

УДК 621.18

РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ПЫЛЕУГОЛЬНОЙ РАСТОПОЧНОЙ ГОРЕЛКИ

Двойнишников В.А., Хохлов В.А.

ОАО «Подольский машиностроительный завод», г. Подольск МО

На начальном этапе пуска пылеугольных энергетических котлов необходимо создать условия для стабилизации процесса горения основного топлива в топке котла. Достигается это с помощью специальных (растопочных) горелок.

В качестве топлива в таких горелках из-за низкого уровня температур воздуха и связанной с этим проблемой достижения устойчивости горения твёрдого топлива используется мазут или газ. Однако в силу их дороговизны постоянно ведутся поиски путей замены их угольной пылью. Существуют два способа:

- применение специальных устройств (плазмотронов, муфелей), в которых создаются высокотемпературные условия для воспламенения обычной пыли угля, сжигаемого в котле, с последующей подачей в топочный объём;
- использование специально приготовленной пыли, например, «механоактивированного угля микропомола» с повышенной реакционной способностью [1].

Последнее достигается применением специальной технологии, основанной на размоле предварительно подсушенного угля в дезинтеграторе (ДИ). В нём пыль переходит в активированное состояние, которое сохраняется в течение некоторого времени, и характеризуется более низким по сравнению с начальным состоянием значением энергии активации.

Разработке конструкции пылеугольной растопочной вихревой горелки и обоснованию её работоспособности при использовании в качестве топлива «механоактивированного угля микропомола» и посвящена данная статья.

Предлагаемая горелка выполнена в виде двух коаксиальных каналов:

- цилиндрического, предназначенного для ввода смеси пыли и транспортирующего её воздуха (называемой далее первичной средой), поступающей из мельницы-дезинтегратора;

- кольцевого с установленным на некотором расстоянии от его среза аксиальным лопаточным завихрителем, предназначенного для ввода воздуха, называемого далее вторичным.

Устойчивость воспламенения угольной пыли в такой горелке базируется на формировании неподвижного фронта горения на границе взаимодействия встречно направленных сред: первичной смеси из центрального канала и высокотемпературных продуктов сгорания зоны возвратного течения, образующейся в приосевой области течения около среза горелки.

Растопочная горелка подобной конструкции устанавливается в центральную часть основных (вихревых или прямоточных круглых) горелок котла. На рис. 1 показан вариант конструктивного исполнения растопочной горелки,

встроенной в основную прямоточную круглую горелку котла ПК-40-1 Беловской ГРЭС. В этом случае последняя имеет три канала: два из них – каналы растопочной горелки, третий (внешний) для ввода воздуха основной горелки с объёмным расходом, необходимым для поддержания температур газов на выходе из топки. Среда в первом и воздух в третьем каналах вводятся в топку без закрутки, а во втором – через закручивающий аппарат.

