УДК 621.311

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ РАСПЫЛЕНИЯ И СЖИГАНИЯ СУСПЕНЗИОННОГО УГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

Мурко В.И.[1], Федяев В.И.[1], Карпенок В.И.[1], Засыпкин И.М.[2], Сенчурова Ю.А.[3], Риестерер А.[1]

[1]ЗАО «НПП «Сибэкотехника», Новокузнецк, Россия
[2]Институт теоретической и прикладной механики им. С.А.Христиановича СО РАН, Новосибирск, Россия
[3]Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф.Горбачева», ф-л Белово, Россия

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты исследований распыления суспензионного угольного топлива пневмомеханическими форсунками и его сжигания в вихревой топке. Показано, что при распылении топлива образуются две качественно различные системы капель. Первая система с «каплями» диаметром свыше 80…100 мкм представлена угольными частицами; вторая – водоугольными каплями. Установлена различная динамика изменения температур угольных частиц и капель ВУТ при их горении. При этом время нахождения горящих частиц и капель ВУТ в вихревой топке пропорционально их диаметру, что позволяет обеспечить их эффективное выгорание.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие энергетики, а также повышение энергетической безопасности России в значительной степени зависят от широкого и эффективного использования угля в качестве энергетического топлива. Для этого необходимо, в первую очередь, улучшить потребительские свойства угля как энергетического топлива, а также освоить получение на основе угля альтернативных топлив при замене дефицитных природных ресурсов: газообразного и жидкого нефтяного топлива. Для решения вышеуказанной проблемы весьма перспективны проводимые как в России, так и за рубежом работы по технологии получения и использования угольных суспензий, которые представляют собой композиционную дисперсную систему, состоящую из твердой фазы в виде мелкодисперсного угля и жидкой среды (вода, спирты, углеводороды, продукты переработки нефти) [1, 2]. Достаточно изученным и перспективным в энергетике является суспензионное угольное топливо – водоугольное топливо (ВУТ), в котором основную часть жидкой среды составляет вода.

МЕХАНИЗМ ГОРЕНИЯ ВУТ

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

В работе Г.Н. Делягина [3] отмечается, что горение водоугольного топлива существенно отличается от аналогичного процесса при использовании пылевидного угля. При этом утверждается, что на температуру воспламенения и устойчивость горения практически не оказывает влияния марка угля. Однако результаты практического применения ВУТ показывают, что при получении водоугольного топлива из высокометаморфизованных каменных углей с низким выходом летучих веществ для надежного воспламенения ВУТ требуются существенно более высокие температуры, а для устойчивого эффективного горения распыленного топлива необходимо обеспечивать достаточное время его нахождения в высокотемпературном поле. В связи с этим нами обоснован следующий механизм распыления ВУТ сжатым воздухом или другим распыляющим агентом.

© Мурко В.И., Федяев В.И., Карпенок В.И., Засыпкин И.М., Сенчурова Ю.А., Риестерер А.

Предполагается, что при распылении водоугольного топлива образуется полидисперсный поток, содержащий как чисто угольные частицы, освобожденные от жидкой фазы за счет высокой скорости их вылета из сопла форсунки, так и водоугольные капли, имеющие в своем составе тонкие угольные частицы, окруженные жидкой фазой – водой. В зависимости от гранулометрического состава угля в ВУТ, количество чисто угольных частиц в потоке распыленного топлива может достигать 25…30 %, что безусловно сказывается на процессы его воспламенения и последующего устойчивого горения.

В связи с этим механизмы воспламенения и горения полидисперсного потока капель ВУТ необходимо рассматривать с учетом законов тепломассообмена и химических реакций, происходящих в жидкоугольных каплях и обычных угольных частицах.

