

УДК 662.933.12

**ТРЕХМЕРНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ АЭРОДИНАМИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ГОРЕЛКИ****THREE-DIMENSIONAL MATHEMATICAL MODELING AERODYNAMICS OF THE  
BURNER**

©Дубровский В. А.

*д-р техн. наук, Сибирский федеральный университет  
г. Красноярск, Россия, vitdubrov@mail.ru*

©Dubrovskiy V.

*Dr. habil., Siberian Federal University  
Krasnoyarsk, Russia, vitdubrov@mail.ru*

©Потылицын М. Ю.

*ООО «Экоэнергия»  
г. Красноярск, Россия, mihailpot@yandex.ru*

©Potylitsyn M.

*“EcoEnergy”, Krasnoyarsk, Russia, mihailpot@yandex.ru*

©Седельников Н. В.

*Сибирский федеральный университет  
г. Красноярск, Россия, hokli94@mail.ru*

©Sedelnikov N.

*Siberian Federal University  
Krasnoyarsk, Russia, hokli94@mail.ru*

*Аннотация.* В статье приведено описание универсальной экологической энергосберегающей горелки. Горелка позволяет жечь различные типы угля и лигнита без использования нефтяного топлива для воспламенения бойлера. Приведена эффективность введения горелки для сгорания угля на современных теплоэлектростанциях.

Современные методы подготовки и сгорания угля на теплоэлектростанциях не полностью удовлетворяют текущие требования надежности, экологической безопасности и экономической эффективности бойлеров.

Этот факт повышает потребность развивать использование энергии высокой технологии угля, нацеленного на всестороннее решение проблем горящих углей на современной теплоэлектростанции, а именно, исключение использования дорогого нефтяного топлива, нефтяного топлива, уменьшая сокращение окисей азота шлакоотделения нагреваемых поверхностей бойлера.

Работа имеет дело с аэродинамикой универсального энергосберегающего устройства горелки, установленного на котле БКЗ-420 ст. №9Б Красноярской ГРЭС-2. Применение методов трехмерного математического моделирования позволяет повысить эффективность горелки.

*Abstract.* Universal ecological energy-efficient burner was described. The burner allows burning different types of coal and lignite without the use of fuel oil for kindling the boiler. Efficiency assessment tools of the introduction of the burner for combustion of coal in modern thermal power plants were given.

Modern methods of preparation and combustion of coal in thermal power plants don't completely meet the current requirements of reliability, environmental safety and economic efficiency of the boilers.

This fact raises the need to develop high-technology energy use of coal, aimed at a comprehensive solution to the problems of burning coals in a modern thermal power plant, namely the exclusion of the use of expensive fuel oil, reducing the nitrogen oxides reduction in slagging of heating surfaces of the boiler.

The work deals with the aerodynamics of the universal energy-efficient burner device installed on the boiler BKZ-420-140 Krasnoyarsk RHPP-2. Applying the methods of three-dimensional mathematical modeling, studied coal particle separation process of various sizes in a muffle of the universal burner device and allowed the development of technical proposals to improve the efficiency of the burner.

*Ключевые слова:* универсальное экологическое энергосберегающее устройство горелки, газификация угольной пыли, разжигающей без использования горючего.

*Keywords:* universal ecological energy-efficient burner device, gasification of coal dust, kindling without the use of fuel oil.

Расширение потребления угольного топлива в нашей стране, прежде всего, обусловлено освоением углей Канско-Ачинского бассейна. Многолетний опыт использования канско-ачинских углей (КАУ) на тепловых электростанциях показал, что традиционные способы их подготовки и сжигания не в полной мере соответствуют современным требованиям обеспечения надежности, эколого-экономической эффективности. Решение проблемы повышения эффективности энергетического использования углей Канско-Ачинского бассейна осуществляется на основе научнообоснованной технологии сжигания с предварительной термической подготовкой углей [1].

В лаборатории «Эколого-энергоэффективное сжигание углей» разработана технология термической подготовки КАУ в универсальном горелочном устройстве, которое может использоваться как в режиме растопки, так и в качестве основных горелок без применения дорогостоящего жидкого топлива-мазута [2, с. 3].

В настоящее время на котле БКЗ-420 ст. №9Б Красноярской ГРЭС-2 проведены опытно-промышленные испытания универсального энергоэффективного горелочного устройства.

