

На правах рукописи



ГОЛУБЕВ Вадим Алексеевич

ОБОСНОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СПОСОБОВ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАСТИТЕЛЬНЫХ
ОТХОДОВ

01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника

05.14.14 – тепловые электрические станции,
их энергетические системы и агрегаты

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Барнаул – 2014

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет имени И.И.Ползунова» на кафедре «Котло- и реакторостроения» и в Обществе с ограниченной ответственностью «ПроЭнергоМаш-Проект», г.Барнаул

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент

Пузырёв Евгений Михайлович

Научный консультант: доктор технических наук, профессор

Сеначин Павел Кондратьевич

Официальные оппоненты:

Богомолов Александр Романович, доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

Кириченко Александр Федорович, кандидат технических наук, эксперт по сертификации энергетического оборудования, руководитель Органа по сертификации «Сибэнерготест», г. Барнаул.

Ведущая организация: **ОАО «Сибэнергомаш»** (Барнаульский котельный завод), г.Барнаул

Защита состоится «27» июня 2014 г. в 14.30 на заседании диссертационного совета Д 212.004.03 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И.Ползунова» по адресу: 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46. (тел/факс (3852) 29 87 22; E-mail: D21200403@mail.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» по адресу: 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета (до 16 июня, не позднее 10 дней до защиты диссертации).

Автореферат разослан "____" апреля 2014 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.004.03,
кандидат технических наук, доцент



С.П. Кулманаков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Развитие общества сегодня характеризуется глобализацией и острыми кризисными ситуациями, вызываемыми во многом проблемами энергетики и экологии. Повсеместно возникают противоречия между возрастающим спросом на энергоносители, ограниченностью запасов традиционных топлив и их неуклонным удорожанием, и одновременно жизнедеятельность сопровождается производством горючих отходов: древесных, сельскохозяйственных, лигнина и др., горы которых быстро растут и представляют серьезную угрозу нашего времени. Например, в Алтайском крае энергетический потенциал только кородревесных отходов – КДО в 1,5 раза больше потребности в топливе. Выявленное противоречие можно разрешить, рассматривая отходы как местные топлива для энергетики с минимумом транспортных расходов, и как сырьевую базу для производства брикетов и пеллет – возобновляемого высококачественного и экологически безопасного биотоплива, CO₂ нейтрального, создающего минимальную эмиссию выбросов.

С другой стороны, проблема заключается в оборудовании для огневой утилизации: его отсутствии, непригодности, в том, что оно морально и физически устарело. Требуются технологии, позволяющие предприятиям расширить топливную базу, утилизировать отходы и высвободить площади свалок, уменьшить экологические выплаты и снизить эксплуатационные расходы. И здесь важна возможность малозатратной модернизации типовых котлов с заменой значительной доли качественного топлива на отходы путем разработки и установки высокоэффективных топочных устройств.

Еще в большей степени разработка технологических схем и проектирование требуемого набора оборудования актуальны и необходимы при создании производства качественных видов топлива из лигнина и подобных ему отходов, не пригодных для эффективного прямого сжигания.

Целью работы является научное обоснование и совершенствование способов энергетического использования растительных отходов на основе изучения их теплофизических свойств и кинетики термических превращений, численного моделирования определяющих процессов, а также разработка конструкций вихревых топок для прямого сжигания в типовых котлах и комплексов подготовки высококачественного энергетического биотоплива.

Для достижения этих целей **решались следующие задачи.**

- Анализ и экспериментальное исследование теплофизических свойств, кинетики термических превращений КДО и гидролизного лигнина в условиях, характерных для топочных процессов и процессов переработки биомассы в энергетическое топливо.
- Разработка и научное обоснование путем численного моделирования конструктивных схем вихревых топочных устройств, пригодных для перевода энергетических котлов БКЗ-75 на прямое совместное сжигание КДО с углем (при замене до 40% его в топливном балансе).
- Теоретическое обоснование и разработка метода приборного контроля доли биомассы в топливном балансе многотопливных энергетических установок.
- Комплексная разработка технологии получения высококачественного энергетического биотоплива в виде брикетов из растительных отходов (на примере лигнина) с унификацией теплотехнических свойств, включая методики теплового,

аэродинамического и конструкторского расчетов оборудования комплекса (с полочной сушилкой и теплогенератором).

Научная новизна (положения, выносимые на защиту).

- Результаты опытных исследований и анализа характеристик КДО и лигнина в процессах их сушки, термического разложения и горения.

- Обоснован (численным моделированием по коду FIRE-3D) и запатентован способ прямого вихревого сжигания на ТЭЦ совместно с углем многотоннажных потоков КДО с использованием типовых энергетических котлоагрегатов (на примере котлов БКЗ-75, включая малозатратные схемы реконструкции топки).

- Теоретически обоснован и предложен метод приборного контроля доли биомассы в топливном балансе многотопливных энергетических установок (на основе газового анализа).

- Научно обоснована схема подготовки высококачественного энергетического биотоплива (на примере лигнина) с унификацией свойств влажных отходов (с использованием защищенных патентами устройств - сушилки полочного типа и теплогенератора с топкой вихревого типа).

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в том, что:

- результаты экспериментального исследования свойств и характера поведения древесных отходов и лигнина в условиях интенсивного термического воздействия могут быть применены при реконструкции и создании нового энергетического оборудования, использующего КДО и растительные отходы;

- разработана методика математического моделирования и проектирования вихревых топочных устройств прямого сжигания с использованием рекомендаций, учитывающих усадку и кинетику стадий термических превращений КДО;

- на примере котлов БКЗ-75 разработаны, запатентованы и внедрены вихревой топочный процесс и новые технологические схемы прямого сжигания КДО совместно с углем, а также конструкции топочно-горелочных устройств, дожигателя шлака, трамплина и других элементов, позволяющие повысить эффективность работы котлов и снизить вредные выбросы в атмосферу;

- научно обоснованы двухступенчатая пневматическая система сушки и система складирования КДО, дополняющие схему вихревого сжигания, которые позволяют при реконструкции типовых котлов, в отличие от 3-5% для зарубежных схем, вовлечь в тепловой баланс ТЭЦ до 40% КДО;

- предложенный метод приборного контроля доли биомассы в топливном балансе может быть использован на предприятиях, применяющих схемы совместного сжигания биомассы с различными энергетическими топливами;

- внедрение новых запатентованных агрегатов и технологических схем сушки и брикетирования высоковлажных растительных отходов позволяет унифицировать их свойства с получением энергетического биотоплива.

Реализация работы. Результаты работы использованы в малозатратных проектах реконструкций энергетических котлов: БКЗ-75 стационарный №5 для ТЭЦ Селенгинского целлюлозно-картонного комбината (СЦКК), ЧКД-35 на ТЭЦ в г. Габрово, Республика Болгария, БКЗ-75 стационарный №9 ТЭЦ №6 в г. Братск с установкой в них вихревых топков, а также в проекте промышленной установки по производству до 5 т/ч брикетов из гидролизного лигнина, г. Речица, Беларусь.

