

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ 2-Х СТУПЕНЧАТОГО БЕЗМАЗУТНОГО ГОРЕЛОЧНОГО УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ УГЛЯ МИКРОПОМОЛА

А.П. Бурдуков, О.Л. Магдеева, В.А. Кузнецов, М.Ю. Чернецкий

В данной работе представлены результаты расчетных исследований нескольких конструкций перспективного безмазутного горелочного устройства с использованием угля микропомола, высокая реакционная способность которого используется для воспламенения основной массы угольной пыли стандартного помола. Исследования показали, что улиточный подвод воздуха и угля как для первой ступени горелки, так и второй ступени обеспечивают достаточные условия по температуре на выходе из горелочного устройства.

Ключевые слова: уголь микропомола, 2-х ступенчатое горелочное устройство, воспламенение угольной пыли, математическая модель, пакет программ SigmaFlow.

ВВЕДЕНИЕ

На сотнях котлов угольных тепловых электростанций из-за низких реакционных свойств углей в процессах розжига и стабилизации горения пылеугольного факела используется высокорекреакционное газомазутное топливо (в тепловом эквиваленте 1–2 % объема применяемого на котле угля и более) и даже дизельное топливо. Эта проблема наиболее актуальна для Сибири, где большая энергетика – в основном угольная с долей использования угля в целом по региону на уровне 92 %. Во многих сибирских и дальневосточных областях газ отсутствует, а мазут и дизельное топливо являются дорогим и дефицитным топливом. В Институте теплофизики СО РАН проводятся исследования [1–3] по получению механоактивированного угля, измельченного на мельницах-активаторах до 10–40 мкм (уголь микропомола) и сжиганию его на стендах мощностью 1–5 МВт. Как было показано в исследованиях отечественных ученых [3], так и зарубежных, такой способ подготовки угольного топлива может значительно увеличить его реакционную способность. Но экспериментальные исследования на больших огневых стендах являются финансово затратным мероприятием, и поэтому реализация ряда технических решений на данных стендах требует предварительного обоснования. Одним из основных инструментов для этого, на сегодняшний день, является математическое моделирование. Оно нашло широкое применение для оптимизации, в том числе угольных технологий [4–6]. В данной работе представлены расчетные исследования горелочного устройства применительно к огневому стенду мощностью 1 МВт. Горелка

реализована в виде двух ступеней, где в первую ступень подается воздух вместе с углем микропомола, а вторую уголь стандартного помола. Основная идея – использование энергии, которая выделяется при сгорании угля микропомола для обеспечения стабильного воспламенения угля стандартного помола.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Было рассмотрено два варианта горелочных устройств. В первом из них для обеспечения хорошей закрутки пылевоздушной смеси, было сделано две улитки (рисунок 1а), в первую улитку подается уголь микропомола, во вторую уголь стандартного помола. Во втором варианте, показанном на рисунке 1б, так же в первую улитку подается уголь микропомола, а вместо второй улитки был построен короб прямоугольного сечения, в который подается уголь стандартного помола.

Расчетные сетки для двух вариантов горелочного устройства содержали 800 000 ячеек. Для исследования влияния размеров сетки на результаты расчетов были рассмотрены сетка размером 300 тыс. и 1,5 млн. ячеек. Сравнительный анализ по основным характеристикам потока (скорость, температура) показал незначительные отличия между сеткой размером 0,8 млн. и 1,5 млн. ячеек.

В таблице 1, представлены расходные характеристики горелки, в таблице 2 представлен состав угля используемого для расчета. Фракционный состав угля микропомола, полученный измельчением на дезинтеграторе и угля после ШБМ представлен в таблице 3.