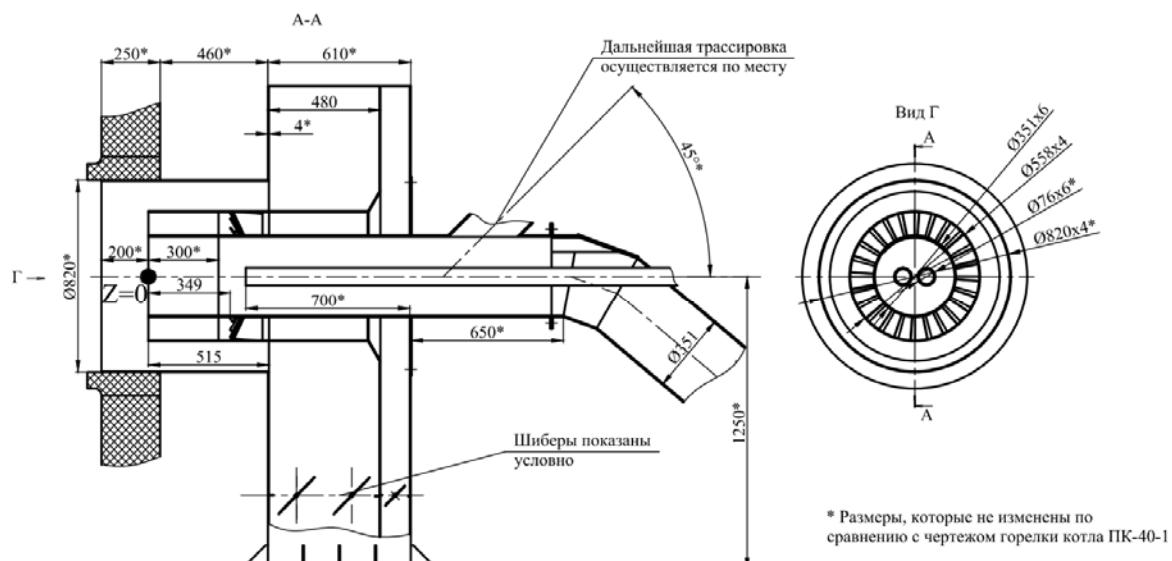


Рис. 1. Конструктивное исполнение вихревой растопочной горелки для сжигания «механоактивного угля микропомола»

При работе котла на основном режиме в центральный канал растопочной горелки вместо среды из дезинтегратора подается пыль из трубы ПВК и первичный воздух (как это реализовано в котле ПК-40-1), а в её кольцевой канал – часть вторичного воздуха.

При весьма простом конструктивном исполнении растопочной горелки её работоспособность во многом определяется соблюдением условий формирования зоны возвратного течения в приосевой области, прилегающей к срезу центрального канала горелки, и поддержанием температурного уровня среды в ней. Эти условия достигаются за счёт:

- выбора соответствующих размеров каналов и угла установки лопаток закручивающего аппарата;
- поддержания определённого расхода в каналах горелки;
- подбора угольной пыли с достаточной реакционной способностью (значений предэкспоненциального множителя K_0 , энергии активации E_a , выхода летучих V^{daf} , низшей теплоты сгорания на рабочую массу $Q_{h,n}^p$, и тонины помола).

Детальное рассмотрение некоторых из указанных выше факторов и составляет те конкретные задачи, которые рассмотрены в статье, а именно,

- определение влияния скоростей сред, истекающих из каналов растопочной и основной горелки на формирование зоны возвратного течения в приосевой области, прилегающей к центральному каналу;

- установление степени устойчивости работы растопочной горелки при использовании в качестве топлива «механоактивного угля микропомола» и влияние на ее работу величины расхода топлива.

Исследования были выполнены для случая растопочной горелки с диаметрами центрального и кольцевого канала $\varnothing 350 \times 6$ и $\varnothing 558 \times 4$ мм соответственно, встроенной в основную горелку с внешним диаметром $\varnothing 820$ мм (рис. 1), с аксиальным лопаточным аппаратом из 24 прямых лопаток с углом установки $57,7^\circ$.

В исследованиях температура первичной смеси была принята равной 60°C , а в качестве топлива использовалась пыль, получаемая после размола в ДИ подсушенного угля (смесь 75% Кузнецкого угля ДР, Г и 25% - шлама с $W^r = 1,8\%$, $A^r = 16,86\%$, $C^r = 63,82\%$, $S^r = 0,33\%$, $H^r = 4,57\%$, $N^r = 2,06\%$, $O^r = 10,55\%$, $Q_n^r = 25,698$ МДж/кг, $V^{\text{daf}} = 42,25\%$, $\rho_{\text{каж}} = 1273$ кг/м³). Максимальный расход топлива в горелке составлял $\sim 0,8$ кг/с, что соответствовало её тепловой мощности $\sim 20,6$ МВт. Расходы сред в каналах растопочной горелки и основной горелки изменялись в пределах:

- первичной смеси – $0,13 \div 1,0$ Нм³/с (с учетом минимального расхода воздуха на входе в дезинтегратор производительностью 3 т/ч и возможности последующей присадки воздуха в среду до горелки);
- вторичного воздуха – $4,5 \div 7,5$ Нм³/с (исходя из обеспечения коэффициента избытка воздуха в растопочной горелке равным $1,0 \div 1,25$ при расходе топлива 0,8 кг/с);
- воздуха в основной горелке – $1,53$ Нм³/с (исходя из условия поддержания общего избытка воздуха в топке на уровне 2,5).

