

На правах рукописи



Карпенко Виктор Иванович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СЖИГАНИЯ
ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В ТЕПЛОГЕНЕРАТОРАХ
МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ**

Специальность 05.14.04 – промышленная теплоэнергетика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет» (СибГИУ).

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Мурко Василий Иванович

Официальные оппоненты: **Стрижак Павел Александрович**, доктор физико-математических наук, профессор; Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», научно-образовательный центр И.Н. Бутакова инженерной школы энергетики, профессор
Радзюк Александр Юрьевич, кандидат технических наук; Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет», кафедра теплотехники и гидрогазодинамики, доцент

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Защита состоится 16 марта 2022 года в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.099.07, созданного на базе Сибирского федерального университета, по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26, ауд. Г 21-02.

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

Автореферат разослан ___ ____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Сизганова Евгения Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы обусловлена необходимостью создания надёжной технологии сжигания водоугольного топлива и конструкций теплогенераторов малой и средней мощности.

Для успешного развития угольной промышленности необходимы как глубокая переработка угля, так и применение экологически чистых угольных технологий. Бурное развитие углеобогащения привело к увеличению объемов высококачественного угля, но при этом резко возросло количество тонкодисперсных отходов углеобогащения (ТДОУ). Очень часто эти отходы имеют зольность менее 50 %, но высокие значения влажности и очень тонкий гранулометрический состав (до 90 % частиц размером менее 0,2 мм) не позволяют их использование на практике. Поэтому угольные предприятия направляют их в отвалы, что приводит не только к существенным потерям добытого угля, но и к значительному загрязнению окружающей среды. Наиболее приемлемой технологией, позволяющей утилизировать ТДОУ, является приготовление из них водоугольных суспензий (ВУС) в качестве топлива. Если технологии приготовления водоугольного топлива (ВУТ) с необходимыми структурно-реологическими и теплофизическими характеристиками уже существуют, то задачи надёжного сжигания полученного ВУТ и создания конструкций теплогенераторов малой и средней мощности, остаются в значительной мере не решёнными.

Степень разработанности темы. В последние годы вопросы технологии сжигания водо-угольного топлива исследовались многими российскими и зарубежными учёными: Алексеенко С.В., Барановой М.П., Бойко Е.А., Кулагиным В.А., Овчинниковым Ю.В., Стрижаком П.А., Сенчуровой Ю.А., Пузырёвым Е.М., Радзюком А.Ю., Kijo-Kleczkowska A., Liu M., Duan Y. и др. Перспективным направлением при этом является использование технологии низкотемпературного вихревого сжигания забалластированных топлив. Вместе с тем при использовании данной технологии сжигания ВУТ имеются нерешённые задачи, сдерживающие её практическое применение – это недостаточность теоретических данных по оценке влияния основных характеристик ВУТ (выхода летучих веществ, влажности, зольности и, соответственно, низшей теплоты сгорания топлива) на процессы воспламенения и горения, отсутствие научно обоснованных методических рекомендаций по выбору конструктивных параметров вихревых адиабатических топок (внутренние размеры и диаметр пережимного окна) для надёжного сжигания топлива в зависимости от теплопроизводительности теплогенераторов малой и средней мощности, в том числе, при переводе мазутных, газовых и угольных котлов со слоевыми топками на сжигание ВУТ.

Исследование проводилось в рамках выполнения научно-технических проектов:

- проекта № 2010-218-02-174 «Разработка технологии и создание пилотного образца, автоматизированного энергогенерирующего комплекса, работающего на отходах углеобогащения» по Постановлению Правительства РФ от 09.04.2010 г. № 218 «О

мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологического производства»;

- грантов РФФИ и Правительства Красноярского края №№ 17-48-240386, 18-48-242001 и 18-41-242004 при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы», по Соглашению № 14.583.21.0004 о предоставлении субсидии от 16 июля 2014 г. (Уникальный идентификатор научных исследований (проекта) RFMEFI58314X0004).

Объект исследования: теплогенераторы малой и средней мощности.

Предмет исследования: характеристики процесса сжигания ВУТ.

Цель работы: совершенствование технологии сжигания водоугольного топлива с использованием угольных шламов и тонкодисперсных отходов углеобогащения в теплогенераторах малой и средней мощности.

Для достижения цели поставлены и решены следующие **задачи:**

1. Проведен анализ современного состояния проблемы в области сжигания композиционных топливных смесей на основании литературного обзора.

2. Рассмотрена физическая модель, позволяющая на основании термодинамического анализа выделить наиболее вероятные реакции, протекающие на поверхности частиц топлива и в тонком слое окружающего пространства в непосредственной близости от поверхности частиц при его сжигании.

3. Выполнено численное моделирование процесса сжигания водоугольного топлива в адиабатической вихревой топке.

4. Определены зависимости теплопроизводительности вихревой топки от её конструктивных размеров при сжигании ВУТ различного качества.

5. Созданы конструкции теплогенераторов малой и средней мощности с вертикальной и горизонтальной осью вихревой топки и проведена технико-экономическая оценка их эффективности.

Научная новизна работы и основные положения, выносимые на защиту:

1. Определено влияние зольности и выхода летучих на: состав газовой фазы в атмосфере топки, режим сжигания и температуру в топочном пространстве, необходимые для устойчивого горения суспензионного топлива;

2. Установлено, что процесс горения различных по структуре частиц (распыленные капли ВУТ и чисто угольные частицы) в адиабатической топке становится идентичным уже по истечении нескольких долей секунды, при этом температурный режим стабильного горения ВУТ устанавливается в границах 850–1100 °С в зависимости от выхода летучих веществ, при этом, время нахождения в топке капель ВУТ и угольных частиц должно быть не менее 3–5 с;

3. Найдены зависимости параметров сжигания ВУТ из угольных шламов и ТДОУ от конструктивных параметров адиабатических топок, теплопроизводительности и характеристик различных видов водоугольного топлива, позволяющие проектировать рациональные конструкции теплогенераторов малой и средней мощности и технологические режимы их работы.

Практическая значимость результатов работы состоит в том, что на основании выполненных термодинамического анализа и численных расчетов процесса сжигания водоугольного топлива определены режимы сжигания суспензионного топлива из угольных шламов и ТДОУ в вихревых адиабатических топках. Расчеты технологических режимов теплогенераторов, работающих на ВУТ, позволяют определить их оптимальные конструктивные параметры уже на стадии проектирования.

