

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

В работе рассматривается горелочное устройство, для использования в технологии безмазутного розжига котла на основе механоактивированного угля микропомола. Выполнены исследования по выбору конструкции горелочного устройства применительно к котлу ПК-40 паропроизводительностью 320 т/час. С использованием математического моделирования обоснована конструкция 2-х ступенчатой горелки, обеспечивающая высокий уровень температур пылевоздушной смеси на выходе из второй ступени горелки.

Ключевые слова: уголь, горелка, механоактивация, микропомол, моделирование.

Введение

Основными элементами технологии безмазутного розжига и стабилизации горения пылеугольного факела на основе использования механоактивированных углей микропомола являются **мельница-активатор** и горелочное устройство. Первый элемент – мельница-активатор, разработан по заказу ИТ СО РАН Новосибирской фирмой «Продсельмаш» на производительность по углю до 1,5 т/час. Вариант такой мельницы был испытан с отработкой режима измельчения углей до размеров $d_{rp} \approx 42 \text{ мкм}$.

При разработке конструкции второго основного элемента – горелки был выполнен достаточно большой объем исследовательских работ, позволивший найти оптимальное конструкторское решение по выбору схемы организации процесса розжига с минимизацией количества растопочных устройств в топке котла и затрат на производство механоактивированного угля, используемого в технологии безмазутного розжига. Основные данные по мельнице и горелочному устройству позволяют разработать рабочий проект по безмазутному розжигу на основе использования механоактивированного угля микропомола.

Изготовление рабочей конструкторской документации на горелочное устройство может быть выполнено по полученным нами данным специализированной проектной организацией имеющей соответствующий сертификат.

Основные технические требования и решения

На огневом стенде ИТ СО РАН тепловой мощностью 5 МВт было выполнено исследование по воспламенению и горению пылевзвеси углей пропущенных через дезинтегратор-активатор. В результате было установлено, что в муфельном предтопке происходит устойчивое воспламенение и горение пылевзвеси, при этом при избытке первичного воздуха $\alpha = 0.2 \div 0.35$ на участке муфеля длиной до 500 мм. образуется высокотемпературная зона.

В начальный момент времени процесс воспламенения пылевзвеси осуществляется с использованием газовой горелки (ЗЗУ). Через достаточно короткое время ~ 1 мин. газовая горелка выключается и горение пылевзвеси происходит в автотермическом режиме.

Наиболее простое на первый взгляд решение по созданию безмазутного розжига на котле ПК-40 – замещение всего тепла, идущего на розжиг котла теплом от горения угля микропомола. Однако при этом необходимо использовать достаточно мощные дезинтеграторы производительностью 6-7 т/час при 2-х растопочных горелках и 3-3,5 т/час угля при 4-х горелках.

На наш взгляд целесообразнее использовать систему, подобную той, что реализуется в плазменных технологиях розжига пылеугольных котлов – двухступенчатая горелка с подачей части пылевзвеси в первую ступень где происходит термоподготовка угольной пыли плазменной струей, с последующим

смешиванием горячей пылевзвеси с основной частью пылегазового потока во 2-й ступени горелки.

В нашем случае в 1-ю ступень горелки (рисунок 1) подается 1-1,2 тонны пыли ультратонкого помола после **мельницы-дезинтегратора**.

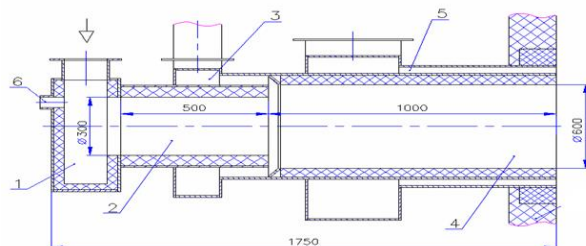


Рисунок 1 – двухступенчатая угольная горелка

Первая ступень горелки – футерованная улитка (1), на выходе которой расположен цилиндрический канал (2). В улитке предусмотрено отверстие (6), в которое помещается воспламеняющее устройство – газовая горелка (ЗЗУ), мазутная горелка или мало-мощный плазмотрон (мощностью 5-10кВт). Основная задача 1-ой ступени – термохимическая подготовка, воспламенение и устойчивое горение пылевзвеси угля микропомола с целью воспламенения пыли подаваемой из бункера пыли после ШБМ через улитку (3) во 2-ю ступень горелки (4). Вторичный воздух 1-й ступени может также подаваться через улитку (3).

