

Моделирование и натурные испытания вихревых плазменно-топливных систем для воспламенения высокозольного энергетического угля¹

© 2015 г. Мессерле В.Е.^{2, 3, 4}, Устименко А.Б.⁴, Карпенко Ю.Е.⁵, Чернецкий М.Ю.^{2, 3},
Дектерев А.А.^{2, 3}, Филимонов С.А.²

Сибирский федеральный университет² – Институт теплофизики СО РАН³ – Научно-исследовательский институт
экспериментальной и теоретической физики⁴ – ООО “Отраслевой центр плазменно-энергетических технологий”⁵

e-mail: ust@physics.kz

Выполнены исследования процессов подачи пылеугольного топлива и его горения в топке котла, оснащенного вихревыми плазменно-топливными системами. Представлены результаты трехмерного моделирования процессов традиционного сжигания угля и сжигания с плазменной активацией горения в топочном пространстве. Проведены численные исследования вихревой плазменно-топливной системы с подачей аэросмеси через улиточный аппарат. Выявлена зависимость траектории закрученного потока аэросмеси в вихревой плазменно-топливной системе от угла поворота улиточного аппарата и определен оптимальный угол поворота, при котором достигается устойчивое плазменное воспламенение пылеугольного факела.

Ключевые слова: горение, пылеугольное топливо, термохимическая подготовка, плазма, топка котла, численное моделирование.

DOI: 10.1134/S0040363615060065

В мировой теплоэнергетике для растопки пылеугольных котлов и стабилизации горения пылеугольного факела используют природный газ или топочный мазут. На эти цели расходуют более 50 млн т мазута в год. На пылеугольных тепловых электростанциях (ТЭС) России ежегодно сжигают свыше 5 млн т мазута. Повсеместное снижение качества энергетических углей (повышение зольности и влажности, уменьшение выхода летучих) требует увеличения расхода топочного мазута на ТЭС.

Единственной известной технологией, обеспечивающей безмазутную растопку котла, подхват и стабилизацию горения пылеугольного факела, отработанной на реальных пылеугольных котлах, является плазменная технология воспламенения углей [1, 2]. Для реализации этой технологии разработаны плазменно-топливные системы (ПТС), представляющие собой пылеугольные горелки, оснащенные электродуговым плазмотроном (рис. 1). Принцип работы ПТС заключа-

ется в том, что холодная аэросмесь (смесь угольной пыли с воздухом) нагревается в зоне плазменного факела, образуя из низкосортного угля высокореакционное двухкомпонентное топливо (ВДТ). Это топливо удовлетворяет современным эколого-экономическим требованиям и представляет собой горючий газ и коксовый остаток, которые активно воспламеняются при смешении с вторичным воздухом в топке котла и устойчиво горят без сжигания дополнительного высокореакционного топлива (мазута или газа). Численным моделированием и измерениями на выходе экспериментальной топки было показано, что

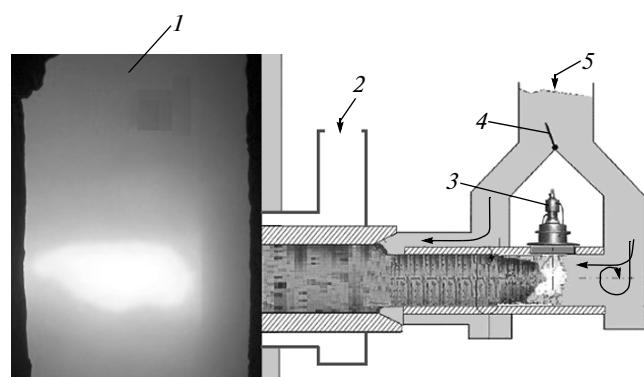


Рис. 1. Вихревая плазменно-топливная система.
1 – топка; 2 – вторичный воздух; 3 – плазмотрон;
4 – шибер; 5 – аэросмесь

¹ Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках реализации ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы” (госконтракт № 14.А18.21.1962).

² 660074, Россия, г. Красноярск, ул. Киренского, д. 26. СФУ.

³ 630090, Россия, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, д. 1. ИТ СО РАН.

⁴ 050010, Казахстан, г. Алматы, ул. Толе би, д. 96а. КазНУ.

