

На правах рукописи



РЯБОВ
Георгий Александрович

**НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ
СЖИГАНИЯ ТВЁРДЫХ ТОПЛИВ В ЦИРКУЛИРУЮЩЕМ
КИПЯЩЕМ СЛОЕ**

Специальность 05.14.14 – «Тепловые электрические станции,
их энергетические системы и агрегаты»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации
на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва
2016

Работа выполнена в Открытом акционерном обществе "Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени Теплотехнический научно-исследовательский институт" (ОАО "ВТИ").

Официальные оппоненты:

Росляков Павел Васильевич - доктор техн. наук, профессор, профессор кафедры ПГТ ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»;

Рыжков Александр Филиппович - доктор техн. наук, профессор, профессор кафедры ТЭС ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого президента России Б. Н. Ельцина»;

Зайченко Виктор Михайлович – доктор техн. наук, старший научный сотрудник, заведующий отделом «Распределенные энергетические системы» Объединенного института высоких температур РАН.

Ведущая организация – ОАО «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова» (ОАО «НПО ЦКТИ»)

Защита состоится "10" ноября 2016 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д.222.001.01 при ОАО "Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени Теплотехнический научно-исследовательский институт" (ОАО "ВТИ") по адресу: 115280, г. Москва, ул. Автозаводская, 14.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ОАО "ВТИ".

Автореферат разослан " " 2016 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д.222.001.01,

доктор технических наук

 П. А. Березинец

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Технология сжигания твердых топлив в циркулирующем кипящем слое (ЦКС) начала свое развитие применительно к энергетическим установкам в конце 70-х годов прошлого века под влиянием ужесточающихся экологических требований. В настоящее время в мире эксплуатируется более 3000 котлов с ЦКС. Сооружен первый в России блок № 9 мощностью 330 МВт с котлом с ЦКС на Новочеркасской ГРЭС. Поставщиком котла с ЦКС для него является ОАО «ЭМАльянс», инжиниринг и значительная доля поставки выполняются компанией «Фостер-Уиллер». Опыт сооружения и пуска этого блока создаст условия для широкого внедрения технологии ЦКС в России. Рядом документов высокого уровня (Энергетическая стратегия России на период до 2030 года, одобренная Распоряжением Правительства Российской Федерации № 1715-Р от 13.11.2009 и др.) предусматривается внедрение технологии ЦКС и разработка отечественных котлов с ЦКС.

Технология сжигания твердых топлив в ЦКС является наукоемкой. Процессы гидродинамики топочного контура (контур циркуляции: топка, сепаратор, система возврата) и тесно связанные с ними процессы теплообмена, улавливания и возврата частиц – ключевые для организации эффективного низкотемпературного сжигания различных видов топлива и условий образования и подавления вредных выбросов. Поэтому комплексное исследование указанных вопросов представляется безусловно актуальным.

В России до сих пор не была разработана программа теплового расчета котлов с ЦКС. Использование известных программ расчета традиционных пылеугольных котлов, основанных на рекомендациях Нормативного метода расчета паровых котлов, может давать ошибочные результаты. Разработка обоснованного метода расчета топочного контура совершенно необходима для создания котлов с ЦКС.

Весьма актуальными также являются исследования процессов сжигания разных видов биомассы в котлах с кипящим слоем. Гидродинамические условия в топке и протекающие в ней сложные процессы, влияющие в частности на агломерацию частиц слоя, определяют надежность таких котлов.

В последнее время проявляется значительный интерес к исследованиям гидродинамики связанных между собой аппаратов с кипящим и циркулирующим кипящим слоем. Такие технологии применяются в полигенерирующих системах, в которых происходит пиролиз (газификация) в одном из аппаратов и дожигание кокса – в другом. При этом комбинируется выработка тепла и электроэнергии, получение полезных продуктов – синтетического газа и смол. Для этих систем крайне важна высокая и надежная циркуляция частиц между аппаратами. Связанные системы двух-трех реакторов используются в технологиях сжигания и газификации в химических циклах. Эти перспективные технологии могут быть наименее затратными для снижения выбросов двуокиси углерода от ТЭС.

Цель работы– создание научных и методических основ для разработки и внедрения в первую очередь для котлов ТЭС, установок с кипящим и циркулирующим кипящим слоем, обеспечивающих возможность эффективного сжигания широкой гаммы топлив с минимальными вредными выбросами.

Для реализации поставленной цели автором проведен комплекс экспериментальных и расчетно-аналитических исследований, разработана программа расчетов топочного контура, включая гидродинамику и теплообмен в топке, сепарацию частиц в различных уловителях, гидродинамику элементов систем возврата золы в топку, выполнены технико-экономические обоснования внедрения технологии ЦКС на ряде ТЭС при их техническом перевооружении.

Научная новизна. Впервые в РФ получены экспериментальные данные по гидродинамике топок с ЦКС на основе сформулированных критериев моделирования на холодных моделях, включая данные по профилю концентраций по высоте топки, профилю массовых потоков по ширине топки, улавливанию частиц в зоне выхода из топки (КПД улавливания на потолке) в зависимости от

скорости газов, массы слоя и размеров частиц. На основе собственных опытных данных и обобщения результатов зарубежных исследований разработана методика расчета гидродинамических показателей топок с ЦКС.

Получены новые данные по локальному теплообмену в зависимости от режимных факторов и характеристик частиц. Впервые показана взаимосвязь кондуктивного теплообмена с гидродинамикой топки и концентрацией частиц в пристенной зоне. На базе газокINETической модели предложена методика расчета теплообмена к настенным экранам топки котла с ЦКС.

Проведены исследования сепарации частиц в циклонах и швеллерковых сепараторах на различных установках. На их основе разработаны рекомендации по выбору конструктивных размеров циклонов и швеллерковых сепараторов, определению фракционного и общего КПД улавливания и сопротивления циклонов. Впервые исследованы условия движения в опускных стояках и пневмозатворах. Определены режимы перехода от нисходящего движения частиц в плотном слое к движению в оживленном слое. На базе исследований гидродинамики и теплообмена с учетом данных по условиям горения различных видов топлива, генерации и подавления вредных выбросов впервые в России разработана методика конструкторского расчета топочного контура котлов с ЦКС.

Впервые изучены вопросы агломерации слоя при сжигании кородревесных отходов в котле с кипящим слоем и разработаны рекомендации по предотвращению агломерации слоя и повышению надежности работы котлов с кипящим слоем. Впервые в России рассмотрены вопросы улавливания CO_2 с использованием технологий сжигания и газификации топлива в химических циклах.

Практическая значимость работы и внедрение её результатов

Результаты диссертационной работы нашли применение при разработке эскизных и технических проектов котельных установок с ЦКС, инвестиционных проектов технического перевооружения Шатурской, Череповецкой, Новочеркасской и Серовской ГРЭС, Мурманской и Дубровской ТЭЦ, сооружении

Новоростовской ГРЭС и других объектов. Под руководством автора выполнены расчеты технических показателей блока № 9 Новочеркасской ГРЭС, включая эффективность сжигания АШ и тощего кузнецкого угля при различных нагрузках котла. На котле с кипящим слоем Архангельского ЦБК внедрены рекомендации по предотвращению агломерации слоя. Работы автора использованы при оптимизации режимов сжигания твердых бытовых отходов в печах с вихревым кипящим слоем.

Разработанные автором методы расчета котлов с ЦКС явились основой для проектирования отечественных котлов с ЦКС для блоков 225 и 330 МВт, а также котлов с ЦКС для перспективных угольных ТЭЦ.

На защиту вносятся следующие основные положения:

Комплекс знаний, описывающих закономерности процессов, протекающих в топочном контуре котлов с ЦКС и разработанные на их основе методы и программы расчетов, обеспечивающие в совокупности возможность достоверных расчетов при проектировании, освоении и эксплуатации таких котлов. Этот комплекс включает в себя методики, экспериментальные данные и результаты расчетных исследований.

методики:

- расчета гидродинамических показателей топок с ЦКС, включая профиль концентраций по высоте топки, массовые подъемные и опускные потоки частиц, расход частиц на входе в сепараторы (эффективность улавливания в верхней части топки);
- расчета теплообмена к настенным экранам топки котла с ЦКС, учитывающую влияние течения в пристенной зоне на кондуктивную составляющую теплообмена;
- расчета и рекомендации по выбору конструктивных размеров циклонов и швёллерковых сепараторов;
- определения фракционного и общего КПД улавливания и сопротивления циклонов;

- расчета систем возврата частиц с определением конструктивных размеров опускаемых стояков и пневмозатворов и рекомендации по режимам псевдоожижения;

- расчета профиля давлений в системах со связанными между собой реакторами с КС и ЦКС;

- конструкторского расчета топочного контура котлов с ЦКС;

экспериментальные данные:

- по гидродинамике топок с ЦКС на основе сформулированных критериев моделирования на холодных моделях;

- по локальному теплообмену к настенным экранам топок котлов с ЦКС;

- по сепарации частиц в циклонах и швеллерковых сепараторах;

- по условиям движения в опускаемых стояках и пневмозатворах с определением режимов перехода от нисходящего движения частиц в плотном слое к движению в ожиженном слое;

- по агломерации слоя при сжигании коро-древесных отходов в котле с кипящим слоем;

результаты расчетных и аналитических исследований:

- оптимальных условий использования технологии ЦКС для технического перевооружения ТЭС России;

- возможности применения передовых технологий сжигания и газификации топлив в химических циклах для улавливания CO₂.

Основные результаты работы, излагаемые в диссертации, неоднократно докладывались и получили высокую оценку на крупных международных научных конференциях по технологии ЦКС не только в России, но и за рубежом: 15-й Международной конференции по сжиганию в кипящем слое (FBC-15), Саванна, США, 1999 г.; 6-й Международной конференции по технологии ЦКС (CFB-6), Вюрцбург, Германия, 1999 г.; 7-й Международной конференции по технологии ЦКС (CFB-7), Ниагара, Канада, 2002 г.; 17-й Международной конференции по сжиганию в кипящем слое (FBC-17), Джексонвилл, США, 2003 г.;

8-й Международной конференции по технологии ЦКС (CFB-8), Ганзгоу, Китай, 2005 г.; 9-й Международной конференции по технологии ЦКС (CFB-9), Гамбург, Германия, 2008 г.; 20-й Международной конференции по сжиганию в кипящем слое, Ксиан, Китай, 2009 г.; 10-й Международной конференции по технологии ЦКС (CFB-10), Санривер, США, 2011 г.; 11-й Международной конференции по технологии ЦКС и псевдоожигу (CFB-11), 2014г., Пекин, Китай; 22-й Международной конференции по конверсии топлив в кипящем слое (FBC-22), 2015г., Турку, Финляндия, Минском международном форуме по теплообмену, Минск, Белоруссия в 1996, 2000 и 2012 гг.; Международной научно-практической конференции 80-летия уральской теплоэнергетики, Екатеринбург, 2003г.; Международной научно-практической конференции «Угольная теплоэнергетика: проблемы реабилитации и развития», Алушта и Киев, Украина в 2006, 2008, 2010, 2011, 2013 и 2014 гг.; Международной научно-практической конференции «Технологии эффективного и экологически чистого использования угля», Москва, 2009г.; Международной научной конференции «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики», Алушта, Украина, 2010 г.; 8-й Всероссийской конференции с международным участием «Горение твердого топлива», 2012г., Новосибирск; 8-м Всероссийском семинаре ВУЗов по теплофизике и энергетике, 2013г., Екатеринбург; 2-й Международной научно-технической конференции «Использование твердых топлив для эффективного и экологически чистого производства электроэнергии и тепла», 2014г., Москва; 9-м Всероссийском семинаре ВУЗов по теплофизике и энергетике», 2015г., Казань; 9-й Всероссийской конференции с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения», 2015г., Новосибирск.

Степень достоверности, апробации и обоснованности результатов работы

Достоверность и обоснованность результатов работы достигнуты последовательностью вывода основных положений диссертации: аналитические исследования процессов гидродинамики, теплообмена и сепарации частиц в топоч-

ном контуре аппаратов с циркулирующим кипящим слоем, а также условий моделирования и переноса данных на промышленные объекты; экспериментальные исследования на холодных и огневых установках; обобщение данных с учетом литературных данных и разработка рекомендаций по расчету элементов топочного контура; создание единой расчетной модели для конструкторского расчета котла с ЦКС, технико-экономическое обоснование применения технологии ЦКС для технического перевооружения ТЭС России на базе разработок проектов котлов с ЦКС с использованием разработанных методов расчета и расширение области исследованных процессов на передовые системы сжигания топлива в химических циклах.

Результаты работы неоднократно докладывались и получили высокую оценку на крупнейших международных конференциях по технологии ЦКС.

