

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



СОЛОВЬЁВА

Татьяна Алексеевна

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

05.14.04 - промышленная теплоэнергетика

диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Штым Константин Анатольевич

Владивосток - 2017

Содержание

Введение.....	4
Глава 1. Циклонно-вихревая технология сжигания топлива.....	12
1.1 Аэродинамические принципы организации вихревого сжигания	12
1.2 Опыт освоения вихревого сжигания топлива	13
1.3 Сжигание природного газа в горелках.....	21
1.4 Исследования вихревого сжигания на энергетических объектах Дальнего Востока.....	24
1.5 Постановка задач исследований.....	27
Глава 2. Модернизация паровых и водогрейных котельных установок на циклонно-вихревое сжигание природного газа	30
2.1 Модернизация парового котла БКЗ-120-100.....	30
2.2 Модернизация водогрейного котла ПТВМ-100.....	38
2.3 Усовершенствованная конструкция промышленного циклонно- вихревого предтопка для сжигания природного газа.....	56
2.4 Результаты модернизации водогрейных котлов марки КВГМ-100-150 ...	59
2.5 Техничко-экономическое обоснование модернизации.....	65
Глава 3. Постановка исследований закономерностей формирования вихревого движения в ЦВП.....	69
3.1 Описание экспериментальной промышленной установки и схемы измерений.....	69
3.2 Обработка экспериментальных данных. Оценка погрешности измерений.....	77
3.3 Численное моделирование процессов горения в ЦВП.....	83
Глава 4. Распределение параметров закрученного потока в циклонно-вихревом предтопке	87
4.1 Анализ результатов исследований закрученного в ЦВП потока без горения	87

4.2 Анализ результатов исследований закрученного в ЦВП потока при сжигании природного газа	92
4.3 Корректировка аэродинамического расчёта	109
Заключение	122
Список сокращений и условных обозначений	124
Список литературы	126
Приложение А	137
Приложение Б	139
Приложение В	144
Приложение Г	148
Приложение Д	149

Введение

В диссертационной работе представлены результаты разработок и внедрений циклонно-вихревой (ЦВ) технологии сжигания природного газа на паровых и водогрейных котлах средней мощности, результаты выбора рационального подвода газа в камеру сгорания (КС) циклонно-вихревого предтопка (ЦВП), данные исследований влияния комбинирования подвода газа на изменение технико-экономических показателей (ТЭП) работы котельной установки и на параметры закрученного потока в объеме КС ЦВП с воздушным охлаждением. Организация комбинированного процесса сжигания природного газа дает возможность влиять на геометрию факела в КС ЦВП и в топке котельной установки. В работе показано, как циклонно-вихревая технология комбинированного сжигания газа улучшает экологические и ТЭП модернизированных котлов за счёт увеличения их производительности, КПД и снижения вредных выбросов.

Актуальность темы диссертации. Модернизация теплоэнергетического оборудования позволяет повысить эффективность его работы. Модернизация - это один из перспективных вариантов в направлении совершенствования энергетики России, предусмотренный энергетической стратегией её развития до 2035 г. [91] и «Комплексной программой развития электроэнергетики Дальневосточного федерального округа до 2025 г.» [35], разработанной в соответствии с поручением президента РФ. Основной целью энергетической стратегии России до 2035 г [91] является переход энергетического сектора страны через структурную трансформацию на более высокий, качественно новый уровень, максимально содействующий динамичному социально-экономическому развитию Российской Федерации. Для достижения цели необходимо выполнить ряд задач, первой из которых является изменение качественной и возрастной структуры основных производственных фондов за счет ускоренной модернизации основного оборудования.

Повышение эффективности работы теплоэнергоисточников в энергосистемах Дальнего Востока является особо актуальным и важным вопросом потому,

что износ энергетического оборудования ТЭС ДФО составляет в среднем от 60 до 70 % [30].

Согласно энергетической стратегии России до 2035 г. планируется помимо традиционных месторождений осваивать новые ресурсы газа, в частности Восточной Сибири и Дальнего Востока. Планируется прирост добычи газа до 40 %. Помимо создания новых экспортных маршрутов на мировой рынок Азиатско-Тихоокеанского региона планируется газификация российских регионов - Восточной Сибири и Дальнего Востока.

Основное оборудование энергоисточников Дальнего Востока, с учетом новой стратегии России, переводят на сжигание газа. Полная замена энергетического оборудования является сложной и очень затратной программой. Одним из относительно малозатратных и эффективных способов повышения экономичности оборудования является его модернизация. Модернизировать котельную установку можно за счёт её оснащения традиционными газомазутными горелочными устройствами российского или зарубежного производства. Усовершенствовать технологию сжигания топлива можно используя циклонно-вихревые предтопки. Стоит отметить, что на Дальнем Востоке более 60 единиц котельных агрегатов модернизированы на циклонно-вихревую технологию сжигания мазута. Данная технология зарекомендовала себя как высокоэффективная [69, 68], поэтому совершенствование циклонно-вихревой технологии сжигания газообразного топлива является перспективным направлением в решении первоочередных задач, поставленных в энергетической стратегии России.

Исследованием специфики закрученных потоков и применением вихревых камер для интенсификации энерготехнологических процессов занимаются: С.В. Алексеенко, К.А. Григорьев, А. Гупта, Г.Н. Делягин, Ю. В. Овчинников, Ш.А. Пиралишвили, М. Е. Пузырёв, В.В. Саломатов, Н. Сайред, Ф.А. Серант, А.Н. Штым, Satoru Ishizuka. В работах Л.И. Мальцева, В.И. Мурко, А.Ф. Рыжкова, Э.И. Розенфельда, Л.М. Цирульникова, 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 пребы-

вания продуктов сгорания в зоне высоких температур, а также способа сжигания. Эти условия в совокупности определяются налаженными режимами работы котла во всем диапазоне нагрузок, аэродинамикой факела в топке, которая зависит от совершенства конструкции горелочного устройства, геометрии топки, условий теплообмена и т.д.

Повысить эффективность сжигания жидкого и газообразного топлива при надежных условиях работы оборудования, продлить его эксплуатационный ресурс, оптимизировать экологические и экономические параметры можно путём модернизации котельных агрегатов на усовершенствованную циклонно-вихревую технологию сжигания топлив.

В ДВПИ-ДВГТУ-ДВФУ многолетние исследования аэродинамики циклонно-вихревых камер привели к успешной реализации данной технологии для сжигания мазута на шестидесяти котлах двадцати четырёх типоразмеров в четырёх энергосистемах ДФО.

Изменения в топливной политике региона (с угольного и мазутного топлива на природный газ) поставили задачу провести эффективную и малозатратную модернизацию котельной установки.

Работа выполнена в рамках приоритетного направления развития науки, технологий и техники РФ Пр–577 «Энергосберегающие технологии», критические технологии «Производство электроэнергии и тепла на органическом топливе», «Системы жизнеобеспечения и защиты человека», «Энергосбережение», а также в рамках научных исследований АНО научно-технический и внедренческий Центр «Модернизации котельной техники» ДВФУ и при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, выделяемой по госбюджету кафедре Теплоэнергетики и теплотехники и международной лаборатории горения и энергетики ДВФУ (договор 14.У26.31.0003).

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, повышающего эффективность работы котельной установки.

Для достижения этой цели необходимо решить 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 при холодных продувках и сжигании газа (горячих продувках).
4. Внедрить проекты модернизации котельных установок с ЦВП, сжигающих природный газ.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использованы пневмометрические, термометрические, газоаналитические методы исследований газодинамических и теплообменных процессов в промышленных ЦВП. Экспериментальные исследования проведены в промышленных условиях, результаты обобщены в размерном и безразмерном виде и проанализированы в сравнении с данными других авторов.

Научная новизна

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.

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.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Усовершенствованная конструкция ЦВП мощностью 65 МВт для сжигания газообразного топлива в котельных установках средней мощности.

2. Оптимальные режимы распределения газа в объёме КС ЦВП, улучшающие технико-экономические показатели (ТЭП) и экологические характеристики работы котельной установки.

3. Экспериментальные и расчётные результаты исследований процесса горения природного газа в ЦВП. Эмпирические формулы для расчёта констант интегрирования, корректирующих аэродинамические безразмерные параметры закрученного потока с учётом горения газа в предтопке. Численные значения формпараметра m при горении газа, которые рекомендуется учитывать при расчёте аэродинамических параметров закрученного потока.

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.

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».

Достоверность результатов работы обеспечена комплексным расчётно-экспериментальным подходом к решению поставленных задач с применением вычислительных средств, сертифицированного оборудования, методов исследования, соответствующих современному состоянию в области теоретической теплотехники, гидродинамики, удовлетворительным совпадением расчётных данных с экспериментальными результатами, полученными на действующем экспериментальном промышленном оборудовании. Выводы достаточно хорошо коррелируют с результатами, полученными другими исследователями.

Апробация работы. Основные положения работы, результаты теоретических, вычислительных, экспериментальных исследований и внедрений докладывались и обсуждались на: «IV International Young Scholars' Forum 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 конференций «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 издано 30 публикаций, в том числе 3 статьи в рецензируемых изданиях из списка ВАК.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и приложений. Диссертационная работа содержит 149 страниц машинописного текста, 51 рисунок, 19 таблиц, список литературы из 97 наименований и 5 приложений.

Глава 1. Циклонно-вихревая технология сжигания топлива

1.1 Аэродинамические принципы организации вихревого сжигания

Топочный процесс основывается на аэродинамической структуре газоздушного потока [33]. Вихревой топочный процесс основывается на использовании криволинейного движения газоздушного потока за счёт создания устойчивых и управляемых вихрей в объёме топочной камеры. Круговое движение несущего вихря заставляет топливовоздушную смесь циркулировать в топочном объёме столько раз, сколько необходимо для её полного сгорания. Так как при циркуляции топливовоздушного потока развивается центробежный эффект, который отбрасывает частицы к периферии, то необходимо придавать вихревой камере аэродинамический обтекаемый профиль, что и привело к созданию со временем различных вихревых топочных камер. Принципиальная схема вихревого сжигания представлена на рисунке 1.1.

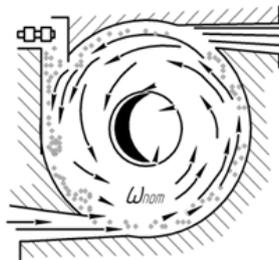


Рисунок 1.1 - Принципиальная схема вихревого сжигания

Вихревое сжигание позволяет частице сгорать непосредственно в потоке, но при условиях, которые позволяют частице пребывать в топочном объёме определенное время.

Циркуляционно-вихревые топки, использующие слабозакрученные и неупорядоченные вихри, явились переходным типом к топочным устройствам, которые получили название «циклонные топки», так как в основу их была положена аэродинамическая модель циклонов-сепараторов. Известно, что в циклонах-сепараторах применяются камеры с хорошо обтекаемой внутренней полостью и

тангенциальным подводом основной массы воздуха при таких скоростях, которые обеспечивают значительный центробежный эффект. Для аэродинамической структуры циклонно-вихревых камер сгорания свойственно присутствие устойчивых высоконапряженных циркуляционных зон. Их рациональное использование имеет решающее значение в эффективном смесеобразовании, то есть в процессе, определяющем скорость реакции горения. Именно удачное использование этих зон, вывело со временем циклонно-вихревые камеры на самый высокий уровень по теплонапряженности в энергетических установках.

1.2 Опыт освоения вихревого сжигания топлива

В данной диссертационной работе основное внимание уделено сжиганию природного газа, но первоначально циклонный принцип организации горения был предложен Г. Ф. Кнорре, еще в начале 30-х годов XX века, для сжигания твёрдого топлива [65]. Улучшение горения возможно осуществить закруткой потока, тем самым улучшая смешение топлива и окислителя, способствуя устойчивому горению за счёт теплообмена в вихревых зонах между продуктами горения и реагентами. Этот принцип заложен в большинстве конструкций газомазутных горелочных устройств.

Освоение циклонно-вихревой технологии в стране и мире началось в начале XX века. С учетом топливной политики того времени основное внимание уделялось сжиганию угля в циклонных камерах [69]. Работы исследователей были направлены на изучение и внедрение циклонно-вихревого принципа формирования топочного процесса. Промышленные исследования топочных камер с горизонтальными циклонными предтопками, сжигающими угли, в начале 70-х годов замедлились. Основными причинами являлись трудности с обеспечением устойчивого удаления жидкого шлака во всем диапазоне нагрузок котлов для разных марок сжигаемых углей. Не удавалось разработать надежную конструкцию циклона, работающего длительный период времени.

В 70-е годы на ТЭЦ-23 Мосэнерго были установлены четыре котла типа

ТГМП-314Ц Таганрогского завода с горизонтальными циклонными предтопками, выполненными по рекомендациям МО ЦКТИ [38, 15]. Авторы монографии [65] имели опыт сжигания солярового масла в модели циклонной камеры с относительным диаметром пережима $d_{п}$ равным 0,33, но всё же ими были даны проектные рекомендации для изготовления горизонтального циклонного предтопка сжигающего мазут, а именно: пережим камеры $d_{п}$ равен 0,44; калибр \bar{L} изменяется от 1 до 1,5; водяное охлаждение; ошипованная сложная обмуровка. Рекомендуемый напор не более 400 мм.вод.ст., подогретого свыше 250 °С воздуха. Подача первичного (от 30 до 40 %) и вторичного воздуха отдельная. В целом основой проекта МО ЦКТИ была очень сложная конструкция предтопка, который разрабатывался для сжигания угольной пыли с жидким шлакоудалением.

Исследователи предполагали, что сжигание жидкого топлива в циклонных предтопках в сравнении с углем позволит: исключить высокотемпературную газовую коррозию на экранных трубах; повысить надежность экранных поверхностей нагрева за счёт уменьшения падающих тепловых потоков; получить эмиссионные характеристики факела при сжигании жидкого и газообразного топлива такие, которые обеспечат регулировку температуры перегрева пара; создать условия сжигания мазута с минимальными избытками воздуха ($\alpha = 1,01 \dots 1,02$) и за счёт этого снизить скорость загрязнения и коррозии конвективной части котла. За многие годы эксплуатации этих котлов не удалось обеспечить их надежную работу на циклонных предтопках. Периодически происходило прогорание обшивки предтопков (особенно в зоне примыкания предтопков к топочным экранам), обгорали газовые сопла и другие элементы предтопка. Переход с газа на сжигание мазута и наоборот дополнительно ускорял процесс разрушения огнеупорной кладки в предтопке. Это являлось причиной появления большой тепловой неравномерности и увеличения локальных тепловых потоков. В результате получалось кризисное ухудшение работы как гидравлического, так и температурного режимов экранной системы предтопка. По этим причинам эксплуатация котлов ТГМП-314Ц фактически производилась при высокой степени их аварийности. Затраты на установку на котле циклонных предтопков на 10-15 % превышают стоимость ана-

логичного котлоагрегата с газо-мазутными горелками. Потребление электроэнергии на собственные нужды в 2,5 раза выше, чем у котла с горелками, что указывает на высокое аэродинамическое сопротивление предтопок. Концентрацию выбросов оксидов азота при сжигании газа удалось снизить только до 520-540 мг/м³, а при сжигании мазута до 730-740 мг/м³, что значительно превышает нормативные значения. Перечисленные причины привели к реконструкции всех котлов ТГМП-314Ц ТЭЦ-23 с циклонной на горелочную технологию сжигания топлива [15, 28].

В начале 80-х годов XX века опять возник интерес исследователей к циклонно-вихревой технологии сжигания топлива. В США такие котлостроительные фирмы как Babcock & Wilcox (сокращенно B&W), Thompson-Ramo-Wooldridge (сокращенно TRW) и др. начали совершенствовать и изобретать конструкции циклонных предтопок, сжигающих уголь на действующих котлах. Цель этих исследований состояла не только в усовершенствовании конструкции предтопка и вихревой технологии, но и в перспективе перевода мазутных котлов на сжигание твёрдого топлива в циклонных предтопках. Американская компания Babcock & Wilcox разработала технологию циклонно-вихревого сжигания угольной пыли с низкой температурой плавления золы (рисунок 1.2). Основным недостатком этой технологии являлся быстрый износ внутренних поверхностей циклона. Конструктора-исследователи начали активно развивать программу по повышению надежности внутренних поверхностей циклонного предтопка с применением новых материалов и передовых технологий.

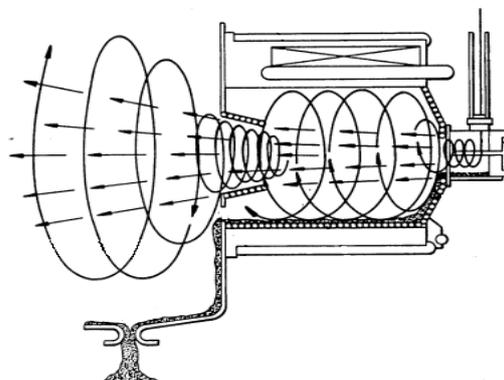


Рисунок 1.2 - Схема движения потоков в циклонном предтопке компании Babcock & Wilcox

Усовершенствованный и модифицированный предтопок (рисунок 1.3) выполнен с применением новых поверхностей охлаждения повышенной механической прочности [92], что позволило значительно продлить срок службы предтопка. Конструктивно воздух в циклонный предтопок подводится двумя независимыми потоками в ось предтопка и тангенциально через один ввод. Относительный диаметр пережима не более 0,5. Изготавливаются предтопки единичной мощностью от 44 до 125 МВт с водяным охлаждением, которые имеют длину от 6 до 10 м и диаметр от 1,8 до 3 м. Предтопки оснащаются горелками для сжигания различных видов топлива, таких как мазут, дизельное топливо, природный газ, лигнит, шламы бумажного производства, дерево, а также имеется опыт по сжиганию коксового газа и использованных шин.

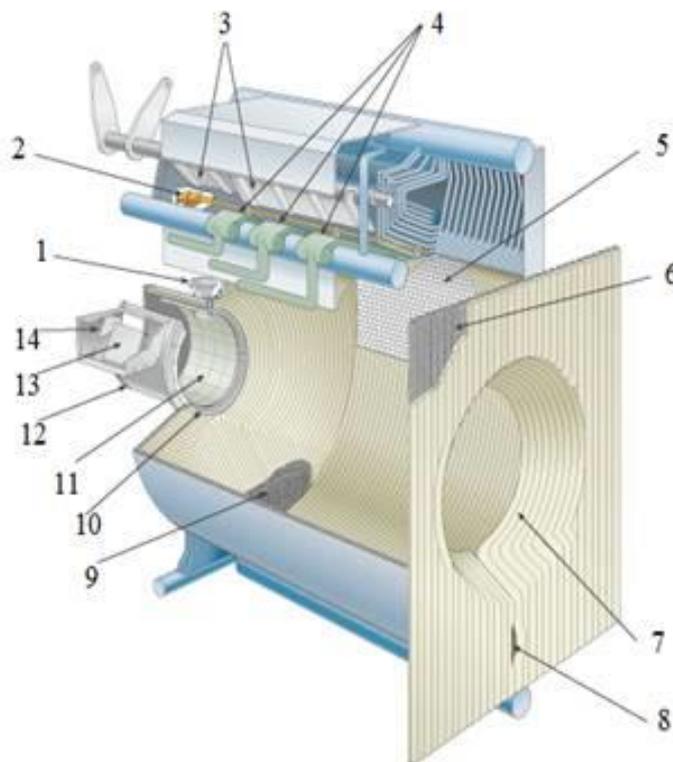


Рисунок 1.3 - Циклонный предтопок конструкции Babcock & Wilcox [132]:

1-вход угольной пыли; 2- жидкотопливная горелка; 3-заслонка регулирования скорости вторичного воздуха; 4-газовые горелки; 5- зона ошипованной поверхности; 6-экранная панель топки котла; 7- выходная амбразура; 8-шлакоотвод; 9- экранная панель циклонного предтопка; 10- ошипованная амбразура; 11-износостойкая обмуровка; 12-радиальная горелка; 13-первичный воздух; 14-третичный воздух

В 2010 г. компания Babcock & Wilcox оформила патент [93] на циклонный предтопок, в котором реализован способ снижения оксидов азота при сжигании топлива с избытком воздуха $\alpha \leq 0,9$. Нестехиометрический ввод воздуха организован как в камеру сгорания предтопка, так и в топку котла.

Компания Babcock & Wilcox в сотрудничестве с научно-исследовательскими центрами ведет работы по усовершенствованию процессов смесеобразования и горения. Задача совместных усилий заключается в повышении эффективности циклонно-вихревой технологии в условиях длительной, надежной и стабильной работы, при этом стремясь к снижению вредных выбросов в атмосферу. Исследования показывают, что влиять на процесс смесеобразования и горения проще в ограниченном объеме. Для этого необходимо знать в каких областях происходят реакции связанные с горением и образованием оксидов азота. Тогда постоянное воздействие водой или концентрацией кислорода позволит добиться вполне эффективных результатов без использования дорогостоящих систем рециркуляции дымовых газов и нестехиометрического горения с большим количеством горелок.

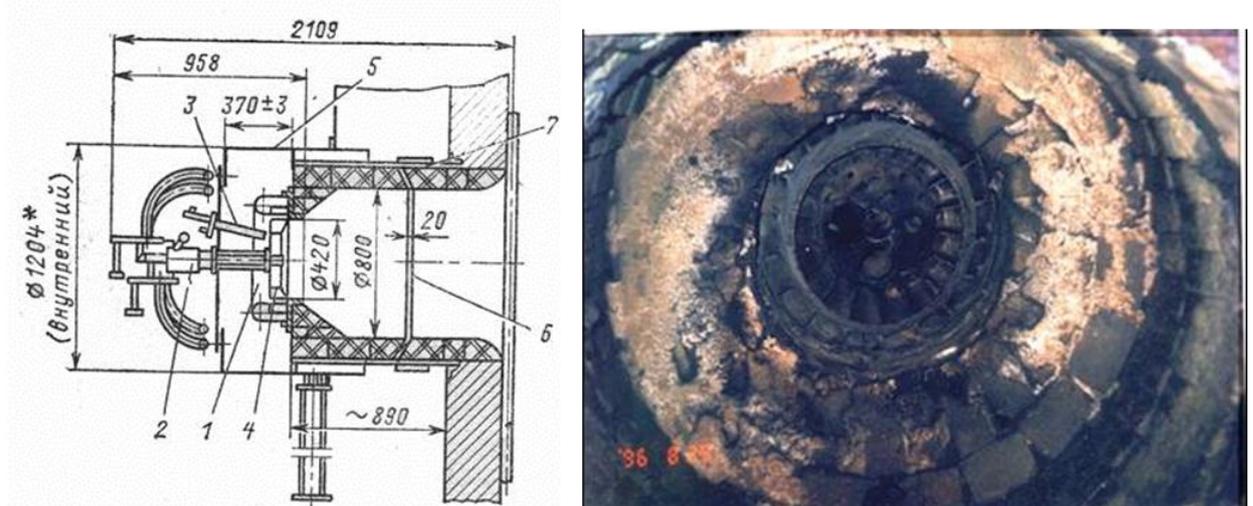
Российские исследования проводятся так же в направлении получения и сжигания водоугольных суспензий [42, 11, 53]. Отечественные и зарубежные экспериментальные и промышленные топки циклонного типа, сжигающие уголь и угольную пыль, характеризуются следующими особенностями:

- высокая тепловая форсировка сечения (Q/F) и объема (Q/V) циклонной камеры, соответственно $(10 \div 13) \cdot 10^6$ ккал/ $m^3 \cdot ч$ и $(3 \div 6) \cdot 10^6$ ккал/ $m^3 \cdot ч$;
- отношение длины циклонной камеры L к её диаметру D составляет \bar{L} от 1 до 1,3, что позволяет осуществлять компоновку котлов компактными предтопками большой единичной мощности;
- регулирование времени пребывания части топлива в циклонной камере за счёт организации конического сопла-ловушки и вращательного движения в циклоне;
- осевой закрученный ввод или тангенциальный ввод угольной пыли;

- высокое аэродинамическое сопротивление, достигающее при номинальных нагрузках значений 600-800 мм.вод.ст.
- низкий коэффициент избытка воздуха в циклоне ($\alpha = 1,05-1,1$), при этом высокая температура подогретого воздуха достигающая 370-430 °С;
- стенки циклонного предтопка экранируются водоохлаждаемыми трубами, которые включены в водопаровой контур котлоагрегата и покрыты огнеупорной жаростойкой обмазкой, нанесенной на обшивку;
- процесс изготовления экранной части циклонных камер сложный, трудоёмкий и затратный;
- высокий расход электроэнергии на дутье;
- требуется высококвалифицированный обслуживающий персонал;
- автоматизация регулирования топочного процесса.

От указанных недостатков предполагалось избавиться при сжигании в ЦВП газа и мазута на котлах малой и средней мощности. Для промэнергетики в ЦКТИ разработали циклонные предтопки с водяным охлаждением. Относительный диаметр пережима предтопков $d_n = 0,5$ и $d_n = 0,75$ при теплонапряжении сечения Q/F равном $(15 \div 16) \cdot 10^6$ ккал/($m^2 \cdot ч$) и объёма Q/V равного $2 \cdot 10^6$ ккал/($m^2 \cdot ч$). Мощность предтопка составляла 25 Гкал/ч при внутреннем диаметре камеры 1600 мм [14, 59]. Входная скорость воздуха в циклон составляла от 40 до 60 м/с. Перпендикулярно потоку воздуха, выходящему из сопел, устанавливалась форсунка. Наилучшее смешение достигалось с использованием плоскофакельных форсунок [62].

Для паровых котлов типа ДЕ разработана ЦКТИ циклонно-вихревая форкамера, представленная на рисунке 1.4. Особенность форкамеры заключается в воздушном охлаждении торкретированных стенок. Воздух подается в камеру через торцевой завихритель аксиально и через кольцевой зазор, оборудованный лопатками для закручивания потока, тангенциально. Такой способ подачи закрученного тангенциально воздуха создает аэродинамический режим, а так же зону рециркуляции для газификации и выгорания части топлива в камере. Общие недостатки котлов серии ДЕ с циклонными предтопками – номинальная производительность не достигнута, работа форкамеры ненадежная [78, 79].



а)

б)

Рисунок - 1.4 Предтопок ЦКТИ к котлу ДЕ-25: а) циклонный предтопок
 б) внешний вид завихрителя: 1-газовый коллектор, 2-мазутная форсунка,
 3-запальник, 4-аксиальный завихритель, 5-корпус,
 6 - тангенциальный ввод воздуха

Некоторые котлы оснащаются водоохлаждаемыми циклонными предтопками, например, ПТВМ-50 и ПТВМ-100 [9]. На водогрейном котле ПТВМ-50 Хабаровской ТЭЦ-2 установлено четыре предтопка. Результаты испытаний, проведенных нами на этом котле, показали невысокую эффективность их работы и очень малый срок службы водоохлаждаемой части. Охлаждение стенок циклонного предтопка ВЗПИ осуществляется с помощью водоохлаждаемых труб, которые входят в водопаровой контур котла. Поверхность этих труб ошпорована и покрыта сложной огнеупорной обмазкой. Толщина футеровки камеры 250 мм из хромомагнезитового кирпича выдерживает ограниченное число теплосмен. При увеличении мощности предтопка увеличивается теплонапряжение сечения камеры, а при высокой огнеупорности 250 миллиметровый слой хромомагнезитового кирпича имеет очень ограниченное количество теплосмен [38]. Помимо этого недостатка отмечается коксование завихрителя, внешний вид которого представлен на рисунке 1.5.

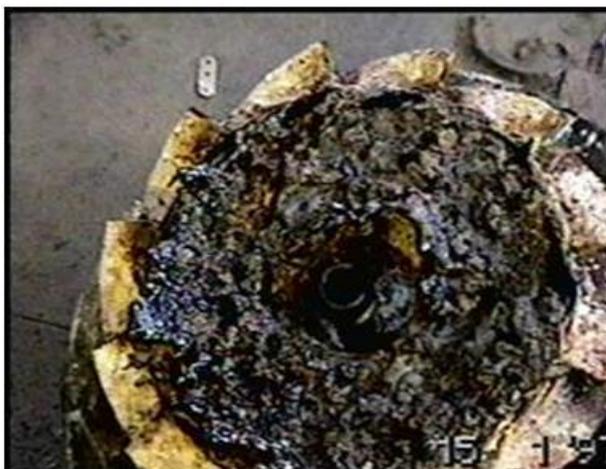


Рисунок. 1.5 - Общий вид закоксованного завихрителя предтопка котла ПТВМ-50 Хабаровской ТЭЦ-2

Проблемой при сжигании топлива в малом объёме является обеспечение эффективной защиты стенок от перегрева и разрушения по причине высокого объёмного теплонапряжения в предтопке при горении. Неправильная организация аэродинамики и распыла топлива сразу приводит к разрушению внутренней поверхности предтопка. В огнеупорной обмуровке происходит локальный перегрев отдельных зон и последующее их выплавление, а при водяном охлаждении образуются свищи. Как следствие нарушается симметрия факела, что приводит к закоксованию отдельных участков обмуровки. Режим пуска и прогрева предтопка требует особого внимания, так как происходит формирование зоны обратного тока стабилизирующей факел - зона эжекции. Не все конструкции предтопков дают возможность производить прогрев постепенно, что способствует равномерному входу в устойчивый режим работы. Проблемой ряда циклонных камер является “размытие” зоны рециркуляции продуктов сгорания и переход на горелочный режим работы при достижении номинальной нагрузки или при нагрузках близких к номинальной. При таких условиях работы происходит резкое увеличение избытка воздуха и ограничение нагрузки по тяге. На стабильность и эффективность горения оказывают влияние качество распыла и температура воздуха. К срыву факела или образованию коксовых отложений на экранных поверхностях, особенно в области амбразуры предтопка, может привести любое нарушение при распыле топлива форсункой.

Разработка и реализация надежной конструкции с использованием крутки потоков, позволяющей интенсифицировать процессы горения и теплообмена в котлах, не снижает интерес энергетиков к исследованию специфики вихревого сжигания топлив. С начала 60-х годов, начали изучать и развивать сжигание топлив в разомкнутых вихрях, создаваемых в объеме топки. Предложены конструктивные решения топочных устройств для совершенствования сжигания разных видов топлива с применением одного или нескольких разомкнутых вихрей [4, 7, 22, 36, 37, 56].

Организация топочного процесса с применением вихревого движения в принципе осуществляется по двум направлениям: сжигание топлива в концентрированном высокофорсированном вихре; факельное сжигание топлива в сочетании с разомкнутым вихревым движением. Основные результаты исследований по этим направлениям проводились при сжигании угля и мазута. Данные исследований при сжигании газа практически отсутствуют. Одни из последних результатов исследований взаимодействия горящих закрученных потоков представлены в работах авторов [25, 26, 39, 42, 94, 55, 54, 53, 52, 24, 51, 34].

1.3 Сжигание природного газа в горелках

Перевод котлоагрегатов на сжигание газа и мазута в основном осуществляется за счёт компоновки топки котла газомазутными горелками [14, 61, 31, 63].

Для энергетических котлов средней мощности наиболее используемыми горелками являются универсальные горелки без предварительного смешения, сжигающие высококалорийный природный газ низкого или высокого давления в свободном факеле. В горелочных устройствах внешнего смешения активная зона интенсивного перемешивания локализуется у корня факела, что стабилизирует процесс горения. Это характерно для любой из многочисленных разновидностей конструкций горелок, особенно для тех, в которых стремятся к созданию вихревой [5, 6, 64, 9, 10] или струйной эжекции, усиливающей теплообмен. Конструкции горелок позволяют работать практически на разных нагрузках котла, не опа-

саясь проскока пламени, так как горение внутри горелки без воздуха невозможно [16, 17]. При этом регулируют нагрузку котла изменяя подачу количества газа или меняя число работающих горелок, так как устойчивость работы горелок характеризуется её пределом регулирования, который строго ограничен напором воздуха.

Газомазутные горелки хорошо выполняют свои задачи при комплектации ими котлов малой мощности [14, 29]. Котёл оснащается одной – тремя горелками, что не усложняет условия работы и эксплуатации котла [14, 66, 31].

В отличие от заявленных в паспорте характеристик, на практике часто горелки работают со значительными избытками воздуха $\alpha=1,4-1,6$ и более, снижающими температуру горения [14, 29]. При этом не всегда происходит полное сгорание газа. К примеру, факел светящегося пламени получается длинным, требующим большой высоты (длины) топочного пространства. Горение топлива происходит в топочном объёме, но аэродинамика топки котла не настолько совершенна, чтобы обеспечить эффективное смесеобразование и высокую равномерную турбулизацию продуктов горения в большом объёме. В объёме топки усиливается неравномерность распределения как кинетической энергии потока продуктов горения, так и тепловой энергии факела. Особенность расположения горелок и условия регулировки усложняют задачу по выравниванию расходов первичного и вторичного воздуха на горелках. Часто организованный избыток воздуха на горение с целью исключения химнедожога в 5 раз выше нормы. Улучшить динамику регулирования и создать равномерное заполнение топочного объёма при любой нагрузке пытаются за счёт увеличения числа горелок на котле. Повышение эффективности работы котлов, оснащённых горелочными устройствами, за счёт изменения количества работающих горелок приводит в реальных условиях к усложнению эксплуатации котла, снижению эффективности работы котла в целом и существенной сложности наладки работы каждой горелки в частности. Но даже отлаженный режим горения на горелках и котле в целом не гарантирует низкие эмиссионные выбросы оксидов азота, так как в частности для горелок типа ГМ-10 паспортные значения содержания оксидов азота NO_x при $\alpha=1,4$ составляет 210 мг/м^3 , что превышает почти в два раза нормативные удельные выбросы равные

$\text{NO}_x = 125 \text{ мг/м}^3$ при $\alpha=1,4$ согласно ГОСТ 50831-95. Таким образом, режимные мероприятия на горелках не могут подавить образование топливных NO_x , при этом стоимость современных газомазутных горелок очень высока, а при компоновке котла несколькими горелками нормативные амортизационные отчисления не компенсируют капитальных затрат на модернизацию котла современными газомазутными горелками. Организация третичного дутья или рециркулирующих инертных газов с целью снижения эмиссии топливных NO_x приводят к усложнению не только технологической схемы котла, но и режима его работы в целом, так как не редко сопла третичного дутья рационально оснащать направляющими для регулировки потока [74]. Альтернативным вариантом оптимизации работы котельных установок при сжигании газа является использование в топочном объёме вихревого движения [3, 4] или установка циклонно-вихревых предтопок [46, 47].

Концентрированное вихревое движение с центробежным полем генерируется в объёме циклонного предтопка. С учетом принципов автомодельности подобные условия сохраняются и в диапазоне изменения нагрузки. Управляя процессом газификации топлива в циклонно-вихревой камере, возможно получить высокие тепловые напряжения. Ступенчатое сжигание топлива в циклонном предтопке создает условия для догорания факела в основном объёме топки котла, что существенно упрощает работу экранных и хвостовых поверхностей нагрева, повышая эффективность работы котельной установки.

1.4 Исследования вихревого сжигания на энергетических объектах Дальнего Востока

Сжиганием топлива с использованием вихревой технологий занимались как ведущие научно-исследовательские институты страны (ВТИ, ЦКТИ, МоЦКТИ, ЭНИН, КазНИИЭ), так и энергетические кафедры вузов (МВТУ, ЛПИ, МЭИ, УПИ и др.). Направления вихревой организации топочного процесса детально исследуются сотрудниками кафедры «Теоретической и общей теплотехники» ДВПИ-ДВГТУ-ДВФУ [70, 72] начиная с середины 70-ых годов прошлого века.

Интерес кафедры «ТОТ» ДВПИ к усовершенствованию котельных установок, учитывая особенности сжигаемого топлива, отмечается еще с 30-х годов прошлого века. Работы были не постоянные и выполнялись по заданию заказчика. Основной задачей являлась оптимизация сжигания топлива в установке заказчика. Выбор и анализ конструктивного решения для котла шахты 6-6 бис г. Артем в 1961 г. положили начало исследованиям циклонно-вихревой технологии сжигания топлива на кафедре «ТОТ». Проект первого циклонного предтопка выполнен ДВПИ для жаротрубного котла промышленной котельной для сжигания угля. При выполнении проекта учитывались рекомендации МВТУ (проф. Кнорре Г.Ф.), а так же отдела малой энергетики ЦКТИ и института теплоэнергетики АН Украины. Циклонный предтопок ДВПИ (г. Артем, Приморского края, 1962 г.) запроектирован для работы на отходах бурого угля с зольностью не менее 30 % и калорийностью 11 МДж/кг. Предтопок изготовлен с воздушным охлаждением, «зажигательным кольцом» (стабилизатор факела) в передней части камеры и относительным пережимом меньше 0,5 в выходной части камеры. Предтопок работал на дробленом угле. Режимы работы не были надежными, а горение устойчивым. Происходило постоянное зашлаковывание камеры сгорания, поэтому предтопок демонтировали. Аналогичные работы и исследования МВТУ, ЦКТИ, КазНИИ энергетики, МЭИ и других организаций в этом направлении тоже не дали положительных результатов. Особенности аэродинамики вихревого процесса, выбор водяного охлаждения со сложностью реализации – это главные причины, которые

затормозили и остановили внедрение циклонных предтопок в большой и малой энергетике. Детальные исследования аэродинамики закрученного потока в циклонно-вихревой камере с воздушным охлаждением предтопка, с облегченной обмуровкой и с комбинированной генерацией вихря – основные решения, которые являлись перспективными в совершенствовании циклонно-вихревой технологии сжигания. Схема модели такого предтопка представлена на рисунке 1.6.

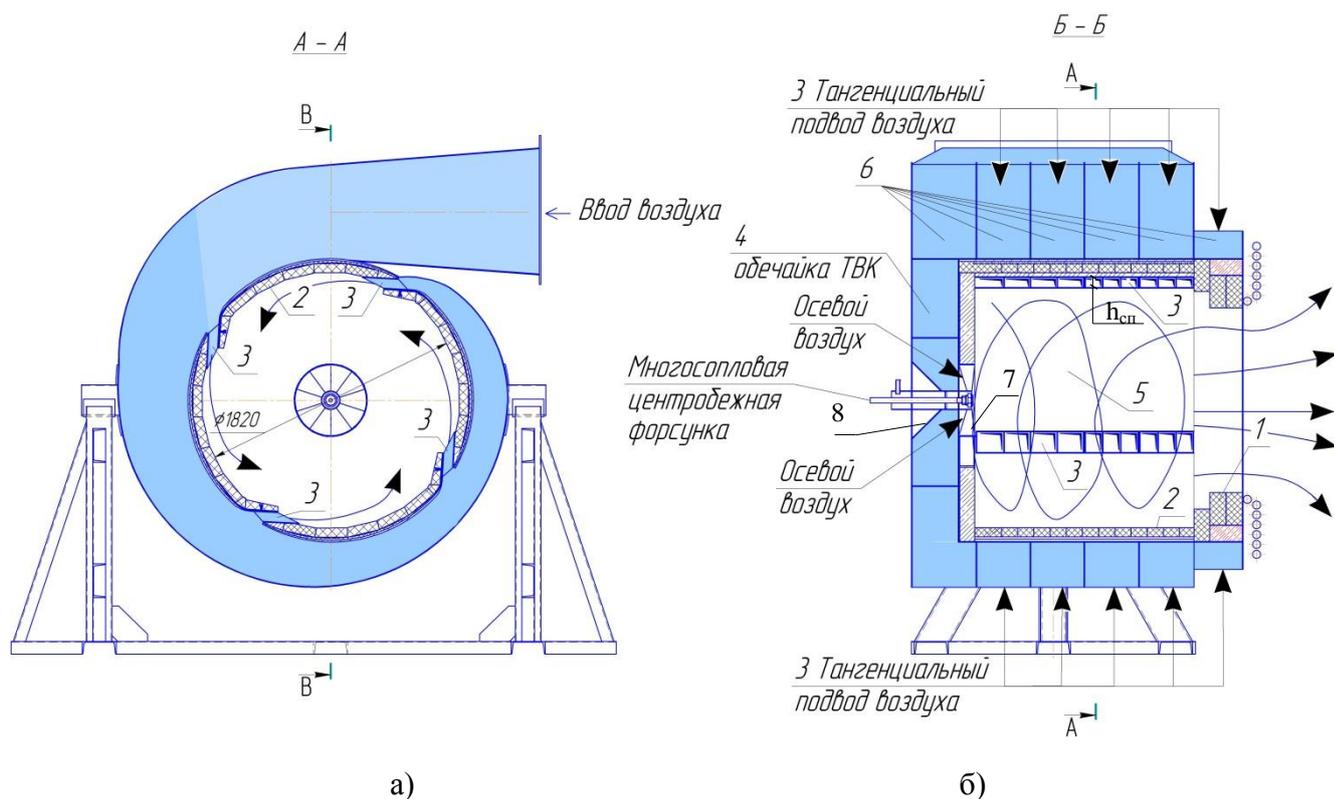


Рисунок 1.6 - Схема циклонного предтопка: а – продольный разрез, б – поперечный разрез: 1-пережим; 2-обмуровка; 3-тангенциальный подвод воздуха через обечайки; 4 - обечайка торцевой вихревой камеры (ТВК); 5-камера сгорания; 6 – воздушные обечайки; 7- завихритель; 8 – конус; $h_{\text{сп}}$ - высота воздушных сопел

Первые ЦВП были установлены на предприятии «Дальзавод» в г. Владивостоке на пяти котлах Шухова-Берлина в конце 60-х – начале 70-х годов. В течение 25-ти лет эти котлы эксплуатировались с ЦВП. Дальнейшие исследования циклонного сжигания проводились в сотрудничестве со специалистами РЭУ «Дальэнерго». Результаты испытаний первых котлов, модернизированных на «Дальзаводе» и «Дальэнерго», были представлены специалистам и представителям

ЦКТИ, ЭНИНА, ВНИПИ Энергопрома и других организаций. Направление циклонно-вихревого сжигания получила одобрение Госкомитета по науке и технике. Это позволило начать разработку циклонных предтопок единичной мощностью от 17 до 65 МВт для паровых и водогрейных котлов разных марок.

Во Владивостоке в июле 1999 г. прошло совещание представителей РАО «ЕЭС России», ВТИ, ЦКТИ, МЭИ. Одним из результатов совещания были рекомендации по широкому внедрению циклонно-вихревой технологии сжигания топлива на территории ДФО. Внедрение производилось в рамках реконструкции и модернизации котлов, сжигающих мазут. Разработка проектов модернизации проводилась в Центре «Модернизация котельной техники», созданном при ДВПИ в 1991 г.

Работа котлов с ЦВП с учётом многолетнего опыта эксплуатации и последними результатами, подтверждёнными режимно-наладочными испытаниями котлов [73, 80], характеризуется следующими показателями:

- увеличением теплопроизводительности котлоагрегатов на 10-20 %;
- снижением удельного расхода топлива на выработку теплоты $\approx 1 \div 4\%$;
- уменьшением удельных затрат электроэнергии на тягу и дутьё $\approx 10 \div 20\%$;
- упрощением эксплуатации котлоагрегата;
- повышением надёжности процесса горения;
- уменьшением натрубных отложений;
- снижением концентрации оксидов азота до 150 мг/м^3 в пересчёте на $\alpha=1,4$ (при нормативном значении 250 мг/м^3 при $\alpha=1,4$);
- увеличением срока службы поверхностей нагрева (не менее пяти лет);
- увеличение коэффициента полезного действия до 93,7 %.

