

На правах рукописи

СЕНЧУРОВА  
Юлия Анатольевна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СЖИГАНИЯ  
ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В ВИХРЕВЫХ ТОПКАХ**

05.14.04. – промышленная теплоэнергетика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Кемерово – 2008

Работа выполнена  
в Кузбасском государственном техническом университете  
и ФГУП НПЦ «Экотехника»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Мурко Василий Иванович

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
Степанов Сергей Григорьевич

кандидат технических наук, доцент  
Баранова Марина Петровна

Ведущая организация: Новосибирский Государственный  
Технический Университет

Защита диссертации состоится «11» декабря 2008 г. в 14<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета ДМ 212.099.07 при ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26, ауд. Д 501.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Политехнического института ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет».

Автореферат кандидатской диссертации размещен на официальном сайте Политехнического института ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» (<http://www.krgtu.ru/science/post-graduate/report>).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: г. Красноярск, ул. Киренского, 26, ПИ СФУ, Ученому секретарю диссертационного совета ДМ 212.099.07; факс (3912) 430-692 (для кафедры ТЭС); e-mail: [boiko@krgtu.ru](mailto:boiko@krgtu.ru).

Автореферат разослан «11» ноября 2008 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
к.т.н., доцент



Е.А. Бойко

**Актуальность темы диссертации.** В настоящее время в России происходит переосмысление роли и места угля в обеспечении энергетической и экономической безопасности государства. При этом увеличение доли угля в топливном балансе страны является стабилизирующим фактором защиты от возникновения глубоких энергетических кризисов. Однако экологические проблемы, возникающие при использовании угольного топлива, требуют разработки и внедрения новых экологически чистых угольных технологий. В связи с этим является перспективным использование угля в виде суспензионного угольного топлива (ВУТ). Внедрение ВУТ обеспечивает сбережение энергетических и материальных ресурсов, а также окружающей среды. Кроме того, применение ВУТ является наиболее эффективным и экологически чистым методом утилизации тонких угольных шламов угледобывающих и углеперерабатывающих предприятий.

Основными отличительными характеристиками ВУТ являются наличие в топливе тонких угольных частиц и жидкой фазы – воды, а также повышенная относительно других жидких топлив вязкость. Указанные особенности являются решающими при выборе эффективной технологии сжигания ВУТ, которая должна обеспечивать необходимую полноту выгорания топлива и минимально возможные вредные выбросы в уходящих газах. Особенно остро данная проблема стоит при применении ВУТ в котлах малой и средней мощности, в которых в настоящее время, как правило, используется низкоэффективный слоевой способ сжигания угля. При этом мехнедожог топлива составляет от 20 до 60%.

В последние годы широкое распространение получил низкотемпературный вихревой способ сжигания (НТВС) забалластированных топлив. Однако в настоящее время фактически отсутствуют научно обоснованные решения по применению НТВС для сжигания суспензионного угольного топлива. Недостаточно изучен механизм распыления ВУТ, не определено влияние реологических и теплофизических характеристик топлива на эффективность его сжигания в вихревых топках.

Таким образом, совершенствование технологии сжигания водоугольного топлива в вихревых топках является актуальной проблемой при его использовании в котлах малой и средней мощности.

**Объект исследования** – водоугольное топливо.

**Предмет исследования** – режимы сжигания водоугольного топлива.

**Цель работы** состоит в совершенствовании технологии сжигания водоугольного топлива в вихревых топках применительно к котлам малой и средней мощности.

#### **Задачи исследования:**

1. Исследовать механизм дробления капель водоугольного топлива при его распылении.
2. Разработать физико-математическую модель процесса сжигания распыленного водоугольного топлива.
3. Определить параметры технологии сжигания водоугольного топлива в вихревых топках с использованием численного моделирования процесса.
4. Определить технико-экономическую эффективность разработанных технологических решений.

**Научная новизна работы** и основные положения, выносимые на защиту:

1. Установлено, что распыленные капли ВУТ состоят из двух качественно различных систем: первая система с крупными «каплями» ( $d_k > 80\text{?}100$  мкм) представлена в основном угольными частицами, а вторая – с мелкими частицами ( $d_k \leq 80\text{?}100$  мкм) – водоугольными каплями.
2. Впервые предложена физико-математическая модель процесса сжигания распыленных капель ВУТ, которая представляет собой сочетание горения двух модельных систем: освободившихся от жидкой фазы угольных частиц и водоугольных капель.
3. Установлено, что траектории движущихся «капель-частиц» и капель ВУТ в вихревой камере имеют форму спиралей, при этом время нахождения горящих «капель-частиц» и капель ВУТ в топке пропорционально их диаметру, что позволяет обеспечить практически полное их выгорание.
4. Предложены технологические решения сжигания ВУТ в вихревых топках, позволяющие выбрать наиболее эффективный режим их работы.