Личный вклад автора заключается в:

- разработке методик моделирования и исследований гидродинамики, теплообмена и сепарации частиц;
- руководстве и непосредственном участии в проведении экспериментальных исследований на стендовых установках и промышленных объектах;
- обобщении данных и разработке рекомендаций по расчету элементов топочного контура установок с ЦКС;
- разработке методики теплового расчета котлов с ЦКС и рекомендаций по проектированию котлов с кипящим и циркулирующим кипящим слоем;
- разработке технических решений по котлам с ЦКС для технического перевооружения ТЭС России и технико-экономическом анализе условий наиболее эффективного внедрения котлов с ЦКС;
- проведении аналитических и расчетно-экспериментальных исследований передовых технологий сжигания и газификации топлива в химических циклах.

Публикации по работе. Основное содержание выполненных исследований, научных и методических разработок изложено в 37 журнальных статьях

(из них 34 в изданиях ВАК), 53 докладах в сборниках международных конференций (из них 27 на английском языке), 4 статьях в сборниках научных статей, 4 информационных сборниках и учебных пособиях и 5 описаниях к авторским свидетельствам.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, 10 глав и заключения, изложенных на 291 странице машинописного текста, содержащих 106 рисунков и 7 таблиц, а также списка цитируемой литературы из 276 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, поставлена цель работы, показана ее новизна, практическая ценность и реализация результатов, даны сведения об апробации работы, публикациях, показан личный вклад автора и представлены результаты, выносимые на защиту.

В первой главе рассматриваются особенности технологии сжигания топлива в кипящем и циркулирующем кипящем слое. Рассмотрено состояние и развитие технологии ЦКС в мире. В настоящее время в мире эксплуатируется более 3000 котлов с ЦКС и КС. В Европе наибольший прогресс с внедрением котлов с ЦКС достигнут в последнее время в Польше (более 15 котлов для блоков мощностью более 100 МВт; из них три блока по 235 МВт и еще три по 260 МВт). В 2009 г. введен в эксплуатацию крупнейший в мире блок мощностью 460 МВт с котлом ЦКС на ТЭС в Ложице. Китай является самым крупным рынком использования технологии ЦКС. Установленная мощность блоков с котлами с ЦКС составляет 102 ГВт, из них 1019 котлов с паропроизводительностью от 120 до 1065 т/ч.

Выполнен анализ новых направлений сжигания и газификации твердых топлив в установках со связанными между собой реакторами. Это установки так называемого сжигания в химическом цикле, когда переносчиком кислорода

к топливу является не воздух, а оксид металла и технологии полигенерирующих систем для выработки электроэнергии, тепла и получения полезных продуктов (генераторный газ, смолы, моторные топлива).

Вопросы гидродинамики топочного контура (контур циркуляции: топка, сепаратор, система возврата) и тесно связанные с ней вопросы теплообмена, улавливания и возврата частиц являются ключевыми для организации эффективного низкотемпературного сжигания различных видов топлива и условий образования и подавления вредных выбросов. Исходя из выполненного анализа литературных источников по гидродинамике реакторов (топок) с ЦКС, можно заключить, что установки с ЦКС работают в режимах турбулентного слоя и быстрого слоя, причем в их нижней части плотность слоя почти постоянна и зависит от скорости газов. Далее по высоте топки плотность падает и достигает значений 4–20 кг/м³ на входе в сепараторы. Профиль концентраций по сечению установок неравномерен с опускным движением частиц вблизи стен. Имеются зависимости для расчета аксиального профиля концентраций и расхода циркулирующего материала, многие из них не учитывают сепарации частиц в зоне входа в циклон, которая зависит от конструкции и расхода частиц. Перспективным представляется использование степенной зависимости для профиля концентраций по высоте топки с учетом коэффициента турбулентной диффузии. Важным является проведение исследований влияния режимных и конструктивных факторов на профиль концентраций по ширине и высоте установок с определением подъемных и опускных потоков, на базе которых необходимо разработать инженерную модель расчета гидродинамики топок с ЦКС.

Для расчета суммарного теплообмена к экранам топки котла с ЦКС наиболее существенно определение кондуктивной составляющей. В качестве основы для инженерной разработки может быть принята газокINETическая модель. Необходимо установить зависимость для определения влияния неравномерности концентраций потока по сечению в надслоевом пространстве. Пока еще та-

ких исследований недостаточно для получения описания процессов в пристенной зоне.

В результате анализа данных по сепарации частиц в системах с циркулирующим кипящим слоем можно заключить, что эффективность улавливания оказывает решающее влияние на состав и расход циркулирующего материала. В качестве основы для дальнейших расчетных разработок может быть использована трехзонная модель течения. При высокой концентрации потока эффективность простых ударно-инерционных сепараторов существенно возрастает, что делает актуальным исследование таких конструкций сепараторов.

Выполненный анализ работы систем возврата золы установил, что для разработки методики расчета этих систем важными являются условия начала ожигания в стояках и затворах и расчет скорости скольжения, определяющий режим движения в стояке. Необходимо исследовать режимы работы пневматических клапанов с определением требуемого расхода ожигающего агента при работе клапанов в контуре циркуляции с изменяющимся перепадом давления в реакторах и сопротивлением циклонов.

Вопросы гидродинамики связанных между собой аппаратов с КС и ЦКС имеют большое значение для организации процесса сжигания и газификации топлива с сепарацией CO_2 в химических циклах, а также полигенерирующих системах с пиролизом и дожиганием полукокса. Для решения этих проблем требуется разработка новых методов моделирования и экспериментального контроля процессов в элементах топочного контура котлов с ЦКС.

Разработка и обоснование достоверного метода расчета топочного контура совершенно необходимы для создания котлов с ЦКС. Эта разработка на базе собственных исследований и обобщения литературных данных является основной задачей работы. При ее решении требовалось также сравнить результаты расчетов с опытными данными по реальным котлам, т. е. провести верификацию расчетных моделей.

Еще одна задача исследований – изучение особенностей сжигания различных видов биомассы и отходов, в частности агломерации слоя при наличии в золе биомассы щелочных компонентов.

Для создания предпосылок практического использования технологии необходимо было выполнить технико-экономические сравнения блоков с котлами с ЦКС и пылеугольных, определить влияние разных факторов, включая качество топлива и требования к ограничению вредных выбросов на показатели энергоблоков и выявить условия наиболее эффективного применения технологии ЦКС в России.

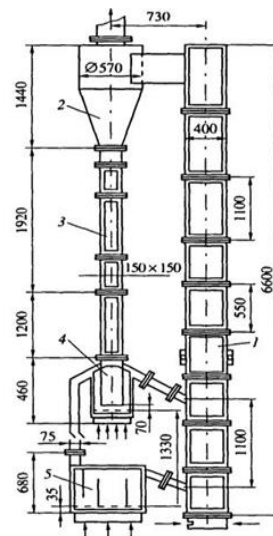
Важной задачей являлось проведение первых в России исследований гидродинамики связанных между собой реакторов для технологий улавливания CO_2 с использованием химических циклов, а также полигенерирующих систем с получением электроэнергии, тепла и полезных продуктов.

Вторая глава посвящена исследованиям процессов и разработке метода расчета гидродинамики топки с ЦКС. Бóльшая часть известных работ по исследованию гидродинамики топок выполнена на «холодных» моделях. Указанные модели обладают рядом преимуществ, связанных с возможностью визуальных наблюдений, относительной простотой организации измерений и небольшими затратами на изучение влияния изменения конструктивных элементов на процессы в моделях котла. Для получения представительных результатов при проведении исследований на изотермических моделях. Нужно корректно выбрать высоту и сечение модели, скорость огибающего воздуха и характеристики используемого материала (размер частиц и их плотность). В диссертационной работе подробно рассмотрено влияние различных факторов на основные показатели гидродинамики моделей аппаратов с ЦКС и даны рекомендации по выбору геометрических параметров, режимных факторов и характеристик материала слоя. Существенным является поддержание близких значений порозности в верхней части модели, которая обеспечивает подобные значения отношения массовых потоков частиц и газа. При этом возможно использование

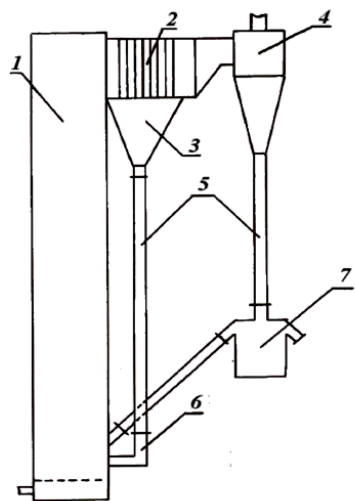
близких скоростей газов и характерных размеров частиц и их плотности в пределах материалов группы «В» по диаграмме Гелдарта.

Следует также использовать геометрические размеры моделей с ограничениями по минимальным диаметрам (площади) и высоте установки. Приведенные подходы были использованы при разработке крупной аэродинамической установки и определении режимных характеристик проведения исследований. Первоначальная схема этой установки приведена на рисунке 1.

Опыты проводились в диапазоне скоростей воздуха от 3 до 7 м/с при различной массе слоя. В качестве материала для загрузки стенда использовались песок (истинная плотность 1450–1580 кг/м³, средний размер по поверхности от 0,3 до 0,17 мм) и анионит (плотность 1240 кг/м³ и средние размеры 0,8 мм; 0,65; 0,5; и 0,2 мм).



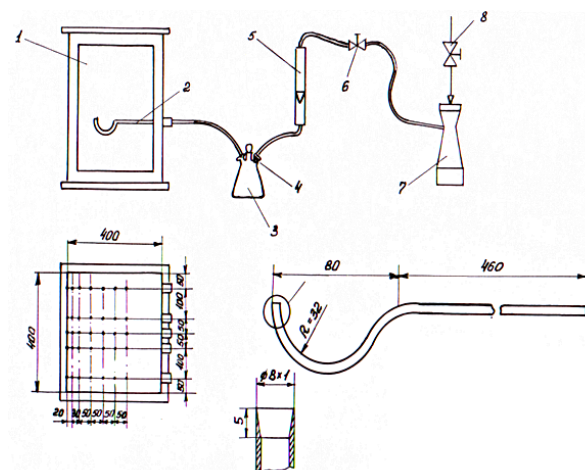
1 – модель топки; 2 – циклон; 3 – опускной стояк;
4 – пневмозатвор; 5 – модель теплообменника
Рисунок 1 – Схема аэродинамической установки



1 – модель топки; 2 – швеллерковый сепаратор;
3 – бункер под сепаратором; 4 – циклон; 5 –
опускные стояки; 6 – L-клапан; 7 – пневмозатвор
Рисунок 2 – Схема модернизированной аэродина-
мической установки с использованием швеллерко-
вого сепаратора и L-клапана

Установка неоднократно реконструировалась для решения конкретных задач, в частности, отдельно исследовались новые конструкции пневмозатворов, были проведены опыты с различным сечением входа в циклон, между топкой и циклоном устанавливался швеллерковый сепаратор с бункером и своим опускным стояком с L-клапаном (рисунок 2).

Для определения локальных массовых потоков частиц в восходящем и нисходящем потоках в модели топки использовалась система отбора проб (рисунок 3). Схема отбора проб включает в себя «S»-образный пробоотборник, позволяющий отбирать пробу восходящего и нисходящего потоков в одной и той же точке, линию отвода потока с фильтром и сборной емкостью, подключенной на выходе из фильтра к эжектору.



1 – секция модели топки; 2 – пробоотборник; 3 – осадительная камера; 4 – матерчатый фильтр; 5 – ротаметр; 6 – регулирующая арматура; 7 – эжектор; 8 – подвод воздуха высокого давления

Рисунок 3– Схема определения локальных массовых потоков

Использовался также разработанный в институте теплофизики СоРАН А. Л. Евсеевым дифференциальный доплеровский анемометр с волоконными световодами (ЛДВА), предназначенный для измерения скорости и концентрации частиц в двухфазных потоках с высокой концентрацией дисперсной фазы.

Интерес представляют данные по характерным размерам частиц по сечению установки в надслоевом пространстве. Оказалось, что изменение среднего размера частиц по ширине установки невелико. В опускном потоке как вблизи стен, так и в центральной зоне количество крупных фракций выше, чем в подъемном потоке. Для режима ЦКС характерной слабая зависимость размеров частиц по высоте надслоевого пространства. При этом фракционный состав частиц, движущихся вверх в пристенной зоне и центре потока, одинаков. В опускном потоке вблизи стен движутся несколько более крупные частицы, чем падающие в центральной зоне.

Типичный профиль концентраций по высоте установки при использовании песка и скорости воздуха около 5,5 м/с и разных массах слоя представлен на рисунке 4.