Успешный опыт циклонно-вихревого сжигания мазута на водогрейных и паровых котлах средней мощности послужил основанием для разработки проектов модернизации паровых и водогрейных котлов на сжигание природного газа в циклонно-вихревых предтопках.

1.5 Постановка задач исследований

Перед автором настоящей диссертационной работы были поставлены следующие задачи:

1. разработать усовершенствованную конструкцию циклонно-вихревого предтопка, эффективно сжигающего природный газ;
2. оценить влияние комбинированного распределения газа в КС на формирование факела в ЦВП и топке котла;
3. определить оптимальные режимы работы газового ЦВП и котла в целом;
4. исследовать влияние горения на изменение аэродинамических параметров закрученного потока;
5. разработать рекомендации по корректировке безразмерных аэродинамических параметров закрученного потока, рассчитать коэффициент аэродинамического сопротивления ЦВП при сжигании газа;
6. внедрить на котельных установках усовершенствованную циклонно-вихревую технологию сжигания газообразного топлива.

Оснащение котельных установок средней мощности газомазутными ЦВП мощностью 65 МВт является одним из масштабных, перспективных, эффективных и надежных вариантов модернизации котельного оборудования.

Количество и марки котельных агрегатов, основных энергоисточников Дальнего Востока, представлены в таблице 1.1. Модернизация котельных агрегатов позволит рационально осуществить газификацию основных фондов энергетики [91]. Номинальная производительность котлов будет достигнута за счёт установки ЦВП в количестве и мощностью, как указано в таблице 1.1., из которой следует, что 149 котельных установок из 197 рационально модернизировать установив ЦВП мощностью 65 МВт.

Расположение ЦВП на каждой котельной установке проводится на основании результатов математического моделирования распределения тепловых потоков в топке котла [74, 67, 75] и многолетнего успешного опыта работы паровых и водогрейных котлов, оснащённых ЦВП.

Таблица 1.1 – Котельный парк паровых и водогрейных котлоагрегатов, установленных на энергоисточниках Дальнего Востока

Марка котла	Номинальная производительность, т/ч (Гкал/ч)	Общее количество	Станции, на которой применяется данный котёл	Износ, %	Параметры острого пара		Количество ЦВП на котле
					давление, кгс/см ²	температура, °С	
Паровые							
ТПЕ-215 (Е-670-140)	670 (398)	6	Хабаровская ТЭЦ-3	34	140	545/545	-
			Комсомольская ТЭЦ-3	34			-
ТПЕ-214-СХЗЛ	670 (398)	3	Нерюнгринская ГРЭС	46			-
БКЗ-670-140	670 (398)	5	Приморская ГРЭС	49	140	545/545	-
БКЗ-420-140	420 (253)	4	Благовещенская ТЭЦ	36,5	140	560	-
БКЗ-320-140	320 (193)	8	Камчатская ТЭЦ-2	34,5	140	560	4*
			Южно-Сахалинская ТЭЦ-1	54	140	560	
БКЗ-220-100	220 (136)	41	Артемовская ТЭЦ	89	100	540	4*
			Приморская ГРЭС	49	100	540	
			Амурская ТЭЦ-1	45	100	540	
			Райчихинская ГРЭС	75	100	540	
			Аркагалинская ГРЭС	38	100	540	
			Магаданская ТЭЦ	66,5	100	540	
БКЗ-210-140	210 (127)	25	Сахалинская ГРЭС	64	100	540	4*
			Владивостокская ТЭЦ-2	61	140	560	
			Хабаровская ТЭЦ-1	79,5	140	560	
ТП-170	170 (102)	9	Комсомольская ТЭЦ-2	80	140	560	2*
			Партизанская ГРЭС	91	100	510	
БКЗ-160-100	160 (99)	13	Хабаровская ТЭЦ-1	79,5	100	510	2*
			Комсомольская ТЭЦ-2	80	100	540	
			Николаевская ТЭЦ	37	100	540	
			Магаданская ТЭЦ	66,5	100	540	
			Анадырская ТЭЦ	48	100	540	
ТП-150	150 (95)	2	Аркагалинская ГРЭС	38	34	420	2*
			Комсомольская ТЭЦ-1	80	34	420	
ТП-38	150 (95)	1	Аркагалинская ГРЭС	38	34	420	
БКЗ-135-100	135 (83)	7	Камчатская ТЭЦ-1	45	100	540	2*
БКЗ-120-100	120 (74)	7	Камчатская ТЭЦ-1	45	100	540	2*
			Охинская ТЭЦ	63	100	540	
ЦКТИ-75-39	75 (49)	4	Райчихинская ГРЭС	75	39	440	1*
			Чульманская ТЭЦ	58,5	39	440	

Продолжение таблицы 1.1

Марка котла	Номинальная производительность, т/ч (Гкал/ч)	Общее количество	Станции, на которой применяется данный котёл	Износ, %	Параметры острого пара		Количество ЦВП на котле
					давление, кгс/см ²	температура, °С	
БКЗ-75-39	75 (49)	17	Владивостокская ТЭЦ-1	62	39	440	2**
			Комсомольская ТЭЦ-1	80	39	440	
			Николаевская ТЭЦ	37	39	440	
			Биробиджанская ТЭЦ	60	39	440	
			Чульманская ТЭЦ	58,5	39	440	
ГМ-60-14/250	60 (36)	1	Якутская ТЭЦ	85	14	250	2***
БКЗ-50-39	50 (32)	4	Магаданская ТЭЦ	66,5	39	440	2***
ГМ-50-14/250	50 (30)	5	Хабаровская ТЭЦ-3	-	14	250	2***
			Комсомольская ТЭЦ-3	-			
			Якутская ТЭЦ	85			
Б-50-14/250	50 (30)	2	Хабаровская ТЭЦ-2	-	14	250	2***
ЧКД-Дукла	50 (32)	2	Эгвекинотская ГРЭС	63	39	440	2***
К-50-40	50 (32)	2			39	445	2***
ПК-50-40	50 (32)	1	Чаунская ТЭЦ	63	39	445	2***
Е-50-40	50 (32)	2			39	445	2***
ТС-35У	35 (22)	7	Майская ГРЭС	-	39	445	1***
			Якутская ТЭЦ				
ТС-35	35 (22)	1	Чаунская ТЭЦ	63	39	445	1***
Водогрейные							
ПТВМ-180	(180)	3	Хабаровская ТЭЦ-3	-	13,5	150	4*
ПТВМ-100	(100)	7	Хабаровская ТЭЦ-1	-	13,5	150	2*
			Хабаровская ТЭЦ-2				
			Якутская ТЭЦ				
КВГМ-100	(100)	10	Владивостокская ТЭЦ-1	-	10,3	150	2*
			Хабаровская ТЭЦ-2				
			Комсомольская ТЭЦ-3				
			Благовещенская ТЭЦ				
			Якутская ТЭЦ				
КВТК-100	(100)	8	Магаданская ТЭЦ	-	11	150	2*
			Нерюнгринская ГРЭС				
ПТВМ-50	(50)	4	Хабаровская ТЭЦ-2	-	13,5	150	1*
			Якутская ТЭЦ				
КВГМ-10	(10)	4	Амурская ТЭЦ	-	10,3	150	0

Примечание * мощность ЦВП 65 МВт

** мощность ЦВП 35 МВт

*** мощность ЦВП 25 МВт

Глава 2. Модернизация паровых и водогрейных котельных установок на циклонно-вихревое сжигание природного газа

2.1 Модернизация парового котла БКЗ-120-100

Первый опыт сжигания газа в ЦВП был получен на паровом котле БКЗ-120-100 ГМ Охинской ТЭЦ, на котором жидкое топливо – нефть, сжигается в качестве резервного, а природный газ как основное топливо.

Работа котла на газовых горелках сопровождалась пережогом труб заднего экрана, ненадежностью работы котельной установки на основном и резервном топливе, ограничением нагрузки котла (паропроизводительность котла не превышала 110 т/ч).

Эти проблемы удалось решить за счёт циклонно-вихревой технологии сжигания топлива. Техническое решение модернизации котла включало в себя замену имеющихся на котле восьми вихревых горелок на два ЦВП [67, 69], замена третьей ступени трубчатого воздухоподогревателя на дополнительную ступень экономайзера по условиям тепловой схемы ТЭЦ. На рисунке 2.1 представлена схема модернизированного котла [69].

Проект модернизации котла выполнен Центром МКТ. На котле установлено два ЦВП, каждый единичной мощностью 65 МВт. Оба предтопка расположены на левом боковом экране топки в два яруса на отметках 6060 мм и 9060 мм.

Циклонно-вихревой предтопок представляет собой камеру сгорания с комбинированным вводом воздуха на горение после воздухоподогревателя: 75 % от общего объёма воздуха на ЦВП подается в камеру сгорания тангенциально по всей длине камеры предтопка, а 25 % аксиально.

Конструктивно в ЦВП подача газа была организована, согласно рекомендациям конструкторов Барнаульского котельного завода, через ось предтопка с закруткой и смешением с воздухом в 20-ти лопаточном завихрителе. Газ в камеру сгорания ЦВП подается через завихритель по кольцевому коллектору. В коллекторе были выполнены три ряда сопел в виде отверстий. Первый ряд из тринадцати

сопел выполнен диаметром $\varnothing 28$ мм, второй ряд сопел состоял из двадцати шести отверстий диаметром $\varnothing 13$ мм и третий из восьмидесяти шести сопел диаметром $\varnothing 6$ мм.

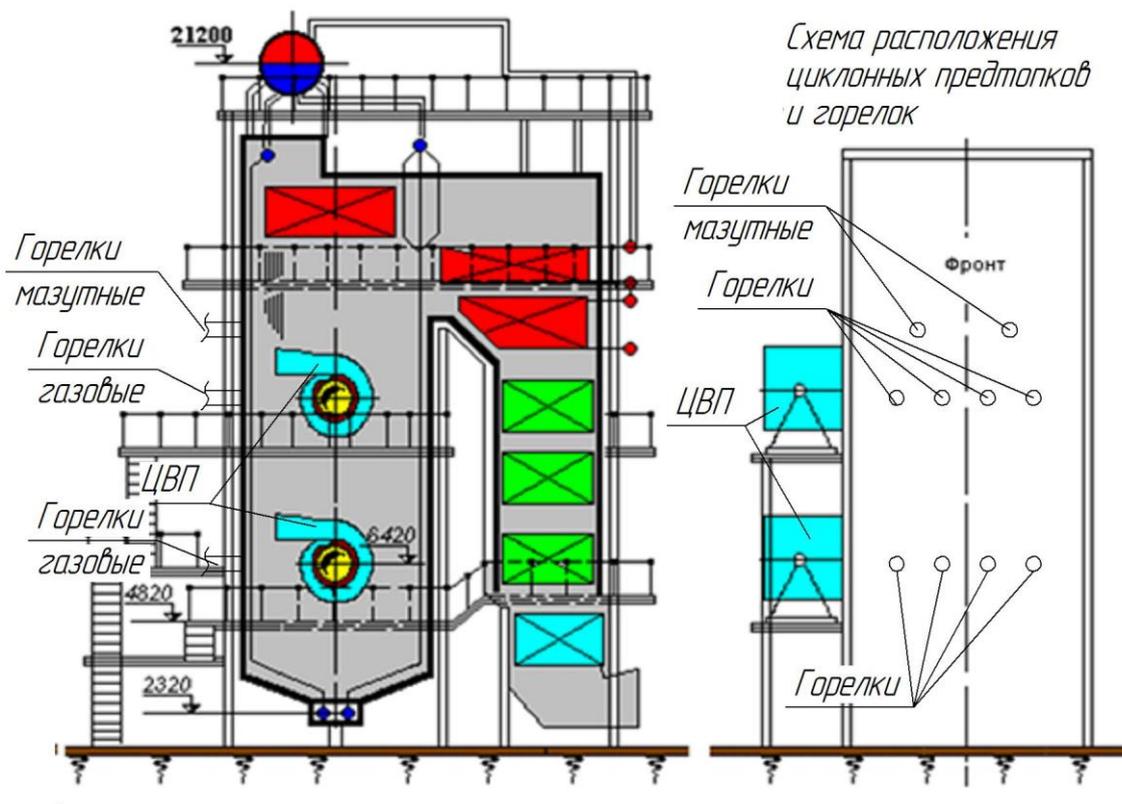


Рисунок 2.1 - Схема модернизированного котла БКЗ-120-100 с горелочного на циклонно-вихревое сжигание природного газа

Для сжигания нефти каждый предтопок оснащен низконапорной центробежной многосопловой форсункой конструкции Центра МКТ [71]. Розжиг предтопок на газе и нефти осуществляется с использованием электротермического запальника (ЭТЗ), разработки Центра МКТ [49].

Пуск модернизированного котла БКЗ-120-100МЦ произведен в 1998 г. после капитального ремонта, совмещенного с модернизацией котла. При нагрузках котла ориентировочно 60-80 т/ч работает верхний предтопок, при нагрузках больше 80 т/ч - два предтопка. Эксплуатационный диапазон устанавливался в ходе проведения пуско-наладочных испытаний.

Характер газового факела, наблюдаемый при растопке, имел следующие визуальные характеристики: основное горение происходило в топке, внутри пред-

топка присутствовал вихрь голубовато-белого цвета в форме полого цилиндра по диаметру завихрителя, который конусно расширялся к выходу из предтопка, что показано на рисунке 2.2. Увеличение нагрузки на котле и разрежения в топке способствовало смещению факела из камеры предтопка в топку котла. Форма факела в топке была практически кольцевой, факел прижимался к экрану примыкания и боковым экранам, при этом центр топки факелом не заполнялся. Подаваемый в центральную зону предтопка газ выходил отдельным потоком, не смешиваясь с пристенным слоем воздуха. Процессы окисления происходили за предтопками в двух - трёх диаметрах от пережима, при этом подсос горячих топочных газов в предтопки отсутствовал. Отдельные проскоки пламени на границе пережима приводили к пульсациям факела, попытка снизить расход воздуха для прогрева обмуровки и создания стабильного ядра горения в предтопке не дала положительного результата. Стало очевидно, что осевая подача газа не обеспечивает эффективного предварительного смесеобразования причём во всем диапазоне изменения давления газа на предтопок (от 0,05 до 0,5 кгс/см²) [67, 86].



Рисунок 2.2 – Горение газа в ЦВП котла БКЗ-120-100 при осевой подаче газа в ЦВП

Для доведения технико-экономических показателей котла до расчётных на верхнем и нижнем предтопках произвели конструктивные изменения с последующими исследованиями процессов смесеобразования. На верхнем предтопке вы-

полнены следующие изменения:

- перераспределен воздух по обечайкам ЦВП за счёт уменьшения высоты тангенциальных сопловых вводов $h_{\text{сп}}$ с 90 до 70 мм. На двух последних обечайках высота сопел уменьшена до 60 мм;

- изменена конструкция конуса (высота конуса уменьшена на 80 мм за счет увеличения угла наклона);

- изменена геометрия завихрителя. Завихритель оснастили вторым рядом лопаток (10 штук), а первый ряд из двадцати лопаточного переделали в десяти лопаточный;

- в газовом коллекторе отглушены отверстия среднего венца;

- в газовом коллекторе в отверстия первого венца вварены вставки с внутренним диаметром равным 10 мм;

- был выполнен дополнительный подвод газа по торцу – вокруг завихрителя по окружности. Торцевой ввод выполнен в виде трубок диаметром 19 мм под углом 30° и диаметром 15 мм под углом 15° , с конусной вставкой для улучшения распыла.

Выгорание газа в предтопке заметно улучшилось в диапазоне нагрузок от 25 до 70% от номинальной, а по форме и структуре факел стал аналогичен мазутному, что показано на рисунке 2.3.

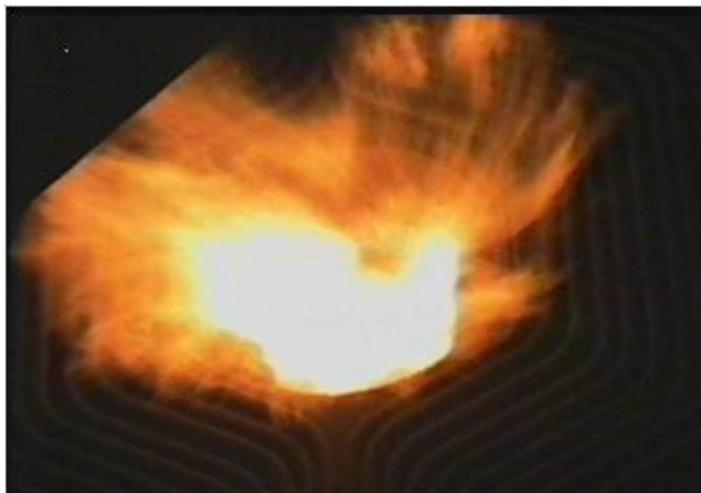
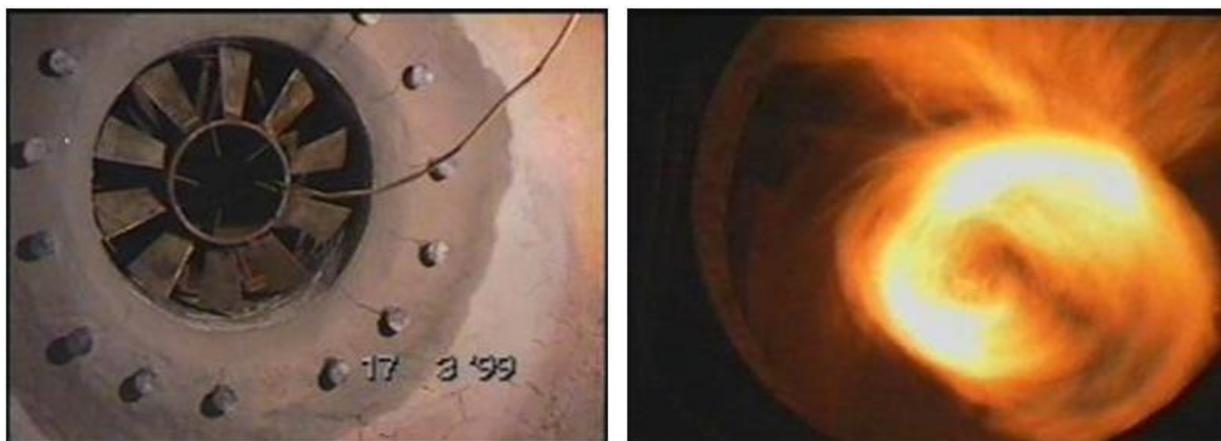


Рисунок 2.3 – Горение газа в верхнем предтопке при осевой и торцевой подаче газа в ЦВП

На нижнем предтопке выполнялись следующие изменения:

- перераспределен воздуха по обечайкам ЦВП за счёт уменьшения высоты тангенциальных сопловых вводов с 90 до 70 мм на четырех обечайках. На двух последних обечайках высота сопел уменьшена до 40 мм;
- изменен конус в торцевой вихревой камере предтопка (высота конуса уменьшена на 80 мм);
- в конусе выполнены три прямоугольных окна длиной 150 мм и шириной 40 мм для подавления зоны эжекции в корневой (центральной) области завихрителя;
- в газовом коллекторе отглушены отверстия среднего венца;
- в газовом коллекторе в отверстия первого венца были вварены вставки с внутренним диаметром 19 мм;
- в газовом коллекторе организован дополнительный подвод газа через торцевые сопла. Сопла выполнены из трубок с тарелочными распылителями, внешний вид которых показан на рисунке 2.4 а.

Структура и форма факела сильно отличается от верхнего предтопка, что наглядно показано на рисунке 2.4 б. Выбранный ввод газа позволил использовать околоторцевые завихрения для улучшения смесеобразования в момент воспламенения.



а)

б)

Рисунок 2.4 – Горение газа в нижнем предтопке при осевой и торцевой подаче газа: а – торцевые сопла с тарелочными распылителями;

б – факел нижнего предтопка

За счёт уменьшения высоты тангенциальных воздушных сопловых вводов увеличилась скорость воздуха через них, это позволило перераспределить расходы воздуха: увеличить расход воздуха в обечайку ТВК и уменьшить в последние две. Исследования распределения воздуха по обечайкам ЦВП [67] показали, что увеличение расхода воздуха в обечайку ТВК оказалось целесообразным и приблизило величину расхода воздуха к проектным значениям. С учётом процесса горения в предтопке по расходным характеристикам между воздушными обечайками перераспределение составляет $\approx 4\%$.

Пусконаладочные испытания котельного агрегата проводились при совместной работе предтопков на газе на нагрузках 73 % и 90 % от номинальной и на максимальной. Одиночная работа верхнего предтопка исследовалась на нагрузках 43 % и 52 % от номинальной, нижнего на 44 % и 60 % от номинальной и на максимальной нагрузке.

Исследования уровней максимальных тепловых потоков в топке котла БКЗ-120-100 до и после модернизации [23, 75] по результаты зондирования показали, что максимальный уровень теплоток в топке котла на 25-30 % ниже в сравнении со значениями до модернизации, т.е. при горелочном сжигании. Рост производительности котла до 146 т/ч удалось добиться за счёт интенсификации тепломассобмена в топочной камере и замены ВЗП на дополнительную ступень водяного экономайзера. Замена восьми горелок на котле БКЗ-120-100 на два циклонных предтопка расширила диапазон регулирования, повысила надёжность работы котла при значительном упрощении эксплуатации и снижении выбросов NO_x [82, 97]. Конструктивная особенность циклонного предтопка избавляет от необходимости использовать воздухоподогреватель, при этом появляется возможность для размещения дополнительных поверхностей нагрева в конвективном тракте, ведущая к значительному увеличению мощности и экономичности котла. Снижение сопротивления воздушного тракта, после исключения из него воздухоподогревателя, позволяет снизить на 15% удельные затраты на тягу и дутьё и использовать тот же вентилятор на более высоких нагрузках (см. рисунок 2.5). Дан-

ные, представленные в таблице 2.1, позволяют сделать заключение об эффективности проведенной модернизации.

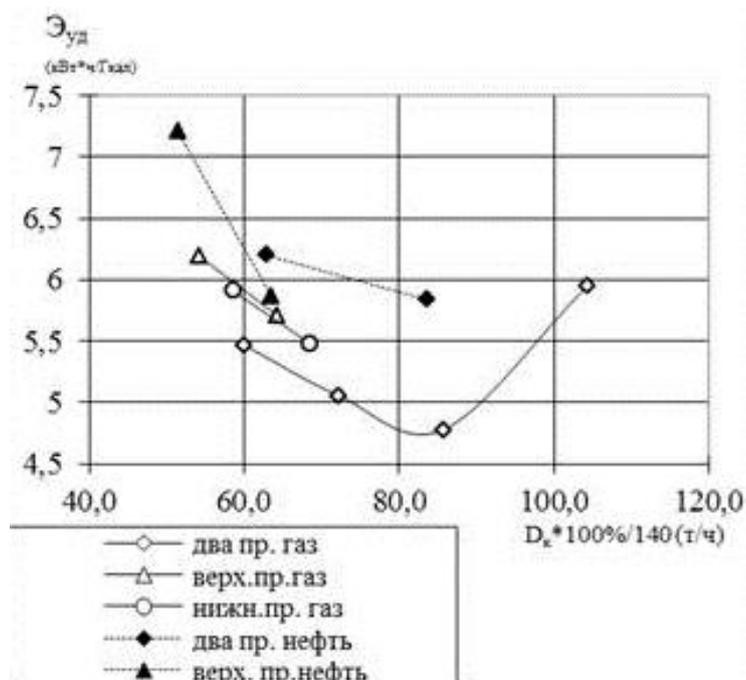


Рисунок 2.5 - Удельные затраты на тягу и дутье

Таблица 2.1 – Техничко-экономические параметры котла БКЗ-120-100 до и после модернизации

Вариант	Параметр				
	$D_{пп}$	$t_{уг}$	$\alpha_{уг}$	$\eta_{бр}$	C_{NOx} (при $\alpha=1,4$)
	т/ч	°С	-	%	мг/м ³
Проект завода	120	157	1,18	91,5	-
До модернизации	113	159	1,38	92,6	160
Проект модернизации	140	174	1,25	91,2	125
После модернизации	146	166	1,25	92,2	81

Из анализа результатов испытаний можно сделать следующий вывод - торцевая раздача газа более приемлема (в сравнении только с осевой), так как топливо, попадая в зону перехода от квазитвёрдого к квазипотенциальному вращению на радиусе $\approx \frac{1}{2}R$, равномерно распределяется по камере сгорания. Очень важно отметить, что при такой подаче газа максимально используются торцевые перето-

ки, дающие стабильное выгорание газа у корня факела в месте выхода осевого воздуха.

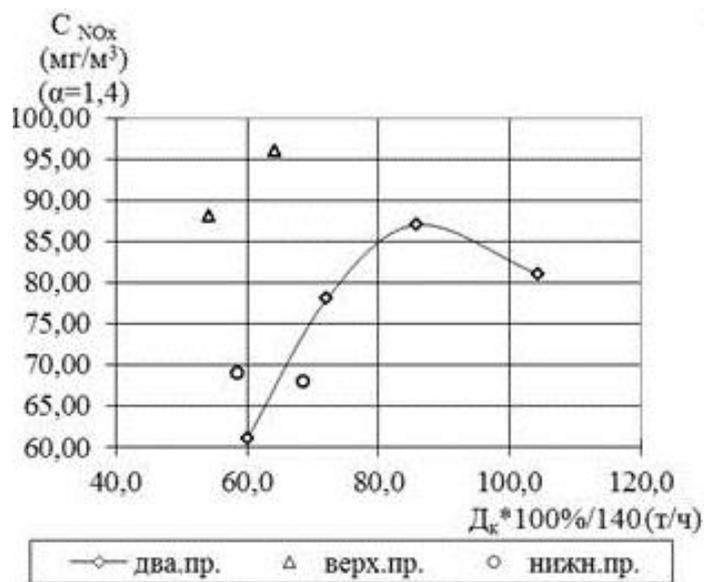


Рисунок 2.6 - Изменение концентрации NO_x в уходящих газах

Анализ состава газов на выходе из котла показал снижение избытка воздуха до 1,25 при максимальной нагрузке котла 146 тонн пара в час. Снижение концентрации NO_x , представленное на рисунке 2.6, показывает, что на нижнем предтопке процесс горения организован лучше, и это связано с проведенной оптимизацией подвода тангенциального воздуха к предпоследней и последней обечайкам (за счёт изменение высоты сопловых вводов). Детальное изучение влияния распределения воздуха по длине предтопка на скорость воздуха на выходе из сопел позволило значительно улучшить сгорание газа. В связи с этим появилось предложение о раздаче части газа через сопловые коробки тангенциального ввода воздуха [47].

2.2 Модернизация водогрейного котла ПТВМ-100

Совершенствование конструкции ЦВП было продолжено на Якутской ТЭЦ. Котлоагрегат ПТВМ-100 №2В ЯТЭЦ - первый модернизированный водогрейный котёл с ЦВП, в котором газ сжигается как основной вид топлива.

Водогрейные котлы ПТВМ-100 ЯТЭЦ имеют типовое решение: дымовая труба размещена на каркасе; топка оснащена шестнадцатью горелочными устройствами, расположенными встречно в два яруса на заднем и фронтном экранах топки, каждая горелка оснащена индивидуальным вентилятором. Работа котла на естественной тяге характеризуется повышенной чувствительностью к качеству топочного процесса как по присосам холодного воздуха, так и по расходу подаваемого воздуха. Из-за значительного количества горелочных устройств (шестнадцать газомазутных горелок ГМГ-10) и дутьевых вентиляторов автоматизация котла является трудоёмкой и дорогостоящей.

До модернизации котёл ПТВМ-100 №2В имел следующие недостатки:

- предельная мощность котла ограничивалась тягой на уровне 90 Гкал/ч в начале отопительного периода в сентябре месяце при температурах воздуха $t_{хв}$ от 0 до 5 °С. При прохождении зимнего максимума с $t_{хв}$ минус 40 и минус 50 °С предельная мощность котла ограничивалась на уровне 82 Гкал/ч в связи с ухудшением условий смесеобразования и ростом избытка воздуха за котлом;

- фактический среднегодовой коэффициент полезного действия брутто котла был ниже нормативного на 2 %;

- средний срок службы топочных поверхностей нагрева составлял 3 года, а нижнего конвективного блока 2 года.

Проектное решение предусматривало замену шестнадцати горелок и шестнадцати дутьевых вентиляторов на два предтопка единичной мощностью 65 МВт каждый на боковых экранах топки на отметке 5950 мм, что схематично показано на рисунке 2.7. На котле установлены два дутьевых вентилятора ДВ-17 с индивидуальной работой на каждый предтопок. 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 из труб диаметром $\varnothing 28 \times 3$ мм за счет экранирующей способности более надежного пакета из труб диаметром $\varnothing 38 \times 3$ мм. В расчётном варианте ожидался рост КПД brutto котла с 88 до 92 %.

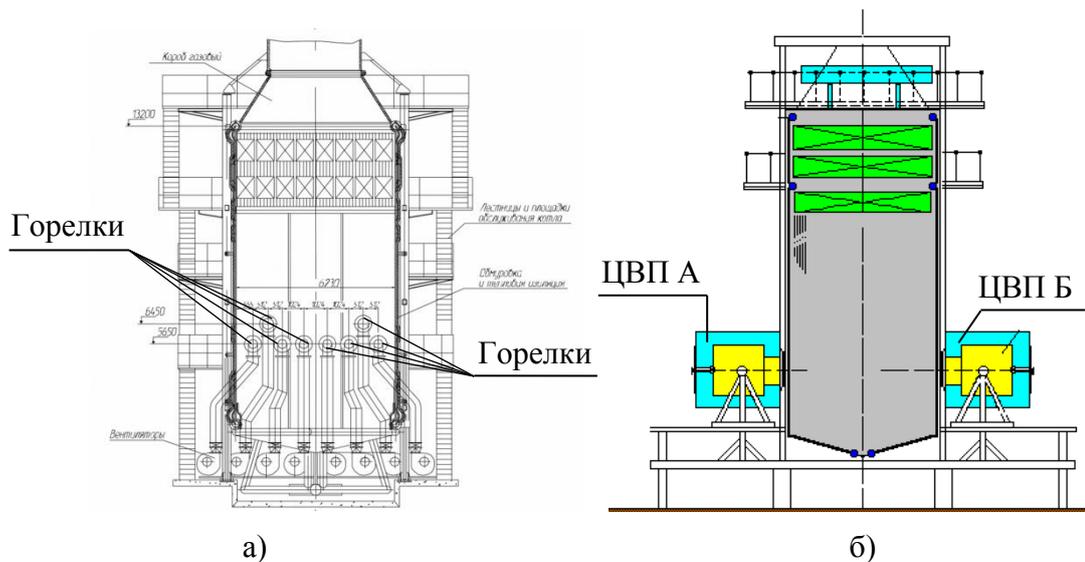


Рисунок 2.7 - Водогрейный котёл ПТМВ-100 ст.№2В Якутской ТЭЦ:
а – схема котла до модернизации; б – схема модернизированного котла

Воздух на горение подается с температурой равной температуре окружающей среды. Для города Якутска диапазон изменения температур окружающей среды составляет от минус 54°C до плюс 30°C . Подача газа в камеру сгорания была выполнена комбинированной - аксиальная, торцевая и тангенциальная - с самостоятельными газопроводами и распределительными коллекторами. Таким образом, реализована комбинированная подача газа на горение с возможностью регулирования и отключения любого газового ввода [60]. Конструкция газового предтопка мощностью 65 МВт водогрейного котла ПТВМ-100 представлена на рисунке 2.8.

Газ в камеру сгорания ЦВП подается на завихритель по кольцевому осевому коллектору через двадцать четыре сопловых газовых отверстия диаметром 11 мм.

Газ смешивается с воздухом, и закручивается в десятилопаточном аксиальном завихрителе, и подается в камеру сгорания предтопка, где смешивается с газом, подаваемым через торцевые сопла. Торцевой коллектор распределяет газ через один ряд осевых сопел диаметром 19 мм в количестве двадцати пяти штук. Часть газа подается в аэродинамические сопла камеры сгорания тангенциально. Для этого во второе и третье воздушные тангенциальные сопла введены три газовые трубки диаметром 38x3 мм. Для исследований влияния тангенциального подвода газа на смесеобразование с воздухом был выполнен односторонний ввод газа через воздушные трубки-сопла, хотя в ЦВП котла реализован четырёхсторонний тангенциальный подвод воздуха.

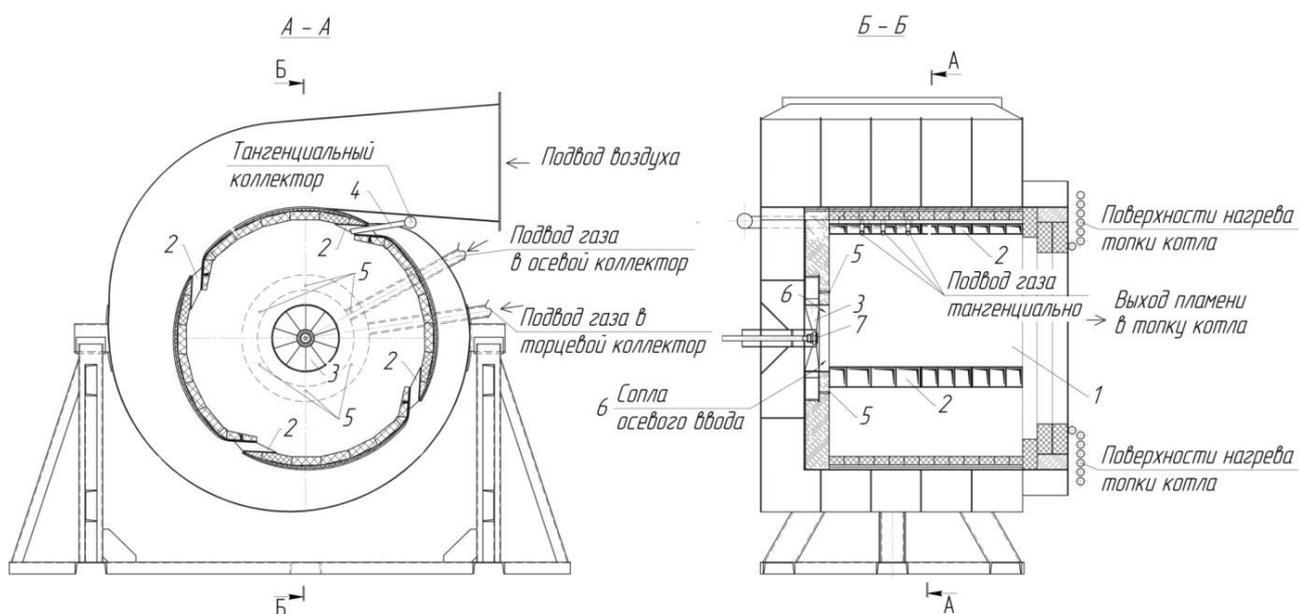


Рисунок 2.8 - Газовый ЦВП мощностью 65 МВт котла ПТВМ-100:

- 1 – камера сгорания ЦВП; 2 – сопла тангенциального ввода воздуха в камеру сгорания ЦВП; 3 - аксиальный завихритель осевого ввода воздуха;
 4 – сопла тангенциального ввода газа; 5 – сопла торцевого ввода газа;
 6 – сопла осевого ввода газа; 7 – многосопловая центробежная форсунка

Вид на ЦВП изнутри котла, где просматриваются завихритель, торцевые и тангенциальные сопла, представлен на рисунке 2.9.

Для сжигания дизельного топлива в качестве резервного каждый предтопок оснащается низконапорной центробежной многосопловой форсункой конструкции Центра МКТ (см. поз. 7 на рисунке 2.8).

Модернизация котла произведена при участии Барнаульского котельного завода, на базе которого были изготовлены ЦВП котла ПТВМ-100 ЯТЭЦ. Проект был реализован полностью в 2001 г. и в ноябре этого же года ПТВМ-100 №2В был запущен в опытно-промышленную эксплуатацию.

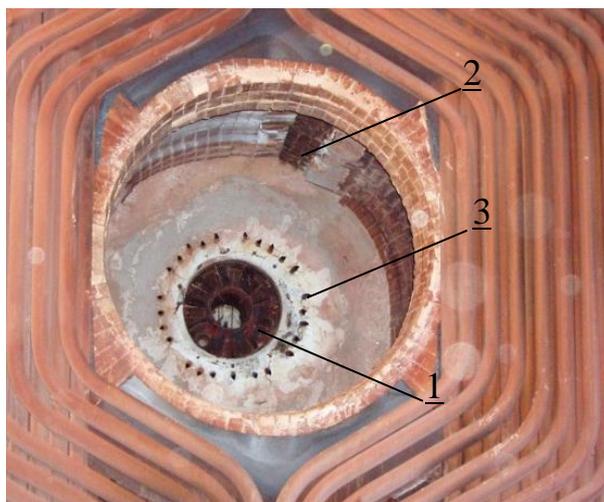


Рисунок 2.9 - Вид на ЦВП А из топки котла ПТВМ-100 № 2В: 1 - аксиальный завихритель осевого ввода воздуха и газа; 2 – сопла тангенциального ввода газа; 3 – сопла торцевого ввода газа

В результате проведённых работ получено значительное улучшение условий выгорания газа, которое достигнуто за счет усовершенствования конструкции предтопка, а именно, разработки системы тангенциальной подачи части газа в камеру сгорания. Итоговые результаты испытаний котла, представленные в таблице 2.2, выполнены службой испытательного центра энергетического оборудования ОАО «НПО ЦКТИ» (см. приложение Б).

Таблица 2.2 - Результаты испытаний, модернизированного котла ПТВМ-100 ст.№2В, проведенных ОАО «НПО ЦКТИ»

Наименование показателя	Единица измерения	Фактическая величина						
		2 ЦП			1 ЦП			
Испытательный агрегат	-	Водогрейный котёл ПТВМ-100 № 2В						
Топливо	-	Природный газ						
Тепловая нагрузка	Гкал/ч	106	97	88	74	55	45	32
Расход воды	т/ч	1470	1470	1470	1460	1450	1480	1450
Давление воды на входе	кг/см ²	16	16	16	16	16	16	16
Давление воды на выходе	кг/см ²	15	15	15	15	15	15	15
Температура воды на входе	°С	55	55	54	54	53	52	52
Температура воды на выходе	°С	127	121	114	105	91	82,5	74
Разрежение вверху топки	кг/м ²	20	20	25	25	30	30	30
Температура уходящих газов	°С	132	125	116	109	94	88	76
Температура холодного воздуха	°С	-10	-10	-8	-8	-5	-5	-5
Потери тепла с уходящими газами, q ₂	%	6,7	6,43	5,85	5,49	4,62	4,34	3,75
Потери тепла в окружающую среду, q ₅	%	0,1	0,11	0,12	0,14	0,19	0,23	0,33
КПД (брутто)	%	93,2	93,4	94,0	94,3	95,2	95,4	95,9
Расход топлива	м ³ /ч	17360	15870	14340	12050	8850	7250	5100
Низшая теплота сгорания	ккал/нм ³	8531						
Плотность	кг/нм ³	0,7666						
Объём топки котла	м ³	244						
Глубина топки	мм	6230						
Ширина топки	мм	6400						
Отметка расположения ЦВП	мм	5250						

Продолжение таблицы 2.2

Наименование показателя	Единица измерения	Фактическая величина						
		2 ЦП				1 ЦП		
Количество работающих предтопков	шт.	2	2	2	2	1	1	1
Давление природного газа перед предтопками	кгс/см ²	0,395	0,325	0,266	0,26	0,39	0,265	0,2
Расход природного газа	м ³ /ч	17360	15870	14340	12050	8850	7250	5100
Давление воздуха: перед предтопком А	кгс/м ²	135	125	95	75	100	75	30
перед предтопком Б		145	140	100	85	0	0	0
Температура воздуха перед предтопками	°С	-10	-10	-8	-8	-5	-5	-5
Минимальный коэффициент избытка воздуха в режимной точке	-	1,21	1,22	1,21	1,2	1,19	1,19	1,18
Содержание оксида углерода в сухих продуктах сгорания (при $\alpha=1,4$)	мг/м ³	100	30	80	150	110	120	200
Содержание оксидов азота (NO _x) в сухих продуктах сгорания (при $\alpha=1,4$)	мг/м ³	120	115	112	110	98	95	90
Уровень звука	дБ А	82	-	-	-	77	-	-

Сотрудниками кафедры ТЭиТТ ДВФУ с участием автора диссертационной работы производились работы по анализу технико-экономических показателей работы котельного агрегата и в частности по исследованию работы предтопка с трёхпоточной подачей газа (тангенциально, аксиально и через торцевые сопла).

Основной целью исследовательских работ [76, 8883] являлось определение оптимальных режимов работы котельной установки при комбинировании газа, вводимого в ЦВП на горение и исследование смешения газа с воздухом температурой минус 54 °С и выше, т.е. в условиях крайнего Севера. Для этого на левом предтопке А в плановый ремонтный период были выполнены монтажные работы, позволяющие производить пневмометрические исследования в камере сгорания предтопка [88]. Наружный и внутренний виды подготовленного к исследованиям предтопка представлены на рисунке 2.10.



Рисунок 2.10 – Подготовленный к исследованиям ЦВП А:

1 - пневмометрический зонд; 2 – исследовательские сечения

Для исследования влияния режимных условий ввода газа в ЦВП на эффективность работы котельной установки производились опытные комбинации подвода газа в камеру сгорания [88, 89]. Результатами оптимального режима работы котла являлись не только удовлетворительные значения технико-экономических показателей, но и условия формирования факела в топке котла. Режимные условия и трёхсторонний подвод газа способствуют созданию и регулированию длин-

ны факела, выходящего из ЦВП в топку. Увеличение осевой и торцевой подачи расхода газа формирует короткофакельное раскрывающееся пламя, дальнейшее раскрытие которого приводит к “прилипанию” факела к экранным поверхностям. Наиболее приемлемым и оптимальным является вариант работы топки при взаимодействии длиннофакельных встречных потоков пламени, формируемых из ЦВП. Достижение оптимальной структуры факела в топке котла сопровождалось наладкой режима работы. Таким образом, были определены режимы с давлением газа по вводам и напором воздуха, подаваемые на горение в предтопок, позволяющие обеспечить наиболее эффективные режимы сгорания газа при оптимальных показателях работы котельной установки [89], а именно:

режим 1 - подача газа через тангенциальный, торцевой и осевой вводы (комбинированный);

режим 2 - подача газа через тангенциальный ввод (с организацией минимальной подачи части газа через осевой ввод);

режим 3 - подача газа через торцевой и осевой ввод.

Результаты режимно-наладочных испытаний на котле ПТВМ-100 ст.№2В при комбинировании ввода газа в камеру сгорания предтопка сведены в таблицу 2.3. Комбинированная подача газа в камеру предтопка позволила получить наиболее эффективный режим горения при работе котла в основном диапазоне нагрузок [77, 84, 86].

Целесообразность проведенной модернизации котла ст.№2В обоснована результатами сравнительного анализа работы с аналогичным котельным агрегатом ст.№3В ЯТЭЦ, оснащенный шестнадцатью горелочными устройствами марки МГМГ-8 [14, 32]. Результаты режимно-наладочных работ на котлах сведены в таблицу 2.4.