⁵ 671160, Россия, Республика Бурятия, Селенгинский район, г. Гусиноозерск, ул. Пушкина, д. 33. ОЦПЭТ РАО “ЕЭС России”.

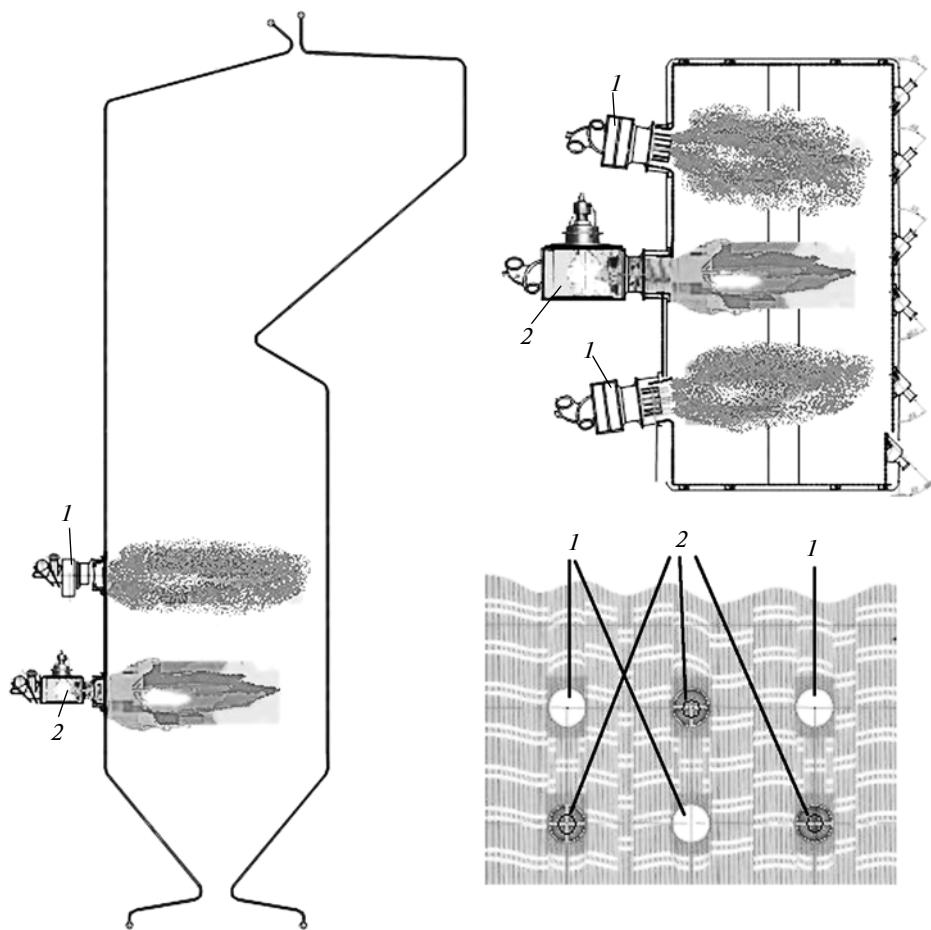


Рис. 2. Схема компоновки ПТС и основных пылеугольных горелок на котле БКЗ-420 Алматинской ТЭЦ-2.
1 – штатная вихревая двухпоточная пылеугольная горелка; 2 – ПТС

применение ПТС на пылеугольных котлах повышает эффективность сжигания энергетических углей благодаря снижению механического недожога топлива при одновременном уменьшении выбросов оксидов азота [3, 4].

Моделирование и испытание ПТС на котле БКЗ-420 Алматинской ТЭЦ-2

В данной работе представлены результаты моделирования и испытаний ПТС на котле БКЗ-420 Алматинской ТЭЦ-2 (рис. 2). Плазменно-топливные системы для котла БКЗ-420 созданы на базе трех основных горелок: двух крайних горелок нижнего яруса и средней горелки верхнего яруса; ПТС размещены в горелках вместо канала первичной аэросмеси. Это позволило оставить без изменения пылепроводы вторичной аэросмеси (внешний канал аэросмеси) и вторичного воздуха.