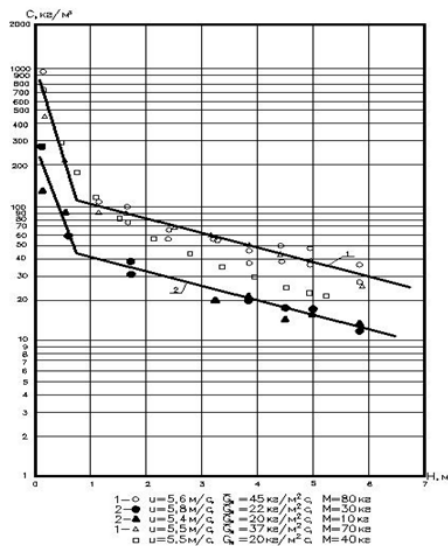


Рисунок 4– Типичный профиль концен-траций по высоте установки

При построении зависимости в логарифмических координатах можно выделить две зоны: зона турбулентного слоя в нижней части и зона надслоевого пространства. Увеличение массы слоя (перепада давлений в модели) приводит к росту концентраций также, как и увеличение скорости воздуха.

Для обобщения была принята степенная зависимость изменения концентрации ρ_i , кг/м³, по высоте h_i топки и определены опытные коэффициенты:

$$\rho_i = A \cdot k_d \cdot h_i^{k_d-1}, \text{ кг/м}^3 \quad (1)$$

где A – коэффициент, учитывающего массу материала в топке:

$$A = \frac{M}{F_T \cdot (h_T^{k_d} - h_K^{k_d})}, \quad (2)$$

k_d – коэффициент турбулентной диффузии, определяется по зависимости:

$$k_d = - \frac{0,1 \cdot \sqrt{\pi} \cdot U \cdot (1 - 2,8 \cdot \text{Re}_D^{-0,125})}{(1 + \frac{St_D}{12}) \cdot (U - U_B)}, \quad (3)$$

$$U_B = \frac{Ar}{18 + 0,61 \cdot \sqrt{Ar}} \cdot \frac{\nu_T}{d_c}. \quad (4)$$

Применительно к котлу с ЦКС средняя плотность смеси, кг/м³ в надслоевом пространстве определяется по формуле:

$$\bar{\rho} = A \cdot \left(\frac{h_T^{k_d} - h_N^{k_d}}{h_{\text{экp}}} \right). \quad (5)$$

Результаты расчетов удовлетворительно соответствуют опытным данным и могут быть перенесены на реальные объекты с учетом широкого диапазон исследованных скоростей газа, масс слоя и физических характеристик частиц.

Важной характеристикой котла с ЦКС является расход материала по

внешнему контуру. Он зависит от эффективности улавливания в сепараторе, условий выхода из топки в сепаратор, скорости газа, размеров частиц и массы слоя (перепада давлений). Влияние скорости газа близко к квадратичному (показатель степени около 1,8). Для материалов с одинаковой плотностью уменьшение среднего размера с 800 до 200 мкм при одинаковой скорости воздуха приводит к увеличению выноса в 3–5 раз. Рост массы слоя приводит также к увеличению выноса. Это связано с вовлечением большего абсолютного количества частиц в циркуляцию при той же относительной доле в слое в соответствии с фракционным составом.

Результаты исследований радиального профиля концентраций показали, что в центре потока объемная концентрация частиц примерно постоянна. Вблизи стен она резко растет. Этот рост тем выше, чем больше скорость воздуха и удельный расход циркулирующего материала. В самой близкой к стенке области объемная концентрация снова снижается и приближается к величине концентрации в центральной зоне модели топки.

На рисунке 5 показан типичный профиль подъемных массовых потоков частиц и потока нетто в зависимости от расстояния от стенки модели. Там же приведены данные об относительной объемной концентрации потока (отношение локальной концентрации к среднеинтегральной), полученные с помощью дифференциального лазерно-доплеровского анемометра с оптоволоконными датчиками.

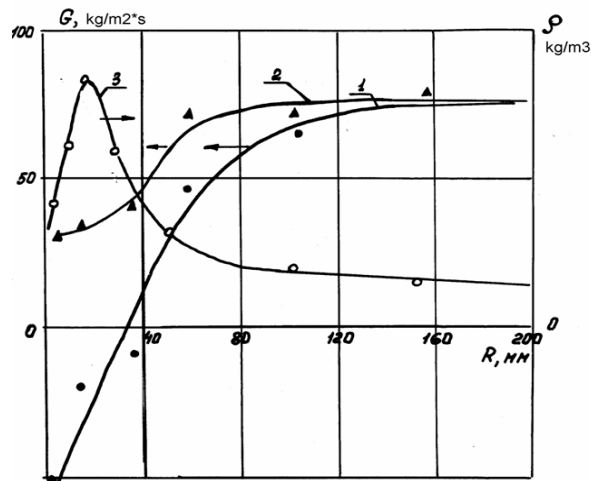
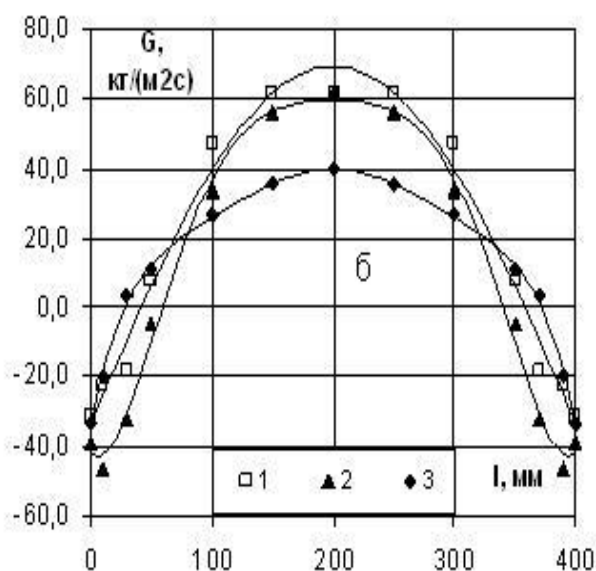
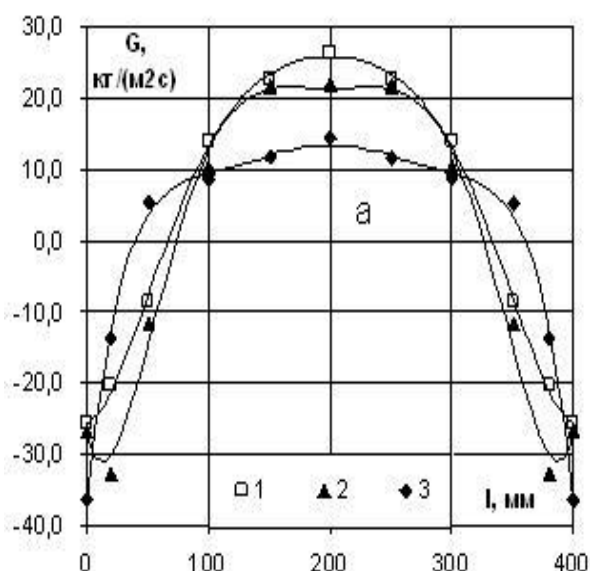


Рисунок 5— Типичный профиль потока нетто (1), подъемных массовых потоков частиц (2) и концентрации (3) в зависимости от расстояния от стенки модели

Ширина пристенной зоны может быть определена исходя из условия: поток нетто равен нулю. Считается, что на границе опускной зоны концентрация потока соответствует средней по сечению.



1 – сечение 1 (3,76 м от решетки); 2 – сечение 2 (4,8 м от решетки); 3 – сечение 3 (5,8 м от решетки)

Рисунок 6– Профили массовых потоков (G) по ширине установки (l) при скорости $U=4,3$ м/с; а – анионит; б – песок

Характерные профили массовых потоков по ширине установки для анионита и песка приведены на рисунке 6.

С увеличением высоты потоки частиц уменьшаются, и их профиль становится более равномерным. Увеличение скорости воздуха приводит к бóльшей неравномерности профиля массовых потоков, что объясняется увеличением зоны динамических выбросов при данной высоте установки. Интегрирование профилей массовых потоков дает значения среднего подъемного и опускного потоков, приведенных к полному сечению установки. Эти важные показатели определяют величину внешней и внутренней циркуляции частиц. Расход циркулирующих частиц всегда ниже, чем расход частиц, движущихся вверх в зоне выхода из топки, вследствие влияния сепарационного эффекта потолка топки и поворота на входе в циклон. Частицы, уловленные в верхней части топки, образуют внутреннюю циркуляцию, которая возрастает к нижней части топки за счет частиц, выпадающих из центральной зоны топки в пристенную зону опускного потока. Таким образом, зная подъемный (или опускной) поток частиц и КПД улавливания в верхней части топки, можно полностью рассчитывать все основные показатели гидродинамики топки.

Баланс подъемных G_{Π} и опускных $G_{\text{оп}}$ массовых потоков кг/(м²·с) в любом $i = m$ сечении установки записывается следующим образом:

$$G_{\Pi i} - G_{\text{оп} i} = G_{\Pi i+1} - G_{\text{оп} i+1} = \dots = G_{\Pi} \quad (6)$$

Опускной расход частиц в сечении перед выходом из топки $G_{\text{оп}}^{\text{ВЫХ}}$ в сепаратор определяет так называемый КПД улавливания в верхней части топки:

$$\eta_{\Pi} = \frac{G_{\text{оп}}^{\text{ВЫХ}}}{G_{\Pi}^{\text{ВЫХ}}} = \frac{G_{\Pi}^{\text{ВЫХ}} - G_{\Pi}}{G_{\Pi}^{\text{ВЫХ}}} \quad (7)$$

Значение η_{Π} существенно зависит от геометрических характеристик зоны выхода из топки и может меняться в широких пределах. Для условий наших опытов при свободном входе в циклон это значение составляло 20–50%. Для промышленных котлов оно равно 20–30%.

Обработка данных по подъемным потокам может быть выполнена с учетом простой зависимости, связывающей скорость частиц и их расход:

$$G_{\Pi} = \frac{U(\rho_{\text{ВЫХ}} - \rho_{\Gamma})}{\psi} \cdot \frac{\rho}{\rho - \rho_{\Gamma}}, \quad (8)$$

где ψ – коэффициент скольжения ($\psi = U/\bar{\varepsilon} \cdot U_p$).

Определяя среднюю порозность через среднюю концентрацию частиц в потоке $\bar{\rho}$, окончательно получаем:

$$G_{\Pi} = \frac{U(\bar{\rho} - \rho_{\Gamma})}{\psi} \cdot \frac{\rho}{\rho - \rho_{\Gamma}} \quad (9)$$

Коэффициент скольжения может быть записан в виде функции от критериев Фруда по скорости воздуха и размеру установки и по скорости витания (транспортной скорости). Обработка наших опытных данных позволила получить следующую зависимость:

$$\psi = 1 + 0,057 Fr_d^{1,474} \cdot (1 - \bar{\varepsilon})^{-0,002} + 0,69 Fr_D^{0,051} \quad (10)$$

Зависимости (8–10) в сочетании с рекомендациями по расчету профиля концентраций по высоте позволяют определить расход подъемного потока частиц. Если известно КПД улавливания в верхней части топки, то система для расчета основных показателей аэродинамики ЦКС оказывается замкнутой.

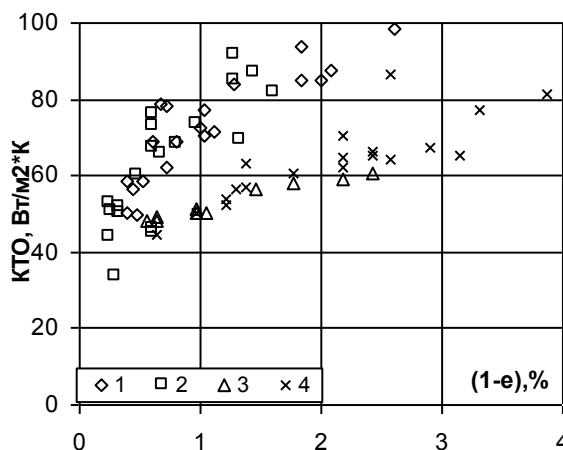
Для определения расхода циркулирующих частиц достаточно знать эффективность улавливания частиц в верхней части топки и подъемный расход частиц в этой зоне. Получена зависимость для оценки КПД улавливания частиц в зоне выхода η_t из топки. Обработка опытов при свободном входе в циклон показала, что на КПД улавливания оказывает значение критерия Стокса:

$$\eta_n = 100 \left[1 - B \cdot St^n (1 - \overline{\varepsilon_{ex}})^m \right], \quad (11)$$

Здесь коэффициент «В» определяется условиями выхода из топки.

В главе 3 рассмотрены вопросы теплообмена к настенным экранам и взаимосвязи гидродинамики пристенной зоны и теплообмена. Для этих исследований были разработаны датчики локального теплообмена.