Таблица 2.3 - Основные показатели эффективности работы котла ПТВМ-100 ст.№2В

Показатель	Режим 1	Режим 2	Режим 3
	2 ЦВП	2 ЦВП	2 ЦВП
Тепловая нагрузка, Q_k , Гкал/ч	89	89	89
Коэффициент избытка воздуха в уходящих газах, α	1,3	1,46	1,4
Температура холодного воздуха, $t_{хв}$, °С	- 47	- 47	- 47
Температура уходящих газов, $t_{ух}$, °С	137	140	145
Содержание NO_x при $\alpha=1,4$, мг/м ³	55	60	62
Содержание СО при $\alpha=1,4$, мг/м ³	9	15	16
КПД брутто котла, $\eta_{бр}$, %	93,7	93,55	93,4

Таблица 2.4 - Основные показатели эффективности работы котла ПТВМ-100 ст.№2В и ПТВМ-100 ст.№3В

Показатель	ПТВМ-100 ст.№2В		ПТВМ-100 ст.№3В
	2 ЦВП	1 ЦВП	Значение
Тепловая нагрузка, Q_k , Гкал/ч	74-106	32-55	37,5-88,8
Коэффициент избытка воздуха в уходящих газах, α	1,2-1,21	1,18-1,2	1,28-1,25
Температура уходящих газов, $T_{ух}$, °С	125 - 150	80 - 94	100-148
Температура холодного воздуха, $t_{хв}$, °С	-20		
Содержание NO_x при $\alpha=1,4$, мг/м ³	60-90	60-80	60-118
КПД котла, $\eta_{бр}$, %	94,3 – 93,2	95,6 – 95,2	92,1-90,3

Как видно из таблицы 2.3, в процессе эксплуатации котельной установки ПТВМ-100 ст.№2 с ЦВП улучшились основные показатели эффективности его работы в сравнении с котлом, оснащённым горелками, а именно:

- возросла мощность котла при более эффективном выгорании топлива с минимальными избытками воздуха. Котёл способен выдавать номинальную мощность 100 Гкал/ч. Увеличение мощности на ПТВМ-100 ст.№2 достигнуто за счёт размещения дополнительных поверхностей нагрева в топочном объёме и увеличения объёма топки;

- улучшилось тепловосприятие в топке, так как смесеобразование и процесс формирования факела осуществляется преимущественно в ЦВП [67]. Улучшенное тепловосприятие позволяет снизить температуру уходящих газов до 109-76 °С на минимальных нагрузках и до 150 °С на максимальной нагрузке (при нормативном значении температуры уходящих газов 185°С);

- повысилась экономичность котла за счёт низкого избытка воздуха и отсутствия хим. недожога. Эксплуатационный КПД брутто котла ПТВМ-100 ст.№2 изменяется в диапазоне от 93,2 до 94,3 % (нормативный КПД котла в заводском исполнении составляет 88,6%);

- улучшились экологические характеристики котла за счёт снижения выбросов NO_x на 30-50 % и исключения продуктов неполного сгорания топлива за котлом. Содержание оксидов азота [97] на котле удалось снизить при $\alpha=1,4$ до 33 мг/м³;

- упростилось управление и эксплуатация котельной установкой.

Помимо определения оптимальных режимов работы котла при комбинировании ввода газа, проводились исследования аэродинамики циклонно-вихревой камеры котла ПТВМ-100, определялись гидродинамические характеристики при холодных (без горения природного газа) и при горячих продувках (при горении природного газа в КС ЦВП) [76]. Схема ЦВП котла ПТВМ-100 с расположением экспериментальных сечений и основными размерами представлена на рисунке 2.11. Калибр ЦВП на котле ПТВМ-100 \bar{L} равен 1,0. Длина камеры сгорания предтопка $L=1750$ мм, диаметр камеры сгорания $D=1750$ мм. Замеры производились в

трёх сечениях. Первое сечение на расстоянии X_1 , равное 300 мм (безразмерное расстояние $\bar{X}_1 = X_1/D = 0,199$) от торца КС ЦВП, второе на расстоянии X_2 , равное 770 мм (безразмерное расстояние $\bar{X}_2 = X_2/D = 0,51$) от торца, и третье на расстоянии X_3 , равное 1170 мм (безразмерное расстояние $\bar{X}_3 = X_3/D = 0,77$) от торца. Для исследований был изготовлен исследовательский цилиндрический зонд [76], который позволил пневмометрическим методом [88] измерить скорость (динамическое давление) вихревого потока, направление вихревого “холодного” и “горячего” потоков, статическое давление потока и температуру. Исследования на котле ПТВМ-100 ст. №2В проводились при температуре наружного воздуха минус 47°C. Нагрузка котельного агрегата при трёх режимах комбинации ввода газа в КС ЦВП составляла 89 Гкал/ч.

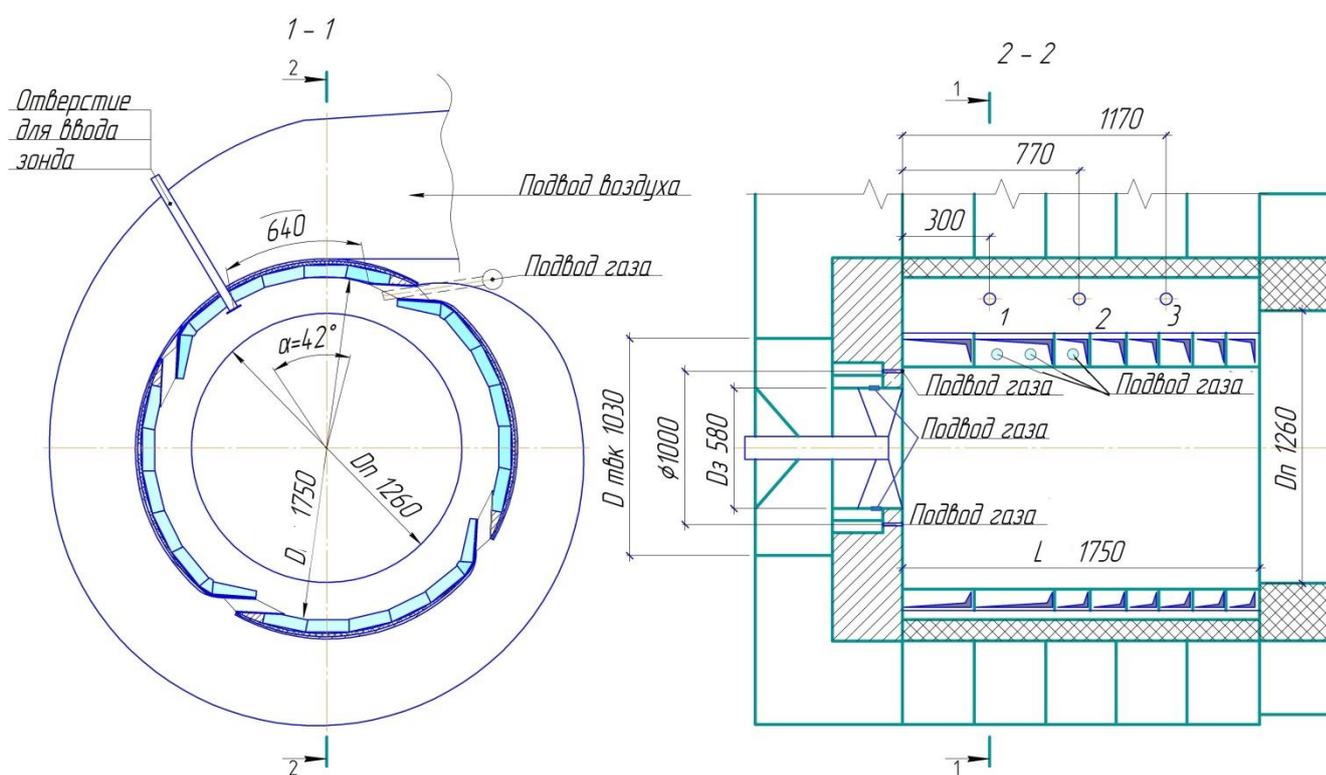


Рисунок 2.11 – Схема ЦВП котла ПТВМ-100 с расположением экспериментальных сечений и основными размерами

Вихревое движение потока характеризуется в основном профилем изменения тангенциальной составляющей скорости W_φ . На рисунке 2.12 представлено

изменение W_ϕ в объёме камеры при сжигании природного газа с различными условиями его подачи (три режима) в сравнении с продувками без горения.

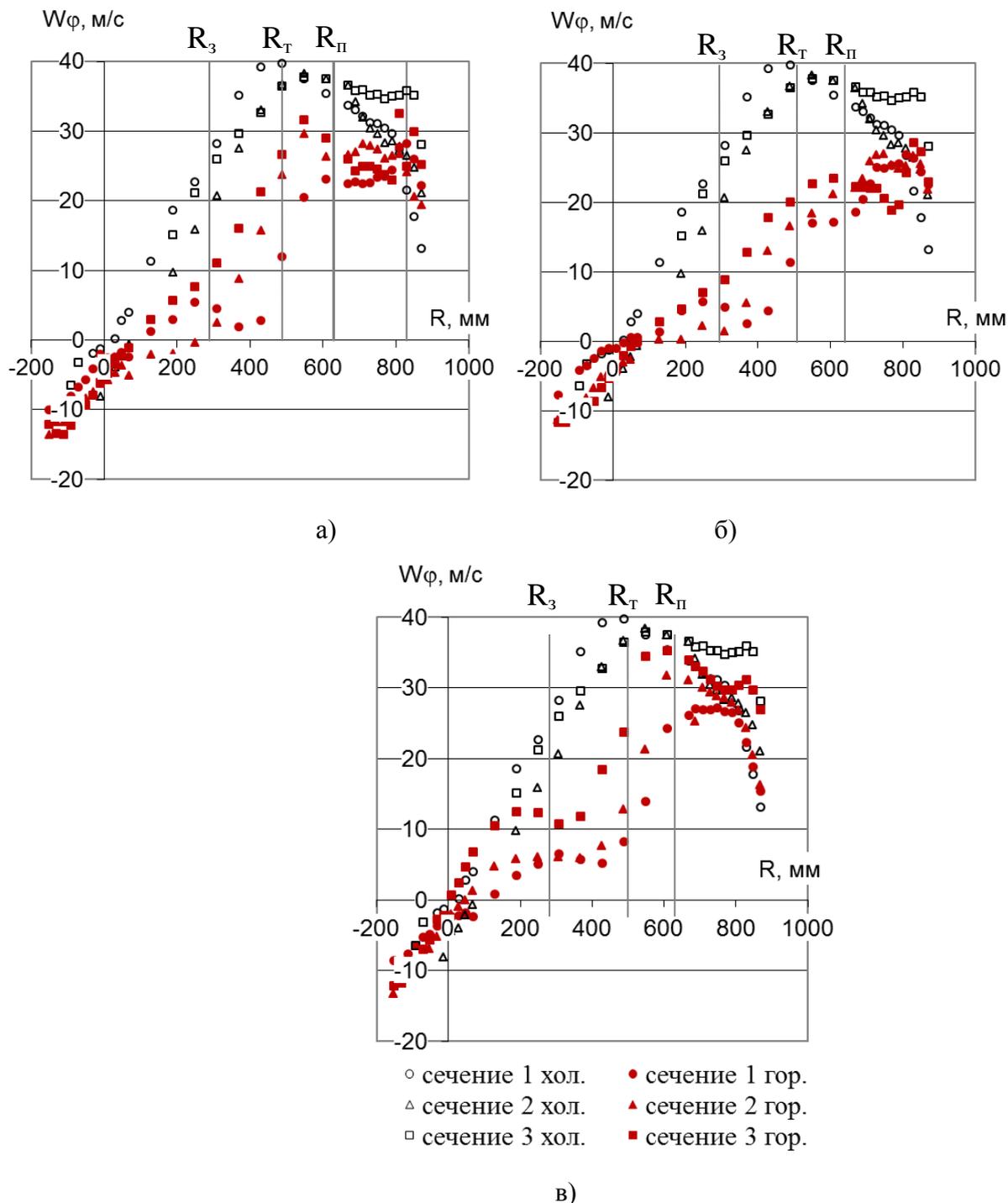


Рисунок 2.12 – Изменение W_ϕ в КС ЦВП котла ПТВМ-100:

а - режим 1; б - режим 2; в - режим 3; R_3 – радиус завихрителя; R_T - радиус торцевых сопел; R_P – радиус пережима

Анализируя графики, можно выделить наличие областей, в которых скорость возрастает от стенки, а затем убывает к оси до нулевых значений. Эти обла-

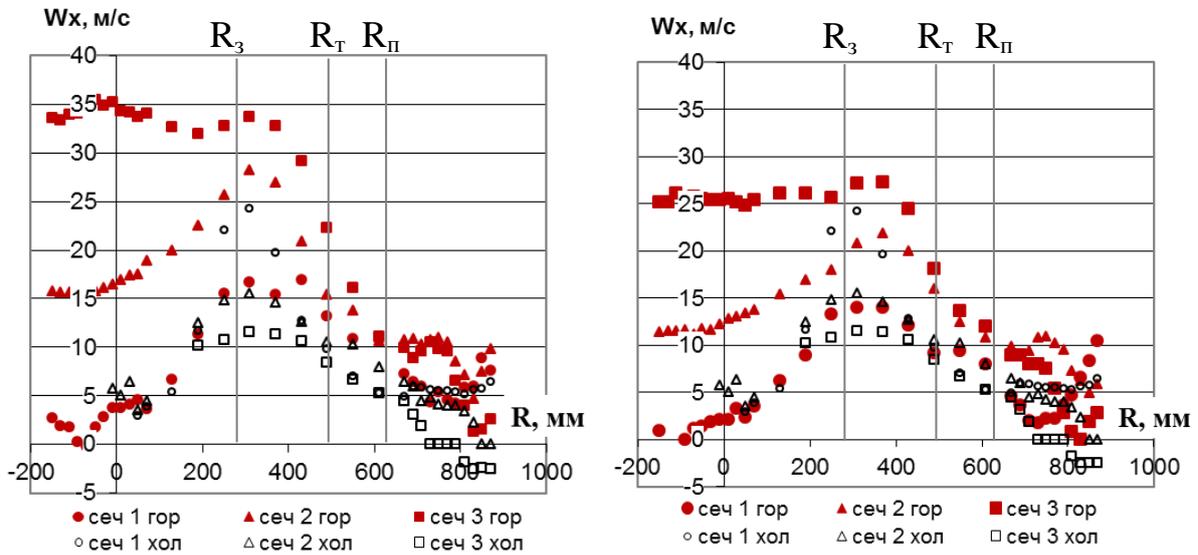
сти формируются и “горячим” и “холодным” вихрями и разделяются между собой максимальными по значению тангенциальными скоростями и называются, соответственно, областью квазипотенциального и квазитвёрдого вращения. При тангенциальном вводе газа (режим 1, режим 2) возле стенки сразу наблюдается возрастание W_ϕ . В этой области происходит смешение газа с воздухом с последующим горением. Наибольшая деформация ядра вихревого потока наблюдается при осевом вводе газа (режим 3). Наличие закрученности потока подтверждается профилем изменения тангенциальной скорости как “горячих” вихрей на всех режимах, так и “холодного” вихря, но процесс горения оказывает влияние на изменение W_ϕ , снижая степень закрученности потока в приосевой зоне за счёт возрастания осевой составляющей скорости потока.

Интенсивность стока “холодного” и “горячего” вихрей в топку котла наглядно отражает изменение осевой составляющей вектора скорости W_x по радиусу камеры ЦВП (рисунок 2.13). Осевая скорость “холодного” вихря в трёх сечения имеет одинаковый характер изменения, а именно: W_x возрастает от 0-6 м/с в пристенной зоне до 10-15 м/с на радиусе 200-500 мм и не превышает 5-7 м/с в осевой области предтопка. Скорость же “горячего” потока по мере приближения к выходу из предтопка существенно увеличивается. Возрастание W_x “горячего” вихря в осевой части предтопка в 2÷7 раз, соответственно, превышает значения W_x “холодного” вихря.

Увеличение скорости “горячих” вихрей объясняется тем, что в процессе сгорания топлива объём среды увеличивается как минимум четырёхкратно, что вызывает необходимость осевого проталкивания потока из камеры сгорания в топку котла, тем самым изменяя существенно крутку потока в приосевой области, преобразуя его преимущественно в прямоточный.

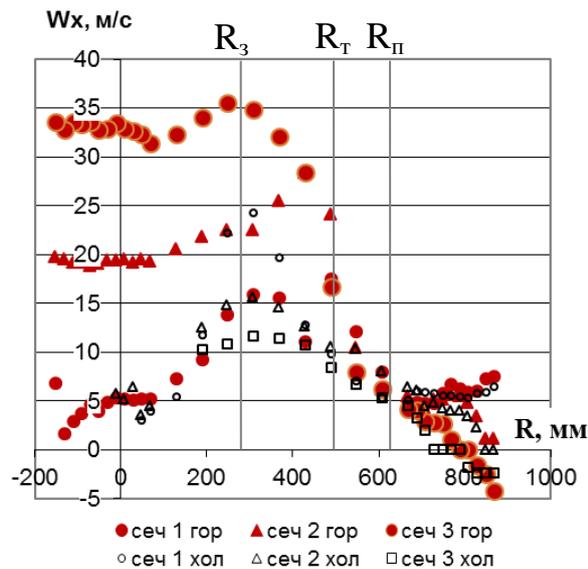
Изменение температуры потока отражено на графиках, представленных на рисунке 2.14. Отметим, что максимальные значения тангенциальной составляющей скорости практически совпадают с ростом значений температур в пристенной области, а максимальные значения осевой скорости возрастают по мере по-

вышения температуры потока в области формируемой по радиусу от оси до пережима (радиус пережима R_{Π} равен 630 мм).



а)

б)



в)

Рисунок 2.13 – Изменение W_x в КС ЦВП котла ПТВМ-100:

а - режим 1; б - режим 2; в - режим 3; R_3 – радиус завихрителя; R_T - радиус торцевых сопел; R_{Π} – радиус пережима

Возрастание тангенциальной составляющей скорости в квазипотенциальной области вызваны активным процессом смешения и началом горения топливно-

воздушной смеси. При подводе газа аксиально и через торцевые сопла - режим 3, возрастание тангенциальной составляющей скорости W_φ аналогично профилю изменения W_φ холодного закрученного потока в квазипотенциальной области, так как процесс горения начинается на радиусе ≈ 500 мм, а в квазипотенциальной области температура закрученного потока изменяется не значительно от 60 до 100 °С, что показано на рисунке 2.14 в.

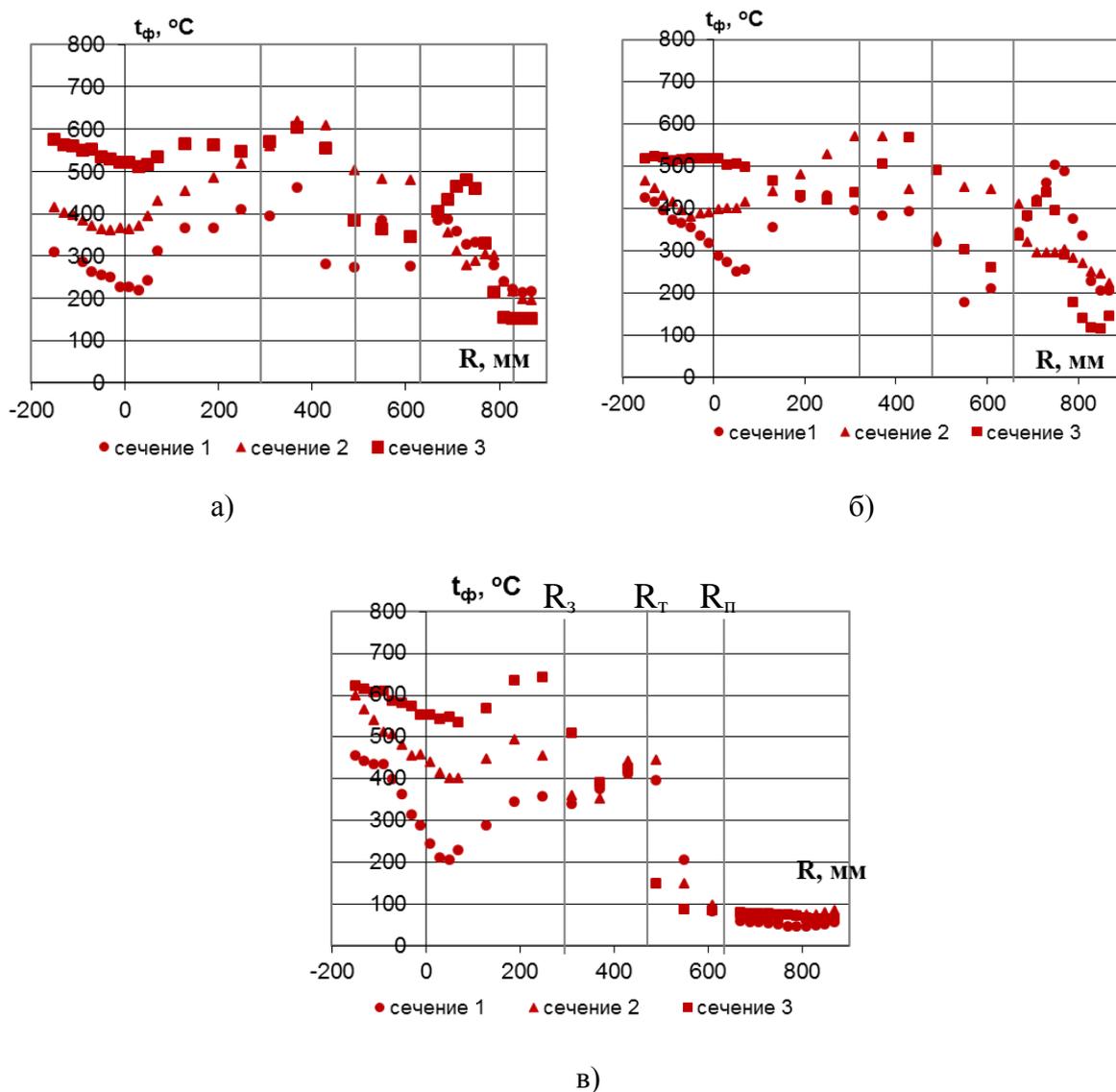


Рисунок 2.14 – Изменение температуры горящего закрученного потока в КС ЦВП котла ПТВМ-100: а - режим 1; б - режим 2; в - режим 3; R_3 – радиус завихрителя; R_T - радиус торцевых сопел; $R_П$ – радиус пережима

Интенсивность тепловыделений определяется скоростью горения. Возрастание температуры в ЦВП позволяет добиться максимального сгорания топлива в

объеме предтопка. Сформированный таким образом высокотурбулизированный факел способствует эффективному теплообмену с тепловоспринимающими поверхностями топочного объёма [23, 75], что и определяет основное преимущество циклонно-вихревого сжигания. Максимальные температуры горячего закрученного потока по результатам исследований следующие:

- 570-600 °С при режимах 1 и 2;
- 640 °С при режиме 3.

Необходимость поддержания в камере предтопка высокой температуры для успешного процесса горения объясняется тем, что при температуре ниже 540 °С сложно получить полное сгорание природного газа. Значения температур, представленные на рисунке 2.14, горящего закрученного потока в ЦВП котла ПТВМ-100 указывают на неполное сгорание основной части газа в предтопке. При этом процесс горения ускоряет перемещение закрученного потока из предтопка в топку котла, сокращая время пребывания недогоревшей топливно-воздушной смеси в предтопке. Последующее смешивание газа и продуктов горения с окислителем позволяет догореть части топлива и оксидам углерода уже в объёме топки котла. Оксид углерода смешиваясь с окислителем O_2 , горит в топке с выделением большого количества теплоты Q [18], превращаясь в двуокись углерода CO_2 :



Об эффективности работы котельной установки свидетельствует содержание CO в уходящих газах за котлом, которое при α равном 1,4 составляет всего от 9 до 15 мг/м³.

Процесс неполного сгорания топливно-воздушной смеси в предтопке в условиях аэродинамики топки котла является причиной образования на экранных трубах локальных сажистых отложений. Об этом свидетельствует состояние боковых топочных экранов слева от ЦВП А и справа от ЦВП Б, что можно наглядно увидеть на рисунке 2.15. Надо отметить, что подобные условия возникают при работе котла на максимальных нагрузках, а так же при пуске котла.

При пуске котла из холодного состояния не рекомендуется включать тангенциальный подвод газа в ЦВП в течении первых 30 минут, так как стенки КС

ЦВП постепенно прогреваются и тем самым снижают температуру факела, что приводит к неполному сгоранию газа. В зимний период времени увеличивается период прогрева ЦВП и котла из-за низких температур холодного воздуха, подаваемого на горение (до минус 54 °С). Локальные области набрасывания на экранные поверхности окиси углерода представлены на рисунке 2.15.

При максимальных нагрузках котла раздающие тангенциально газ трубки диаметром 38x3 мм не обеспечивают в предтопке полного смешения максимального расхода газа с воздухом даже при высоких скоростях газа ≈ 70 м/с. Основное и наилучшее перемешивание струи газа с окислителем происходит на границе взаимодействия газовых сред (воздушной и топливной), где и происходит горение. Перемешивание центральной части газовой струи с недостаточным количеством окислителя способствует генерации образования оксида углерода СО, реакция окисления которой описывается уравнением:

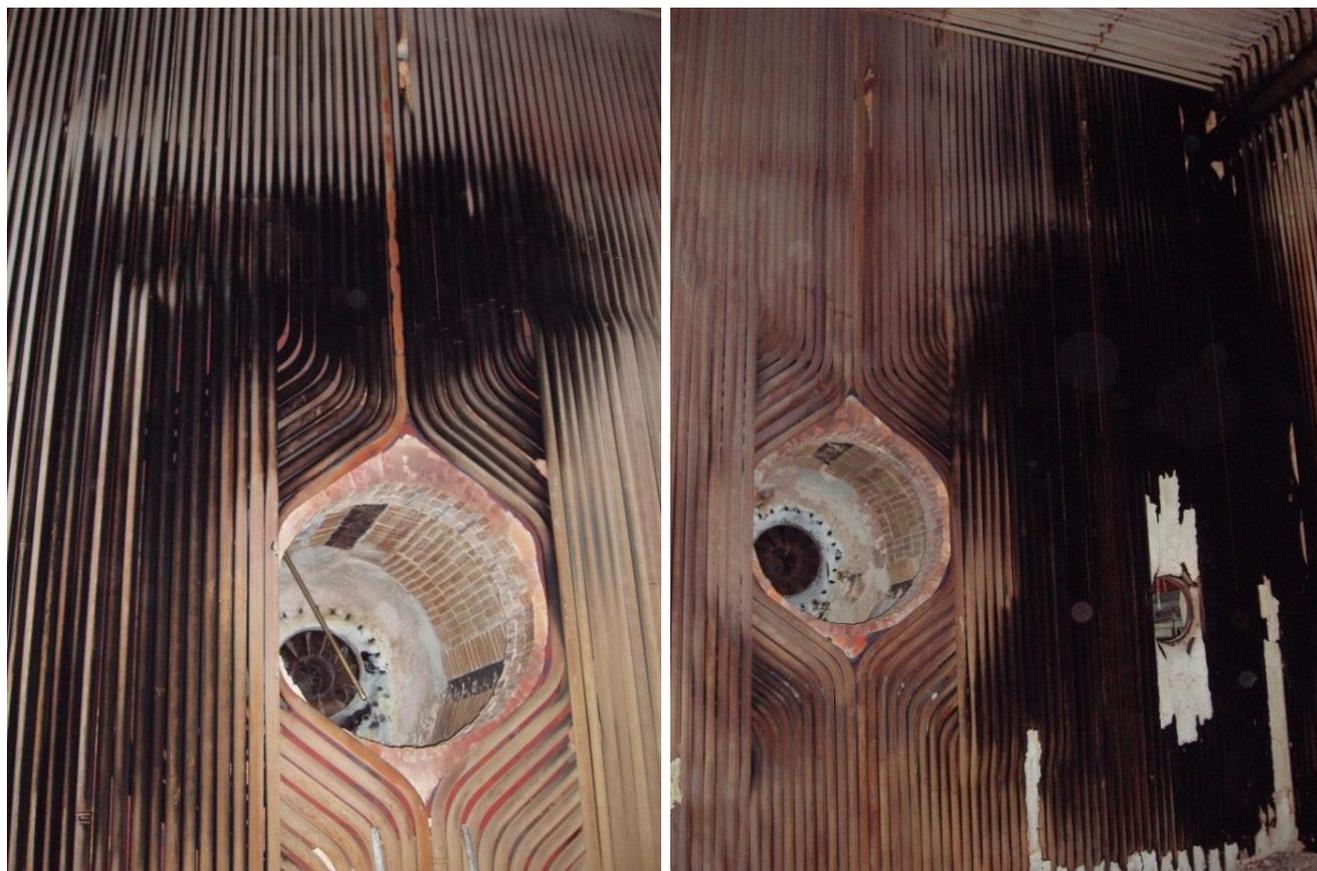


При выталкивании закрученного потока в топку котла происходит заполнение пространства топки и областей возле экранных поверхностей, где локально (см. рисунок 2.15) и происходит набрасывание на экраны окиси углерода закрученным потоком. С учётом разницы температур между теплоносителем в экранных трубах и факелом создаются зоны с пониженным температурным уровнем, где при низкой локальной концентрации кислорода ($O_2 = 0-2\%$) создаются условия для восстановления углекислоты (CO_2) до окиси углерода:



Реакция эндотермична и уже при температуре пламени 800 °С и ниже степень превращения CO_2 в СО достигает 80% с набрасыванием окиси углерода на экраны (см. рисунок 2.15) [18].

Равномерное распределение газа через все тангенциальные воздушные сопла в процессе горения позволит интенсифицировать тепло и массообмен топлива и воздуха в ЦВП и добиться полного сгорания в объёме КС ЦВП, что является основным преимуществом циклонно-вихревого сжигания в сравнении с горелочным способом.



а)

б)

Рисунок 2.15 - Состояние боковых топочных экранов котла ПТВМ-100:

а – слева от предтопка А; б – справа от предтопка Б

Важный результат, полученный после модернизации газового водогрейного котла ПТВМ-100МЦ ст. №2В, состоит в том, что определена возможность организации эффективного комбинированного сжигания газа в диапазоне температур холодного воздуха от минус 54°С до плюс 30°С с высокой энергетической и экологической эффективностью. Повысилась мощность котлоагрегата, упростилась схема управления котлом. Автоматизация котла ПТВМ-100 ст.№2В позволила максимально упростить режимы регулирования нагрузок, в то время как автоматизация шестнадцати горелок на котле ПТВМ-100 ст.№3В не только экономически более затратна, но и менее функциональна при автоматическом пуске котла.

В ходе выполненных на котле исследований получены следующие результаты [84]:

- исследовано, как доленое соотношение, вводимого в камеру сгорания с разных сторон газа, влияет на формирование факела в топке котла;

- определены режимы оптимального долевого соотношения между газовыми вводами;
- исследованы условия начала горения и дальнейшего развития процесса горения в КС ЦВП;
- исследованы области вихревого движения потока и определены области практически прямоточного движения потока в предтопке;
- оценены достоинства тангенциального ввода газа, а так же выявлены недостатки одностороннего тангенциального ввода газ.

Достоинство модернизированного котла состоит ещё в сохранение целосности внутренней обмуровки предтопков за многолетний период эксплуатации. Руководство Якутской ТЭЦ планирует модернизировать водогрейный котёл ПТВМ-100 ст.№3В на циклонно-вихревую технологию сжигания природного газа [8].

2.3 Усовершенствованная конструкция промышленного циклонно-вихревого предтопка для сжигания природного газа

По итогам модернизации парового котла БКЗ-120-100 и водогрейного котла ПТВМ-100 было выяснено, что в вихревых предтопках благодаря аэродинамической схеме обеспечивается достаточно эффективное сжигание топлива, что практически полностью исключает возможность образования внутритопочных и натрубных отложений, характерных для высокотемпературных топочных процессов. Многоступенчатая комбинированная схема подвода воздуха обеспечивает низкое сопротивление циклонного предтопка (до 2000 Па), хорошую маневренность котла, высокую эффективность процесса сжигания и широкий диапазон регулирования нагрузок (от 10 до 100%). Двухступенчатое сжигание газа не требует от топочного объёма котла специальных мероприятий по смесеобразованию и воспламенению. Продукты горения в основном реагируют до выхода из предтопка по экологически эффективной схеме ступенчатой подачи воздуха в камеру сго-

рания. В топочном объёме котла завершается сжигание газа и осуществляется охлаждение продуктов сгорания, заканчивающееся в конвективных пакетах.

С учётом результатов исследований и опыта эксплуатации котла БКЗ-120-100 и ПТВМ-100 разработана усовершенствованная конструкции ЦВП мощностью 65 МВт с воздушным охлаждением и комбинированной генерацией вихревого движения в КС [95], представленная на рисунке 2.16. Основное сжигаемое топливо – природный газ, резервное – мазут.

Конструкция ЦВП обеспечивает эффективное смешение воздуха и газа. Воздух подается по распределительному воздушному коробу (поз. 1 на рисунке 2.16) в камеру сгорания ЦВП (поз. 2 на рисунке 2.16) двумя основными потоками – аксиально и тангенциально. Аксиально (около 25% общего объема воздуха) воздух подается через торцевую воздушную камеру (поз. 3 на рисунке 2.16) с закруткой воздуха в завихрителе (поз. 4 на рисунке 2.16), а тангенциально (примерно 75% общего объема воздуха) распределяется через сопла тангенциального ввода (поз. 5 на рисунке 2.16). Комбинированная подача воздуха позволяет значительно снизить аэродинамическое сопротивление ЦВП.

Воздух нагревается при прохождении в улитке (поз. 15 на рисунке 2.16) за счет отвода теплоты от внешней поверхности обмуровки (поз. 14 на рисунке 2.16) камеры сгорания ЦВП (поз. 2 на рисунке 2.16). Поступая в камеру сгорания через тангенциальные сопла, воздух создает пристенную завесу, предохраняющую обмуровку из шамотного кирпича от перегрева и разрушения.

Газообразное топливо подается в камеру сгорания на 70 % через сопловые тангенциальные вводы (поз. 8 на рисунке 2.16) на 20 % через сопла торцевого ввода газа (поз. 10 на рисунке 2.16) и на 10 % через сопла осевого ввода газа (поз. 11 на рисунке 2.16). Тангенциальные сопловые вводы выполнены из шестнадцати стальных трубок внутренним диаметром 25 мм.

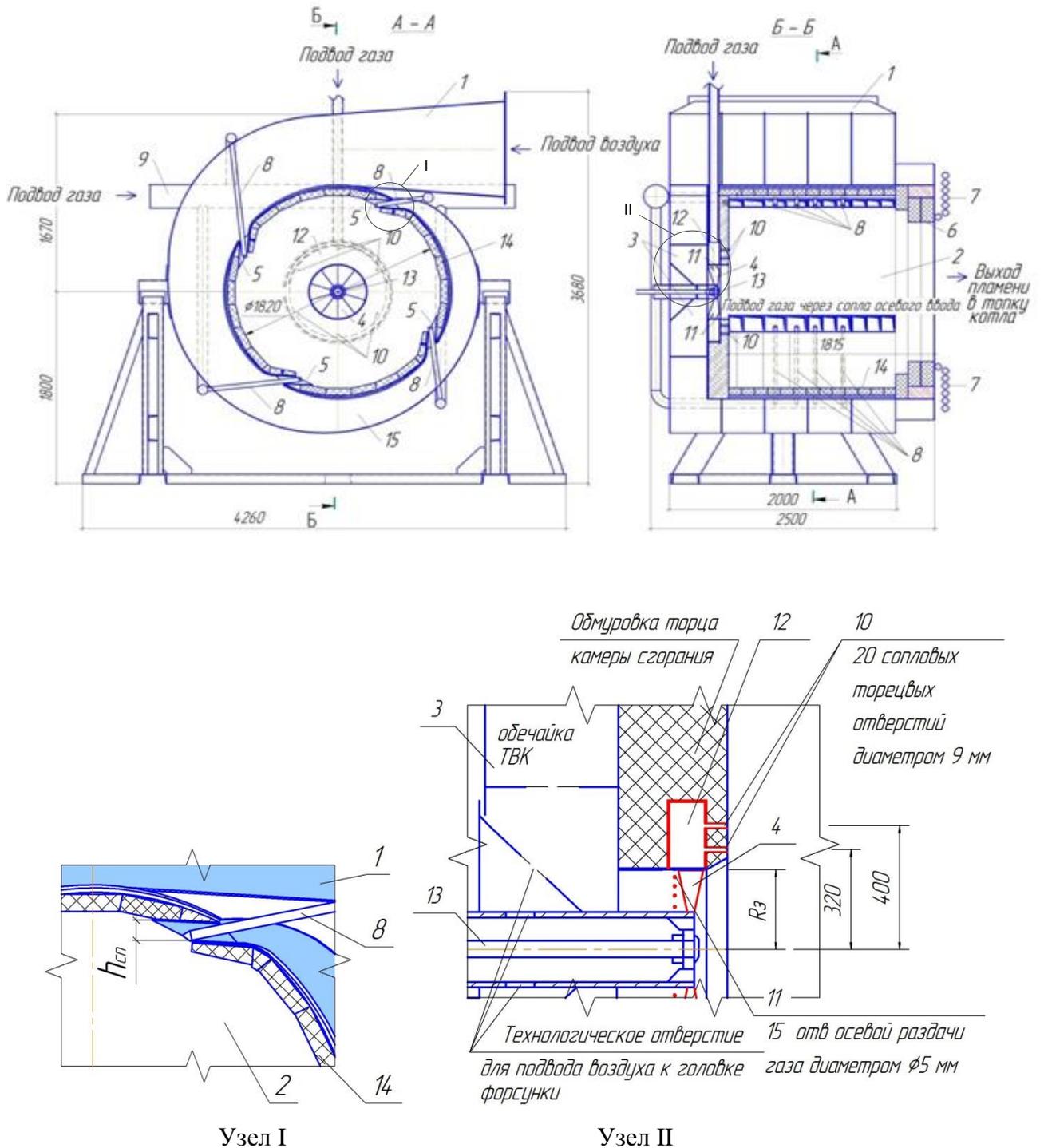


Рисунок 2.16 - Конструкция газо-мазутного ЦВП мощностью 65 МВт (поперечный и продольный разрезы): 1 – распределительный короб воздуха; 2 – камера сгорания; 3 – торцевая вихревая камера; 4 - аксиальный завихритель; 5 – сопла тангенциального ввода воздуха; 6 – пережим; 7 – поверхности нагрева котла; 8 – сопла тангенциального ввода газа; 9 – тангенциальный газовый коллектор; 10 – сопла торцевого ввода газа; 11 – сопла осевого ввода газа; 12 – торцевой газовый коллектор; 13 – многосопловая центробежная форсунка; 14- обмуровка; 15 – “улитка”

Газомазутный ЦВП оснащен многосопловой центробежной мазутной форсункой (поз. 13 на рисунке 2.16) для сжигания резервного топлива - мазута. От тангенциального коллектора (поз. 9 на рисунке 2.16) отходят четыре отводящих линии для распределения газообразного топлива через сопла тангенциального ввода газа (поз. 8 на рисунке 2.16). Через торцевой коллектор (поз. 12 на рисунке 2.16) газ равномерно подводится в торцевую и осевую части ЦВП. Сжигание топливоздушнoй смеси происходит в камере сгорания с последующим выходом продуктов сгорания и несгоревшего топлива через выходную амбразуру – пережим (поз. 6 на рисунке 2.16) в топку котла, для чего выполнена разводка экранных труб котла (поз. 7 на рисунке 2.16).

Описанная конструкция ЦВП была взята за основу при модернизации котельных установок марки КВГМ-100-150.

2.4 Результаты модернизации водогрейных котлов марки КВГМ-100-150

С началом газификации Дальнего Востока перед энергетиками была поставлена первоочередная задача по переводу мазутных котлов на сжигание природного газа, в решении которой активное участие принимал Центр «Модернизации котельной техники». При модернизации предтопок водогрейных котлов КВГМ-100-150 Хабаровской ТЭЦ на сжигание газа в 2007 г. использовался опыт сжигания газа в ЦВП на котлах ПТВМ-100 Якутской ТЭЦ и БКЗ-120-100 Охинской ТЭЦ [69, 71, 85, 89]. Эффективная эксплуатация этих котлов оказала существенное влияние на решения по организации распределения газообразного топлива в камере сгорания ЦВП котлов ст.№8, 9 Хабаровской ТЭЦ-2.

В конструкции ЦВП предусматривалась тангенциальная, торцевая и осевая подача газа в камеру сгорания ЦВП, как показано на рисунке 2.16. Различия между ЦВП котлов заключается в четырехстороннем тангенциальном подводе газа и воздуха в предтопках котла ст.№8 и трёхстороннем на ЦВП котла ст.№9. Основные показатели работы котлов после модернизации и проведения режимно-наладочных испытаний представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 - Технико-экономические показатели работы котлоагрегатов КВГМ-100-150 МЦ ст. №8,9 Хабаровской ТЭЦ-2

Наименование	КВГМ-100 ГМ ст.№8	КВГМ-100 ГМ ст.№9
Теплопроизводительность, Q_k , Гкал/ч	62,8÷92,8	46,8÷94,4
Коэффициент избытка воздуха в уходящих газах, α	1,69 ÷1,53	2,04÷1,5
Температура уходящих газов, t_{yx} , °С	106÷135	96÷129
Концентрация C_{NOx} в уходящих газах при $\alpha=1,4$, мг/м ³	118,8÷124,3	100,4÷123,5
Концентрация C_{CO} в уходящих газах при $\alpha=1,4$, мг/м ³	1,8÷7,1	3,8÷8,6
КПД, $\eta_{бр}$, %	91,55÷90,82	90,8÷91,9
Расход топлива, тыс.м ³ /ч (т/ч)	8÷11,9 (6÷8,97)	6÷12,1 (4,5÷9)
Удельный расход условного топлива, $V_{уд.усл}$, кг.у.т./Гкал	156,04÷157,3	157,41÷155,44

Котлы работают в широком диапазоне изменения нагрузки от 46% до 100% от $Q_{ном}$, руководствуясь диспетчерским графиком. Ограничений по тягодутьевому оборудованию нет, но отмечается наличие присосов холодного воздуха по конвективной части обоих котлоагрегатов вследствие неплотности обмуровки, что приводит к снижению КПД котла. Подобная проблема наблюдается на многих котельных установках данного типа.

Основное котельное оборудование Владивостокской ТЭЦ1 и ТЦ «Северная» представлено водогрейными котлами типа КВГМ-100-150 МЦ - в количестве шести единиц. В рамках проекта газификации Дальнего Востока в 2011 г. закончена модернизация котельного оборудования этих теплоисточников на сжигание природного газа в ЦВП [13].

Модернизация котлов проведена по проектам, учитывающим конструктивные и эксплуатационные особенности данного типа котлов [95, 13]. Проектное решение модернизации КВГМ-100-150 предусматривает замену трёх горелок РГМГ-30 на два предтопка единичной мощностью 65 МВт каждый на боковых

экранах топки [69], схема показана на рисунке 2.17.

Распределение природного газа в КС ЦВП решено осуществлять по усовершенствованной ЦВ технологии, как показано на рисунке 2.16, с сохранением существующей системы мазутоснабжения котлов как резервной. На котлах разработана и реализована схема циркуляции “противоток”, представленная на рисунке 2.18, с возможностью перехода на проток путем переключения запорной арматуры на входе/выходе сетевой воды в котёл. Эта схема позволила существенно увеличить КПД котла при пиковых режимах работы. При проведении режимно-наладочных испытаний выяснилось, что эксплуатировать котёл КВГМ-100-150 МЦ по схеме “противоток” при нагрузках менее 70% от номинальной и при температуре сетевой воды ниже 70°С не рекомендуется по причине конденсации водяных паров в последнем конвективном пакете. С целью повышения надежности работы котлов на меняющихся за отопительный сезон режимах циркуляции воды, все конвективные поверхности нагрева выполнены из труб $d_y 32$ мм.