Плазменно-топливная система состоит из двух частей: водоохлаждаемого узла установки плазмotronа и муфелизованных каналов термохимической подготовки угля к сжиганию. Плазменно-топливная система была разработана и спроек-

тирована с использованием двух компьютерных программ: одномерной “Плазма-Уголь”, учитывающей детальную кинетику термохимических превращений топлива в двухфазном потоке с плазменным источником, и трехмерной CFD “Cinar ICE”, учитывающей геометрию топки, турбулентность среды, радиационный теплообмен и процесс горения угольных частиц по модели быстрой кинетики [3].

Для численных исследований были выбраны два режима работы котла: традиционный (с использованием шести пылеугольных горелок) и с плазменной активацией горения (с заменой трех пылеугольных горелок на ПТС). Параметры ВДТ, получаемого в ПТС из аэросмеси, рассчитывались с использованием программы “Плазма-Уголь”. Они являлись начальными параметрами для трехмерного расчета топки котла БКЗ-420, оснащенного ПТС, который выполнялся по программе Cinar ICE. Эта же программа использовалась и для расчетов традиционного режима сжигания угля в топке котла БКЗ-420, оснащенного штатными вихревыми пылеугольными горелками.

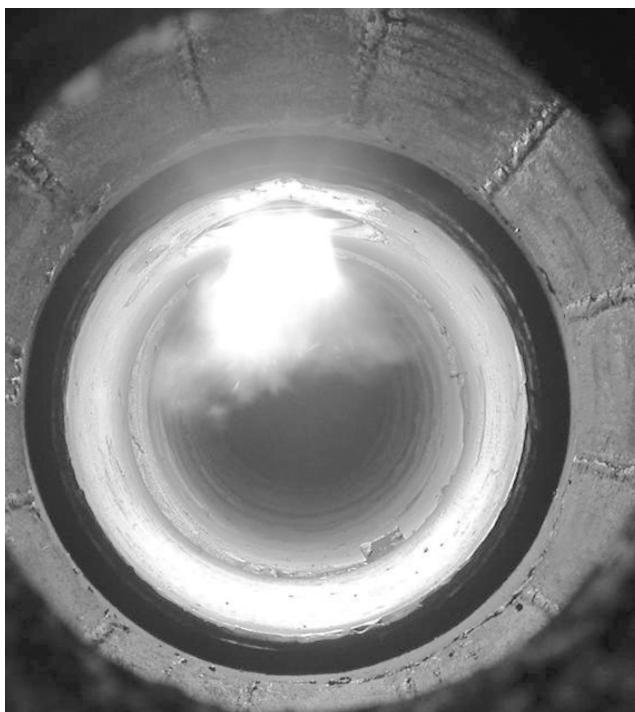


Рис. 3. Плазменный факел в ПТС до подачи аэросмеси

В котле сжигается высокозольный экибастузский каменный уголь зольностью 40%, выходом летучих 24%, влажностью 5% и теплотой сгорания 16 760 кДж/кг. Тонина помола угля составляет $R_{90} = 15\%$. Исходные данные для расчета ПТС по программе “Плазма-Уголь”:

Мощность плазмотрона, кВт.....	200
Начальная температура аэросмеси, К.....	362
Расход угля через горелку или ПТС, кг/ч.....	6000
Расход первичного воздуха, кг/ч.....	8955
Длина ПТС, м.....	3.687

Уголь моделируется в виде суммы четырех составляющих, % (по массе): фиксированного углерода С – 46.18, летучих (H_2 – 2.63, H_2O – 1.84, CO – 3.95, CO_2 – 1.4, CH_4 – 0.55), золы – 40 и смолы, представленной в виде бензола C_6H_6 – 3.45. В результате расчета получены следующие характеристики плазменного процесса образования ВДТ: распределение температур и скоростей газа и частиц, концентрации компонентов газовой фазы, степень газификации и концентрация углерода в коксовом остатке. На выходе ПТС между газом и

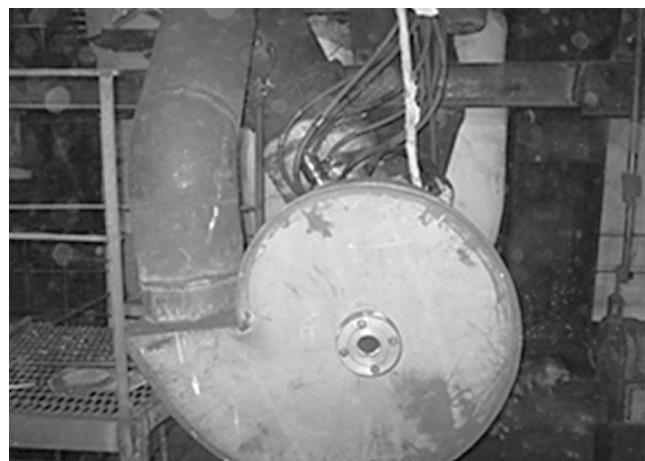


Рис. 4. Общий вид вихревой ПТС с улиточным аппаратом для котла БКЗ-420 Алматинской ТЭЦ-2