Экспериментальные данные о локальном теплообмене свидетельствуют, о существенном влиянии на него плотности потока (объемной концентрации) и размеров частиц (рисунок 7). Расположение датчика по высоте установки в условиях постоянной объемной концентрации не влияет на теплоотдачу.



1 – песок 230 мкм нижний датчик; 2 – песок 230 мкм верхний датчик; 3 – анионит 700 мкм; 4 – анионит 550 мкм

Рисунок 7 – Влияние объемной концентрации (1-ε) на коэффициент теплообмена (KTO)

Теплообмен к настенным экранам тесно связан с гидродинамикой топки, в особенности с движением потока вблизи стен топки. Новым подходом в предложенных моделях является расчет контактного теплообмена по объемной концентрации в пристенной зоне. Полуэмпирическая модель расчета кондуктивной составляющей теплообмена к настенным экранам базируется на газокINETической модели Мартина¹. В предложенных зависимостях вводится ряд упрощений.

¹ - Martin H. //Chem. Eng. Pros. -1984. – V 18 – P. 157-238.

В первую очередь рассматривается не средняя по сечению порозность, а порозность в пристенном слое.

$$\alpha_{\text{конд}} = \frac{\lambda_{\text{г}}}{d_{\text{с}}} (1 - \varepsilon_{\text{ст}}) \text{Nu}_{\text{Sh}} \frac{\sqrt[3]{1 - \varepsilon_{\text{ск}}}}{0,807}, \quad (13)$$

где Nu_{Sh} – число Нуссельта, рассчитанное по модифицированной формуле Шлундера:

$$\text{Nu}_{\text{max}} = 4 \cdot \left[\left(1 + \frac{2 \cdot \sigma}{d_{\text{с}}} \right) \cdot \ln \left(1 + \frac{d_{\text{с}}}{2 \cdot \sigma} \right) - 1 \right] \quad (14)$$

Определение коэффициента, зависящего от длины пробега молекулы газа и коэффициента аккомодации, выполняется по зависимости:

$$\sigma = 43,2 \frac{\mu_{\text{г}}}{p} \sqrt{t + 273} \left(1 + 1,439 \cdot 10^{-\frac{357}{t+273}} \right). \quad (15)$$

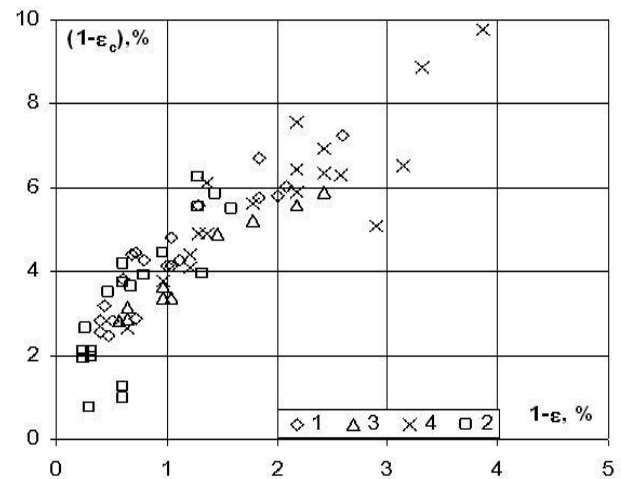
Объемная концентрация частиц в пристенной зоне была определена на основе данных по теплообмену.

Обработка их дала следующую эмпирическую зависимость:

$$\frac{1 - \varepsilon_{\text{ск}}}{1 - \varepsilon} = 1 + 0,188 \cdot (1 - \varepsilon)^{-0,61}. \quad (16)$$

Для подтверждения положений разработанной модели были определены значения концентраций в пристенной зоне на основе опытных данных о локальном теплообмене при значениях объемных концентраций, характерных для надслоевого пространства котлов с ЦКС.

Результаты этих расчетов в виде зависимости объемной концентрации в пристенной зоне от средней концентрации приведены на рисунке 8.



1 – песок 230 мкм нижний датчик; 2 – песок 230 мкм верхний датчик; 3 – анионит 700 мкм; 4 – анионит 550 мкм

Рисунок 8 – Результаты расчета объемной концентрации $(1 - \varepsilon_{\text{с}})$ в пристенной зоне по данным исследований теплообмена.

Исходя из анализа структуры потока в пристенной зоне можно считать, что при высоких объемных концентрациях (переходная зона и турбулентный кипящий слой) концентрация в пристенной зоне близка к средней по сечению.

При снижении средней концентрации уменьшается ширина пристенной зоны, ухудшается перемешивание по сечению и концентрация в пристенной зоне возрастает по отношению к средней.

Глава 4 посвящена исследованиям сепарации частиц в циклонах и швеллеровых сепараторах. Основная часть исследований проведена на аэродинамической установке, снабженной циклоном диаметром 0,54 м и высотой 1,44 м (см. рисунок 1). В процессе длительных опытов в стационарных режимах определялась масса частиц, уловленных в рукавном фильтре, и расходы этих частиц и циркулирующего материала (расход уловленных частиц). По этим данным рассчитывалось значение КПД циклона. Так же производился фракционный анализ уловленных и унесенных частиц для определения фракционного КПД.

Для возможности обобщения данных и их переноса на реальные объекты необходима разработка методики расчета фракционного КПД циклонов. Анализ многочисленных отечественных и зарубежных зависимостей для расчета фракционного КПД показал, что одной из наиболее общих моделей является трехзонная модель движения, предложенная Дитцем^{**} для высокотемпературных циклонов. В этой модели рассматривается три зоны: зона входа, опускного и подъемного потоков. Турбулентное смешение определяется по профилю радиальных концентраций в каждой зоне с учетом обмена частиц. В анализ включаются реальная геометрия циклона, учитывается обмен частиц между зонами 2 и 3, распределение времени релаксации. При этом в зонах 1 и 2 газ и частицы движутся вниз, а в зоне 3 вектор скорости газа направлен преимущественно вверх. Предложенная система уравнений для каждой зоны при соответствующей

^{**} - Dietz P.W. Collection Efficiency of Cyclone Separators //AjChE journal, November, 1981.- V 27 - №6. - P .888-892.

ших допущениях и преобразованиях, выполненных автором, приводит к следующему комплексу зависимостей для расчета фракционного КПД:

$$\eta_{\text{фр}} = 1 - \left[k_0 - \sqrt{k_1^2 + k_2} \cdot \exp(-f(d)) \right]; \quad (17)$$

$$k_0 = \frac{1 - \left(\frac{D_{\text{тр}}}{D_{\text{ц}}} \right)^{1,4}}{2} + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{D_{\text{тр}}}{D_{\text{ц}}} \right)^{1,4} \cdot \frac{1}{f(d)}; \quad (18)$$

$$k_1 = \frac{1 - \left(\frac{D_{\text{тр}}}{D_{\text{ц}}} \right)^{1,4}}{2} - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{D_{\text{тр}}}{D_{\text{ц}}} \right)^{1,4} \cdot \frac{1}{f(d)}; \quad (19)$$

$$k_2 = \left(\frac{D_{\text{тр}}}{D_{\text{ц}}} \right)^{1,4}. \quad (20)$$

Рабочая высота циклона принимается равной высоте циклона H за вычетом половины высоты входного патрубка $b/2$, если она меньше высоты обратного вихря l , рассчитанной по формуле:

$$l = 2,3 \cdot D_{\text{тр}} \cdot \left(\frac{D_{\text{ц}}^2}{a \cdot b} \right)^{1/3}. \quad (21)$$

В противном случае считается, что высота равна l .

Функция от диаметра частиц $f(d)$ определяется по зависимости

$$f(d) = 0,565 \cdot \left(\frac{h_{\text{тр}} - \frac{a}{2}}{l} \right)^{0,44} \cdot \left(\frac{t_{\text{г}} + 273}{293} \right)^{0,33} \cdot \left(\frac{d_{\text{и}}}{d_{\text{р}}} \right)^{1,04}. \quad (22)$$

Расчетный размер частиц равен

$$d_{\text{р}} = \sqrt{\frac{9\mu_{\text{г}}ab}{\pi H_{\text{ц}}\rho U_{\text{вх}}}}. \quad (23)$$

В целом, имеется удовлетворительное совпадение опытных и расчетных данных. Однако расчетные значения дают несколько заниженный результат по сравнению с промышленным котлом, что, по-видимому, связано с влиянием высокой концентрации частиц в циклоне.

Результаты исследования сепарации частиц в швеллерковых сепараторах показали, что в диапазоне скорости 7–11 м/с КПД сепаратора наиболее высок и не меняется и снижается как при уменьшении, так и при увеличении скорости

газа. При низких концентрациях потока (менее 0,5кг/м³) эффективность улавливания резко снижается. Зависимость фракционного КПД улавливания в швеллерковых сепараторах показала, что при наклон кривой КПД меняется при диаметре частиц менее 90 мкм эффективности улавливания снижается.

В главе 5 изложены результаты исследования систем возврата частиц в топку. Опускное движение в стояке может происходить в режиме движущегося вниз плотного слоя или в переходном режиме. При большом расходе ожижающего агента (газ, пар, воздух) в стояк возможен и режим с пузырьковым ожижением, который может приводить к проскоку воздуха в циклон. Границы режимов зависят от скорости скольжения (суммы скоростей материала и газа с разными знаками направления движения). Если значение скорости скольжения положительно (положительное направление – вниз), то движение происходит в плотном слое, если отрицательно – то в переходном режиме, а при большом значении этой скорости – в режиме пузырькового слоя.

Были выполнены расчетные и экспериментальные исследования условий начала движения в L-клапане. Предложена полуэмпирическая зависимость для критического расхода воздуха, при котором начинается движение через L-клапан.

$$Q_{кр} = \left[\frac{\varepsilon_{гор}}{L_{гор} \cdot K_{гор}} + \frac{\varepsilon_{ст}}{H_{ст} K_{ст}} \right] \Delta p_{гор}^0, \quad (24)$$

где $K_{гор} = 154 \frac{\mu_r}{d_c^2} \left(\frac{1 - \varepsilon_{гор}}{\varepsilon_{гор}} \right)^2$ и $K_c = 154 \frac{\mu_r}{d_c^2} \left(\frac{1 - \varepsilon_c}{\varepsilon_c} \right)^2$.

Значение начального сопротивления горизонтального участка L-клапана ($\Delta p_{гор}^0$) определяется экспериментально.

Зависимость (24) показывает, что скорость газа, соответствующая началу движения материала, уменьшается с ростом уровня слоя в стояке. Если сумма перепада давлений в реакторе с ЦКС и сопротивления циклона равна или меньше веса столба слоя в стояке, то с ростом длины горизонтальной части L-клапана указанная скорость газа также растет. Указанное условие является

важным для работы клапанов. Если оно не соблюдается, то воздух пойдет в основном вверх стояка и циркуляция будет нарушена. Это нарушение будет продолжаться до тех пор, пока поступающий из реактора материал не заполнит стояк до необходимого уровня.

На рисунке 9 представлены данные в виде зависимости расчетной скорости скольжения (положительное направление – вниз) от относительной скорости подачи воздуха в стояк петлевого затвора.

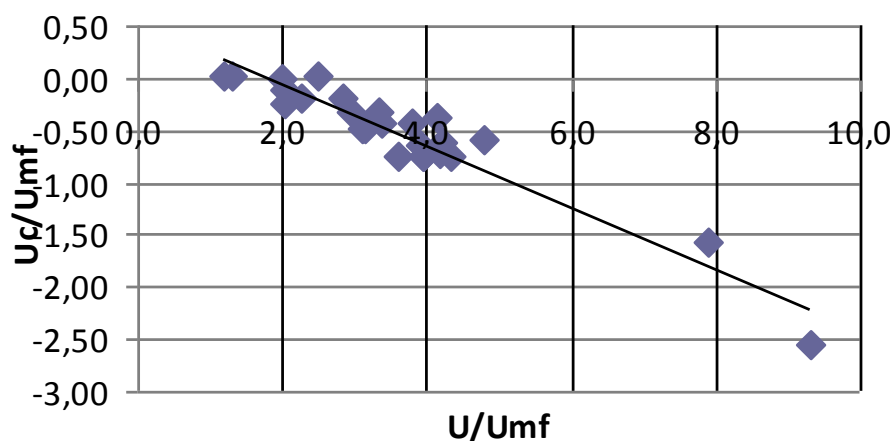
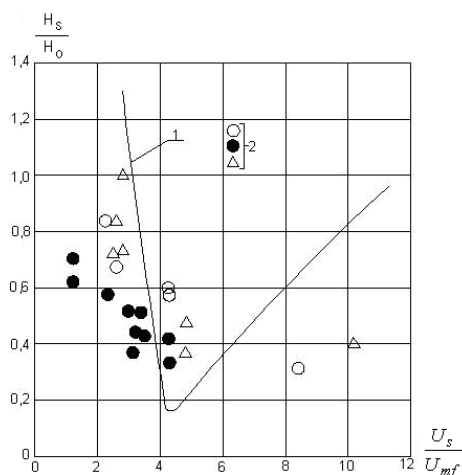


Рисунок 9 – Зависимость относительной скорости скольжения в стояке от относительной скорости по общему расходу воздуха в стояк

Из данных (см. рисунок 9) следует, что режим движения в плотном слое в стояке происходит при подаче воздуха до примерно двух скоростей псевдоожижения, переходному режиму соответствует подача воздуха в стояк со скоростью 2–5 скоростей минимального псевдоожижения, далее наступает режим движения в полностью ожиженном состоянии.