Вторичный воздух второй ступени горелки подается в топочную камеру через коаксиальный канал (5) со встроенным лопаточным завихрителем.

После прогрева котла подача микроугля в 1-ю ступень горелки прекращается и розжиговая горелка работает на пыли после ШБМ, подаваемой через улитку (3).

Возможна реализация нескольких различных схем розжига котла ПК-40 с использованием углей микропомола.

1. Замещение всего используемого при розжиге мазута эквивалентным по теплу количеством угля микропомола. Это казалось бы, наиболее простая схема потребует создания больших по производительности мельниц-дезинтеграторов - производительностью до 7 т/час с соответствующими расходами электроэнергии. При меньших производительностях необходимо создание до 4-х растопочных горелок. Эта схема нам представляется громоздкой и неперспективной.

2. Приведенная выше схема (рисунок 1) с использованием в розжиговой горелке только части угля микропомола. Такая схема, как сказано выше, используется в системах безмазутного плазменного розжига котлов. Обычно вторая муфелизированная часть розжиговой горелки (4) имеет большую длину при использовании низкореекционных углей. Для выбора оптимальной, для сжигания, используемого на Беловской ГРЭС угля, длины 2-й ступени нами были выполнены расчеты по двум независимым моделям. Следует отметить, что размеры 1-й ступени нами были определены из экспериментов по сжиганию углей микропомола, где было установлено, что при длине ступени примерно 500мм устанавливается устойчивый фронт горения. Поскольку проведение испытаний при сжигании 4-5 т/час угля в лабораторных условиях затруднено из-за необходимости отведения тепла (порядка 15-20 МВт), размеры 2-й ступени были протестированы расчетным путем.

Были рассмотрены две схемы горелочных устройств – с коаксиальной подачей пыли микропомола через улитку (1) и пыли обычного помола через улитку (3), а также схема, где поток пыли микропомола (1) смешивался на выходе из горелки с пылью обычного помола, подаваемого под углом к потоку микроугля. Здесь фактически отсутствует муфельный участок для крупной пыли и термические условия воспламенения и устойчивого горения факела смеси пыли угля микро – и обычного помола усложнены высокой теплоотдачей факела в объем топки.

Поэтому первоначально был выполнен комплекс расчетов для горелки 1-го типа, т.к. такого типа горелки многократно использовались в системах плазменного розжига на углях различных стадий метаморфизма и в зависимости от химической активности углей выбирались геометрические размеры горелок, в том числе длины муфелизированных частей для угля микропомола и его смеси с углем обычного помола. Основной задачей было нахождение в результате расчетов минимальной общей длины горелки, т.к. расстояние между топочными камерами котла ПК-40 Беловской ГРЭС не позволяло использовать размеры горелочных устройств, превышающие размеры существующих горелок. Для расчетов были использованы две математические модели – трехмерная, реализованная в пакете программ «SigmaFlow» [1], и одномерная, с детальным рассмотрением механизмов химических превращений топлива – «Плазма-уголь» [2]. Рассматривалось

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ ГОРЕЛОЧНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ПОТОКА В ГОРЕЛКЕ И ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ СМЕШЕНИЯ В ЗОНЕ ГОРЕНИЯ

сжигание Кузнецкого угля, данные по углю приведены в таблице 1.

Таблица 1 – состав Кузнецкого угля

W^r	A^r	V^{ida}	C^r	H^r	S^r	N^r	Q_f^r , МДж/кг
20	12,4	42	53	3,8	0,27	1,7	20,5

Математическая модель «SigmaFlow»