Методология и методы исследования. Расчет модели и процесса горения проводился на основе классических методов термодинамики и макрокинетики с использованием программного модуля ANSYS FLUENT. Экспериментальные исследования проводились с применением сертифицированных средств измерения на лабораторных установках, разработанных и созданных в экспериментальной лаборатории СибГИУ.

Внедрение результатов работы осуществлено при разработке теплогенераторов малой и средней мощности для сжигания ВУТ, приготовленного на основе ТДОУ (шахта «Заречная», ОАО «Междуречье» и др.). Разработаны конструкции и созданы теплогенераторы, работающие на ВУТ, для сушки зерна, а также на базе котлов «Теплотрон».

Достоверность результатов работы обеспечивается применением современных методов теоретических и экспериментальных исследований в области термодинамики, химии твердого топлива, теоретической теплотехники и математического моделирования. Результаты, полученные в процессе теоретических и экспериментальных исследований, подтверждены данными полупромышленных и промышленных испытаний разработанных конструкций теплогенераторов малой и средней мощности, работающих на ВУТ.

Личный вклад автора заключается во включенном участии автора на всех стадиях исследования: постановке и реализации задач исследования, разработке основных положений научной новизны и практической значимости, разработке конструкций теплогенераторов малой и средней мощности и их внедрении в стендовых, полупромышленных и промышленных условиях.

Апробация работы. Представление и обсуждение результатов диссертационного исследования проходило на: Международной НПК «Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов» в рамках выставки-ярмарки «Уголь России и Майнинг» (Новокузнецк, 2011); IV Международной научной экологической конференции «Проблемы рекультивации отходов быта, промышленного и сельскохо-

зяйственного производства» (Краснодар, 2015); XVI Международной НПК «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс» (Кемерово, 2016); XVIII International Coal Preparation Congress (Санкт-Петербург, 2016); The 8th Russian-Chinese Symposium Coal in the 21st Century: Mining, Processing and Safety (Кемерово, 2016); MATEC Web of Conferences. Heat and Mass Transfer in the System of Thermal Modes of Energy – Technical and Technological Equipment, HMTTSC (2016); XX Всероссийской научной конференции с международным участием «Сопряженные задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии» (Томск, 2016); Международном Российско-Казахстанском симпозиуме «Углекислота и экология Кузбасса» (Кемерово, 2017), Международной НПК «Научно-техническое обеспечение АПК Сибири» (Краснообск, 2017).

Публикации. Основные результаты научных исследований по теме диссертации изложены в 21 научной работе, из них: 11 статей в журналах из Перечня ВАК; 5 – в изданиях, входящих в международные базы данных Scopus и Web of Science; 5 патентов РФ на полезные модели.

Структура и объем работы. Материалы диссертации изложены на 166 страницах основного текста, включающего 43 рисунка и 39 таблиц. Работа состоит из введения, пяти разделов, основных выводов и результатов, списка литературы из 106 наименований и двух приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, определяющая цель и задачи исследования. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первом разделе представлен литературный обзор и анализ основных характеристик и технологий сжигания ВУТ, приготовленного из угольных шламов и тонкодисперсных отходов углеобогащения. Проанализированы характеристики ТДОУ обогатительных фабрик России и ВУТ, получаемого на их основе, по основным параметрам: стадии метаморфизма угля, максимальной крупности угольных частиц, массовой доле твердой фазы, зольности, структурно-реологическим характеристикам. Установлена статическая стабильность получаемых опытных партий ВУТ. Проанализированы существующие физико-математические модели процессов распыления, воспламенения и горения водоугольного топлива в высокотемпературном газовом потоке. Рассмотрены существующие способы сжигания ВУТ и конструкции котельных агрегатов малой и средней мощности. Установлено, что наиболее эффективное и стабильное горение водоугольного топлива, забалластированного влагой и минеральными компонентами, осуществляется при применении вихревых адиабатических топок. Термодинамический и химический анализ процесса воспламенения и горения ВУТ, а также числен-

ное моделирование указанных процессов позволяет глубже понять исследуемые процессы и оценить качество принимаемых конструктивных решений при существенно меньших затратах времени и средств. Выполненный анализ состояния существующих проблем при сжигании ВУТ подтвердил актуальность выбранной темы, позволил сформулировать цель и задачи диссертационной работы.

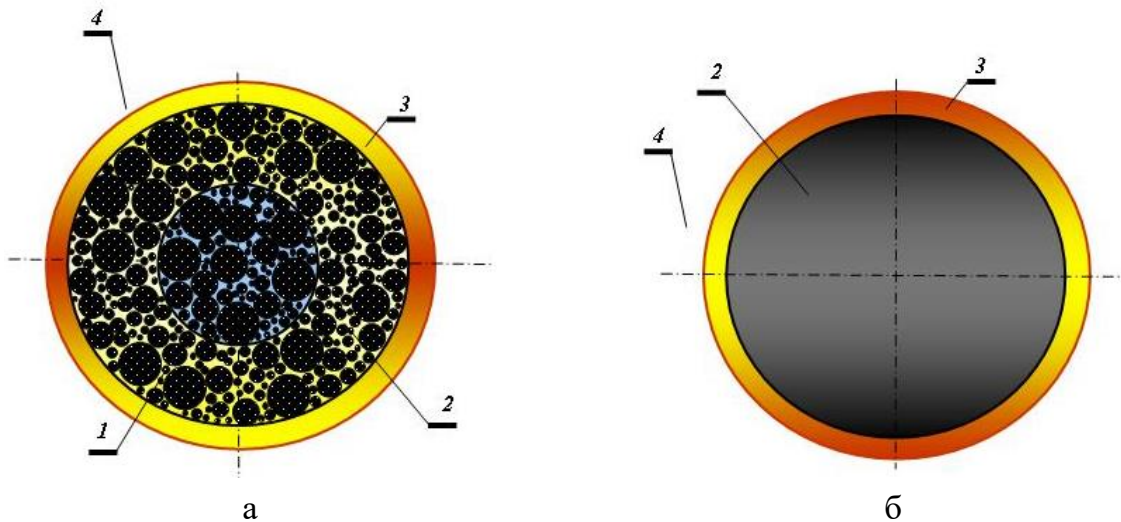
Второй раздел посвящен исследованию процесса горения ВУТ в вихревой топке. За основу физико-математической модели процесса принята модель, предложенная д.т.н. Мурко В.И. и развитая в работах его учеников. Согласно данной модели в процессе пневмомеханического распыления и подачи распыленной струи ВУТ в топочное пространство происходит дробление образующихся в каналах форсунки капель топлива на более мелкие за счет воздействия сил трения окружающей среды, которые стремятся расплющить летящие капли. Одновременно за счет указанных сил происходит срыв жидких пленок с тонкими угольными частицами с поверхностей крупных частиц.