Эти результаты объясняют факт изменения характера зависимости относительного уровня слоя в стояке от относительной скорости воздуха, приведенной на рисунке 10.

При малых относительных скоростях ожижения (1,5–2,5) относительный уровень слоя в стояке резко снижается с увеличением скорости ожижения, затем это падение замедляется, а при относительной скорости более 5 наблюдается повышение относительного уровня слоя в стояке с ростом ожижения.



1 – данные Чонга и Ноултона^{***}, 2 – опытные данные ВТИ при различной крупности частиц
Рисунок 10 – Зависимость относительного уровня слоя в стояке от относительной скорости оживления

Для расчета диаметра стояка можно рекомендовать значение опускной скорости материала около 0,1 м/с и давать двукратный запас по площади его сечения.

Исследования начала движения в L-клапане были выполнены для мелкой фракции песка при отводе его в незаполненный реактор с КС при нескольких уровнях слоя в стояке L-клапана – высоких (от 0,67 до 1,16 м над низом горизонтальной части клапана) и низком (указанное расстояние 0,34 м). Воздух подавался на высоте 0,14 м от оси горизонтальной части клапана. Оказалось, что скорость воздуха, при которой начинается движение материала, заметно выше, чем скорость, при которой оно прекращается. При этом скорость воздуха при прекращении движения материала близка к скорости минимального псевдоожижения. Опытные данные в целом согласуются с полученной зависимостью (24). Значение начального сопротивления L-клапана в формуле (24) оказалось равным 4,2 кПа, что соответствует весу столба материала в стояке L-клапана, при котором изменение расхода оживающего воздуха не приводит к изменению уровня слоя в стояке.

^{***} - Chong Y. O., O'Dea D. E., Leung L.S., Nicklin D. J., Lottes J. Design of standpipe and non – mechanical V – valves for a circulating fluidized bed// 3 – rd Int. Conf. on CFB Technology/ Pergamon Press. – 1988.

В главе 6 приведены результаты исследований гидродинамики связанных между собой реакторов. Для расчета и конструирования систем со связанными между собой реакторами с ЦКС и КС крайне важным является расчет контура циркуляции частиц: реактор с ЦКС – циклон – переток в реактор с кипящим слоем – реактор с кипящим слоем – возврат материала в реактор с ЦКС. Этот расчет заключается в определении расхода материала в системе, перепадов давлений в реакторах и системе возврата уловленных частиц, сопротивления циклонов и уровня слоя в стояках под циклонами в зависимости от скоростей газов в реакторах и подачи газа в пневматические клапаны.

При этом соблюдается материальный баланс, изменение уровня слоя в стояке приводит к изменению массы слоя в реакторе с ЦКС, а сумма масс материала в реакторе M_T и системе возврата (M_c , в основном в стояке) остается постоянной. Для того чтобы замкнуть контур циркуляции, необходимо составить уравнения связи между расходом материала, уровнем слоя в стояке и подачей газа в затвор. Применительно к работе L-клапана в условиях равенства сечений стояка и горизонтальной части затвора и существенно большей высоты слоя в стояке по сравнению с высотой ввода воздуха от низа стояка после преобразований получаем:

$$Q_L = \frac{(\Delta P_T + \Delta P_{Ц}) \cdot \varepsilon_{ст} F_{ст}}{H_{ст} \cdot K_{ст}} + \frac{G_{ц}}{\rho} \left[\frac{\varepsilon_{гор}}{1 - \varepsilon_{гор}} - \frac{\varepsilon_{ст}}{1 - \varepsilon_{ст}} \right] + \Delta p_{гор} \cdot F_{ст} \left[\frac{\varepsilon_{гор}}{L_{гор} \cdot K_{гор}} + \frac{\varepsilon_{ст}}{H_{ст} \cdot K_{ст}} \right], \quad (25)$$

Из зависимости (25) следует, что при увеличении подачи газа в реактор растет как перепад в нем, так и сопротивление циклона, одновременно увеличивается и расход материала и порозность в горизонтальной части L-клапана. Это необходимо компенсировать существенным ростом расхода газа в L-клапан. В противном случае повышение уровня слоя в стояке может превысить геометрическую высоту стояка.

Применительно к системам со связанными реакторами принцип расчета такой же, но с учетом перепадов давлений в реакторе с КС и сопротивления перетока из реактора с КС в реактор с ЦКС.

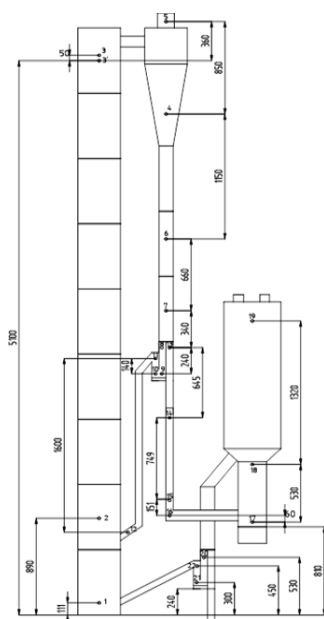


Рисунок 11 – Схема установки с размещением отборов давления

Опыты проводились при двух скоростях воздуха в реакторе с КС (0,3 и 1,5 м/с).

Скорость воздуха, подаваемого в L-клапан, составляла 0,05–0,1 м/с (2–4 скорости минимального ожигения). Наибольшие давления в системе наблюдаются в точке ввода воздуха в L-клапан (т. 15) и точке подвода воздуха в петлевой затвор (т. 21). Данные по изменению этих давлений в зависимости от суммы перепада давлений в топке и сопротивления циклона приведены на рисунке 12.

С ростом этой суммы (ростом массы слоя в реакторе с ЦКС) давление в т. 15 снижается, а в т. 21 – увеличивается. Несмотря на значительный разброс опытных точек, характер изменения близок к линейному. Оказалось, что сумма давлений в т. 15 и т. 21 практически не меняется во всех режимах.

Эта величина (около 23 кПа), по-видимому, характеризует работу всего

Исследования проводились на экспериментальной установке, схема которой приведена на рисунке 11. Основная часть экспериментов проводилась с использованием песка в качестве наполнителя слоя (средний диаметр 0,172 мм, насыпной вес 1520 кг/м³, порозность минимального ожигения 0,42, вибрационного слоя 0,36).

Общая масса материала в системе составляла 178–185 кг. Скорость воздуха в реакторе с ЦКС менялись от 3 до 4,1 м/с.

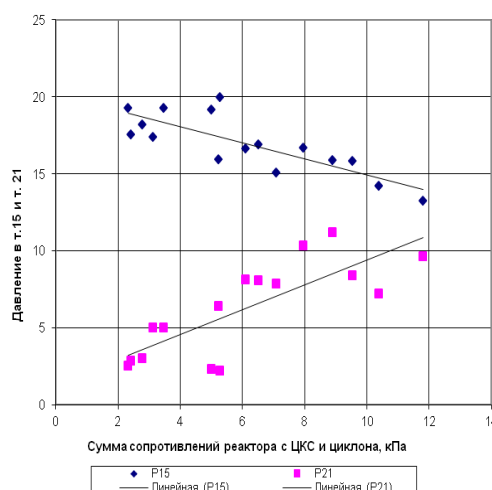


Рисунок 12 – Зависимости давлений в точках подвода воздуха в L-клапан (т. 15) и затвор реактора с КС (т. 21) от суммы перепада давлений в реакторе с ЦКС и сопротивления циклона

контура со связанными между собой реакторами в условиях постоянной массы и физических характеристик материала и газа.

Опытные данные всех режимов при разных параметрах работы L-клапана (расход воздуха, перепад давлений в топке, сопротивление циклона, уровень слоя в стояке, расход материала, сопротивление горизонтального участка) были сравнены с расчетной зависимостью (25) и показали удовлетворительное совпадение результатов.

Были разработаны алгоритм и компьютерная программа расчета баланса давлений в системе связанных между собой реакторов. Расчетные и опытные данные по балансу масс и распределению масс материала в элементах установки хорошо совпадают (отклонения не превышает 2 кг при средней массе материала в установке 180 кг).

Глава 7 посвящена разработке метода конструкторского расчета топочно-го контура котла с ЦКС. Выполненные автором и под его руководством разработки методик расчета гидродинамики топки, теплообмена к экранным поверхностям и основных элементов котлов с ЦКС (циклонов, зольных теплообменников, системы возврата) в условиях сжигания различных топлив положены в основу первых в России компьютерных программ расчета топочного контура котла с ЦКС и математической модели топки с ЦКС.

В тепловом балансе котла при определении потерь тепла необходимо учитывать потери тепла от реакций с известняком. Они рассчитываются по теплу эндотермических и экзотермических реакций. Потери тепла с химическим недожогом q_3 в котлах с циркулирующим кипящим слоем принимаются равными 0,01 %, исходя из предельного значения концентрации CO_2 100 мг/м³. При сжигании низкорекреационных топлив, а также древесины и торфа эти значения могут увеличиться до 2 раз.

Ориентировочные значения потерь тепла с механическим недожогом даны в таблице 1 по данным опытного сжигания с участием автора и обобщением литературных данных и рекомендаций зарубежных компаний – изготовителей котлов с ЦКС.

Таблица 1 - Задаваемые параметры для различных углей

Топливо	Избыток на выходе из топки	Температура на выходе из топки, °C	Доля уноса золы	Скорость газов, м/с	Максимальный размер куска, мм	q ₄ , %	Доля первичного воздуха
Антрацитовый штыб	1,2–1,25	850–900	0,5–0,6	5–5,7	3–6	3–5	0,5–0,7
Тощие угли	1,2–1,25	850–900	0,6–0,7	5–5,7	6	2–4	0,5–0,7
Каменные угли с $V^{\text{daf}} \geq 25\%$	1,15–1,2	830–870	0,5–0,8	5–6	12	1–2	0,5–0,6
Отходы углеобогащения	1,15–1,2	830–870	0,5–0,6	5–6	6–12	2–3	0,5–0,6
Бурые угли: малозольные с $A_{\text{пр}}^r \leq 1 \frac{\text{кг} \cdot \%}{\text{МДж}}$ средней зольности с $A_{\text{пр}}^r \geq 1 \frac{\text{кг} \cdot \%}{\text{МДж}}$ высокозольные с $Q_{\text{лет}} \leq 20 \text{ МДж/кг}$	1,15–1,2	800–850	0,9	5–5,5	25	2–3	0,4–0,5
	1,15–1,2	800–850	0,7–0,8	5,5–6	25	0,5–1	0,4–0,6
	1,15–1,2	830–870	0,5–0,6	5,5–6,5	12	1–2	0,5–0,6
Фрезерный торф	1,2	800–850	0,9	4,5–5,5	25	1–2	0,4–0,5
Сланцы	1,15–1,2	800–850	0,5–0,7	4,5–5,5	25	1–2	0,4–0,6

Эти потери зависят от реакционной способности топлив (отношение связанного углерода к выходу летучих) и от времени пребывания в реакционной зоне, т. е. от гидродинамики контура циркуляции частиц. Кроме того, на потери тепла с механическим недожогом влияет зольность (прежде всего соотношение внешней и внутренней золы). Для низкорекреационных высокозольных топлив потери тепла с механическим недожогом увеличиваются. Для высокорекреационных и средnezольных топлив они минимальны, и могут слегка расти для низкозольных высокорекреационных топлив за счет повышения содержания горючих в уносе.

Потери тепла q_6 со шлаком (донной золой) определяются по температуре в нижней части топки. Ориентировочные значения долей уноса и шлака приведены в таблице 1.

Для котлов с ЦКС полезное тепло топочного контура в общем случае состоит из тепла, воспринятого настенными экранами, ширмами в топке, двухсветными экранами, поверхностями нагрева в зольных теплообменниках и ограждением циклонов. При этом важно, что только тепло этих элементов пароводяного тракта определяет температуру газов на выходе из топки (из циклона). Таким образом, задавая температуру газов на выходе из топки, расчетчик знает весь теплосъем топочного контура, и можно не учитывать расход циркулирующего материала. Рекомендации по выбору основных параметров топок котлов с ЦКС в зависимости от характеристики топлива касаются выбора скорости газов в призматической части топки, температуры газов и избытка воздуха на выходе из топки, фракционного состава подаваемого топлива, потерь тепла с механическим недожогом, доли уноса золы и известняка, доли первичного воздуха при номинальной нагрузке и ориентировочном значении среднего размера частиц циркулирующего материала (см. таблицу 1).