Распыление водоугольного топлива воздухом или водяным паром осуществляется в два этапа. На первом этапе происходит дробление струи ВУТ за счет кинетической энергии распыляющего агента. На втором этапе при разгоне распыленных частиц топлива осуществляется их дробление за счет сил сопротивления, оказываемого окружающей газовой средой, скорость движения которой многократно меньше скорости движения капель. В результате возникающего динамического воздействия капли расплющиваются и разрываются на более мелкие, а жидкая фаза с тонкими угольными частицами срывается с поверхности крупных угольных частиц.

Рассмотрим механизм дробления капель ВУТ по аналогии с мазутным топливом [4].

Давление газовой среды P_1 на движущуюся в ней каплю определяется воздействием силы трения $F_{тр}$ на лобовую площадь капли $S_к$

$$P_1 = \frac{F_{тр}}{S_к}. \quad (1)$$

Пренебрегая силой тяжести и рассматривая лишь действие газовой среды, получаем, что сила трения равна

$$F_{тр} = \psi S_к \rho V_r^2, \quad (2)$$

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

Подставляя выражение (2) в уравнение (1), получим

$$P_1 = \psi \rho V_r^2.$$

С другой стороны, давление, испытываемое каплей за счет сил поверхностного натяжения, составляет

$$P_2 = \frac{2\sigma}{r_к},$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения, $r_к$ – радиус капли.

Предполагается, что распад капли на более мелкие [4] происходит, если

$$P_1 > P_2 \quad (3)$$

В этом случае, максимальный размер капли получается при условии $P_1 = P_2$, т. е.

$$\psi \rho V_r^2 = \frac{2\sigma}{r_к}. \quad (4)$$

Из выражения (4) находим:

$$\psi \rho V_r^2 = \frac{2\sigma}{r_к}. \quad (5)$$

Из формулы (5) видно, что диаметр капель ВУТ существенно зависит от поверхностного натяжения, плотности среды и относительной скорости движения капли. Причем, при повышении температуры, когда вязкость жидкой фазы уменьшается, и увеличении скорости обтекания эффективность распыления жидкого топлива возрастает.

На рис.1 показана расчетная зависимость диаметра распыленных капель ВУТ от скорости их движения при различных значениях σ=0,040-0,060 кг/с^2, ψ= 0,2, ρ=1,29 кг/м^3.

Как видно из рис.1, чем выше относительная скорость движения, тем меньше максимальный диаметр образующихся капель. Таким образом, при скоростях, больших 60 м/с, что практически реализуется в промышленных форсунках ВУТ, крупные угольные частицы распыленного топлива освобождаются от поверхностной влаги, содержащей тонкие угольные частицы, а максимальный диаметр образующихся водоугольных капель не превышает 80-100 мкм.

Поскольку между процессами разрушения капель жидкости и срыва пленок жидкой фазы с частиц угля скоростными потоками газа существует аналогия [6], то можно предположить, что при существующих скоростях движения распыленного топлива срыва пленок жидкости с частиц угля размером меньше 80…100 мкм не происходит.