На Рисунке 1 представлен эскиз универсального энергоэффективного горелочного устройства.

Универсальное энергоэффективное горелочное устройство состоит из реакционной трубы 1 и короба подачи вторичного воздуха 2. Патрубок пыли высокой концентрации (ПВК) 3 соединен трубопроводом с пылепитателем, оборудованным двигателем с частотным приводом, что позволяет плавно регулировать подачу пылеугольного потока в горелочное устройство. Расход ПВК зависит от числа оборотов двигателя пылепитателя и изменяется от 150 об/мин до 1500 об/мин. Первичный воздух подается в горелку тангенциально через воздухопроводы 4, расположенные на торцевой стенке горелочного устройства и трубопровод 5 установленный по оси горелки. На трубопроводе 5 предусмотрена установка запорно-регулирующей аппаратуры, позволяющей регулировать расход первичного воздуха в зависимости от подачи ПВК, что позволяет устанавливать необходимый режим газификации.

Пуск и работа горелки осуществляются путем нагрева стенки реакционной трубы системой электронагрева 6 до температуры 600–700 °С, с последующей подачей в горелку первичного воздуха по воздухопроводам (4, 5) и ПВК через патрубок 3.

Температура в пространстве муфельной части горелочного устройства должна поддерживаться в пределах 900–950 °С, чтобы обеспечить устойчивое воспламенение пылегазового потока на выходе из горелочного устройства при смешении со вторичным воздухом и предотвратить шлакование муфельной части.

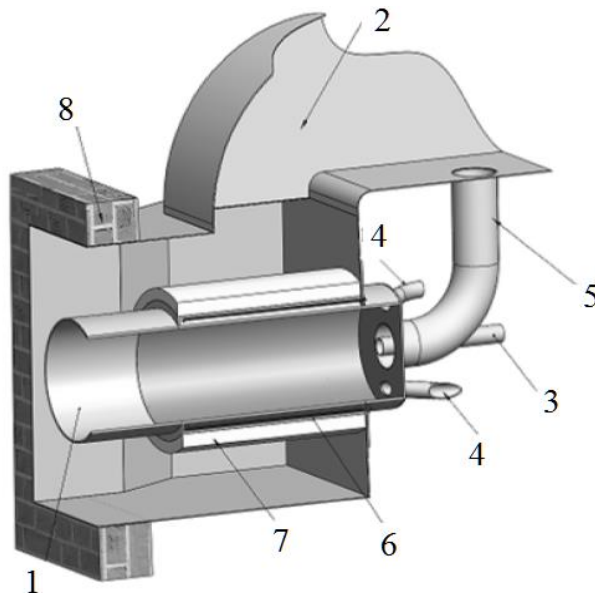


Рисунок 1. Эскиз универсального энергоэффективного горелочного устройства: 1 — реакционная труба; 2 — короб подвода вторичного воздуха; 3 — устройство подвода пыли высокой концентрации (ПВК); 4 — тангенциальный патрубок подачи первичного воздуха; 5 — патрубок осевой подачи первичного воздуха; 6 — система нагрева; 7 — тепловая изоляция; 8 — амбразура котла.

Для решения вопросов сепарации и предотвращения аварийных режимов работы разработана математическая модель описания течений в реакционной трубе горелки. Модель включает уравнения неразрывности, уравнения баланса количества движения, уравнение переноса концентрации компонент. Для описания турбулентных характеристик течения используется модифицированная модель турбулентности [3, с. 140]. Распределение по фракциям сделано на основе распределения Розина–Рамлер, при остатке на сите  $R_{200} = 22\%$ .

Скорость витания частиц угля определена, по формуле:

$$V_{вит} = 5.22 \cdot \sqrt{\frac{d_m \cdot v_m}{v_2}}, \quad (1)$$

где:  $d_m$  — диаметр частиц;  $v_2$  — удельный вес газа;  $v_m$  — удельный вес угля.

Таким образом, скорость витания частиц угля составляет для фракций 200 мкм составляет:  $V_{вит} = 8$  м/с, а для частиц размером 10 мкм:  $V_{вит} = 3,5$  м/с.