Габариты топочной камеры определяются по заданным значениям температуры, избытка воздуха и скорости газов. Температура в топке задается в диапазоне 800–900 °С. Она зависит от реакционной способности и плавкостных характеристик золы. В некоторых случаях, например, при сжигании АШ эта температура может быть увеличена до 920 °С.

Избыток воздуха принимается на уровне 1,15–1,25 (большие значения для низкорекционных топлив). Скорость дымовых газов, приведенная к верхнему сечению топки, находится в диапазоне 4,5–6 м/с при принятой температуре на выходе из топки. Ширина топочной камеры задается после конструкторской проработки, исходя из размеров котельной ячейки, конструкции и размеров настенных экранов. Размеры циклонов, установленных вдоль задней стенки котла, не должны существенно выходить за габариты топочной камеры.

Нижняя часть топки котла с ЦКС всегда выполняется зауженной, чтобы обеспечить относительно высокие скорости газов (не менее чем в верхней части топки) при подаче первичного воздуха. Доля первичного воздуха составляет

0,4–0,7 (большие значения для низкорекреационных топлив). Зона зауженной части топки выполняется футерованной для предотвращения износа труб и коррозии в условиях недостатка кислорода.

Профиль концентраций по высоте топки определяется по рекомендациям главы 2. При выполнении расчетов важно задать необходимый перепад в топке (массу слоя). Расчет теплообмена выполняется в соответствии с рекомендациями главы 3.

Рекомендации по выбору основных конструктивных размеров уловителей (циклонов, швеллерковых сепараторов) и системы возврата базируются на экспериментальных данных и методах, приведенных в главах 4 и 5. Выбор размеров циклонов определяет скорость газов, приведенную к сечению цилиндрической части. Она должна находиться на уровне 5,5 м/с. Скорость во входном патрубке должна составлять 25–30 м/с, а в выхлопном патрубке – 18–25 м/с.

Системы возврата проектируются с запасом не менее 2. Диаметр опускающего стояка рекомендуется выбирать по скорости материала 0,1 м/с (расчет объемного расхода по насыпному весу, расход как расход уловленных частиц). Расходы воздуха в стояк и затвор должны обеспечить уверенное опускающее движение материала без образования крупных пузырей воздуха, движущихся вверх. Рекомендуемый диапазон скорости оживления в стояке – 3–5 скоростей минимального оживления. Для подъемного участка затвора скорость должна быть порядка 10 скоростей минимального оживления. Эти рекомендации дают возможность выбрать сечения всех элементов системы возврата.

В главе 8 рассмотрены вопросы сжигания биомассы в кипящем слое. Основной упор сделан на исследовании вопросов агломерации слоя.

Ключевыми для надежной и эффективной работы таких котлов являются процессы в слое и надслоевом пространстве. В качестве материала слоя в котлах с кипящим слоем, как правило, используется песок определенной фракции. Некоторые компоненты золы древесных отходов приводят к укрупнению частиц слоя, наблюдавшемуся, например, на ТЭС-3 Архангельского ЦБК, где был

внедрен котел с кипящим слоем отечественного производства (ЗАО СП «Энергософин») для сжигания коро-древесных отходов различного качества. Опыт наладки и освоения котла выявил ряд недостатков и особенностей режимов слоевого сжигания биотоплива, наиболее важной из которых является агломерация материала слоя.

Загруженный песок имел средний по поверхности размер частиц около 0,7 мм. Донная зола после недели работы имела средний размер частиц, близкий к исходному песку, однако появились как крупные (более 1,6 мм–1,24 %), так и мелкие фракции (<0,5 мм), содержание которых возросло с 8 до 11 %. Это свидетельствует об одновременно идущих процессах истирания и агломерации частиц. Насыпной вес этой золы (1437 кг/м³) близок к весу исходного песка (1575 кг/м³). Зола, выгруженная перед ремонтом, в основном состояла из агломерированных частиц со средним размером 1,3 мм, причем доля крупных фракций более 1,6 мм составляет уже 45 %, доля мелких (менее 0,5 мм) – всего 2 %. Насыпной вес этой золы равен 950 кг/м³. Таким образом, в процессе длительной эксплуатации агломерация становится более существенной, чем истирание. Был выполнен комплекс физико-химических анализов исходного топлива, его золы и материала слоя. Полуколичественный элементный анализ донной золы и песка был выполнен с помощью рентгенофлюорисцентного метода на VRA-30 и показал заметный рост соединений кальция, калия и магния в донной золе в процессе работы. Определение плавкостных характеристик было выполнено на нагревательном микроскопе в полувосстановительной среде и обнаружило снижение температуры начала размягчения агломератов по сравнению с исходным песком.

Известно, что на скорость образования агломератов влияет содержание калия и натрия в золе, температурный режим слоя и скорость ожигения. Не исключено также образование эвтектик с температурой плавления в тройной системе SiO₂–CaO–FeO. Песок как материал слоя, является наихудшим материалом в отношении агломерации частиц слоя. Снижение температуры слоя менее

750 °С почти прекращает процессы агломерации, а увеличение скорости ожигания уменьшает интенсивность агломерации.

С практической точки зрения важным является оценка требуемого расхода удаляемой золы и добавки свежего материала.

Для такой оценки можно записать уравнения материального баланса и баланса соединений натрия и калия. Если предположить, что в добавленном песке не содержится соединений Na и K, а доля уноса, как это принято в расчете котла, составляет 0,95 (причем песок слоя не выносятся), тогда отношение расхода добавленного материала к расходу золы составляет: $0,05 \frac{S_3 - S_{ун}}{S_{сл}}$.

Исходя из критической концентрации Na + K в слое, равной 1 %, относительный расход добавленного песка для котла с КС ТЭС-3 составит 0,31 расхода поступающей золы, т.е. около 2,6 т в сутки, а расход дренажа – примерно 3,0 т в сутки.

В диссертации обосновано использование технологии совместного сжигания ископаемых топлив и биомассы в котлах с кипящим и циркулирующим кипящим слоем. При этом высокая зольность и сернистость углей компенсируются малым содержанием золы и серы в биомассе. Соединения кальция в биомассе способствуют связыванию серы. Низкое содержание азота в биомассе при совместном сжигании приводит к снижению выбросов оксидов азота по сравнению со сжиганием углей. При наличии большого количества Fe_2O_3 в золе углей щелочные компоненты могут реагировать прежде всего с этими оксидами, не образуя легкоплавких соединений, вызывающих агломерацию слоя.

Глава 9 посвящена вопросам использования технологии ЦКС в системах улавливания углекислого газа и в полигенерирующих системах.

В последние несколько лет в мире развернуты программы исследований возможностей снижения эмиссии CO_2 путем улавливания диоксида углерода, образующегося при использовании органических топлив и его последующего захоронения (или утилизации).

В диссертации разработан общий алгоритм расчета установок с химическими циклами. Выполнены расчеты установок со сжиганием топлива в химических циклах. Определены основные показатели, включая степень сепарации CO_2 , размеры реакторов, требуемый отвод тепла и площадь поверхностей нагрева. Разработаны и рассчитаны схемы пилотных и промышленных установок в вариантах сжигания природного или синтетического газа с использованием газовых и паровых турбин.

Разработана схема промышленной установки для сжигания природного газа (продуктов газификации) в химических циклах под давлением. Автор выполнил оценку капитальных затрат на сооружение установок тепловой мощностью 10 и 100 МВт. Увеличение капитальных затрат составляет 30–40 %. Для крупных блоков с оптимизированными параметрами можно ожидать снижения этой разницы в затратах примерно в 1,5 раза.

Себестоимость электроэнергии на демонстрационной установке тепловой мощностью около 100 МВт с улавливанием CO_2 возрастает в 1,7 раза. Увеличение мощности, переход к промышленным установкам с оптимальными параметрами значительно улучшает показатели эффективности блоков с улавливанием CO_2 в химических циклах; по нашим оценкам себестоимость выработки электроэнергии на них будет выше, чем на установках без улавливания примерно в 1,3 раза. Выполненные оценки показывают, что при использовании химических циклов сжигания топлива удастся достигнуть удельных затрат на уровне 10 евро за 1 тонну CO_2 . Эта величина в 2 раза ниже, чем предполагаемые для других способов сепарации CO_2 .

Получены 3 патента на конструкции установок для сжигания и газификации топлива в химических циклах, в том числе с получением водорода.

Привлекательным является применение полигенерирующих систем с получением электроэнергии, тепла и полезных продуктов. В таких системах с пиролизом или газификацией с твердым теплоносителем используются связанные между собой реакторы с кипящим и циркулирующим кипящим слоем. В публи-

кациях автора показаны преимущества этих систем и основные проблемы их работы. Применение полигенерирующих систем возможно в распределенной энергетике, особенно при утилизации биомассы и отходов производств. Показано, что исходя из соотношения H_2/CO для наиболее эффективного процесса Фишера-Тропша топлива с высоким выходом летучих выглядят предпочтительными для использования в ЭТК по сравнению с относительно низкореакционными углями. В процессе разработок был получен патент на полигенерирующую систему переработки твердого топлива.

В главе 10 рассмотрены проектные решения по котлам с ЦКС для технического перевооружения ТЭС России и дан технико-экономический анализ условий наиболее эффективного использования этой технологии.

Проектные разработки вариантов разных вариантов котлов с ЦКС и технико-экономических обоснования позволили выявить оптимальные условия применения технологии ЦКС при техническом перевооружении ТЭС России. Показано, что технология ЦКС вполне применима для замены более чем 200 котлов на ТЭС с поперечными связями. Выполнены расчеты по собственным методикам и программам применительно к разработке инвестиционных проектов для условий ТЭС в разных регионах России. Для северо-запада рассмотрена широкая гамма топлив, включая сланцы Ленинградской области, торф, кузнецкие угли марок Д и Г, ирша-бородинский бурый уголь, интинские и воркутинские угли и смеси различных видов топлива. Для этого региона выбор топливной базы наиболее сложен, учитывая большое плечо доставки энергетических углей. Перспективным является использование смесей привозных и местных топлив (торфа, сланца).

Для юга России характерно использование АШ, тощих углей и отходов углеобогащения. Эти топлива имеют низкий выход летучих, высокие зольность и содержание серы. В ряде работ показано, что только технология ЦКС может в комплексе решить проблему сжигания таких топлив при минимальных вредных выбросах в окружающую среду.

Для Урала рассмотрены экибастузский и кузнецкие угли с возможностью использования местного топлива (например, богословского угля). Применение технологии ЦКС в этом регионе позволяет диверсифицировать поставки топлива и вовлечь местные ресурсы, которые могут в перспективе дополниться углями приполярного Урала.

Имеется много возможностей совершенствования технологии ЦКС: конструкции сепараторов, зольных теплообменников, систем возврата золы и других элементов. Предложено использование зольных теплообменников плотного слоя, которые могут обеспечить высокий коэффициент теплоотдачи при небольшом расходе воздуха высокого давления. Для увеличения эффективности улавливания мелких фракций предложена специальная конструкция отводящего патрубка охлаждаемого паром циклона.

При выполнении комплексной работы «Разработка угольных энергоблоков ТЭЦ нового поколения мощностью 100–120 МВт с повышенными технико-экономическими параметрами для перспективного замещения действующего оборудования или нового строительства», выполненной под руководством автора, были рассмотрены варианты использования котлов с ЦКС и пылеугольных котлов, оснащенных средствами азото- и сероочистки.

Развитие угольных тепловых электростанций страны с учётом в перспективе возрастания потребления угля и требований сокращения выбросов CO_2 определяет актуальность повышения КПД паросиловых энергоблоков в первую очередь за счет увеличения параметров пара. В рамках возникающих при этом задач ОАО «ВТИ» разрабатывает научно-технические решения для создания оборудования угольных энергоблоков с УСКП с минимизацией стоимости оборудования при КПД блока 50-51 % (соглашение с Министерством образования и науки России, уникальный идентификационный номер проекта RFMEFI57614X0048). На основе анализа состояния разработок котлов с ЦКС на ультрасверхкритические параметры пара для мощных энергоблоков определены принципиальные технические решения, составлена теплогидравлическая

схема котла с ЦКС, установлены оптимальные условия организации процессов гидродинамики и теплообмена в топочном контуре. С использованием собственных методов и программы расчета котлов с ЦКС выполнен конструкторский расчет котла с определением геометрии топки, компоновки и размеров циклонов, зольных теплообменников и поверхностей нагрева конвективной шахты.