В качестве математической модели для описания течения в топочной камере и конвективном газоходе была принята модель неизоэтермического несжимаемого многокомпонентного газа. В рассматриваемой задаче течение газа считается установившимся, поэтому все уравнения записываются в стационарной постановке. Математическая модель включает уравнение неразрывности, уравнения баланса количества движения, уравнение переноса концентрации (массовой доли) i -го компонента, уравнение переноса энергии. В общем виде уравнение переноса для скалярных величин, перечисленных выше, записывается следующим образом:

$$\frac{\partial r f}{\partial t} + \nabla(r \mathbf{v} \cdot f) = \nabla(\Gamma \cdot \nabla f) + Q_f$$

$$f = \{1, u, v, w, h, f_i, k, e\},$$

где ϕ – скалярная величина; Γ – эффективный коэффициент диффузионного переноса; Q_f – источниковый член; ρ – плотность, кг/м³; $\mathbf{v}$ – 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 используется модифицированная высокорейнольдсовая k - ε модель турбулентности. Для определения пульсационных характеристик течения вблизи стенок был использован метод пристеночных функций. Введение пристеночных функций позволяет не детализировать расчетную сетку вблизи стенок.

Высокий температурный уровень топочной среды и поверхностей обуславливает преобладание радиационного теплообмена. Решение уравнения переноса лучистой энергии базируется на P1 аппроксимации метода сферических гармоник. Коэффициенты поглощения газа вычисляются по модели суммы серых газов.

Расчет горения летучих компонент топлива основан на использовании глобальных необратимых реакций между горючим и окислителем. Скорость горения i -реагента, в том числе и летучих, определяется с учетом реакционной способности и концентрации горючего и окислителя, а также скорости турбулентного перемешивания топлива и окислителя. Данная модель представляет комбинацию кинетической модели горения газовых компонент с моделью «обрыва вихря» (eddy break up model) [3].

Моделирование движения угольных частиц проводится в рамках лагранжева подхода. Учет влияния турбулентности потока на движение частицы производится введением случайных флуктуаций скорости газа в уравнение движения. Температура угольной частицы определяется из уравнения сохранения энергии для частицы с учетом конвективного, радиационного теплообмена с окружающим газом. Для описания горения угольной частицы используется модель [4], где горение представляется в виде последовательных стадий: выход влаги, выход летучих и горение коксового остатка. А также используется ряд эмпирических коэффициентов, позволяющих более точно оценить теплообмен и время сгорания угольной частицы.

Для решения уравнений сохранения для газовой фазы используется широко известный метод контрольного объема, суть которого заключается в разбиении расчетной области на контрольные объемы и интегрировании исходных уравнений сохранения по каждому контрольному объему для получения конечно-разностных соотношений. Для вычисления диффузионных потоков на границах контрольного объема используется центрально-разностная схема, имеющая второй порядок точности. При аппроксимации конвективных членов использовалась схема второго порядка точности. Для решения полученной системы уравнений используется метод неполной факторизации, в котором факторизованы только диагональные члены.

Для связи поля давления и скорости в настоящей работе использовалась SIMPLE-подобная процедура на совмещенных сетках. Для устранения осцилляций поля давления, возникающих при использовании совмещенных переменных, используется подход Рхи-Чоу, при котором в уравнение для поправки давления в правую часть вводится монотонизатор [5]. При движении частиц через контрольный объем формируется источниковый

член, через который учитывается обмен импульсом и энергией между газом и дисперсной фазой.

Результаты и их обсуждение

На рисунках 2-7 представлены результаты расчетов для схемы представленной на рисунке 1 с использованием математической модели «SigmaFlow».

