

УДК 662.933.12

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВСЕРЕЖИМНЫХ ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКОЙ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ**

*Дубровский В.А.<sup>1</sup>, Третьяк Н.В.<sup>1</sup>, Чернецкий М.Ю.<sup>1,2</sup>, Чернецкая Н.С.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»

<sup>2</sup> Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе ИТ СО РАН

В настоящее время актуальна проблема замены мазута при растопке и подсветке факела топочных камер котельных агрегатов ТЭС дешевыми углями Канско-Ачинского бассейна, стоимость которых более чем на порядок ниже стоимости жидкого топлива – мазута.

На кафедре «Тепловые электрические станции» Политехнического института Сибирского федерального университета сотрудниками лаборатории «Термическая подготовка углей» усовершенствована технология сжигания канско-ачинских углей (КАУ) с использованием универсальных горелочных устройств, полностью исключающих сжигание жидкого топлива. Такие горелочные устройства могут быть использованы как в режиме растопки и подсветке факела топочных камер котлов, так и в качестве основных горелок. Разработанная технология сжигания КАУ принципиально отличается от системы электрорастопки, испытанной на ТЭЦ-1 г. Красноярска [1].

В настоящей работе представлены результаты численного исследования аэродинамики с целью уточнения конструкции горелочного устройства, и процесса термической подготовки потока угольной пыли высокой концентрации (ПВК) в муфельной части горелочного устройства для установления диапазона значений коэффициента избытка воздуха, когда обеспечивается глубокая термическая подготовка топлива и его устойчивое воспламенение.

Всережимное горелочное устройство, эскиз которого представлен на рис. 1, предназначено для сжигания высокорреакционных углей с предварительной термической подготовкой потока угольной пыли высокой концентрации (ПВК) в его муфельной части [2].

Горелочное устройство состоит из муфельной части горелки 1 диаметром 600 мм и короба подачи вторичного воздуха 2. Подача угольной пыли осуществляется по пылепроводу 3 диаметром 89×3 мм, который входит в муфельную часть по оси горелки. Регулирование расхода ПВК осуществляется пылепитателем, оборудованном двигателем с частотным приводом. Число оборотов лопастного питателя пыли (ППЛ-5) изменяется от 150 до 1500 об/мин, что соответствует расходам пыли от 0,139 до 1,39 кг/с. Первичный воздух подается тангенциально через воздухопроводы 4 диаметром 89×3 мм, расположенные на торцевой стенке горелочного устройства. По трубопроводу 5 диаметром 219×5 мм соосно пылепроводу 3 поступает воздух от короба вторичного воздуха 2. Для регулирования расхода первичного воздуха предусмотрена установка запорно-регулирующей аппаратуры, что позволяет варьировать значение коэффициента избытка воздуха, изменяя глубину газификации потока угольной пыли.

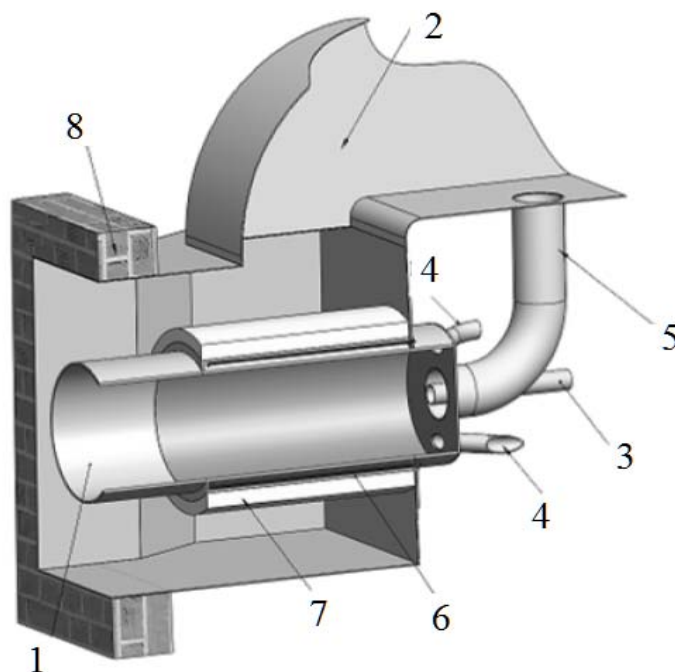


Рис. 1 - Эскиз всережимного горелочного устройства. 1- муфельная часть горелки; 2 – короб подвода вторичного воздуха; 3 – устройство подвода пыли высокой концентрации (ПВК); 4 – тангенциальный патрубок подачи первичного воздуха; 5 – патрубок осевой подачи первичного воздуха; 6 – система нагрева; 7 – тепловая изоляция; 8 – амбразура котла.