Разработанные в диссертации рекомендации по конструированию вихревых топочных камер используются конструкторским бюро ООО «Специальное конструкторское бюро Промышленной Теплоэнергетики», ООО «Вихревые Технологии Сжигания», ООО «ПроЭнергоМаш-Проект», ООО «НИККОМ» при проектировании котлов с вихревыми топками «Торнадо», сушилок и вспомогательного оборудования для утилизации отходов.

Достоверность и обоснованность результатов работы подтверждается: использованием апробированных методик экспериментальных исследований; соответствием результатов экспериментам других авторов; результатами испытаний и практическим опытом эксплуатации реконструированных котлов; согласованностью теоретических и опытных данных, широким практическим внедрением теоретических и технологических разработок.

Личный вклад автора заключается:

- в постановке задач, разработке и создании лабораторных установок по изучению теплофизических свойств и термодеструкции растительных отходов, включая создание методик, а также в проведении исследований и обобщении экспериментальных данных;
- в разработке технологических схем энергетического использования КДО и лигнина, компьютерном моделировании низкотемпературной вихревой топки, пригодной для прямого совместного сжигания КДО с углем в котлах БКЗ-75, включая разработку патентов ПМ №86277, ПМ №86705;
- в разработке и обосновании метода приборного контроля доли биомассы в топливном балансе многотопливных энергетических установок;
- в разработке и обосновании схем и комплекса производства энергетического биотоплива из биомассы, в том числе топки теплогенератора и сушилки полочного типа, включая создание патентов ПМ №87318, ПМ №86277, ПМ №98744, ПМ №89674 и разработку алгоритмов расчета полочных аппаратов;
- в руководстве сотрудниками и авторском надзоре за монтажом, организацией пуско-наладочных, режимно-наладочных, балансовых и специальных испытаний при промышленном внедрении работ.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались на 13 всероссийских научных, научно-практических конференциях и семинарах, указанных в списке публикаций.

Публикации. По теме диссертации автором выполнено 32 публикации, в том числе 4 статьи в рецензируемых изданиях из списка ВАК РФ и 7 патентов.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка литературы. Общий объём диссертации 157 страниц. Работа содержит 115 страниц основного текста, 96 рисунков, 11 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы, отмечены научная новизна, практическая значимость полученных результатов и основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1 посвящена анализу особенностей использования растительных отходов в качестве альтернативного топлива с учетом их рациональной и экономической

утилизации. Конкретно была проведена оценка потенциала имеющихся в Алтайском крае древесных отходов. Существует большое разнообразие видов отходов древесины, соответственно, различаются и свойства этих отходов. Энергетический потенциал древесных и основных сельскохозяйственных отходов на Алтае оценивается в 2млн.т.у.т. в год при потреблении в энергетике около 5-6млн.т.у.т. в год привозного угля. Таким образом, переход на использование биотоплива в Алтайском крае позволит отказаться на 30-40% от привозных углей и получить значительный экономический и экологический эффект.

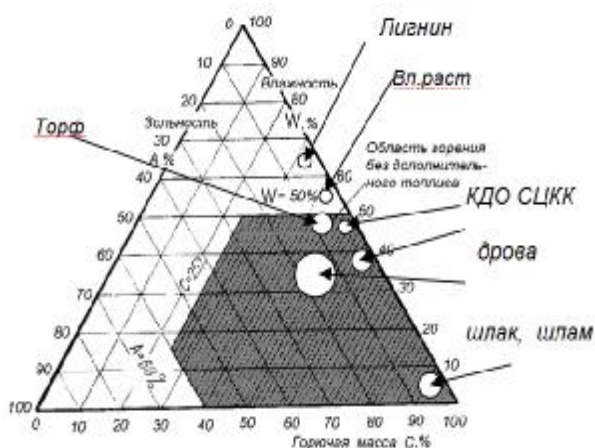


Рисунок 1 – Треугольник Таннера

Важнейшая характеристика горючих отходов – возможность автогенного (самоподдерживающегося) горения - определяется содержанием балластирующих компонентов: влаги и золы. Это заштрихованная зона в поле треугольника Таннера, рис.1, с предельными значениями: горючих более 25%, влаги до 50% и золы до 60% по массе. Согласно проведенному анализу многие отходы не автогенны, требуют предварительной сушки.

С целью обоснования технологий утилизации отходов опытным изучением процессов сушки и термической деструкции были созданы лабораторные стенды, использующие в том числе термогравиметрию (ТГ), рис.2. Экспериментально получаемые кривые изменения массы от температуры и времени позволяют с точностью судить о ходе и стадиях изучаемых процессов.

В лабораторных установках с использованием дериватографа и муфельной печи с механотроном на образцах КДО изучены процессы сушки, выхода, воспламенения горения и летучих. Определены границы перехода к режиму падающей скорости сушки и др. При типовой температуре сушки 105-120°C для лигнина критическая влажность равна 23%. С увеличением температуры сушильного агента – СА интенсивность сушки возрастает. Период падающей скорости сушки наступает при более низкой критической влажности 15%(600°C) и 10%(800°C). Поверхность материала может нагреваться значительно выше температуры мокрого термометра, что сопровождается взрывоопасным режимом газификации. Не рекомендуется применять СА с температурой более 650°C.



Рисунок 2 – Экспериментальный стенд для изучения процессов в КДО

В муфельной печи с механотроном на отдельных частицах и образцах КДО, которые подвешивались к одному из плеч аналитических весов и помещались в муфель, измерялись ход прогрева и потеря массы частиц m , рис.3 и 4. Наблюдался и изучался процесс термического разложения, включающий все стадии: прогрев, сушка, выход летучих и горение коксового остатка, рис 2.