Обобщение результатов разработок угольных энергоблоков мощностью 225 и 330 МВт позволило сравнить технико-экономические показатели вариантов с котлами с ЦКС и пылеугольными котлами при применении разных углей для действующих и перспективных (Европейских) норм на выбросы частиц, оксидов азота и серы. В большинстве случаев данные по капитальным и эксплуатационным затратам вполне сопоставимы. Поэтому выбор предпочтительных решений во многом определяется конкретными условиями сооружения новых блоков и требованиями по вредным выбросам.

Важными достоинствами технологии ЦКС являются не только достижение существующих в РФ, но и перспективных норм на вредные выбросы без применения установок сероочистки и азотоочистки. Существенным преимуществом является диверсификация поставок топлива.

Заключение

1 Выполненный в диссертации комплекс расчетно-аналитических и экспериментальных исследований, обеспечивающих научное обоснование использования технологии кипящего и циркулирующего кипящего слоя для эффективного и экологически чистого сжигания различных твердых топлив, позволил решить научную проблему, имеющую важное народнохозяйственное значение.

Созданы и обоснованы новые методики расчета топочного контура котлов с ЦКС. Определены условия эффективного применения технологии ЦКС при техническом перевооружении угольных ТЭС России. Рассмотрены применения этой технологии для сжигания биомассы и отходов, а также для сепарации CO_2 .

2 Разработаны методы моделирования процессов в аппаратах с ЦКС. Спроектированы и построены стенды, и разработаны методики исследований гидродинамики, теплообмена и сепарации частиц. С их использованием получены новые экспериментальные данные по гидродинамике топок с ЦКС (профиль концентраций по высоте топки, профиль массовых потоков по ширине топки, закономерности улавливания частиц после топки в зависимости от скорости газов, массы и размеров частиц).

3 На основе собственных и обобщения литературных материалов установлены закономерности гидродинамики топки, предложены полуэмпирические зависимости для определения профиля концентраций по высоте топок с ЦКС, расчета подъемного и опускного удельного расхода частиц, улавливания частиц в зоне выхода из топки, объединенные в единую методику расчета гидродинамических показателей топок с ЦКС.

4 Получены новые данные по локальному теплообмену к настенным экранам в зависимости от режимных факторов и характеристик частиц. Показана взаимосвязь кондуктивного теплообмена с гидродинамикой топки и концентрацией частиц в пристенной зоне. На базе газокINETической модели предложена методика расчета теплообмена к настенным экранам топки котла с ЦКС, особенностью которой является учет профиля концентраций по ширине топки и использование расчетной пристенной концентрации, в качестве определяющей для кондуктивной составляющей теплообмена.

5 Проведены на различных установках экспериментальные исследования сепарации частиц в циклонах и швеллерковых сепараторах, подтвердившие возможность улавливания более 99,9 % частиц для условий сильно запыленных потоков. На их основе разработаны рекомендации по оптимизации конструктивных размеров циклонов (размеры входного и выходного патрубков, диаметр и высота циклона и выходного патрубка в зависимости от производительности циклона по газу) и швеллерковых сепараторов (шаг и размеры швеллерков), определению фракционного и общего КПД улавливания при заданных раз-

мерах и характеристиках потока на входе (скорость газа, диаметр и плотность частиц) и сопротивления циклонов с учетом начальной запыленности.

6 Исследованы условия движения потока в опускных стояках и пневмозатворах. Получены опытные закономерности влияния подачи воздуха в стояк и пневмозатор на режим течения и уровень материала в стояке, которые позволили обосновать условия и методы обеспечения режимов работы опускной системы без прорыва воздуха в циклон и переполнения стояка.

Определены режимы перехода от нисходящего движения частиц в плотном слое к движению в оживленном слое.

Разработаны рекомендации по расчету систем возврата частиц, с определением конструктивных характеристик и требуемых для надежного обеспечения пропускной способности расходов и давлений воздуха.

7 Выполнены теоретические и экспериментальные исследования гидродинамики систем со связанными реакторами с КС и ЦКС и установлены закономерности, необходимые для обеспечения надежности и эффективности работы установок с использованием топлив в химических циклах и полигенерирующих системах с получением электроэнергии, тепла и полезных продуктов. Впервые в РФ дано описание режимов движения в этих системах и разработана программа расчета их показателей, в частности, определения профиля давлений по высоте аппаратов в них.

8 На базе комплексных исследований гидродинамики и теплообмена в топке, улавливания и возврата частиц с учетом данных по условиям горения различных топлив, генерации и подавления вредных выбросов впервые в России разработана методика конструкторского расчета топочного контура котлов с ЦКС. Эта методика использована при разработке компьютерной программы расчета и применена при разработке отечественных котлов с ЦКС различной паропроизводительности, включая прямоточные котлы на суперкритические параметры пара для блоков 330 МВт и для блока 800 МВт на ультрасуперкритические параметры пара.

9 Впервые изучены вопросы агломерации слоя при сжигании кородеревесных отходов в котлах с кипящим слоем и разработаны рекомендации по её предотвращению и повышению надежности работы таких котлов. Изучены вопросы совместного сжигания биомассы и ископаемых топлив и показана перспектива её использования. Выполнено технико-экономическое обоснование использования различных видов биомассы для получения тепла и электроэнергии.

10 Впервые в РФ исследованы возможности сепарации CO₂ с использованием передовых технологий сжигания и газификации топлив в химических циклах. Разработаны схемы пилотных и опытно-промышленных установок, предложены новые технические решения, защищенные патентами. Показана возможность существенного снижения затрат на улавливание CO₂ при сжигании и газификации топлив в химических циклах. Разработаны предложения по использованию полигенерирующих систем с получением электроэнергии, тепла и полезных продуктов, которые могут быть использованы в том числе и в распределенной энергетике.

11 Для оценки перспектив и масштабов применения энергоблоков с котлами ЦКС в отечественной электроэнергетике исследованы их экономические и эксплуатационные показатели, а также воздействие на окружающую среду. Разработаны технические решения по котлам с ЦКС для технического перевооружения ТЭС и ТЭЦ мощностью до 330 МВт. Выполнены расчетные обоснования и предложены новые конструктивные решения для котлов с ЦКС перспективной угольной ТЭЦ котлов с ЦКС на ультрасуперкритические параметры пара для блока 800 МВт.

12 Проведены проектные проработки котлов с ЦКС для условий сжигания различных топлив и технико-экономические обоснования применения блоков с котлами ЦКС при различных требованиях к ограничению вредных выбросах. Определены условия наиболее эффективного применения этой технологии сжигания для технического перевооружения ТЭС России.

Основные публикации по теме диссертации

1. **Ryabov, G.A.** Coal – fired power plant designed with circulating fluidized bed boilers – a scientific assessment [Text] / G. A. Ryabov, B. P. Afanasev, R. A. Petrosian [et al.] // Symposium of New coal Technologies, 10 – 13 May, 1993. – Finland, Espoo, 1993.

2. **Рябов, Г.А.** Техническое перевооружение ТЭС с использованием технологии сжигания углей в циркулирующем кипящем слое [Текст] / Г. А. Рябов, И. И. Надыров, Б. Л. Кадников, И. Б. Годик // Электрические станции. – 1996. – № 8. – С. 58–61.

3. **Рябов, Г.А.** Исследование массообмена и гидродинамики на модели котла с циркулирующим кипящим слоем [Текст] / Г.А. Рябов, О.М. Фоломеев // Тепломассообмен ММФ – 96, Минск. – 1996. – Т. 10. – Ч. 2. – С. 33 – 37.

4. **Рябов, Г.А.** Исследование теплообмена к настенным экранам на аэродинамической модели котла с ЦКС [Текст] / Г. А. Рябов, А. И. Курочкин // Тепломассообмен ММФ – 96. Минск. – 1996. – Т. 10. – Ч. 2. – С. 38 – 42.

5. **Рябов, Г. А.** Исследование процессов смешения вторичного воздуха с запыленным потоком применительно к условиям работы котлов ЦКС [Текст] / Г.А. Рябов, В.А. Молчанов, А.Ф. Хритинин // Тепломассообмен ММФ – 96. Минск. – 1996. – Т. 10. – Ч. 2. – С. 43 – 47.

6. **Тумановский, А.Г.** Развитие технологии сжигания топлив [Текст] / А. Г. Тумановский, В. Р. Котлер, Г. А. Рябов [др.] // Теплоэнергетика. – 1996. – № 7. – С. 30 – 39.

7. **Рябов, Г.А.** Исследование гидродинамики и массообмена на экспериментальной установке с циркулирующим кипящим слоем [Текст] / Г. А. Рябов, О. М. Фоломеев // Теплоэнергетика. – 1998. – № 6. – С. 8 – 12.

8. **Evseev, A.R.** Measurement of velocity and concentration of particles in circulating fluidized bed by different Doppler anemometer with fiber optics [Text] / A.R Evseev, G.A. Ryabov, V.A. Orlov // 7th Conf. on Laser anemometry, Sept. 8 – 11, 1997. – Germany, Karlsruhe, 1997.

9. **Ryabov, G.A.** An Experimental Study of Hydrodynamics and Heat Mass Transfer in CFB Model [Text] / G. A. Ryabov, O. M. Folomeev, S. N. Trukhachev // Proc. of the 6th Int. Conf. on CFB, August 22 – 27, 1999. – Germany, Wurzburg, 1999. – P. 373 – 378.

10. **Рябов, Г.А.** Исследование теплообмена к настенным экранам на аэродинамической модели котла с ЦКС [Текст] / Г. А. Рябов, А. И. Курочкин, О. М. Фоломеев // Теплоэнергетика. – 1999. – № 8. – С. 53 – 58.

11. **Ryabov, G.A.** The Implication of CFB Technology for Repowering of Old Pulverized Coal Boilers in Russia [Text] / G. A. Ryabov, I. I. Nadirov // Proc. Of 15th Int. Conf. on FBC, May 16 – 19, 1999. – USA, Savannah, Georgia, 1999.

12. **Фоломеев, О.М.** Исследование гидродинамики и тепломассообмена применительно к условиям работы надслоевого пространства котлов с циркулирующим кипящим слоем [Текст] / О. М. Фоломеев, С. Н. Трухачев, Г. А. Рябов // Теплоэнергетика. – 2000. – №10. – С. 27 – 32.
13. **Рябов, Г.А.** Применение котлов с циркулирующим кипящим слоем для замены устаревших пылеугольных котлов [Текст] / Г. А. Рябов, Е. Н. Толчинский, И. И. Надыров [др.]// Теплоэнергетика. – 2000. – № 8. – С. 14 – 19.
14. **Рябов, Г.А.** Проблемы создания котлов с циркулирующим кипящим слоем для крупных энергоблоков [Текст] / Г. А. Рябов, Д. А. Шапошник // Электрические станции. – 2000. – №9. – С. 18 – 23.
15. **Рябов, Г.А.** Научное обоснование использования технологии сжигания отечественных твердых топлив в циркулирующем кипящем слое [Текст]/ Г. А. Рябов, И. И. Надыров, О. М. Фоломеев, С. Н. Трухачев// Теплоэнергетика. – 2001. – №6. – С. 38 – 43.
16. **Рябов, Г.А.** Основные технические решения по реконструкции Несветай ГРЭС с установкой нового котла с ЦКС в качестве прототипа для технического перевооружения угольных ТЭС [Текст] / Г. А. Рябов, Ю. Н. Втюрин, А. М. Зыков [др.] // Электрические станции. – 2001. – №7. – С. 18 – 25.
17. **Ryabov, G.A.** Solid mass fluxes in the exit region of CFB furnace [Text] / G.A. Ryabov, O.M. Folomeev, S.N. Trukhachev, D.A. Shapochnik// Proc. of 7th Int. Conf. on CFB.– Canada, Niagara Falls, Ontario 2002.
18. **Ryabov, G.A.** Profile of secondary air stream in CFB model [Text] / G. A. Ryabov, O. M. Folomeev, V. A. Molchanov and A. F. Khritinin// Proc. of 7th Int. Conf. on CFB.– Canada, Niagara Falls, Ontario, 2002.
19. **Рябов Г.А.** Исследование систем улавливания и возврата на установках с циркулирующим кипящим слоем [Текст] / Г.А. Рябов, О.М. Фоломеев, Д.А. Шапошник// Теплоэнергетика. – 2002. – № 8. – С. 18 – 24.
20. **Ryabov, G. A.** Agglomeration of Bed Material: Influence on Efficiency of Biofuel Fluidized Bed Boiler [Text] / G. A. Ryabov, D. S. Litoun, E. P. Dik // Proc. of 17th Int. Conf. on FBC, 18 – 23 May, 2003. – USA, Jacksonville, Florida, 2003.
21. **Денисов, В. М.** Опыт пуска и освоения мощности котла с кипящим слоем ТЭС – 3 Архангельского ЦБК [Текст] / В. М. Денисов, С. В. Бердин, Г. А. Рябов [др.] // Промышленная энергетика. – 2002. – № 9. – С. 26 – 32.
22. **Ryabov, G. A.** Solid separation in upper part of CFB riser [Text] / G. A. Ryabov, O. M. Folomeev, D. A. Shaposhnik // Proc. of the 8th Int. Conf. on CFB, 10 – 13 May, 2005. – China, Hangzhou, 2005.
23. **Рябов Г. А.** Использование биомассы и отходов производства для решения проблем энергосбережения [Текст] / Г. А. Рябов // Электрические станции. – 2005. – № 7. С. 33 – 38.
24. **Рябов, Г. А.** Энергетические котлы с циркулирующим кипящим слоем. Увеличение единичной мощности и параметров пара [Текст] / Г. А. Рябов // Электрические станции. – 2005. – № 9. – С. 8 – 13.
25. **Рябов, Г. А.** Особенности процессов в слое и надслоевом пространстве при сжигании биотоплив в котлах с кипящим слоем [Текст] / Г. А. Рябов,

Э.П.Дик, А.Н.Соболева, Т.Е.Соловьева //Теплоэнергетика. – 2005. – № 9. – С. 54 – 60.