В начальный период работы горелки разогрев стенки муфельной части производится системой электронагрева 6 до температур 600 – 700°C. За счет излучения от стенок муфеля частично происходит прогрев потока пыли высокой концентрации и выход летучих веществ из угля при коэффициенте избытка воздуха значительно меньших единицы с образованием смеси горючих газов и коксовых частиц.

Температура в пространстве муфеля должна поддерживаться в пределах 800 – 1000°C, чтобы обеспечить устойчивое воспламенение пылегазового потока на выходе из горелочного устройства при смешении со вторичным воздухом и предотвратить шлакование муфельной части.

Для описания гидродинамики, теплообмена и горения угольной пыли использовалась математическая модель, реализованная в пакете программ SigmaFlow и SigmaFlame [3].

В качестве математической модели для описания течения в муфельной части горелочного устройства была принята модель неизотермического 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:

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

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

где  $\varphi$  – скалярная величина;  $\Gamma$  – эффективный коэффициент диффузионного переноса;  $Q_\phi$  – источниковый член;  $\rho$  – плотность потока,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\mathbf{v}$  – вектор скорости,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $u, v, w$  – компоненты скорости,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $h$  – удельная энтальпия,  $\text{Дж}/\text{кг}$ ;  $k$  – кинетическая энергия турбулентных пульсаций,  $\text{м}^2/\text{с}^2$ ;  $\varepsilon$  – диссипация турбулентной энергии,  $\text{м}^2/\text{с}^3$ ;  $f_i$  – массовая концентрация,  $\text{кг}/\text{кг}$ .

Как показывает практика расчетов процесса горения в топочной камере, применение  $k$ - $\varepsilon$  модели турбулентности позволяет с достаточной степенью точности получить необходимые турбулентные характеристики для потока. В данной работе используется модифицированная высокорейнольдсовая  $k$ - $\varepsilon$  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 веществ, 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).

Моделирование движения 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 и 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 горения 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 гранях контрольного объема используется центрально-разностная схема, имеющая второй порядок точности. При аппроксимации конвективных членов использовалась схема второго порядка точности. Для решения полученной системы уравнений применен метод неполной факторизации, в котором факторизованы только диагональные члены.

Для осуществления связи поля давления и скорости среды в настоящей работе использовалась SIMPLE-подобная процедура на совмещенных сетках [5]. Устранение осцилляций поля давления, возникающих при использовании совмещенных переменных осуществляется путем использования подхода 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 [6].

### Результаты

Проведенные численные исследования изотермической задачи движения угольной пыли в объеме муфеля горелки показали, что отсутствие сепарации угольных частиц на стенки муфеля обеспечивается подачей первичного воздуха в тангенциальные патрубки.

Получена и оценена масса сепарирующихся частиц угольной пыли в единицу времени на поверхности муфельной части горелки от угла расположения тангенциального патрубка подачи первичного воздуха. Рассматривалось изменение угла от  $10^\circ$  до  $90^\circ$  с шагом  $10^\circ$ . Полученные данные представлены на рисунке 2.