Таким образом, при существенной полидисперсности угольных частиц в ВУТ (0–300 (500) мкм), в топочный объем попадают как капли ВУТ с тонкими угольными частицами, так и чисто угольные «крупные» частицы (более 90 (100) мкм), количество которых достигает 25 и более %. В результате при анализе процесса горения распыленного ВУТ в топочном объеме рассматривается двухкомпонентная система: капли ВУТ с тонкими угольными частицами и чисто угольные частицы крупностью более 90(100) мкм.

Для определения наиболее вероятных реакций, протекающих при горении частиц ВУТ, была рассмотрена физико-химическая модель взаимодействия капель и частиц распыленного топлива с окислителями, находящимися в пространстве топки, а также на основании термодинамического подхода были рассчитаны константы равновесия возможных реакций горения углерода и продуктов его неполного горения.

На основании сравнения значений констант равновесия реакций и коэффициентов диффузии различных газов в топочном пространстве определено, что наиболее вероятной реакцией окисления углерода является эндотермическая реакция окисления углерода водяным паром. При этом тепло в зону реакции подводится из зоны 3, где сгорают газообразные летучие, выделяющиеся из угля, и продукты окисления углерода водяным паром – монооксид углерода (СО) и водород (H₂).

Согласно этой модели уже через доли секунды после попадания диспергированного водоугольного топлива в пространство топки его частицы прогреваются и их структуру можно представить, как изображено на рисунке 1. Капли, содержащие воду и мелкие угольные частицы (рисунок 1а), подсыхают на поверхности. Несмотря на то, что срединная зона капли (зона 1) может еще содержать жидкую воду, оболочка (поверхность) состоит из сухого угля с водяным паром между частицами угля или даже без него, если капля высохла и зона 1 исчезла. Чисто угольные частицы (рисунок 1б) изначально не имеют в глубине жидкой воды и практически содержат только зону 2.



Зона 1 – совокупность частиц твердой фазы и воды для капли ВУТ, зона 2 – совокупность высушенных частиц твердой фазы и водяного пара, зона 3 – область вокруг высушенной капли или угольной частицы, в которой протекают основные реакции горения, зона 4 – область, удаленная от поверхности высушенных капель и частиц твердой фазы (пространство топки)

Рисунок 1 – Расположение зон в модели горения диспергированных капель ВУТ (а) и угольных частиц (б)

При моделировании процессов, происходящих на поверхности частиц и в непосредственной близости от поверхности, то есть в зоне 3, рассматривались возможные реакции (таблица 2). В таблицах 1,2 приведены коэффициенты диффузии компонентов газовой смеси и рассчитанные константы равновесия реакций, протекающих при горении топлива.

Таблица 1 – Коэффициенты диффузии компонентов газовой смеси

| Газ | CO ₂ | CO | O ₂ | H ₂ O |
|-------------------------------------|-----------------|-------|----------------|------------------|
| D ₀ , см ² /с | 0,097 | 0,175 | 0,18 | 0,277 |

Таблица 2 – Константы равновесия реакций, протекающих при горении топлива

| Температура, К для реакций | 700 | 900 | 1100 | 1300 |
|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 2C + O ₂ = 2CO | 1,2·10 ²⁴ | 4,0·10 ²⁰ | 1,3·10 ¹⁸ | 3,3·10 ¹⁶ |
| 2 C + CO ₂ = 2CO | 1,05·10 ⁻⁵ | 8,9·10 ⁻³ | 4,7·10 ⁻¹ | 8,0 |
| C + H ₂ O = CO + H ₂ | 3,7·10 ⁻⁴ | 8,6·10 ⁻² | 1,05 | 20,7 |
| 2CO + O ₂ = 2CO ₂ | 1,99·10 ¹¹ | 3,13·10 ⁶ | 2,5·10 ³ | 19,07 |
| 2H ₂ + O ₂ = 2H ₂ O | 8,51·10 ³⁰ | 5,48·10 ²² | 1,19·10 ¹⁸ | 7,73·10 ¹³ |

При анализе данных таблиц 1 и 2, можно заключить, что вероятность окисления углерода кислородом ничтожно мала, поскольку кислород, диффундирующий к поверхности частицы угля, срывается «на ближних подступах» к поверхности при

окислении выделившихся из угля летучих, а также водорода и монооксида углерода, которые образуются при окислении углерода водяным паром.

Рассмотрение состава газовой фазы в пространстве топки проводилось с учетом качества топлива, в частности, с учетом зольности твердой фазы (угля) в суспензии.

Очевидно, что при повышении зольности углей количество воздуха, необходимого для сгорания одного килограмма угля, уменьшается, поскольку с увеличением зольности уменьшается содержание органической массы. При этом количество воды в составе суспензии не изменяется, поскольку текучесть суспензии определяется (при рассмотрении угля или отходов его обогащения одной марки) соотношением количеств твердой и жидкой фаз. В таблице 3 приведено количество образующихся газов при сжигании 1 м^3 суспензии, приготовленной из углей с различной зольностью при содержании твердой фазы в суспензии 52 % и коэффициенте избытка воздуха $\alpha=1$. При этом количество водяного пара постоянно и составляет 647 нм^3

Таблица 3 – Количество необходимого воздуха и образующихся газов при сжигании 1 м^3 ВУТ

| Зольность, % | Необходимое количество воздуха, нм^3 | Общее количество газов, нм^3 |
|--------------|---|---------------------------------------|
| 0 | 7800 | 8447 |
| 10 | 7020 | 7667 |
| 20 | 6240 | 6887 |
| 30 | 5460 | 6107 |
| 40 | 4680 | 5327 |
| 50 | 3900 | 4547 |
| 60 | 3120 | 3767 |
| 70 | 2574 | 3221 |

Расчетные значения параметров, приведенные в таблице 3, соответствуют гипотетическим условиям, когда поступающие в топочное пространство материалы уже прогрелись, топливо диспергировано, вода превратилась в пар, все компоненты перемешаны между собой, но не смешаны с продуктами горения. Наряду с необходимым количеством воздуха были рассчитаны концентрации кислорода и водяного пара, которые соответствуют тем же условиям, что и данные таблицы 3 (рисунок 2), из которых следует, что концентрация водяного пара в атмосфере топочного пространства превысит значение половины концентрации кислорода при сжигании суспензий из угля с зольностью 20 %. При сжигании водоугольных суспензий с более высокими значениями зольности концентрация водяного пара оказывается ещё больше (при $A^d = 50\%$ и выше), а концентрации кислорода и водяного пара становятся близкими. Рассмотрение даже гипотетических условий показывает, что концентрация кислорода в смеси еще до начала горения снижается. В реальных условиях, когда распыленное топливо и воздух

перемешиваются с атмосферой топочного пространства, где процессы горения топлива, поступившего в топку ранее, в значительной степени уже протекли, концентрация кислорода оказывается пониженной настолько, что сгорают только летучие, выделившиеся из угля.