Исследования проводились с помощью программной системы Fluent, широко используемой для численного моделирования топочного процесса при факельном сжигании топлива.

Математическая модель этого процесса базируется на известных дифференциальных уравнениях, описывающих турбулентное движение, диффузию и химическое реагирование газовых компонентов среды, дополненных моделями движения и реагирования топливных частиц, а также излучения. Интенсивность выхода летучих из топливных частиц рассчитывалась по экспоненциальной функции, аналогичной закону Аррениуса, а реагирование кокса на поверхности частиц – по диффузионно-кинетическому механизму [2, 3].

Первичные результаты исследований, получаемых в виде дискретизированных численных значений параметров процесса - температуры, компонент скорости, концентрации компонентов топочной среды (CO₂, летучие, O₂ и др.) в исследуемом объёме при конкретных начальных параметрах сред на входе в горелку, в работе представлялись в виде полей этих параметров в характерных сечениях. Именно они и служили базой для установления характера и степени влияния различных факторов на ход процесса горения, в том числе и на устойчивость воспламенения.

Сложность проведения настоящих исследований связана с необходимостью (из-за значительного числа факторов, влияющих на работу горелки) выполнения большого количества вариантов расчетов, и со значительными (до суток) затратами машинного времени на расчет каждого варианта.

С целью снижения затрат времени исследований изучение влияния одного из параметров осуществлялось при одном фиксированном наборе начальных значений других.

При этом расчёт каждого варианта осуществлялся в два этапа. На первом из них при соблюдении всех начальных значений параметров и характеристик среды, подаваемых в горелку, но без использования стороннего источника теплоты для поджигания факела, достигалось стабильное решение (значения компонент вектора скорости в области течения практически не меняются в процессе вычисления). По наличию в приосевой области зоны обратных токов делался вывод о соблюдении необходимых условий воспламенения - образования устойчивой (стационарной) зоны перемешивания первичной среды со средой возвратного течения.

В тех вариантах, в которых необходимое условие воспламенения выполнялось, реализовывался второй этап. В расчётный объём вносился сторонний источник теплоты. После стабилизации решения он удалялся из расчётной области. Если температурные и скоростные поля становились идентичными полученным на первом этапе (без горения), то делался вывод о невыполнении достаточных условий для воспламенения и горения топлива. Достаточные условия выполнялись тогда, когда горение стабильно протекало без использования стороннего источника теплоты.

Из результатов первого этапа расчётного моделирования следует, что по структуре течения в приосевой области и распространению сред из каналов горелки все расчётные варианты могут быть условно разделены на две группы.

К первой группе относятся те из них, течение в которых характеризуется односторонним ($W_a > 0$ м/с) движением первичной смеси и вторичного воздуха на всей протяжённости их взаимодействия.

Структура же течения во второй группе характеризуется изменением направления движения сред в приосевой области и образованием в ней зоны возвратного течения. В данных вариантах на некотором расстоянии от среза центрального канала происходит разворот потока первичной смеси в радиальном направлении (в сторону струи второго канала). Аксиальная составляющая скорости смеси снижается от начального значения до нуля с одновременным ростом радиальной и тангенциальной (рис. 2) составляющих скорости. Около области с $W_a = 0$ м/с формируется зона перемешивания первичной смеси и среды возвратного течения. Эта зона ориентирована перпендикулярно к направлению движения исходной смеси.

К этой зоне примыкает пограничный слой, расположенный около поверхности с нулевым значением аксиальной компоненты скорости, состоящий из смеси сред из центрального (первичная смесь) и кольцевого (вторичный воздух) каналов и среды возвратного течения. Если последнее течение формируется только из среды пограничного слоя, то зона возвратного течения считается замкнутой.

В некоторых случаях угол раскрытия струи очень велик, и зона возвратного течения формируется ещё и из среды топочного пространства, имеющей низкую температуру (тогда она считается незамкнутой).