**Практическая значимость результатов работы** состоит в том, что на основании предложенной физико-математической модели распыления и сжигания капель ВУТ усовершенствована технология сжигания водоугольного топлива в вихревых топках. Данная технология реализована при создании вихревых топков для эффективного сжигания ВУТ в котлах малой и средней мощности. При этом по эффективности сжигания и экологическим характеристикам предлагаемая технология является наиболее целесообразной.

**Внедрение результатов работы** осуществлено при разработке стендовой демонстрационной установки, а также пилотных проектов по переводу котлов Е 1-9, КП – 0,55 и др. на сжигание ВУТ. Внедрение подтверждается соответствующими актами.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Достоверность результатов работы** обеспечивается применением современных методов теоретических и экспериментальных исследований в области гидродинамики, химии твердого топлива, реологии, теоретической теплотехники и математического моделирования. Результаты, полученные на стендовых и промышленных установках, не противоречат основным физическим закономерностям и удовлетворительно совпадают с результатами математического моделирования и данными, полученными другими исследователями.

**Личный вклад автора** заключается в постановке и реализации задач исследования, разработке основных положений научной новизны и практической значимости, внедрении полученных результатов совместно со специалистами ФГУП НПЦ «Экотехника» и ЗАО НПП «Сибэкотехника» (г. Новокузнецк).

**Апробация работы и публикации.** Основные материалы и результаты исследований докладывались и обсуждались на VII Международной научно-практической конференции «Энергетическая безопасность России: новые подходы к развитию угольной промышленности» (Кемерово, 2005), VI Международной научно-практической конференции «Безопасность жизнедеятельности предприятий в угольных регионах» (Кемерово, 2005), Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (Новосибирск, 2005), VI и VII Международной научной конференции «Наука и образование» (Белово, 2006, 2008), XII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Энергетика: Экология, надежность, безопасность» (Томск, 2006).

Основные результаты диссертационного исследования по данной теме опубликованы в 8 печатных работах, в том числе 1 из списка изданий, рекомендованных ВАКом.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 4 разделов, основных результатов и выводов, изложенных на 123 страницах, содержит 32 рисунка, 27 таблиц и список литературы из 105 наименований.

Автор выражает благодарность научному руководителю, сотрудникам ФГУП НПЦ «Экотехника» и ЗАО НПП «Сибэкотехника» за практическую помощь при проведении исследований и внедрении их результатов в производство. Автор также признателен за ценные консультации, теоретическую и практическую помощь д.т.н, ведущему научному сотруднику Института Теплофизики СО РАН Н.А. Дворникову, д.ф.-м.н., проф., зав. кафедрой вычислительной математики и компьютерного моделирования ММФ ТГУ А.В. Старченко.

**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.

Проанализированы характеристики суспензий по основным параметрам и технологическим признакам: гранулометрическому составу, в том числе максимальной крупности угольных частиц в суспензии, массовой доли твердой фазы, зольности угля в суспензии, реологическим характеристикам, наличием или отсутствием реагентов-пластификаторов, способностью сохранять свои свойства при хранении и транспортировании. Показано, что данные параметры определяют свойства ВУТ как жидкого топлива при транспортировке, хранении и распылении в топках котлов.

Проанализированы физико-химические особенности сжигания распыленного водоугольного топлива. Выявлены преимущества и недостатки основных способов сжигания угля и ВУТ: камерного в распыленном виде, слоевого сжигания, в кипящем слое и низкотемпературного вихревого способа.

Показано, что высокую эффективность имеет НТВС. Низкотемпературная технология сжигания топлива характеризуется тем, что осуществляется при низких скоростях горения и поэтому устройства, в которых она реализуется, содержат высокоэффективные механизмы стабилизации топочного процесса. Низкие, но оптимальные с точки зрения формирования вредных веществ температуры позволяют минимизировать общую эмиссию загрязнений. Многообразие и сложность протекающих в топке котла процессов, высокие затраты и трудоёмкость проведения натурных испытаний существенно ограничивают возможность создания эффективных топливосжигающих установок. В связи с этим, математическое моделирование процессов сжигания водоугольного топлива позволяет глубже понять исследуемые процессы и оценить качество принимаемых решений при значительно меньших затратах времени и средств.

Выполненный анализ состояния проблемы сжигания водоугольного топлива, подтверждающий актуальность выбранной темы, позволил сформулировать цель и задачи диссертационной работы.

**Второй раздел** посвящен исследованию механизма дробления капель водоугольного топлива при его распылении.

Эффективность сжигания ВУТ существенно зависит от качества распыления топлива. Поэтому актуальным представляется более полное раскрытие механизмов дробления и сжигания капель ВУТ.

