // Сборник статей «Опыт эффективного использования энергетических ресурсов Дальнего Востока. (Научно-технический журнал, спец. выпуск). - М.: Горная книга. – 2014. - № 9421. – С. 13-22.

3. Solov'eva, T.A. Conversion of KVGM-100-150 boiler to cyclone-swirl burning of gas / K.A. Shtym, T.A. Solov'eva // Thermal Engineering. - 2015. - Vol. 62, - No.3. - P. 202-207.

статьи, опубликованные в других изданиях и за рубежом:

4. **Соловьёва, Т. А.** Исследование условий образования оксидов азота при сжигании природного газа в циклонно-вихревых предтопках / Штым К.А., Дорогов Е.Ю., **Соловьёва Т.А.**, Кузнецова Е.С., Головатый С.В. // Теплоэнергетика и энергосбережение / под. ред. А.Н. Штыма; Дальневост. федерал. ун-т. – Владивосток: Изд-во Дальневост. федерал. ун-та, 2011. – 257 с. – С. 157- 167.

5. **Соловьёва, Т. А.** Повышение эффективности работы котельного агрегата за счёт установки циклонно-вихревого предтопка / К.А. Штым, Т.А. Соловьёва // Новости теплоснабжения. – 2016. - №6. – С. 30-33.

публикации в материалах научно-технических конференций:

6. **Соловьёва, Т. А.** Выбор методики измерений аэродинамики неизотермического потока в циклонно-вихревой камере / Штым К. А., Соловьёва, Т. А. (Маркушина Т. А.) // Вологдинские чтения. – 2002. – №. 22. – С. 41.

7. **Соловьёва, Т. А.** Топливо-реверсивный котёл с циклонно-вихревым предтопком / Штым К.А., Рудницкий В.А., Соловьёва Т.А., Балабин Д.Н. // Актуальные проблемы современной энергетики. Материалы всероссийской научно-технической конференции. - г. Екатеринбург. – 2002 г.

8. **Соловьёва, Т. А.** Модернизация котла КЕ-35-14 ст. № 5 котельной ОАО "Ярославский ГОК" переводом на циклонно-вихревое сжигание мазута в предтопках Центра МКТ / Дорогов Е.Ю., Штым К.А., Соловьёва Т.А., Балабин Д.Н., Овчинников В.А., Аксёнов А.С. // Труды Дальневосточного государственного технического университета. Выпуск 134. г. Владивосток. 2002 г.- 156 с.- С.139-141.

9. **Соловьёва, Т. А.** Опыт сжигания газа на котлах с циклонно-вихревыми предтопками Центра МКТ / К.А. Штым, Т.А. Соловьёва // Теплофизика процессов горения и охрана окружающей среды: Материалы V и VI Всероссийских научно-технических конференций / Под ред. Ш. А. Пиралишвили. – Рыбинск: РГАТА, 2004. – 240 с. – С. 143-144.

10. **Соловьёва, Т. А.** Постановка исследований неизотермических аэродинамических потоков в газовом циклонно-вихревом предтопке водогрейного котлоагрегата ПТВМ-100 ст.№2 Якутской ТЭЦ / К.А. Штым, Т.А. Соловьёва // Вологдинские чтения. ДВФУ. Владивосток: 2004 г. №39 – С. 10-11.

11. **Соловьёва, Т. А.** Перевод Хабаровской ТЭЦ-2 на сжигание газообразного топлива / К.А. Штым, Т.А. Соловьёва // Вологдинские чтения. Материалы конференции. - Владивосток: 2004 г. №39 – С. 8-10.

12. **Соловьёва, Т. А.** Результаты аэродинамических исследований циклонно-вихревого предтопка, сжигающего газообразное топливо / К.А. Штым, Т.А. Соловьёва // В сб. трудов IV семинара вузов Сибири и Дальнего Востока по теплофизике и теплоэнергетике. Владивосток: ДВГТУ, 2005. - С. 29.

13. **Соловьёва, Т. А.** Анализ результатов обработки данных исследований циклонно-вихревого предтопка при работе на газе / К.А. Штым, Т.А. Соловьёва // Сб. материалов Всероссийской научно-практической конференции «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири». – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2006. – 550 с. С. 219-223.