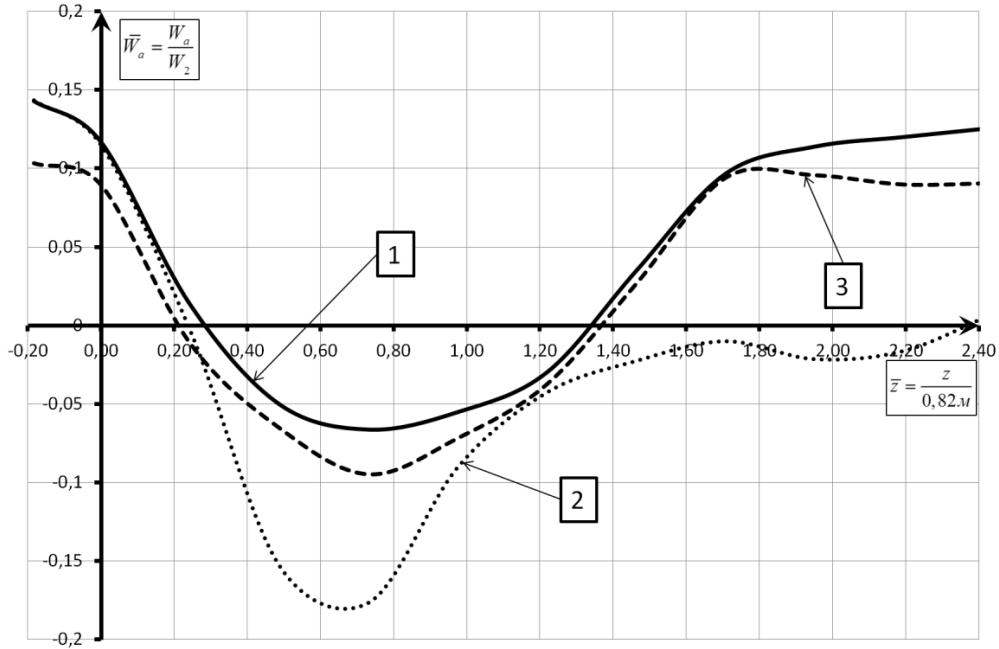


Рис. 2. Распределение аксиальной скорости по оси потока при различных значениях скоростей воздуха по каналам

- 1) $W_1 = 6 \text{ м/с}, W_2 = 35,9 \text{ м/с}, W_3 = 6,3 \text{ м/с}$
- 2) $W_1 = 6 \text{ м/с}, W_2 = 35,9 \text{ м/с}, W_3 = 0,6 \text{ м/с}$
- 3) $W_1 = 6 \text{ м/с}, W_2 = 53,8 \text{ м/с}, W_3 = 6,3 \text{ м/с}$

Из результатов расчёта следует, что:

- основными факторами, определяющими картину течения в приосевой области при фиксированной геометрии растопочной горелки, являются скорости и плотности сред, истекающих из ее каналов;
- картина течения, характеризующаяся наличием в приосевой области зоны обратных токов, имеет место при величине скорости первичной смеси W_1 не более 6 м/с, а скорости воздуха из вторичного канала W_2 не менее 35,9 м/с и канала основной горелки W_3 менее 6 м/с;
- уменьшение скорости W_1 , как и увеличение W_2 и W_3 указанных выше их граничных значений способствует увеличению протяжённости зоны возвратного течения и возвратной скорости среды в возвратном течении (рис. 2).

Работоспособность предложенной конструкции растопочной горелки при применении в ней в качестве топлива «механоактивированного угля микропомола» проверялась при разных значениях его расхода (0,263 кг/с, 0,4165 кг/с и 0,8 кг/с), при неизменных величинах скоростей сред в каналах: $W_1 = 6 \text{ м/с}$, $W_2 = 35,6 \text{ м/с}$ и $W_3 = 6,3 \text{ м/с}$, т.е. при выполнении необходимых условий формирования около центрального канала горелки фронта горения.

В этих исследованиях, составляющих собой второй этап численного моделирования, «механоактивированный уголь микропомола» представлялся в виде 20 фракций с величиной суммарной удельной поверхности $500 \text{ м}^2/\text{кг}$, при значении энергии активации 52 МДж/кг.