С целью построения сеточной модели муфельной части горелочного устройства использована программа  $\sigma$ Grid [4, с. 250] (Рисунок 2). Проведение численного моделирования и анализа полученных результатов выполнены с помощью программы  $\sigma$ Flow. Построение сетки осуществлялось в программе  $s$ Grid. Сетка состоит из 51 блока и содержит 308000 ячеек.

Приведены результаты расчетов векторного поля скорости при расходе угольной пыли 0,278 кг/с, что соответствует оборотам пылепитателя 300 об/мин (Рисунок 3).

Подача воздуха в каналы 3 под углом к оси  $45^\circ$  приводит к интенсивной крутки потока, в которое при удалении от входного сечения, вовлекается поток угольной пыли, поданный в центральный канал. По результатам расчета, установлено, что на начальном участке муфельной части горелки возникает обратное течение газов с небольшой частью мелкой фракции угольной пыли, за счет чего время пребывания в объеме муфеля данных частиц увеличивается и происходит их воспламенение.

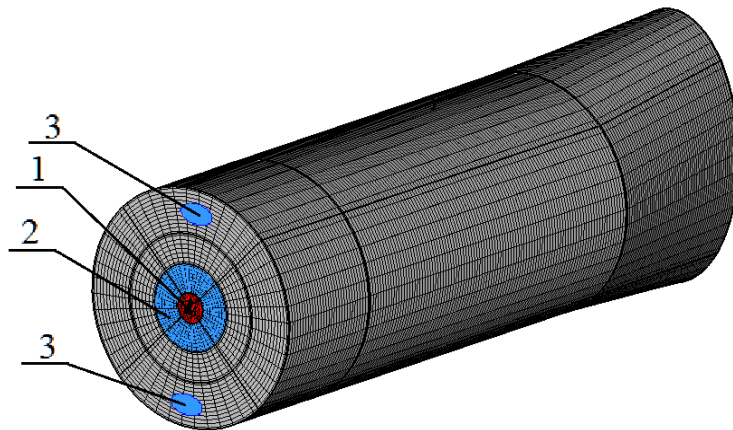


Рисунок 2. Расчетная сетка горелочного устройства: 1 — ввод ПВК; 2 — ввод первичного воздуха соосно потоку ПВК; 3 — ввод тангенциального воздуха.

Проведенные численные исследования изотермической задачи движения угольной пыли в объеме муфеля горелки позволили выбрать оптимальный угол ввода первичного воздуха для исследуемого горелочного устройства в пределах  $40^{\circ}$ – $50^{\circ}$  к вертикальной плоскости горелки.

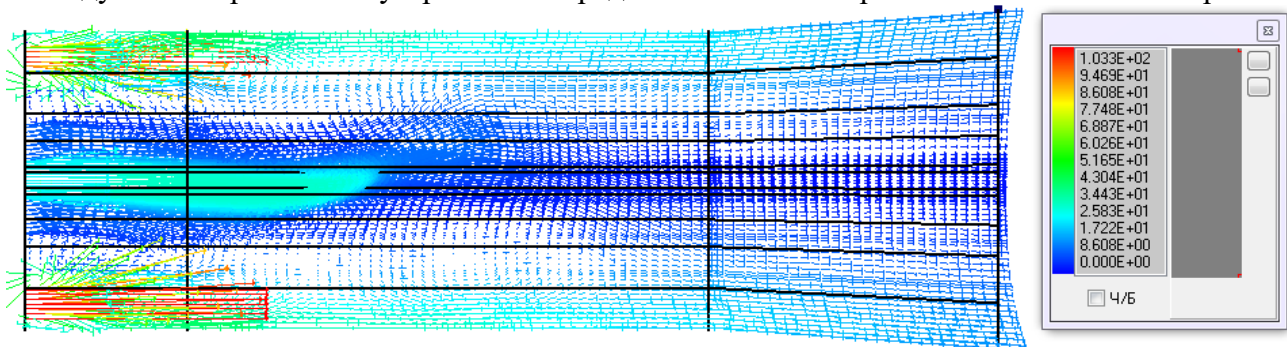


Рисунок 3. Векторное поле скорости угольных частиц в горелке при тангенциальном подводе воздуха.

Увеличение угла ввода патрубка тангенциальной подачи воздуха более  $50^{\circ}$  приводит к резкому увеличению массы сепарирующихся частиц угля в муфеле. 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.