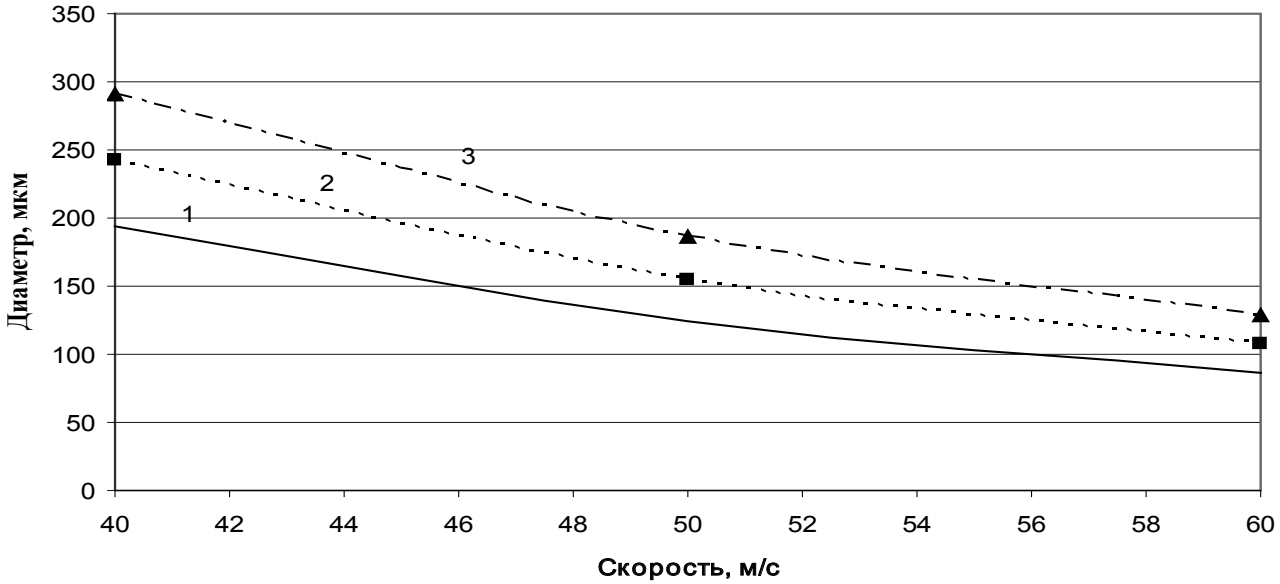

Рис.1 Зависимость диаметра распыленных капель от скорости их движения (Поверхностное натяжение, σ: 1 – 0,040; 2 – 0,050; 3 – 0,060 кг/с^2)

Таким образом, можно утверждать, что процесс сжигания распыленных капель ВУТ представляет собой сочетание горения двух модельных систем: угольных частиц с диаметром $d_k > 80 \div 100$ мкм (капли-частицы) и водоугольных капель с диаметром $d_k \leq 80 \div 100$ мкм.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПЫЛА ВУТ

Экспериментально 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 топлива, расход и давление сжатого воздуха, дисперсность и конфигурация факела распыла).

Распыление ВУТ производилось на экран с поддоном (рис.2).

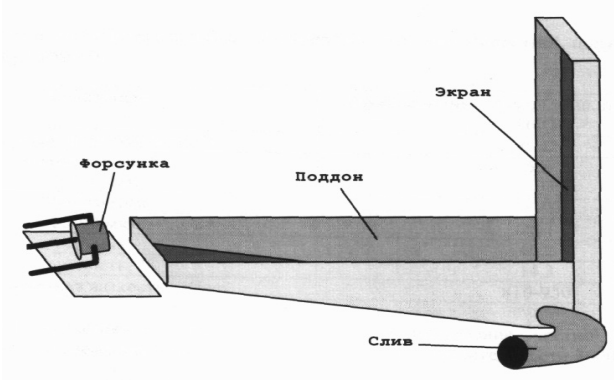

Рис.2. Стенд для испытания процессов распыления ВУТ.

Конфигурация факела распыла определялась следующим образом: факел на определенном расстоянии от форсунки пересекался алюминиевой пластиной. По отпечатку на пластине определялось качество распыла.

В качестве примера на рис.3 представлен один из полученных отпечатков распыленного топлива (характеристика ВУТ: массовая доля твердой фазы - 57 %, вязкость при скорости сдвига 10 с$^{-1}$ составляла 0,6 Па·с, крупность частиц – 0…355 мкм.). На рисунке четко видно наличие крупных угольных частиц, освободившихся от жидкой фазы.

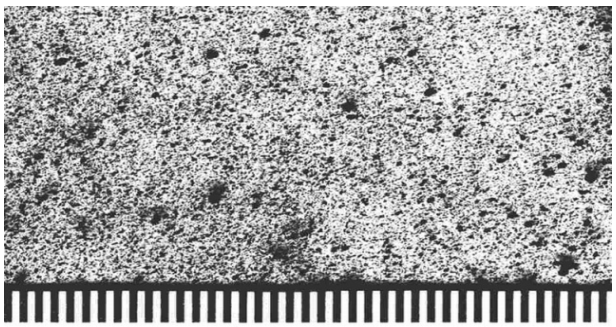

Рис.3. Отпечаток распыла ВУТ .