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ 2-Х СТУПЕНЧАТОГО БЕЗМАЗУТНОГО ГОРЕЛОЧНОГО УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ УГЛЯ МИКРОПОМОЛА

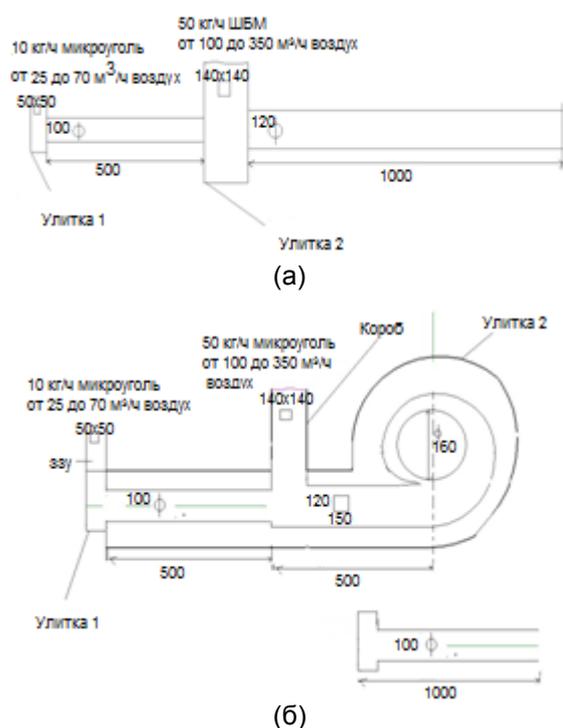


Рисунок 1 – Конструкция горелочного устройства

(а) вариант горелочного устройства с двумя улиточными входами; (б) вариант горелочного устройства с коробом (все размеры, на рисунке указаны в миллиметрах)

Одной из отличительных особенностей углей измельченных в дезинтеграторе является их повышенная реакционная способность. Проведенные ранее исследования в проточном реакторе, а также с помощью термогравиметрического анализа (ТГА) по воспламенению и горению «механоактивированной» угольной пыли позволили получить необходимые количественные характеристики – энергию активацию и предэкспоненциальный множитель для процесса выхода летучих веществ, а также горения коксового остатка. Полученные значения были использованы в данной работе при моделировании процессов воспламенения и горения угольной пыли.

Для стандартного угля кинетические константы были взяты из литературных данных. Все характеристики угольного топлива (кинетические константы, тонина помола и др.) оставались неизменными, двух вариантов горелочного устройства.

Таблица 1 – Расходные характеристики пылеугольного топлива

Подача воздуха и угля микропомола	
Расход воздуха	70 м ³ /час
Расход угля	9,72 кг/ч
Площадь сечения	0,25 · 10 ⁻² м ²
Температура	70 °С
Скорость потока на входе	10 м/с
Подача воздуха и угля стандартного помола	
Расход угля	50 кг/ч
Расход воздуха	350 м ³ /час
Площадь сечения	1,96 · 10 ⁻² м ²
Температура	70 °С
Скорость потока на входе	6,5 м/с

Таблица 2 – Состав Кузнецкого угля

W ^r	A ^r	V ^{daf}	C ^r	H ^r	S ^r	N ^r	Q ^r , М Дж/кг
20	12,4	42	53	3,8	0,27	1,7	20,5

Таблица 3 – Фракционный состав Кузнецкого угля

	Размеры частиц, мкм				
	<2	2–20	20–50	50–100	>100
Рядовой уголь	–	7,9	12,04	8,89	71,58
Уголь микропомола	1,06	32,9	43,12	15,07	7,85

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГОРЕНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ПОТОКА

Для расчетных исследований использовался пакет программ SigmaFlow. Для описания движения потока в топочной камере была принята модель неизотермического несжимаемого многокомпонентного газа. Модель включает уравнения неразрывности, уравнения баланса количества движения, уравнение переноса концентрации компонент, уравнение переноса энергии. В общем виде уравне-

ния сохранения для скалярной величины ϕ записываются:

$$\nabla(\rho \bar{v} \cdot \phi) = \nabla(\Gamma \cdot \nabla \phi) + Q_\phi,$$

$$\phi = \{1, u, v, w, h, f_i, k, \varepsilon\},$$

где ϕ – скалярная величина; Γ – эффективный коэффициент диффузионного переноса; Q_ϕ – источниковый член; ρ – плотность, кг/м³; v – вектор скорости, м/с; u, v, w – компоненты скорости, м/с; h – удельная энтальпия, Дж/кг; k – кинетическая энергия турбулентных пульсаций, м²/с²; ε – диссипация турбулентной энергии, м²/с³; f_i – массовая концентрация, кг/кг.