Выполнены расчетные исследования по установлению режимов термической подготовки угольной пыли для расходов от 150 до 1500 об/мин воздуха, в качестве примера был взят угол ввода первичного воздуха  $45^{\circ}$ , расход воздуха составлял: на входе 1 —  $360 \text{ м}^3/\text{ч}$ , на входе 2 —  $1000 \text{ м}^3/\text{ч}$ , на входе 3–4 —  $1610 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Результаты математического моделирования отражены на Рисунках 4 и 5.

Анализ результатов численных исследований показывает, что величина скорости потока для расходов угольной пыли высокой концентрации от  $0,139 \text{ кг/с}$  до  $1,111 \text{ кг/с}$  на входе в горелочное устройство резко повышается, затем падает и далее стабилизируется на определенном уровне до длины  $0,3 \text{ м}$ , что обусловлено прохождением потока по трубной вставке длиной  $0,3 \text{ м}$  и исключением влияния на поток ПВК тангенциального воздуха (Рисунок 4).

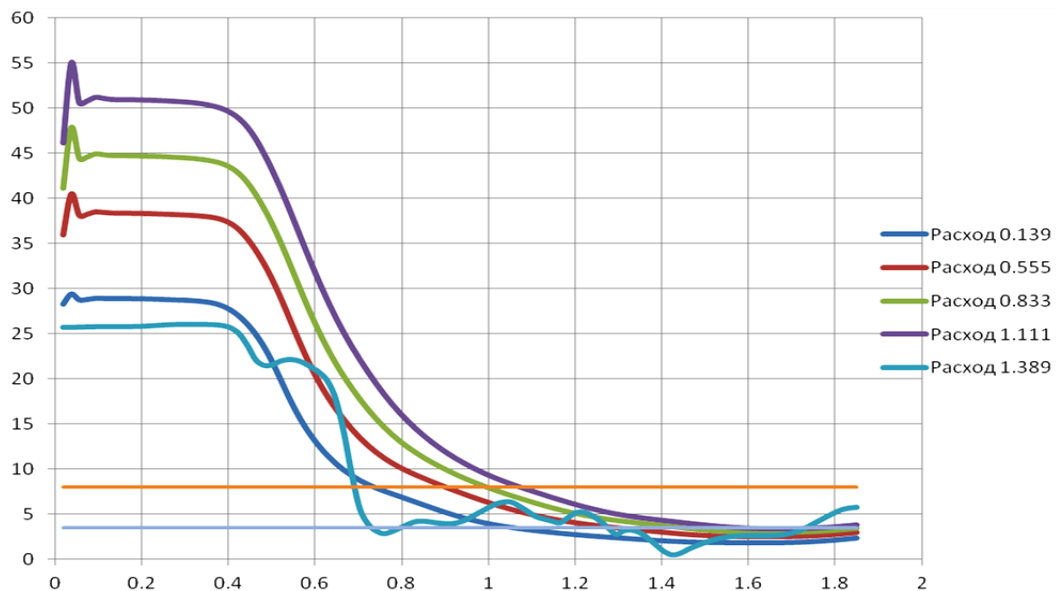


Рисунок 4. Изменение величины скорости в осевой части по длине горелочного устройства от расхода ПВК сечение по прямой с координатами  $x_1(0,0,0)$  и  $x_2(0,0,0)$ .