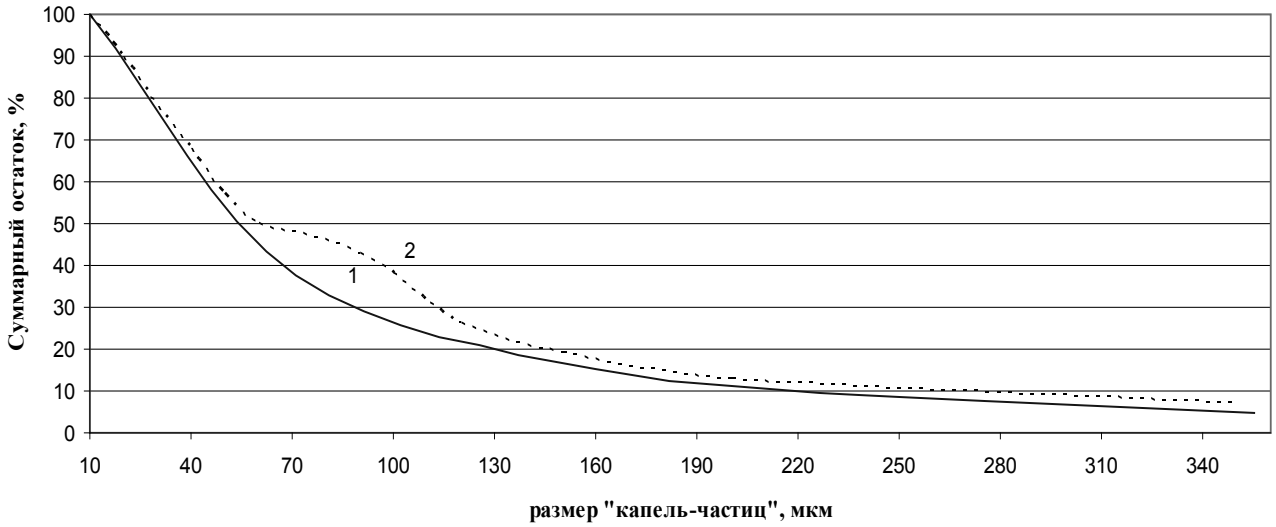

Рис. 4. Интегральное распределение угольных частиц в исходном топливе и системы угольных частиц и капель в распыленном топливе: 1 – распределение по крупности угольных частиц в исходном топливе, 2 – аналогичное распределение распыленных твердых частиц и капель ВУТ.

Для анализа результатов распыления ВУТ отпечаток распыла ВУТ (рис.3) был обработан в векторном редакторе CorelDraw 9.0, результаты которого представлены в таблице 1 и на рисунке 4.

Таблица 1. Распределение капель (частиц) в ВУТ

Диаметр капель (частиц), мкм	Количество капель (частиц), %
+355	4,7
250…355	7,2
160…250	11,9
71…160	23,1
-71	53,1

Как видно из рис.4, интегральное распределение распыленных «капель-частиц» ВУТ по размерам характеризуется наличием «горба» в диапазоне от 70 до 120 мкм, что подтверждает предложенный механизм дробления капель ВУТ при его распылении.

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

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СЖИГАНИЯ ВУТ

Низкая реакционная способность ВУТ вследствие наличия жидкой фазы – воды, повышенная относительно других жидких топлив вязкость, а также используемая для приготовления топлива марка угля являются решающими при выборе эффективной технологии сжигания ВУТ, которая должна обеспечивать необходимую полноту выгорания топлива и минимально возможные вредные выбросы в уходящих газах. С учетом указанных особенностей используется низкотемпературный вихревой способ сжигания (НТВСС) суспензионного угольного топлива, разработанный д.т.н. Пузыревым Е.М. [7], который был реализован при создании различных конструкций вихревых топочных камер сжигания [8-11].