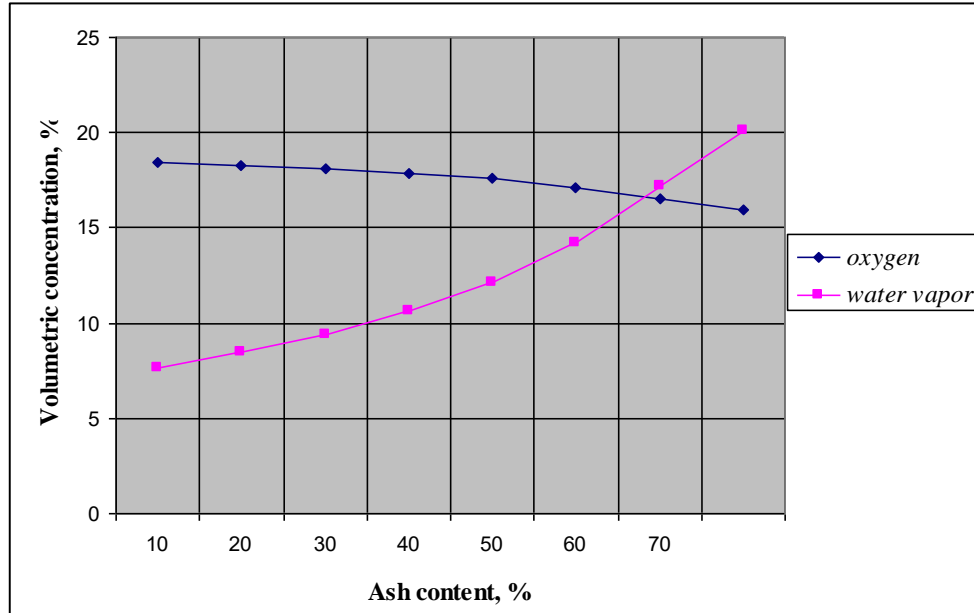


Рисунок 2 – Зависимость содержания кислорода и водяного пара в газовой фазе топки от зольности топлива.

Поэтому при сжигании топлива, приготовленного из ТДОУ, мы рекомендуем повышать коэффициент избытка воздуха (α) до значений не 1,4, как принято при сжигании пылеугольного топлива, а до 2,6–3,2. Для исследования механизма горения было проведено численное моделирование процесса горения при распылении ВУТ в вихревую адиабатическую топку. Численное моделирование и расчет были реализованы с использованием программного модуля ANSYS FLUENT. На рисунках 3 и 4 приведены сравнения изменения температуры и содержания летучих веществ в угольной частице и капле ВУТ в зависимости от длины пути частицы и капли соответственно. Анализ представленных на рисунке 3 данных показывает, что в отличие от плавного увеличения температуры угольной частицы (particle 1) при ее движении температура капли ВУТ (particle 2) после повышения до температуры испарения жидкой фазы остается постоянной на протяжении всего процесса испарения. Затем начинаются процессы горения твердой фазы капли ВУТ с выделением теплоты, и наблюдается резкое повышение температуры.

Из рисунка 4 видно, что содержание летучих веществ для угольной частицы (particle 1) в начале процесса остается неизменным и уменьшается только при нагреве частицы до температуры выделения летучих веществ. Для капель ВУТ (particle 2) наблюдается увеличение содержания летучих веществ за счет испарения воды. В про-

цессе испарения температура твердой фазы капли ВУТ повышается, и содержание летучих веществ достигает аналогичного значения для твердой угольной частицы. Стабильность процесса сохраняется в течение значительно меньшего времени за счет повышения температуры твердой фазы капли ВУТ в процессе испарения воды.

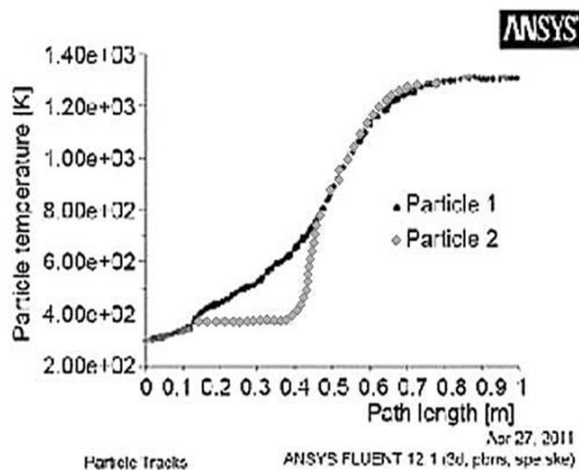


Рисунок 3 – Сравнение изменения температуры угольной частицы (particle 1) и капли ВУТ (particle 2) в зависимости от длины пути частицы и капли

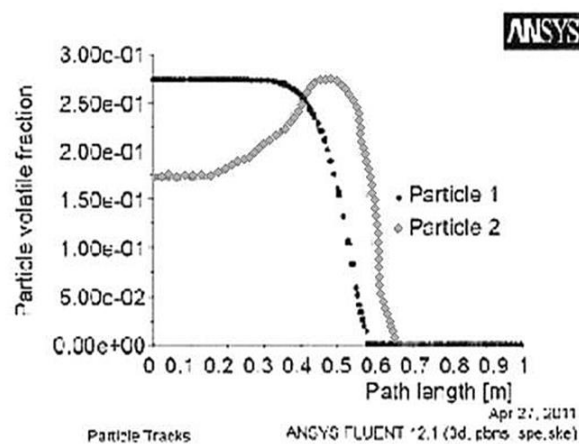


Рисунок 4 – Сравнение изменения содержания летучих веществ в угольной частице (particle 1) и капле ВУТ (particle 2) в зависимости от длины пути частицы и капли

На рисунке 5 представлены результаты численного эксперимента. Анализ траекторий частиц показывает, что они имеют форму спиралей. При этом выявлено, что время нахождения горящих частиц и капель ВУТ в вихревой топке пропорционально их диаметру, что позволяет обеспечить их эффективное выгорание.