Известно, что сжигание водоугольного топлива существенно отличается от аналогичного процесса при использовании пылевидного угля. При этом утверждается, что влияние марки угля и его зольности на температуру воспламенения и устойчивость горения несущественно. Однако результаты стендовых испытаний и опыт эксплуатации показывают, что при сжигании партий ВУТ, приготовленных из высокометаморфизованных углей и антрацитов, требуется более высокий первоначальный нагрев топочного пространства для инициирования процесса воспламенения топлива и дальнейшего его стабильного горения. Аналогичное явление зафиксировано и при использовании водоугольного топлива, приготовленного из высокозольных угольных шламов. Все это указывает на то, что механизм распыления и модели воспламенения и сжигания водоугольного топлива, предложенные Г.Н. Делягиным и другими авторами, требуют корректировки.

На наш взгляд, распыление водоугольного топлива сжатым воздухом или водяным паром осуществляется следующим образом. В форсунке при смешении ВУТ и распыляющего агента происходит дробление струи ВУТ за счет кинетической энергии последнего. Учитывая полидисперсность частиц угля в ВУТ, при распылении образуются как чисто угольные частицы («капли-частицы» крупнее 80-100 мкм), с которых за счет сил гидродинамического трения срывается жидкая пленка с наиболее тонкими частицами, так и водоугольные капли, состоящие из тонких частиц угля и жидкой фазы. Дело в том, что движущиеся капли подвергаются воздействию сил трения окружающей среды ( $\psi\rho V_r^2$ ), которые стремятся расплющить и раздробить капли.

Напротив, силы поверхностного натяжения ( $2\sigma / r_k$ ) стремятся придать каплям сферическую форму. Когда давление сил трения больше давления силы поверхностного натяжения, происходит дробление капель. Капли максимального размера получаются из равенства этих сил, т.е.

$$\psi\rho V_r^2 = \frac{2\sigma}{r_k}, \quad (1)$$

откуда

$$r_k = \frac{2\sigma}{\psi\rho V_r^2}, \quad (2)$$

где  $\psi, \rho$  – коэффициент сопротивления и плотность газовой среды,  $V_r$  – относительная скорость капли по отношению к газовой среде,  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения,  $r_k$  – радиус капли.

Из формулы (2) видно, что диаметр капель ВУТ существенно зависит от поверхностного натяжения, плотности среды и относительной скорости движения капли.

На рисунке 1 показана зависимость диаметра распыленных капель ВУТ от скорости их движения при различных значениях поверхностного натяжения. Расчеты проводились для различных значений  $\sigma = 0,040 - 0,060$  кг/с<sup>2</sup>,  $\psi = 0,2$ ,  $\rho = 1,29$  кг/м<sup>3</sup>.

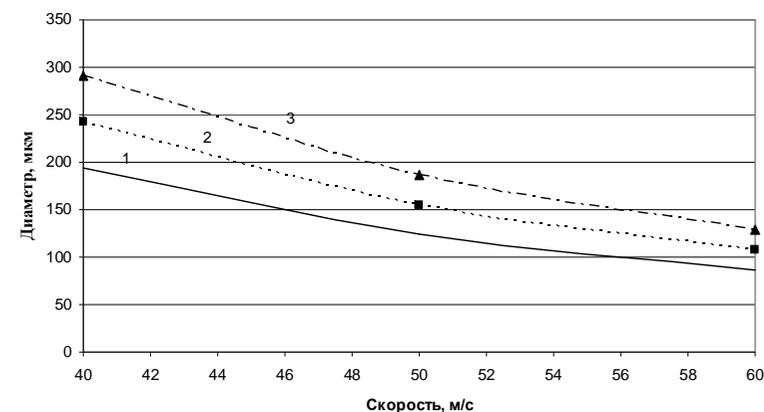


Рисунок 1 – Зависимость диаметра распыленных капель от скорости их движения (Поверхностное натяжение,  $\sigma$ : 1 – 0,040; 2 – 0,050; 3 – 0,060 кг/с<sup>2</sup>)

Как видно из рисунка 1, чем выше относительная скорость движения, тем меньше максимальный диаметр образующихся капель. При скорости вылета распыленных капель из сопла форсунки, равной 40-60 м/с, максимальный диаметр капель составляет от 100 до 300 мкм.

Для подтверждения полученных результатов были проведены экспериментальные исследования.

Распыление водоугольного топлива пневмомеханическими форсунками изучалось на специально созданном стенде. Испытательный стенд предназначен для «холодного» опробования форсунок, оценки качества распыла ВУТ и для определения параметров форсунок (расход и давление ВУТ, расход и давление сжатого воздуха, дисперсность и

конфигурация факела распыла). Схема испытательного стенда включает в себя аккумулирующую емкость с ВУТ, фильтр, насос, компрессор, систему подачи сжатого воздуха, систему подающего и циркуляционного трубопроводов ВУТ, экран с поддоном, на который производилось распыление ВУТ, запорно-регулирующую арматуру, контрольно-измерительные приборы. Распыление ВУТ производилось на экран с поддоном. Конфигурация факела распыла определялась следующим образом: факел на определенном расстоянии от форсунки пересекался алюминиевой пластиной. По отпечатку на пластине определялось качество распыла.