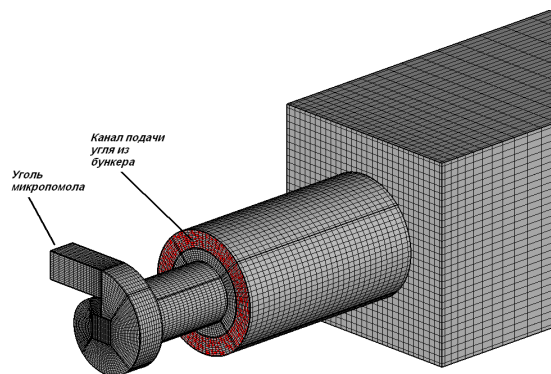


Рисунок 2 – Геометрическая модель и расчетная сетка горелки

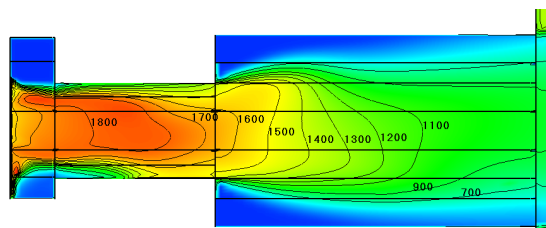


Рисунок 3 – поле температур в центральном сечении, °C

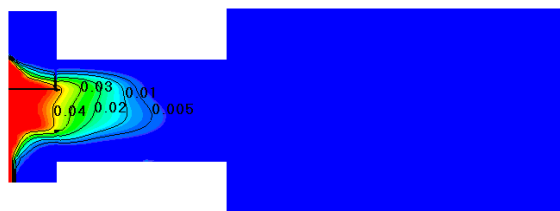


Рисунок 4 – концентрация летучих компонент в центральном сечении, кг/кг

Через тангенциальный вход механоактивированный уголь подается в форкамеру предтопка, где происходит воспламенение угольной пыли. Основная масса первичного окислителя реагирует с летучими компонентами топлива. Вследствие быстрого выхода летучих и их хорошей реакционной способности на выходе из первой ступени концентрация летучих близка к нулю, а концентрация

кислорода составляет около 4% (масс.) (рисунки 4, 6, 7). Максимальные значения температур в первой ступени достигают 1800°C. На выходе из 1-ой ступени формируется высокорреакционная пылевоздушная смесь с температурой 1600°C (рисунки 3, 5), которая взаимодействует с угольной пылью и вторичным воздухом 2-й ступени, подаваемой из бункера пыли после ШБМ через улитку. Анализ результатов расчетов, показывает, что не смотря на формирование высокорреакционной пылевоздушной смеси из первой ступени, геометрия горелочного устройства при предлагаемой длине муфеля 2-й ступени не позволяет получить на выходе 2-й ступени горелки устойчивого фронта пламени при горении смеси угля микропома и пылевзвеси после ШБМ.

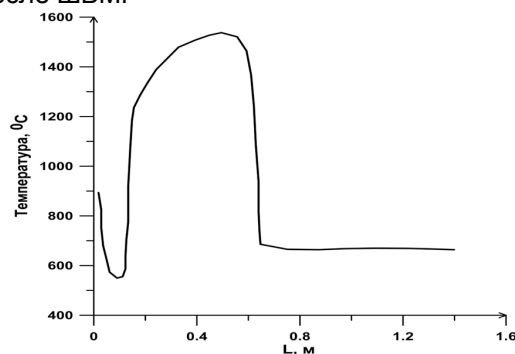


Рисунок 5 – средняя по сечению температура вдоль горелки, °C

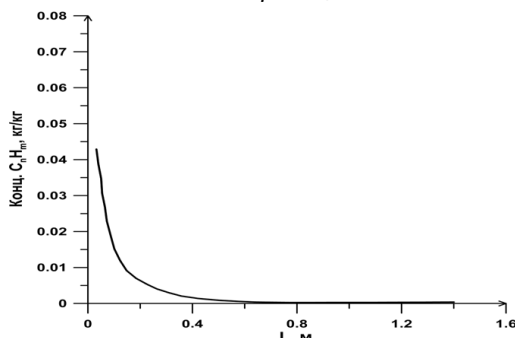


Рисунок 6 – Средняя по сечению концентрация летучих вдоль горелки, кг/кг

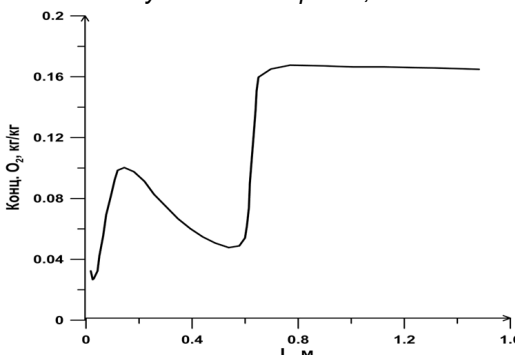


Рисунок 7 – средняя по сечению концентрация O_2 вдоль горелки, кг/кг

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ ГОРЕЛОЧНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ПОТОКА В ГОРЕЛКЕ И ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ СМЕШЕНИЯ В ЗОНЕ ГОРЕНИЯ

Результаты расчетов по одномерной модели «Плазма-уголь» для схемы, представленной на рисунке 1, в предположении идеального смешивания факела микроугля с пылевзвесью от ШБМ показывают существование устойчивого факела на выходе из горелочного устройства с температурой более 900 °С. Это означает, что при хорошем перемешивании 2-х потоков на выходе 2-й ступени возможно существование устойчивого факела.