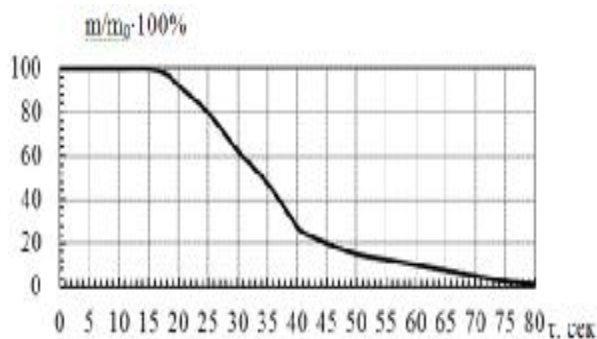


Рисунок 2 – Термическое разложение и горение древесной пыли. Фракция 0,063 мм. Температура печи 500°С

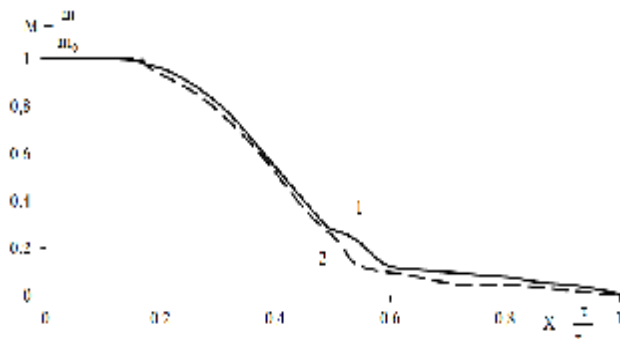
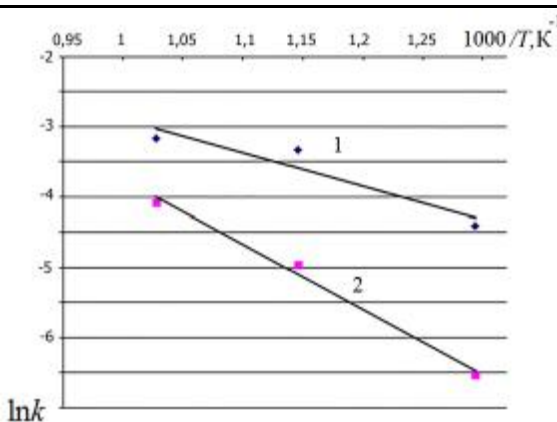


Рисунок 3 – Динамика разложения частиц березы в безразмерных координатах. 1 – $m_0=0,9\text{гр}$ $\tau_k=93\text{сек}$. 2 – $m_0=0,46\text{гр}$ $\tau_k=55\text{сек}$

Расчеты кинетических параметров по ТГ-кривой, таблица 1, основаны на формальном кинетическом уравнении, $-dm/d\tau = km^n$, где n – порядок реакции; k – удельная константа скорости реакции, определяемая по закону Аррениуса: $k = k_0 \exp(-E_a/RT)$, $R=8,314\text{кДж/(кмоль}\cdot\text{К)}$, E_a – энергия активации реакции.

Таблица 1 – Кинетические константы для стадий термического разложения КДО

Стадия термического разложения	Энергия активации, E_a , кДж/моль		Предэкспоненциальный множитель k_0 , с^{-1}	
	Опыты	Поме-ранцев	Опыты	Поме-ранцев
Стадия выхода летучих (кривая 1)	39,8	32	6,62	-
Стадия горения кокса (кривая 2)	77,3	75-135	257	$(1,5-210)\cdot 10^3$



С помощью метода дифференциальной термогравиметрии в муфеле для образцов влажностью выше 40% зафиксирован скачок вверх дериватограммы, кривая 2 (рис.4) - разности температуры инертного вещества и образца.

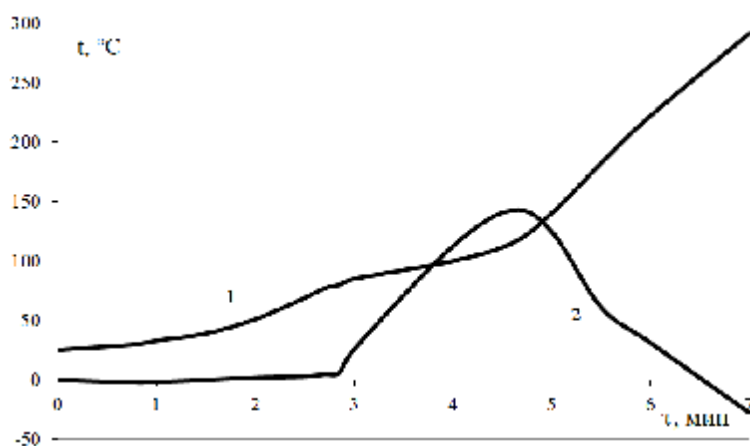


Рисунок 4 – Дериватограмма (влажность $W_r=80\%$).

Интенсивность всплеска зависит от влажности древесины, чем влажность больше, тем интенсивнее всплеск. Скачок на дериватограмме объясняется тем, что сушка сопровождается интенсивным теплоперено-
внутренним теплоперено-

сом в образце с испарением на поверхности и конденсацией пара в объеме образца.

В опытах отмечена заметная усадка, до 0,8 от исходных линейных размеров частиц КДО, рис. 5, ещё в стадии сушки, что необходимо учитывать в расчетах.

На основе анализа опытных данных предложены рекомендации:

При организации топливоподготовки необходимо применять интенсивную высокотемпературную сушку отходов горячими дымовыми газами в нисходящем потоке по прямоточной схеме с многократным взаимным проникновением потоков сырья и СА и ограничить процесс сушки критической влажностью.



Рисунок 5 – Образцы древесины, исходные слева и после нагрева справа (шкала в мм)

Для организации прямого сжигания КДО рекомендуется использовать вихревую технологию с непрерывной подачей топлива, дутья и типовыми мерами стабилизации горения. Вихрь горячих продуктов сгорания удержит в топке мелкие твердые частицы и искры, создаст искровое зажигание и интенсивный перенос тепла в зоны сушки из зон горения, а также обеспечит изотермичность топочного процесса.

В главе 2 рассмотрены проблемы влияния отходов и выполнен обзор технологий сжигания КДО. По зарубежным источникам в энергетических котлах можно использовать до 5% КДО при совместном сжигании с углем. На основе анализа приведенных в главе 1 опытных исследований с этой целью предложено использовать типовые котлы с вихревыми топками типа НТВ, в которых циркулирующий вихрь является мощным фактором стабилизации горения. Рассмотрены вопросы разработки технологии по подготовке к энергетическому использованию КДО путем прямого совместного сжигания с углем.

Вихревой эффект широко используется в циклонах (Кнорре Г.Ф, Штым А.Н., Штым К.А.), вихревых топках ЦКТИ (Н.В. Голованов, Саломатов В.В.), топках МЭИ, КазНИИЭнергетики и др. Предложенная В.В. Померанцевым схема НТВ ЛПИ имеет наиболее широкое внедрение, многочисленные запатентованные модификации и усовершенствования. Схема развивается в нескольких независимых направлениях. Здесь значительный вклад внесли Рундыгин Ю.А., Лихачева Г.Н., Григорьев К.А., Скудицкий В.Е., Шестаков С.М., Обухов И.В., Финкер Ф.З. и др.

В диссертации также использованы элементы топки НТВ ЛПИ. На основе накопленного опыта была разработана и обоснована численным моделированием общая технологическая схема, включая элементы реконструкции типового энергетического котла БКЗ-75 на совместное вихревое сжигание КДО с углем, рис.5 и 6.