Распыляемое водоугольное топливо имело следующие характеристики. Массовая доля твердой фазы – 57-60 %, вязкость при скорости сдвига  $10 \text{ с}^{-1}$  – 600-800 мПа·с, крупность частиц – 0-300 мкм.

В качестве примера на рисунке 2 представлен один из таких отпечатков (цена деления – 1 мм).

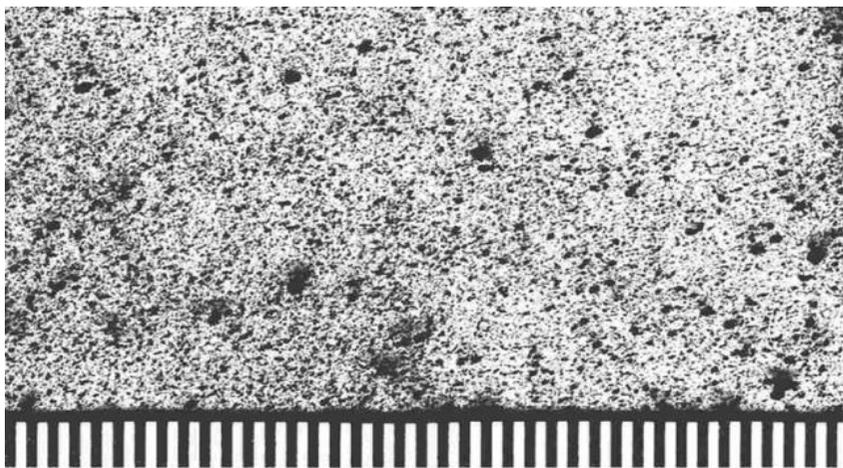


Рисунок 2 – Отпечаток распыла форсунки

Для анализа результатов распыления ВУТ отпечатки распыла форсунки (рисунок 2) обрабатывались при помощи ЭВМ. В таблице 1 показано характерное распределение «капель-частиц» по размеру при распылении.

На рисунке 3 представлены соответствующие полученные кривые распределения.

Таблица 1 – Характерное распределение «капель-частиц» по размеру при распылении

Размер «капель-частиц», мкм	Количество частиц угля в ВУТ, %	Количество «капель-частиц» при распыле, %
> 300	5	7
250...300	3,8	5
160...250	6,3	17
71...160	22,7	14
< 71	62,2	57

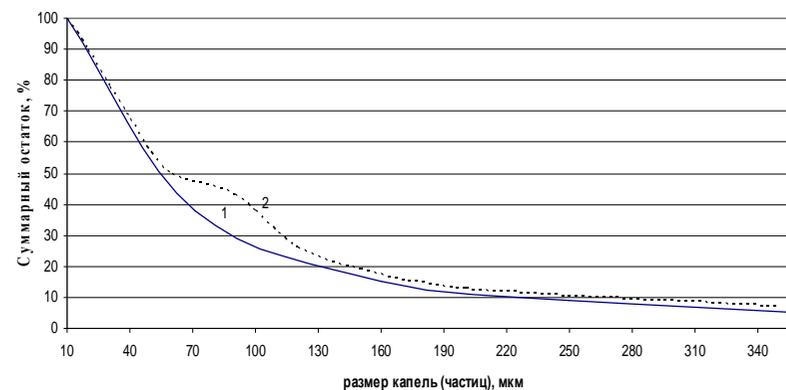


Рисунок 3 – Характерное интегральное распределение «капель-частиц» и капель ВУТ при распыле: 1 – распределение «капель-частиц»; 2 – распределение капель ВУТ

Как видно из рисунка 3, интегральное распределение распыленных «капель-частиц» ВУТ по размерам характеризуется наличием «горба» в диапазоне от 70 до 120 мкм.

Увеличенное количество крупных капель в указанном диапазоне и выполненный анализ механизма дробления капель ВУТ при распылении указывают на то, что распыленные капли действительно состоят из двух качественно различных систем: первая система с крупными «каплями», диаметр которых больше 80-100 мкм, представлена в основном освободившимися от жидкой фазы угольными частицами, а вторая – с мелкими частицами, диаметр которых меньше 80-100 мкм, – водоугольными каплями.

Таким образом, механизмы воспламенения и сжигания полидисперсного потока каплей ВУТ необходимо рассматривать с учетом законов тепломассообмена и химических реакций, происходящих в жидкоугольных каплях и обычных угольных частицах.

**В третьем разделе** согласно предложенной физико-математической модели распыления ВУТ выполнены исследования процесса сжигания распыленного водоугольного топлива.

Принимается, что процесс сжигания распыленных каплей ВУТ представляет собой сочетание горения двух модельных систем: угольных частиц с диаметром  $d_k > 80\text{?}100$  мкм и водоугольных каплей с диаметром  $d_k \leq 80\text{?}100$ . Опираясь на математическую модель, предложенную А.В. Старченко, для описания движения газа и взвешенных частиц используется метод, совмещающий эйлеров и лагранжев подходы.