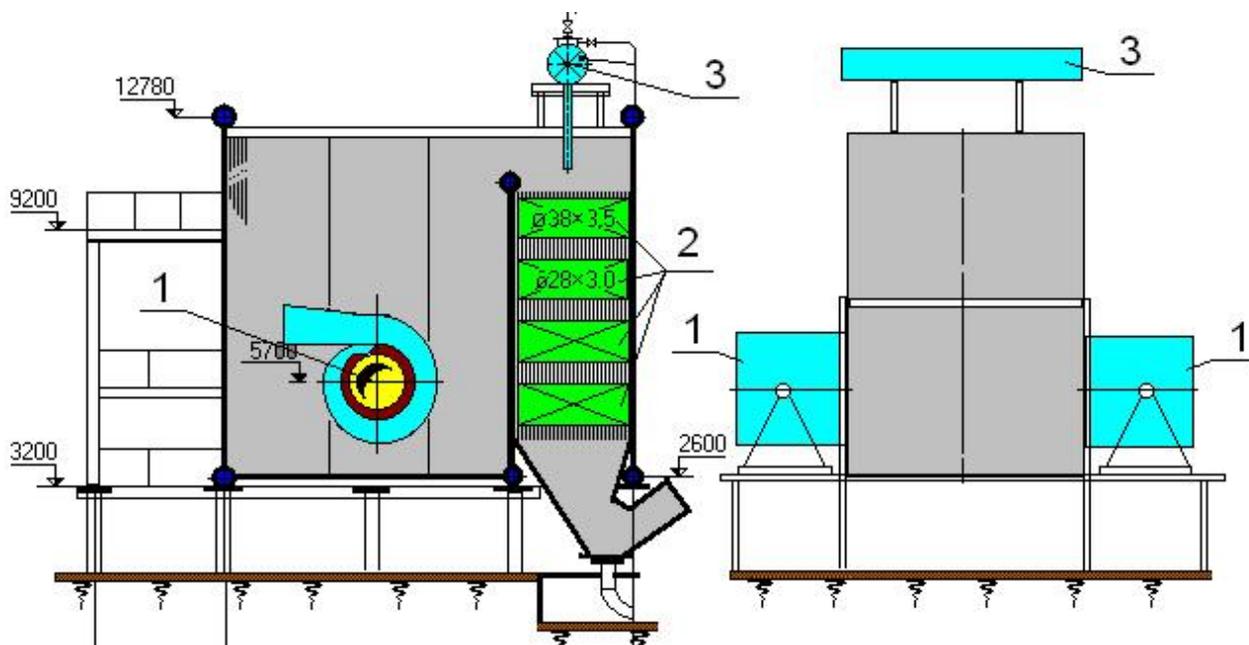


Рисунок 2.17 - Водогрейный котёл КВГМ-100-150: 1-ЦВП; 2-конвективные поверхности нагрева; 3- пневмоимпульсная очистка

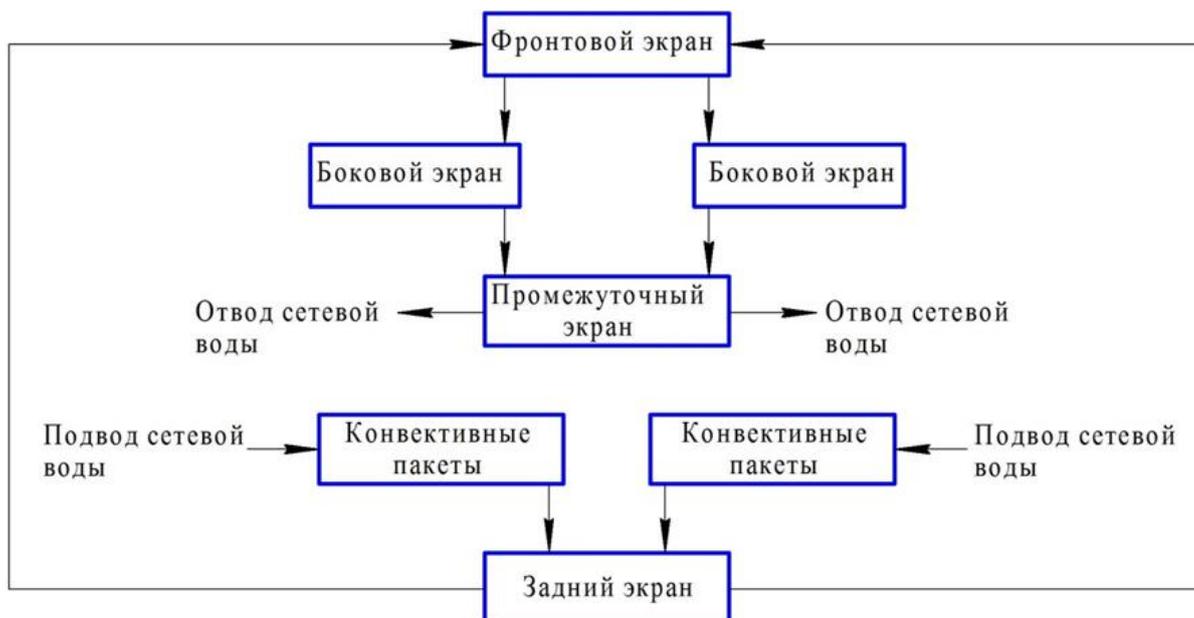


Рисунок 2.18 - Схема циркуляции “противоток”

Выявлена конструктивная особенность у данного типа котельных установок, проявляющаяся при их эксплуатации. Область примыкания промэкрана является «слабым элементом», в этой области происходят перетоки продуктов сгорания из топки в конвективную шахту котла, о чем свидетельствует увеличение температуры в межтрубном пространстве до $650\text{ }^{\circ}\text{C}$, показанное на рисунке 2.19, и отмечается существенное возрастание температуры обмуровки котла до $90\text{ }^{\circ}\text{C}$, смотрите рисунок 2.20. В свою очередь, это ведёт к частичным, а при высоких значениях разрежения к существенным перетокам продуктов сгорания с высокой температурой и массовой концентрацией оксидов азота в конвективной выходной части котла. Поэтому важно своевременно производить ремонты участка примыкания бокового экрана к заднему экрану топки котла, а так же следить за разрежением в топке, что позволяет увеличить КПД котлов.

Эксплуатационные значения ТЭП котлов, работающих по схеме “прямоток” и “противоток” на мазутном и на газообразном топливе, приведены в таблице 2.6. Как видно из табличных сведений, эксплуатационное преимущество работы котлов, сжигающих в ЦВП природный газ по схеме “противоток” в сравнении со схемой “прямоток”, выражается в возрастании КПД на 2 - 4,4%. При работе котла

по схеме “прямоток” эффективность работы котла составляет 94,1%, что выше нормативного значения КПД котла равного 92,7 % при работе на природном газе.

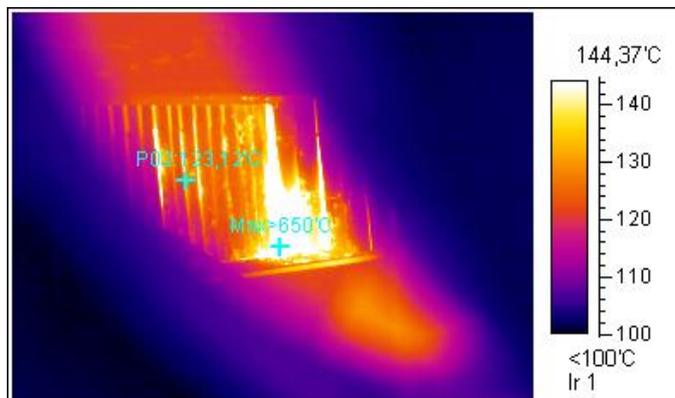


Рисунок 2.19 - Тепловизионное обследование участка примыкания бокового экрана к заднему экрану топки котла КВГМ-100 -150 МЦ ст.№5 (вид через лючок)

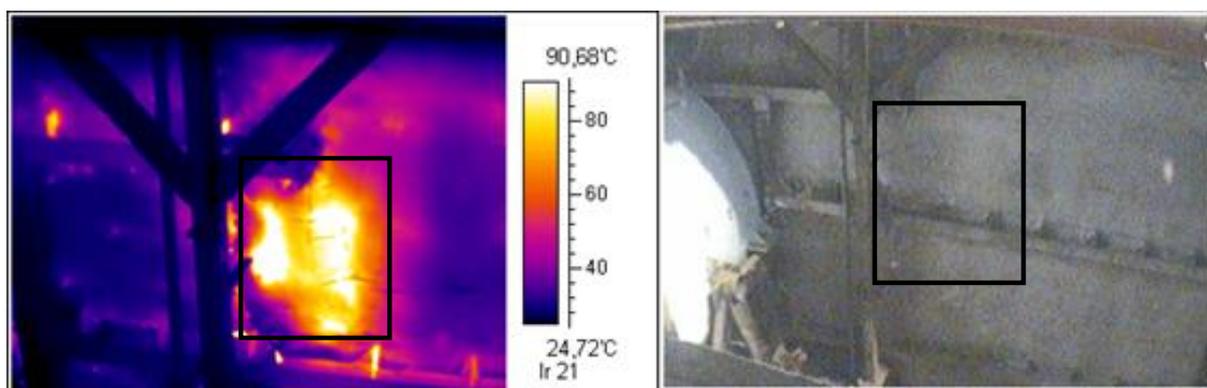


Рисунок 2.20 - Правая боковая сторона котла КВГМ-100-150 МЦ ст.№5:

□ - область примыкания промэкрана

Конструктивные решения, реализованные в ЦВП, позволяют оптимизировать смесеобразование в камере сгорания ЦВП и добиться значительного снижения оксидов азота [97] в теплонапряженном объеме предтопка. Экологические требования к котельной установке по выбросам загрязняющих веществ в атмосферу регламентируются ГОСТ 50831-95 [21]. Нормативные удельные выбросы при $\alpha=1,4$ при сжигании жидкого топлива по содержанию оксидов азота не должны превышать 250 мг/м^3 , а оксидов серы не более 2000 мг/м^3 . Нормативные удельные выбросы при $\alpha=1,4$ при сжигании природного газа по содержанию оксидов азота не должны превышать 125 мг/м^3 .

Таблица 2.6 - Эксплуатационные значения ТЭП котлов

Параметры	Мазутное топливо		Газообразное топливо	
	Прямоток	Противо-ток	Прямоток	Противо-ток
Тепловая нагрузка, Q , Гкал/ч	65-109	98	44,7-106	76,8-101,6
Температура уходящих газов за котлом, $t_{\text{вх}}$, °С	134-175	124	102-156	74,6-86
КПД брутто, $\eta_{\text{бр}}$, %	90-91	93,9	91,7-94,1	95,79-96,1
Удельный расход условного топлива, $b_{\text{уд.у.т.}}$, кг.у.т/Гкал	158,73-156,93	151,3	151,8-155,6	148,14-149,65
Коэффициент избытка воздуха за котлом, α , -	1,17-1,37	1,4	1,11-1,49	1,11-1,16
Содержание оксидов азота, C_{NO_x} при $\alpha=1,4$, мг/м ³	150-237	-	83-120	-
Содержание оксидов серы при $\alpha=1,4$, C_{SO_x} , мг/м ³	1691	-	1,2	-

Сотрудниками независимой экоаналитической лаборатории ООО “Экоаналитика” были выполнены замеры загрязняющих веществ в промышленных выбросах после котла КВГМ-100-150 ст. №5 при сжигании мазута и газа. По результатам исследований составлены протоколы, представленные в приложении В. Данные замеров по содержанию NO_x и SO_2 из протоколов, приведены в таблице 2.6. По результатам исследований можно заключить, что усовершенствованная циклонно-вихревая технология сжигания природного газа позволяет снизить выбросы загрязняющих веществ ниже нормируемых значений на 10-25 %. При сжигании резервного топлива (мазута М-100) в ЦВП выбросы загрязняющих веществ ниже нормируемых значений на 15-40 %.

Режимно-технологические мероприятия, заключающиеся в перераспределении потоков газа по вводам, являются гарантированным механизмом в снижении оксидов азота. Результаты показали, что концентрация оксидов азота при $\alpha=1,4$ во всем диапазоне нагрузок не превышает 125 мг/м³, а при организации впрыска воды в камеру сгорания ЦВП C_{NO_x} снижается до 70 мг/м³ [82, 81, 21].

Для повышения надежности и экономичности котельной установки выполнены работы по автоматизации процессов розжига и ведения режимов горения на газообразном и жидком топливе на всех котлах Владивостокской ТЭЦ-1 и ТЦ «Северная».

После успешной эксплуатации модернизированных котельных установок КВГМ-100-150 на КЦ «Северная» (г. Владивосток) и Хабаровской ТЭЦ-2 за несколько отопительных сезонов на проект модернизации котла КВГМ-100-150 МЦ получено заключения Дорогобужского и Красноярского котельных заводов (Приложение Г).

2.5 Технико-экономическое обоснование модернизации

Технико-экономический расчёт обоснования модернизации котельной установки на циклонно-вихревую технологию сжигания газообразного и жидкого топлив выполнялся с учётом рекомендаций, изложенных в [43].

Экономический эффект и экономическая эффективность модернизации определялась при сопоставлении в денежном выражении получаемого эффекта с затратами на модернизацию. В расчётах по определению эффективности использовались экономические стоимостные показатели капитальных вложений K_{mod} , стоимость и тарифы на энергоносители, издержки производства за месяц ΔI_{Σ} , прирост эффективности работы оборудования и др. При расчете капитальных вложений, стоимости, тарифов, эксплуатационных затрат, а также дополнительных показателей применены цены, тарифы и другие ценообразующие нормативы действующие на январь 2017 года.

Метод расчёта экономического эффекта за месяц основан на постоянной производительности котельной установки в течение месяца на номинальной нагрузке, при разных вариантах модернизации. При равенстве выработки тепловой энергии котлом за месяц (январь) расчёт экономического эффекта за месяц \mathcal{E}_r ,

руб (у.е.) ведётся на базе абсолютных величин капитальных вложений $K_{\text{мод}}$ и эксплуатационных затрат (издержек) ΔI_{Σ} и рассчитывается по формуле:

$$\mathcal{E}_{\Gamma} = \Delta I_{\Sigma} - E_{\text{н}} \cdot K_{\text{мод}} \quad (5.1)$$

где $E_{\text{н}}$ - нормативный коэффициент эффективности капиталовложений.

Экономический расчет вариантов модернизации котельной установки КВГМ-100-150 представлен в таблице 2.7. В экономическом расчёте производилось сравнение вариантов модернизации котла на циклонно-вихревую технологию сжигания мазута и газа с заводским вариантом исполнения котельной установки, эксплуатируемой на Владивостокской ТЭЦ1. Преимущества циклонно-вихревой технологии подтверждаются значительным экономическим эффектом, получаемым при эксплуатации модернизированного котла.

Таблица 2.7 – Расчёт экономического эффекта модернизации

Наименование величины	Обозначение	Формула или обоснование	Значение			
			не модернизированный	модernизированный на ЦВ технологию	реконструкция ЦВП	модernизированный на ЦВ технологию
Вариант модернизации котла			не модернизированный	модernизированный на ЦВ технологию	реконструкция ЦВП	модernизированный на ЦВ технологию
Вид сжигаемого топлива			мазут	мазут	газ (мазут)	газ (мазут)
Выработка котла, Гкал/мес	$Q_{\Gamma}^{\text{к}}$	$Q_{\text{к}}^{\text{сп.}\tau}$	72 000	72 000	72 000	72 000
Тепловая нагрузка котла, Гкал/ч	$Q_{\text{к}}$	данные испытаний	70	100	100	100
Число часов использования, ч	τ		720	504	504	504
КПД брутто котла на нагрузке $Q_{\text{к}}$, %	$\eta_{\text{бр}}$	данные испытаний	90	92	94	94
Удельные затраты электроэнергии на тягу и дутье, кВт·ч/Гкал	$\mathcal{E}_{\text{сн}}^{\text{Тид}}$	данные обработки испытаний	5,8	5,2	5,2	5,2
Калорийность топлива, ккал/кг, ккал/м ³	$Q_{\text{н}}^{\text{р}}$	паспорт качества	9600	9600	8512	8512
Стоимость модернизации, млн, руб	$K_{\text{мод}}$	данные ПЭО и проектной организации	-	8	0,4	8,3
Коэффициент дисконтирования	$E_{\text{н}}$		0,15	0,15	0,15	0,15

Продолжение таблицы 2.7

Наименование величины	Обозначение	Формула или обоснование	Значение			
			не модернизированный	модернизированный на ЦВ технологию	реконструкция ЦВП	модернизированный на ЦВ технологию
Вариант модернизации котла						
Стоимость натурального топлива, руб/т, руб/тыс.м ³	C_T	данные ПЭО	16 670	16 670	5 200	5 200
Стоимость электроэнергии, руб/кВт·ч	$C_{Эн}$	данные ПЭО	3,50	3,50	3,5	3,5
Плотность газа, кг/м ³	ρ	паспорт качества			0,7494	0,7494
Удельный расход условного топлива, кг/Гкал	$B_{усл}$	$142,86/\eta_{бр}$	161	157	152	152
Расход топлива, т/мес	B	$Q_k^r/Q_n^p \eta_{бр}$	5833	5 707	4 720	4720
Расход топлива, тыс.м ³ /мес	B	$Q_k^r/Q_n^p \eta_{бр}$			6299	6299
Экономия расхода						
мазута, т/мес	ΔB_M	B_1-B_2	0	127	-	-
газа, т/мес	ΔB_r	B_1-B_2	-	-	986	1113
Экономия расхода газа, тыс.м ³ /мес	ΔB_r	B_1-B_2	-	-	1316	1485
Экономия затрат по топливу, руб	$\Delta И_T$	$\Delta B \cdot C_T$	-	2 113 949	6 842 136	7 722 067
Затраты на тягу и дутьё, руб	$И_3'$	$\mathcal{E}_{сн}^{Тид} C_{Эн} \cdot Q_k^r$	1 023 120			
Затраты на тягу и дутьё, руб	$И_3''$	$\mathcal{E}_{сн}^{Тид} C_{Эн} \cdot Q_k^r$		917 280	917 280	917 280
Экономия затрат на тягу и дутьё, руб	$\Delta И_{Тид}$	$И_3' - И_3''$	-	105 840	105 840	105 840
Амортизационные отчисления, руб	$И_a$	$8\% \cdot K_{мод}$	-	600 000	30 000	622 500
Экономия затрат, руб	$\Delta И_{\Sigma}$	$\Delta И_T + \Delta И_{Тид} - И_a$	-	1 619 789	6 917 976	7 205 407
Месячный экономический эффект, руб/мес	\mathcal{E}_r	$\Delta И_{\Sigma} - K_{мод} \cdot E_n$	-	419 789	6 857 976	5 960 407
Курс доллара, руб/\$		янв. 2017г	60	60	60	60
Месячный экономический эффект, у.е/мес	\mathcal{E}_r			26 996	115 300	120 090
Срок окупаемости	$T_{ок}$	$K_{мод}/\Delta И_{\Sigma}$	-	4,94	0,06	1,15

По результатам экономического расчёта модернизация котла на сжигание мазута в ЦВП позволила только за счёт повышения КПД котла и снижения собственных нужд на тягу и дутьё получить экономический эффект за месяц в размере ≈ 420 тыс.руб., срок окупаемости $T_{ок}$ капитальных вложений 4,94, если котёл будет эксплуатироваться один месяц в году и $T_{ок}$ один отопительный период при загрузке котла весь отопительный период. При реконструкции существующего ЦВП на сжигание природного газа увеличение экономического эффекта за один месяц достигается так же за счёт возрастания КПД котельной установки и составляет $\approx 6,86$ млн.руб. Срок окупаемости 0,06, так как затраты в этом случае на реконструкцию ЦВП составляют 400 тыс.руб.

Наибольшая экономия затрат на топливо и электроэнергию достигается в варианте комплексной модернизации котельной установки на сжигание природного газа в качестве основного вида топлива. Мазут используется как резервное топливо. Экономия издержек при этом ΔI_{Σ} составляет 7 205 407 руб. Вкладывая 8,3 млн.руб. в модернизацию котельной установки, ожидаемый месячный экономический эффект составит $\approx 5,96$ млн.руб., со сроком окупаемости 1,15. Увеличение периода эксплуатации котла на 100 суток позволит сократить срок окупаемости до $T_{ок}$ 0,23.

Глава 3. Постановка исследований закономерностей формирования вихревого движения в ЦВП

При сжигании твёрдого топлива и мазута основой расчётных зависимостей для вихревого потока были исследования без учёта влияния горения, так как проведение измерений при таких условиях выполнить весьма затруднительно [80]. Как правило, предполагалось, что проведённые холодные продувки вихревых камер отражают основные закономерности вихревого потока и при горении, которое не вносит принципиальных изменений в распределение осреднённых параметров закрученного потока.

Сжигание газа существенно упрощает проведение измерений, поэтому в настоящей диссертационной работе уделено значительное внимание влиянию процесса горения на структуру закрученного потока.

3.1 Описание экспериментальной промышленной установки и схемы измерений

Проведение исследований по определению параметров закрученного потока при горении осуществлялось на промышленном ЦВП. Для исследований был подготовлен водогрейный котёл КВГМ-100-150 ст.№5 Владивостокской ТЭЦ1 [90]. Котёл оснащен двумя усовершенствованными ЦВП мощностью 65 МВт каждый (см. рисунок 2.16). Перевод котла на сжигание газа дал возможность провести внутрициклонные исследования при горении. При сжигании мазута подобные исследования были весьма ограничены, так как сопровождалось залипанием импульсных отверстий зонда горящими каплями [80]. Для исследований характера изменения параметров закрученного потока, формируемого при горении газа, в экспериментальном ЦВП были смонтированы два отверстия для ввода исследовательского зонда. Схема ЦВП с расположением экспериментальных сечений представлена на рисунке 3.1. Длина камеры сгорания предтопка $L=1460$ мм, диаметр $D=1800$ мм. Калибр ЦВП \bar{L} равен 0,81. Замеры производились в двух сечениях.

Первое сечение на расстоянии X_1 , равное 510 мм (безразмерное расстояние $\bar{X}_1 = X_1/D = 0,283$) от торца КС ЦВП, второе на расстоянии X_2 , равное 990 мм (безразмерное расстояние $\bar{X}_2 = X_2/D = 0,55$) от торца. Основные размерные и относительные геометрические характеристики экспериментального ЦВП представлены в таблице 3.1.

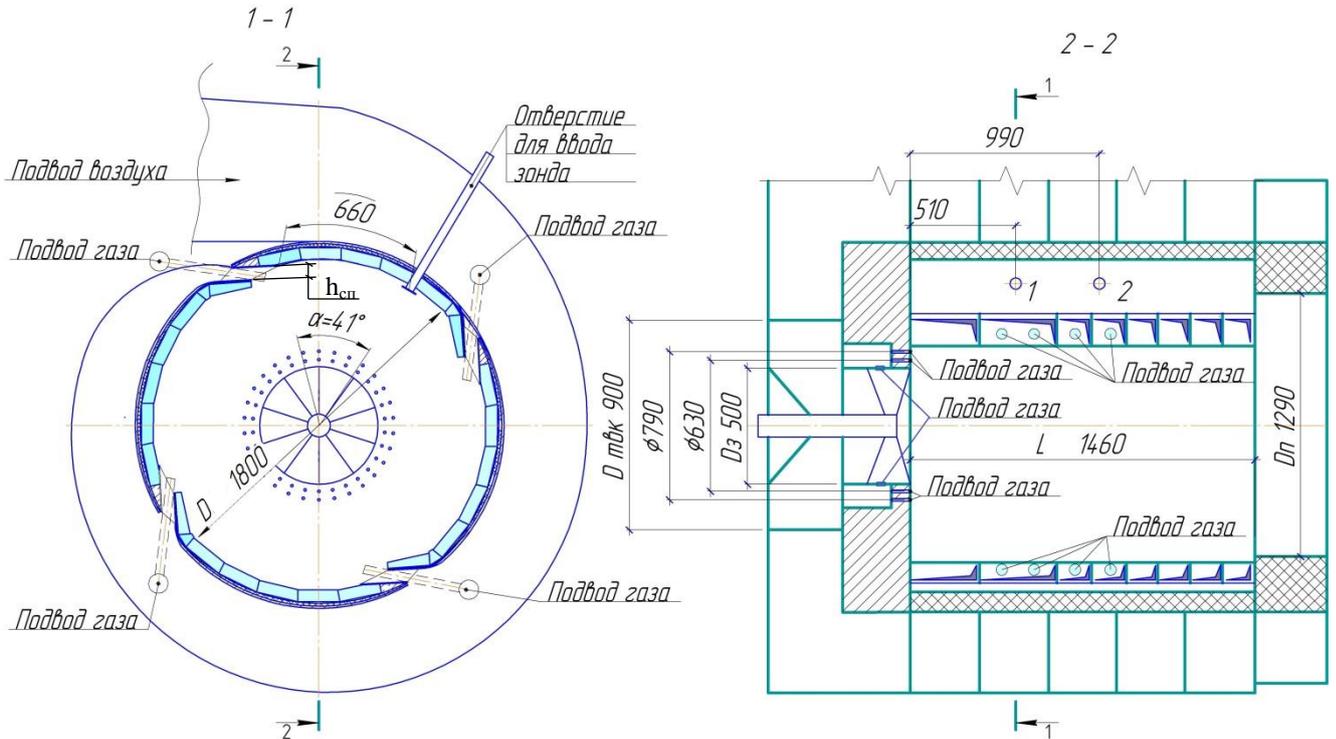


Рисунок 3.1 - Схема ЦВП котла КВГМ-100-150 ст.№5 с расположением экспериментальных сечений

Для анализа и сопоставления параметров закрученного потока исследования проводились при “холодных” и при “горячих” режимах работы. Исследования при подводе в ЦВП воздуха без процесса горения будем далее по тексту называть “холодные” продувки, а при горении топливно-воздушной смеси в ЦВП и котле, соответственно, “горячие” продувки. Воздух в камеру сгорания ЦВП котла подавался дутьевым вентилятором. Типы тягодутьевых механизмов, установленных на котле, и основные их характеристики приведены в таблице 3.2. Воздух подавался из помещения котельного цеха станции и/или из окружающей среды. Напор воздуха на ЦВП регулировался направляющим аппаратом нагнетателя и регулирую-

щим шибером перед ЦВП. Параметры воздуха перед ЦВП при проведении “холодных” продувок представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.1 – Геометрические характеристики экспериментального ЦВП

Наименование	ЦВП котла КВГМ-100 ст №5
Диаметр камеры сгорания, D, мм	1800
Длина камеры сгорания, L, мм	1460
Объем КС предтопка, $V_{п}, м^3$	3,71
Диаметр пережима, $D_{п}, мм$	1290
Диаметр завихрителя, $D_{з}, мм$	500
Диаметр ТВК, $D_{твк}, мм$	900
Высота тангенциального сопла, $h_{сп}, мм$	70
Количество тангенциальных вводов	4
Калибр КС $\bar{L} = \frac{L}{D}$	0,81
Относительный диаметр пережима $d_{п} = D_{п}/D$	0,72

Таблица 3.2 - Типы тягодутьевого оборудования котла КВГМ-100-150

Наименование	КВГМ-100-150 ст.№5	
	ВДН-18	ДН-22х2-0,62
Тип оборудования	ВДН-18	ДН-22х2-0,62
Мощность двигателя, кВт	315	325
Производительность, $м^3/ч$	200 000	280 000
Частота вращения, об/мин	750	750
Количество, шт	1	1

Таблица 3.3 - Режим “холодных” продувок

Наименование	КВГМ-100-150 ст.№5
Статическое давление воздуха перед ЦВП, $P^{изм}_{ст}, Па$ (мм.вод.ст)	490,3 (50)
Динамическое давление воздуха перед ЦВП, $\Delta P^{изм}_{дин}, Па$ (мм.вод.ст)	31,4 (3,2)
Температура воздуха, $t_{в}, °C$	от 10 до 12
Температура закрученного потока, $t_{изм}, °C$	от 10 до 12
Расход воздуха, $V_{в} \cdot 10^3, м^3/ч$	34,720
Разрежение в топке котла, S, Па (мм.вод.ст)	- 29,4 (- 3)

Для исследований использовался водоохлаждаемый зонд. Схема подключения аэродинамического зонда при проведении “холодных” и “горячих” исследований представлена на рисунке 3.2.

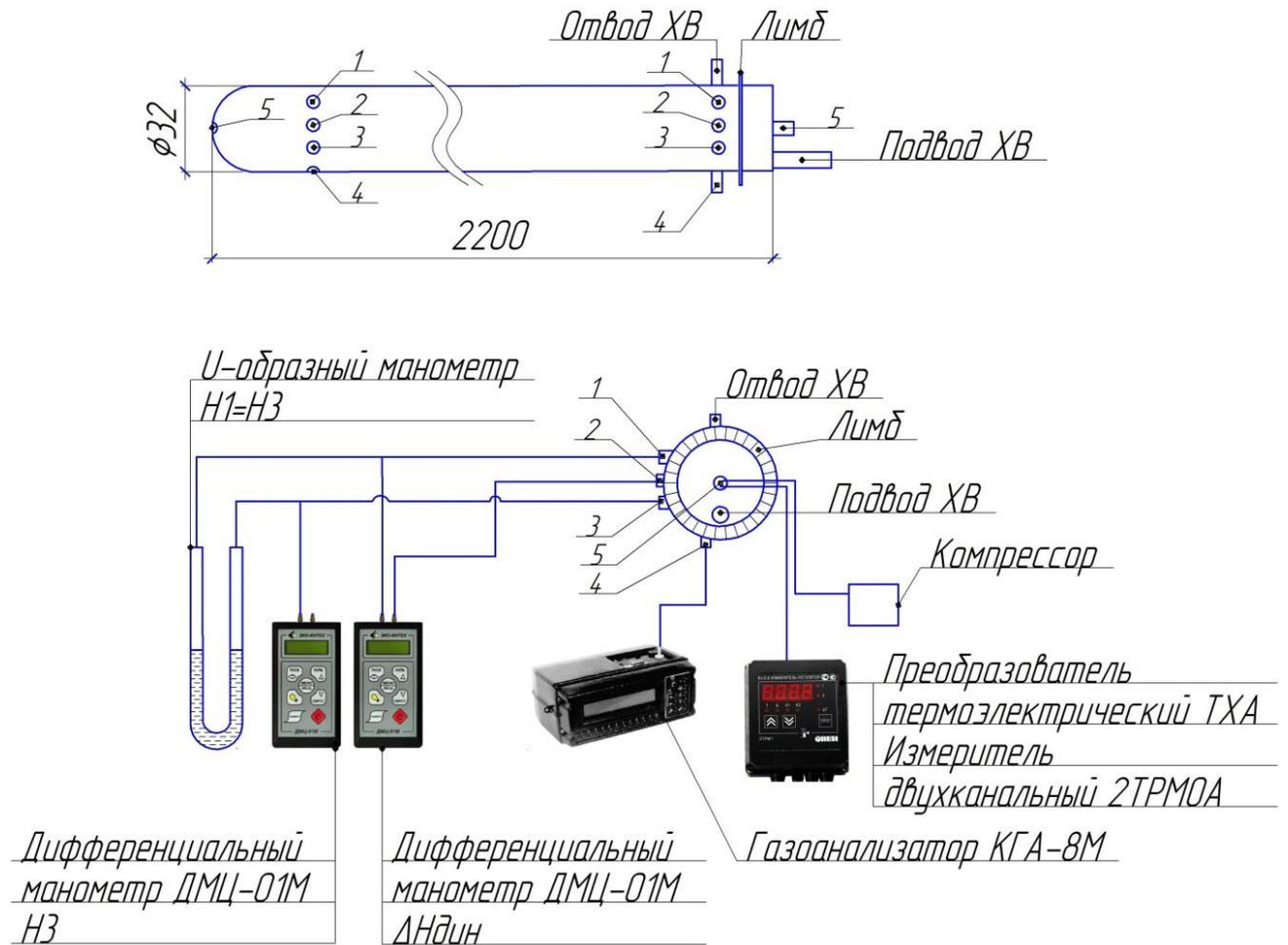


Рисунок 3.2 – Принципиальная экспериментальная схема измерений:

1, 2, 3 – импульсные отверстия для измерения динамического и статического напоров, 4 – импульсное отверстие для измерения состава газов, 5 – импульсное отверстие для измерения температуры закрученного потока

Параметры закрученного потока, замеряемые при “холодных” исследованиях, следующие: статическое давление $P_{ст}^{изм}$, динамическое давление потока $\Delta P_{дин}^{изм}$, направление вектора скорости закрученного потока (угол φ) и температура потока $t_{изм}$.

Для определения влияния режимных условий ввода газа на формирование вихревых потоков в ЦВП были проведены исследования формируемых “горячих” вихрей при комбинации ввода газа в ЦВП. Основными режимами для исследова-

ний являлись:

- режим 1 - подвод газа комбинированно - через тангенциальные, аксиальные и торцевые вводы газа, основной режим работы;
- режим 2 - подвод газа через тангенциальные вводы;
- режим 3 - подвод газа через аксиальные и торцевые вводы.

Нагрузка котельного агрегата при трёх режимах ввода газа в КС ЦВП составляла ≈ 50 Гкал/ч. В таблице 3.4 представлены параметры газа и воздуха на вводе в исследовательский ЦВП, второй ЦВП работал в базовом режиме, и показания штатных приборов, и основные технико-экономические показатели работы котла. Замеры параметров, производимых на котле во время исследований, представлены схематично на рисунке 3.3.

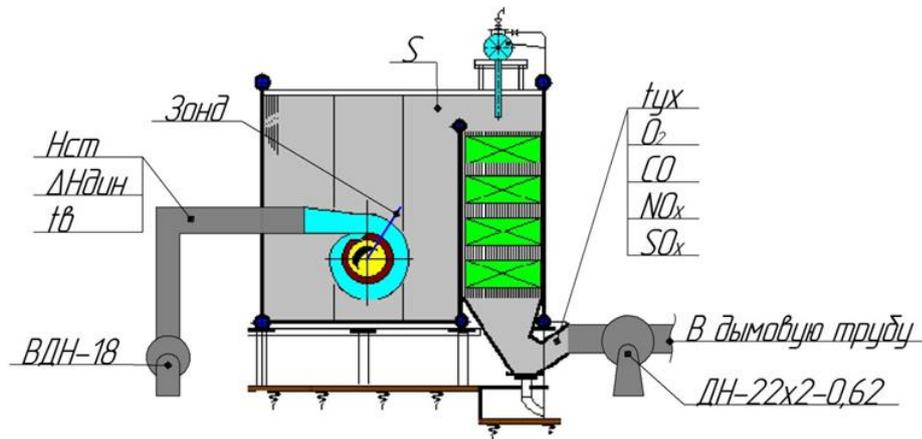


Рисунок 3.3 - Схема замера параметров на котельной установке

Параметры формируемого в камере сгорания ЦВП потока замерылись следующие: статическое $P_{ст}^{изм}$ и динамическое $\Delta P_{дин}^{изм}$ давления потока, направление закрученного потока - угол φ . Измерение температуры потока производилось отсосным пирометром, предварительно калиброванным на стенде в условиях горения газообразного топлива, с целью определения расходов газов через канал термомпары. Значения температуры потока выводились на экран измерителя двухканального 2ТРМОА. Концентрация кислорода O_2 в потоке в исследуемой точке сечения измерялась газоанализатором КГА-8М. При проведении исследований и замеров использовалось оборудование, перечень которого с характеристиками приведен в таблице 3.5.

Таблица 3.4 - Режимы “горячих” продувоч

Наименование	КВГМ-100-150 ст.№5		
	Режим 1	Режим 2	Режим 3
Нагрузка котла, Q, Гкал/ч	49,5	50,9	52,9
Расход газа на котёл, м ³ /ч	6 196	6 391	6 790
КПД котла, $\eta_{бр}$, %	93,8	93,5	93,4
Температура уходящих газов, $t_{ух}$, °С	107,5	108,5	110
Температура окружающей среды, $t_{окр}$, °С	12	12	10
Избыток воздуха за котлом	1,28	1,36	1,37
Содержание кислорода в уходящих газах, %	4,7	5,6	5,7
Массовая концентрация NO _x в уходящих газах при $\alpha=1,4$, C _{NO_x} , мг/м ³	120	122	80,4
Давление газа по вводам в ЦВП исследовательском, кгс/см ²			
осевой ввод	0,068	0	0,209
торцевой ввод			
тангенциальный ввод	0,072	0,086	0
Давление газа по вводам в ЦВП в базовом режиме, кгс/см ²			
осевой ввод	0,068	0,077	0,209
торцевой ввод			
тангенциальный ввод	0,071	0,073	0,178
Статическое давление воздуха перед ЦВП исследовательским, P ^{изм} _{ст} , Па (мм.вод.ст)	565,8 (57,7)	588,4 (60,1)	637,4 (65)
Динамический перепад давления перед ЦВП исследовательским, $\Delta P_{дин}^{изм}$, Па (мм.вод.ст)	29,2 (2,98)	30,5 (3,11)	28,0 (2,86)
Расход газа на ЦВП исследовательский, V _г ·10 ³ , м ³ /ч (м ³ /с)	3,100 (0,86)	3,350 (0,93)	2,600 (0,72)
Расход воздуха на ЦВП исследовательский, V _в ·10 ³ , м ³ /ч	33,502	34,225	33,106
Нагрузка исследовательского ЦВП, Гкал/ч	25	27	21
Статическое давление воздуха на втором ЦВП P ^{изм} _{ст} , Па (мм.вод.ст)	568,8 (58)	588,4 (60)	637,4 (65)
Разрежение в топке котла, S, Па (мм.вод.ст)	-22,55 (-2,3)	-25,49 (-2,6)	-24,51 (-2,5)

Таблица 3.5 - Характеристика приборов измерения

Наименование прибора	Параметр замера	Характеристика прибора
1. Барометр-анероид метеорологический БАММ-1	Атмосферное давление	Предел основной допускаемой погрешности измерений, не более $\pm 0,2$ кПа (1,5 мм.вод.ст) Цена деления шкалы, 01 кПа
2. U-образный манометр	Ориентация потока в пространстве	Диапазон измерения -250...+250 мм; цена деления 1 мм.вод.ст; абсолютная погрешность измерения $\pm 0,5$ мм.
3. Лимб	Направление скорости потока, угол φ	Диапазон измерения $0...360^{\circ}$; цена деления 1° ; абсолютная погрешность измерения $\pm 0,5^{\circ}$.
4. Манометр дифференциальный цифровой ДМЦ-01М (исполнение А)	Статическое давление $P_{ст}$, мм.вод.ст. Динамическое давление $\Delta P_{дин}$, мм.вод.ст.	Диапазон измерений, Па (мм.вод.ст) $0...2000$ ($0...200$) Предел основной допускаемой абсолютной погрешности измерений, не более $\pm(1+0,005\Delta P)$ Па или $\pm(0,1+0,005\Delta P)$ мм.вод.ст. Предел допускаемой вариации, % от предела основной допускаемой абсолютной погрешности, не более 50 %
5. Термометр контактный цифровой ТК-5.09	Температура холодного воздуха на горение $t_{возд}$	Диапазон измерения температуры минус $40...+200$, °С Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности, $\pm 0,5$ °С в диапазоне от минус 40 до +50 °С. Пределы допускаемой основной относительной погрешности, $\pm 0,5$ °С в диапазоне свыше +50 °С. Предел допускаемой дополнительной погрешности измерения температуры, вызванной изменением температуры окружающей среды на каждые 10 °С от нормальной $(20\pm 5)^{\circ}\text{C}$...0,5 основной погрешности
6. Термопара ТВР А1	Температура потока $t_{пот}$	диапазон измерения $0...+2500$ °С; значение единицы младшего разряда $0,1$ °С, при температурах выше 1000 °С значение единицы младшего разряда равно 1 °С; абсолютная погрешность измерения $\pm 0,005 \cdot t$, °С.

Продолжение таблицы 3.5

Наименование прибора	Параметр за-мера	Характеристика прибора		
7. Измеритель двухканальный 2ТРМ0А	Значения температуры $t_{\text{пот}}$ на экране	Предел основной допускаемой приведенной погрешности при измерении термопарой 0,5%		
8. Газоанализатор КГА-8М	Концентрация кислорода, оксидов азота и углерода	Кислород O_2 диапазон измерения разрешающая способность допустимая основная погрешность	0...5% 0,1% +/-0,2% абс.	5...21% 0,1% +/-0,4% абс.
		Оксид азота NO диапазон измерения разрешающая способность	0...250 ppm +/- 25 ppm	>250 ppm +/- 10% отн. от измеряемой величины
		Диоксид азота NO_2 диапазон измерения разрешающая способность	0...30 ppm +/- 15% отн. от измеряемой величины	>30 ppm +/- 15% отн. от измеряемой величины
		Оксид углерода CO диапазон измерения разрешающая способность	0...300 ppm +/- 30 ppm	>300 ppm +/- 10% отн. от измеряемой величины

3.2 Обработка экспериментальных данных. Оценка погрешности измерений

При исследованиях процессов формирования закрученного в ЦВП потока замерам подлежали следующие характеристики этого потока:

- температура закрученного потока, $t_{\text{изм}}$, °С;
- температура воздуха, $t_{\text{в.изм}}$, °С;
- статическое $P_{\text{ст}}^{\text{изм}}$ и динамическое $\Delta P_{\text{дин}}^{\text{изм}}$ давления;
- направление вектора скорости закрученного потока – угол φ ;
- содержание кислорода O_2 (газовый анализ потока при горения).

Исследованиям внутренней структуры закрученного потока предшествовала термическая и аэродинамическая тарировки пневмометрического зонда. Тарировка зонда производилась по методике [41]. Целью термической тарировки являлось получение зависимости истинной температуры закрученного потока t от измеренной температуры потока $t_{\text{изм}}$. Целью аэродинамического тарирования является определение значений тарировочных коэффициентов $K_{\text{тар}}^{\text{ст}} = f(W)$ и $K_{\text{тар}}^{\text{дин}} = f(W)$ для ожидаемого диапазона измеряемых скоростей. При этом истинные (эталонные) значения скорости $W_{\text{эт}}$ и статического давления $P_{\text{ст}}^{\text{эт}}$ измеряются с помощью эталонной трубки Прандтля, а искомые тарировочные коэффициенты находятся из выражений:

$$K_{\text{тар}}^{\text{ст}} = \frac{P_{\text{ст}}^{\text{изм}} - P_{\text{ст}}^{\text{эт}}}{0,5 \cdot \rho \cdot W_{\text{эт}}^2}, \quad (3.1)$$

$$K_{\text{тар}}^{\text{дин}} = \frac{\Delta P_{\text{дин}}^{\text{изм}}}{0,5 \cdot \rho \cdot W_{\text{эт}}^2}, \quad (3.2)$$

где $P_{\text{ст}}^{\text{изм}}$ – статическое давление, измеренное зондом, Па;

$P_{\text{ст}}^{\text{эт}}$ – статическое давление, измеренное эталонной трубкой Прандтля, Па;

$\rho_{\text{п}}$ - плотность закрученного потока в данной точке сечения при истинной температуре среды t , кг/м³;

$W_{\text{эт}}$ – скорость, измеренная эталонной трубкой Прандтля, м/с;

$\Delta P_{\text{дин}}^{\text{изм}}$ – динамическое давление, измеренное зондом, Па.