КДО из буртов загружают в бункер 2 погрузчиком 1 и транспортером 3 дозируются на дисковую сортировку 4. Здесь крупные составляющие отбрасываются, а мелкие частицы поступают на транспортеры 5, 6. Далее плужком 8 они сбрасываются в расходный бункер 7 емкостью 20-30 куб.м. с датчиками уровня 10, обеспечивающими контроль объема КДО. Затем КДО подают четырьмя шнековыми сушилками 12 в вихревую топку 20 котла 21 совместно с дутьем через эжектор 18 и прямоточные фау горелки 19 в подготовленном виде – разогретые и подсушенные.

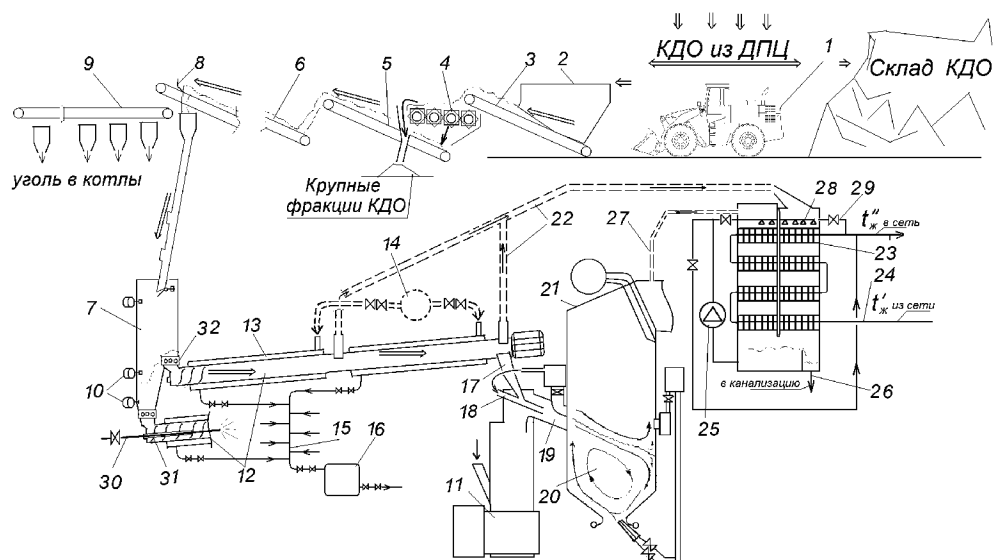


Рисунок 5 – Принципиальная технологическая схема

Уголь подается в котел по штатному тракту топливоподачи 9 через две молотковые мельницы 11 с шахтными сепараторами и через горелки 19 совместно с КДО в вихревую топку 20, где оба вида топлива сгорают. Подсушка повышает калорийность и уменьшает влияние влажности КДО на работу реконструированного котла.

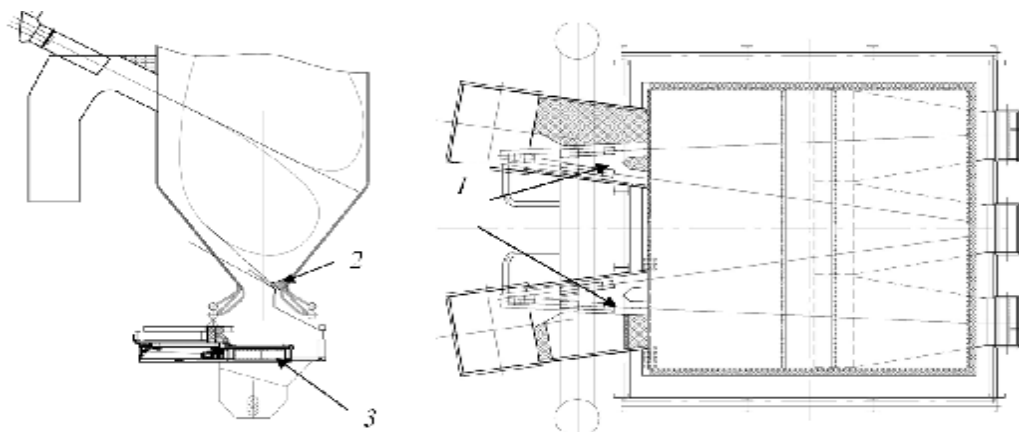


Рисунок 6 – Элементы реконструкции котла на совместное сжигание угля и КДО (патенты ПМ №86277, ПМ №86705). 1-V образные горелки, 2-трамплин, 3- дожигатель шлака.

Разомкнутая схема сушки не балластирует пары влаги из КДО посторонними газами, пары имеют высокую температуру конденсации, 70-95°C, и могут эффективно подогревать сетевую воду в конденсаторе 23, повышая к.п.д. использования топлива на 10-25%, как при сжигании сухих отходов.

Численная реализация математической модели, описывающей процессы аэродинамики, теплообмена и горения в объеме вихревой топки, осуществлялась с использованием специализированного пакета прикладных программ FIRE 3D, разработанного на кафедре ПГСИПГУ ТЭФ ТПУ, г. Томск. На рис. 6 представлена геометрия топочной камеры котла БКЗ 75. В расчете использованы полученные автором кинетические константы горения и учтена усадка частиц древесины (глава 1).

Из рис.7 видно, что предлагаемая схема организации топочного процесса формирует наиболее интенсивные течения, неоднородности, перемешивание и теплообмен именно в нижней части топки котла БКЗ-75, которая ранее практически не

участвовала в работе. Этим обеспечивается повышенный теплосъем и низкотемпературный режим горения в вихревой топке.

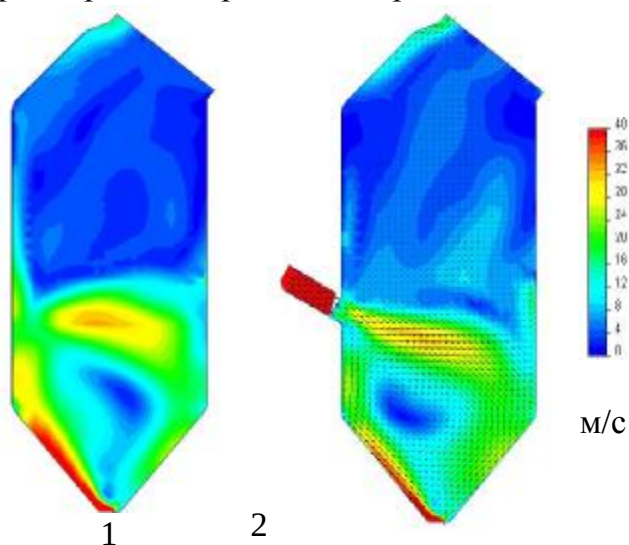


Рисунок 7– Распределение вертикальных проекций векторов и полей скоростей в продольных сечениях между горелками 1 и по горелкам 2

В итоге для разных вариантов подачи дутья были просчитаны и проанализированы распределения проекций векторов и полей скоростей в различных поперечных, продольных и вертикальных сечениях топки котла. Дополнительно на развертке экранов были рассчитаны поля течений, давлений, циркуляция и другие характеристики. После вариантных расчетов были выбраны окончательно углы схождения и горизонтального наклона горелок, угол набегания нижнего дутья, геометрия топки, а также доли раздачи дутья по зонам.