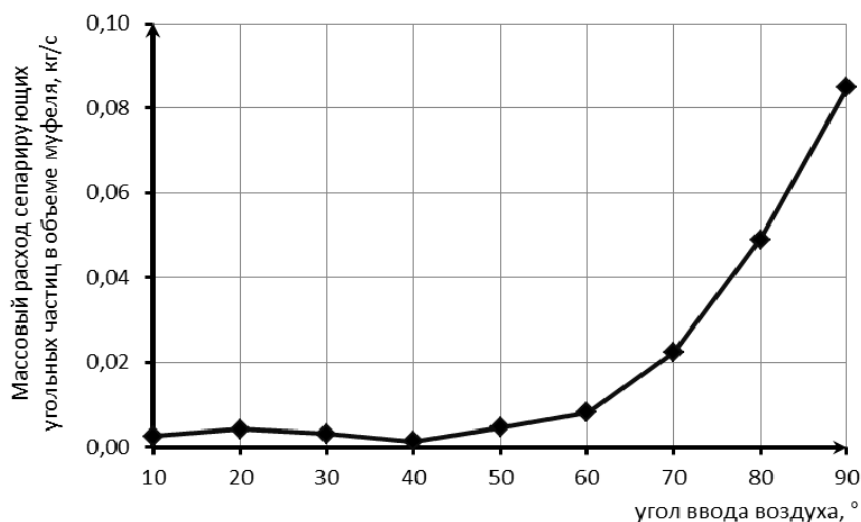


Рис. 2 – Зависимость массового расхода сепарирующихся угольных частиц в объеме муфеля от угла расположения тангенциального патрубка подачи первичного воздуха.

Увеличение угла ввода патрубка тангенциальной подачи воздуха более  $50^\circ$  приводит к резкому увеличению массы сепарирующихся частиц угля в муфеле. При значениях ниже  $50^\circ$  наблюдается незначительное количество сепарирующихся угольных частиц, масса их составляет в среднем 3 – 5% от общего количества, поступающего в горелку топлива. Но в тоже время уменьшение угла ввода патрубка менее  $40^\circ$  приводит к возникновению циркуляционных зон в горелочном устройстве и нестабильности пылевоздушного потока. Это приводит к неравномерному распределению угольных частиц на выходе из муфельной части горелки, и как следствие, к неустойчивому воспламенению в объеме топочной камеры котла.

Таким образом, наилучший угол ввода патрубка тангенциальной подачи первичного воздуха для исследуемого горелочного устройства находится в пределах  $40^{\circ}$ – $50^{\circ}$ .

По результатам численного расчета аэродинамики установлено, что минимальные значения расхода первичного воздуха составляют  $300$ – $1000$  м<sup>3</sup>/час в патрубках осевой подачи, и не менее  $300$  м<sup>3</sup>/час в тангенциальные вводы.

Были проведены расчетные исследования по установлению режимов термической подготовки угольной пыли для расходов угольной пыли от  $0,139$  кг/с до  $1,39$  кг/с (от  $150$  до  $1500$  об/мин ППЛ-5).

По полученным результатам определена зависимость коэффициента избытка воздуха от нагрузки пылепитателя, обеспечивающая режим газификации потока угольной пыли (рис.3, кривая 1). Анализ полученных результатов расчета показал, что при значениях коэффициента избытка воздуха выше кривой 1 не наблюдается необходимый прогрев угольной пыли. Это происходит ввиду смещения зоны начала выделения летучих веществ к выходному срезу муфельной части горелки. Кроме того, определены минимально допустимые значения коэффициента избытка воздуха, ниже которых наблюдается процесс сепарации угольных частиц на стенки муфеля (рис. 3, кривая 2).

