

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА СЖИГАНИЯ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

В.И. Мурко, А.Риестерер, С.А. Цецорина, В.И. Федяев, В.И. Карпенюк

В статье рассмотрен механизм сгорания угольных частиц и водоугольных капель при подаче распыленного водоугольного топлива в адиабатическую вихревую камеру сжигания. Представлены данные численного моделирования процесса сжигания в камере с помощью программного модуля ANSYS FLUENT. Показано, что результаты численного моделирования согласуются с экспериментальными данными.

Ключевые слова: сжигание водоугольного топлива, адиабатическая камера, выделение летучих веществ, связанный углерод, моделирование процесса горения.

Основными направлениями использования водоугольного топлива (ВУТ) являются: применение ВУТ, полученного на основе низкозольного угля, на сушильных комплексах предприятий сельского хозяйства вместо жидкого нефтяного топлива; утилизация тонкодисперсных отходов углеобогащения. При этом успешно применяется технология низкотемпературного вихревого сжигания суспензионного угольного топлива в адиабатических камерах сгорания, которые либо встраиваются в топочное пространство существующих или вновь разрабатываемых котлов и других теплогенераторов, либо устанавливаются рядом с действующими установками [1–3].

С целью дальнейшего изучения процесса сжигания ВУТ в адиабатической вихревой камере и оптимизации ее конструкции были проведены исследования процесса сгорания распыленных капель ВУТ и частиц угля в соответствии с моделью распыления ВУТ, представленной в работе [4].

Распыление водоугольного топлива сжатым воздухом 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. Движущиеся капли подвергаются воздействию сил трения окружающей среды ($\psi \rho V_{\text{г}}^2$), которые стремятся расплющить и раздробить капли. Напротив, силы поверхностного натяжения ($\frac{2\sigma}{r_{\text{к}}}$)

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.

$$\psi \rho V_{\text{г}}^2 = \frac{2\sigma}{r_{\text{к}}}, \quad (1)$$

откуда

$$r_{\text{к}} = \frac{2\sigma}{\psi \rho V_{\text{г}}^2}, \quad (2)$$

где ψ – коэффициент сопротивления газовой среды;

ρ – плотность газовой среды;

$V_{\text{г}}$ – относительная скорость капли по отношению к газовой среде;

σ – коэффициент поверхностного натяжения;

$r_{\text{к}}$ – радиус капли.

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

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 1).

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

Течение описывается системой стационарных трехмерных уравнений Навье-Стокса, сохранения энергии и массы, осредненных

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК №2/1 2011

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА СЖИГАНИЯ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

по 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 рас-

пада вихрей (Eddy-Dissipation Model). Теплофизические свойства воздуха рассчитываются по полиномиальной зависимости от температуры. Параметры инжекции капель ВУТ в камеру задаются с помощью модели «Discrete Phase Model».

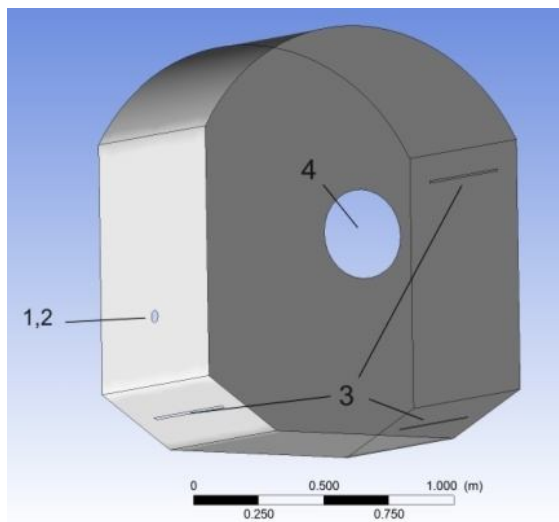


Рисунок 1 – Геометрия моделируемой области

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

Таблица 1 – 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 c^{-1}	мПа·с	1000
Крупность частиц	мкм	10-160
Скорость частиц топлива	м/с	145,6

На рисунках 2–5 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.