Результаты этого численного моделирования показывают, что процесс горения «механоактивированного угля микропомола» в растопочной горелке устойчив (см. рис. 3-5). Во всех рассмотренных варианта структура факела неиз-

менна. В приосевой области течения около среза горелки, как и в случаях без горения (т.е. на первом этапе численного моделирования) образуется зона возвратного движения (рис. 5). Среда в ней представляет собой смесь высокотемпературных продуктов горения, воздуха и топливной пыли. Температура этой смеси, как и концентрация двуокиси углерода, по ходу движения к срезу горелки возрастает вследствие протекающего процесса выгорания коксовых частиц и летучих. Концентрация кислорода, кокса и летучих снижается (рис. 3). При этом следует отметить, что из-за интенсивно протекающего массообмена в зоне возвратного течения значения T , O_2 , CO_2 в радиальном направлении практически постоянны (рис. 4), а меняются только по z (рис. 3).

В области взаимодействия движущейся среды зоны возвратного течения со струёй первичной смеси, истекающей из центрального канала, формируется плоский фронт зажигания (рис. 5). Последний ориентирован перпендикулярно направлению движения потока и неподвижен (величина аксиальной составляющей скорости среды в нём равна нулю). Он расположен на расстоянии $0,3 \div 0,35$ м от среза центрального канала горелки и имеет заметную толщину $30 \div 50$ мм. До фронта в струе первичной смеси концентрация кислорода и температура потока равна начальной, а величина аксиальной составляющей скорости изменяется от $6,3$ м/с до 0 м/с. Во фронте горения температура среды резко (практически скачкообразно) возрастает до уровня 2000 К. За счёт прогрева частиц пыли во фронте происходит выход летучих, воспламенение и горение некоторой части мелких коксовых частиц, концентрация двуокиси углерода в нём возрастает от нуля до максимального значения, а кислорода падает до нуля (рис. 3, 4).

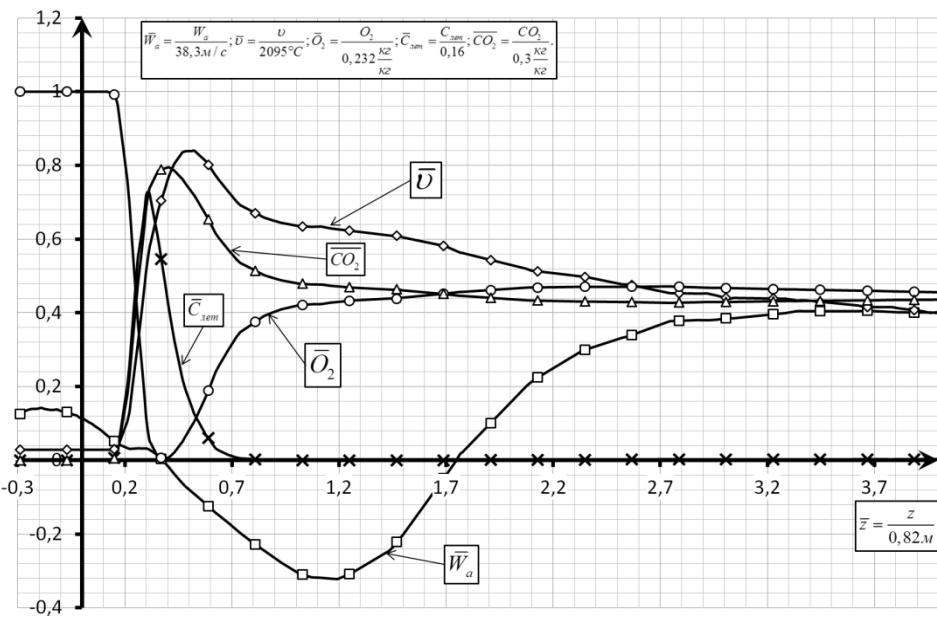


Рис. 3. Распределение аксиальной скорости, температуры, массовой концентрации кислорода, летучих и двуокиси углерода по оси потока при $B_r = 0,4165$ кг/с

\square – Относительная аксиальная скорость; \diamond - Относительная температура; \circ – Относительная массовая концентрация кислорода; Δ – Относительная массовая концентрация двуокиси углерода; \times - Относительная массовая концентрация летучих