Исходя из полученных результатов, были рассмотрены 2 варианта изменения первоначальной схемы горелки, обеспечивающие лучшее перемешивание первичного и вторичного потоков. На рисунке 8 приведена первая модифицированная схема, а на рисунке 9 - вторая модифицированная схема горелочного устройства.

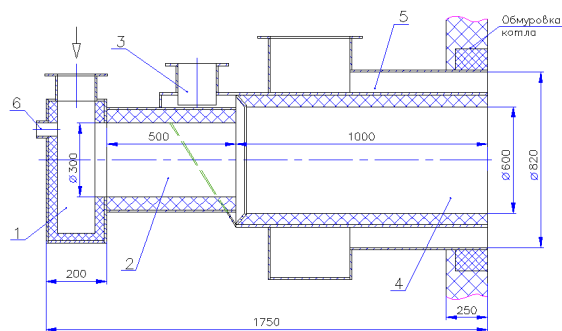


Рисунок 8 – первая модифицированная схема растопочной горелки для котла ПК-40

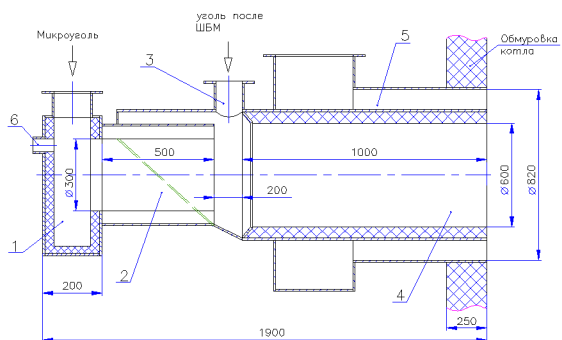


Рисунок 9 – вторая модифицированная схема растопочной горелки для котла ПК-40

На рисунках 10-13 представлены результаты расчетов первой модифицированной схемы горелки (рисунок 8) с использованием математической модели SigmaFlow. На

рисунках 10, 11 показана организация подачи угля из бункера вместе с воздухом. Несмотря на ожидаемое, более интенсивное взаимодействие потока первой ступени с потоком пылеугольной пыли из бункера, результаты расчета показали, что спиральное движение угольных частиц вдоль стенок камеры 2-ой ступени (рисунок 13) не дает ожидаемого результата и на выходе из второй ступени имеем поток с средней температурой 700°С (рисунок 12).