14. **Соловьёва, Т. А.** Исследование смесеобразования в газовых циклонных предтопках / Т. А. Соловьёва // Проблемы реформирования и особенности развития электроэнергетики Дальнего Востока: материалы науч.-практич. конф. - Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2006. – 420 с. С.61-62.
15. **Соловьёва, Т. А.** Результаты исследования неизотермических закрученных потоков. / К.А. Штым, Т.А. Соловьёва // В сб. трудов VI Всероссийского семинара вузов по теплофизике и энергетике. - Красноярск СФУ. - 2009.- С.72-73.
16. **Соловьёва, Т. А.** Техничко-экологические результаты работы котлов КВГМ-100-150, модернизированных на циклонно-вихревое сжигание газа / К.А. Штым, Т.А. Соловьёва // Сб. материалов конференции с международным участием «VIII Всероссийский семинар вузов по теплофизике и энергетике». - Екатеринбург УрФУ, 2013 – 202 с. - С. 177-178.
17. **Соловьёва, Т. А.** Результаты работы котлов КВГМ-100-150 МЦ, модернизированных на циклонно-вихревое сжигание газа / Борода А.В., Лесных А.В., Соловьёва Т.А., Чистяков С.В., Штым К.А. // Пути совершенствования работы теплоэнергетических устройств: материалы всероссийской молодёжной конференции / под ред. А. С. Штым, зав. каф. ИСЗиС; Дальневост. Федерал. ун-т. - Владивосток: Издат. дом Дальневост. Федерал. ун-та, 2012. -372 с.– С. 160-166.
18. **Соловьёва, Т. А.** Зависимость образования оксидов азота от эффективности смесеобразования / Штым К.А., Лесных А. В., Соловьёва Т. А., Головатый С.В // Dynamics and Structure of Combustion Waves: 2nd International Conference, July, 23–27, 2014, Vladivostok: abstracts [Electronic publication] / ed. N.A. Lutsenko; School of Engineering FEFU, Vladivostok, Russia, 2014. Vladivostok: Far Eastern Federal University, 2014. [44 p.].
19. **Соловьёва, Т. А.** Оценка эффективности распределения воздуха и газообразного топлива в циклонно-вихревом предтопке / К.А. Штым, Т.А. Соловьёва // Сб. материалов Всероссийской конференции XXXI «Сибирский теплофизический семинар». - Новосибирск: ИТ СО РАН, 2014. - С. 173.
20. **Соловьёва, Т. А.** Исследование параметров вихревого потока при сжигании газа / К.А. Штым, Т.А. Соловьёва // Сб. материалов IX Всероссийской конференции с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения». - Новосибирск: ИТ СО РАН, 2015. - С.146.
21. **Соловьёва, Т. А.** Интенсификация смесеобразования в циклонно-вихревом предтопке при сжигании природного газа / Головатый С. В., К.А. Штым, Т.А. Соловьёва // Сб. материалов IX Всероссийской конференции с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения». - Новосибирск: ИТ СО РАН, 2015. - С.48.
22. **Соловьёва, Т. А.** Опыт эксплуатации на Дальнем Востоке котлоагрегатов оснащённых циклонно-вихревыми предтопками / А. Н. Штым, К.А. Штым, Т.А. Соловьёва // Материалы VIII международного симпозиума «Горение и плазмохимия» и научно-технической конференции «Энергоэффектив-

ность-2015». 16-18 сентября 2015г. – Алматы: Казак университi, 2015. 541 с. – с.512-516. ISBN 978-601-04-1388-7

23. **Solovyova, T.** Dependency of nitrogen oxides formation from mixture formation efficiency / K. Shtym, T. Solovyova, S. Golovatiy // Dynamics and Structure of Combustion Waves: 2-nd International Conference, July, 23–27, 2014, Vladivostok: abstracts Electronic publication School of Engineering FEFU 2014.

24. **Soloveva, T.** Special Features of Gas Combustion in Cyclone Vortex Burner / K. Shtym, T. Solovyova // Eleventh International Conference on Flow Dynamics (ICFD2014). October 8-10 at the Sendai International Center, Sendai, Japan, hosted by the Institute of Fluid Science, Tohoku University., 2014 .- P. 222-223.

25. **Soloveva, T.** Comparison of Gas Combustion Methods using Combustion Burner and Cyclone Vortex Burner / K. Shtym, T. Soloveva // Twelfth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2015). October 27-29 at the Sendai International Center, Sendai, Japan, hosted by the Institute of Fluid Science, Tohoku University., 2015 .- P. 204-205.

26. **Соловьёва, Т. А.** Влияние режимных условий при сжигании газа на параметры закрученного потока / К.А. Штым, Т.А. Соловьёва // Современные технологии и развитие политехнического образования [Электронный ресурс]: международная научная конференция - Владивосток: ДВФУ, 2015. - С. 640.

27. **Соловьёва, Т. А.** Исследование аэродинамики закрученных потоков на примере циклонно-вихревого предтопка котла БКЗ-75-39 Владивостокской ТЭЦ-1 / Ю. Б. Гончаренко, Т.А. Соловьёва, К.А. Штым // Сб. «Современные технологии и развитие политехнического образования». Научное электронное издание. - Владивосток: ДВФУ, 2016. - С. 522-526.

28. **Соловьёва, Т. А.** Исследования неизотермического закрученного потока / Штым К.А., Соловьёва Т.А., Лесных А.В. // Сб. «Современные технологии и развитие политехнического образования». - Владивосток: ДВФУ, 2016. - С. 467-471.

29. **Soloveva, T.** Influence of gas combustion upon swirled flow parameters/ K. Shtym, T. Soloveva // The 13th International Conference on Combustion & Energy Utilization (ICCEU). October 2-5 at the Convention Center National Taiwan University, Taipei, Taiwan. 2016. P. 77-81.

30. **Soloveva, T.** Research of Swirling Flows During Gas Combustion / K. Shtym, T. Soloveva // Thirteenth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2016), October 10-12 at the Sendai International Center, Sendai, Japan, hosted by the Institute of Fluid Science, Tohoku University., 2016 .- P. 240-241.

Подписано в печать 07.07.2017 г.

Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 1.

Тираж 100 экз. Заказ №

Отпечатано в типографии
Дирекции публикационной деятельности ДВФУ
690990, Владивосток, ул. Пушкинская, 10