Для моделирования сжигания ВУТ вихревым способом были выполнены численные исследования.

Расчет проводился с помощью программного модуля ANSYS FLUENT, позволяющего моделировать процесс горения с учетом турбулентности, теплообмена и химических реакций. Для проектирования расчетной сетки в области камеры использовался пакет GAMBIT, являющийся геометрическим и сеточным препроцессором для FLUENT.

Расчетный объем состоит из камеры котла 1, форсунки 2, системы дутья 3 и пережимного выходного отверстия 4 (рисунок 5).

В области камеры сформирована тетраэдральная сетка, состоящая из 61965 ячеек.

Течение описывается системой стационарных трехмерных уравнений Навье-Стокса, сохранения энергии и массы, осредненныхпо Рейнольдсу. Турбулентная вязкость рассчитывается с помощью двухпараметрической «k-ε» модели. Радиационный теплообмен в двухфазном потоке представляется в рамках P1 приближения метода сферических гармоник. В качестве модели горения распыленных капель ВУТ применяется модель распада вихрей (Eddy-Dissipation Model). Теплофизические свойства воздуха рассчитываются по полиномиальной зависимости от температуры. Параметры инжекции капель ВУТ в камере задаются с помощью модели «Discrete Phase Model».

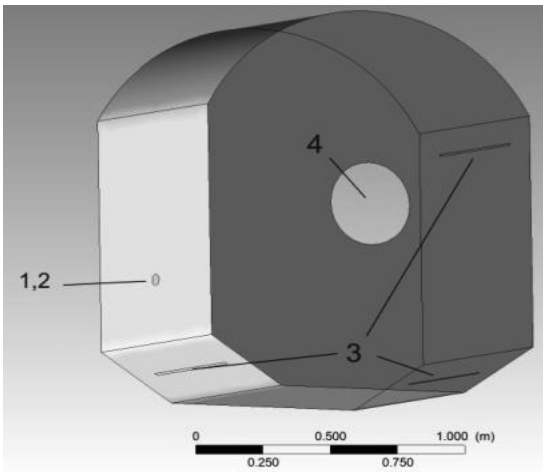

Рис.5. Геометрия моделируемой области.

В качестве исходных параметров были приняты следующие данные (таблица 1).

Таблица 2. Исходные параметры для расчета сжигания ВУТ

Параметр	Единица измерения	Величина
Расход ВУТ через форсунку	кг/ч	67
Массовая доля твердой фазы	%	63
Зольность угля в ВУТ	%	32
Вязкость при скорости сдвига 81 $с^{-1}$	мПа·с	1000
Крупность частиц	мкм	10-160
Скорость частиц топлива	м/с	145,6

На рисунках 6–10 представлены соответственно результаты расчетов: поля температур; массовой скорости испарения жидкой фазы в капле ВУТ; массовой скорости выделения летучих веществ из твердой фазы капли ВУТ; массовой скорости выгорания углерода из твердой фазы капли ВУТ.