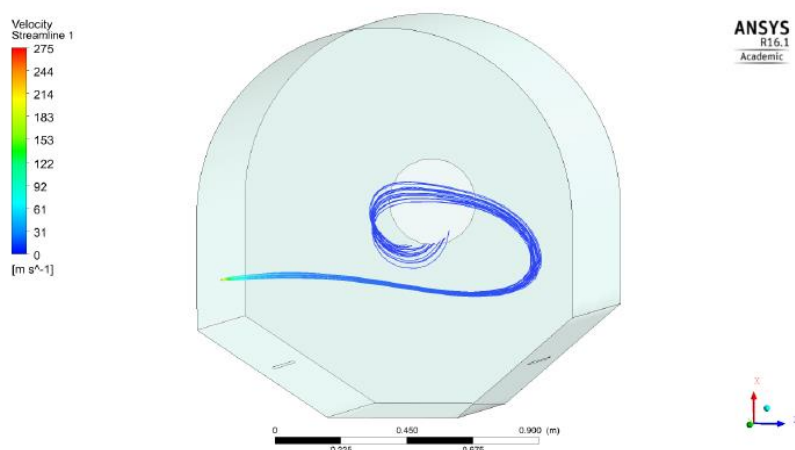


Рисунок 5 – Траектории частиц топлива

Таким образом, организация сжигания ВУТ в вихревой топке позволяет обеспечить повышенное время удержания горящих частиц топлива в топочном пространстве. Оптимальный уровень температур составляет 800–1250 °С.

На рисунке 6 представлены результаты расчетов концентрации кислорода O_2 в направлении к задней стенке топки. Анализ полученных результатов показывает, что к выходу топки наблюдается снижение концентрации O_2 .

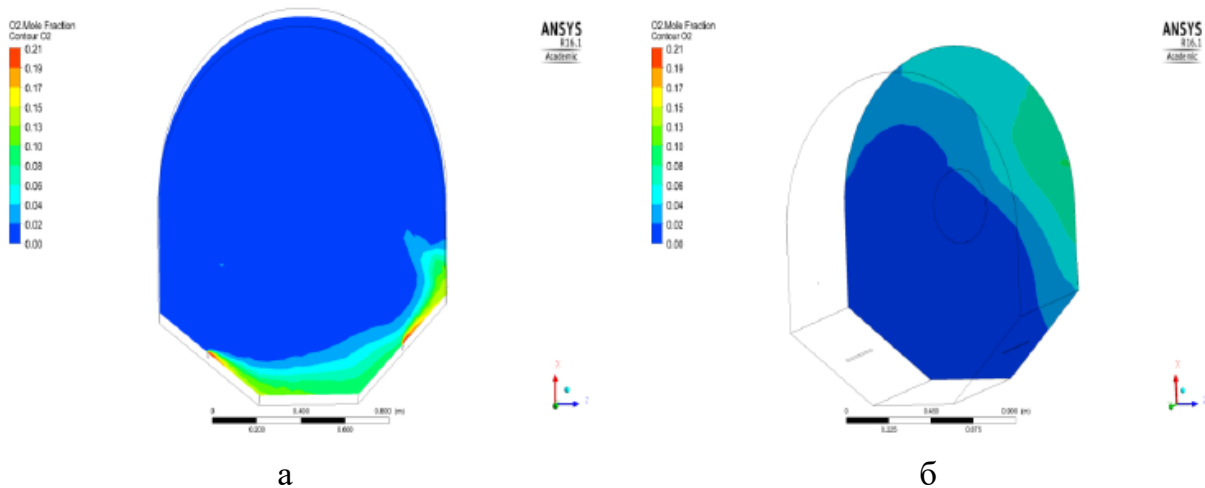


Рисунок 6 – Концентрация O_2 в сечении горелки (а), у задней стенки топки (б)

В разделе 3 представлено обоснование выбора конструктивных параметров вихревых адиабатических топков для сжигания ВУТ. При разработке конструкции вихревых камер для сжигания ВУТ устанавливается, что ось струи распыленного топлива должна быть касательной к условной окружности топки. Диаметр условной окружности (рисунок 7) определяется из соотношения:

$$D_{\text{усл}} = \frac{D_m - d_{no}}{2}, \quad (1)$$

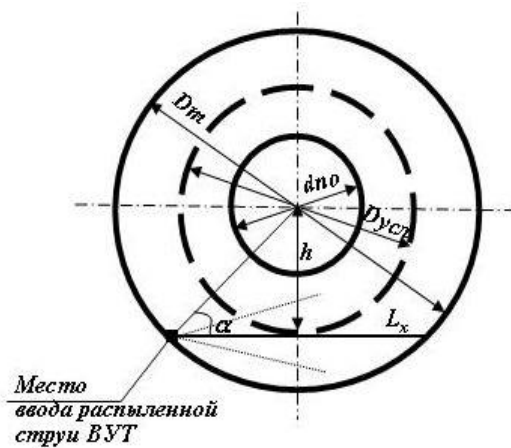


Рисунок 7 – Поперечное сечение внутренней поверхности вихревой топки

Длина хорды L_x в вихревой камере определяется из соотношения:

$$L_{\text{стр}} \leq L_x, \quad (2)$$

где L_x – длина хорды поперечного сечения вихревой топки на расстоянии h от оси топки;

$L_{\text{стр}}$ – длина факела распыла, определяемая из эксперимента.

Ширина топки выбирается из условия:

$$b \geq 2L_x \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha_\phi}{2}, \quad (3)$$

где α_ϕ – угол раскрытия распыленной струи ВУТ. При работе наших форсунок α_ϕ не превышает 30° . Объем топки определяется из выражения:

$$V_m = G_{\text{газ}} \cdot t_{\text{гор}}, \quad (4)$$

где $G_{\text{газ}}$ – объемный расход газов, образующихся при сжигании ВУТ, $\text{м}^3/\text{с}$;

$t_{гор}$ – время горения распыленного ВУТ в топке, составляющее не менее 3–5 секунд.

Для удобства сравнения различных топочных устройств вычисляется удельная теплопроизводительность по формуле:

$$q_m = \frac{Q_m}{V_m}, \quad (5)$$

где Q_m – теплопроизводительность топки, МВт.

Для разработанных адиабатических вихревых камер сгорания ВУТ данный показатель колеблется от 0,28 до 0,35 МВт/м³. При этом большее значение принимается для ВУТ малой зольности, а меньшее для водо-угольного топлива с зольностью более 25–27 %. Соотношение $d_{но}/D_m$ было определено экспериментально и для топков малой и средней производительности составляет $d_{но}/D_m = 0,25–0,3$, что практически в два раза меньше аналогичного показателя для вихревых топочных устройств, в которых сжигается мазут или природный газ.