В данной работе использована модифицированная высокорейнольдсовская k - ε -модель турбулентности. Для определения пульсационных характеристик течения вблизи стенок был применен метод пристеночных функций. Высокий температурный уровень топочной среды и поверхностей обуславливает преобладание радиационного теплообмена. Решение уравнения переноса лучистой энергии базируется на P1 приближения метода сферических гармоник.

В настоящей работе для описания процессов движения угольной пыли используется метод Лагранжа. При моделировании движения частиц основными силами, воздействующими на частицу, являются сила межфазного взаимодействия (сила аэродинамического сопротивления) и сила тяжести. Учет турбулентности потока на движение частицы производится введением случайных флуктуаций скорости газа в уравнение движения частиц.

Для расчета температуры частицы с учетом конвективного и радиационного теплообмена частицы с окружающим газом использовали математическую модель с рядом эмпирических выражений, которые дали возможность скорректировать теплообмен с учетом массообменных процессов, происходящих при прогреве и горении угольной частицы [7]. Для расчета выхода летучих из частицы угля выбрана одностадийная, Однокомпонентная диффузионно-кинетическая модель. Для расчета горения коксового остатка была выбрана диффузионно-кинетическая модель.

В модели учитывается влияние частиц на осредненное движение газа, изменение концентрации газовых компонент и энтальпию.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рисунке 2 показана геометрическая модель и расчетная сетка для конструкций горелочных устройств, представленных на рисунке 1. Для построения использовались структурированные гексаэдральные неортогональные криволинейные сетки.

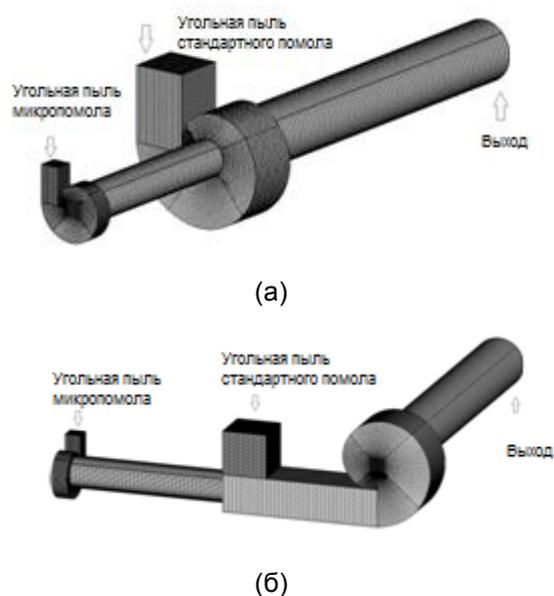


Рисунок 2

На рисунке 3 представлено поле температур в центральном сечении первой части горелочного устройства. Так как данный элемент одинаков для обоих вариантов конструкций, поля температур одинаковы, также как и для других величин. Как можно видеть из результатов расчета, наблюдается достаточно быстрый рост температур, что обусловлено высокой реакционной способностью угля микропорола. Температура на выходе из первой ступени составляла около 1500 °С. На рисунке 4 изображена концентрация угольных частиц в центральном сечении. Наличие улиточного входа приводит к движению основной массы угольной пыли по спирали вдоль стенки камеры.