Согласно этому методу общие уравнения движения, теплообмена и горения в газовой фазе представляются на основе эйлерова способа описания, т.е. используются стационарные пространственные уравнения баланса массы, импульса, концентраций газовых компонентов и энергии для газовой смеси.

Лагранжев подход применяется для описания движения и тепломассообмена одиночных частиц топлива (водоугольной суспензии) и золых частиц вдоль их траекторий с учетом обратного влияния дисперсной фазы на несущую среду. Турбулентные характеристики газа рассчитываются с использованием двухпараметрической «*k-ε*» модели турбулентности, также учитывающей влияние движущихся частиц. Радиационный теплообмен в двухфазном потоке представляется в рамках P1 приближения метода сферических гармоник.

Моделирование процесса сжигания ВУТ в низкотемпературной вихревой топке специальной конструкции выполнялось с использованием программы численного моделирования FLUENT. В качестве сеточного генератора использовался пакет GAMBIT, являющийся препроцессором для FLUENT.

Расчетный объем состоит из топки котла, форсунки (1), системы нижнего дутья (3) и выходного отверстия (2) (рисунок 4). В области топки сгенерирована тетраэдральная сетка, состоящая из 266563 ячеек (рисунок 5). Принимается, что течение описывается системой стационарных трёхмерных уравнений Навье-Стокса и энергии, осредненных по Рейнольдсу. Турбулентная вязкость определяется с помощью двухпараметрической «*k-ε*» модели. Дискретизация дифференциальных уравнений сохранения выполнена со вторым порядком точности. Теплофизические свойства воздуха рассчитываются по полиномиальной зависимости от температуры.

При численном моделировании были приняты следующие исходные данные: расход ВУТ через форсунку – 100-150 кг/ч, массовая доля твердой фазы – 60-65% , зольность угля в ВУТ – 15,0-27,4%, вязкость при скорости сдвига  $81 \text{ с}^{-1}$  – 350-800 мПа·с, крупность частиц – 0-300 мкм, скорость частиц топлива – 40-60 м/с.

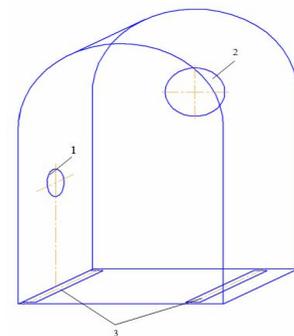
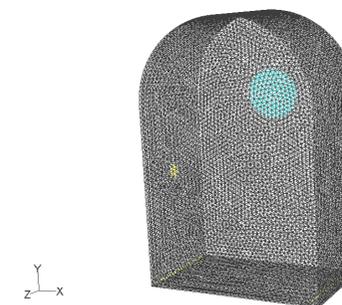


Рисунок 4 – Геометрия Рисунок 5 – Расчетная сетка моделируемой области



На рисунках 6 – 7 представлены полученные при численном моделировании траектории «капель-частиц» и каплей ВУТ различных диаметров, соответственно, на рисунке 6 – траектории водоугольных каплей диаметром 10 – 75 мкм, а на рисунке 7 – «капель-частиц» диаметром 100 – 300 мкм.

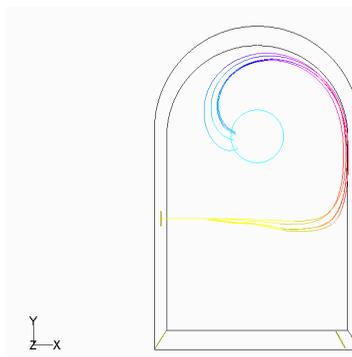


Рисунок 6 – Траектории водоугольных каплей

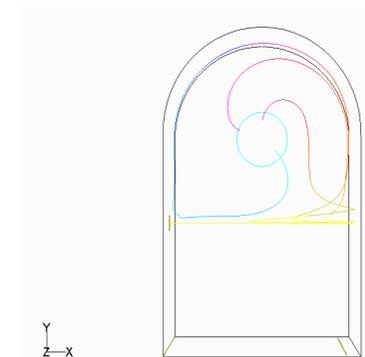


Рисунок 7 – Траектории «капель-частиц»

На рисунке 8 показано максимальное время нахождения «капель-частиц» и капель ВУТ в вихревой камере сжигания.