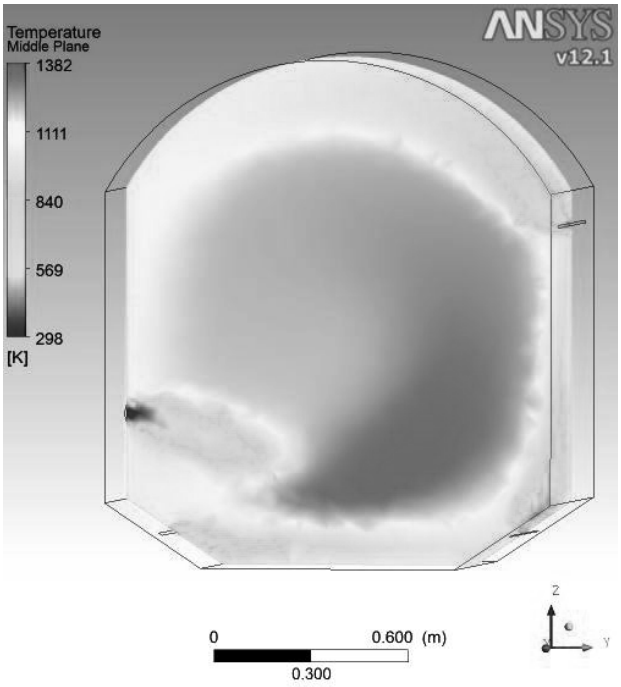

Рис.6. Поле температур в плоскости форсунки

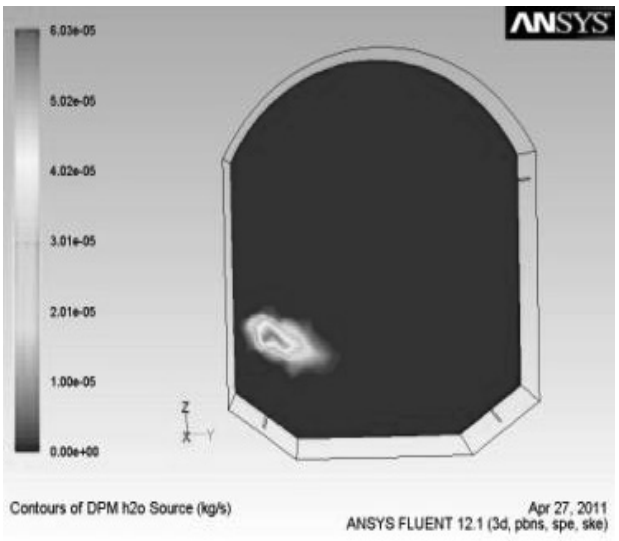

Рис.7. Массовая скорость испарения жидкой фазы в капле ВУТ в продольном сечении камеры

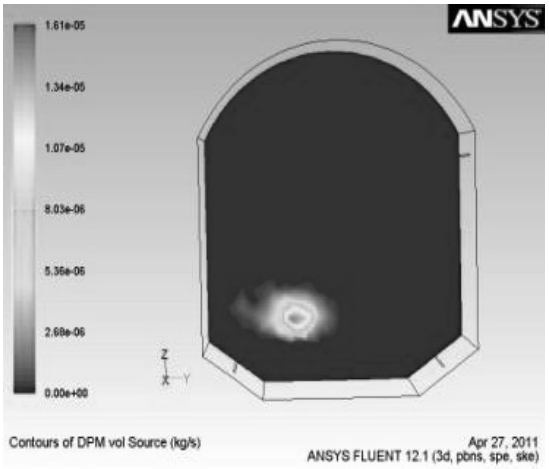

Рис.8. Массовая скорость выделения летучих веществ из твердой фазы капли ВУТ в продольном сечении камеры

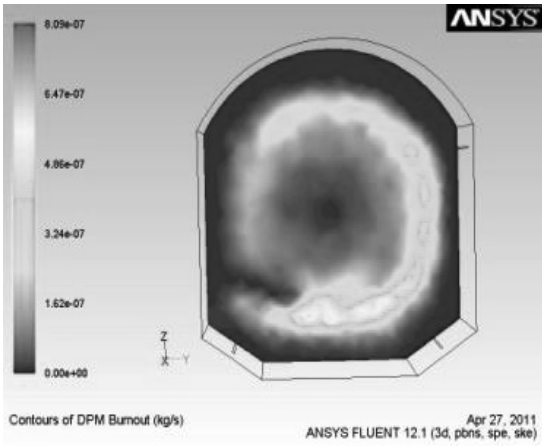

Рис.9. Массовая скорость выгорания углерода из твердой фазы капли ВУТ в продольном сечении камеры

Из рисунков видно, что удаление летучих веществ (рисунок 4) начинается в момент завершения испарения капель воды (рисунок 3), что сопровождается повышением температуры (рисунок 2). Одновременно с этим начинается процесс горения связанного углерода капли ВУТ (рисунок 5).