частицами достигается термическое равновесие при температурах газа и частиц 1025 К, а скорость газового потока составляет 49 м/с, превышая скорость частиц на 1 м/с. Отметим, что скорость потока на выходе из ПТС значительно превышает скорость аэросмеси на выходе традиционных пылеугольных горелок. Концентрация окислителей (CO_2 , H_2O , O_2) на выходе ПТС равняется 19.2%, степень газификации угля достигает на выходе 48%, что вполне достаточно для получения ВДТ.

Интегральные характеристики на выходе ПТС (см. таблицу) использовались в качестве начальных параметров при трехмерном численном моделировании горения ВДТ в топке энергетического котла БКЗ-420 с использованием программы Cinar ICE.

Результаты расчета параметров на выходе из топки в традиционном и плазменном режимах:

	Традицион- ный режим	Плазменный режим
Температура, °С.....	950	798
Концентрация:		
O_2 , %.....	2	1
CO_2 , %.....	16	18
NO_x , ppm.....	80.6	59.5
углерода в золе, %.....	1.1	0.9

Из приведенных данных следует, что концентрация остаточного углерода, характеризующая полноту выгорания угля, на выходе из топки с тремя ПТС на 16% ниже, чем при традиционном

Состав ВДТ на выходе ПТС

Газовая фаза, % (по объему)								Зола, кг/ч	С, кг/ч
H ₂	CO	CH ₄	C ₆ H ₆	CO ₂	H ₂ O	N ₂	O ₂		
1.05	7.75	0.3	0.77	15.6	3.55	70.84	0.15	1518	261

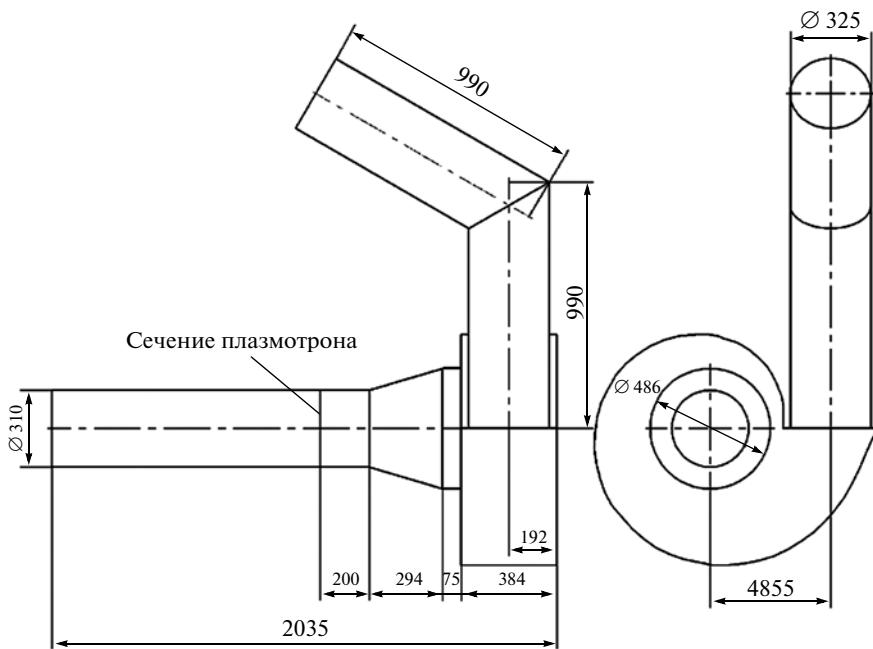


Рис. 5. Расчетная схема ПТС

сжигании. Плазменно-топливная система улучшает экологические характеристики процесса сжигания твердого топлива за счет снижения выбросов оксидов азота более чем на 33%. Очевидно, что снижение концентраций остаточного углерода и оксидов азота NO_x на выходе из топки

котла при использовании ПТС повышает экологические показатели ТЭС.