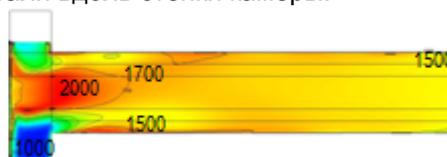


Рисунок 3 – Поле температур в центральном сечении для первой части горелочного устройства, °С

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ 2-Х СТУПЕНЧАТОГО БЕЗМАЗУТНОГО ГОРЕЛОЧНОГО УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ УГЛЯ МИКРОПОМОЛА

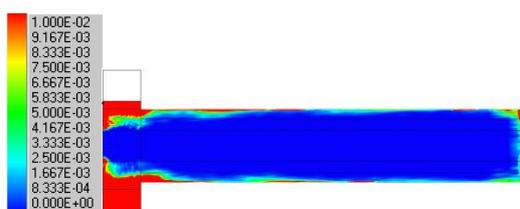


Рисунок 4 – Концентрация частиц в центральном сечении для первой части горелочного устройства, кг/м^3

На рисунке 5 показано сравнение распределения температур для двух вариантов в центральном сечении камеры для второй части горелочного устройства. Можно отметить, что для первого варианта на выходе из улитки факел имеет более симметричную структуру. При этом средние значения температуры по длине камеры более высокие для второго варианта, что происходит вследствие более ранней подачи угольной пыли для второго варианта и смешение двух пылевоздушных потоков уже в коробе. Более раннее смешение также приводит к более равномерному распределению температур и быстрому выравниванию значений температур далее по сечению. Это обусловлено также и более быстрым выгоранием концентраций частиц для второго варианта (рисунок 6). При этом угольные частицы более равномерно заполняют улитку второй ступени горелки для второго варианта (рисунок 6б), чем для первого (рисунок 6а) и в дальнейшем по длине канала концентрация частиц более равномерная. Концентрация кислорода для второго варианта распределена более равномерно и имеет меньшее значение по длине второй ступени, чем для первой (рисунок 7а, б).

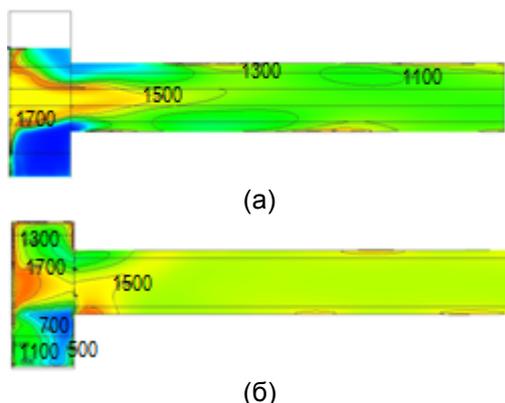
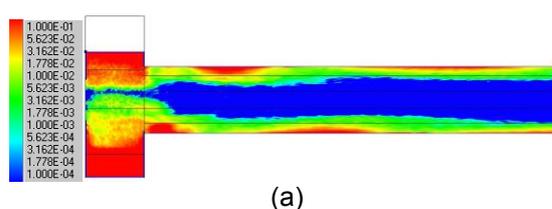
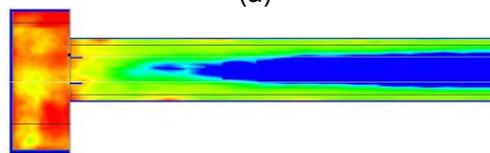


Рисунок 5 – Распределение температур в центральном сечении второй части горелочного устройства, (а) первый вариант горелочного устройства, (б) второй вариант горелочного устройства, $^{\circ}\text{C}$

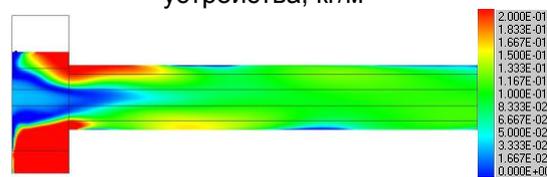


(а)

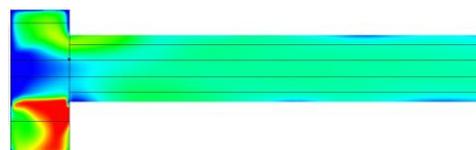


(б)