На рисунках 6 и 7 показаны 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 6 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.

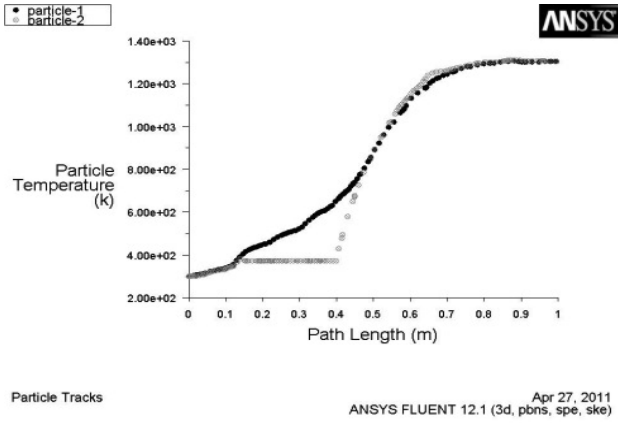

Рис.10. Сравнение изменения температуры угольной частицы (particle 1) и капли ВУТ (particle 2) в зависимости от длины пути частицы и капли

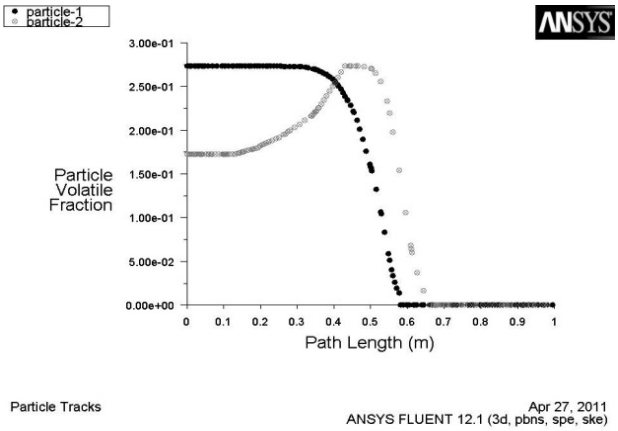

Рис.11. Сравнение изменения содержания летучих веществ в угольной частице (particle 1) и капле ВУТ (particle 2) в зависимости от длины пути частицы и капли

Из рисунка 7 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 процессе 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.

Следует отметить, что результаты моделирования хорошо согласуются с опытными данными (таблица 3), полученными в процессе сжигания опытных партий ВУТ, приготовленных из углей различных марок и зольности, на демонстрационном стенде НПЦ «Сибэкотехника» [12].

Таблица 3. Сравнение результатов численного моделирования и экспериментальных исследований

Наименование данных	Данные, полученные	
	численным моделированием	Экспериментально
Тепловая мощность	247 кВт	258 кВт
Выход CO	101 мг/м^3	116 мг/м^3
Выход NO_x	412 мг/м^3	419 мг/м^3
Мех. недожог	7 %	5 %

В таблице 4 представлены результаты сжигания опытных партий ВУТ, приготовленных из различных марок углей, которые подтверждают влияние выхода летучих веществ на параметры сжигания топлива.

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÷500ºС	800÷850ºС	25÷30
из угольных шламов марки СС	зольность 22%	600÷650ºС	850÷900º	С35÷37
	зольность 36%	600÷650ºС	850÷900ºС	40÷45
из антрацита марки А		750÷850ºС	950÷1070ºС	50÷56

Анализ данных, представленных в таблице 4, показывает, что температура зажигания и время выхода на стабильный режим горения различных видов ВУТ зависят от марки угля и его зольности, что подтверждает выполненные теоретические исследования.

Таким образом, компьютерное моделирование процесса горения топлива позволяет определить оптимальные режимы сжигания ВУТ и повысить точность проектирования новых или усовершенствования конструкций топок существующих котлов. В результате снижается общая стоимость работ за счет исключения проведения дорогостоящих экспериментов.