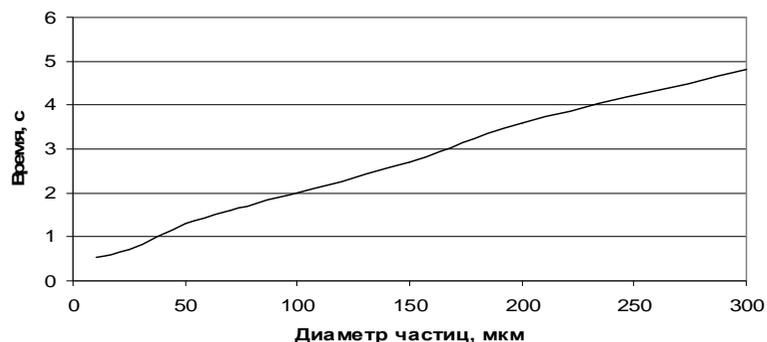


Рисунок 8 – Время нахождения «капель-частиц» и капель ВУТ в камере сжигания

Анализ траекторий частиц показывает, что полученные траектории имеют форму спиралей. Из рисунка 8 видно, что чем крупнее «капли-частицы», тем больше время их пребывания в камере и, соответственно, время их сгорания, при этом время пребывания наиболее крупных «капель-частиц» и капель ВУТ составляет не менее 5-6 с. Этого времени достаточно для полного их выгорания.

В процессе исследований установлены следующие параметры технологии сжигания ВУТ в вихревой топке с тепловой мощностью 0,3 Гкал/ч: температура сжигания 800-1250<sup>0</sup>С; давление сжатого и дутьевого воздуха 0,2-0,5 МПа и 0,001-0,002 МПа соответственно; расход ВУТ на 1 Гкал от 300 до 360 кг.

**В разделе 4** представлены опытно-промышленные исследования по сжиганию ВУТ, которые проводились в разработанной вихревой топке, установленной на стендовой установке. Для приготовления ВУТ использовались угли и угольные шламы различных марок и зольности. В таблице 2 представлена техническая характеристика углей и угольных шламов, из которых готовились опытные партии водоугольного топлива.

В таблице 3 представлены технические характеристики исследованных опытных партий ВУТ.

Таблица 2 – Техническая характеристика использованных углей и угольных шламов

Наименование показателя	Единица измерения	Характеристика, числовое значение		
		Уголь	Угольный шлам	Угольный шлам
Тип исходного сырья		Уголь	Угольный шлам	Угольный шлам
Марка угля		Д, Г	СС	А
Влажность угля	%	10-15	20-28	8-16
Зольность угля	%	14-20	22-36	25-40
Выход летучих веществ	%	40-42	22	7-9

Таблица 3 – Технические характеристики исследованных опытных партий ВУТ

Наименование показателя	Единица измерения	Характеристика, числовое значение		
		Уголь	Угольный шлам	Угольный шлам
Тип исходного сырья		Уголь	Угольный шлам	Угольный шлам
Марка угля		Д, Г	СС	А
Массовая доля твердой фазы, С <sub>т</sub>	%	56?60	58?65	63?68
Крупность частиц	мкм	0?350	0?500	0?350
Эффективная вязкость при скорости сдвига 81 с <sup>-1</sup> и температуре 20 <sup>0</sup> С	мПа·с	500?850	500?850	500?850

Сжигание опытных партий ВУТ осуществлялось в вихревой камере сжигания (рисунок 9), оборудованной горелочным устройством и системой эвакуации газов. ВУТ из расходного бака с помощью перистальтического насоса НП-16 с производительностью до 0,3 м<sup>3</sup>/ч по системе трубопроводов подается к форсунке горелочного устройства. Регулирование объема подачи осуществляется с помощью инвертора J 100 “Hitachi” путем изменения частоты вращения двигателя насоса. Для исключения забивания форсунок крупными частицами используется фильтр тонкой очистки.

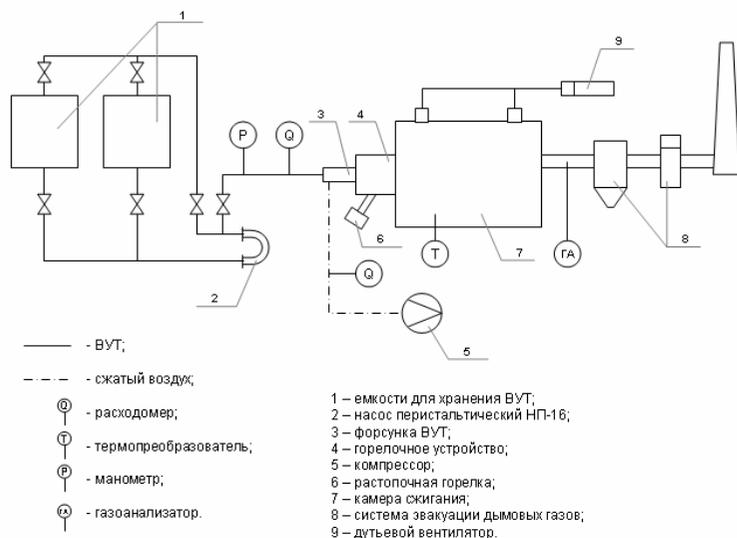


Рисунок 9 – Технологическая схема сжигания ВУТ

Распыление ВУТ форсункой осуществляется с помощью сжатого воздуха с применением компрессора ПКС-3,5. В процессе сжигания состав газовой фазы контролируется с помощью газоанализатора ДАГ 16, температура в камере сжигания – термопарой, расход ВУТ и сжатого воздуха - расходомерами. Давление ВУТ и сжатого воздуха измеряется датчиками давления и манометром. Все показания по давлению и температуре фиксируются на технологических измерителях. Для розжига ВУТ применяется соляная горелка WSO-12Н.