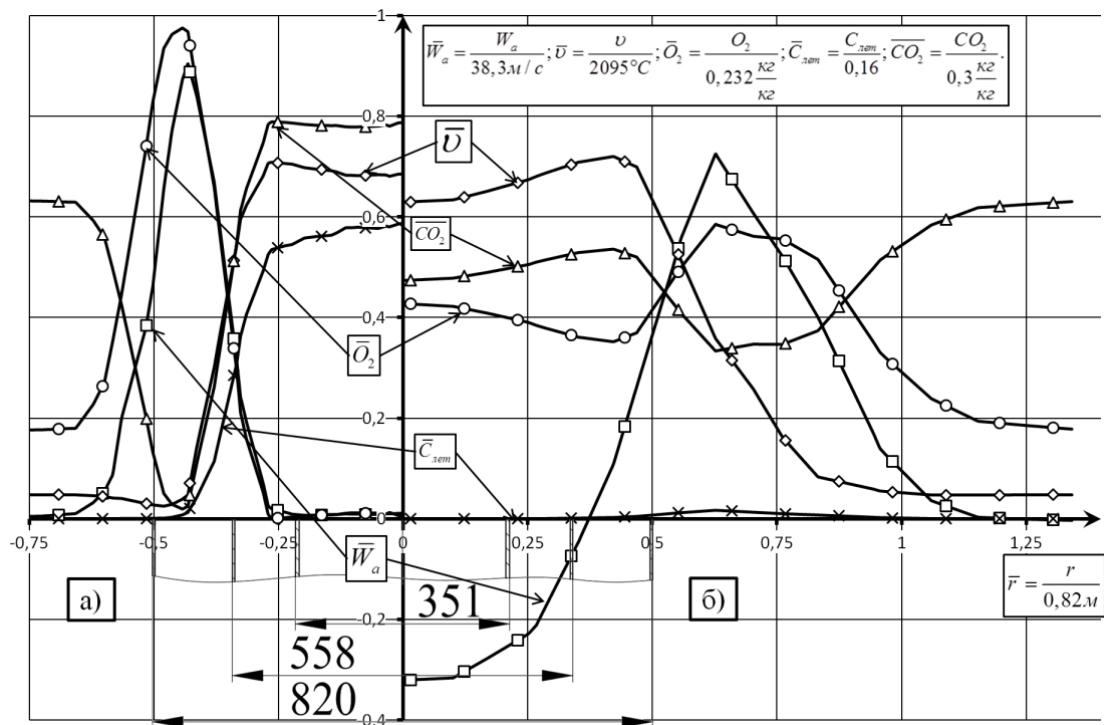


Рис. 4. Распределение аксиальной скорости, температуры, массовой концентрации кислорода, летучих и двуокиси углерода в радиальном направлении в области (а) фронта горения и (б) максимальной скорости обратного течения в ЗОТ

□ – Относительная аксиальная скорость; \diamond – Относительная температура; \circ – Относительная массовая концентрация кислорода; Δ – Относительная массовая концентрация двуокиси углерода; \times – Относительная массовая концентрация летучих

Горение и выгорание основной части коксовых частиц и оставшейся части летучих происходит в объёмном пограничном слое, образующемся из первичной смеси, вторичного воздуха и среды возвратного течения, и расположенной на внешней границе около изотахи $Wa=0$ м/с зоны возвратного течения (рис. 5). По ходу движения толщина слоя возрастает, температура, как и концентрация двуокиси углерода растёт, а величина скорости, как и концентрации кислорода падает. Из среды этого слоя, а именно при развороте его части и формируется зона возвратного течения.

После окончания зоны возвратного течения факел развивается по закономерностям, характерным для струй, истекающих в затопленное пространство. Температура, скорости и концентрации компонентов среды в поперечном сечении факела и окружающей среды выравниваются.

Увеличение расходов топлива от 0,263 до 0,8 кг/с, вводимого в первичной смеси при сохранении других начальных значений всех других характеристик сред, подаваемых в горелку, оказывает влияние только на количественные стороны протекания процесса горения.