При моделировании рассчитывались траектории движения частиц. Частицы задерживаются вихрем в топке, обеспечивая их глубокое выгорание.

Струи наклонных горелок опускаются вниз и совместно со струями нижнего заднего дутья формируют восходящий вдоль фронтального экрана поток, который поступает под горелки и поддерживает стабильное воспламенение топлива в корне их факелов. Это существенно повышает надежность воспламенения, обеспечивает устойчивость топочного процесса и замещение значительной доли угля отходами.

В главе 3 рассмотрено развитие разработанной схемы прямого сжигания отходов. На типовом котле БКЗ-75, ст. №5 ТЭЦ СЦКК, имеющем систему подачи КДО

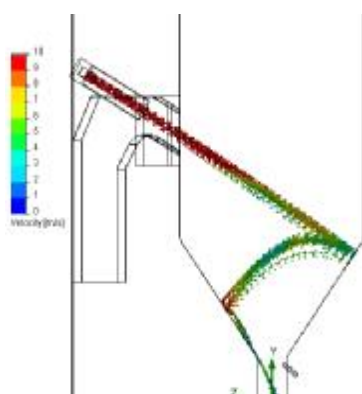


Рисунок 8 – Трассы движения частиц КДО диаметром 15 мм

их доля достигала 4,5-7т/час, до 30% по теплу, выбросы минимальны: $CO=22-104ppm$, $NOx=220-240mg/nm^3$. Усовершенствованные схема

и методика математического моделирования и оптимизации аэродинамики и вводимых элементов получили развитие в проекте перевода типового котла БКЗ-75, ст.№9 ТЭЦ 6 (г. Братск). В этой схеме применена пневматическая сушка КДО. Дополнительно в



Рисунок 9- Горение провала на дожигателе шлака

новой схеме используются дожигатели шлака 3, рис. 6. Они необходимы из-за выявленного при моделировании провала частиц крупнее 3 мм в холодную воронку, рис. 8. Дожигатели шлака работают эффективно,

рис.9, и позволяют существенно сократить мехнедожог с провалом. Тепловая мощность на колосниках от 4 до 10 Гкал/ч или от 10 до 20 % общей мощности котла.

По итогам испытаний, проведенных под руководством зав. лаб. СибЭНТЦ, к.т.н., заслуженного энергетика РФ Васильева В.В., определено, что во всех режимах наблюдалась вихревая аэродинамика и устойчивое горение без пульсаций факела. Поверхности нагрева чистые, коэффициенты тепловой эффективности топки и трубной системы выше проектных. Механический недожог q_4 снижается до 0,3% на номинальной мощности, рис.10. КПД котла на номинале достиг 93%. Газовый анализ подтвердил прогнозируемое при совместном сжигании снижение выбросов оксидов азота в 1,5-2 раза, рис. 11.

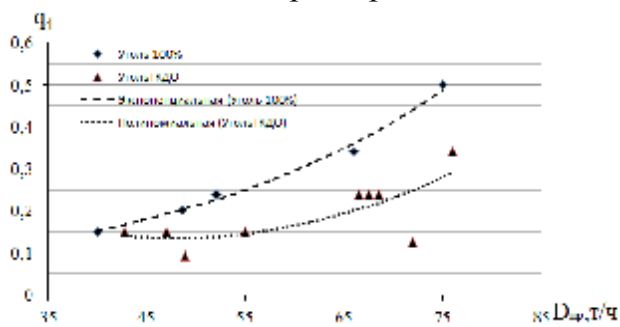


Рисунок 10 - Зависимость мехнедожога от паропроизводительности при различных схемах топливоподачи

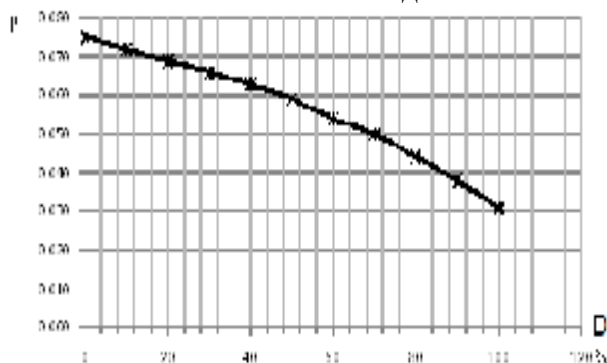


Рисунок 12 - Зависимость β от доли D древесного топлива при совместном сжигании с бурым углем.

продуктов сгорания и номограмм, типа рис. 12, и применением параметра β :

$$\beta = 2,35 \cdot \frac{H^r - 0,126 \cdot O^r}{C^r + 0,375 \cdot S^r}$$

Топлива имеют определенный элементный состав и значения β . Для КДО $\beta=0,030-0,031$ и для угля $\beta=0,073-0,143$.

С другой стороны параметр $\beta_{см}$ может быть определен и восстановлен (обратная задача) на основе приборного анализа состава дымовых газов газоанализатором:

$$\beta_{см} = \frac{21 - 0,605 \cdot CO - RO_2 - O_2}{CO + RO_2}, \quad \beta_{см} = \beta,$$

где CO_2 —углекислый газ, $RO_2=CO_2+SO_2$ – трехатомные газы, CO – угарный газ.

Сопоставляя значения β , для доли D биотоплива, рис. 12, и вычисленные по данным газового анализа $\beta_{см}$, можно определить долю КДО в смеси топлив.

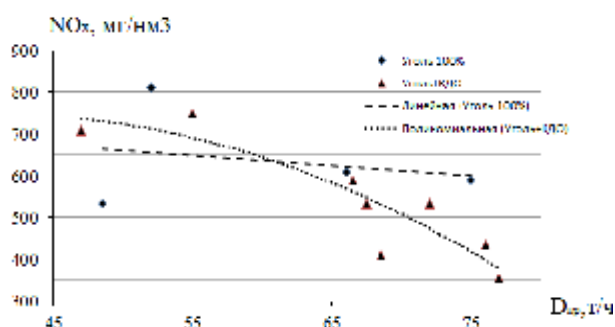


Рисунок 11 - Зависимость концентрации NOx от нагрузки котла при различных схемах топливоподачи

В связи с дотациями при сжигании биомассы важную роль играет учет доли КДО в тепловом балансе. Причем из-за низкой насыпной плотности и калорийности, объемный и массовый расходы КДО могут превышать характеристики потока основного топлива, и учет их доли представляет трудности. Для решения проблемы разработана методика определения доли тепла, вносимой биомассой, с использованием приборного контроля состава про-

Глава 4 касается разработки технологии унификации свойств и переработки растительных отходов в качественное энергетическое биотопливо - брикеты. Разработка и проектирование технологических схем и специального оборудования выполнены с учетом рекомендаций главы 1. Технология на примере получения лигнобрикетов, так как из-за высокой влажности лигнин практически не сжигается, и в отвалах имеются его запасы в миллионы тонн.