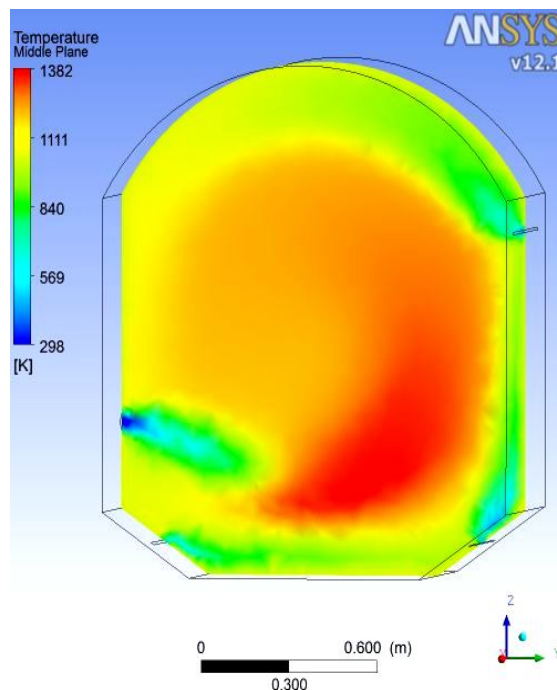


Рисунок 2 – Поле температур в плоскости форсунки

МУРКО В.И., РИЕСТЕРЕР А., ЦЕЦОРИНА С.А., ФЕДЯЕВ В.И., КАРПЕНОК В.И.

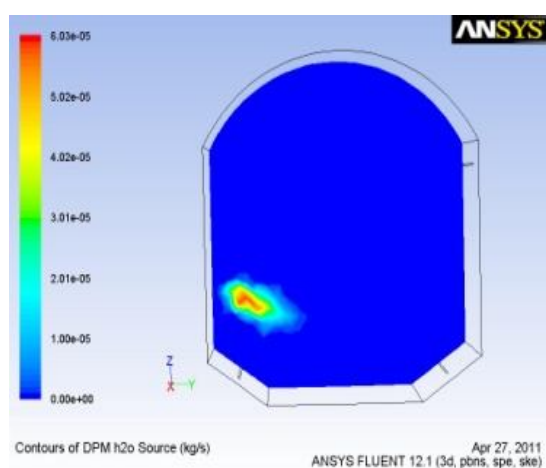


Рисунок 3 – Массовая скорость испарения жидкой фазы в капле ВУТ в продольном сечении камеры

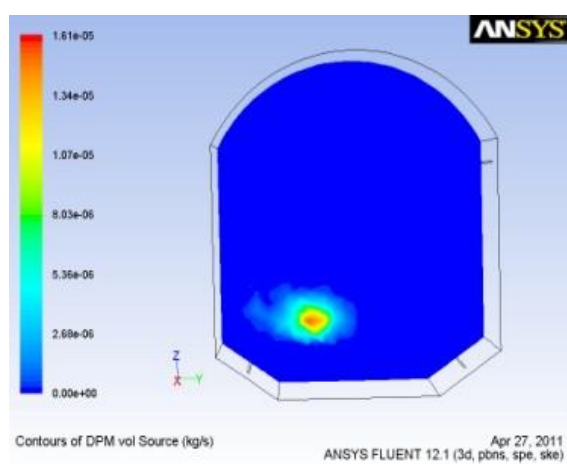


Рисунок 4 – Массовая скорость выделения летучих веществ из твердой фазы капли ВУТ в продольном сечении камеры

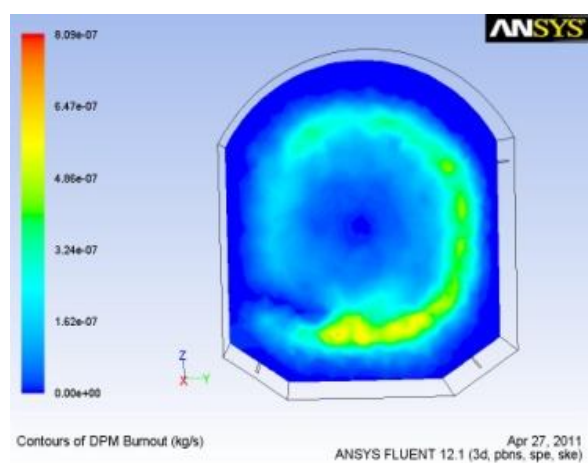


Рисунок 5 – Массовая скорость выгорания углерода из твердой фазы капли ВУТ в продольном сечении камеры

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА СЖИГАНИЯ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

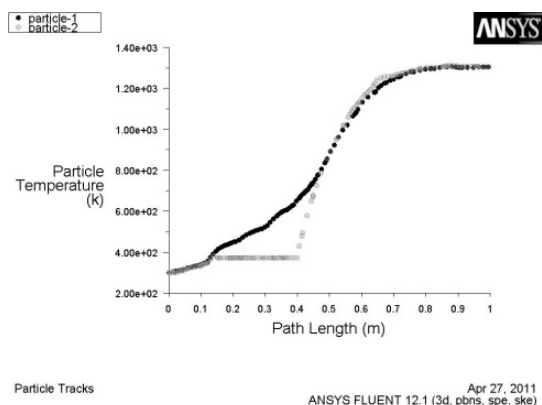


Рисунок 6 – Сравнение изменения температуры угольной частицы (particle 1) и капли ВУТ (particle 2) в зависимости от длины пути частицы и капли