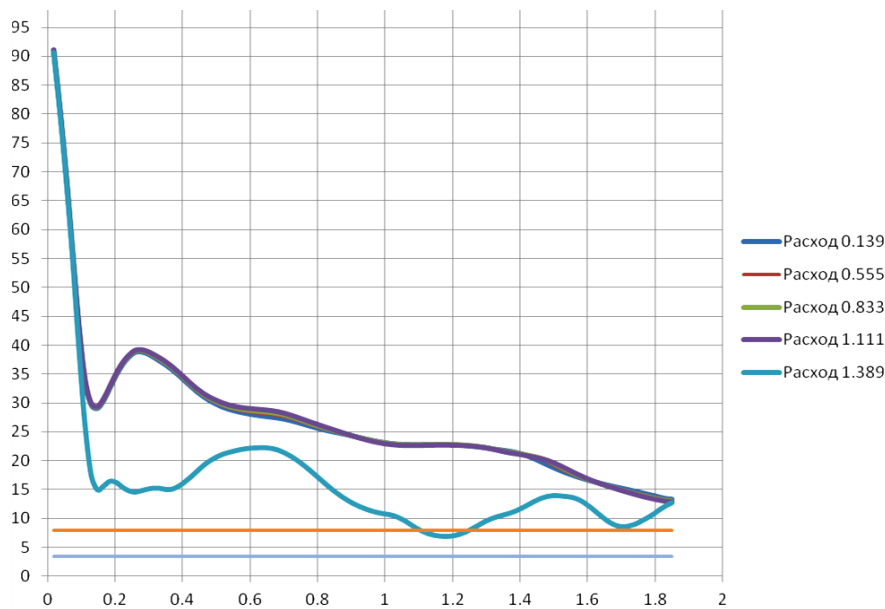


Рисунок 5. Изменение величины скорости потока в пристеночной области по длине горелочного устройства от расхода ПВК, сечение по прямой с координатами  $x_1(0,0.25,0)$  и  $x_2(0,0.25,0)$ .

На расстоянии от 1,08 до 1,5 скорость потока снижается ниже скорости витания ( $V_{вит} = 8$  м/с), что указывает на выпадение из потока частиц размером более 200 мкм и выше. Кривые скорости опускаются ниже  $V_{вит} = 3,5$  м/с по длине горелочного устройства от 1,5 м до 1,8 м, следовательно, на данном участке будет происходить сепарация частиц размером ниже 10 мкм. Далее скорость потока повышается, что связано с изменением сечения горелки, перехода сечения горелки из круглого в эллипс, т. е. практически из осевой части потока выпадают все фракции ПВК и перемещаются в пристеночную зону горелки, где подхватываются потоком и транспортируются без сепарации, в связи с тем, что на выходе из горелки скорости не падают ниже 13 м/с (Рисунок 5).

*Выводы:*

1. По результатам моделирования муфельной части горелочного устройства обоснован диапазон наиболее эффективных значений углов ввода патрубка тангенциальной подачи первичного воздуха, который составляет 40–50 °.

2. Конструкция предлагаемого горелочного устройства позволяет исключить расслоение потока угольной пыли высокой концентрации (ПВК). Проведенные изотермические расчеты, дают важную информацию о совместном движении газового потока и угольных частиц в муфельной части горелочного устройства.

*Список литературы:*

1. Дубровский В. А. Повышение эффективности энергетического использования углей Канско–Ачинского бассейна. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2004. 184 с.

2. Пат. 95072 Российская Федерация, МПК F 23 D 1/06. Горелочное устройство // Дубровский В. А., Евтихов Ж. Л., Потылицын М. Ю.; опубл. 10.06.2010. 8 с.

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

4. Дектерев А. А., Гаврилов А. А., Харламов Е. Б., Литвинцев К. Ю. Использование программы  $\sigma$ Flow для численного исследования технологических объектов // Вычислительные технологии. 2003. Т. 8, Ч. 1. С. 250–255.

*References:*

1. Dubrovskii V. A. Povyshenie effektivnosti energeticheskogo ispolzovaniya uglei Kansko–Achinskogo basseina: Monografiya. Krasnoyarsk: IPTs KGTU, 2004. 184 p.

2. Pat. 95072 Rossiiskaya Federatsiya, MPK F 23 D 1/06. Gorelochnoe ustroistvo. Dubrovskii V. A., Evtikhov Zh. L., Potylitsyn M. Yu.; opubl. 10.06.2010. 8 p.

3. Dekterev A. A., Gavrilov A. A., Chernetskii M. Yu., Surzhikova N. S. Matematicheskaya model protsessov aerodinamiki i teploobmena v pylougolnykh topochnykh ustroistvakh. Teplovye protsessy v tekhnike, 2011, v. 3, no. 3, pp. 140–144.

4. Dekterev A. A., Gavrilov A. A., Kharlamov E. B., Litvintsev K. Yu. Ispolzovanie programmy  $\sigma$ Flow dlya chislennogo issledovaniya tekhnologicheskikh obektov. Vychislitelnye tekhnologii. 2003, v. 8, part. 1, pp. 250–255.

*Работа поступила  
в редакцию 18.09.2016 г.*

*Принята к публикации  
22.09.2016 г.*