В качестве сушильного агента – СА используются дымовые газы от сжигания предварительно подсушенного лигнина. Сушильный агрегат представлен на рис.13. Материал и СА движутся спутно вниз, оптимальный профиль лопаток обеспечивает задержку частиц, многократные взаимопроницающие пересечения потоков и интенсивное взаимодействие потоков частиц и СА.

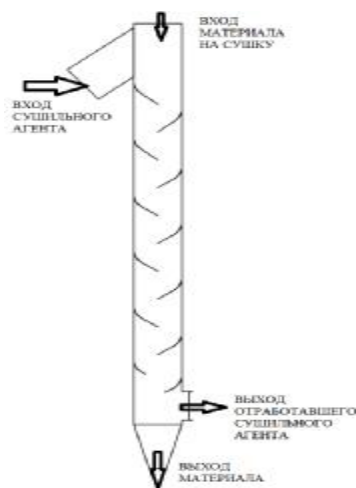


Рисунок 13 – Разрез полочного сушильного агрегата (патент ПМ №87318)

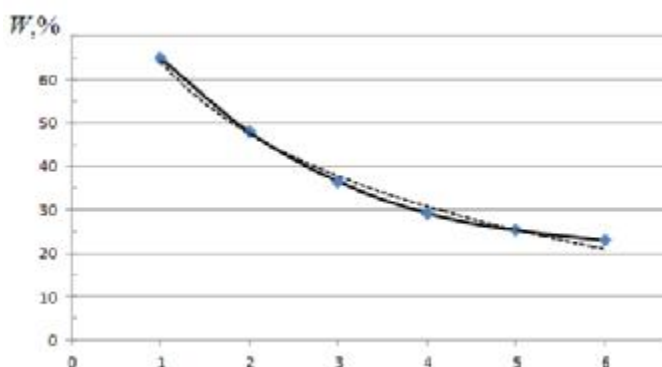


Рисунок 14 - Зависимость влажности лигнина от номера участка N (пунктиром обозначена логарифмическая аппроксимация уравнением)

- Влажность на рабочую массу – от 10% до 25%;
- Зольность на рабочую массу – от 2,1% до 9%;
- Теплота сгорания брикетов, низшая МДж/кг – 16,76(4000ккал/кг).

В диссертации разработана методика инженерного расчета сушки полочного типа, рис.14, которая была использована в проекте сушильной установки ПС – 5.5, работающей в составе брикетировочного комплекса, рис.15.

Характеристики товарного брикета из гидролизного лигнина, получаемого на установке г. Речица Республики Беларусь производительностью 10т/ч, рис.15:

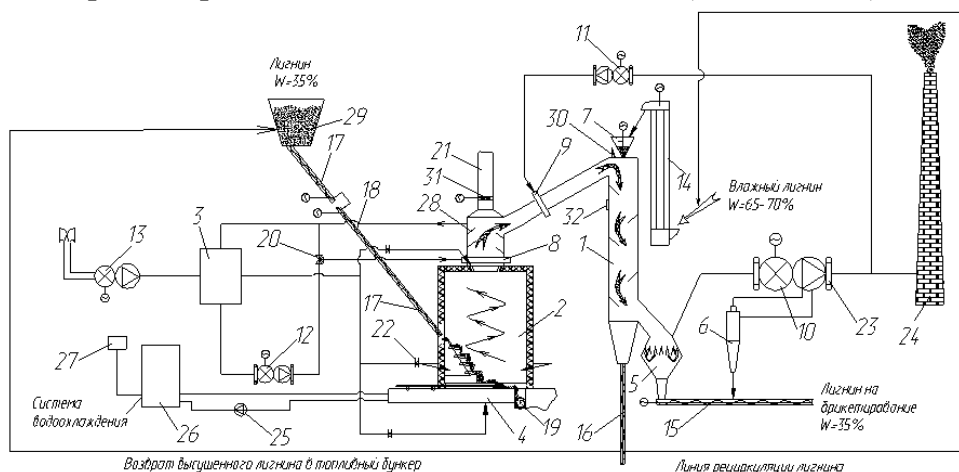


Рисунок 15 Технологическая схема комплекса брикетирования 10 т/час лигнина (использует патенты ПМ №87318, ПМ №86277, ПМ №98744, ПМ №89674)

Разработанная и реализованная технологическая схема опытно-промышленной установки по подготовке 10т/час лигнина к брикетированию и ее основные элемен-

ты представлены на рис.15. Главными элементами установки является полочный сушильный агрегат типа ПС – 5.5 , позиция 1, в которой происходит приготовление готового продукта – сушка лигнина. Сушилка включает загрузочное устройство 7, отбор сухого лигнина 16 и промежуточный уловитель 5.

К числу основных элементов схемы также относятся: теплогенератор - 2 типа ТТГ – 4.2ШпВТ, работающий на лигнине, воздухоподогреватель - 3 трубчатого типа



Рисунок 16 – Комплекс по сушке лигнина г. Речицы

и дымосос пылеуловитель – 10 с циклоном 6.

В теплогенераторе 2 для выгрузки шлака установлена топка – 4 с шурующей планкой типа ТШПМ-1.45. Для создания разряжения в системе и удаления отработанных дымовых газов используется дымосос типа ДП-12×1500 основной, позиция 10, а для подогрева и подачи дутья установлены: дымосос, типа ДН-9×1500, – 12 рециркуляции дымовых газов через воздухоподогреватель - 3, и вентилятор – 13.

Внешний вид разработанного сушильного агрегата, работающего в составе брикетировочного комплекса по производству 5 т/ч лигнобрикетов, смонтированного в г. Речицы Республики Беларусь представлен на рис.16.

Основные результаты и выводы

Выявлено противоречие между возрастающим спросом на энергоносители и ограниченностью запасов традиционных топлив, сопровождающееся их неуклонным удорожанием. При этом текущая жизнедеятельность общества сопряжена с производством горючих твердых бытовых отходов (ТБО), коро-древесных отходов (КДО), лигнина и других, горы которых быстро растут и в настоящее время представляют собой серьёзную экологическую угрозу. Эту проблему предложено решать путем использования этих отходов в качестве энергетического топлива.