Рисунок 6 – Распределение концентрации частиц в центральном сечении горелочного устройства, (а) первый вариант горелочного устройства, (б) второй вариант горелочного устройства, кг/м^3



(а)



(б)

Рисунок 7 – Распределение концентрации кислорода в центральном сечении для второй части горелочного устройства, (а) первый вариант горелочного устройства, (б) второй вариант горелочного устройства (кг/кг)

На рисунке 8 представлено распределение интегральной температуры по длине второй ступени для двух вариантов. В первом случае температуры растут на протяжении всей ступени, что свидетельствует о постепенном выгорании угольной пыли. Для второго варианта, уже после второй половины, температура выходит на постоянное значение. Значение температуры на выходе из второй ступени для первого варианта составляет 1260°C , для второго варианта 1450°C . Концентрация кислорода на выходе из горелки для первого варианта составляет 9 %, для второго 5 %, (рисунок 9). Несмотря на более лучшее выгорание топлива и более высокие температуры газа на выходе из второй ступени для второго варианта, конструкция является более сложной и металлоемкой по сравнению с первым вариантом. При этом стоит отметить, первый вариант обеспечивает дос-

таточные условия для эффективного выгорания основной массы угольного топлива в топке огневого стенда, при этом обладая более простой и надежной конструкцией.

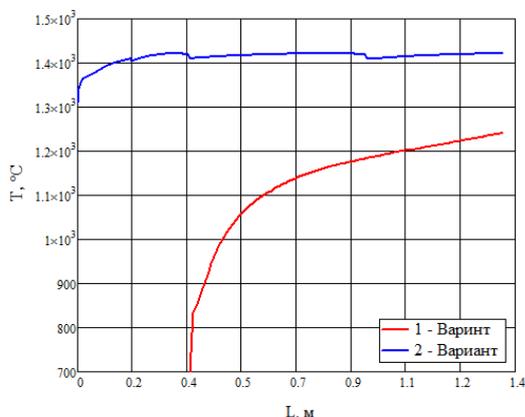


Рисунок 8 – Средняя по сечению температура вдоль горелки, для двух вариантов геометрий горелочного устройства (°C)

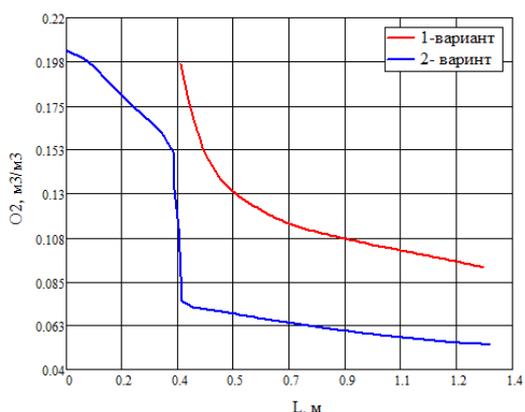


Рисунок 9 – Средняя по сечению концентрация O_2 вдоль горелки, для двух вариантов геометрий горелочного устройства (m^3/m^3)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием пакета программ SigmaFlow проведены расчетные исследования двух вариантов горелочных устройств огневого стенда мощностью 1 МВт для ступенчатого сжигания угля с использованием в первой ступени углей микропомола. Сравнение результатов расчета двух вариантов горелочных устройств показало, что конструкция, в которой смешение высокотемпературного потока первой ступени с пылеугольным потоком второй ступени происходит в дополнительном коробе, обеспечивает более полное и быстрое выгорание основной массы угля. Но как показывают результаты расчета, первый вариант также обеспечивает достаточные условия для эф-

фективного выгорания основной массы угольного топлива с необходимыми температурами на выходе, при этом обладая более простой и надежной конструкцией.

«Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по Соглашению о субсидии № 14.613.21.0005 (уникальный идентификатор проекта RFMEFI61314X0005)».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурдуков, А. П. Разработка технологии использования механоактивированных углей микропомола для розжига и подсветки угольных котлов действующих ТЭС / А. П. Бурдуков, В. И. Попов, Г. В. Чернова, М. Ю. Чернецкий и др. // Теплоэнергетика. – 2013. – № 12. – С. 40–46.
2. Бурдуков, А. П. Использование мелкодисперсного лигноцеллюлозного сырья в качестве твердого топлива / А. П. Бурдуков, В. А. Попов М. Ю., Чернецкий, А. А. Дектерев, О. И. Ломовский, А. Л. Бычков // Ползуновский вестник. – 2013. – № 3/2. – С. 16–27.
3. Burdukov, P. A. Autothermal combustion of mechanically-activated micronized coal in a 5 MW pilot-scale combustor/ P. A. Burdukov, V. I. Popov, M. Yu. Chernetskiy, A. Dekterev and K. Hanjalić // Fuel. – Vol. 122 – P. 103–111.
4. Siegel, R. Thermal Radiation Heat Transfer/ R. Siegel, J. R. Howell // New York : Hemisphere, 1992.
5. Чернецкий, М. Ю. Математическая модель процессов теплообмена и горения пылеугольного топлива при факельном сжигании / М. Ю. Чернецкий, А. А. Дектерев // Физика горения и взрыва. – 2011. – № 3. – С. 37–46.
6. Бурдуков, А. П. Исследование оптимальной конструкции горелочного устройства для обеспечения устойчивости аэродинамической структуры потока в горелке и интенсификации процессов смешения в зоне горения / А. П. Бурдуков, М. Ю. Чернецкий, А. А. Дектерев, Н. С. Чернецкая // Ползуновский вестник. – 2012. – № 3–1. – С. 55–61.
7. Майданик, М. Н. Математическое моделирование топки и поворотного газохода котла П-50Р при совместном сжигании твердого и газообразного топлива / М. Н. Майданик, Э. Х. Вербовецкий, А. А. Дектерев, М. Ю. Чернецкий, А. А. Гаврилов, Д. В. Бойков, С. В. Бердин // Теплоэнергетика. – 2011. – № 6. – С. 37–42.
8. Саломатов, В. В. Экспериментальное и численное исследование аэродинамических характеристик закрученных потоков в модели вихревой топки парогенератора / В. В. Саломатов, Д. В. Красинский, Ю. А. Аникин, И. С. Ануфриев, О. В. Шарыпов, Х. Энхжаргал // Инженерно-физический журнал. – 2012. – Т. 85, № 2. – С. 266–276.
9. Чернецкий, М. Ю., Математическая модель процессов теплообмена и горения пылеугольного топлива при факельном сжигании / М. Ю. Чернецкий, А. А. Дектерев // Физика горения и взрыва. – 2011. – № 3. – С. 37–46.

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ 2-Х СТУПЕНЧАТОГО БЕЗМАЗУТНОГО ГОРЕЛОЧНОГО
УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ УГЛЯ МИКРОПОМОЛА

Бурдуков А.П. – д.т.н., проф., главный научный сотрудник, ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1, тел. (8391) 2494726, e-mail: dekterev@mail.ru.

Магдеева О.Л. – студент, Институт инженерной физики и радиоэлектроники ФГАОУ ВПО «Сибирский Федеральный университет», 660074, Красноярск, ул. Киренского, 26, тел. (8391) 2494726, e-mail: olga.magdeeva@mail.ru.

Кузнецов В.А. – аспирант, ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателад-

зе Сибирского отделения РАН, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1, тел. (8391) 2494726 e-mail: victor_partner@mail.ru.

Чернецкий М.Ю. – к.т.н., научный сотрудник, ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1, тел. (8391) 2494726; Институт инженерной физики и радиоэлектроники ФГАОУ ВПО «Сибирский Федеральный университет», 660074, Красноярск, ул. Киренского, 26, тел. (8391) 2494726, e-mail: Micch@yandex.ru.