Первоначальный разогрев вихревой топки осуществляется с помощью горелки, работающей на дизельном топливе. Затем производится совместное сжигание ВУТ с дизельным топливом. В дальнейшем сжигание ВУТ осуществляется самостоятельно. При сжигании производится замер состава газовых выбросов.

В таблице 4 представлены результаты сжигания опытных партий ВУТ.

Таблица 4 – Результаты сжигания опытных партий ВУТ

Вид водоугольного топлива	Температура в топке		Время выхода на стабильное самостоятельное горение, мин	
	зажигания	стабильное самостоятельное горение		
из угля марки Д, Г	450?500 <sup>0</sup> С	800?850 <sup>0</sup> С	25?30	
из угольных шламов марки СС	зольность 22%	600?650 <sup>0</sup> С	850?900 <sup>0</sup> С	35?37
	зольность 36%	600?650 <sup>0</sup> С	850?900 <sup>0</sup> С	40?45
из антрацита марки А	750?850 <sup>0</sup> С	950?1070 <sup>0</sup> С	50?56	

Проведенные испытания показали, что ВУТ, приготовленные из углей различных марок и зольности, надежно воспламеняются и эффективно сжигаются в вихревой топке. Механический недожог топлива (содержание горючих в уловленных золовых частицах) составил не более 3-5%. Аналогичный показатель для слоевых угольных топок составляет 20-60%.

Как видно из данных таблицы 4, температура зажигания и время выхода на стабильный режим самостоятельного горения различных видов ВУТ зависят от марки угля и его зольности, что подтверждает выполненные теоретические исследования.

В таблице 5 представлены результаты хроматографического анализа газовых выбросов при сжигании водоугольного топлива.

Таблица 5 – Содержание вредных веществ в уходящих газах

Показатели контроля	НД на МВИ	Угольный шлам	Нормативное содержание
Монооксид азота NO (мг/м <sup>3</sup> )	Газоанализатор ДАГ 16	165	-
Оксиды азота NO <sub>x</sub> (мг/м <sup>3</sup> )	Газоанализатор ДАГ 16	173	750
Оксид углерода СО (мг/м <sup>3</sup> )	Газоанализатор ДАГ 16	112	375

Из таблицы 5 видно, что содержание вредных выбросов в 3,3-4,3 раза ниже предельно допустимых концентраций (для предприятий России).

Технико-экономическая эффективность строительства установок по приготовлению ВУТ и переводу котлов на его сжигание рассмотрена на примере строительства на территории шахты «Тырганская» промышленной установки для приготовления ВУТ из угольных шламов и отходов флотации ОФ «Зиминка» и перевода котельных ООО «УК «Прокопьевскуголь» на сжигание ВУТ. Максимальная эффективность внедрения ВУТ достигается при расположении установки для его приготовления рядом с углеобогатительной фабрикой или гидрошахтой, когда в качестве твердой фазы используются угольные шламы, а жидкой – сгущенные отходы флотации с тонкодисперсными трудноулавливаемыми твердыми частицами. При этом вовлекаются в оборот угольные шламы и отходы флотации, сбрасываемые в настоящее время в наружные шламовые отстойники.

Экономическая эффективность получена за счет разной стоимости топливной составляющей при использовании ВУТ и рядового угля в котельных. Указанная разница составляет от 100 до 150 руб. на 1 Гкал без учета снижения платы за вредные выбросы. Окупаемость капитальных затрат составляет не более 2,5 года.

Таким образом, реализация усовершенствованной технологии сжигания водоугольного топлива в вихревых топках котлов малой и средней мощности позволяет получить существенный экономический эффект и снизить вредные выбросы в окружающую среду.

#### Основные выводы и результаты:

1. Исследован механизм дробления капель ВУТ при его распылении, что обуславливает особенности сжигания ВУТ. При этом установлено, что в процессе распыления ВУТ образуются две качественно различные системы: первая система с «каплями» диаметром свыше 80-100 мкм представлена преимущественно угольными частицами; вторая – водоугольными каплями.
2. Впервые разработана физико-математическая модель процесса сжигания распыленного водоугольного топлива, согласно которой в вихревой топке происходит горение двух модельных систем: «капель-частиц» и капель ВУТ.
3. Путем численного моделирования построены траектории движущихся «капель-частиц» и капель ВУТ в вихревой топке в

зависимости от их диаметра. При этом установлено, что время пребывания распыленных наиболее крупных капель топлива в топочном пространстве составляет не менее 5-6 с, что обеспечивает полное их выгорание.