В процессе испытаний трех ПТС, установленных на котле БКЗ-420, при достижении необходимой концентрации пыли в аэросмеси, равной 0.6–0.7 кг/кг, наблюдалось воспламенение пылеугольного факела в холодной топке котла на выходе из ПТС. Измерение температуры факелов через смотровые лючки цифровым пирометром показало, что сразу после воспламенения температура составляла 700–800°C и повышалась до необходимой 1050–1070°C, что согласуется с результатами моделирования топки котла БКЗ-420, оснащенной ПТС. При этом в начале воспламенения наблюдались пульсации горящих факелов в топке, стабилизирующихся по мере ее прогрева и подачи вторичного воздуха (30–40%) через горелки с ПТС. Во время испытаний зафиксировано соответствие скорости повышения температуры горячего воздуха после стабилизации факелов скорости при мазутной растопке котла [4–6].

Однако необходимый для безмазутной растопки котла устойчивый пылеугольный факел в штатном режиме работы пылесистемы с прямым вдуванием пыли не был получен из-за невозможности стабилизировать концентрацию угольной пыли в аэросмеси на уровне 0.6–0.7 кг/кг и недостаточного взаимодействия закрученного потока аэросмеси с компактным воздушным плазменным факелом в ПТС (рис. 3). Из рисунка видно, что при относительно небольшой площади перекрытия сечения ПТС плазменным факелом основная часть потока аэросмеси с ним не контактирует, что приводит к неустойчивому воспламенению пыле-