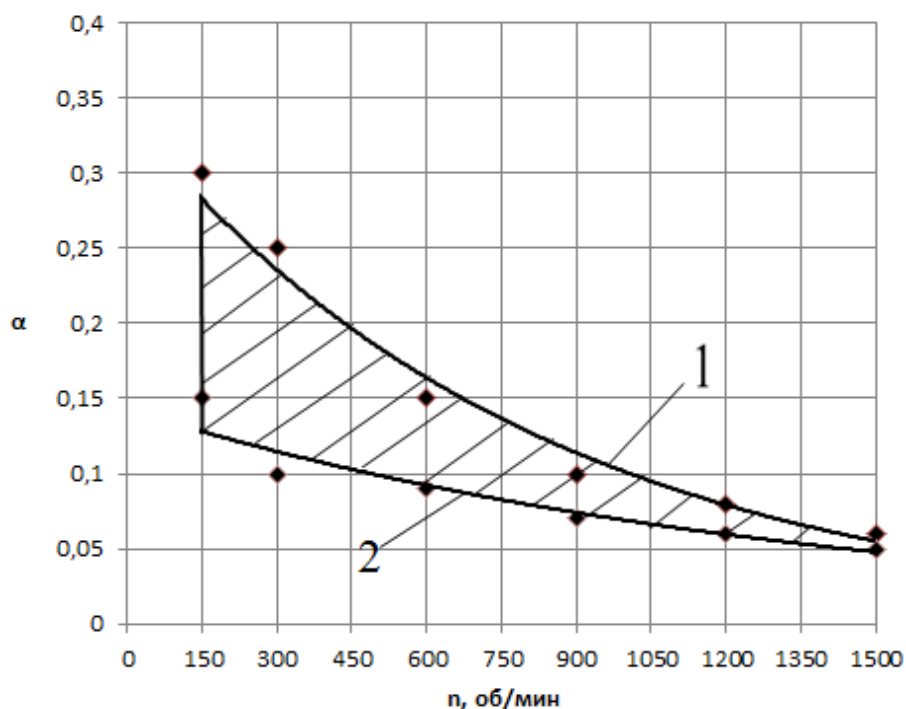


Рис. 3 – Диапазон значений коэффициента избытка воздуха в муфельной части горелочного устройства от нагрузки пылепитателя для обеспечения устойчивого процесса тепоподготовки ПВК

Таким образом, область между кривой 1 и 2 (рис. 3) определяет диапазон режима работы горелочного устройства с предварительной термической подготовкой топлива, обеспечивающий необходимые условия на выходе из муфеля горелки для устойчивого воспламенения и горения угольной пыли в объеме топочной камеры котла.

В качестве примера на рисунках 4-6 представлены результаты расчета процесса термической подготовки угольной пыли в муфельной части горелочного устройства при 300 об/мин пылепитателя (0,278 кг/с) и коэффициенте избытка воздуха 0,25. По результатам расчета, установлено, что на начальном участке муфельной части горелки возникает обратное течение газов (рис. 4) с небольшой частью мелкой фракции угольной пыли, за счет чего время пребывания в объеме муфеля данных частиц увеличивается и происходит их воспламенение. Это приводит к образованию области с высокой температурой и происходит прогрев основной массы пылеугольного потока.

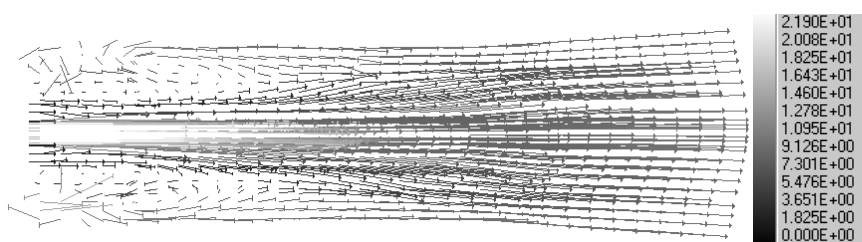


Рис. 4 – Векторное поле скорости (вертикальное сечение по оси муфельной части горелочного устройства)

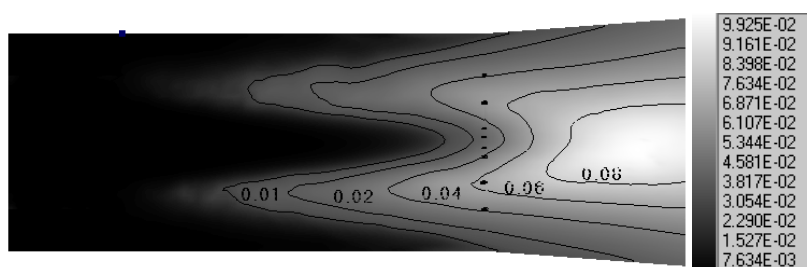


Рис. 5 – Концентрация летучих веществ, кг/кг (вертикальное сечение по оси муфельной части горелочного устройства)