26. **Buchcov, A. M.** Repowering of old pulverized coal boilers – CFB boiler on Nesvetay TPP [Text] / A. M. Buchcov, G. A. Ryabov // Proc. of the 8th Int. Conf. on CFB, 10 – 13May, 2005. – China, Hangzgou, 2005.

27. **Рябов, Г. А.** Техническое перевооружение тепловых электростанций, сжигающих твердые топлива и природный газ, по разработкам ВТИ для второй очереди Шатурской ГРЭС [Текст] /Г. А. Рябов, П. А. Березинец, Г. Д. Авруцкий, В. Р. Котлер // Энергетик. – 2006. – № 6. –С. 14 – 18.

28. **Tugov, A. N.** Operating experience of fluidized bed furnaces of municipal wastes incineration at Rudnevo plant in Russia [Text] / A. N. Tugov, G. A. Ryabov, E. P. Dik [atal.] // Proc. of the 9th Int. Conf. on CFB, 13 – 16 May, 2008. – Germany, Hamburg, 2008. – P. 1063 – 1068.

29. **Рябов, Г.А.** Перспективы и проблемы использования биомассы и отходов для производства тепла и электроэнергии [Текст] / Г. А. Рябов, Д. С. Литун, Э. П. Дик, К. А. Земсков // Теплоэнергетика. – 2006.– № 7. – С. 61 – 66.

30. Современные природоохранные технологии в электроэнергетике [Текст]: информационный сборник/ под общ. ред. В. Я. Путилова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 387 с. – Разд. 1.5.1 – 1.5.2.

31. **Рябов, Г. А.** Перспективы использования технологии ЦКС при техническом перевооружении ТЭС России [Текст] / Г. А. Рябов, О. М.Фоломеев, Д. С Литун [др.] // Теплоэнергетика. – 2009. – № 1. – С. 28 – 36.

32. **Ryabov, G. A.** Economical Comporison PC and CFB Boilers for Retrofit and New Power Plantsin Russia [Text] / G. A. Ryabov // Proc. of the 20th Int. Conf. on FBC, 18 – 21May, 2009. – China, Xian, 2009. – P. 282 – 291.

33. **Рябов, Г.А.** Сжигание топлив в химических циклах с сепарацией CO₂ [Текст] /Г. А. Рябов, Д. А. Санкин, К. В. Ханеев // Энергетик. – 2009. – № 2. – С. 14 – 17.

34. **Рябов, Г.А.** Сепарация CO₂ с использованием химических циклов сжигания и газификации топлив [Текст] / Г. А. Рябов, О. М. Фоломеев, Д. С Литун, Д.А. Санкин // Теплоэнергетика. – 2009. – № 6. – С. 39 – 49.

35. **Рябов, Г. А.** Применение технологии ЦКС для крупных энергетических блоков и улавливания CO₂[Текст] / Г. А. Рябов, О. М. Фоломеев, Д.А. Санкин [др.]// Электрические станции. – 2010. – № 2. –С. 2 – 11.

36. **Рябов, Г.А.** Применение полигенерирующих систем для повышения эффективности использования твердых топлив [Текст] / Г. А. Рябов, К. В. Ханеев // Энергетик. – 2010. № 11. – С. 35 – 38.

37. **Рябов, Г.А.** Разработка типовых котлов с ЦКС для технического перевооружения ТЭС [Текст] / Г. А. Рябов, О. М.Фоломеев, Д. А. Мельников [др.] // Электрические станции. – 2011. – № 6. – С. 18 – 26.

38. **Ryabov, G. A.** Cold Model Study on Interconnected Fluidized Bed Reactors for Multi – Generation Systems and Chemical Looping processes [Text] /

G. A. Ryabov, O. M. Folomeev, D. A. Sankin, K. V. Chaneev// Proc. of the 10th Int. Conf. on CFB and Fluidization Technology, 1 – 5May, 2011.– USA, Synriver, Oregon, 2011. – P. 169 – 176.

39. **Рябов, Г. А.** Обоснование расчета топочного контура котлов с циркулирующим кипящим слоем [Текст] / Г. А. Рябов, О. М. Фоломеев // Теплоэнергетика. – 2011. – № 6. – С. 12 – 18.

40. **Рябов, Г. А.** Использование технологии циркулирующего кипящего слоя при совместном сжигании биомассы и ископаемых топлив на ТЭЦ [Текст] / Г. А. Рябов, И. А. Долгушин // Электрические станции. – 2012. – № 10. – С. 4 – 9.

41. **Рябов, Г. А.** Совершенствование технологии ЦКС в Китае [Текст] / Г. А. Рябов, К. В. Ханеев // Энергохозяйство за рубежом. – 2013. – № 5 (270), – С. 18 – 22.

42. **Рябов, Г. А.** Котлы с циркулирующим кипящим слоем на сверхкритические параметры пара [Текст] / Г. А. Рябов // Электрические станции. – 2013. – № 9. – С. 14 – 22.

43. **Рябов, Г. А.** Профиль энергоблока угольной ТЭЦ нового поколения [Текст] / Г. А. Рябов, Г. Д. Авруцкий, А. М. Зыков [др.] // Известия РАН. Энергетика, 2014. – № 1. – С. 16 – 26.

44. **Рябов, Г. А.** Использование технологии циркулирующего кипящего слоя для улавливания CO₂. Сжигание и газификация в химических циклах [Текст] / Г. А. Рябов, Д. А. Санкин, О. М. Фоломеев // Известия РАН Энергетика. – 2014. – № 4.

45. **Рябов, Г. А.** Методика расчета показателей псевдоожижения в системах возврата материала аппаратов с циркулирующим кипящим слоем [Текст] / Г. А. Рябов, О. М. Фоломеев // Известия РАН Энергетика. – 2014. – № 5.

46. **Рябов, Г. А.** Исследование граничных режимов движения твердых материалов в циркуляционных контурах энергоустановок [Текст] / Г. А. Рябов, О. М. Фоломеев, Д. А. Санкин, Д. А. Мельников // Теплоэнергетика. – 2014. – № 11. – С. 1 – 10.

47. **Ryabov, G. A.** Investigation on hydrodynamics of interconnected reactors and loop seal behavior for Multi – generation systems [Text] / G. A. Ryabov, O. M. Folomeev, D. A. Sankin, D. A. Melnikov // Proc. of 11th Int. Conf. on CFB and Fluidization Technology, May 14 – 17, 2014. – China, Beijing, 2014.

48. **Рябов, Г. А.** Опыт сжигания различных видов биомассы в России и Белоруссии [Текст] / Г. А. Рябов, Д. С. Литун, Е. А. Пицуха [др.] // Электрические станции. – 2015. – № 9. – С. 9 – 17.

49. **Рябов, Г. А.** Результаты расчетных и экспериментальных исследований гидродинамики циркуляционных контуров в аппаратах с циркулирующим кипящим слоем и системах со связанными реакторами [Текст] / Г. А. Рябов, О. М. Фоломеев, Д. А. Санкин, Д. А. Мельников // Теплоэнергетика. – 2015. – № 2. – С. 33 – 40.

50. **Ryabov, G. A.** Pressure Balance model for Dual CFB – FB Reactors Systems [Text] / G. A. Ryabov, O. M. Folomeev, D. A. Sankin, D. A. Melnikov // Proc.

of the 22nd Int. Conf on Fluidized Bed Conversion, 12 – 14 June, 2015.– Finland, Turkey, 2015.

51. **Ryabov, G. A.** Hydrodynamics of Interconnected Reactors for Polygeneration Systems and Chemical Looping Combustion and Gasification[Text] / G. A. Ryabov, O. M. Folomeev, D. A. Sankin, D. A. Melnikov// JP Journal of Heat and Mass Transfer. – 2016. – Vol. 13. – № 1.

Патенты

1. Пат. на полезную модель U1 56559 Российская Федерация, МПК F 23 С 10/00. Установка для сжигания газообразного топлива в химическом цикле с сепарацией диоксида углерода при использовании частиц оксидов металла – носителей кислорода [Текст] /Рябов Г. А., Фоломеев О. М. ; заявитель и патентообладатель ОАО «ВТИ». – №2005139888/22 ; заявл. 21.12.2005 ; опубл. 10.09.2006.

2. Пат. на полезную модель U1 72041 Российская Федерация, МПК F 23 С 10/00. Установка для сжигания газообразного топлива в химическом цикле с сепарацией диоксида углерода при регулируемой циркуляции переносчиков кислорода [Текст] / Рябов Г. А., Фоломеев О. М.; заявитель и патентообладатель ОАО «ВТИ». – № 2007146014/22; заявл. 13.12.2007; опубл. 27.03.2008, Бюл. № 9.

3. Пат. на полезную модель U1 79977 Российская Федерация, МПК F 23 С 10/00. Установка для сжигания твердого топлива в химическом цикле с газификацией и при использовании циркулирующих частиц оксидов металла в качестве переносчиков кислорода [Текст] / Рябов Г. А., Фоломеев О. М., Санкин Д. А.; заявитель и патентообладатель ОАО «ВТИ». – № 2008140055; заявл. 10.10.2008; опубл. 02.01.2009, Бюл. № 2.

4. Пат. на полезную модель U1 101035 Российская Федерация, МПК С 10 J 3/86. Полигенерирующая система переработки твердого топлива [Текст] / Рябов Г. А., Фоломеев О. М., Ханеев К. В., Санкин Д. С., Мельников Д.А.; заявитель и патентообладатель ОАО «ВТИ». – № 2010128463/05; заявл. 12.07.2010; опубл. 10.01.2011, Бюл. №1.

5. Пат. на полезную модель U1120379 Российская Федерация, МПК В 04 С 3/02. Сепаратор циклонного типа для отделения твердых частиц из высокотемпературного газового потока [Текст] / Рябов Г. А.; заявитель и патентообладатель ОАО «ВТИ». – № 2012123423/05; заявл. 20.09.2011; опубл. 07.06.12.

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

a – ширина входного парубка циклона, м; b – высота входного парубка циклона, м; d – диаметр частиц, м; D – диаметр, м; F – сечение, м²; g – ускорение свободного падения, м/с²; G – удельный расход частиц, кг/(м²·с); h – высота, м; $H_{ц}$ – полная высота циклона, м; M – масса материала, кг; p – давление, Па; Δp – перепад давлений, сопротивление, Па; t – температура, °С; S – концентрация натрия и калия, %; U – скорость газа, м/с; α – коэффициент

теплоотдачи, Вт/м²·К; ε – порозность; λ – теплопроводность, Вт/(м·К); μ – динамическая вязкость, Па·С; ν – кинематическая вязкость м²/с; ρ – плотность (концентрация), кг/м³; σ – коэффициент аккомодации; η – коэффициент полезного действия (КПД).

Безразмерные критерии: $Ar = gd^3(\rho_v - \rho_f)/(\nu_f^2 \cdot \rho_f)$ – Архимеда; $Fr = U^2/(g \cdot d)$ – Фруда; $Re = Ud/\nu_f$ – Рейнольдса; $St = (U \cdot d \cdot \rho)/(\mu_f \cdot D_3)$ – Стокса.

Индексы: в – витание (скорость); вх – вход в циклон; вых – на выходе из топки; г – газы; гор – горизонтальная часть L-клапана; з – зола; к – колпачки (высота); оп – опускной (расход); п – подъемный (расход); р – расчетный (диаметр); с – средний (диаметр частиц); сл – слой; ск – стенка; ст – стояк; т – топка (сечение, высота); тр – выхлопная труба циклона; ун – унос; ц – циклон (диаметр, высота); ч – частицы; э – эквивалентный (диаметр); i – текущее значение по высоте; $\bar{}$ – среднее значение; экр – экраны; конд – кондуктивный; фр – фракционный; mf – минимальное снижение.