4. Определены параметры технологии сжигания ВУТ в вихревой топке с тепловой мощностью 0,3 Гкал/ч: температура сжигания 800-1250<sup>0</sup>С; давление сжатого и дутьевого воздуха 0,2-0,5 МПа и 0,001-0,002 МПа соответственно; расход ВУТ на 1 Гкал от 300 до 360 кг; коэффициент избытка воздуха, равный 1,2-1,4.
5. Проведенные стендовые испытания сжигания опытных партий ВУТ, приготовленных из углей и угольных шламов различных марок и зольности показали, что температура воспламенения и время выхода на стабильное самостоятельное горение существенно зависят от марки угля и его зольности.
6. Опытные-промышленные и промышленные испытания усовершенствованной технологии сжигания ВУТ в вихревых топках показали, что разработанные технологические решения обеспечивают высокую эффективность сжигания топлива (механический недожог уловленных золых частиц не превышает 3-5%) и снижение уровня вредных выбросов в 3,3-4,3 раза.
7. Установлено, что экономический эффект при внедрении ВУТ, приготовленных из угольных шламов и отходов флотации, в котельных обеспечивается за счет снижения стоимости топливной составляющей на 100-150 руб. на 1 Гкал по сравнению со слоевым сжиганием рядового угля.

#### Основное содержание работы отражено в публикациях:

1. **Сенчурова, Ю.А.** Результаты исследований распыления водоугольного топлива пневмомеханическими форсунками/ Ю.А. Сенчурова, В.И. Мурко, В.И.Федяев, Д.А. Дзюба, Е.М. Пузырев // Известия Томского Политехнического Университета. – Т.312. - № 4. - 2008. – с. 37-40.
2. **Сенчурова, Ю.А.** Модель распыления водоугольного топлива / Ю.А. Сенчурова, В.И. Мурко, В.И. Федяев, Д.А. Дзюба // Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности: Труды VII международной научно – практической конференции – Кемерово: ННЦ ГП – ИГД им. А.А. Скочинского, ИУУ СО РАН, КузГТУ, ЗАО КВК «Экспо - Сибирь», 2005. – с. 93-94.

3. **Сенчулова, Ю.А.** Результаты исследований распыления водоугольного топлива / Ю.А. Сенчулова, В.И. Мурко, В.И. Федяев, Д.А. Дзюба // Материалы VI международной научно – практической конференции – Кемерово, 15-16 ноября 2005 г. / отв. ред. Ю.А. Антонов; зам. отв. ред. Л.А. Шевченко; Кузбасс. гос. техн. ун-т. – Кемерово, 2005. – с. 152-154.
4. **Сенчулова, Ю.А.** Механизм распыления водоугольного топлива / Ю.А. Сенчулова, В.И. Мурко // Наука. Технологии. Инновации: материалы всероссийской научной конференции молодых ученых (8-11 декабря 2005 г.): в 7 ч. /Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск, 2006. – Ч.3. – С.84-86.
5. **Сенчулова, Ю.А.** Водоугольное топливо: результаты распыления / Ю.А. Сенчулова, В.И. Мурко // Наука и образование: Материалы VI Международной научной конференции (2-3 марта 2006 г.): В 4 ч. / Кемеровский государственный университет. Беловский институт (филиал). – Белово: Беловский полиграфист, 2006.– Ч. 1. – С. 537- 540.
6. **Сенчулова, Ю.А.** К вопросу о сжигании дисперсионных водоугольных суспензий [Текст] / Ю.А. Сенчулова, В.И. Мурко // Энергетика: экология, надежность, безопасность: Материалы докладов XII Всероссийской научно-технической конференции. – Томск: ТПУ, 2006. – С. 161- 164.
7. **Сенчулова, Ю.А.** Математическое моделирование процессов сжигания водоугольного топлива в вихревой топке // Наука и образование: Материалы VII Международной научной конференции (14-15 марта 2008 г.): В 3 ч. / Кемеровский государственный университет. Беловский институт (филиал). – Белово: Беловский полиграфист, 2008. – Ч. 3. – С. 248 – 252.
8. **Сенчулова, Ю.А.** Обзор методов сжигания водоугольного топлива в котлах малой мощности и на демонстрационных установках// Наука и образование: Материалы VII Международной научной конференции (14-15 марта 2008 г.): В 3 ч. / Кемеровский государственный университет. Беловский институт (филиал). – Белово: Беловский полиграфист, 2008.– Ч. 3. – С. 252-256.

Сенчулова Юлия Анатольевна  
 Совершенствование технологии сжигания водоугольного топлива в вихревых топках  
 Автореф. дисс. на соискание ученой степени кандидата тех. наук.  
 Подписано в печать 10.11.2009. Заказ № \_\_\_\_\_  
 Формат 60\*90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.  
 ИПЦ Политехнического института Сибирского федерального университета