Плотность закрученного потока $\rho_{\text{п}}$, кг/м³, рассчитывается по формуле:

$$\rho_{\text{п}} = 1,293 \cdot \frac{273}{t + 273}, \quad (3.3)$$

где 1,293 – плотность воздуха при нормальных физических условиях, кг/м³;

t – температура закрученного потока, °С.

Для качественной оценки характера распределения температуры в КС ЦВП температура потока при горении природного газа t , °С, рассчитывалась по результатам термической тарировки, с учётом поправки к измеренным показаниям температуры $t_{\text{изм}}$ по формуле:

$$t = 8 \cdot 10^{-7} \cdot t_{\text{изм}} - 0,021 \cdot t_{\text{изм}}^2 + 2,7494 \cdot t_{\text{изм}} - 21,006, \quad (3.4)$$

где $t_{\text{изм}}$ – измеренные показания температуры закрученного потока, °С.

Плотность закрученного потока $\rho_{\text{п}}$ при горения природного газа в ЦВП определяется по формуле (3.3), при этом t рассчитывается по формуле (3.4), а температура “горячего” закрученного потока $t_{\text{изм}}$ замеряется термопарой ТВР А1. Плотность закрученного “холодного” потока $\rho_{\text{п}}$ без горения природного газа в ЦВП определяется по формуле (3.3), при этом $t = t_{\text{в.изм}}$. Температура воздуха закрученного потока $t_{\text{в.изм}}$ замерялась термометром контактным цифровым ТК-5.09.

По результатам тарировки были получены тарировочные коэффициенты для исследований на котле КВГМ-100-150 ст.№5:

$$K_{\text{тар}}^{\text{ст}} = 0,0037 \cdot W + 0,0894, \quad (3.5)$$

$$K_{\text{тар}}^{\text{дин}} = -0,00312 \cdot W - 0,1028, \quad (3.6)$$

где W – вектор скорости закрученного потока, м/с.

Вектор скорости закрученного потока W , м/с, вычисляется по формуле:

$$W = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P_{\text{дин}}^{\text{изм}}}{\rho_{\text{п}}}}, \quad (3.7)$$

Произведена обработка результатов замеров с целью вычисления параметров закрученного потока. Статическое давление $P_{ст}$, Па, вычисляют по формуле:

$$P_{ст} = P_{ст}^{изм} + K_{тар}^{ст} \cdot \frac{\rho_{п} \cdot W^2}{2}, \quad (3.8)$$

где $P_{ст}^{изм}$ - значение статического давления, измеренное зондом, Па;

$K_{тар}^{ст}$ - статический тарировочный коэффициент зонда, рассчитанный по формуле 3.5;

W - вектор скорости закрученного потока, м/с.

Динамическое давление $\Delta P_{дин}$, Па, вычисляют по формуле:

$$\Delta P_{дин} = \Delta P_{дин}^{изм} + K_{тар}^{дин} \cdot \frac{\rho_{п} \cdot W^2}{2}, \quad (3.9)$$

где $\Delta P_{дин}^{изм}$ - значение динамического давления, измеренное зондом, Па;

$K_{тар}^{дин}$ - динамический тарировочный коэффициент зонда, рассчитанный по формуле 3.6.

Полное давление $P_{пол}$, Па, вычисляют по формуле:

$$P_{пол} = P_{ст} + \Delta P_{дин}, \quad (3.10)$$

Тангенциальная W_{φ} , м/с, и осевая W_x , м/с, составляющие вектора полной скорости потока W , м/с, рассчитываются по формулам:

$$W_{\varphi} = W \cdot \cos \varphi, \quad (3.11)$$

$$W_x = W \cdot \sin \varphi, \quad (3.12)$$

где φ - направление вектора скорости относительно горизонтальной плоскости, град.

Угловая скорость ω , 1/с, вычисляется по формуле:

$$\omega = \frac{W_{\varphi}}{R_i}, \quad (3.13)$$

где R_i - текущий радиус, на котором выполняются замеры в экспериментальном сечении, м.

Циркуляция скорости Γ , м²/с, рассчитывается по формуле:

$$\Gamma = W_{\varphi} \cdot R_i, \quad (3.14)$$

Оценка погрешности измерений рассчитывалась с учетом [57]. После проведения эксперимента была проведена оценка величины неисключенной систематической погрешности измерения температур, напоров, давлений, результаты которой представлены в таблице 3.6. Результаты расчёта оценки погрешностей косвенных измерений представлены в таблице 3.7.

Максимальная загромождённость зондом КС ЦВП котла КВГМ-100-150 составила 1,17 % площади поперечного сечения КС ЦВП (или 0,8 % объёма КС ЦВП). В качестве базовых значений в таблицах 3.6 и 3.7 использованы значения параметров, полученных при выполнении исследований. Таким образом, оценка погрешностей измерений свидетельствует о достаточной точности экспериментальных данных.

Таблица 3.6 - Оценка погрешности прямых измерений по паспортным данным измерительных приборов

Параметр	Базовое значение	Характеристики измерительного прибора	Максимальная погрешность измерения		Доля замеров в соответствующем диапазоне погрешностей
			Предел измерения	Абсолютная, Δ	
Температура воздуха $t_{в.изм}, ^\circ\text{C}$	12	-40...+200 $^\circ\text{C}$	$\pm 0,5$ $^\circ\text{C}$	4%	1,0
Температура закрученного потока $t_{изм}, ^\circ\text{C}$	230...1413	0...2500 $^\circ\text{C}$	$0,005 \cdot t$ $^\circ\text{C}$	$\pm 0,5\%$	1,0
Температура закрученного потока с учетом погрешности 2ТРМОА	230...1413	Кл 0,5	$\pm 1,15 \dots \pm 7$ $^\circ\text{C}$	$\pm 0,5\%$	1,0
Статическое давление $P_{ст}$, мм.вод.ст.	0,9...2,35 2,35...63	0...200	$\pm 0,19$ $\pm 0,41$	13%...5% 5%...0,7%	0,15 0,85
$\Delta P_{дин}^{изм}$, мм.вод.ст	1...73				
	1...2,4	0...200	$\pm 0,1$	11,7...4,9%	0,1
	2,4...73	0...200	$\pm 0,46$	4,9...0,6%	0,9
Угол φ , град	0...7	0...360	$\pm 0,5$	>5%	0,07
	7...172	0...360	$\pm 0,5$	$\pm 0,3\%$	0,93
Давление атмосферное	738...745 мм.рт.ст 98,39кПа... ...99,323кПа	80000-106000 Па	± 200 Па	0,2%	1,0
Содержание кислорода, O_2 , %	1,...4,9 5...21	0...5% 5...21%	$\pm 0,4\%$ $\pm 0,2\%$	7,5...23% 0,9...4,15%	0,15 0,85
Радиус, R, м	0,020...0,900	0...3	$\pm 0,5$ мм	2,6...0,1%	1,0
Длина воздуховода, D, м	1	0...3	$\pm 0,5$ мм	0,1%	1,0
Ширина воздуховода, Ш, м	1,38	0...3	$\pm 0,5$ мм	0,04%	1,0

Таблица 3.7 - Оценка погрешностей косвенных измерений

Наименование аргумента y_i	Аргументы y_i	Формула определяющей функции	Базовое значение аргумента	Формула суммирования погрешностей	Погрешность	
					Абсолютная, Δy_i	Относительная, $\delta(y_i)$, %
Температура закрученного потока	$t_{изм}$, °C	прямое измерение	93... ...1010	По данным таблицы 3.6	±5	0,5
			1010... ...1412		±7	0,5
Температура потока	T , °K	$T = t_{изм} + 273$	366... ...1283 1283... ...1685	$\Delta T = \Delta t$	±5 ±7	±0,4 ±0,42
Плотность закрученного потока	$\rho_{п}$, кг/м ³	$\rho = 1,293 \cdot \frac{273}{T}$	0,3...1,25	$\delta(\rho_n) = \delta(t_{изм})$	±0,005	±0,42
Динамическое давление	$\Delta P_{дин}$, мм.вод.ст	прямое измерение	1 2,4 73	По данным таблицы 3.6	±0,11 ±0,46	11,7 4,9 0,6
			x , Па·м ³ /кг		$x = \Delta P_{дин} / \rho_{п}$	89 8,07 3,73
Скорость закрученного потока	W , м/с	$W = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P_{дин}}{\rho_{п}}}$	31,1 6,46 9,48	$\delta(W) = 0,5 \cdot \delta(x)$	±0,09 ±0,16 ±0,52	5,85 2,46 0,365
sin φ	y_1	$y_1 = \cos \varphi \cdot \Delta \varphi$	0...172 29,7 127 130	По данным таблицы 3.6	±0,43 ±0,32 ±0,3	0,86 -0,4 -0,39
Тангенциальная составляющая вектора скорости	W_{φ} , м/с	$W_{\varphi} = W \cdot \cos \varphi$	0...29 27 4,1 5,7	$\delta(W_{\varphi}) = \sqrt{(\delta(W))^2 + (\delta(y_1))^2}$	±1,7 ±0,1 ±0,03	6,6 2,62 0,51
cos φ	y_2	$y_2 = \sin \varphi \cdot \Delta \varphi$	0...172 29,7 130	По данным таблицы 3.6	±0,25 ±0,38	0,5 0,49
Осевая составляющая вектора скорости	W_x , м/с	$W_x = W \cdot \sin \varphi$	3...38 15,4 4,95 7,57	$\delta(W_x) = \sqrt{(\delta(W))^2 + (\delta(y_2))^2}$	±0,9 ±0,13 ±0,05	6,1 2,71 0,61

Продолжение таблицы 3.7

Наименование аргумента y_i	Аргументы y_i	Формула определяющей функции	Базовое значение аргумента	Формула суммирования погрешностей	Погрешность	
					Абсолютная, Δy_i	Относительная, $\delta(y_i)$, %
Циркуляция скорости	Γ , м ² /с	$\Gamma = W_\varphi \cdot R_i$	13,5 0,3 0,4	$\delta(\Gamma) =$ $= \sqrt{(\delta(W_\varphi))^2 + (\delta(R_i))^2}$	$\pm 0,84$ $\pm 0,02$ $\pm 0,025$	6,61 8,87 6,75
Угловая скорость	ω , 1/с	$\omega = W_\varphi / R_i$	54 59 81	$\delta(\omega) =$ $= \sqrt{(\delta(W_\varphi))^2 + (\delta(R_i))^2}$	$\pm 3,35$ $\pm 4,7$ $\pm 5,12$	6,61 8,87 6,75
Температура воздуха	$t_{в.изм}$, °С	прямое измерение	12	По данным таблицы 3.6	$\pm 0,43$	4,3
Температура воздуха	T_B , °К	$T_B = t_{в.изм} + 273$	285	$\Delta T = \Delta t$	$\pm 0,2$	0,2
Плотность воздуха	ρ_B , кг/м ³	$\rho_B =$ $= 1,293 \cdot \frac{273}{T_B}$	1,24	$\delta(\rho_B) = \delta(t_{в.изм})$	$\pm 0,55$	$\pm 0,42$
Скорость воздуха в воздуховоде	v_B , м/с	$v_B =$ $= \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P_{дин}}{\rho_B}}$	10,53	$\delta(v_B) = 0,5 \cdot \delta(x_1)$	$\pm 0,2$	1,9
	x_1 , Па·м ³ /кг	$x_1 = \Delta H_{дин} / \rho_B$	55,4	$\delta(v_B) =$ $= \sqrt{(\delta(\Delta P_{дин}))^2 + (\delta(\rho_B))^2}$	$\pm 1,18$	2,18
Площадь поперечного сечения воздуховода	F , м ²	$F = D \cdot Ш$	1,38	$\delta(F) =$ $= \sqrt{(\delta(D))^2 + (\delta(Ш))^2}$	$\pm 0,001$	0,1
Расход воздуха в воздуховоде	V_B , м ³ /с	$V_B = v_B \cdot F$	14,53	$\delta(V_B) =$ $= \sqrt{(\delta(v_B))^2 + (\delta(F))^2}$	$\pm 0,27$	1,9

3.3 Численное моделирование процессов горения в ЦВП

Параллельно с исследованиями производилось моделирование процессов вихревого горения газа на основе твёрдотельной модели ЦВП котлов БКЗ-120-100, ПТВМ-100 и КВГМ-100. Использовалась программа Fluent, предназначенная

для моделирования течения жидкостей и газов с учётом турбулентности, теплообмена и химических реакций.

Математическая модель создавалась в четыре этапа: построение твердотельной модели; генерация сетки на основе построенной твердотельной модели; указание граничных условий работы и параметров решателя; расчёт.

Построение твердотельной модели выполнялось по чертежам реального ЦВП, но вносились изменения, позволяющие избавиться от очень острых углов, с целью построения качественной сетки и уменьшения количество ячеек. Твердотельная модель ЦВП котла КВГМ-100-150 представлена на рисунке 3.4.

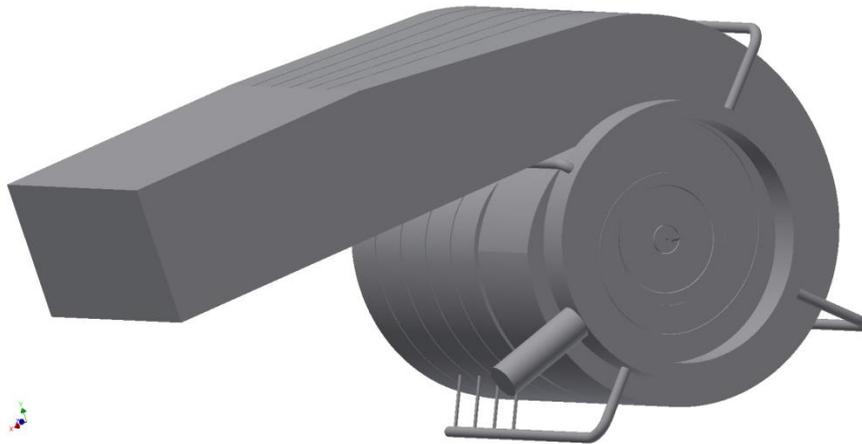


Рисунок 3.4 - Твердотельная модель ЦВП

Моделирование в программе Fluent производилось с использованием тетраэдрной сетки, сгенерированной на основе твердотельной модели. Для моделирования необходимо было соблюсти критерии качества сетки и её плотность в местах больших градиентов, которые можно определить на основе тестовых расчётов [48]. Для соблюдения качества сетки использовался критерий «Aspect ratio» - это отношение максимального и минимального расстояния между отрезками, соединяющими центры масс соседних ячеек сетки. Значение данного критерия должно быть больше 0,3. Существенные градиенты скорости и турбулентности,

требующие уплотнения сетки, расположены в зонах тангенциального и торцевого вводов газа, а так же в области завихрителя (рисунок 3.5).

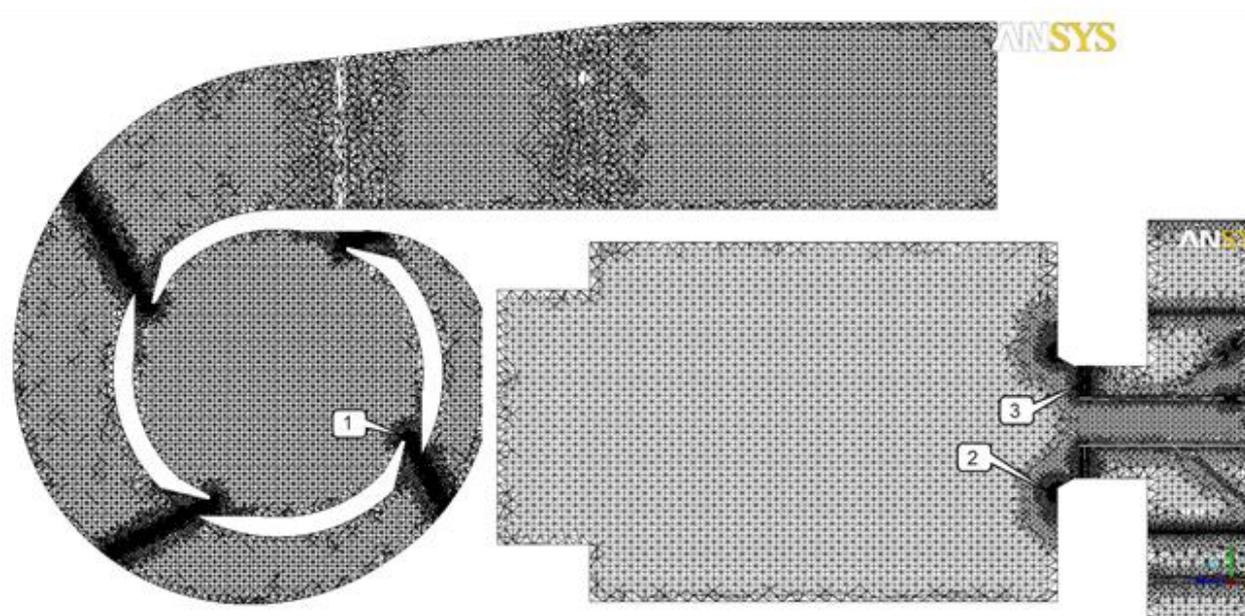


Рисунок 3.5 - Тетраэдерная сетка твердотельной модели циклонно-вихревого предтопка:

1 – тангенциальный ввод газа; 2 – торцевой ввод газа;

3 – завихритель

На основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса и энергии численно моделировалось трёхмерное турбулентное течение, которое в первую очередь определяет структуру факела [12]. Турбулентный перенос описывается RNG $k - \epsilon$ моделью. Выбор данной модели турбулентности обусловлен наибольшей устойчивостью в данной задаче по сравнению с $k - \epsilon$ моделью и моделью напряжений Рейнольдса. Эта модель турбулентности используется для расчётов связанных с вихрями, учитывая требовательность к ресурсам. Данная модель решалась численно методом конечных элементов с использованием пакета программ Fluent. Достоверность результатов моделирования турбулентного переноса сопоставлена с расчётным профилем тангенциальной составляющей скорости и с данными экспериментальных замеров при горячих продувках в ЦВП котла ПТВМ-100 с относительным пережимом равным 0,72. Предлагаемая модель показала хорошие результаты сходимости (рисунок 3.6).

Для расчёта горения применялась модель «Species Transport», позволяющая моделировать смешивание и транспортировку химических веществ путём решения уравнений сохранения, учитывающих процессы конвекции, диффузии и химические реакции по каждому компоненту.

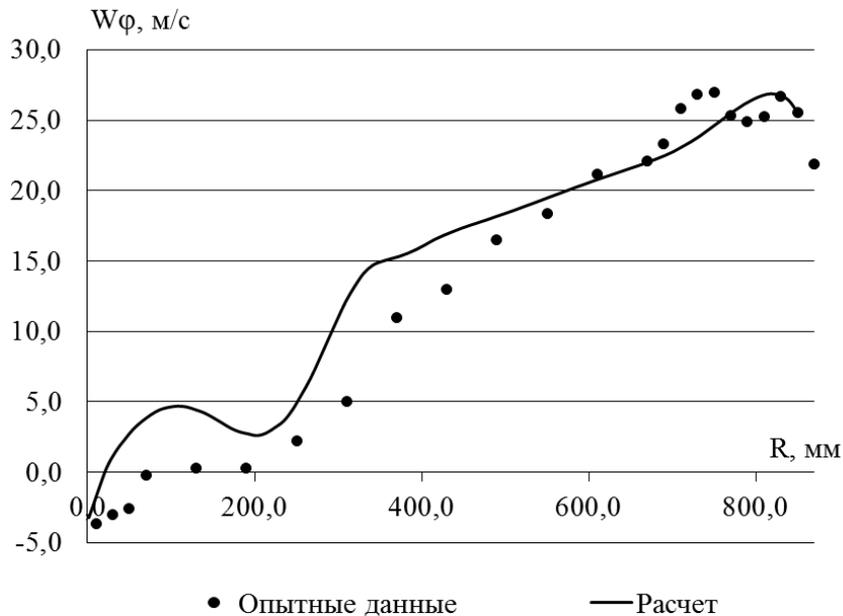


Рисунок 3.6 - Сопоставление изменения расчетного профиля тангенциальной скорости по радиусу камеры с опытными данными

Граничные условия, на основе которых выполнен расчёт, обусловлены параметрами воздуха и газа на вводе в КС ЦВП, представлены в таблицах 3.3 и 3.4.

Результаты расчёта математической модели циклонно-вихревого предтопка котла КВГМ-100-150 согласуются с экспериментальными данными, полученными при исследованиях в усовершенствованной конструкции ЦВП.

Глава 4. Распределение параметров закрученного потока в циклонно-вихревом предтопке

4.1 Анализ результатов исследований закрученного в ЦВП потока без горения

В ходе выполнения исследований [81] аэродинамики циклонно-вихревой камеры калибром 0,81 котла КВГМ-100-150 определялись гидродинамические характеристики при холодных (без сжигания природного газа, температура которого при выполнении исследований изменялась от 10 до 12 °С) и при горячих продувках (при сжигании природного газа в КС ЦВП).

Анализ результатов исследования “холодного” вихря в камере сгорания ЦВП показал закономерность изменения тангенциальной составляющей вектора скорости W_ϕ по радиусу КС, которая представлена графически на рисунке 4.1. Максимальная по значению тангенциальная составляющая вектора скорости разделяет между собой области квазитвёрдого и квазипотенциального вращения. Тангенциальная скорость в зоне квазипотенциального вращения возрастает от пристенной области камеры до максимальных значений, а затем убывает, в зоне квазитвёрдого вращения. Максимальные значения тангенциальной скорости наблюдаются после выходного окна – пережима (диафрагмы). Радиус пережима R_π для КС ЦВП котла КВГМ-100-150 составляет 645 мм. В первом сечении максимальная скорость W_ϕ , равная 23 м/с, отмечается на радиусе 420 мм, а максимальная W_ϕ , равная 22,2 м/с, во втором сечении на радиусе 520 мм. Максимальная по абсолютной величине W_ϕ наблюдается в центральной части закрученного потока, что указывает на наибольшую интенсивность вихревого течения потока именно в этой области. Отметим, что максимальные значения тангенциальной скорости занимают относительно протяжённую зону, которая и является переходной между квазипотенциальной и квазитвёрдой областями. Протяжённость этой области составила на исследуемой камере в среднем 200 мм. Относительный диаметр пережима $d_\pi = D_\pi/D$ влияет на расположение максимальных тангенциальных

скоростей в объеме камеры, как отмечается в работах [67], и с его уменьшением $W_{\phi_{\max}}$ смещается к оси камеры, тем самым увеличивая область квазипотенциального вращения. Камера сгорания котла КВГМ-100-150 имеет оптимальный параметр $d_{\pi}=D_{\pi}/D$, равный 0,72, что, как показали результаты [79], эксплуатационные показатели работы оборудования и данные исследований, позволяет создать интенсивный закрученный “холодный” поток в 63-73 % основного объема камеры предтопка. В остальной части объема, которая является областью квазитвёрдого вращения, интенсивность закрутки потока снижается и на оси камеры предтопка W_{ϕ} равна нулю.

Изменение профиля W_{ϕ} в камере сгорания ЦВП наглядно показывает, что формируемый четырехсторонним тангенциальным вводом воздуха “холодный” вихрь осесимметричен. Тангенциальная скорость с максимальных значений в исследуемых камерах убывает в зоне квазитвёрдого вращения тела. На оси КС ЦВП W_{ϕ} равна 0 м/с, что указывает на отсутствие вращения на оси вихря. Имеется незначительное несовпадение геометрической оси КС ЦВП и аэродинамической оси вращения закрученного потока. В КС ЦВП котла КВГМ-100-150 аэродинамическое отклонение вихря относительно геометрической оси не превышает 8,8%. Таким образом, четырехсторонний тангенциальный ввод воздуха способствует равномерному формированию осесимметричного вихря в КС ЦВП, поэтому последующие продувки при исследованиях проводились при пересечении оси ЦВП зондом только на 150 мм.

Результаты исследований “холодного” вихря показали характер изменения осевой составляющей вектора скорости, которая графически представлена на рисунке 4.2

Осевая составляющая вектора скорости в периферийной части потока существенно меньше W_{ϕ} . Наибольшие значения W_x отмечаются в ближайшем к завихрителю сечении, а так же в сечении, расположенном возле диафрагмы (перезжим), что находится в соответствии с имеющимися опытными данными других авторов [67]. Как видно на рисунке 4.2, результаты “холодных” продувок не показали наличие обратного осевого тока из топки котла в предтопок.

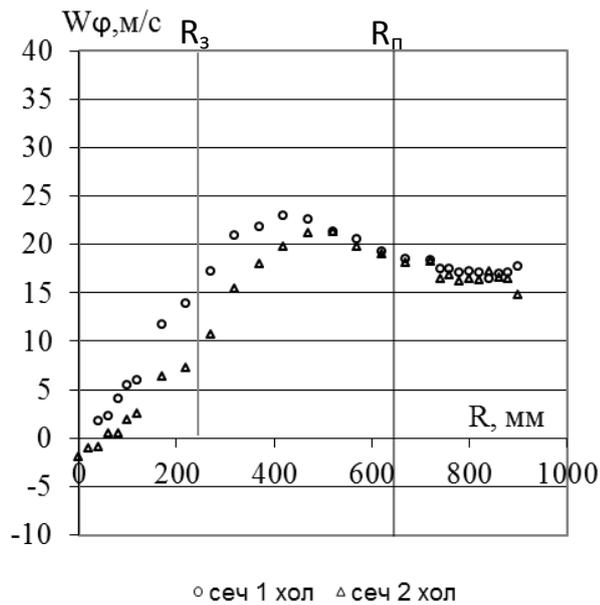


Рисунок 4.1 – Изменение W_φ тангенциальной скорости закрученного потока;
 R_3 – радиус завихрителя; R_n – радиус пережима

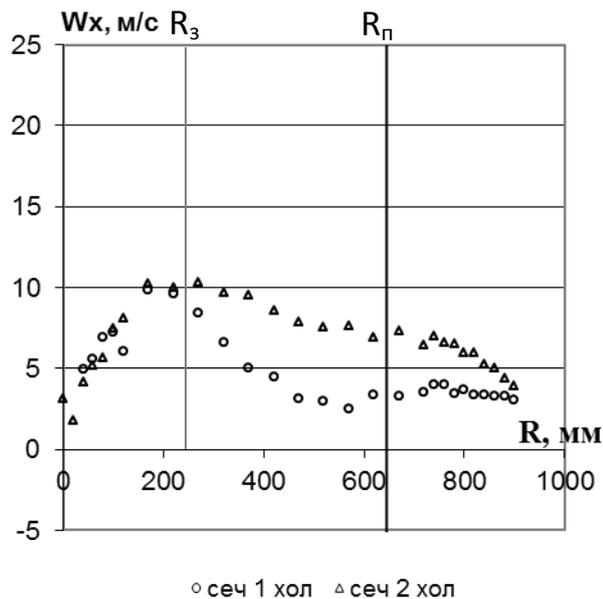


Рисунок 4.2 – Изменение W_x осевой скорости закрученного “холодного” потока;
 R_3 – радиус завихрителя; R_n – радиус пережима

Сопоставим значения W_φ и W_x по абсолютной величине. При относительном диаметре пережима $d_n 0,72$ осевая скорость в центре КС имеет максимальные значения и соизмерима с W_φ , а в пристенной зоне W_x меньше тангенциальной в 5-10 раз. В данной работе не приводятся опытные значения по радиальной составляющей W_r , так как исследователями в работе [67] отмечено, что наименьшая из

составляющих W_r , определенная пневмометрическим методом, по порядку значения сопоставима с возможной ошибкой измерений.

На рисунке 4.3 представлен график изменения угловой скорости в предтопке. Характер изменения ω согласуется с высказываниями о “твёрдом” вращении в приосевой части закрученного вихря. Область квазипотенциального вращения занимает большую часть объёма камеры.

Профили статического давления $P_{ст}$ закрученного холодного потока по радиусу циклонно-вихревой камеры представлены графически на рисунке 4.4. Наличие области отрицательных $P_{ст}$ в приосевой зоне (квazitвёрдой) не создает условия для возникновения в ней возвратных токов. Радиусы, где абсолютные значения статического давления равны нулю, указывают на наличие “разрывной” зоны, возле которой абсолютные значения W_ϕ максимальны. Таким образом, $P_{ст}$ равное нулю почти совпало с границей разделяющей квазипотенциальную и квазитвёрдую области холодного вихря, которая на рисунке 4.4 отмечена пунктирной линией. Значение статического давления $P_{ст}$ закрученного холодного потока, равное нулю, разделяет области избыточного давления и разрежения.

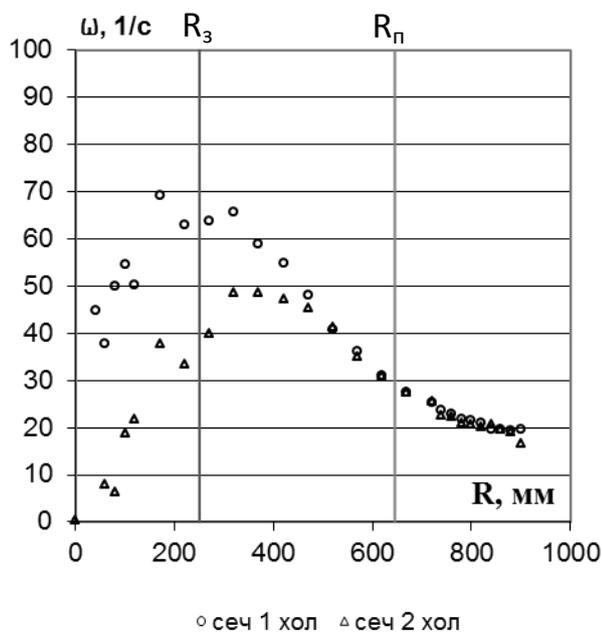


Рисунок 4.3 – Изменение угловой скорости закрученного “холодного” потока;

R_z – радиус завихрителя; R_p – радиус пережима

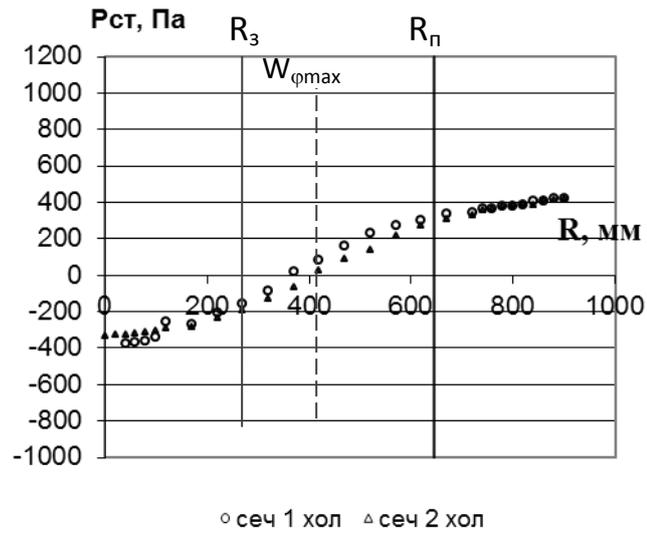


Рисунок 4.4 – Изменение $P_{ст}$ закрученного “холодного” потока;
 $R_з$ – радиус завихрителя; $R_п$ – радиус пережима

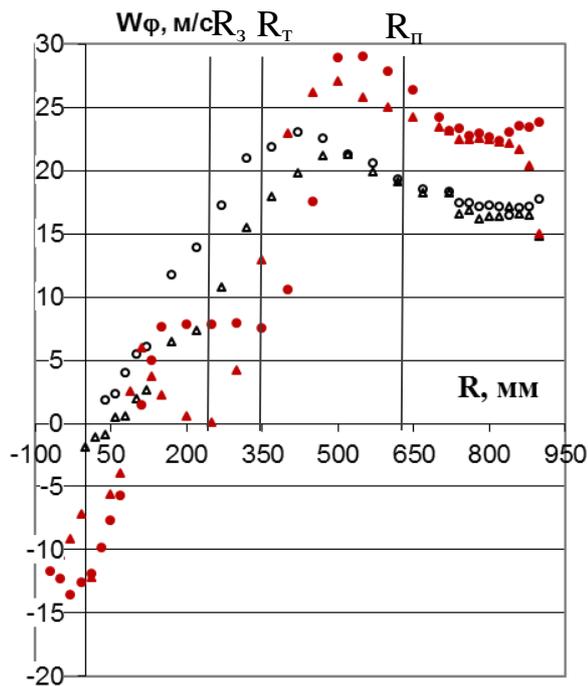
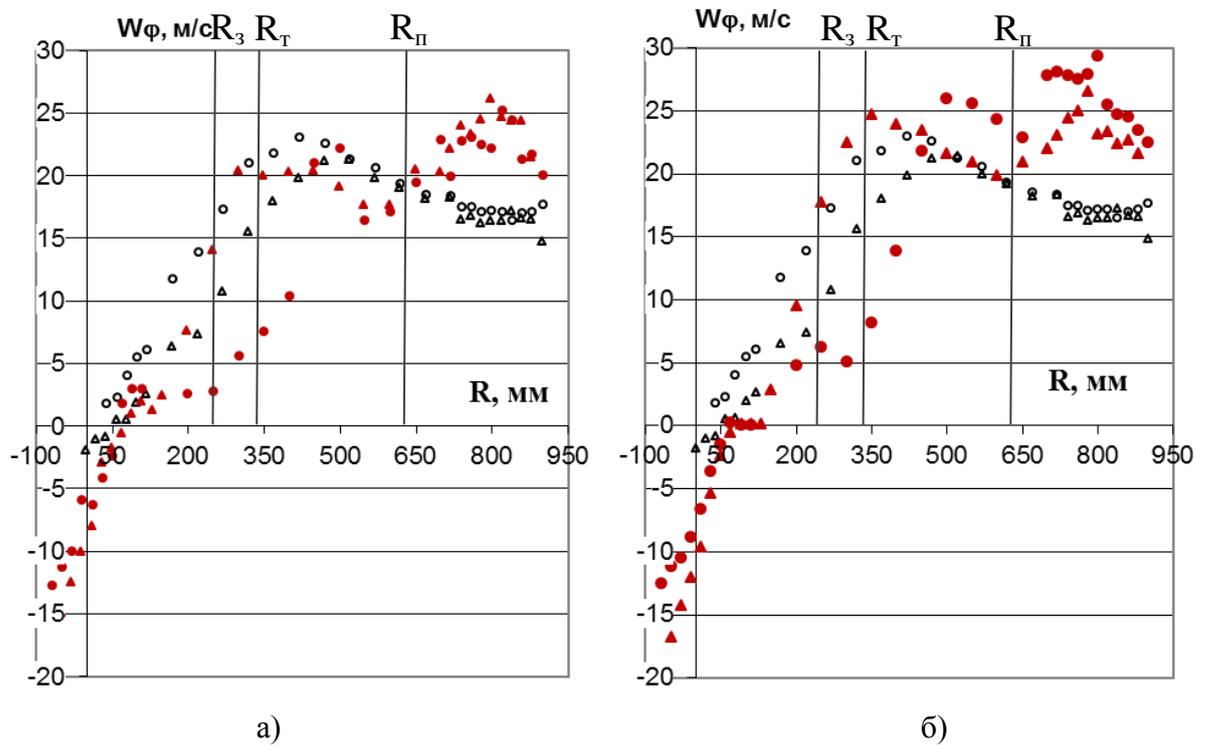
4.2 Анализ результатов исследований закрученного в ЦВП потока при сжигании природного газа

Под термином “горячий” вихрь в данной работе будем понимать вихрь, сформированный при горении природного газа в ЦВП. Температура “горячего” вихря при выполнении исследований изменялась от стенки КС до центра ЦВП от 110 до 1410 °С. В ходе исследований аэродинамики ЦВП определялись гидродинамические характеристики потока при холодных продувках и при сжигании природного газа на водогрейном котле мощностью 100 Гкал/ч. Водогрейный котёл КВГМ-100-150 имеет два ЦВП с калибром \bar{L} камеры сгорания, равным 0,81, и относительным диаметром пережима d_p , равным 0,72. Нагрузка котла при исследованиях составляла 50 Гкал/ч, а на исследуемом ЦВП поддерживалась равной ≈ 25 Гкал/ч (номинальная мощность ЦВП составляет 65 Гкал/ч). В таблице 3.4 представлены параметры газа и воздуха на вводе в ЦВП. Основные режимы исследований:

- режим 1 - подвода газа комбинированно - через тангенциальные, аксиальные и торцевые вводы газа, основной режим работы;
- режим 2 - подвода газа через тангенциальные вводы;
- режим 3 - подвода газа через аксиальные и торцевые вводы.

На рисунке 4.5 представлены графики изменения тангенциальной составляющей вектора скорости W_φ по радиусу камеры. Закрученный поток характеризуется возрастанием тангенциальной составляющей вектора скорости от пристенной области КС до $W_{\varphi_{\max}}$ и последующим снижением к оси камеры до значений скорости W_φ , равных нулю. Как видно из графиков, характерная особенность структуры закрученного потока имеет место при холодных продувках и сохраняется при горении газа. Несовпадение геометрической оси КС ЦВП и аэродинамической оси вращения закрученного потока при горении не превышает 7,7 % при первом режиме горения и 14,4 % при втором режиме горения газа. Четырёхсторонний тангенциальный ввод воздуха и газа способствует равномерному форми-

рованию осесимметричного вихря в КС ЦВП.



○ сеч 1 хол △ сеч 2 хол ● сеч 1 гор ▲ сеч 2 гор

Рисунок 4.5 – Изменение тангенциальной скорости закрученного потока:

а) режим 1; б) режим 2; в) режим 3; R_3 – радиус завихрителя; R_T – радиус торцевых сопел;

R_π – радиус пережима

Максимальная по величине тангенциальная составляющая вектора скорости разделяет между собой области квазитвёрдого и квазипотенциального вращения, но максимальные значения тангенциальной скорости горячего потока занимают менее протяжённую область в сравнении с холодным потоком. Протяжённость этой области при горении составила $\approx 50-150$ мм. На графиках ясно отмечаются зоны возрастания и убывания W_φ . Причем в квазипотенциальной области таких зон возрастания W_φ две - при режиме 1 и режиме 2. Первое возрастание скорости отмечается около стенки на радиусе ≈ 800 мм, а второе на радиусе равном ≈ 400 мм на первом режиме работы. Возрастание W_φ при режиме 2 происходит на радиусе 800 мм до ≈ 27 м/с и на радиусах 350 и 500 мм до ≈ 26 м/с. Изменение температуры потока в пристенной области, существенно влияет на изменение W_φ , с возрастанием температуры возрастает и тангенциальная скорость.

Результаты холодных продувок показали равномерность изменения профиля W_φ в квазипотенциальной и квазитвёрдой областях (см. рисунок 4.5). При горении профиль тангенциальной составляющей скорости имеет зоны деформации в квазипотенциальной и в квазитвёрдой областях, связанные с влиянием аксиального ввода воздуха, подвода газа на горение и непосредственно процессом формирования и развитием факела в предтопке. Эти условия оказывают влияние на изменение параметров закрученного потока.

Объёмное равенство расходов воздуха ($\frac{V_B^X}{V_B} \cdot 100\%$ не более 5,5 %) при горячих и холодных исследованиях на КВГМ-100-150 дает возможность проведения качественного и количественного анализа результатов исследований. Распределение газа в объёме КС ЦВП существенно влияет на формирование крутки потока. В первом сечении, расположенном на расстоянии 510 мм от торцевой стенки предтопка, профиль изменения W_φ горячего потока в квазитвёрдой области существенно отличается от изменения W_φ холодного потока. Максимальная разница между значениями W_φ холодного и горячего потока при первом режиме составляет 14,8 м/с на радиусе 300 мм и 14,2 м/с на радиусе 350 мм. Максимальная разница между значениями W_φ холодного и горячего потока при организации второго

режима достигает 16 м/с на радиусе 300 мм и 13,2 м/с на радиусе 350 мм. Значения W_ϕ горячего потока в квазитвёрдой области меньше значений W_ϕ холодного потока. Расположение первого венца торцевых сопел выполнено на радиусе 315 мм, а второго на радиусе 395 мм. Максимальная разница скоростей отмечается именно в области ввода газа через торцевые сопла. Таким образом, торцевой и осевой подвод газа формирует ядро горения, которое существенно влияет на перераспределение составляющих вектора скорости закрученного потока, уменьшая W_ϕ и увеличивая W_x . Это очень ярко демонстрирует третий режим горения, в котором подача газа в КС осуществлена только через аксиальные и торцевые сопла. Тангенциальная составляющая скорости, закрученного в квазипотенциальной зоне воздушного потока со значений 29 и 26,5 м/с на радиусе 500мм, начинает резко снижаться, что показано на рисунке 3.5 в. На расстоянии 350 мм от оси в первом сечении W_ϕ снижается до 7,8 м/с, а во втором сечении на радиусе 250 мм W_ϕ уже почти равна нулю. Аксиальный лопаточный завихритель влияет на крутку потока, так как значение скорости в первом сечении достигает W_ϕ равное 7,8 м/с.

Пики значений тангенциальной составляющей скорости в квазипотенциальной области вызваны активным процессом смешения и началом горения топливно-воздушной смеси. Экспериментальные сечения располагаются между тангенциальными газоздушными вводами, что и показано на рисунке 3.1. Таким образом, исследования наглядно отражают условия и качество смесеобразования воздуха и газа в объёме КС. При подводе газа аксиально и через торцевые сопла - режим 3, возрастание тангенциальной составляющей скорости W_ϕ аналогично профилю изменения W_ϕ холодного закрученного потока в квазипотенциальной области, так как процесс горения начинается на радиусе 400-450 мм, а температура закрученного потока изменяется незначительно от 60 до 200 °С, что показано на рисунке 4.6 в. Отметим, что максимальные значения тангенциальной составляющей скорости W_ϕ , практически совпадают с ростом значений температур на тех же радиусах, это наглядно показано на графиках, изображенных на рисунке 4.5 и 4.6., а так же подтверждается результатами математического моделирования,

см. рисунок 4.7 [19], где представлено распределение скорости, температуры и содержания кислорода потока в области тангенциального подвода газа и воздуха в ЦВП. Подаваемый в сопла газ, способствует не только развитию закрученного потока, но и интенсифицирует смесеобразование с тангенциально вводимым воздухом за счёт высоких скоростей (до 70 м/с при номинальных нагрузках) и началом процесса горения, увеличивающим скорость потока.