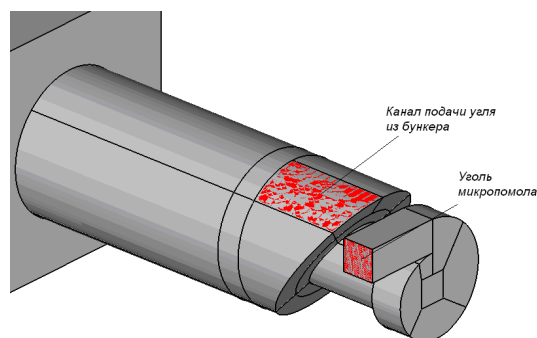


Рисунок 10 – геометрическая модель горелки

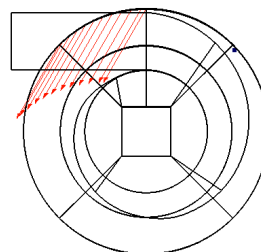


Рисунок 11 - направление потока через канал подачи угля из бункера

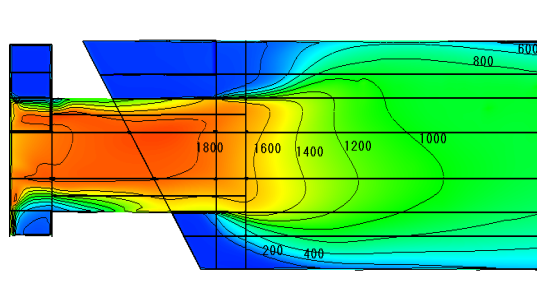


Рисунок 12 – поле температур в центральном сечении, °С

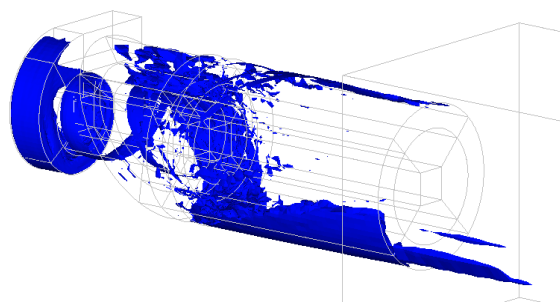


Рисунок 13 – изоповерхность угольных частиц 0.4 кг/кг

На рисунке 14 приведена геометрическая модель горелки, а на рисунке 15 – организация подачи угля из бункера вместе с воздухом.

На рисунках 16 и 17 представлены результаты расчетов второй модифицированной схемы горелки (рисунок 9).

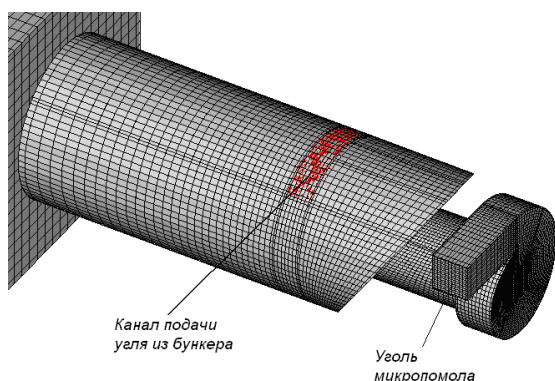


Рисунок 14 – геометрическая модель горелки

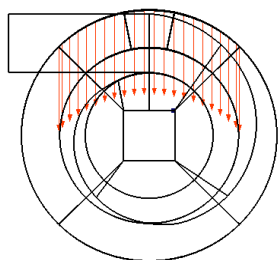


Рисунок 15 – направление потока через канал подачи угля из бункера

Данная организация подачи воздуха и угля приводит к интенсивному взаимодействию высокотемпературной пылевоздушной смеси первой ступени с пылеугольным потоком второй ступени (рисунок 16). Интенсифицируется процесс выхода летучих веществ, происходит их воспламенение и средняя

температура на выходе из второй ступени составляет 1100°C. Поле температур на выходе из 2-й ступени горелки характеризует устойчивое горение факела из смеси угля микромола и пылевзвеси после штатной мельницы (рисунок 17). Это дает возможность считать данный вариант схемы 2-х ступенчатого горелочного устройства оптимальным для различных технологических решений при создании растопочных горелок на угле микромола в широком диапазоне ряда метаморфизма.

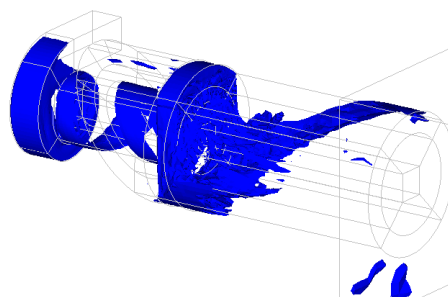


Рисунок 16 – изоповерхность угольных частиц 0.4 кг/кг

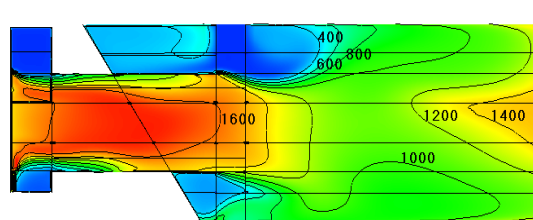


Рисунок 17 – поле температур в центральном сечении, °C

Выводы

1. В результате экспериментов на стенде по сжиганию механоактивированных углей микромола, тепловой мощностью 5 МВт, получены данные для проектирования 1-й ступени горелочного устройства безмазутного розжига для котла ПК-40.

2. На основе анализа результатов расчета воспламенения и горения пылеугольного факела угля микромола и рядовой пылевзвеси после ШБМ с использованием одномерной и пространственной моделей установлена возможность создания 2-х ступенчатой горелки для безмазутного розжига в пределах размеров штатного горелочного устройства.