На примере Алтайского края показано, что КДО, лигнин и другие ТБО потенциально имеют и зачастую превышают энергетические потребности территории. Предлагается их рассматривать как местные топлива для энергетики с минимумом транспортных расходов и как сырьевую базу для приготовления брикетов и пеллет – возобновляемого высококачественного, CO_2 нейтрального и экологически безопасного биотоплива.

1. Проведено детальное изучение физико-химических и кинетических свойств образцов КДО и лигнина на всех стадиях топочного процесса (прогрева, сушки и выгорания коксового остатка) и получены численные значения констант макрокинетики, как основы для разработки научно обоснованных методик, способов и устройств, необходимых для вовлечения КДО и лигнина в топливный баланс предприятий.

2. На примере котлов БКЗ-75-39-440ФБ предложены (на основе численного моделирования топливного процесса и других исследований) научно обоснованные технологические схемы и конструкторские решения для малозатратной модернизации существующего котельно-топочного оборудования, с возможностью вовлечения в топливный баланс КДО, в том числе, для совместного сжигания КДО и угля (при замене до 40% его в топливном балансе).

3. Теоретически обоснован и разработан метод приборного контроля доли биомассы в топливном балансе многотопливных энергетических установок на базе непрерывного газового анализа уходящих газов (с возможностью автоматического регулирования заданного технологического режима).

4. На примере лигнина разработан и запущен в работу брикетировочный комплекс, обеспечивающий унификацию свойств и переработку до 10 т/час растительных отходов в качественные биобрикеты, включая разработку методики расчета и проектирования полочной сушилки, теплогенератора с вихревой топкой и другого специального оборудования комплекса.

Результаты исследования использованы в малозатратных проектах реконструкций энергетических котлов Барнаульского котельного завода ОАО «Сибэнергомаш» БКЗ-75: станционный №5 для ТЭЦ Селенгинского целлюлозно-картонного комбината (СЦКК) и котла станционный №9 ТЭЦ №6 в г. Братске, с установкой в них вихревых топков, а также в проекте опытно-промышленной по производству до 5 т/ч топливных брикетов из гидролизного лигнина, г. Речица, Беларусь.

Разработанные в диссертации рекомендации по конструированию вихревых топочных камер используются конструкторским бюро ООО «Специальное конструкторское бюро Промышленной Теплоэнергетики», ООО «Вихревые Технологии Сжигания», ООО «ПроЭнергоМаш-Проект», ООО «НИККОМ» при проектировании котлов с вихревыми топками «Торнадо», сушилок и вспомогательного оборудования для утилизации отходов.

Результаты исследования используются в учебном процессе в Алтайском государственном техническом университете им. И.И. Ползунова (на кафедре КиРС), г. Барнаул.

Основные положения диссертации отражены в следующих работах.

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Разработка технологии пиролиза и применение газогенераторов при утилизации отходов/ Е.М. Пузырёв, В.Г. Лурий, В.А. Голубев, А.В. Лаптов, М.Е. Пузырёв // Ползуновский вестник. – 2010. – №1. – С. 87–92.
2. Голубев, В.А. Оценка доли зеленой энергии при сжигании биомассы/ В.А. Голубев, Е.М. Пузырёв, М.Е. Пузырёв // Ползуновский вестник. – 2012. – №3/1. – С. 39–41.
3. Пузырев, Е.М. Роторные машины/ Е.М. Пузырев, В.А. Голубев, М.Е. Пузырев// Ползуновский вестник. – 2013. – № 3/4. — С. 63–69.
4. Пузырёв, Е.М. Роторно-винтовые двигатели/ Е.М. Пузырёв, В.А. Голубев, М.Е. Пузырёв // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – № 4. – С. 36–44.

Патенты на полезные модели:

5. Вихревая топка: патент ПМ №86277 РФ: МКП F23C5/24 / К.С. Афанасьев, В.А. Голубев, Е.Б. Жуков, Е.М. Пузырёв, М.Е. Пузырёв; патентообладатель ООО «НПО «ПроЭнергоМаш» – № 2009111614 ; заявлено 30.03.2009 ; опубл. 27.08.2009.
6. Низкотемпературная вихревая топка: патент ПМ №86705 РФ: МКП F23C5/24 / Е.М. Пузырев, В.А. Голубев, Е.Б. Жуков; патентообладатель ООО «НПО «ПроЭнергоМаш» – № 2009112650 ; заявлено 06.04.2009 ; опубл. 10.09.2009.
7. Газогенераторная установка: патент ПМ №89674 РФ: МКП C10J 3/00 / Е.М. Пузырев, В.Г. Лурий, В.А. Голубев; патентообладатели Пузырёв Е.М., Лурий В.Г., Голубев В.А. – № 2009123126 ; заявлено 18.06.2009 ; опубл. 10.12.2009.

8. Установка для сушки: патент ПМ №87318 РФ: МПК А01С3/00, F26В3/08 / Е.М. Пузырев, В.Г. Лурий, В.А. Голубев, М.С. Никишанин; патентообладатели Пузырёв Е.М., Лурий В.Г. – № 2009123127 ; заявлено 18.06.2009 ; опубл. 10.10.2009.
9. Шнек: патент ПМ №98744 РФ: МПК В 65 G 033/16 / Е.М. Пузырев, В.Г. Лурий, В.А. Голубев; патентообладатели Пузырёв Е.М., Голубев В.А., Пузырев М.Е. – № 2010126133 ; заявлено 25.06.2010 ; опубл. 27.10.2010.
10. Топка кипящего слоя: патент ПМ №107841 РФ: МПК F23С11/00 / Е.М. Пузырев, В.А. Голубев, М.Е. Пузырев; патентообладатели Пузырёв Е.М., Голубев В.А., Пузырев М.Е. – № 2011112811 ; заявлено 01.04.2011 ; опубл. 27.08.2011.
11. Безбарабанный паровой котел: патент ПМ №109829 РФ: МПК F22В21/00, F22 В37/32 / Е.М. Пузырев, В.А. Голубев, М.Е. Пузырев; патентообладатели Пузырёв Е.М., Голубев В.А., Пузырев М.Е. – № 2011112891; заявлено 04.04.2011 ; опубл. 27.10.2011.