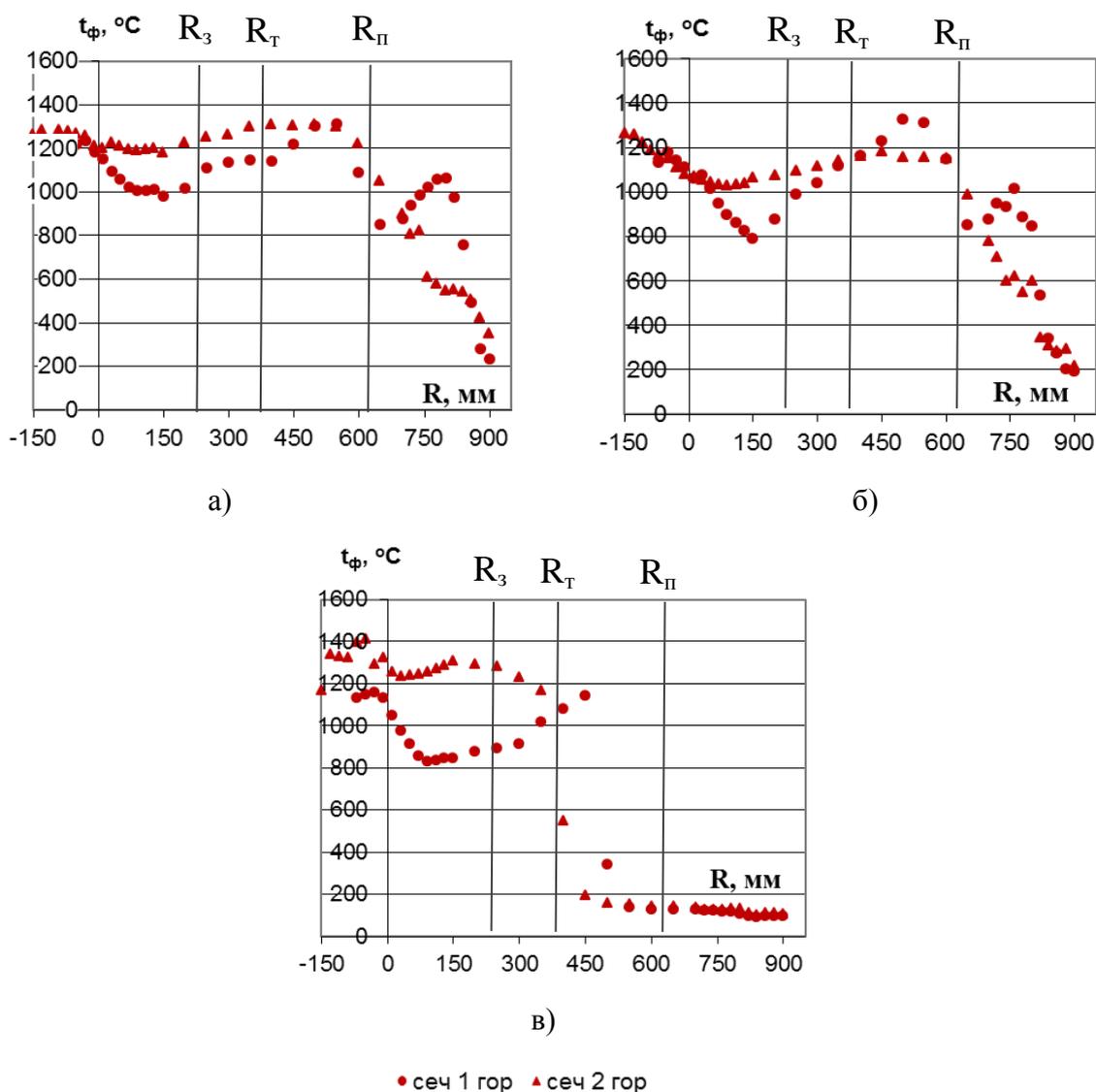


Рисунок 4.6 – Изменение температуры закрученного потока:

а) режим 1; б) режим 2; в) режим 3; R_3 – радиус завихрителя; R_T – радиус торцевых сопел; R_{Π} – радиус пережима

Конструктивное выполнение газовых сопел показано на рисунке 4.8. Угол наклона наконечника тангенциального газового сопла такой, что ось сопла направлена по касательной к окружности пережима ЦВП. Такое решение исключает возможность прогрева наружной части улитки за счёт теплообмена излучением, что наблюдалось в случае при расположении газовых сопел под тем же углом, что и воздушные сопла.

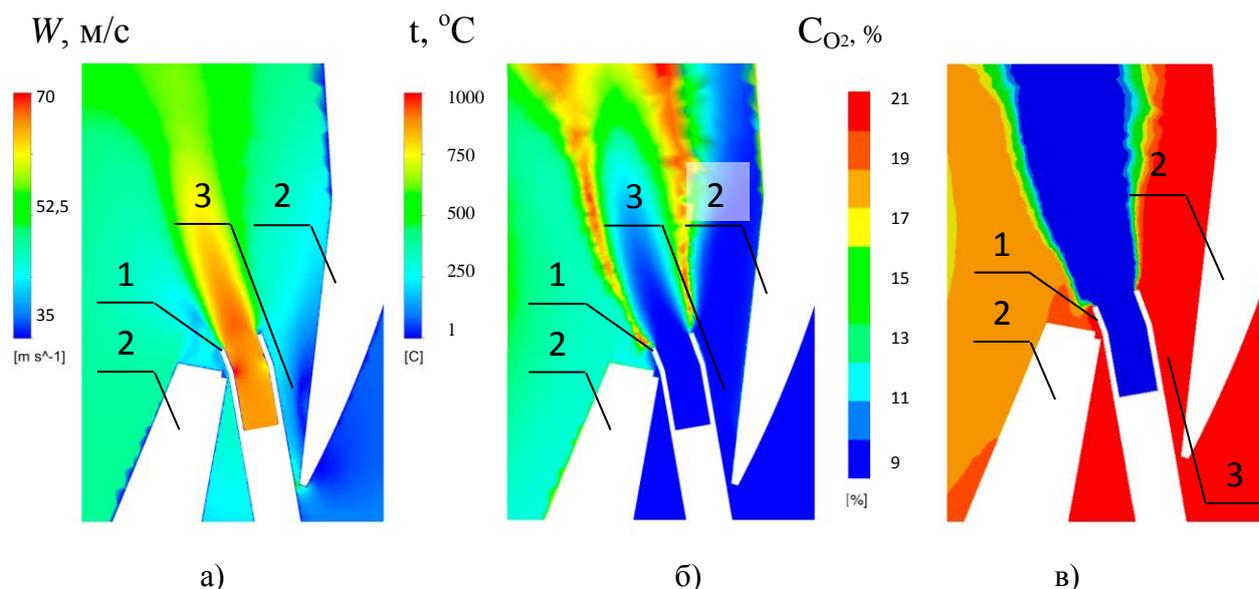


Рисунок 4.7 - Распределение скорости, температуры и содержания кислорода в области тангенциального подвода газа и воздуха в ЦВП: а) скорость; б) температура; в) содержание O_2 ;

1 – газовое сопло; 2 - обмуровка; 3 – воздушное сопло

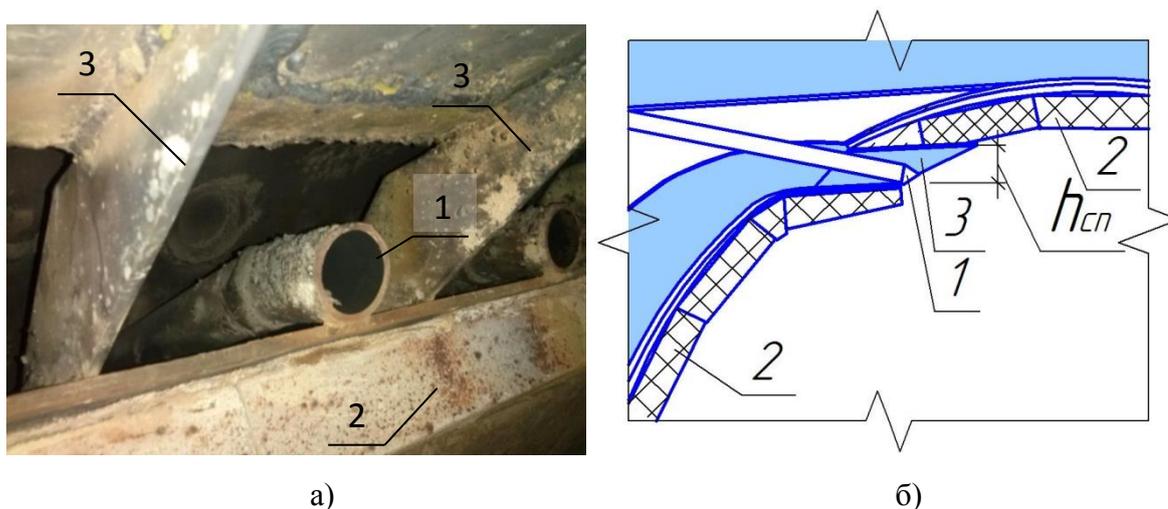


Рисунок 4.8 - Тангенциальный подвод газа и воздуха в ЦВП:

а) вид изнутри ЦВП; б) эскиз вида; 1 – газовое сопло; 2 - обмуровка;

3 – перегородка воздушного сопла

Области подъёма и снижения температур смешивающихся сред соответствуют зонам возрастания и убывания скоростей этих потоков и процессам горения, на что указывают не только значения температур потока и результаты математического моделирования, но и содержание кислорода, вступающего в реакцию горения, что отражено на рисунках 4.7 в, 4.9. Отметим, что при работе ЦВП на трёх разных режимах подвода газа видно влияние аксиального ввода воздуха через трубу, предназначенную для расположения многосопловой жидкотопливной форсунки (для сжигания резервного топлива мазута). Это наглядно показывают профили снижения температуры в первом сечении на радиусе от 0 до 150 мм, представленные на рисунки 4.6. По длине КС ЦВП так же отмечается снижение значений температур потока в осевой области из-за аксиально подаваемого через лопаточный завихритель воздуха, который в меньшей своей доле участвует в процессе горения именно в первом сечении, потому что содержание кислорода в этой области достаточно высокое и составляет 15-18 % (см. рисунок 4.9).

Содержание кислорода в сечениях, расположенных в центральной части КС, по данным замеров составляет 9-12 %, а ближе к радиусу, соответствующему радиусу пережима ($R_{п}$ равен 645 мм), снижается с 9 до 3% в зависимости от режима распределения газа в КС (см. рисунок 4.9).

Содержание кислорода и значение температуры “горячего” потока показывают области горения и области смешения воздуха и газа. Отметим, что при режиме 1 и режиме 2 по содержанию кислорода наиболее активная область полного горения в КС ЦВП котла КВГМ-100 наблюдается на радиусах от 200 до 600 мм. При организации в ЦВП котла режима 3, где подача газа осуществляется через осевые и торцевые вводы, содержание кислорода практически не снижается ниже 12 %, что указывает на высокие организованные избытки воздуха, но необходимые для ведения данного режима по газовому анализу уходящих газов за котлом, так как снижение избытка воздуха приводит к увеличению хим.недожога по содержанию СО в уходящих газах более 23 мг/м³.

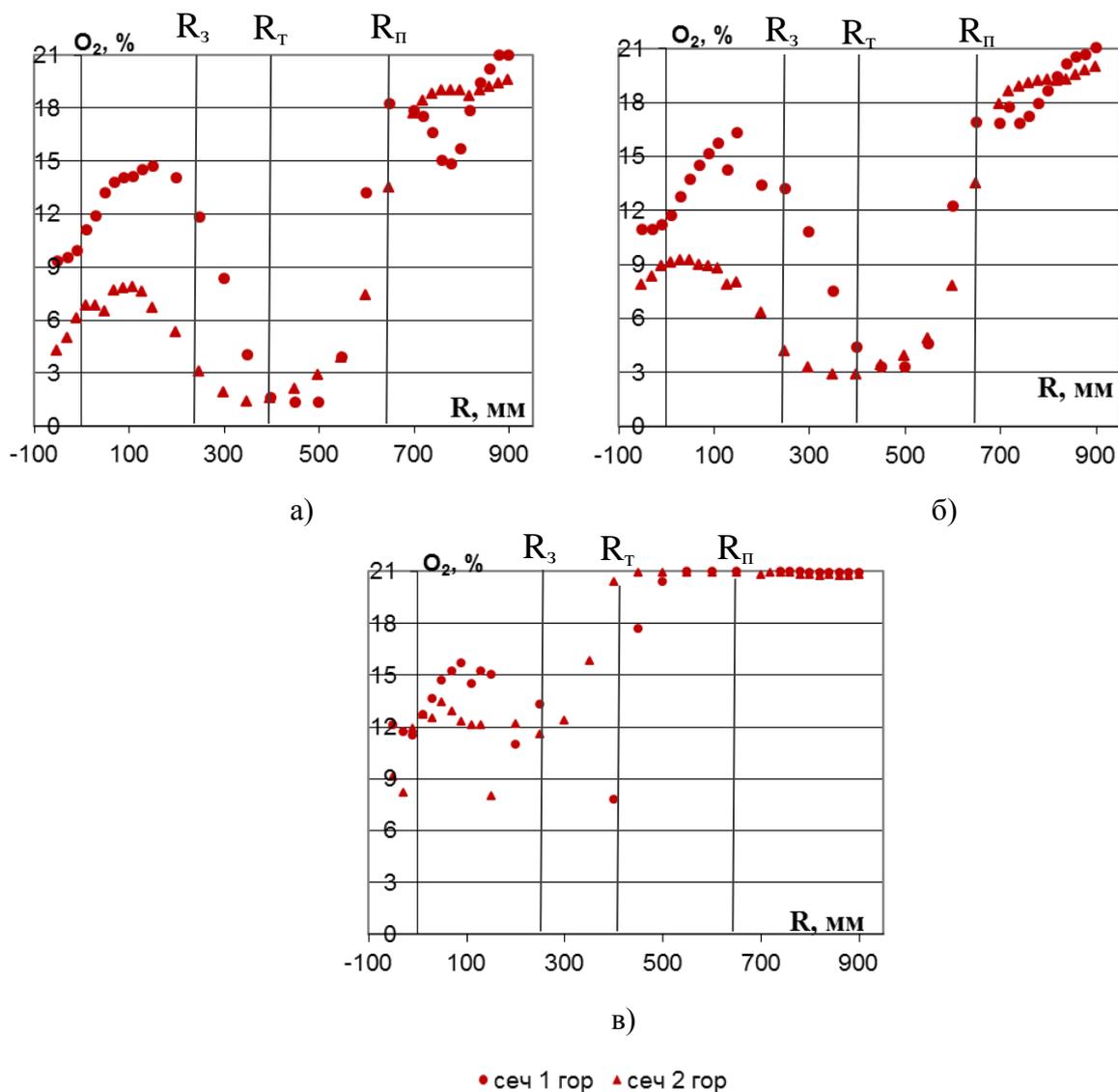


Рисунок 4.9 – Изменение содержания кислорода в закрученном потоке:

а) режим 1; б) режим 2; в) режим 3; R_3 – радиус завихрителя; R_T – радиус торцевых сопел;
 R_P – радиус пережима

Важной особенностью конструкции ЦВП является его воздушное охлаждение. Стенки камеры предтопка футерованы огнеупорным кирпичом марки ША, температура плавления которого $1600\text{ }^\circ\text{C}$. Исследования показали, что средняя температура воздушного потока около стенки камеры предтопка составляет:

- $190\text{--}350\text{ }^\circ\text{C}$ при режимах 1 и 2;
- $110\text{ }^\circ\text{C}$ при режиме 3.

Входя в камеру тангенциально, воздух нагревается от внутренней обмуровки камеры, одновременно охлаждая все элементы камеры сгорания независимо от места ввода газа в ЦВП, т. е. на трёх режимах.

Максимальные температуры горячего закрученного потока на трёх режимах по результатам исследований следующие:

- 1330 °С при режимах 1 и 2;
- 1410 °С при режиме 3.

Значимость поддержания в камере предтопка высокой температуры для успешного процесса горения газа, объясняется тем, что при температуре ниже 540 °С невозможно получить полное сгорание природного газа. Температуры горячего закрученного потока в ЦВП котла КВГМ-100-150 указывают на стабильное и качественное сгорание основной части топлива в предтопке. Решение, которое позволило этого достигнуть - усовершенствованный способ сжигания газа за счёт четырёхстороннего тангенциального подвода газа в КС ЦВП. Равномерностью распределения расхода газа по тангенциальным вводам создаются условия качественного перемешивания газовых сред, создающих замыкающееся кольцо в квазипотенциальной области вихря. Процесс горения в предтопке интенсифицирует массообмен и теплообмен между перемешивающимися горящими закрученными потоками (образующими замыкающееся кольцо), что подтверждается результатами расчёта математической модели, представленными на рисунке 4.10.

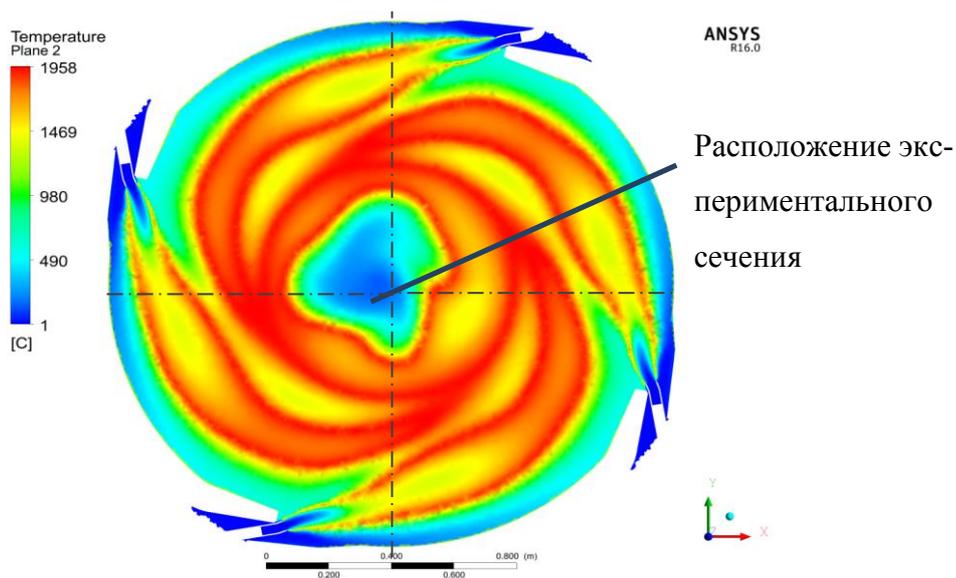


Рисунок 4.10 – Распределение температуры закрученного потока при четырёхстороннем тангенциальном вводе газа в предтопке

Характер осевых перемещений, закрученных в циклонно-вихревом предтопке потоков, представлен графически на рисунке 4.11. Скорость горячего потока при первом и втором режимах работы ЦВП, в направлении выхода из предтопка, увеличивается по мере возрастания его температуры. В пристенной области, где формируется закрученный тангенциальными вводами поток, осевые перемещения горячего и холодного потоков минимальны. Исследования при холодных и горячих продувках в КС ЦВП котла КВГМ-100-150 проводились при организации подвода практически одинакового расхода воздуха ($\frac{V_B^x}{V_{rB}} \cdot 100\%$ не превышала 5,5%). Средняя осевая скорость холодного потока W_x^{cp} составляла $\approx 3,5$ м/с. Сжигание газа в предтопке котла КВГМ-100-150 увеличивает скорость осевого смещения потока в пристенной зоне, но не значительно:

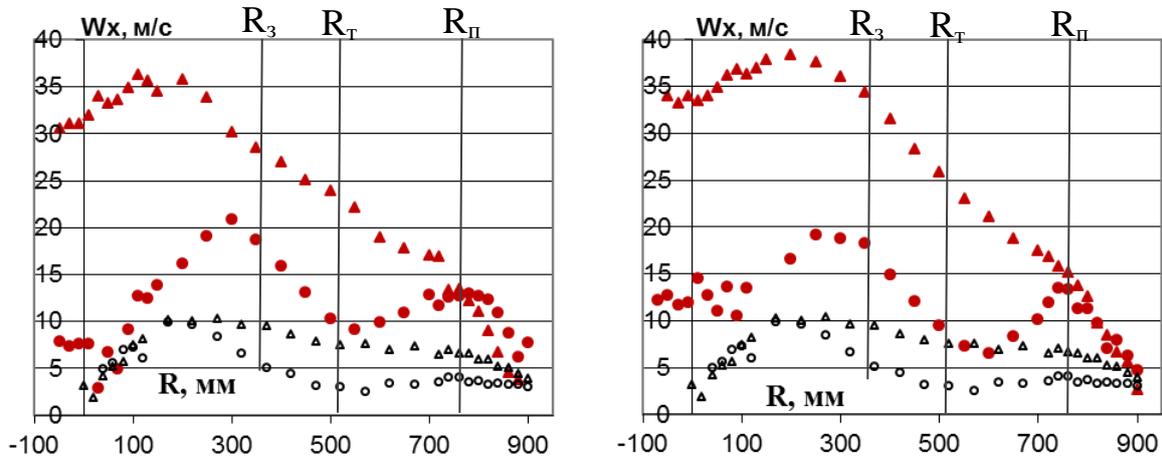
- при режиме 1 средняя W_x^{cp} горячего потока равна 5,55 м/с,
- при режиме 2 средняя W_x^{cp} горячего потока составляет 4,8 м/с
- при третьем режиме средняя W_x^{cp} равна 5,0 м/с.

Таким образом, осевая скорость “горячего” потока в пристенной области в среднем в 1,45 раза больше, чем W_x “холодного” потока.

Осевые перемещения “горячего” потока возрастают с увеличением его температуры и по мере продвижения потока к радиусу равному радиусу пережима. Горение в предтопке увеличивает степень расширения потока, который стремится выйти из предтопка в топку котла через пережим. Так как наибольшее возрастание температуры потока отмечается во втором сечении, то и скорость W_x увеличивается по мере продвижения потока от торцевой стенки камеры к пережиму (к выходу из предтопка). В сравнении со значениями W_x холодного потока горение способствует увеличению осевой скорости потока в квазитвёрдой области, а именно:

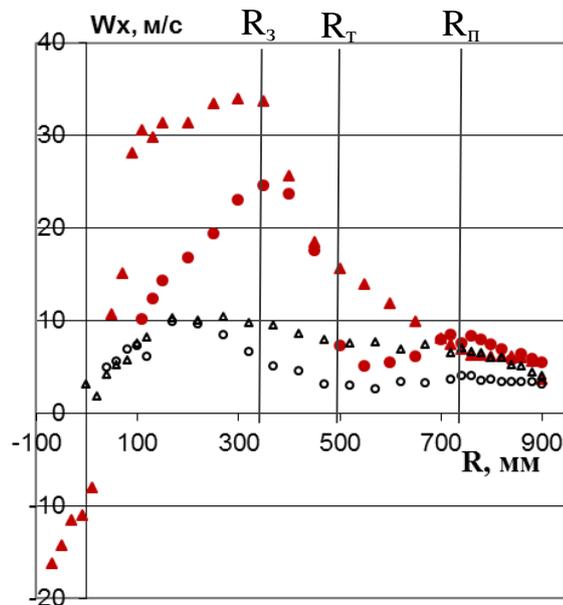
- в 2 раза в первом сечении и в 3,5-10 раз во втором сечении при первом режиме работы предтопка;
- в ≈ 2 раза в первом сечении и в 3,7-11 раз во втором сечении при втором режиме работы предтопка;

- в ≈ 3 раза в первом сечении и в 3,3-5 раза во втором сечении при третьем режиме работы предтопка.



а)

б)



в)

○ сеч 1 хол △ сеч 2 хол ● сеч 1 гор ▲ сеч 2 гор

Рисунок 4.11 – Изменение осевой скорости закрученного потока:

а) режим 1; б) режим 2; в) режим 3; R_3 – радиус завихрителя; R_T – радиус торцевых сопел;

R_P – радиус пережима

Ввод газа через аксиальные и торцевые сопла генерирует факел, который направлен прямо на выход из предтопка. Скорость горячего потока по мере приближения к выходу из него увеличивается в 3,5-5 раз. Это подтверждает график

изменения осевой составляющей вектора полной скорости, представленный на рисунке 4.11 в. Примечательно, что только при организации третьего режима подвода газа удалось создать осевую зону обратных токов из топки котла. Увеличение температуры потока приводит к повышению скорости на выходе из предтопка и последующему его резкому раскрытию в топке котла за счет сужающего выходного окна - пережима. Раскрытие потока может быть столь значительным, что происходит “прилипание” факела к экранным поверхностям. Такое развитие факела в топке котла способствует образованию отдулин, как результат перегрева стенки трубы, поэтому при третьем режиме необходимо следить за раскрытием факела после ЦВП, что регулируется давлением газа.

Смешение газа с воздухом при режиме 3 однозначно не свидетельствует о хорошем качестве смесеобразования. Горение при этом режиме охватывает область радиусом ≈ 300 мм. Содержание кислорода в процессе горения в первом сечении высокое и достигает 11-15,7 % (см. рисунок 4.9). Содержание кислорода во втором сечении по данным замеров так же существенное 11,6-13,6 %. Снижение расхода, подаваемого на горение воздуха, приводит к появлению хим.недожога за котлом, при этом средняя температура потока на выходе из предтопка составляет 1300-1410 °С (см. рисунок 4.6). Температура факела в топке котла превышает температуру факела в предтопке, и при возникновении обратного осевого тока возрастание температуры закрученного потока до 1410 °С связано именно с обратным током топочных газов. Область обратного тока создается при третьем режиме примерно с середины КС на расстоянии 900 мм от торцевой стенки, что видно на рисунках 4.11в и 3.1. Скорость потока, направленного в камеру предтопка из топки котла, достигает $\approx 14,4$ м/с.

Обратим внимание на соотношение абсолютных значений осевой и тангенциальной составляющих скорости. Осевая скорость W_x сопоставима и даже превышает по значениям W_ϕ в приосевой и осевой областях во втором сечении (сечение, расположенное ближе к пережиму). Как видно из рисунка 4.11, W_x соизмерима по значениям с W_ϕ (см. рисунок 4.5) в центральной части объёма предтопка (сечение 1), а в зоне выходного окна (сечение 2) в 1,2-1,8 раза превышает W_ϕ .

Третий режим работы ЦВП является преимущественно растопочным [96]. Этот режим позволяет обеспечить прогрев ЦВП и котла за 30 мин. Осуществляется работа ЦВП на растопочном режиме до 15 % нагрузки котла. Распределение газа на режиме 3 на нагрузках 15 % и более не позволяет эффективно использовать объем камеры ЦВП, так как заполнение камеры предтопка факелом составляет 20% от общего объема предтопка. Температура газо-воздушного потока от стенки до радиуса ≈ 550 мм практически постоянна и составляет $\approx 60-110$ °С. Рост нагрузки котла осуществляется увеличением расхода газа, подаваемого тангенциально – режим 1 и режим 2. Заполнение объёма камеры факелом при режиме 1 составляет 80%, а при режиме 2 составляет 65-70 %.

Величина тангенциальной скорости W_ϕ при горении, а следовательно и момент количества вращения, изменяются в сравнении с W_ϕ при “холодных” продувках. На рисунке 4.12 представлены графики изменения циркуляции скорости “холодного” и “горячего” закрученных потоков по радиусу камеры сгорания.

Из-за диссипации энергии циркуляция скорости является убывающей функцией. Понижение Γ происходит от стенки предтопка до оси, что наблюдается в “холодном” и “горячем” вихрях. При качественном сопоставлении количественных результатов исследований (расход воздуха при горении равен расходу воздуха при холодных продувках) циркуляция скорости в камере ЦВП котла КВГМ-100-150 при горении больше в квазипотенциальной области и меньше в квазитвёрдой области в сравнении с моментом количества движения “холодного” потока. Снижение Γ в квазитвёрдой области обусловлено влиянием процесса горения природного газа, вводимого через осевые и торцевые сопла.

Общий характер изменения статического давления холодного и горячего вихрей по радиусу сохраняется. Принципиальным отличием от изменения $P_{ст}$ холодного вихря является то, что при горении, при первом и втором режиме (основные режимы работы), почти не создаются приосевые области отрицательных давлений $P_{ст}$. Осевые перемещения закрученного горячего потока при этом направлены в топку котла (см. рисунок 4.11 а, б). Характер изменения $P_{ст}$ в осевой об-

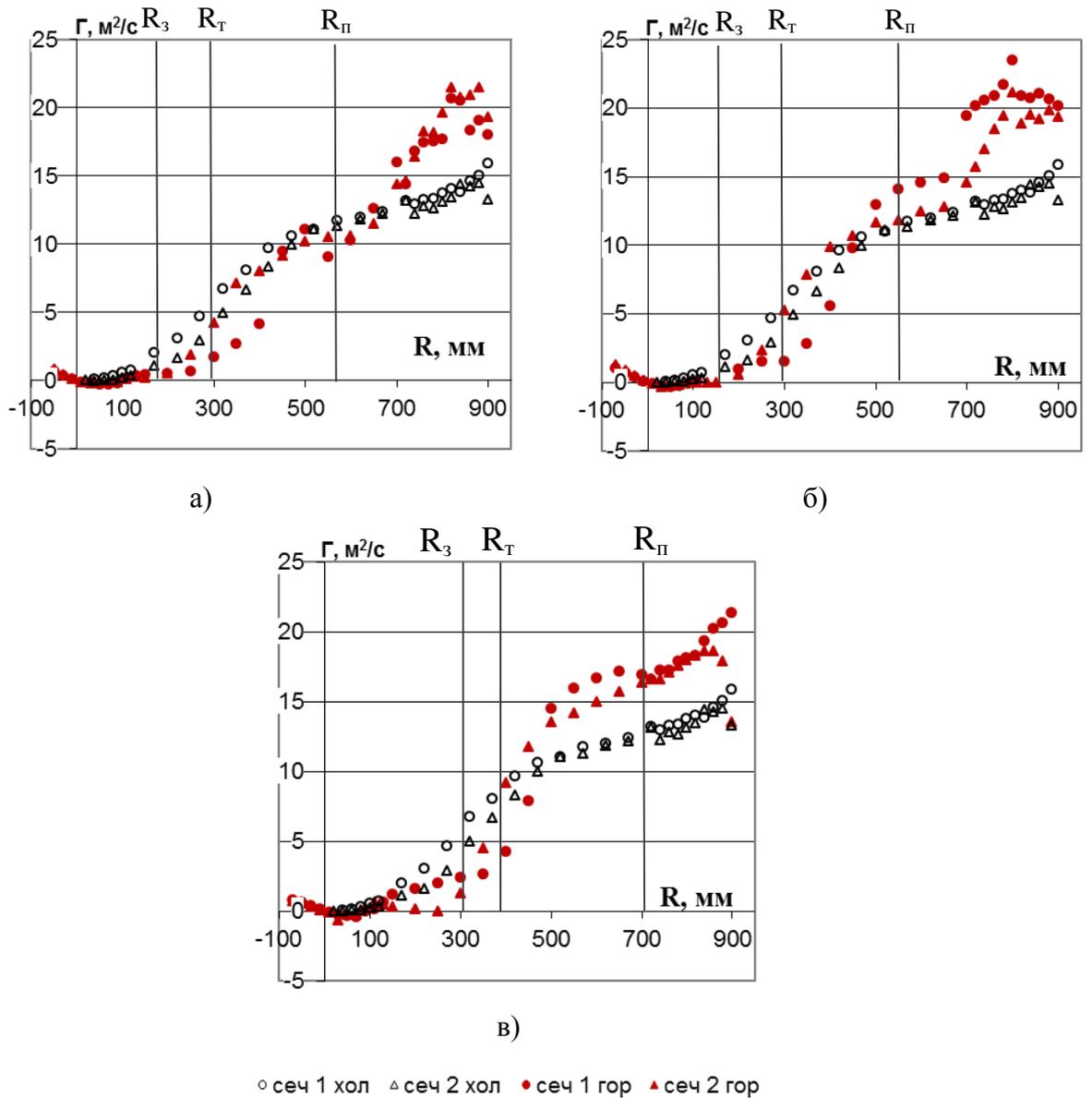
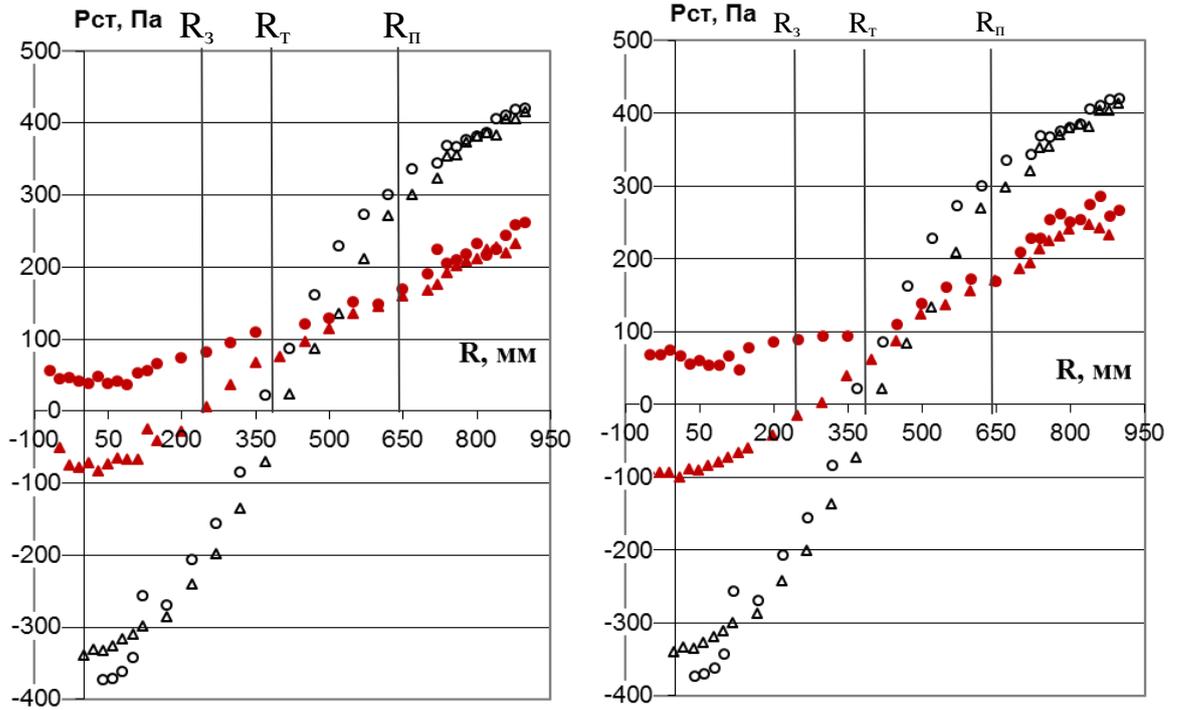


Рисунок 4.12 – Изменение циркуляции скорости закрученного потока:

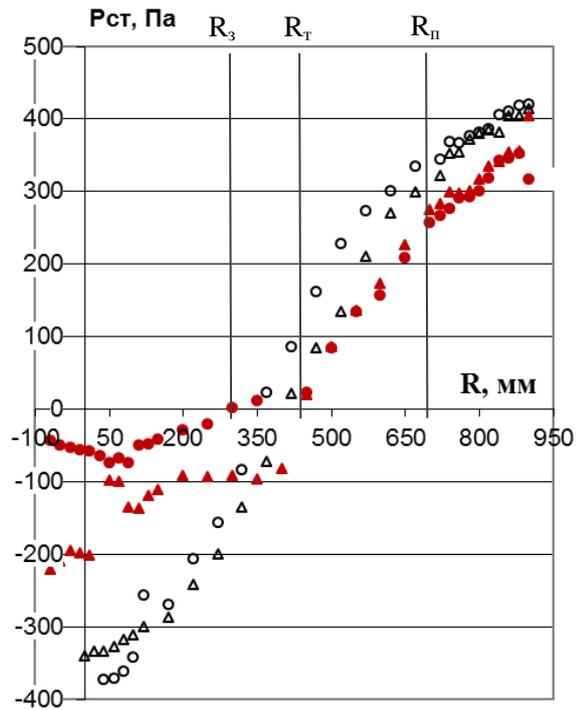
а) режим 1; б) режим 2; в) режим 3; R_3 – радиус завихрителя; R_T – радиус торцевых сопел; R_n – радиус пережима; R_y – радиус ядра закрученного потока

ласти предтопка при горении согласуется с возникновением обратных токов в камеру предтопка только при организации третьего режима работы ЦВП (растопочного), что подтверждается возрастанием температуры потока в этой области до 1400 °С (см. рисунок 4.6 в) за счёт обратного тока топочных газов, см. рисунок 4.11 в. Характер изменения статического давления холодного вихря указывает на формирование равномерного закрученного потока во всём объёме камеры сгорания предтопка [20]. На стабилизацию горячего закрученного потока в квазипо-



а)

б)



в)

○ сеч 1 хол △ сеч 2 хол ● сеч 1 гор ▲ сеч 2 гор

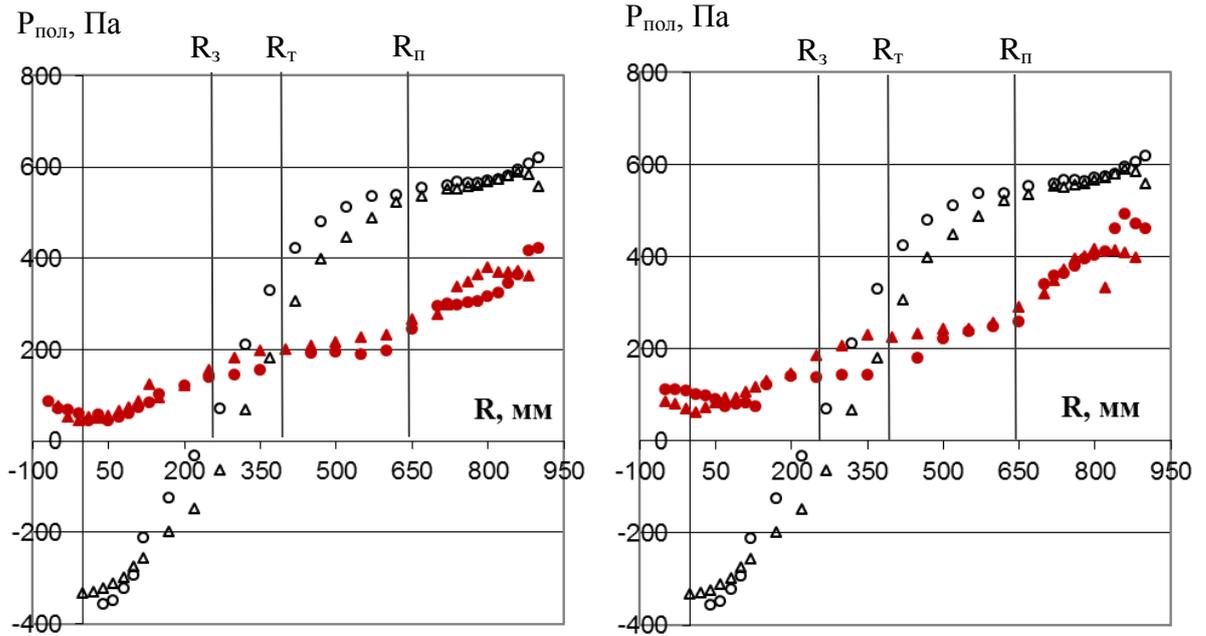
Рисунок 4.13 – Изменение статического давления закрученного потока:

а) режим 1; б) режим 2; в) режим 3; R_3 – радиус завихрителя;

R_T – радиус торцевых сопел; $R_{п}$ – радиус пережима

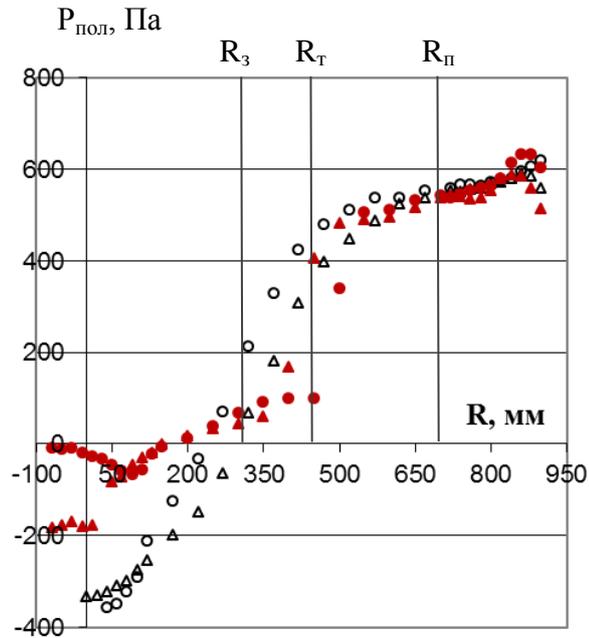
тенциальной области расходуется часть входной энергии потока, которая в сравнении с холодным $P_{ст}$ меньше почти в полтора - два раза при режиме 1 и режиме 2. Вход потока в КС при горении сопровождается потерями потенциальной энергии потока. Эта энергия преобразуется в работу, совершаемую потоком на преодоление потерь на трение. Поток, входящий через сопловые вводы, в пристенной зоне соударяется с образованной через соседнее сопло полуограниченной пристенной струей. Формирование полуограниченных турбулентных струй обосновано четырёхсторонним тангенциальным вводом потоков. В месте встречи входящей и пристенной струй происходит “удар” с последующим стеканием к турбулентному вихревому ядру горящего потока. Так же энергия потока затрачивается на трение в пристенном слое и при горении в предтопке сопротивление слоя возрастает. В квазитвёрдой области $P_{ст}$ горячего вихря распределяется с учётом затрат энергии необходимых для проталкивания потока в топку котла. Изменение потенциальной энергии $P_{ст}$ холодного и горячего потоков показывает, что поток совершает работу выталкивания за счёт своей потенциальной энергии. Если в КС организован третий режим горения, то $P_{ст}$ горячего вихря при входе на 16% ниже в квазипотенциальной и на 75% выше в квазитвёрдой областях в сравнении с $P_{ст}$ холодного вихря.

Изменение полного давления закрученного потока графически представлено на рисунке 4.14. При рассмотрении профиля изменения $P_{пол}$ горячего потока в сравнении с $P_{пол}$ холодного потока при первом и втором режиме отмечается, что значения $P_{пол}$ горячего потока на 150-200 Па меньше, чем холодного при входе потока в камеру предтопка, при этом статическое давление воздуха перед ЦВП на 19% больше при режимах горения (при исследованиях поддерживалось равенство расходов воздуха, подаваемого в КС, $\frac{V_B^X}{V_B^Г} \cdot 100\% \leq 5,5 \%$). Резкое снижение $P_{пол}$ горячего вихря в сравнении с холодным происходит за счёт преодоления сил трения, создаваемых горячим потоком - расширение среды, соударение струй, трение пристенного слоя, сток к турбулентному ядру потока и т.д. В пристенной и осевой областях $P_{пол}$ потока существенно возрастает за счёт увеличения внутренней энергии потока, что связано с возрастанием температуры в этой области.



а)

б)



в)

○ сеч 1 хол △ сеч 2 хол ● сеч 1 гор ▲ сеч 2 гор

Рисунок 4. 14 - Изменение полного давления закрученного потока:

а) режим 1; б) режим 2; в) режим 3; R_3 – радиус завихрителя;

R_T – радиус торцевых сопел; $R_п$ – радиус пережима

Изменение полного давления закрученного потока, формируемого при третьем режиме работы предтопка, наглядно видно на графике 4.14 в. Полное давление (энергия) горячего вихря со средней температурой равной 1300°C , сформирован-

ного в центральной части предтопка, резко снижает полное давление тангенциально сформированного закрученного потока с температурой 110°С на радиусе ≈400-500 мм. При этом полное давление холодного и горячего вихрей на входе в предтопок в этом случае практически равны и составляют ≈600 Па.