Уровень температур в факеле растет, а, следовательно, и повышается устойчивость воспламенения и полнота выгорания топлива. Протяженность зоны возвратного течения, как и размеры ее в поперечном сечении и величина аксиальной скорости по длине возрастают.

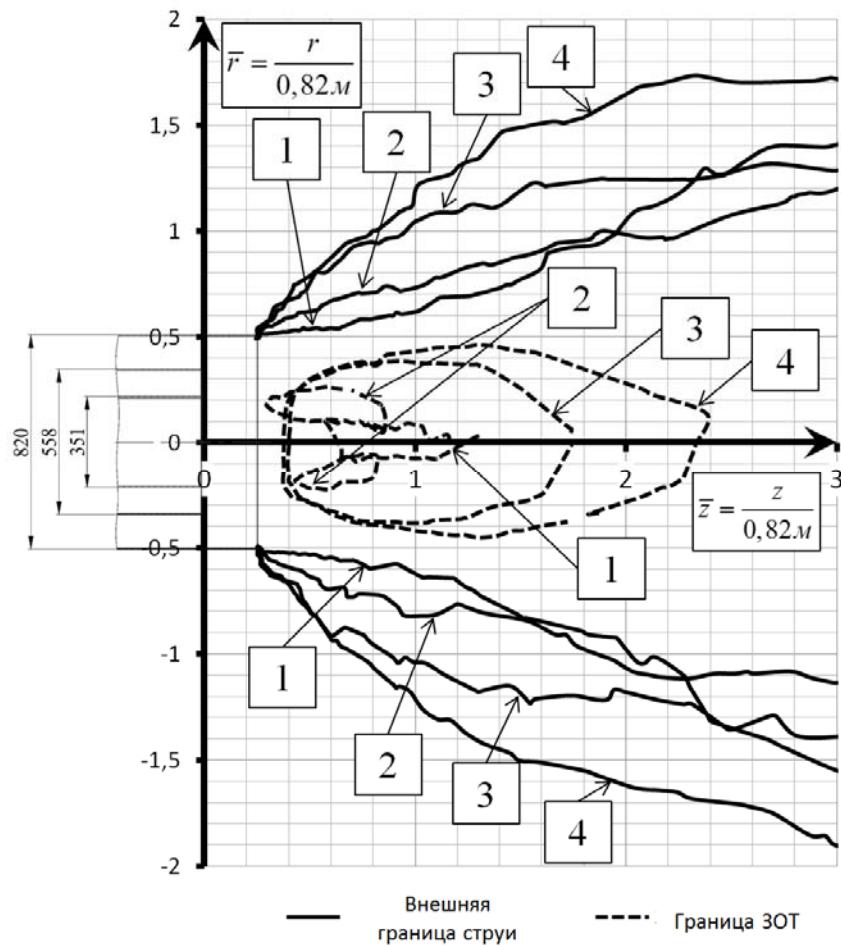


Рис. 5. Внешняя граница струи и область ЗОТ при сжигании различного расхода топлива в горелке

- 1) $B_r = 0 \text{ кг/с}$, горения нет
- 2) $B_r = 0,263 \text{ кг/с}$
- 3) $B_r = 0,4165 \text{ кг/с}$
- 4) $B_r = 0,8 \text{ кг/с}$

Таким образом, результаты выполненных численных экспериментов указывают на то, что предполагаемая в работе конструкция вихревой растопочной горелки обеспечивает устойчивое протекание процесса горения механоактивированного угля микропомола. Изменение же тепловой мощности такой горелки в период пуска целесообразно выполнять только изменением расхода топлива, при этом увеличение последнего способствует повышению устойчивости процесса горения.

Литература

1. **Можно ли отказаться от использования мазута для разжига пылеугольных котлов?** / Бордуков А. П., Елин В. Н. // Уголь. 2011. №11. С. 40-40
2. **Predicting the Combustion Behavior of Coal Particles** / M. M. Baum and P. J. Street // Combust. Sci. Tech. 1971. №3(5). P 231-243
3. **Rate of Combustion of Size-Graded Fractions of Char from a Low Rank Coal between 1200 K–2000 K** / M. A. Field // Combustion and Flame. 1969. 13. 237-252