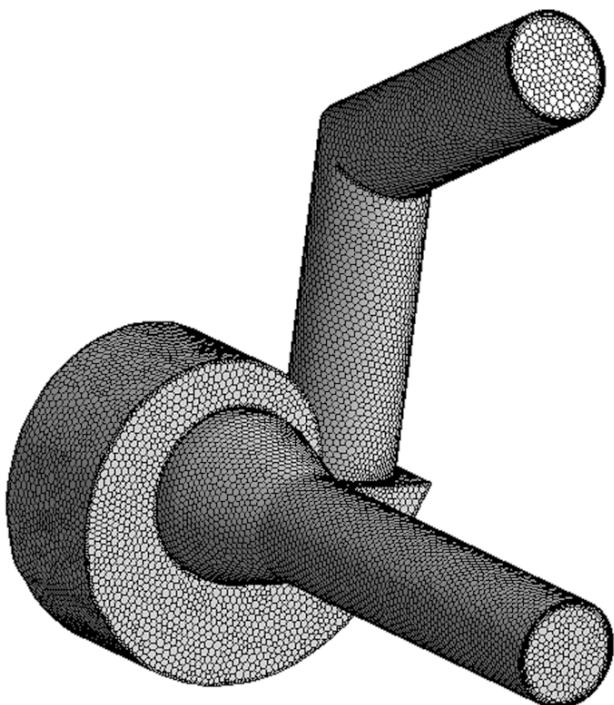


Рис. 6. Расчетная сетка улиточного аппарата

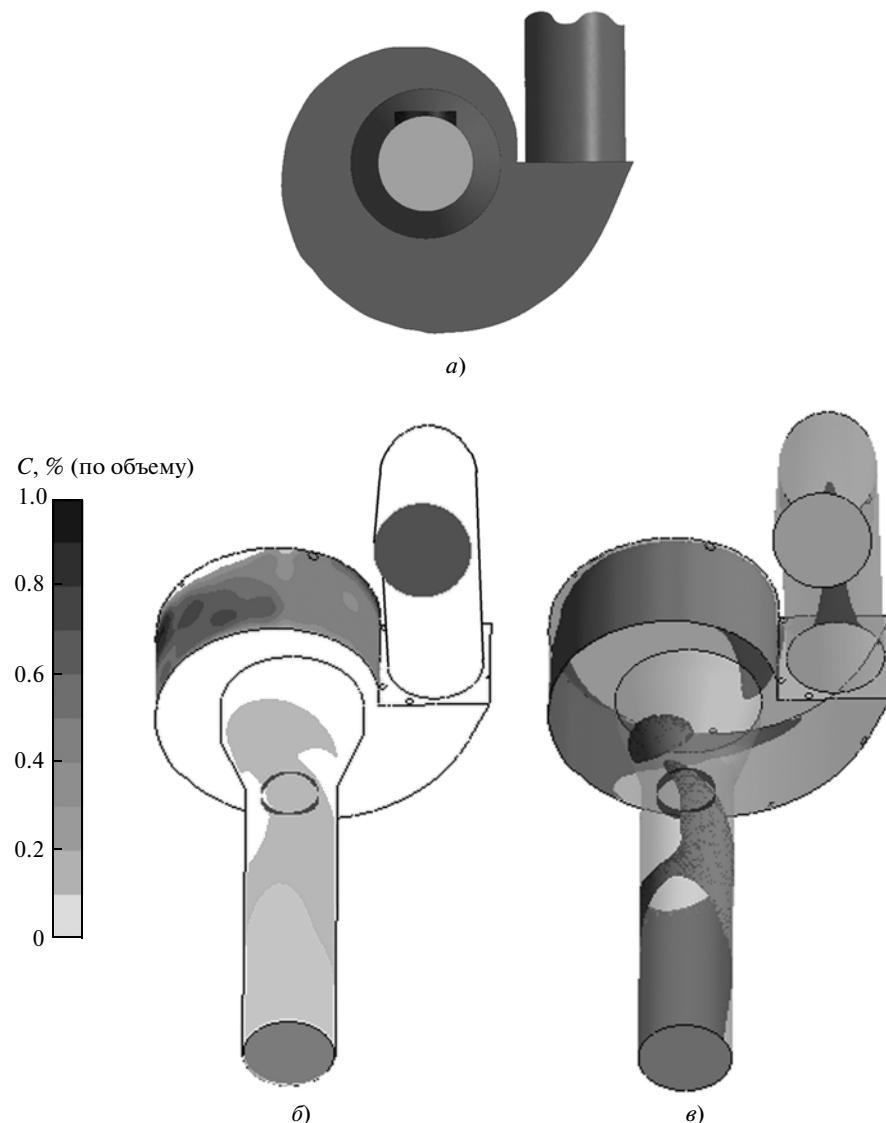


Рис. 7. Результаты расчета течения аэросмеси при угле поворота улиточного аппарата 0° .

a – положение установки; *б* – объемная концентрация дисперсной фазы вблизи внутренней поверхности улиточного аппарата и камеры плазменного воспламенения аэросмеси; *в* – изоповерхность объемной концентрации дисперсной фазы $f = 7\%$

угольного факела высокозольного экибастузского угля. В этой связи необходимо определить траекторию закрученного потока аэросмеси в вихревой ПТС для организации его интенсивного взаимодействия с компактным плазменным факелом. Для решения этой задачи были выполнены численные исследования вихревой ПТС с подачей аэросмеси через улиточный аппарат (рис. 4). Целью расчетов являлось установление области пересечения потока аэросмеси с областью выхода плазменного факела от плазмотрона, определяемой амбразурой для установки плазмотрона, в зависимости от угла поворота улиточного аппарата.

Расчетное исследование вихревой ПТС с улиточным аппаратом

Расчеты выполнялись с использованием CFD-программы FLUENT 14 [7]. На рис. 5 представлена расчетная схема ПТС. В ПТС подается аэросмесь с расходами угольной пыли 5 т/ч и первичного воздуха 6.23 тыс. м³/ч. Дисперсный состав угольной пыли следующий:

Диаметр частиц, мкм	Доля в потоке, %
10	19
47	45
80	21
150	15

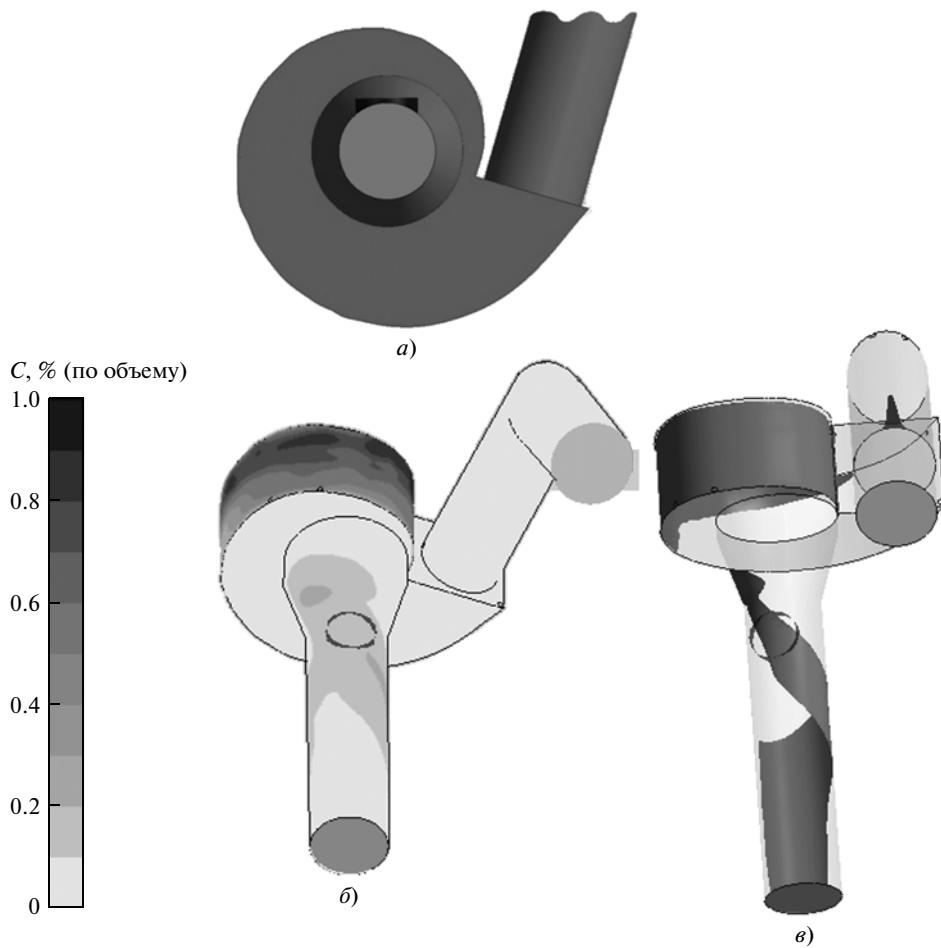


Рис. 8. Результаты расчета течения аэросмеси при угле поворота улиточного аппарата 15° .
а, б – обозначения см. рис. 7; в – $f = 10\%$

Расчет производился на полиэдральной сетке размером 206 200 ячеек (рис. 6). Использовалась модель Эйлера с гранулированной средой, где несущий поток и частицы представляются в виде сплошных взаимодействующих сред. Данная модель нашла широкое применение для расчета течений в технологических устройствах с высокой концентрацией дисперсной фазы. Для описания взаимодействия частиц между собой и их влияния на течение газа в модель вводится ряд эмпирических зависимостей и параметров, которые зависят от концентрации дисперсной фазы. В данной работе выбор вида зависимостей и значений эмпирических величин, как и сам набор уравнений для описания движения гранулированной среды, был взят из [8–11].

Уравнение сохранения массы для газовой и дисперсной фаз:

$$\nabla(\alpha_i \rho_i \vec{v}_i) = 0,$$

где α – объемная доля фазы; ρ – плотность фазы; \vec{v} – вектор скорости; i – индекс фазы.

Уравнение сохранения импульса:
для воздуха

$$\nabla(\alpha_L \rho_L \vec{v}_L \vec{v}_L) = -\alpha_L \nabla p + \\ + \nabla \hat{\tau}_L + \alpha_L \rho_L \vec{g} + \sum_{s=1}^{N_s} K_{L,s} (\vec{v}_L - \vec{v}_s) - \sum_{s=1}^{N_s} \vec{F}_{lift,s};$$

для дисперсных фаз

$$\nabla(\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = -\alpha_s \nabla p - \nabla p_s + \nabla \hat{\tau}_s + \alpha_s \rho_s \vec{g} + \\ + \sum_{k=1}^{N_s} K_{k,s} (\vec{v}_s - \vec{v}_k) - K_{L,s} (\vec{v}_L - \vec{v}_s) + \vec{F}_{lift,s},$$

где p – суммарное давление всех фаз; p_s – давление, обусловленное хаотичным движением частиц; $\hat{\tau}_s$ – тензор напряжений; $K_{L,s}$ – коэффициент взаимодействия между жидкостью и дисперсными фазами; $K_{k,s}$ – коэффициент взаимодействия между дисперсными фазами; N_s – число твердых фаз; $\vec{F}_{lift,s}$ – подъемная сила; s, k – индексы дисперсной фазы ($s \neq k$); L – индекс жидкости; \vec{g} – ускорение свободного падения.