В четвертом разделе представлены результаты разработки конструкций теплогенераторов малой и средней мощности. Вихревые адиабатические камеры сжигания различаются по расположению оси вихревого движения газов в топочном пространстве (горизонтально и вертикально). В зависимости от теплопроизводительности котла вихревая камера располагается либо рядом с котлом (котел является котлом-утилизатором), либо встраивается в топочное пространство котла. Адиабатические вихревые топочные камеры с горизонтальной осью вращения топочных газов были разработаны для котлов с теплопроизводительностью от 0,1 до 0,7 МВт (таблица 4). На рисунке 8 представлен теплогенератор для сушки зерна пос. Краснообск, Новосибирской области.



Рисунок 8 – Теплогенератор для сушки зерна

Таблица 4 – Характеристика теплогенераторов с горизонтальной осью

| Наименование показателя | Название объекта | | | | |
|--|----------------------------|---|---|---|--|
| | Стендовая установка СибГИУ | Технологический комплекс шахта «Заречная» | Теплогенератор для сушки зерна, пос. Краснообск | Технологический комплекс, г. Черепаново | Установка сжигания ВУТ, г. Забже, Польша |
| Теплопроизводительность, МВт | до 0,25 | 0,66 | 0,25 | 0,56 | 0,25 |
| Расход топлива, кг/ч | до 120 | 190 | 75 | 160 | 65 |
| Низшая теплота сгорания ВУТ, МДж/кг | 10,00 ÷14,00 | 12,00 | 11,75 | 12,70 | 13,40 |
| Геометрические размеры топки, м | | | | | |
| диаметр | 1,15 | 1,40 | 1,30 | 2,00 | 1,35 |
| ширина | 0,70 | 1,05 | 0,90 | 1,30 | 0,93 |
| соотношение d_{no}/D | 0,20 | 0,25 | 0,18 | 0,19 | 0,22 |
| Теплонапряжение объема топки, МВт/м ³ | 0,35 | 0,39 | 0,21 | 0,28 | 0,21 |

Вихревые адиабатические топки с вертикальной осью вращения были разработаны для экспериментального стенда КузГТУ (на базе котла «Теплотрон»), для промышленного котла ДКВР-10-13 (ОАО «Междуречье»). В таблице 5 представлены характеристики теплогенераторов с вертикальной осью вихря.

Таблица 5 – Характеристика теплогенераторов с вертикальной осью

| Наименование показателя | Название объекта | |
|--|------------------|---|
| | КВр-0,63ВУТ | Технологический комплекс ОАО «Междуречье» |
| Теплопроизводительность, МВт | 0,65 | 4,5 |
| Расход топлива, кг/ч | 200 ÷ 470 | 1200 ÷ 1400 |
| Низшая теплота сгорания ВУТ, МДж/кг | 12,15 - 14,25 | 11,72- 13,59 |
| Геометрические размеры топки, м | | |
| диаметр | 1,40 | 2,60 |
| высота | 2,00 | 3,00 |
| соотношение d_{no}/D | 0,28 | 0,36 |
| Теплонапряжение объема топки, МВт/м ³ | 0,21 | 0,23 |

Вертикальный разрез топочного пространства представлен на рисунке 9. Фото парового котла ДКВР-10-13ВУТ (котельная ОАО «Междуречье») представлено на рисунке 10.