Статьи, отражающие основное содержание работы:

12. Голубев, В.А. Исследование свойств и процессов горения нетрадиционных топлив/ В.А. Голубев, Е.Б. Жуков, В.И. Симанов, И.Д. Фурсов // Ползуновский вестник.– 2004.– №1.– С.129-130.
13. Голубев, В.А. Перевод котла БКЗ-75 на сжигание древесных отходов / В.А. Голубев, Е.Б. Жуков, К.С. Афанасьев, Е.М. Пузырев // Ползуновский вестник.– 2007.– №4. – С. 109-113.
14. Пузырев, Е.М. Сжигание низкосортного топлива в вихревых топочных устройствах/ Е.М. Пузырев, К.С. Афанасьев, Е.Б. Жуков, В.А. Голубев // Вестник алтайской науки.– 2008.– С. 101-109.
15. Жуков, Е.Б. Исследование горения низкосортных топлив/ Е.Б. Жуков, И.Д. Фурсов, В.А. Голубев, В.С. Смолин // Вестник алтайской науки.– 2008. – С. 89-95.
16. Голубев, В.А. Исследование свойств и процессов горения нетрадиционных топлив/ В.А. Голубев, Е.Б. Жуков, В.И. Симанов // «Наука. Техника. Иновации.»: тез. докл. региональной научной конференции студентов, аспирантов, молодых ученых. – Новосибирск, 2003.– С. 53-54.
17. Голубев, В.А. Альтернативные виды топлив «Алтайского края» в малой энергетике / В.А. Голубев, Е.Б. Жуков, В.И. Симанов // «Проблемы энергосбережения и энергобезопасности Сибири»: тезисы докладов на Всероссийской научно-практической конференции. – Барнаул, 2004.
18. Жуков, Е.Б. Технология сжигания древесных отходов в малой энергетике/ Е.Б. Жуков, В.А. Голубев, В.И. Симанов// Ползуновский альманах. – Барнаул, 2006. – С. 85-88.
19. Жуков, Е.Б. Сжигание низкосортных топлив с применением многократной циркуляции / Е.Б. Жуков, В.А. Голубев // «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» IX Всероссийская школа-конференция молодых ученых. – Новосибирск, 2006.
20. Пузырёв, Е.М. Математическое моделирование в реконструкции энергетических котлов по технологии низкотемпературного вихревого сжигания/ Е.М. Пузырёв, Е.Б. Жуков, В.А. Голубев, К.С. Афанасьев // Актуальные проблемы энергетики: матер. III междунар. научно-практ. конф.– Екатеринбург, 2007. – С. 124-127.
21. Пузырёв, Е.М. Разработка вихревых топков «Торнадо» / Е.М. Пузырёв, К.С. Афанасьев, В.А. Голубев // Там же. III междунар. конф.– Екатеринбург, 2007. – С. 128-131.
22. Жуков, Е.Б. Моделирование и численная оптимизация вихревых топочных устройств. Минеральная часть топлива, шлакование, загрязнение и очистка котлов/ Е.Б. Жуков, В.А. Голубев, К.С. Афанасьев, Е.М. Пузырев // Сборник докладов IV научно-практ. конф. (Челябинск, 4-7 июня 2007 г.). – Челябинск, 2007. – С. 52-61.
23. Голубев, В.А. Математическое моделирование аэродинамической обстановки в НТВ топках энергетических котлов/ В.А. Голубев, Е.Б. Жуков, К.С. Афанасьев, Е.М. Пузы-

- рёв // Энергетические, экологические и технологические проблемы экономики (ЭЭТПЭ-2007): материалы Всерос. научно-практич. конф. с междунар. участием. АлтГТУ. (Барнаул, 17-20 октября 2007 г.). – Барнаул, 2007. – С. 113-114.
24. Голубев, В.А. Сжигание водоугольного топлива в вихревых топочных устройствах. Физика неравновесных процессов в энергетике и наноиндустрии / В.А. Голубев, Е.Б. Жуков, К.С. Афанасьев // Тезисы докладов Всерос. школы-семинара молодых ученых. – Новосибирск, 2007. – С. 57-58.
25. Пузырёв, Е.М. Технология сжигания кородревесных отходов и низкосортного угля в НТВ-топках энергетических котлов. Энергетические, экологические и технологические проблемы экономики (ЭЭТПЭ-2008) / Е.М. Пузырёв, В.А. Голубев, М.Е. Пузырёв, Е.Б. Жуков // Материалы Всерос. научно-практич. конф. с междунар. участием. – Барнаул, 2008. – С. 296-301.
26. Жуков, Е.Б. Сжигание низкосортного топлива в вихревых топочных устройствах. Горение твердого топлива / Е.Б. Жуков, К.С. Афанасьев, В.А. Голубев, Е.М. Пузырёв // Сб. докл. VII конф. – Новосибирск, 2009. – С. 51-53.
27. Пузырёв, Е.М. Применение вихревых топок "Торнадо" для перевода котлов на использование растительных и кородревесных отходов / Е.М. Пузырёв, К.С. Афанасьев, В.А. Голубев и др. // Сборник докладов V научно-практической конференции "Минеральная часть топлива, шлакование, очистка котлов, улавливание и использование золы". (Челябинск, 7-9 июня 2011 г.). – Челябинск. – 2011. – С. 236-248.
28. Голубев, В.А. Установка по получению аморфного оксида кремния на основе контролируемого пиролиза. Минеральная часть топлива, шлакование, очистка котлов, улавливание и использование золы / В.А. Голубев, Е.М. Пузырев, А.В. Лаптов, М.Е. Пузырев // V научно-пркт. конф. – Челябинск, 2011. – С. 193-203.
29. Афанасьев, К.С. Применение вихревых топок «Торнадо» для утилизации углесодержащих и древесных отходов/ К.С. Афанасьев, В.А. Голубев, М.Е. Пузырёв и др. // VII всероссийский семинар вузов по теплофизике и энергетике: сборник докладов. (Кемерово, 14-16 сентября 2011 г.). – Кемерово, 2011.
30. Голубев, В.А. Использование вихревых топок «Торнадо» в паровых котлах. Минеральная часть топлива, шлакование, очистка котлов, улавливание и использование золы / В.А. Голубев, Е.М. Пузырёв, М.Е. Пузырёв // Сб. докладов V научно-практ. конф. (Челябинск, 7-9 июня 2011 г.). – Челябинск, 2011. – С. 107-116.
31. Голубев, В.А. Оценка доли зеленой энергии при сжигании биомассы в вихревых топках/ В.А. Голубев, Е.М. Пузырёв, М.Е. Пузырёв // VIII Всеросс. Конфер. «Горение твердого топлива». – Новосибирск, 2012. – С.34.1-34.6.
32. Голубев, В.А. Применение математического моделирования при разработке вихревых топок «Торнадо» и переводе энергетических котлов на совместное сжигание низкосортных топлив / В.А. Голубев, К.С.Афанасьев, А.В. Гиль, Е.М. Пузырёв, М.Е. Пузырёв, В.И. Мурко // VIII Всеросс. Конфер. «Теплофизика и энергетика». – Екатеринбург, 2013. – С. 195-201.

Подписано в печать 16.04.2014. Формат 60х84 1/16.
Печать цифровая. Усл.п.л. 0,93 Тираж 100 экз. Заказ 2013-574
Отпечатано в типографии АлтГТУ,
656038, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46. тел. (8-3852) 29-09-48
Лицензия на полиграфическую деятельность
ПЛД № 28-35 от 15.07.97 г.