4.3 Корректировка аэродинамического расчёта

Корректировку аэродинамического расчёта предлагается выполнять на основании результатов обобщения газодинамических данных экспериментов, выполненных для ЦВП водогрейного котла КВГМ-100-150 ст. №5 Владивостокской ТЭЦ1, в котором организован равномерный четырёхсторонний ввод газа. Общий анализ результатов исследований показал следующее:

- осесимметричность закрученного потока и при организации горения в камере и без горения в ней (на 8,8 % отклонение аэродинамической оси вращения закрученного “холодного” потока от геометрической оси КС ЦВП и на 7,7-14 % закрученного “горячего” потока);

- определяющее влияние на структуру закрученного потока оказывает режим подвода газа на горение;

- соизмеримость значений осевой составляющей скорости W_x в приосевой зоне с тангенциальной W_φ .

В основу корректировки аэродинамического расчёта принята методика, изложенная в [67], которая оправдала себя при обобщении полей скорости и давлений в циклонно-вихревых камерах различного назначения при $\rho = \text{const}$.

При исследовании аэродинамики камер рекомендуется для вычисления безразмерной W_φ [133,141 из [67] формула в виде:

$$\bar{W} = \left(\frac{2 \cdot \eta}{1 + \eta^2} \right)^m, \quad (4.1)$$

где m – формпараметр;

η - безразмерный радиус.

Формпараметр m - экспериментально определяемая величина, зависящая от условий генерации закрученного потока, геометрических характеристик, режима работы и других факторов. Формпараметр m характеризует изменение закономерности вращения периферийного и приосевого вихрей.

Семейство безразмерных профилей циркуляции скорости $\bar{\Gamma}$ распределяется в турбулентном ядре закрученного в циклонно-вихревой камере потока, основываясь на аппроксимации (4.1) для тангенциальной составляющей скорости:

$$\bar{\Gamma} = \eta \cdot \left(\frac{2\eta}{1 + \eta^2} \right)^m, \quad (4.2)$$

Расчёт параметров потока \bar{W} и $\bar{\Gamma}$ возможен после аппроксимации (4.2), если вычислены и известны показатель m и масштабные величины $W_{\varphi \max}$ и $R_{\varphi \max}$. Поскольку полная скорость вращающегося потока в большей части объёма исследованных камер по величине близка к её тангенциальной составляющей [67], то за масштабную величину принято значение $W_{\varphi \max}$ на радиусе $R_{\varphi \max}$. Закономерность изменения тангенциальной скорости в безразмерном виде представлена на рисунке 4.15, где $\bar{W} = \frac{W_{\varphi}}{W_{\varphi \max}}$ - безразмерная тангенциальная составляющая скорости вихревого потока распределена в камере сгорания по безразмерному радиусу $\eta = \frac{R}{R_{\varphi \max}}$ в поперечных сечениях, находящихся на расстоянии $\bar{x} = \frac{x}{D}$ от переднего торца КС. Согласно [67], при комбинированном вводе воздуха формпараметр m целесообразно рассчитывать с учётом границы ядра потока по формуле:

$$m = \frac{\eta_{\text{я}}^2 + 1}{\eta_{\text{я}}^{2,4} - 1}, \quad (4.3)$$

где $\eta_{\text{я}}$ - безразмерный радиус ядра потока.

В экспериментах формпараметру m равному 1,42 соответствует безразмерный радиус границы ядра $R_{\text{я}}$ потока “холодного” вихря $\eta_{\text{я}} = \frac{R_{\text{я}}}{R_{\varphi \max}} = 1,76$. Расчёт безразмерного параметра “горячего” вихря $\bar{\Gamma}$ выполняется после аппроксимации

(4.2). При организации режима горения в камере предтопка формпараметр m целесообразно определять по формуле:

$$m = \log \frac{2 \cdot \eta}{1 + \eta^2} \frac{\bar{\Gamma}}{\eta}, \quad (4.4)$$

Формпараметр m “горячего” вихря рассчитывался для двух основных режимов работы ЦВП при сжигании природного газа. Третий режим является растопочным. При определении формпараметра для камеры ЦВП с учетом процесса горения рекомендуется определение среднего m для квазитвёрдой области и среднего m для квазипотенциальной зоны. Значения усредненного расчётного формпараметра m для режимов 1 и 2 представлены в таблице 4.1.

На рисунке 4.15 приводится графическое сопоставление расчётных профилей безразмерной тангенциальной скорости с опытными \bar{W} . Изменение расчётной \bar{W} по радиусу камеры сгорания ЦВП в сравнении с экспериментальными значениями \bar{W} хорошо коррелируется при расчёте тангенциальной скорости “холодного” вихря по формулам (4.1) и (4.3) при m равном 1,42.

Таблица 4.1 – Значения усредненного расчётного формпараметра m

Режим	Квазипотенциальная область	Квазитвёрдая область
Режим 1 – комбинированный подвод газа	69	4,6
Режим 2 – подвод газа тангенциальный	67,4	5,4

Показатель m характеризует изменение закономерности вращения периферийного и приосевого вихрей, но для “горячего” вихря расчёты \bar{W} по формулам (4.1) и (4.4) показали не полное соответствие с опытными данными даже с учётом усреднения формпараметра в квазитвёрдой ($\eta < 1$) и квазипотенциальной ($\eta > 1$) областях. Это связано с тем, что скорости газа и воздуха, подводимые в КС, различны. Смещение топливно-воздушных потоков происходит при максимальной нагрузке ЦВП при скорости воздуха ≈ 28 м/с и скорости газа ≈ 70 м/с. Тангенци-

альный ввод газовой смеси и её горение формируют в квазипотенциальной области два экстремума W_φ : около стенки КС и на безразмерном радиусе η близком по значениям к радиусу пережима ЦВП. Методика [67] не учитывает влияния горения газа и осевой подачи воздуха и выполняется на основании одной принятой масштабной величины $W_{\varphi max}$ на радиусе $R_{\varphi max}$.

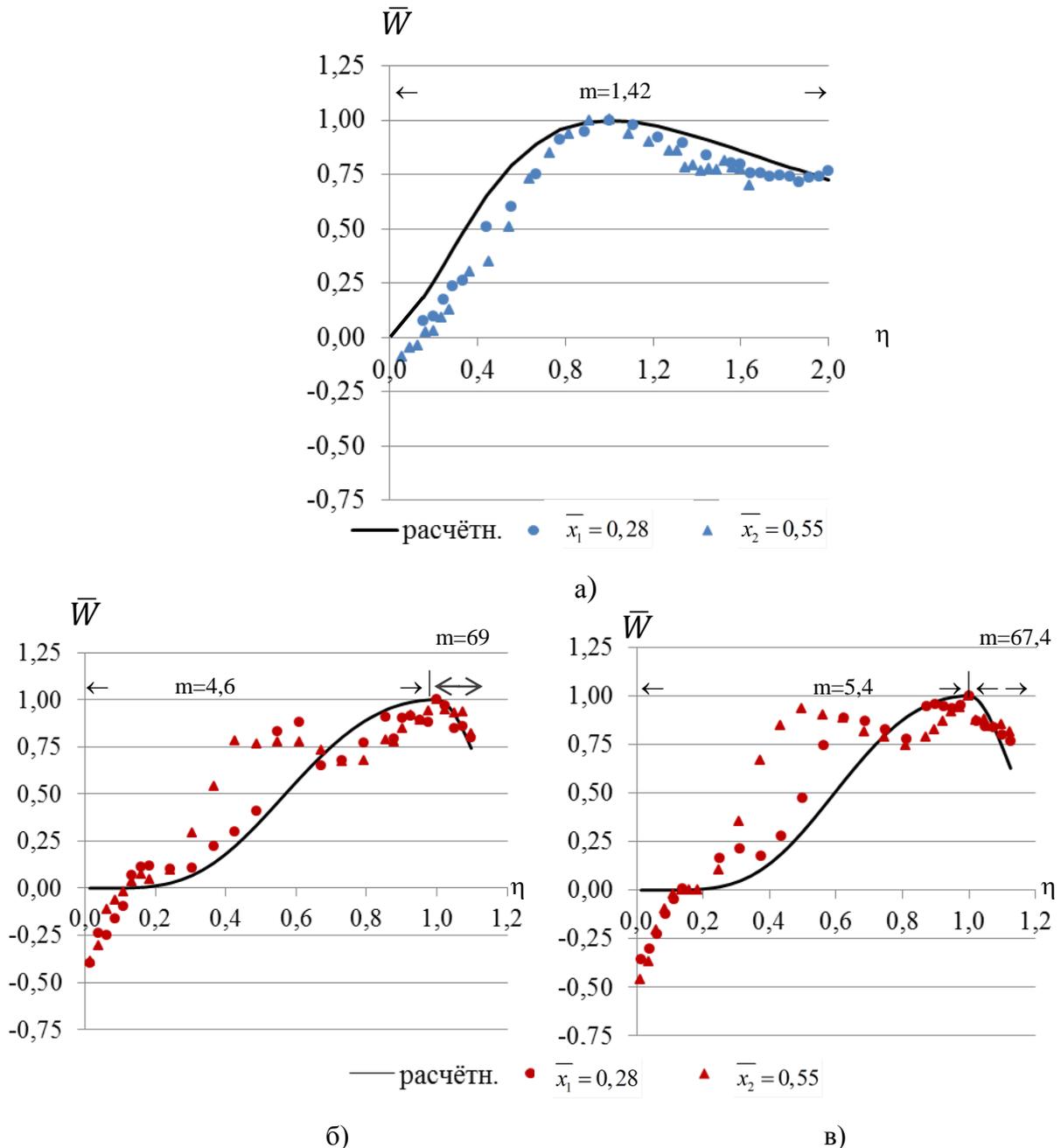


Рисунок 4.15 - Сопоставление экспериментальных и расчётных распределений безразмерной тангенциальной скорости \bar{W} по сечениям ЦВП:

а) режим “холодных” продувок; б) режим 1; в) режим 2

Расчёты безразмерной циркуляции скорости $\bar{\Gamma}$, согласно (4.2) и с учётом формпараметра “холодного” вихря m равного 1,42, хорошо коррелируются с опытными данными практически во всём объёме камеры, что показано на рисунке 4.16 а. Расчёты $\bar{\Gamma}$ по формуле (4.2) и с учётом того, что формпараметр m в квази-потенциальной и кавзитвёрдой областях “горячего” вихря различен, удовлетворительно описывают характер изменения $\bar{\Gamma}$, что показано на рисунке 4.16 б, в.

Распределение безразмерной радиальной скорости в [67] определяется по формуле:

$$V = \frac{W_r}{W_{\varphi \max}} = 2 \alpha \left(\frac{2\eta}{1+\eta^2} \right)^m \left[\left(1 + m \frac{1-\eta^2}{1+\eta^2} \right)^2 - \frac{4m\eta^2}{(1+\eta^2)^2} \right] \quad (4.5)$$

где α - коэффициент турбулентной структуры ядра потока.

Величина α определяется из материального баланса камеры, с учётом процесса горения $\frac{\rho_x}{\rho_r}$ по формуле:

$$\alpha = \text{Ro}_r \cdot \frac{d_n \cdot m}{4 \cdot \bar{L} \cdot K_q \cdot (m^2 - 1)} \cdot \frac{\rho_x}{\rho_r}, \quad (4.6)$$

где $\text{Ro}_r = \frac{\dot{V}}{2 \cdot \pi \cdot W_{\varphi\text{я}} \cdot R_{\text{я}} \cdot R_{\text{п}}}$ - число Россби для радиального потока;

d_n - относительный пережим камеры;

m - формпараметр камеры;

\bar{L} - относительный калибр камеры;

K_q - коэффициент, учитывающий торцевые перетечки из пристенной зоны. В расчёте U принят K_q равным единице так как торцевые перетечки, вызванные обратным током из центральной части камеры сгорания, не наблюдаются;

ρ_x - средняя плотность потока от радиуса R до радиуса равного $R_{\text{я}}$, кг/м³;

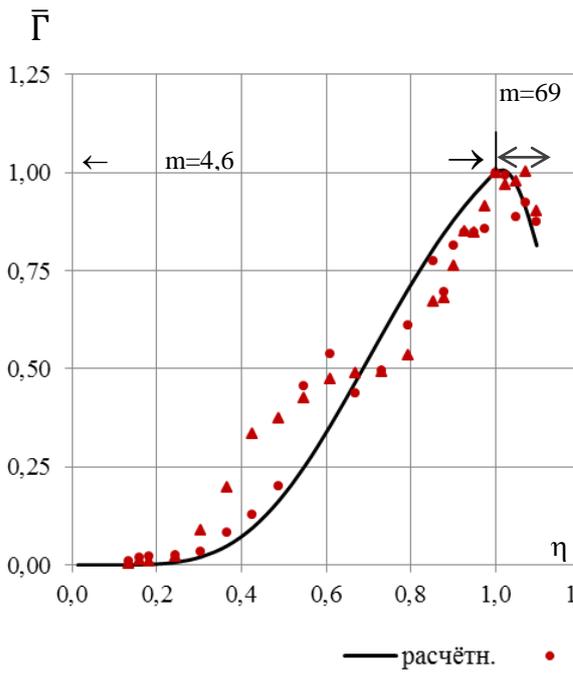
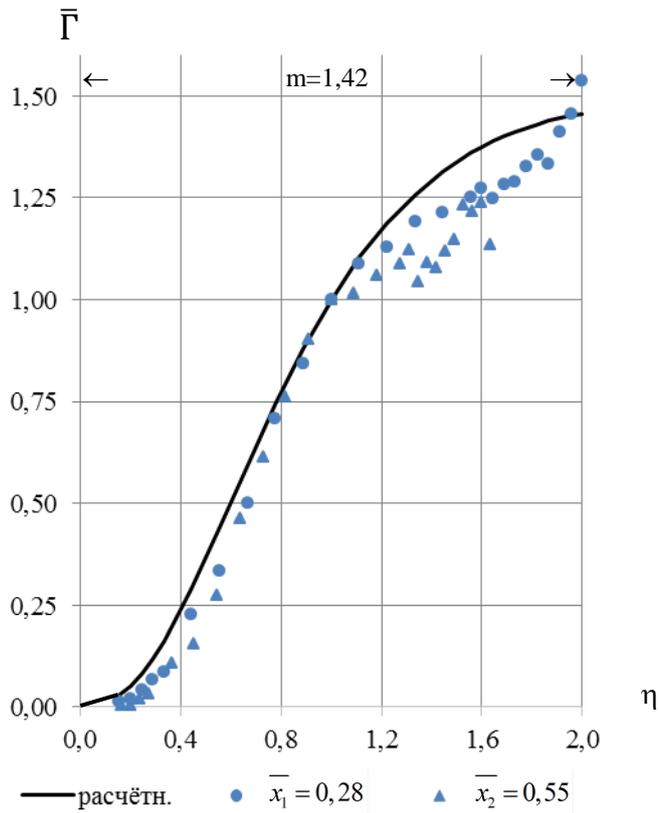
ρ_r - средняя плотность потока от оси КС ЦВП до радиуса равного $R_{\text{я}}$, кг/м³;

\dot{V} - расход воздуха $V_{\text{в}}$ и газа $V_{\text{г}}$, подаваемого в камеру ЦВП на сжигание, м³/с;

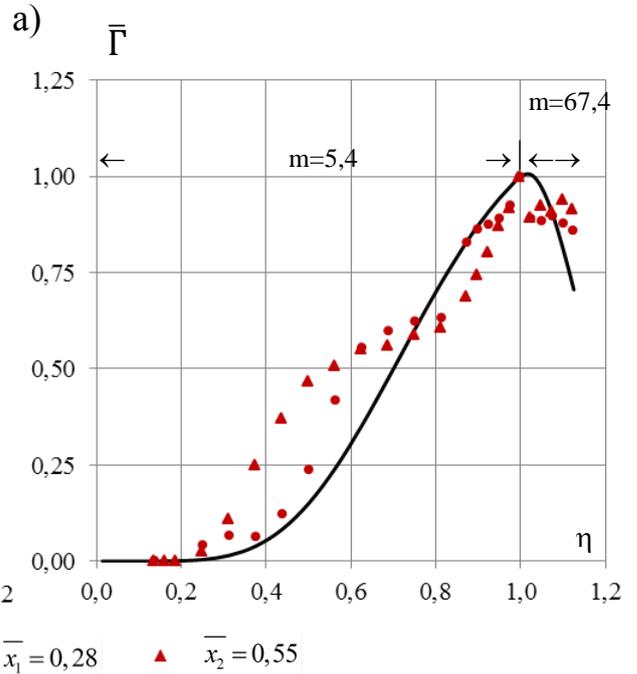
$W_{\varphi\text{я}}$ - тангенциальная составляющая скорости на радиусе ядра потока $R_{\text{я}}$, м/с;

$R_{\text{я}}$ - радиус ядра потока, м;

$R_{\text{п}}$ - радиус пережима камеры ЦВП, м.



б)



в)

Рисунок 4.16 - Сопоставление экспериментальных и расчётных распределений безразмерной циркуляции скорости $\bar{\Gamma}$ по сечениям ЦВП:

а) режим “холодных” продувок; б) режим 1; в) режим 2

Для исследуемого предтопка коэффициент α имеет значения, представленные в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Значения коэффициента α

Режим	Квазипотенциальная область	Квазитвёрдая область
Текущий безразмерный радиус	$\eta \geq 1$	$\eta < 1$
Режим без горения	0,0785	0,0785
Режим 1 – комбинированный подвод газа	0,0011	0,0018
Режим 2 – подвод газа тангенциальный	0,00138	0,0179

Результаты расчётов V по (4.5), представленные на рисунке 4.17, показывают долю радиальной составляющей скорости, которая изменяется в диапазоне от 0,33 до 0,14 для режима “холодных” продувок и в диапазоне от 0,14 до 0,18 для первого и для второго режимов работы ЦВП. Предположения о незначительности составляющей потока V в данном случае не очевидна, поэтому стоит учесть в (4.5) влияние осевого ввода воздуха.

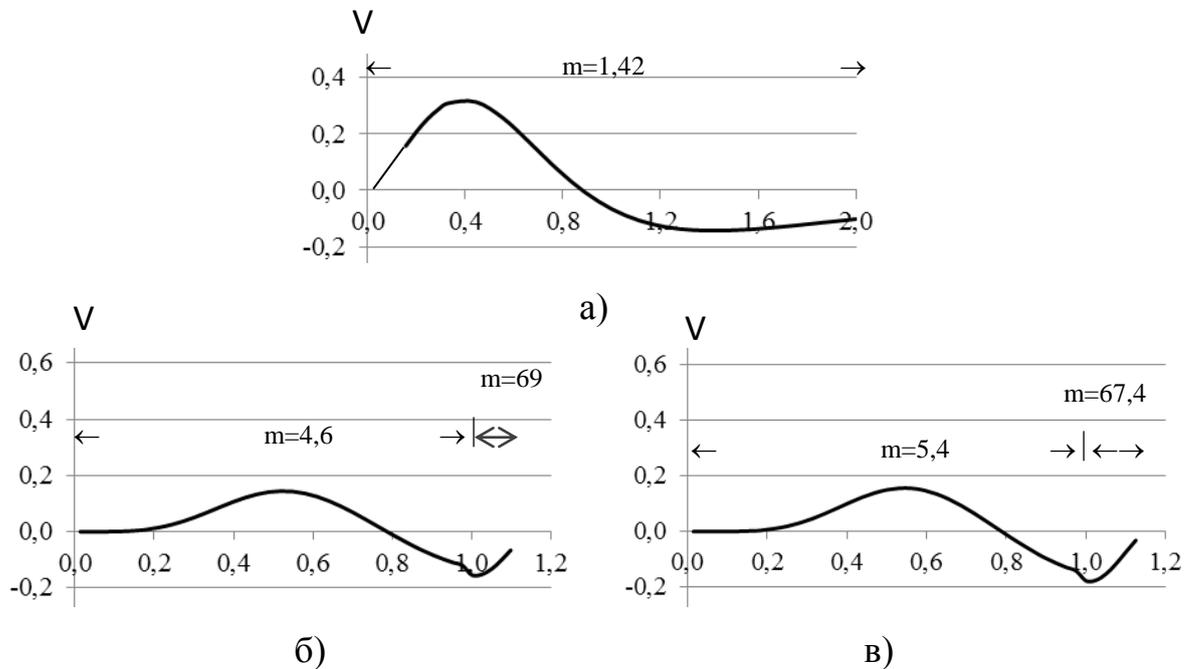


Рисунок 4.17 – Расчётные профили радиальной скорости в ЦВП:

а) режим “холодных” продувок; б) режим 1; в) режим 2

Расчетная формула для осевой скорости:

$$U = \frac{W_x}{W_{\phi \max}} = - \frac{2\alpha}{\eta \cdot (1 + \eta^2)^3} \cdot \left(\frac{2\eta}{1 + \eta^2} \right)^m \cdot [(m + 1)^3 \cdot (1 - \eta^2)^3 + 6m^2\eta^2 \cdot (\eta^4 - 1) - 8m\eta \cdot (1 + 2\eta^2) + 2\eta^6 + 6\eta^2] \cdot \xi + C(\eta), \quad (4.7)$$

где $C(\eta)=0$ – константа интегрирования.

Представленные на рисунках 4.18 расчётные зависимости при $C(\eta)=0$ не находят качественного соответствия с обобщенными экспериментальными данными.

Как видно из графиков (рисунок 4.18), профиль изменения расчётных осевых скоростей “холодного” вихря указывает на наличие обратных токов в осевой области камеры предтопка и непосредственно возле стенки, что не подтверждается экспериментальными результатами исследований. Профиль изменения экспериментальной относительной осевой скорости “холодного” вихря в основном объёме камеры ЦВП указывает на направленность закрученного потока на выход из камеры предтопка. Экспериментальные значения скорости U в первом ($\bar{x}_1 = 0,28$) сечении и во втором ($\bar{x}_2 = 0,55$) практически одинаковы.

Осевая скорость “горячего” потока тоже отличается и от U “холодного” потока и от расчётной U вихря. Так, значения U , замеренные в сечении, расположенном ближе к пережиму ЦВП ($\bar{x}_2 = 0,55$), свидетельствуют о существенном увеличении осевой скорости. Уровень осевой скорости увеличивается не только от торцевой стенки предтопка к пережиму, но и от цилиндрической стенки предтопка к его оси.

Несоответствие рассчитанных по (4.7) и экспериментальных значений осевой скорости потока объясняется двумя причинами:

- не учтено в формуле (4.7) влияние осевого ввода воздуха в камеру ЦВП,
- распределение осевой скорости дано без учёта функции $C(\eta)$, если выполнить подбор данной функции, то можно откорректировать расчётный профиль U в каждом конкретном случае.

В данной работе выполнен подбор функции константы интегрирования $C(\eta)$ для U эмпирическим путём, результаты сведены в таблицу 4.3.

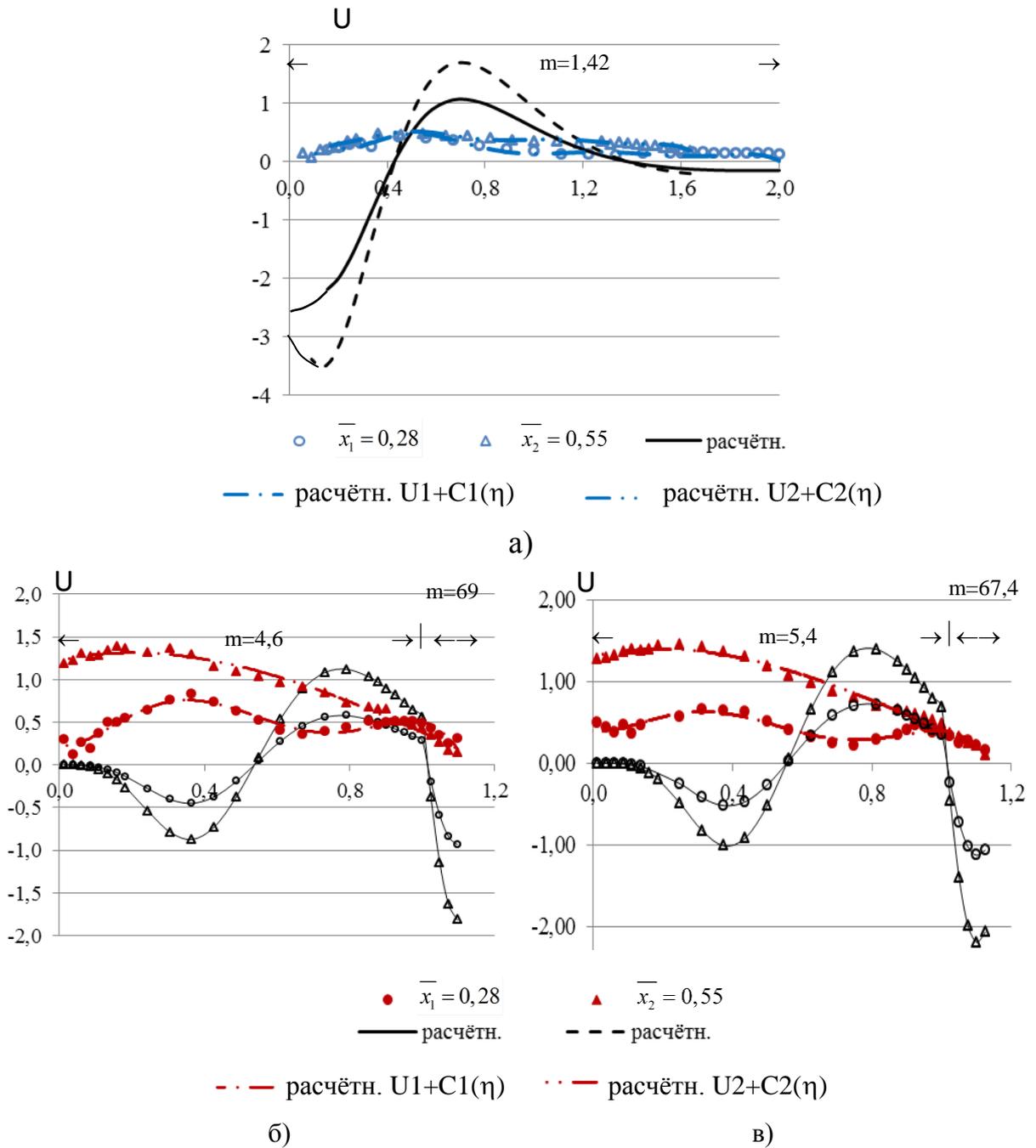


Рисунок 4.18 – Сопоставление экспериментальных и расчётных распределений осевой скорости U по сечениям ЦВП: а) режим “холодных” продувок; б) режим 1; в) режим 2

Таблица 4.3 – Функция $C(\eta) = f(\eta)$ к (4.7)

Наименование	Константа интегрирования $C_1(\eta)$ к осевой скорости в первом сечении U1	Константа интегрирования $C_2(\eta)$ к осевой скорости во втором сечении U2
“Холодные” продувки		
Безразмерное расстояние от торца камеры сгорания $\bar{x} = \frac{x}{D}$	0,28	0,55
Безразмерная осевая координата $\xi = \frac{x}{R_{\phi \max}}$	1,133	1,8
Режим продувки воздухом (без процесса горения), $C=f(\eta)$	$C_1(\eta) = -5,96 \cdot \eta^6 + 41,86 \cdot \eta^5 - 113,2 \cdot \eta^4 + 144,2 \cdot \eta^3 - 81,9 \cdot \eta^2 + 12,5 \cdot \eta + 2,02$	$C_2(\eta) = -23,9 \cdot \eta^6 + 147,9 \cdot \eta^5 - 357,5 \cdot \eta^4 + 417,9 \cdot \eta^3 - 229,7 \cdot \eta^2 + 43,8 \cdot \eta + 1,1$
“Горячие” продувки		
Режим 1 - комбинированный режим (ввод газа через тангенциальные, торцевые и осевые сопла), $C=f(\eta)$	$C_1(\eta) = -47,2 \cdot \eta^5 + 140,9 \cdot \eta^4 - 134,8 \cdot \eta^3 + 42,7 \cdot \eta^2 - 0,93 \cdot \eta + 80,2$ 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 $\eta \in (0;1)$, $m=4,6$
Безразмерная осевая координата $\xi = \frac{x_i}{R_{\phi \max}}$	1,02	2,83
Режим 2 – подвод газа через тангенциальные сопла, $C=f(\eta)$	$C_1(\eta) = -414,82 \cdot \eta + 1194,6 \cdot \eta^2 - 1123 \cdot \eta + 343,22$ при $\eta \geq 1$, $m=67,4$ $C_1(\eta) = -162,5 \cdot \eta^6 + 391,9 \cdot \eta^5 - 288 \cdot \eta^4 + 45 \cdot \eta^3 + 13,8 \cdot \eta^2 - 0,7 \cdot \eta + 0,3$ при $\eta \in (0;1)$, $m=5,4$	$C_2(\eta) = -653,79 \cdot \eta^3 + 1829 \cdot \eta^2 - 1652,5 \cdot \eta + 476,68$ при $\eta \geq 1$, $m=67,4$ $C_2(\eta) = -297 \cdot \eta^6 + 760,6 \cdot \eta^5 - 636,6 \cdot \eta^4 + 173,3 \cdot \eta^3 - 1,5 \cdot \eta^2 - 0,46 \cdot \eta + 1,3$ при $\eta \in (0;1)$, $m=5,4$
Безразмерная осевая координата $\xi = \frac{x_i}{R_{\phi \max}}$	1,02	2,48

Решение уравнения для безразмерного перепада статического давления $\overline{\Delta P}$ имеет вид:

$$\overline{\Delta P} = 2^{2m} \sum_{i=0}^{\infty} (-1)^{i+1} \cdot \frac{(m-i)!}{i! (m+i) \cdot (1+\eta^2)^{m+i}} + C, \quad (4.8)$$

где $C=0$ – константа интегрирования.

Сопоставление результатов расчётов с экспериментальными данными приведено на рисунке 4.19. Следует обратить внимание на относительно точное соответствие опытных и расчётных данных при “холодных” продувках с формпараметром m равным 1,42.

Для профилей изменения $\overline{\Delta P}$ “горячих” вихрей при первом и втором режимах сохраняется характер изменения давления от стенки камеры до оси, но при этом в сечении, расположенном ближе к торцевой стенке камеры ($\overline{x}_1 = 0,28$) не отмечаются области с отрицательными давлениями. В сечении, расположенном на расстоянии ($\overline{x}_2 = 0,55$), от торцевой стенки камеры области разрежения фиксируются.

Расчётный профиль безразмерного статического давления “горячего” вихря отличается от экспериментального профиля $\overline{\Delta P}$. При построении расчётного профиля $\overline{\Delta P}$, с переменным формпараметром, характер изменения давления будет меняться от профиля с m , равным 69 и 67,4, до m , равного 4,6 и 5,4, соответственно, поэтому в данной работе приводятся эмпирические зависимости $\overline{\Delta P} = f(\eta)$, представленные в таблице 4.4.

Предлагаемый подход газодинамического обобщения и расчёт параметров закрученного потока может быть использован для случая организации вихревого движения “горячего” потока в циклонно-вихревых предтопках различной конструкции. При этом в зависимости от конструктивных особенностей циклонно-вихревого устройства и его режимных характеристик, потребуется конкретизация эмпирических величин m , α , $R_{\text{фmax}}$, $W_{\text{фmax}}$ и корректировка параметра U расчётными константами интегрирования $C(\eta)$.

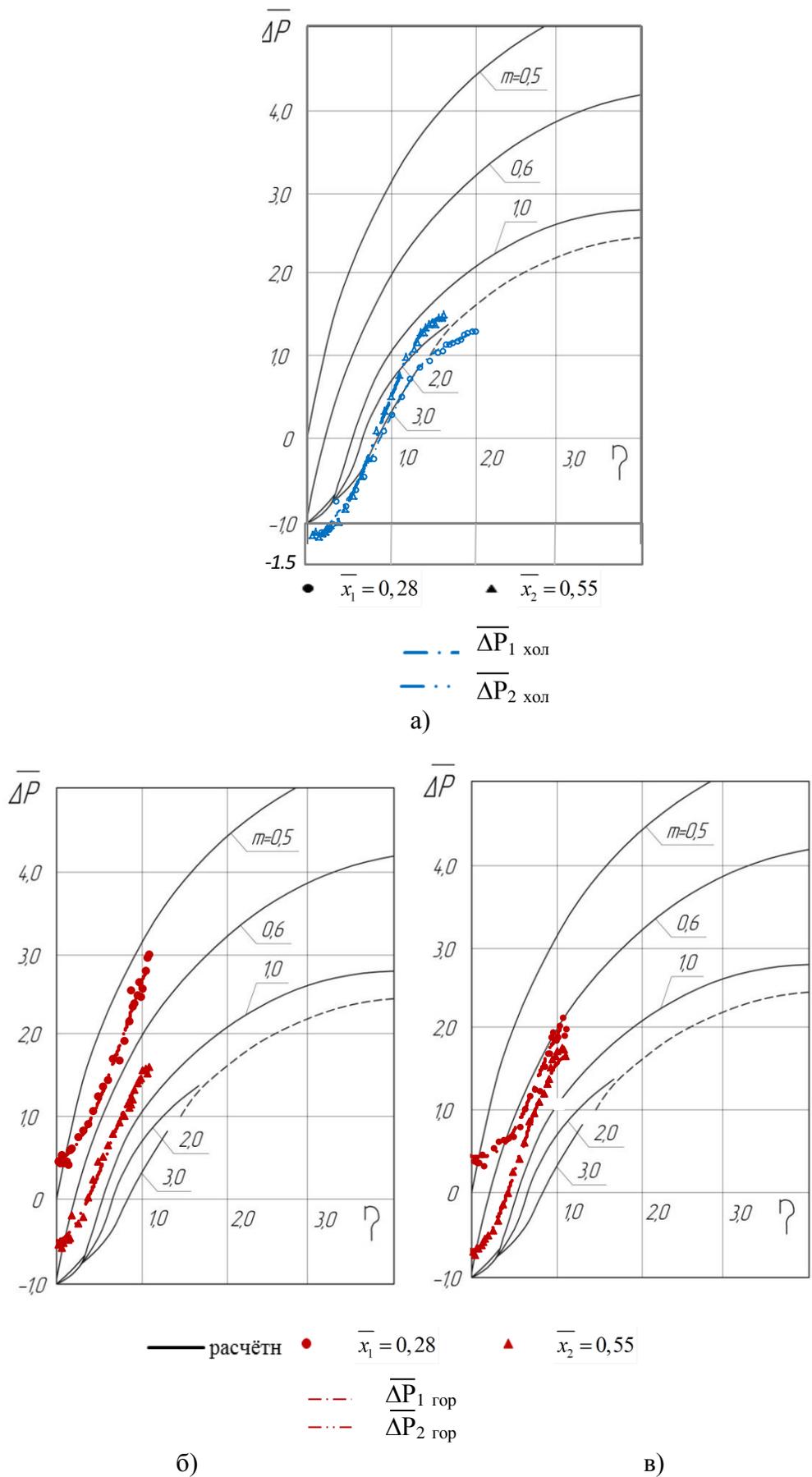


Рисунок 4.19 – Сопоставление экспериментальных и расчётных распределений статического давления по сечениям ЦВП: а) режим “холодных” продувок; б) режим 1; в) режим 2

Таблица 4.4 – Функция $\overline{\Delta P} = f(\eta)$

Наименование	Сечение 1	Сечение 2
“Горячие” продувки		
Режим 1 - комбинированный режим (ввод газа через тангенциальные, торцевые и осевые сопла)	$\overline{\Delta P}(\eta) = -1,37 \cdot \eta^3 + 3,48 \cdot \eta^2 + 0,016 \cdot \eta + 0,5$	$\overline{\Delta P}(\eta) = -2,4 \cdot \eta^3 + 4,2 \cdot \eta^2 + 0,16 \cdot \eta - 0,5$
Безразмерная осевая координата $\xi = \frac{x}{R_{\phi \max}}$	1,0	2,83
Режим 2 – подвод газа через тангенциальные сопла	$\overline{\Delta P}(\eta) = -2,5 \cdot \eta^4 + 3,96 \cdot \eta^3 + 0,1 \cdot \eta^2 - 0,14 \cdot \eta + 0,48$	$\overline{\Delta P}(\eta) = -3,16 \cdot \eta^3 + 5,55 \cdot \eta^2 - 0,14 \cdot \eta + 0,48$
Безразмерная осевая координата $\xi = \frac{x}{R_{\phi \max}}$	1,02	2,48

Заключение

1. Впервые проведены исследования газодинамики в камере сгорания промышленного воздухоохлаждаемого циклонного предтопка при сжигании природного газа, которые выявили, существенное изменение составляющих вектора скорости закрученного потока, а также статического давления в сравнении с холодными продувками.

2. Определены области интенсивного смесеобразования и горения топливно-воздушной смеси. Получены данные об оптимальных режимах работы ЦВП и котельной установки в целом во всем диапазоне нагрузок.

3. Предложены эмпирические зависимости расчёта безразмерной осевой составляющей скорости закрученного потока и безразмерного статического давления с учётом влияния осевого ввода воздуха и горения газа.

4. Уточнены численные значения формпараметра m закрученного потока при горении газа в ЦВП для квазипотенциальной и квазитвёрдой областей, позволяющие рассчитывать безразмерные аэродинамические параметры закрученного потока.

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

6. На усовершенствованную циклонно-вихревую технологию сжигания газа переведено 16 паровых и водогрейных котлов:

- паровой котлоагрегат БКЗ-120-100 Охинской ТЭЦ. Осуществлена замена восьми газомазутных горелок ГМГ-10 на два ЦВП мощностью по 65 МВт,

- водогрейный котёл ПТВМ-100 Якутской ТЭЦ. Выполнена замена шестнадцати горелок МГМГ-8 на два ЦВП мощностью 65 МВт каждый,

- восемь водогрейных котлов типа КВГМ-100 на Хабаровской ТЭЦ-2 и на Владивостокской ТЭЦ-1;

- три водогрейных котла ЭЧМ-25/35 на котельной «Северная».

- три паровых котельных установки БКЗ-75-16 на Владивостокской ТЭЦ-1.

Эксплуатация двух котлов Хабаровской ТЭЦ-2 успешно осуществляется с 2007 г. Паровые и водогрейные котлы Владивостокской ТЭЦ-1 и объединённой котельной «Северная» эффективно эксплуатируются с 2012 г. Акт внедрения представлен в приложении Д.

Работа модернизированного водогрейного котла КВГМ-100-150 характеризуется увеличением мощности до 106 % и КПД до 94,1 % при прямоточной гидравлической схеме циркуляции теплоносителя и до 96,1 % при противоточной, нормативный КПД котла при сжигании газа составляет 92,7 %. На котельной установке снижаются выбросы загрязняющих веществ в атмосферу за счёт двухступенчатого сжигания газа в КС ЦВП. Содержание оксидов азота при нормированном значении 125 мг/м^3 при $\alpha=1,4$ снижено до $83\text{-}120 \text{ мг/м}^3$ в диапазоне нагрузок от 45 до 106 %.

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.

Список сокращений и условных обозначений

φ, r, x	Тангенциальная, радиальная и осевая координаты, [-];
$\rho_{\text{п}}$	Плотность закрученного потока, [кг/м ³];
$\rho_{\text{в}}$	Плотность воздуха, [кг/м ³];
ω	Угловая скорость, [1/с];
W	Вектор скорости потока, [м/с];
W_r	Радиальная составляющая вектора скорости, [м/с];
W_x	Осевая составляющая вектора скорости, [м/с];
W_{φ}	Тангенциальная составляющая вектора скорости, [м/с];
C	Концентрация выбросов, [мг/м ³];
R, D	Радиус и диаметр камеры сгорания предтопка, [мм];
$R_3, R_{\text{п}}$	Радиус завихрителя, радиус пережима, [мм];
R_i	Текущий радиус на котором выполняются замеры в экспериментальном сечении, [м];
$d_{\text{п}}=D_{\text{п}}/D$	Относительный диаметр пережима, [-];
$L, \bar{L} = \frac{L}{D}$	Длина и калибр камеры сгорания, [-];
T	Температура, [°K];
$P_{\text{ст}}$	Статическое давление, [Па];
$P_{\text{пол}}$	Полное давление потока, [Па];
$\Delta P_{\text{дин}}$	Динамическое давление, [Па];
$t_{\text{в.изм}}$	Температура воздуха перед ЦВП, [°C],
$t_{\text{изм}}$	Измеренные показания температуры закрученного потока, °C
t	Температура потока при горении природного газа, °C
B_r	Расход природного газа на предтопок, [м ³ /с];
$V_{\text{в}}$	Расход воздуха, [м ³ /с];
V_n	Объем камеры сгорания предтопка, [м ³];

$W_{\varphi \max}, R_{\varphi \max}$	Максимальное значение тангенциальной скорости [м/с] и её радиус, [м];
$\eta = \frac{R_i}{R_{\varphi \max}}$	Безразмерный радиус, [-];
$\eta_{\text{я}} = \frac{R_{\text{я}}}{R_{\varphi \max}}$	Безразмерный радиус ядра потока, [-];
$\bar{x} = \frac{x}{D}$	Безразмерное расстояние от торца камеры сгорания, [-];
$\xi = \frac{x}{R_{\varphi \max}}$	Безразмерная осевая координата, [-];
$\bar{W} = \frac{W_{\varphi}}{W_{\varphi \max}}$	Безразмерная тангенциальная составляющая скорости вихревого потока в камере сгорания, [-];
$U = \frac{W_x}{W_{\varphi \max}}$	Безразмерная осевая составляющая скорости вихревого потока в камере сгорания, [-];
$V = \frac{W_r}{W_{\varphi \max}}$	Безразмерная радиальная составляющая скорости вихревого потока в камере сгорания, [-];
α	Коэффициент, характеризующий турбулентную структуру потока, [-];
m	Формпараметр, [-];

Список литературы

1. А.с. 1508048 СССР, МПК⁷ F 23 С 5/32 Циклонный предтопок / А.Н. Штым, В.А. Рудницкий // Владивосток. НИС ДВПИ им. В.В. Куйбышева №4276974/24-06; заявл. 06.07.1987 опубл. 15.09.1989, Бюл.№34.-4 с.
2. А.с. 2335486 СССР, МПК⁷ F 23 Способ работы топки / Е.Г. Воротников, В.В. Померанцев, Ф.З. Финкер (СССР). – 2.07.1976, Бюл.№ 24.-2с.
3. А.с. 288218 СССР, МПК⁷ F 23 Вихревая топка / Н.В. Голованов, В.В. Померанцев (СССР). – 6.03.1961, Бюл.№ 36.-2с.
4. А.с. 340836 СССР, МПК⁷ F 23 Вихревая топка / В.В. Померанцев (СССР). – 6.03.1972, Бюл.№ 22.-2с.
5. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. М.: Физматгиз, 1960. 716 с.
6. Абрамович Г.Н. Теория центробежной форсунки. – В кн.: Промышленная аэродинамика. М., БНТ ЦАГИ, 1944, с.18-26.
7. Алексеенко С.В., Бурдуков А.П., Дектерев А.А., Маркович Д.М., Шторк С.И. Физическое и математическое моделирование аэродинамики и горения в топочных камерах энергоустановок. Теплоэнергетика № 9, 2011 г., с. 67-72.
8. Андриевский В. В. Проекты реконструкции и модернизации оборудования и тепловых сетей Якутской ТЭЦ // Новости теплоснабжения. – 2014. №9. с. 34-40.
9. Ахмедов Р.Б. Аэродинамика закрученных струй.-М.: Энергия,1977. - 240 с.
10. Ахмедов Р.Б., Балагула Т.Б., Рашидов Ф.К., Сакаев А.Ю. Аэродинамика закрученной струи. М., «Энергия», 1977.
11. Баранова М. П., Кулагин В.А. Физико-химические основы получения топливных водоугольных суспензий: монография / Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2011. – 160 с. ISBN: 978-5-7638-2116-1
12. Белов И.А., Исаев С.А. Моделирование турбулентных течений // СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2001. - 108 с.
13. Борода А.В., Лесных А.В., Соловьёва Т.А., Чистяков С.В., Штым К.А. Результаты работы котлов КВГМ-100-150 МЦ, модернизированных на циклон-

- но-вихревое сжигание газа // Пути совершенствования работы теплоэнергетических устройств: материалы всероссийской молодежной 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.
14. Бузников Е.Ф., Роддатис К.Ф., Берзинш Э.Я. Производственные и отопительные котельные. –М.: Энергоатомиздат.1984.- 248 с.
 15. Верещетин В. А., Тугов А. Н., Сидоркин В. Т. Современные малотоксичные горелочные устройства для сжигания жидких и газообразных топлив // Сборник докладов и каталог Седьмой Всероссийской конференции “Реконструкция энергетики - 2015” М: 174 с. С. 19-22. Режим доступа: <http://www.intecheco.ru/energo/topics2015.html>
 16. Винтовкин А. А., Ладыгичев М. Г., Гусовский В. Л., Калинова Т. В Горелочные устройства промышленных печей и топок (конструкции и технические характеристики). – М. : “Интернет инжиниринг”, 1999. 560 с.
 17. Винтовкин А. А., Ладыгичев М. Г., Гусовский В. Л., Усачев А. Б. Современные горелочные устройства //М.: Машиностроение. – 2001. 496 с.
 18. Глинка Н. Л. Общая химия. – 23-е издание, испр. (Под ред. ВА Рябиновича.)–Л //Химия. – 1983.
 19. Головатый С. В., Штым К.А., Соловьёва Т.А. Интенсификация смесеобразования в циклонно-вихревом предтопке при сжигании природного газа // Сб. материалов IX Всероссийской конференции с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения». - Новосибирск: ИТ СО РАН, 2015. - С.48.
 20. Гончаренко Ю. Б., Соловьёва Т.А., Штым К.А. Исследование аэродинамики закрученных потоков на примере циклонно-вихревого предтопка котла БКЗ-75-39 Владивостокской ТЭЦ-1 // Сб. «Современные технологии и развитие политехнического образования». Научное электронное издание. - Владивосток: ДВФУ, 2016. - С. 522-526.
 21. ГОСТ Р. 50831-95 Установки котельные //Тепломеханическое оборудование. Общие технические требования. – 1995.