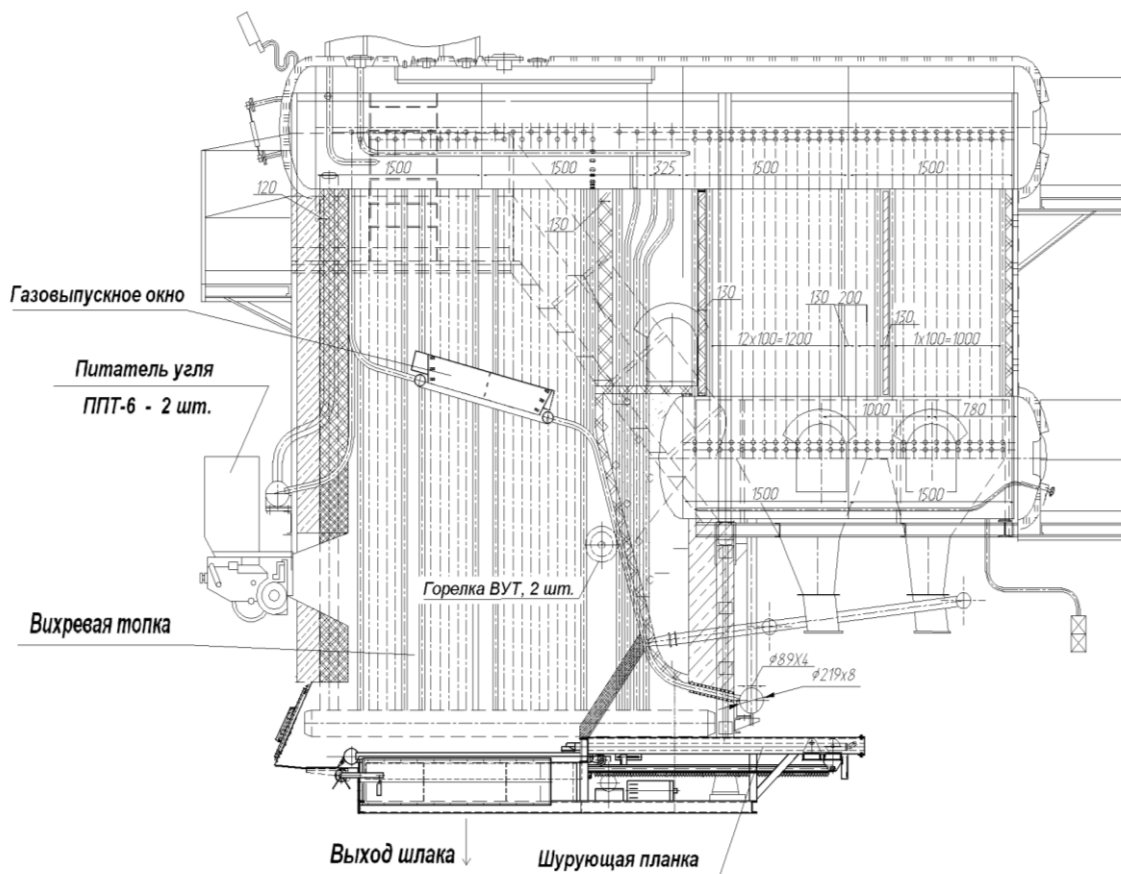


Рисунок 9 – Вертикальный разрез топочного пространства котла ДКВР-10-13

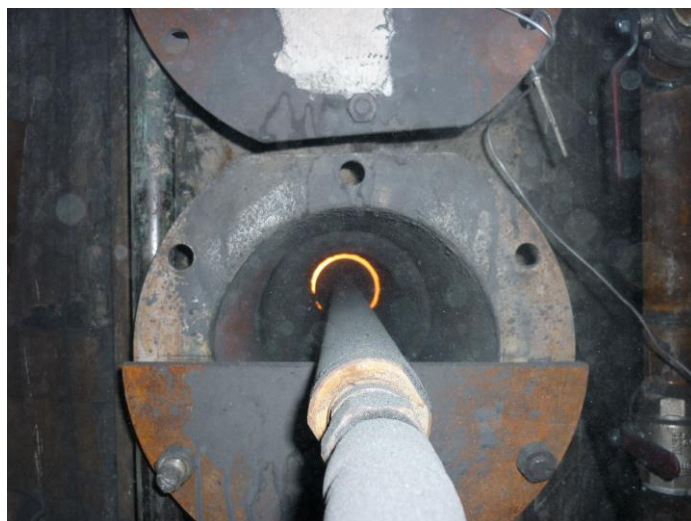


Рисунок 10 – Котел ДКВР 10-13 ВУТ

Определены состав и количество вредных выбросов в дымовых газах при сжигании опытных образцов топлива в котле КВр-0,63ВУТ (на базе котла «Теплотрон») (табл. 6).

Таблица 6 – Состав и количество вредных выбросов при сжигании ВУТ

| Исходное сырье | ПДК* | ВУТ «ОФ ш. Комсомолец» | ВУТ «ОФ ш. имени С.М. Кирова» |
|---------------------------------------|----------------------|----------------------------|-------------------------------|
| Пыль, мг/м ³ | 250 | не более 170 | не более 200 |
| СО, мг/м ³ | 375 | не более 75 | не более 75 |
| NO _x , мг/м ³ | 750 | не более 250 | не более 230 |
| SO ₂ , мг/м ³ | 1200 | не более 200 | не более 200 |
| ПАУ (бенз(а)пирен), мг/м ³ | 0,1·10 ⁻³ | менее 0,1·10 ⁻³ | |

* – нормативы удельных выбросов в атмосферу твердых частиц, окиси углерода, оксидов азота и серы, бенз(а)пирена.

В разделе 5 представлены результаты разработки бизнес-плана создания ПТК ВУТ для внедрения теплогенераторов малой и средней мощности производительностью 1,6 (1,4) МВт (Гкал/ч) и 11,6 (10) МВт (Гкал/ч). Экономический эффект при замене угля на ВУТ составляет от 2,56 до 18,21 млн. руб./сезон.

В таблице 7 приведены технико-экономические показатели проекта.

Таблица 7– Техничко-экономические показатели ПТК ВУТ.

| № п/п | Наименование показателей | Значение | | | |
|-------|---|----------------------------|-------|----------------------------|--------|
| | | Q = 1,6 (1,4) МВт (Гкал/ч) | | Q = 11,6 (10) МВт (Гкал/ч) | |
| 1. | Вид топлива | Уголь | ВУТ | Уголь | ВУТ |
| 2. | Режим работы | Отопительный сезон | | | |
| 3. | Производство тепловой энергии, МВт·ч | 10 524 | | 75 168 | |
| 4. | КПД работы котельной установки | 0,6 | 0,85 | 0,6 | 0,85 |
| 5. | Низшая теплота сгорания топлива, Гкал/т | 5,300 | 3,300 | 5,300 | 3,300 |
| 6. | Капитальные затраты, тыс. руб. | 10 000 | | 35 000 | |
| 7. | Расход топлива, т/МВт | 0,36 | 0,44 | 0,36 | 0,44 |
| 8. | Стоимость топлива, руб./т | 1500 | 500 | 1500 | 500 |
| 9. | Экономический эффект при замене угля на ВУТ, тыс.руб./сезон | | 2 560 | | 18 210 |
| 10. | Срок окупаемости капитальных вложений, год | | 3,9 | | 2,7 |

Помимо расчетных показателей экономической эффективности, проект расширяет возможности сферы использования водоугольного топлива. А также оптимизирует экологические затраты предприятий за загрязнение окружающей природной среды от процессов доставки, хранения, погрузки- разгрузки угля; за загрязнение окружающей природной среды при сжигании топлива в котельных.

Экологический эффект от использования водоугольного топлива:

- экологически безопасное топливо на всех стадиях производства, транспортирования и использования;
- позволяет в 1,5-3,5 раза снизить вредные выбросы в атмосферу (пыли,

оксидов азота, бенз(а)пирена, двуокиси серы);

- позволяет эффективно использовать образующуюся при сжигании летучую золу.

В приложениях представлены Акты испытаний котельных установок после перевода их на ВУТ и дипломы, подтверждающие призовые места за участие в выставках.

Заключение

1. Определено влияние зольности и выхода летучих на: состав газовой фазы в атмосфере топки, режим сжигания и температуру в топочном пространстве, необходимые для устойчивого горения суспензионного топлива.

2. На основании анализа предложенной модели, а также численных расчетов установлено, что процесс горения различных по структуре частиц (капли ВУТ и угольные частицы) в адиабатической топке становится идентичным уже по истечении нескольких долей секунды, при этом температурный режим стабильного горения ВУТ устанавливается в границах 850–1100°С в зависимости от выхода летучих веществ, при этом, время нахождения в топке капель ВУТ и угольных частиц должно быть не менее 3–5 с.

3. Найдены зависимости параметров сжигания ВУТ из угольных шламов и ТДОУ характеристик топлива; разработана методика расчета геометрических размеров вихревых адиабатических камер сгорания малой и средней мощности с учетом их теплопроизводительности и качества ВУТ.

4. Предложены конструкции теплогенераторов малой и средней мощности с горизонтальной и вертикальной осью вращения в вихревой топочной камере и разработаны технологические режимы их работы; показана их высокая эффективность (механический недожог составил не более 5 %, КПД котлов не менее 86 %), а количество вредных выбросов в уходящих газах существенно меньше предельно допустимых значений (в 2,1–3,0 раза); определена технико-экономическая эффективность применения теплогенераторов малой и средней мощности, работающих на ВУТ различного качества, в разных отраслях промышленности.