Материалы статьи подготовлены в процессе реализации проекта в рамках частногосударственного партнерства в сфере реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства при финансовой поддержке правительства Российской Федерации (шифр 2010-218-02-174 «Разработка технологии и создание пилотного образца автоматизированного энергогенерирующего комплекса, работающего на отходах углеобогащения»).

ВЫВОДЫ

В результате исследований подтверждено, что при распылении водоугольного топлива образуется полидисперсный поток, содержащий как чисто угольные частицы, так и водоугольные капли, имеющие в своем составе тонкие угольные частицы, окруженные жидкой фазой. Механизмы воспламенения и сжигания полидисперсного потока капель ВУТ необходимо рассматривать с учетом законов тепломассообмена и химических реакций, происходящих в жидкоугольных каплях и обычных угольных частицах. Проведенные экспериментальные и численные исследования позволяют определить оптимальные режимы распыла и сжигания ВУТ и повысить точность проектирования новых или усовершенствования конструкций топок существующих котлов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мурко, В.И. Научные основы процессов получения и эффективного применения водоугольных суспензий: автореферат дис. док. техн. наук: 05.17.07 / В.И. Мурко; Моск. ин-т гор. ископаемых. – Москва: 1999. – 48 с.
2. Мурко, В.И. Водоугольное топливо / В.И. Мурко, В.И.Федяев, Д.А. Дзюба // Уголь. – 2002. – №6. – С. 58-59.
3. Делягин, Г.Н. Сжигание водоугольных суспензий - метод использования обводненных твердых топлив: автореферат дис. докт. техн. наук: №05-283 / Г.Н. Делягин; Ин-т гор. ископаемых. – Москва: 1971. – 48 с.
4. Хзмалян, Д.М. Теория топочных процессов / Д.М. Хзмалян. – М.: Энергоатомиздат. – 1990. – 352 с.
5. Корсунов, Ю.А. Экспериментальное исследование дробления капель жидкости при низких значениях чисел Рейнольдса / Ю.А. Корсунов // Механика жидкости и газа. – 1971. – № 2. – С. 182–186.
6. Грин, Х., Аэрозоли – пыли, дымы и туманы (пер. с англ.) / Х. Грин, В. Лейн. – Л. – 1969. – 426 с.
7. Демонстрационная опытно-промышленная установка для приготовления, транспортирования, хранения и сжигания композиционного водоугольного топлива [Текст] / В.И. Мурко, В.И. Федяев, Д.А. Дзюба и др. // Уголь
8. Кузбасса, 2003. – № 10. – С. 20
9. Пузырев Е.М., Мурко В.И. и др. Результаты опытно-промышленных испытаний работы котла ДКВР 6,5/13 на водоугольном топливе. Журнал «Теплоэнергетика, 2001, №2. – 69 с.
10. Мурко В.И., В.И. Федяев, Е.М. Пузырев и др. Материалы международной научно-практической конференции, 3-4 июня 2003, Новокузнецк, СибГИУ, – с. 38-43.
11. В.И. Мурко, Федяев В.И .Карпенок В.И. Разработка и создание технологического комплекса по сжиганию тонкодисперсных отходов углеобогащения в котельной ОАО «Междуречье». Ж.: Уголь Кузбасса, 2010, №4, -с. 102-103.
12. В.И. Мурко, Пузырев Е.М.. Вихревая камерная топка. Пат. 45807 RU UI F23 с 5/24 2005100095/22. Заявл. 11.01.2005. Опубл. 27.05.2005. Бюл. № 15,с.57.
13. Вихревая топка. Пат. На полезную модель № 37183 RU 7 F 23 C 5/24, 1/02. 25.11.202
14. Мурко, В.И. Демонстрационная опытно-промышленная установка для приготовления, транспортирования, хранения и сжигания композиционного водоугольного топлива [Текст] / В.И. Мурко, В.И. Федяев, Д.А. Дзюба и др. // Уголь Кузбасса, 2003. – № 10. – С. 20.