22. Григорьев К.А. Опыт низкотемпературного вихревого сжигания различных видов топлива в котле БКЗ-120-138 Кировской ТЭЦ-4 /К.А. Григорьев, В.Е. Скудицкий и др. // Электрические станции, 2010, № 4, с 9-13
23. Дорогов Е.Ю. Исследование теплообмена в топках котлов с циклонными предтопками ДВГТУ: дис. канд. техн. наук: Владивосток, 2000. - 210 с.
24. Жуков Е. Б., Пузырёв Е. М., Голубев В.А., Афанасьев К. С. Опыт реконструкции котлов на базе моделирования вихревых потоков // Энергетик. – 2009. – №. 5. – С. 21-24.
25. Зайцев О. Н., Илаев Г. А., Атрощенко С. Ю. Программы расчета взаимодействующих закрученных потоков для управления аэродинамикой котлов малой мощности //Строительство и техногенная безопасность. – 2016. – №. 3. – с. 61-66.
26. Зайцев О. Н., Илаев Г. А., Атрощенко С. Ю. Программы расчета взаимодействующих закрученных потоков для управления аэродинамикой котлов малой мощности //Строительство и техногенная безопасность. – 2016. – №. 3. – С. 61-66.
27. Зейдл Развитие и практика циклонного-сжигания в Федеральной Республике Германии // Доклады объединенной конференции по горению Американского объединения инженеров-механиков и Английского института инженеров-механиков (Лондон – Бостон, 1955) . Сжигание топлив / Под редакцией проф. Кнорре Г. Ф.: Госэнергоиздат 1957. 84 с. – С. 4-17.
28. Зройчиков Н. А. и др. Модернизация котлов ТГМП-314Ц, оборудованных циклонными предтопками для снижения вредных выбросов и повышения надежности работы горелочных устройств и поверхностей нагрева //Теплоэнергетика. – 2002. – №. 12. – С. 17-21.
29. Зыков А. К. Паровые и водогрейные котлы. – Рипол Классик, 1987. 128 с.
30. Иванов С.А. Повышение эффективности работы теплоэнергетического оборудования электростанций в энергосистемах с преобладающей долей ТЭЦ за счет совершенствования тепловых схем и режимов работы (на примере Забайкальского края). дис. док. техн. наук.- Чита, 2011.- 452с.

31. Иванов Ю. В. Газогорелочные устройства //М.: Недра. – 1972. 276 с.
32. K. Shtym, T. Soloveva Comparison of Gas Combustion Methods using Combustion Burner and Cyclone Vortex Burner // Twelfth International Conference on Flow Dynamics (ICFD 2015). October 27-29 at the Sendai International Center, Sendai, Japan, hosted by the Institute of Fluid Science, Tohoku University., 2015 .- P. 204-205.
33. Кнорре Г.Ф. Топочные процессы. М.-Л.: ГЭИ, 1959, - 396 с.
34. Козлов С. Г., Скуратов А. П. Влияние характеристик пристенного газового слоя на шлакование топочных экранов при сжигании березовского угля // Теплоэнергетика. – 2010. – №. 7. – С. 51-57.
35. Комплексная программа развития электроэнергетики Дальневосточного федерального округа до 2025 [Текст] : [приказ и.о. Министра энергетики РФ С.И. Шматко от 16 мая 2012 г].
36. Красинский Д.В., Саломатов В.В., Ануфриев И.С., Шарыпов О.В., Шадрин Е.Ю., Аникин Ю.А. Моделирование топочных процессов при сжигании распыленного угля в вихревой топке усовершенствованной конструкции. Часть 1. Аэродинамика течения в вихревой топке. Теплоэнергетика № 2, 2015 г., с.41-46. DOI:10.1134/S0040363615020046.
37. Красинский Д.В., Саломатов В.В., Ануфриев И.С., Шарыпов О.В., Шадрин Е.Ю., Аникин Ю.А. Моделирование топочных процессов при сжигании распыленного угля в вихревой топке усовершенствованной конструкции. Часть 2. Горение бурового угля КАБ в вихревой топке. Теплоэнергетика № 3, 2015 г., с. 54-61. DOI:10.1134/S0040363615030054.
38. Круглов Б.И. Испытания головного газомазутного котла ТГМП-314Ц с циклонными предтопками/ Б.И. Круглов, Б.Д. Кацнельсон, Ю.Л. Гуськов // Электрические станции. – 1979 – № 5. – С.19-22.
39. Лукьянченко Д. М., Топорен С. С., Зайцев О. Н. Экспериментальные исследования процессов горения в теплогенерирующих установках малой мощности //Строительство и техногенная безопасность. – 2014. – №. 50. – С. 104-110.

40. Лядно И.М. Сжигание топочного мазута и газа в промышленных котельных. –М.: Госэнергоиздат. 1963.-208 с.
41. Методические указания по испытаниям топочных и горелочных устройств котельных установок: СО 34.26.724 (МУ 37-70-180-87) : утв. Производственным объединением по наладке, совершенствованию технологии и эксплуатации электростанций и сетей «Союзтехэнерго» 29.07.87 г. : – М. - ввод в действие с 01.01.88.
42. Овчинников Ю. В., Бойко Е. Е., Серант Ф. А. Проблемы сжигания водугольных топлив и предложения по разработке технологии сжигания // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации.— 2015.— №1.— С. 85-93.
43. Пархоменко Е. Л., Герасимов Б. И., Пархоменко Л. В. Качество инновационного продукта. – Тамбов: Изд-во Тамбов. гос. техн. ун-та, 2005.
44. Пат. 2180074 Российская Федерация, МПК⁷ F 23 C 5/32, Циклонный предтопок / А.Н. Штым, В.А. Рудницкий, К.А Штым // Владивосток. АННО Центр МКТ №2000116249/06; заявл. 20.06.2000 опубл. 27.02.2002, Бюл.№26 6 с.
45. Пат. 2182280 Российская Федерация, МПК⁷ F 23 C 5/32, F 23 L 15/00, Способ работы котельной установки / А.Н. Штым, В.А. Рудницкий // Владивосток. АННО Центр МКТ №2000106710/06; заявл. 20.03.2000 опубл. 10.05.2002, Бюл.№13 8 с.
46. Пат. 2190154 Российская Федерация, МПК⁷ F 23 C 5/32, F 23 C 1/10. Циклонный предтопок (варианты) /заявитель и патентообладатель АННО Центр МКТ. - № 2000116249 ; заявл. 19.10.00 ; опубл. 27.09.02. – Соавт.: Штым К. А., Рудницкий В. А., Маняхин Ю. И., Обухов И. В.
47. Пат. 2443940 Российская Федерация, МПК⁷ F 23 C 1/8, F 23 C 7/02, F 23 C 5/32 Циклонный предтопок / А.Н. Штым, К.А. Штым. Владивосток. АННО Центр МКТ №2010138883/06; заявл. 21.09.2010 опубл. 27.02.2012, Бюл.№6 11 с.
48. Патанкар С.В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / под ред. В.Д. Виленского. М.: Энергоатомиздат, 1984. - 152 с.

49. Пол.модель. 13687 Российская Федерация, МПК⁷ F 23 Q 7/00, Запальное устройство / К.А. Штым, Дорогов Е.Ю. // Владивосток. АННО Центр МКТ №2000100066/20 ; заявл. 05.01.2000 опубл. 10.05.2000, Бюл.№13 1 с.
50. Пол.модель. 22220 Российская Федерация, МПК⁷ F 23 C 11/00, Комбинированная форсунка / А.Н Штым, В.А.Упский, М.В.Упский // Владивосток. АННО Центр МКТ №2001133874/20 ; заявл. 13.12.2001 опубл. 10.03.2002, Бюл.№7 1 с.
51. Пронин М. С., Мещеряков В. Г., Козлов С. Г., Иванников В. М., Чирков Г. Е., Цедров Б. В. Освоение технологии сжигания канско-ачинских углей в камерных топках и перспективы её дальнейшего применения //Теплоэнергетика. – 1996. – №. 9. – С. 7-12.
52. Пузырев Е. М., Афанасьев К. С. Опыт разработки вихревых топок на дробленом угле для котлов малой и средней мощности // Энергетик. – 2009. – №. 4. – С. 11-12.
53. Пузырёв Е. М., Голубев В. А. Технология сжигания водоугольного топлива в энергетических котлах // Вестник алтайской науки. Барнаул. – 2014. – №. 4. – С. 325-331.
54. Пузырёв М. Е., Афанасьев К. А., Пузырёв Е. М., Климов Г. А. Котлы с вихревыми топками “Торнадо” // Сб. «Научноёмкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов» / Под ред. В. Н. Фрянова. – 2010. - С. 469-478.
55. Пузырёв М. Е., Пузырёв Е. М., Жуков Е. Б. Проектирование котельно-топочных устройств // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2016. № 2. - С. 52-57.
56. Саломатов В.В., Красинский Д.В., Аникин Ю.А., Ануфриев И.С., Шарыпов О.В., Х. Энхжаргал. Экспериментальное и численное исследование аэродинамических характеристик закрученных потоков в модели вихревой топки парогенератора. ИФЖ. Т.85, № 2, 2012 г., с. 266-276.
57. Семенов Б. А. Инженерный эксперимент в промышленной теплотехнике, теплоэнергетике и теплотехнологиях: Учебное пособие. 2-е изд., доп. – СПб.:

- Издательство «Лань», 2013 . – 400 с.: ил. – (Учебники для вузов. Специальная литература). ISBN 978-5-8114-1392-8
58. Сидельковский Л.Н., Шурыгин А.П. Циклонные энерготехнологические установки.-М.: ГЭИ, 1962.- 80 с.
 59. Сидоров М.И., Завирухо В.Д., Розенгауз Б.М. Исследование теплообмена в топке газомазутного котла с камерой сгорания при двухступенчатом сжигании топлива. Промышленная энергетика, 1977, № 9, с. 37-40.
 60. Соловьёва Т. А. Исследование смесеобразования в газовых циклонных предтопках // Проблемы реформирования и особенности развития электроэнергетики Дальнего Востока: материалы науч.-практич. конф. - Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2006. – 420 с. С.61-62.
 61. Спейшер В. А., Горбаненко А. Д. Повышение эффективности использования газа и мазута в энергетических установках //М.: Энергоатомиздат. – 1991.
 62. Тагер С.А., Талума Р.Ю., Калмару А.М., Казакова Н.А. Исследование двухступенчатого циклонного сжигания высокосернистого мазута с подавлением образования NO_2 и SO_3 . – Теплоэнергетика, 1976, №12, с.34-39.
 63. Тасс О.А., Стужин Ю.В. Промышленные исследования мазутных форсунок. Сборник «Вопросы исследования и расчета газомазутных топочных и горелочных устройств». Изд. ЦКТИ. Л.: 1967. № 76.
 64. Теория турбулентных струй / Абрамович Г. Н., Гиршович Т. А., Крашенинников С. Ю., Секундов А. Н., Смирнова И. П. Изд. 2-е, перераб. И доп. / Под ред. Г. Н. Абрамовича. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984.- 720 с.
 65. Циклонные топки / Под ред. Г.Ф.Кнорре, М.А.Наджарова. М.: ГЭИ, 1958. – 216 с.
 66. Чепель В. М., Шур И. А. Сжигание газов в топках котлов и печей и обслуживание газового хозяйства предприятий. – Гостоптехиздат. Ленингр. отд-ние, 1960.
 67. Штым А. Н., Штым К. А., Дорогов Е. Ю. Котельные установки с циклонными предтопками //Владивосток: Изд. дом Дальневосточ. федер. ун-та. – 2012.

68. ШТЫМ А. Н., ШТЫМ К.А., СОЛОВЬЁВА Т.А. Опыт эксплуатации на Дальнем Востоке котлоагрегатов оснащенных циклонно-вихревыми предтопками // Материалы VIII международного симпозиума «Горение и плазмохимия» и научно-технической конференции «Энергоэффективность-2015». 16-18 сентября 2015г. – Алматы: Казак университi, 2015. 541 с. – с. 512 - 516. ISBN 978-601-04-1388-7
69. ШТЫМ А.Н., БАШАРОВ Ю.Д., РУДНИЦКИЙ В.А., ШТЫМ К.А., ДОРОГОВ Е.Ю., МАНЯХИН Ю.И. Исследование и опыт внедрения циклонно-вихревого сжигания топлива // В сб. «Материалы зонального совещания по вопросам сжигания местных низкосортных углей, мазута, газа....» Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 1999 г. С. 28-38.
70. ШТЫМ А.Н., ВОРОТНИКОВ Е.Г., РАСПУТИН О.В., ШТЫМ К.А. Опыт освоения вихревой технологии сжигания твёрдого топлива. // Энергетик. - 2011. №9. - с. 23-25
71. ШТЫМ А.Н., РУДНИЦКИЙ В.А., КАЗМЕРКОВСКИЙ В.И, ШТЫМ К.А, ДОЦЕНКО Л.Ф. Перевод котла БКЗ-120-100ГМ на сжигание газа и нефти-сырца в воздухоохлаждаемых циклонных предтопках // Электрические станции. - 2000. №6. - с. 20-22
72. ШТЫМ А.Н., ШТЫМ К.А. Модернизация паровых и водогрейных котлов с установкой циклонных предтопков для сжигания мазута и газа.// Энергетик.- 2010. №10.-с. 25-28.
73. ШТЫМ К. А. Совершенствование циклонно-вихревой технологии сжигания топлива: дис. ... док. техн. наук. - Владивосток, 2015.- 304 с.
74. ШТЫМ К. А., ГОЛОВАТЫЙ С. В., ЛЕСНЫХ А. В. Исследование аэродинамики в топке котла с циклонно-вихревыми предтопками // Сборник статей «Опыт эффективного использования энергетических ресурсов Дальнего Востока. (Научно-технический журнал, спец.выпуск).- М.: Горная книга.–2014. – №. 9421. – С.23-30.
75. ШТЫМ К. А., ДОРОГОВ Е. Ю., СОЛОВЬЁВА Т. А. Особенности теплообмена в топках котлов с вихревыми предтопками //Сборник статей «Опыт эффектив-

- ного использования энергетических ресурсов Дальнего Востока.(Научно-технический журнал, спец. выпуск).-М.: Горная книга. – 2014. – №. 9421. – С. 13-22.
76. Штым К. А., Маркушина Т. А. Выбор методики измерений аэродинамики неизотермического потока в циклонно-вихревой камере // Вологдинские чтения. – 2002. – №. 22. – с. 41.
77. Штым К. А., Соловьёва Т. А. Оценка эффективности распределения воздуха и газообразного топлива в циклонно-вихревом предтопке // Сб. материалов Всероссийской конференции XXXI «Сибирский теплофизический семинар». - Новосибирск: ИТ СО РАН, 2014. - С. 173.
78. Штым К.А. Анализ снижения срока службы поверхностей нагрева на котлоагрегатах ПТС АО Дальэнерго. В сб. «Вологдинские чтения» Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 1998 г. С.31-33.
79. Штым К.А. Модернизация и исследование паровых и водогрейных котлов с циклонными предтопками ДВГТУ. дис. канд. техн. наук.- Владивосток, 2000. - 250 с.
80. Штым К.А. Модернизация и исследование паровых и водогрейных котлов с циклонными предтопками ДВГТУ. дис. ...канд. техн. наук. - Владивосток, 2000.-250с
81. Штым К.А., Дорогов Е.Ю., Соловьёва Т.А., Кузнецова Е.С., Головатый С.В. Исследование условий образования оксидов азота при сжигании природного газа в циклонно-вихревых предтопках // 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.
82. Штым К.А., Лесных А. В., Соловьёва Т. А., Головатый С.В Зависимость образования оксидов азота от эффективности смесеобразования // 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.].

83. Штым К.А., Соловьёва Т.А. Анализ результатов обработки данных исследований циклонно-вихревого предтопка при работе на газе // 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.
84. Штым К.А., Соловьёва Т.А. Влияние режимных условий при сжигании газа на параметры закрученного потока // Современные технологии и развитие политехнического образования[Электронные ресурсы]: международная научная конференция. - Владивосток: ДВФУ, 2015. - С. 640.
85. Штым К.А., Соловьёва Т.А. Исследование параметров вихревого потока при сжигании газа // Сб. материалов IX Всероссийской конференции с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения» Новосибирск: ИТ СО РАН, 2015. - С.146.
86. Штым К.А., Соловьёва Т.А. Опыт сжигания газа на котлах с циклонно-вихревыми предтопками // 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.
87. Штым К.А., Соловьёва Т.А. Перевод Хабаровской ТЭЦ-2 на сжигание газообразного топлива // Вологдинские чтения. Материалы конференции. - Владивосток: 2004 г. №39 – С. 8-10.
88. Штым К.А., Соловьёва Т.А. Постановка исследований неизотермических аэродинамических потоков в газовом циклонно-вихревом предтопке водогрейного котлоагрегата ПТВМ-100 ст.№2 Якутской ТЭЦ // Вологдинские чтения. ДВФУ. Владивосток: 2004 г. №39 – С. 10-11.
89. Штым К.А., Соловьёва Т.А. Результаты аэродинамических исследований циклонно-вихревого предтопка, сжигающего газообразное топливо // В сб. трудов IV семинара вузов Сибири и Дальнего Востока по теплофизике и теплоэнергетике. Владивосток: ДВГТУ, 2005. - С. 29

90. ШТЫМ К.А., СОЛОВЬЁВА Т.А., ЛЕСНЫХ А.В. Исследования неизотермического закрученного потока // Сб. «Современные технологии и развитие политехнического образования». - Владивосток: ДВФУ, 2016. - С. 467-471.
91. Энергетическая стратегия России на период до 2030 г (с пролонгацией до 2035 г.). Распоряжение Правительства РФ от 13.11.2009 г. №1715-р.
92. Pat. 6,021,724 United States, Int. Cl.⁷ F23D 1/02; F22B 37/00, Cyclone furnace for retrofit applications / Manvil O. Dahl and oth. // New Orleans. Babcock & Wilcox Company; McDermott Technology, Inc., Appl № 08/966,110; filed: Nov. 7, 1997; date of patent: Feb. 8, 2000.
93. Pat. 7,926,432 B2 United States, Int. Cl.⁷ F23D ½(20060101), Low NO.sub.x cyclone furnace steam generator / Gerald J. Maringo; and oth. // Babcock & Wilcox Power Generation Group, Inc., Appl № 11/720,506; filed: Feb. 6, 2006; date of patent: Apr. 19, 2011.
94. Satoru Ishizuka, Derek Dunn-Rankin, Robert W. Pitz, Robert Jj. Kee, Yyuyin Zhang, Huayang Zhu, Tadao Takeno, Makihito Nishioka, Daisuke Shimokuri Tubular combustion. – N.Y., 2013. – 281 p.
95. Shtym K.A., Solov'eva T.A. Conversion of KVGM-100-150 boiler to cyclone-swirl burning of gas // Thermal Engineering. - 2015. - Vol. 62, - No.3. - P. 202-207.
96. Shtym K., Solovyova T. Features of Gas Combustion in Cyclone Vortex Burner // 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.
97. Shtym K., Solovyova T., Golovatiy S. Dependency of nitrogen oxides formation from mixture formation efficiency // Dynamics and Structure of Combustion Waves: 2-nd International Conference, July, 23–27, 2014, Vladivostok: abstracts Electronic publication School of Engineering FEFU 2014.

Приложение А
Сертификат соответствия
(обязательное)

СИСТЕМА СЕРТИФИКАЦИИ ГОСТ Р
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ



СЕРТИФИКАТ СООТВЕТСТВИЯ

№ РОСС RU.AB24.H03516

Срок действия с 19.10.2010

по 18.10.2013

№ 0348062

ОРГАН ПО СЕРТИФИКАЦИИ рег. № РОСС RU.0001.11AB24
ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ "СЕРТИФИКАЦИЯ ПРОДУКЦИИ
"СТАНДАРТ-ТЕСТ"
121359, г. Москва, ул. Маршала Тимошенко, д. 4, офис 1, тел. (495) 741-59-32, (499) 726-30-02, факс (499)
726-30-01, info@standart-test.ru

ПРОДУКЦИЯ Газо-мазутный циклонно-вихревой предтопок, ЦВП-25, ЦВП-35,
ЦВП-65.
по ТУ 3696-001-20779221-2010
Серийный выпуск

код ОК 005 (ОКП):
36 9630

СООТВЕТСТВУЕТ ТРЕБОВАНИЯМ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ
ГОСТ 25696-83

код ТН ВЭД России:

ИЗГОТОВИТЕЛЬ Владивостокский филиал ОАО «Дальэнергомонтаж»
РФ, 690091, г. Владивосток, ул. Фадеева, д. 47

СЕРТИФИКАТ ВЫДАН Автономная некоммерческая научно-образовательная организация ДВГТУ
Научно-технический и внедренческий центр «Модернизация котельной техники» ИНН: 2536007570.
Код-ОКПО:20779221
РФ, 690600, г. Владивосток, ул. Пушкинская, д. 10, корпус А, оф. 114, тел. 8 4232 260-727, факс 8 4232 260-727

НА ОСНОВАНИИ Протокола сертификационных испытаний №831-111 от 19.10.2010г. Испытательной
лаборатории ЗАО "ТИБР", рег. № РОСС RU.0001.21МЛ44 от 21.01.2008, адрес: Россия, 125635, г. Москва, ул.
Ангарская, д. 10.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ Инспекционный контроль: октябрь 2011г., октябрь 2012г.
Схема сертификации 3.



Руководитель органа

подпись

Н.Е. Теренина

инициалы, фамилия

Эксперт

подпись

А.Н. Лукьянов

инициалы, фамилия

Сертификат не применяется при обязательной сертификации

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ
СЕРТИФИКАТ СООТВЕТСТВИЯ
(обязательная сертификация)

№ C-RU.LT46.B.00014
(номер сертификата соответствия)

ТР 0500798
(учетный номер бланка)

ЗАЯВИТЕЛЬ Автономная некоммерческая научно-образовательная организация ДВГТУ Научно-технический и внедренческий центр «Модернизация котельной техники». Адрес: 690600, г. Владивосток, ул. Пушкинская, д.10 корпус А оф. 114. ОГРН: 1022501289337.

ИЗГОТОВИТЕЛЬ Владивостокский филиал ОАО «Дальэнергомонтаж». Адрес: 690091 г. Владивосток ул. Фадеева 47.

ОРГАН ПО СЕРТИФИКАЦИИ

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ «КС СЕРТИФИКАТ»
105005, г. Москва, Пославников переулок, д. 9, тел. 956 83 90, факс 956 83 92; e-mail: zayavki@ksset.ru. ОГРН: 1067746698337.
Аттестат рег. № РОСС RU.0001.11146 выдан 13.07.2009г. Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии.

**ПОДТВЕРЖДАЕТ, ЧТО
ПРОДУКЦИЯ**

Газо-мазутный циклонно-вихревой предтопок, ЦВП-25; ЦВП-35; ЦВП-65
выпускаемый по ТУ 3113-001-20779221-2010.

Серийный выпуск.
**СООТВЕТСТВУЕТ ТРЕБОВАНИЯМ
ТЕХНИЧЕСКОГО РЕГЛАМЕНТА
(ТЕХНИЧЕСКИХ РЕГЛАМЕНТОВ)**

Указание технического регламента (технических регламентов), на соответствие требованиям которого (которых) проводится сертификация

Технический регламент о безопасности машин и оборудования
(Постановление Правительства РФ от 15.09.2009 N 753)

**ПРОВЕДЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
(ИСПЫТАНИЯ) И ИЗМЕРЕНИЯ**

Протокол испытаний № 13-32-10/10 от 27.10.2010 г.
(Испытательный центр ЗАО «СПЕКТР – К», рег. № РОСС RU.0001.21MM02 от 12.05.2010, адрес: 156019, Россия, г. Кострома, ул. П.Щербины, дом 9.)

ПРЕДСТАВЛЕННЫЕ ДОКУМЕНТЫ

Документы, представленные заявителем в орган по сертификации в качестве доказательства соответствия продукции требованиям технического регламента (технических регламентов)

Паспорт 49-01.00.00.000 ПС
Схема сертификации 1с.

СРОК ДЕЙСТВИЯ СЕРТИФИКАТА СООТВЕТСТВИЯ с 28.10.2010 по 27.10.2013



Руководитель
(заместитель руководителя)
органа по сертификации
подпись, инициалы, фамилия

Е.А. Горностаева

Эксперт (эксперты)
подпись, инициалы, фамилия

Г.Н. Сеницин

Приложение Б
Протокол №05-054-146-2003
(обязательное)

ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО
ОБОРУДОВАНИЯ ОАО "НПО ЦКТИ"
(аккредитован Госстандартом России № РОСС RU0001. 22МХ02)

Лист 1
Всего листов 6

УТВЕРЖДАЮ

Первый зам. генерального директора
Чавчанидзе Е.К.

“ ”

2003г.



ПРОТОКОЛ № 05 - 054 - 146 - 2003

Типовые испытания котла ПТВМ-100-2В(ст.№2) с циклонными
предтопками Якутской ТЭЦ при сжигании природного газа

Санкт-Петербург
2003г.

1. ХАРАКТЕРИСТИКА ИСПЫТЫВАЕМОЙ ПРОДУКЦИИ

1.1. Котел водогрейный ПТВМ-100 с воздухоохлаждаемыми циклонно-вихревыми предтопками.

Разработчик предтопка – Центр «Модернизация котельной техники», г. Владивосток,
Черт. № 155-010000000СБ.

Изготовитель предтопка – «Сибэнергомаш», г. Барнаул.

Реконструкция газораздающей части - «Сибэнергомаш», г. Барнаул.

Изготовитель газораздающей части - «Сибэнергомаш», г. Барнаул.

Циклонно-вихревой предтопок предназначен для раздельного сжигания дизельного топлива и природного газа в топке котла ПТВМ-100 (ст.№2) Якутской ТЭЦ.

1.2. Предтопки в количестве 2 штук установлены соосно на боковых экранах котла вместо 16 нерегулируемых газомазутных горелок с индивидуальными вентиляторами.

1.3. Циклонно-вихревой предтопок (рис. 1) состоит из распределительного воздушного короба (1), в котором установлены сопловые аппараты (2). Закрутка воздуха осуществляется тангенциально. Раздающий газовый коллектор (3) выполнен двухсекционным. Центральная часть, обеспечивающая радиальный вдув газа за завихритель (4) двумя рядами отверстий $\varnothing 12$ мм, питается индивидуальным газопроводом Ду 80 (5). Кольцевая часть коллектора обеспечивает подачу газа к специальным соплам с насадками, т.е. приторцевую подачу газа в камеру сгорания (6) предтопка. Она питается двумя газопроводами Ду 100 (7).

Сжигание аварийного топлива (дизельного) осуществляется одной форсункой ЦМКТ производительностью 6 т/ч, установленной по оси предтопка.

2. ЦЕЛЬ ИСПЫТАНИЯ.

Испытания котла ПТВМ-100 проводились с целью определения соответствия показателей его работы расчетным и нормативным показателям (ГОСТ 21563-93, ГОСТ 21204-97, ГОСТ 12.1.003-83), а также соответствия фактических размеров конструкторской документации.

3. УСЛОВИЯ ИСПЫТАНИЙ

Испытания котла с циклонно-вихревыми предтопками проведены специалистами ОАО «НПО ЦКТИ» по договору № 178-02/5 от 20 марта 2003г. с участием специалистов АННОО «ЦМКТ» и режимной группы ПТО Якутской ТЭЦ.

Место проведения испытаний водогрейного котла ПТВМ-100-2В (ст.№2) с циклонно-вихревыми предтопками - Якутская ТЭЦ ОАО АК «Якутскэнерго».

Дата проведения испытаний – апрель 2003г.

Испытания проводились по программе и методике, которые соответствуют требованиям ГОСТ 29134-97 «Горелки газовые промышленные. Методы испытаний».

Параметры работы котла (теплопроизводительность, температура и давление прямой и обратной сетевой воды, температура воздуха и уходящих газов, разрежение в топке, давление газа и воздуха перед предтопками, расход газа на котел) определялись по приборам штатного контроля теплового и местного щитов. Состав дымовых газов в контрольном сечении определялся с помощью газоанализатора КГА-8. Уровень звука в зоне обслуживания горелок замерялся шумомером ВШВ-003. Все приборы находились в исправном состоянии и прошли госповерку в установленном порядке в 2002г.

Конструкция предтопка, его отдельных узлов и деталей соответствует требованиям безопасности (исключение самопроизвольных ослаблений соединений, утечки топлива, обеспечение визуального наблюдения за факелом и т.д.).

4. ОСНОВНЫЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ РАЗМЕРЫ ПРЕДТОПКА.

Наименование определяемого размера	Ед. измерений	Размер по чертежу	Размер по изготовлению	Соответ
Диаметр амбразуры циклона	мм	1260	1260	Соответ
Количество и диаметр газораздающих труб циклона	мм	1 тр. Ø89 x4 2 тр. Ø108 x4	1 тр. Ø89 x4 2 тр. Ø108 x4	Соответ.
Газораздающие сопла	мм	12 отв.Ø9 12 отв.Ø13 24 отв.Ø20	12 отв.Ø9 12 отв.Ø13 24 отв.Ø20	Соответ
Габариты воздухоподводящего короба	мм x мм	2330 x 630	2330 x 630	Соответ
Габариты циклона: длина	мм	2450	2450	Соответ.
высота	мм	1262	1262	

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ КОТЛА С ЦИКЛОННЫМИ ПРЕДТОПКАМИ.

Наименование показателей	Един. изм.	Заявлен. или нормир. величина	Фактическая величина							Примечание
			1	2	3	4	5	6	7	
Агрегат, на котором проводились испытания			Водогрейный котел ПТВМ-100-2В, ст. №2							
Теплопроизводительность котла	МВт	116,3	123	113	102	86	64	53	37	
Расход воды	т/ч		1470	1470	1470	1460	1450	1480	1450	
Давление воды на входе	МПа		1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	
Давление воды на выходе	МПа		1,47							
Температура воды на входе	°С		55	55	54	54	53	52	52	
Температура воды на выходе	°С		127	121	114	105	91	82,5	74	
Топливо			Природный газ							
Расход топлива (0°С, 101,3 кПа)	м³/ч		13420	12300	11030	9050	6900	5650	3920	

ПРИМЕЧАНИЯ :

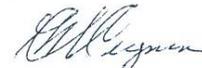
1. Нормативный диапазон регулирования теплопроизводительности водогрейных котлов от 30 до 100% (ГОСТ 21563-93) на данном котле с циклонными предтопками обеспечивается комбинированным качественно-количественным способом регулирования нагрузки (при уменьшении теплопроизводительности котла ниже 55% от номинальной один из двух предтопков отключается). До реконструкции регулирование теплопроизводительности котла производилось последовательным отключением горелок.
2. Поскольку ГОСТ 21563-93 не регламентирует выбросы оксида углерода для оценки допустимости полученных выбросов углерода на испытываемом водогрейном котле приняты норматив для котельных установок энергетических блоков 80 – 1200 МВт по ГОСТ Р 50831-95.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Котел ПТВМ-100-2В (ст.№2) с циклонными предтопками по черт. № 155-010000000СБ (разработчик – Центр “Модернизация котельной техники» г. Владивосток, изготовитель - ОАО «Сибэнергомаш» г. Барнаул) соответствуют технической документации и требованиям ГОСТ 21563-93, ГОСТ 21204-97, ГОСТ Р 50831-95, ГОСТ 12.1.003-83 (с учетом примечаний 1,2 к таблице технических характеристик).

Разрешается применение котла ПТВМ-100-2В (ст.№2) с циклонными предтопками Якутской ТЭЦ.

Зам. заведующего отделением котельных установок

 Н.Г. Жмерик

Зав. лабораторией сжигания жидких и газообразных топлив

 Н.С. Шестаков

Руководитель работы,
ст. научный сотрудник



В.А. Асосков

Приложение В
Протокол №256 и 1781/1
(обязательное)

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ “ЭКОАНАЛИТИКА”

Экоаналитическая лаборатория

Аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.516028 действителен до 02.02.2015 г.

Адрес: 690091 г. Владивосток, Океанский пр., 29/31. Тел/факс: (4232) 40-16-28; тел: 92-05-68

ПРОТОКОЛ № 256

результатов исследований качества промышленных выбросов в атмосферу
(протокол на 1-м листе)

Заказчик: Центр «МКТ»

Номер заказа лаборатории: ЭАЛ - 256

Дата проведения исследований: 05.05.2010 г.

Наименование предприятия: филиал ПТС ОАО «ДГК», КЦ-1

Место отбора пробы: Газоход правый котла КВГМ – 100 МЦ ст. № 5

Пара метры газообразных потоков: динамическое давление газа – 27 Па; площадь газохода – 2,28 м²; температура отходящих газов – 127°С; линейная скорость газового потока – 5,7 м/с; расход газа – 9,08 м³/с; влажность – 4,25%; концентрация O₂ – 11,5%.

№ п/п	Показатель	Методика анализа	Результат анализа, г/м ³ *	Погрешность ±Δ _{абс.}
1.	Азота оксид	ПНДФ 13.1:2:3.19-98	0,125	0,019
2.	Азота диоксид	ПНДФ 13.1:2:3.19-98	0,018	0,003
3.	Серы диоксид	ПНДФ 13.1:2:3.19-98	1,025	0,154
4.	Углерода оксид	ПНДФ 13.1:2:22-98	0,014	0,004
5.	Сажа (как взвешенные вещества)	ГОСТ Р ИСО 9096-2006	0,075	0,011
6.	Ванадий	М-03-505-120-04	0,166 мг/м ³	0,042 мг/м ³

Примечание:

* Фактические результаты анализа приведены к нормальным условиям и представлены, как средние арифметические результатов определений, признанных приемлемыми.
Отбор проб в промышленных выбросах производился в соответствии с требованиями НД: ГОСТ Р 50820, ПНДФ 12.1.2-99.
Параметры газообразных потоков определяли в соответствии с требованиями НД: ГОСТ 17.2.4.07-90, ГОСТ 17.2.4.06-90.

Протокол № 256 от 05.05.2010 г.
Стр. 1 из 2

Для корректного сопоставления опытных и расчетных данных выбросов загрязняющих веществ в атмосферу (г/с) для тепловых электростанций и котельных в соответствии с требованиями НД: ГОСТ 50831-95, РД 34.02.305-98 массовые концентрации пересчитываются на сухой газ (влажность - 4,25%) и коэффициент избытка воздуха 1,4 (концентрация O_2 - 11,5%).

№ п/п	Показатель	Сi (dry), г/м ³ **	Сi 1,4 (dry), г/м ³ ***	Выброс загрязняющих веществ в атмосферу, г/с
1.	Азота оксид	0,131	0,207	1,8796
2.	Азота диоксид	0,019	0,030	0,2724
3.	Серы диоксид	1,070	1,691	15,3543
4.	Углерода оксид	0,015	0,024	0,2179
5.	Сажа (как взвешенные вещества)	0,078	0,124	1,1237
6.	Мазутная зола (в пересчете на ванадий)	0,173 мг/м ³	0,274 мг/м ³	0,00249

Примечание:

** Сi (dry) – массовая концентрация в пересчете на сухой газ

***Сi 1,4 (dry) - массовая концентрация при $\alpha = 1,4$

Дата выдачи результатов анализа: 13.05.2010г.



Заведующий ЭАЛ

И.Г. Лисицкая

Протокол № 256 от 05.05.2010 г.

Стр. 2 из 2

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ «ЭКОАНАЛИТИКА»

Экоаналитическая лаборатория

Адрес: 690091 г. Владивосток, Океанский пр., 29/31. Тел: (423) 292-05-68

ПРОТОКОЛ № 1781/1

результатов исследований качества промышленных выбросов в атмосферу
(протокол на 1-м листе)

Заказчик: Центр «МКТ»
 Номер заказа лаборатории: ЭАЛ – 1781
 Номер акта отбора проб: 247В
 Дата проведения исследований: 25.12.2013 г.
 Наименование предприятия: филиал ПТС ОАО «ДГК», КЦ-1.
 Место отбора пробы: КВГМ-100, СТ № 5, (нагрузка – 66 Г кал/ч)
 Параметры газопылевых потоков: динамическое давление газа – (– 5,05 мм. рт. ст.); температура отходящих газов – 106°С; линейная скорость газового потока – 10,0 м/с; расход газа – 16,43 м³/с; влажность – 1,9%; концентрация O₂ – 8,0 %.

№ п/п	Показатель	Методика анализа	Результат анализа	
			г/м ³ *	±Δ _{абс.}
1.	Азота оксид	ПНД Ф 13.1:2:3.19-98	0,0108	0,0016
2.	Азота диоксид	ПНД Ф 13.1:2:3.19-98	0,0664	0,0100
3.	Серы диоксид	ПНД Ф 13.1:2:3.19-98	0,0010	0,0003
4.	Углерода оксид	ПНД Ф 13.1:2.22-98	0,0010	0,0002
5.	Взвешенные частицы (пыль)	ГОСТ Р ИСО 9096-2006	< 20	–
6.	Сажа	ФР.1.31.2001.00384	< 4,0	–

Примечание:

- * Фактические результаты анализа приведены к нормальным условиям и представлены, как средние арифметическое результатов определений, признанных приемлемыми.
- Отбор проб в промышленных выбросах производился в соответствии с требованиями НД: ГОСТ Р 50820, ПНД Ф 12.1.2-99.
- Параметры газопылевых потоков определяли в соответствии с требованиями НД: ГОСТ 17.2.4.07-90, ГОСТ 17.2.4.06-90.

Протокол № 1781/1 от 24.01.2014 г.

Стр. 1 из 2



Заявитель: ЭУП



У.Н. Далева

Дата выдачи результатов анализа: 24.01.2014 г.

***С₁ I¹⁴ (φ₁₄) - массовая концентрация пыли α = I¹⁴

** С₁ (φ₁₄) - массовая концентрация в пересчете на сухой газ

Примечание:

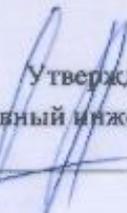
φ	Связь	-	-	-
2	Взвешенные аэрозоли (пыль)	-	-	-
4	Диоксида оксид	0'0010	0'0015	0'0121
3	Серы диоксид	0'0010	0'0015	0'0121
5	Узола диоксид	0'0021	0'0282	0'0121
1	Узола оксид	0'0110	0'0158	1'2828
№ п/п	Показатель	L ^M ₅ ** С ₁ (φ ₁₄)	L ^M ₅ *** С ₁ I ¹⁴ (φ ₁₄)	L ^{1/5} Вредос. эквивалентных веществ в атмосфере

I¹⁴ (α) и коэффициенты излучения воздуха I¹⁴ (концентрация O₂ - 8'10 α⁰)

коэффициент в соответствии с действующим НД: ГОСТ 20831-02, ВД 34.05.302-08 массовые концентрации вредных веществ на сухой газ (вязкость -

Для корректного сопоставления оптических и вредных данных вредных веществ эквивалентных веществ в атмосфере (L^{1/5}) для тепловых электростанций и

Приложение Г
 Технические условия ТУ 3110-001-44573731-2013 (введены впервые)
 (обязательное)

КРАСНОЯРСКИЙ КОТЕЛЬНЫЙ ЗАВОД Подпись и Дата		ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ КРАСНОЯРСКИЙ КОТЕЛЬНЫЙ ЗАВОД 660013, Россия, Красноярский край, г. Красноярск, ул. Кишиневская, 16 тел. (391) 266-93-86, факс 266-92-83 E-mail: info@kraskz.ru ИНН 2462023415 КПП 246201001 ОКПО 44573731 ОГРН 1022402060889
	<p>Утверждаю: главный инженер С.В. Шклавцов</p>  	
<p>Котел водогрейный КВГМ-100 МЦ</p> <p>Технические условия ТУ 3110-001-44573731-2013 (введены впервые)</p>		
Дата введения 15.04.2013г.		
	Директор ООО «Энергосервис МКТ» Главный конструктор	 К.А. Штым
		
	Красноярск – Владивосток 2013	

Приложение Д
Акт внедрения
(обязательное)

УТВЕРЖДАЮ
Директор СП «Приморские тепловые сети»
филиала «Приморская генерация» АО ДГК

Д. А. Вишняков

10.10.2016 г.

АКТ

внедрения результатов работы на соискание учёной степени кандидата технических наук Соловьёвой Татьяны Алексеевны на тему: «Совершенствование процесса сжигания природного газа в котельных установках с циклонными предтопками»

Мы, нижеподписавшиеся: директор СП «Приморские тепловые сети» Вишняков Д.А., главный инженер Старцев А. А., и зам. главного инженера по эксплуатации Басырев М. В. составили настоящий акт о том, что внедрённая циклонно-вихревая технология сжигания природного газа на 12 котельных установках, позволила достичь заявленных заводом-изготовителем технико-экономических показателей и улучшить экологические характеристики. Мероприятия по развитию поверхностей нагрева котлов способствовали повышению мощности котлов. На котлах КВГМ-100-150 разработана и реализована схема циркуляции «противоток» с возможностью перехода на прямоток, которая позволяет увеличить КПД котла при работе на нагрузках близких к максимальным.

Универсальность циклонно-вихревых предтопок существенно упростила модернизацию теплоисточников при переводе на сжигание природного газа.

Главный инженер

 А. А. Старцев

Зам. главного инженера

 М. В. Басырев