5. Разработан бизнес-плана создания ПТК ВУТ на основе теплогенераторов малой и средней мощности производительностью 1,6 (1,4) МВт (Гкал/ч) и 11,6 (10) МВт (Гкал/ч). Экономический эффект при замене угля на ВУТ составляет от 2,56 до 18,21 млн. руб./сезон.

Благодарность. Автор выражает благодарность научному руководителю В.И. Мурко и коллективу ООО НПЦ «Сибэкотехника» (г. Новокузнецк) за практическую помощь при проведении исследований и внедрении их результатов в производство.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Статьи в рецензируемых научных журналах и изданиях из Перечня ВАК:

1. **Karpenok V.I.**, Murko V.I., Mastikhina V.P., Loboda Yu.A. Thermodynamic and chemical analysis of water-coal fuel ignition and combustion in adiabatic combustion chamber, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol.*, 2021, 14(4), 385–398. DOI: 10.17516/1999-494X-0319

2. Мурко В.И., Федяев В.И., **Карпенко В.И.** и др. Результаты сжигания суспензионного водоугольного топлива в котле типа «Теплотрон». *Журн. сиб. федер. ун-та. Техника и технологии*. 2018. 11(5), 560–566. DOI: 10.17516/1999-494X-0054.

3. Мурко В.И., **Карпенко В.И.**, Федяев В.И. и др. Результаты испытаний топливной присадки на котле со слоевым сжиганием угля. *Журн. сиб. федер. ун-та. Техника и технологии*. 2017. 10(8), 993–999. DOI: 10.17516/1999-494X-2017-10-8-993-999.

4. Мурко В.И., Федяев В.И., **Карпенко В.И.** и др. Сжигание водоугольного топлива в теплогенерирующих установках малой мощности. *Ползуновский вестник*. 2014. № 4-1. 59–63.

5. Мурко В.И., Сенчурова Ю.А., Федяев В.И., **Карпенко В.И.** Исследования технологии сжигания суспензионного угольного топлива в вихревой камере. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2013. № 2 (96). 103–105.

6. Murko V.I., Tsetsorina S.A., Fedyaev V.I., **Karpenok V.I.** RESULTS OF NUMERICAL SIMULATION OF COMBUSTION OF COAL-WATER FUEL. *Ползуновский вестник*. 2013. Т.4. 38.

7. Мурко В.И., Федяев В.И., **Карпенко В.И.**, Дзюба Д.А. Результаты исследования вредных выбросов при сжигании суспензионного угольного топлива. *Журн. сиб. федер. ун-та. Техника и технологии*. 2012. 5(5), 512–519.

8. Мурко В.И., Вахрушева Г.Д., Федяев В.И., **Карпенко В.И.** Результаты исследования влияния механической активации на структурно-реологические характеристики угольных суспензий на основе фильтр-кеков. *Журн. сиб. федер. ун-та. Техника и технологии*. 2011. 4(6), 601–612.

9. Делягин В.Н., Иванов Н.М., Батищев В.Я., **Карпенко В.И.** и др. Использование водоугольного топлива в тепловых процессах АПК. *Ползуновский вестник*. 2011. № 2-1. 239–242.

10. Мурко В.И., Риестерер А., Цецорина С.А., Федяев В.И., **Карпенко В.И.** Результаты численного моделирования процесса сжигания водоугольного топлива. *Ползуновский вестник*. 2011. № 2-1. 230–234.

11. Мурко В.И., Вахрушева Г.Д., Федяев В.И., **Карпенко В.И.** и др. Исследование получения суспензионного угольного топлива на основе тонкодисперсных отходов углеобогащения. *Журн. сиб. федер. ун-та. Техника и технологии*. 2011. 4(5), 522–526.

Статьи, проиндексированные в международных базах Scopus/ Web of Science:

12. Мурко, В.И., **Карпенко В.И.**, Белогурова Т.П., Миханошина И.А. Разработка технологии комплексного использования побочных продуктов обогащения угля. *Уголь*. 2017. № 4 (1093). 54–59.

13. Murko V.I., **Karpenok V.I.**, Senchurova Y.A. et al Results Of Study Of Sulfur Oxide Reduction During Combustion Of Coal-Water Slurry Fuel Through Use Of Sulfur Capturing Agents. *MATEC Web of Conferences. Heat and Mass Transfer in the System of Thermal Modes of Energy - Technical and Technological Equipment, HMTTSC 2016*. 2016. 01074.

14. Murko V.I., Fedyaev, V.I., **Karpenok V.I.** et al Investigation Of The Spraying Mechanism And Combustion Of The Suspended Coal Fuel. *Thermal Science*. 2015. Т. 19. № 1. 243–251.

15. Мурко В.И., Уманский А.А., **Карпенко В.И.** и др. Исследование возможности использования водоугольного топлива в нагревательных термических печах. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2012. № 12. 30–33.

16. Мочалов, С.П., Федяев В.И., **Карпенко В.И.** и др. Автоматизированный экспериментально-лабораторный энерготехнологический комплекс. *Уголь*. 2012. № 10 (1039). 49–53.

Патенты:

17. Патент на полезную модель RU 93032 U1, 20.04.2010. Котлоагрегат для сжигания угольного топлива / Пузырев Е.М., Пузырев М.Е., Мурко В.И., Федяев В.И., **Карпенко В.И.**, Звягин В.Н., Айнетдинов Х.Л. Заявка № 2010100383/22 от 11.01.2010.

18. Патент на полезную модель RU 109831 U1, 27.10.2011. Форсунка / Мурко В.И., Федяев В.И., **Карпенко В.И.**, Смердов Л.А., Дзюба Д.А. Заявка № 2011120982/06 от 24.05.2011.

19. Патент на полезную модель RU 105417 U1, 10.06.2011. Теплогенератор / Мурко В.И., Федяев В.И., **Карпенко В.И.**, Мочалов С.П., Мышляев Л.П., Венгер К.Г. Заявка № 2010150444/06 от 08.12.2010.

20. Патент на полезную модель RU 147336 U1, 10.11.2014. Устройство для сжигания топлив / Мурко В.И., Федяев В.И., **Карпенко В.И.**, Делягин В.Н. Заявка № 2014106798/06 от 21.02.2014

21. Патент на полезную модель RU 177021 U1, 06.02.2018. Котел / Мурко В.И., Федяев В.И., **Карпенко В.И.**, Прошунин Ю.Е., Почечуев А.А. Заявка № 2016147090 от 30.11.2016.