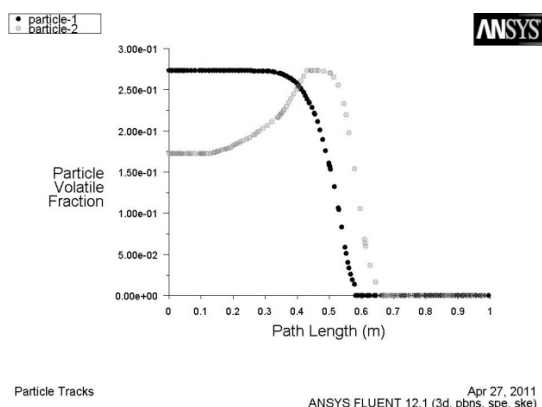


Рисунок 7 – Сравнение изменения содержания летучих веществ в угольной частице (particle 1) и капле ВУТ (particle 2) в зависимости от длины пути частицы и капли

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 про-

цесса испарения. Затем начинаются процессы горения твердой фазы капли ВУТ с выделением теплоты, и наблюдается резкое повышение температуры.

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 2), полученными в процессе сжигания опытных партий ВУТ, приготовленных из углей различных марок и зольности, на демонстрационном стенде НПЦ «Сибэкотехника» [5].

Таблица 2 – Результаты исследований, полученные численным моделированием и экспериментально

Наименование данных	Данные, полученные	
	численным моделированием	экспериментально
Тепловая мощность	247 кВт	258 кВт
Выход СО	101 мг/м ³	116 мг/м ³
Выход NO _x	412 мг/м ³	419 мг/м ³
Мех. недожог	7 %	5 %

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 Россий-

МУРКО В.И., РИЕСТЕРЕР А., ЦЕЦОРИНА С.А., ФЕДЯЕВ В.И., КАРПЕНОВ В.И.

ской Федерации (шифр 2010-218-02-174 «Разработка технологии и создание пилотного образца автоматизированного энергогенерирующего комплекса, работающего на отходах углеобогащения»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мурко, В.И. Разработка мини-ТЭЦ на отходах углеобогащения [Текст] / В.И. Мурко, А.А. Ивушкин, К.Г. Вегнер и др. // Уголь Кузбасса, 2010. – № 12. – С. 67–68.
2. Мурко, В.И. Результаты промышленного опробования технологического комплекса по приготовлению и сжиганию суспензионного угольного топлива [Текст] / В.И. Мурко, В.И. Федяев, А.П. Стариков и др. // Сибирский уголь, 2008. – № 1. – С. 32–34.
3. Мурко, В.И. Разработка и создание технологического комплекса по сжиганию тонкодисперсных отходов углеобогащения в котельной ОАО «Междуречье» [Текст] / В.И. Мурко, В.И. Федяев, В.И. Карпенков и др. // Уголь Кузбасса, 2010. – № 4. – С. 102–103.
4. Мурко, В.И. Модель сжигания суспензионного угольного топлива. Горение твердого топлива [Текст] // Горение твердого топлива: труды VII Всероссийской научно-практической конференции

/ В.И. Мурко, Ю.А. Сенчунова, В.И. Федяев, Д.А. Дзюба. – Новосибирск: Издательство НГУ, 2009. – Т. 2. – С. 144–149.

5. 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.

Мурко В.И., д.т.н., проф., ГОУ ВПО Сибирский государственный индустриальный университет, руководитель лаборатории энергогенерирующих технологий и комплексов, тел. 8(3843) 74-37-00, E-mail: sib_eco@kuz.ru;

Риестерер А., ЗАО НПП «Сибэкотехника», дипломник Политехнического филиала-института университета г. Нанта, Франция (Ecole Polytechnique de l'Universite de Nantes);

Цецорина С.А., к.т.н., доц. каф. литейного производства, ГОУ ВПО Сибирский государственный индустриальный университет,

Федяев В.И., ген. директор, ЗАО НПП «Сибэкотехника»;

Карпенков В.И., ст. науч. сотрудник лаборатории энергогенерирующих технологий и комплексов ГОУ ВПО Сибирский государственный индустриальный университет.