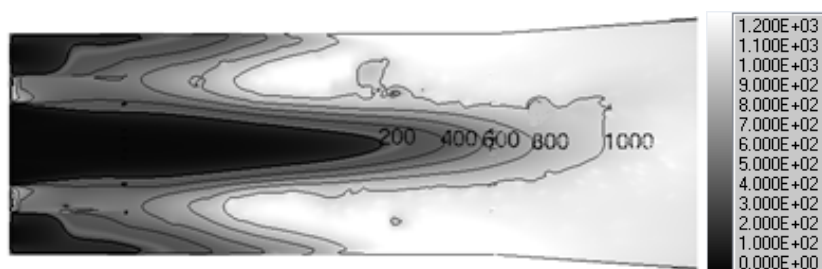


Рис. 6 – Распределение температуры пылегазового потока, °С; (вертикальное сечение по оси муфельной части горелочного устройства)

Выход летучих веществ начинается на расстоянии 0,7 – 0,8 м от устья горелки (рис.5). Наличие кислорода приводит к частичному выгоранию выделившихся летучих веществ и конверсии углерода. Температура в объеме муфеля достигает 900 – 1000° С (рис.6).

В результате на выходе из горелочного устройства формируется высокотемпературный химически активный двухкомпонентный поток продуктов термической подготовки угля (таблица 1).

Анализ результатов численного исследования показал, что на выходе из горелочного устройства формируется высокотемпературный химически активный двухкомпонентный поток продуктов термической подготовки угля (таблица 1).

При изготовлении *опытно-промышленного* образца всережимного горелочного устройства были учтены результаты трехмерного аэродинамического моделирования. Горелочное устройство установлено на котле БКЗ-420 ст. №9Б Красноярской ГРЭС -2 .

Таблица 1 – Концентрация газов на выходе из муфельной части горелочного устройства, объемные %

Нагрузка ППЛ-5 об/мин.	Расход топлива (т/ч)	Коэф. избытка воздуха	Расход воздуха м3/час	CO	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
150	0,5	0,3	650	6,9	6,3	11,7	16,1	0,0	55,5
300	1	0,25	1050	7,4	7	10,5	19	0,0	54,3
600	2	0,15	1300	5,5	10,1	11,1	23,1	0,3	49,2
900	3	0,1	1300	3,4	13,1	11,2	27,5	0,4	43,1
1200	4	0,08	1300	2,4	16,5	12,4	28,1	0,5	39,8
1500	5	0,06	1300	1,7	18,5	12,6	29,1	0,6	37,3

### Заключение

В результате трехмерного моделирования аэродинамики всережимного горелочного устройства установлено, что при подаче первичного воздуха под углом 40-50° обеспечивается наиболее эффективная закрутка пылеугольного потока.

На основании численных исследований процесса термической подготовки топлива определен диапазон значений коэффициента избытка воздуха от расхода угольной пыли высокой концентрации, когда обеспечивается необходимая глубина термической подготовки потока угольной пыли в муфельной части горелочного устройства.

Хорошим подтверждением численного моделирования послужили пусконаладочные испытания всережимного горелочного устройства на котле БКЗ-420 Красноярской ГРЭС-2, в результате которых удалось исключить сепарацию угольной пыли на стенки муфельной части горелки, получить устойчивый факел на выходе из горелочного устройства и обеспечить разогрев объема топочной камеры и пуск котла без применения жидкого топлива—мазута.

## Литература

1. А. с. 1210001 СССР, МКИ с. Пылеугольная горелка /Н. А. Сеулин, Л. Г. Осокин, В. К. Шнайдер, Федченко М.П. (СССР ). - № 3635118/24-06; заявл.18.08.83; опубл. 07.02.86, Бюл. № 5.
2. Пат. 114356 Российская Федерация, МПК F 23 D 1/02. Горелочное устройство/ В.А. Дубровский, Ж.Л. Евтихов, М.Ю. Потылицын, Н.В. Третьяк; опубл. 20.03.2012, Бюл. №8. – 2с.
3. Дектерев, А.А. Математическая модель процессов аэродинамики и теплообмена в пылеугольных топочных устройствах / А.А. Дектерев, А.А. Гаврилов, М.Ю. Чернецкий, Н.С. Суржикова // Тепловые процессы в технике. – 2011. – Т.3. – №3. – С.140-144.
4. 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.
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
6. Crow, C.T. The Particle-Source-In Cell (PSI-CELL) Model for gas droplet flows / Crow C.T., Sharma M.P., Stock D.E. // Journal of Fluids Engineering. P. 325–332.