3. С использованием программного комплекса «SigmaFlow» определена оптимальная геометрия 2-х ступенчатой горелки для котла ПК-40.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ ГОРЕЛОЧНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ПОТОКА В ГОРЕЛКЕ И ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ СМЕШЕНИЯ В ЗОНЕ ГОРЕНИЯ

4. Представленное решение позволяет использовать для котла ПК-40 две растопочные горелки с дезинтеграторами производительностью по топливу до 1.5-2 т/час.

5. Полученные данные могут использоваться для подготовки Технической документации системы безмазутного розжига котла ПК-40.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Дектерев А.А., Гаврилов А.А., Чернецкий М.Ю., Суржикова Н.С. Математическая модель процессов аэродинамики и теплообмена в пылеугольных топочных устройствах // Тепловые процессы в технике.- 2011.- Т. 3, № 3.- С. 140-144.

2 Karpenko E.I., Messerle V.E., Ustimenko A.B. Mathematical model of the processes of ignition, combustion, and gasification of the pulverized coal fuel in the electric arc devices // Thermophysics and Aeromechanics.- 1995.- Vol. 2, No. 2.- P. 151-165.

3 Magnussen, B.F., and Hjertager, B.W., On the structure of turbulence and a generalised eddy dissipation concept for chemical reaction in turbulent flow // 19th AIAA Aerospace Meeting (1981), St. Louis, USA.

4 Чернецкий М.Ю., Дектерев А.А. Математическая модель процессов теплообмена и горения пылеугольного топлива при факельном сжигании // Физика горения и взрыва.- 2011.- № 3.- С. 37-46.

5 Быстров Ю.А., Исаев С.А., Кудрявцев Н.А., Леонтьев А.И. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб.- СПб.: Судостроение, 2005.- 392 с.

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

Бурдуков А.П.¹, д.т.н., проф.,

главный научный сотрудник,

e-mail: dekterev@mail.ru

Чернецкий М.Ю.¹, к.т.н., инженер,

e-mail: Micch@yandex.ru

Дектерев А.А.¹, к.т.н., с.н.с.,

старший научный сотрудник,

e-mail: dekterev@mail.ru

Чернецкая Н.С.², аспирант,

e-mail: n_surzhikova@inbox.ru

¹ ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1, тел. (8391) 2494726

² Политехнический институт ФГАОУ ВПО «Сибирский Федеральный университет», 660074, Красноярск, ул. Киренского, 26, тел. (8391) 2494726.

УДК 535.529: 541.64

ПОСТАНОВКА МЕЗОСКОПИЧЕСКИХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ ДЛЯ СКОРОСТИ ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЯ НА ГРАНИЦЕ

М.А. Макарова, И.Г. Пышнограй, Г.В. Пышнограй, Ю.А. Алтухов, И.Э. Головичёва, Ю.Б. Трегубова, И.В. Третьяков, Г.Л. Афонин, Х.Н.А. Аль Джода

Предложены пути для построения методики моделирования течения сплошной среды в каналах с заданной микрогеометрией неровностей поверхности стенок, включающей мезоскопическое описание граничных условий по скорости и давлению на основе метода расщепления по физическим процессам.

Ключевые слова: мезоскопический подход, численные методы, механика сплошных сред, параллельные вычисления, микрогеометрия, шероховатость.

Описание течения сплошных сред в областях, ограниченных твёрдыми непроницаемыми стенками - течения в каналах и микроканалах, гидродинамической теории смазки и т.д. - требует задания граничных условий для скорости жидкости на границе. Обычно это условия прилипания - задание нулевых касательной и нормальной компонент скорости относительно твёрдой стенки. Для макроскопических масштабов такое приближение во многих случаях вполне удовле-

творительно, но для микроскопических масштабов из-за возможного скольжения жидкости относительно стенки такое приближение иногда должно быть пересмотрено [1]. Существование скольжения жидкости относительно твёрдой стенки установлено во многих экспериментах и процессах [2-7], где необходимо учитывать микромасштабы связанные как с геометрией расчётной области, так и с пространственными масштабами описываемых процессов.