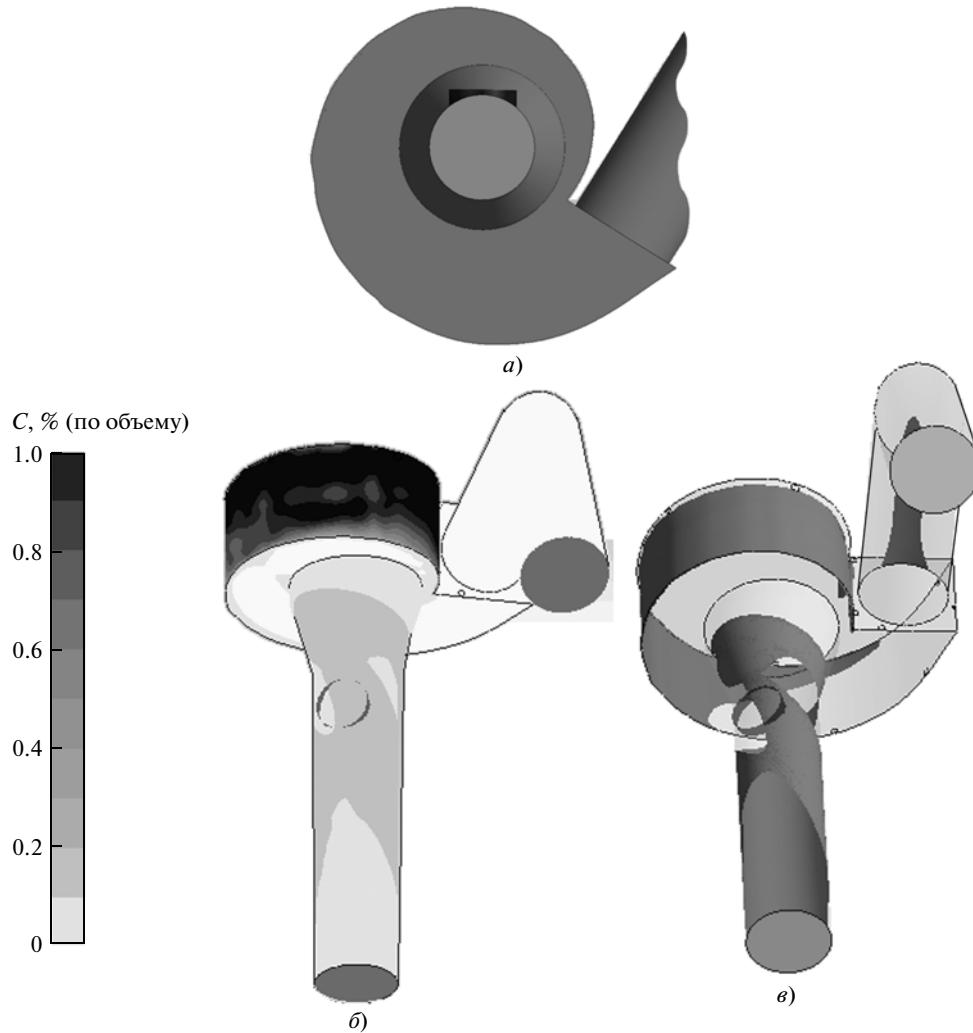


Рис. 9. Результаты расчета течения аэросмеси при угле поворота улиточного аппарата 30° .
а, б – обозначения см. рис. 7; в – $f = 6\%$

Давление p_s задается выражением

$$p_s = 2\rho_s(1 + e_{ss})\alpha_s^2 g_0 \Theta_s,$$

где e_{ss} – коэффициент восстановления взаимодействия частиц (в расчетах принимался равным 0.9); g_0 – радиальная функция распределения, описывающая вероятность столкновения частиц; Θ_s – гранулярная температура (пропорциональна кинетической энергии хаотичного движения частиц), для которой уравнение переноса имеет следующий вид:

$$\frac{3}{2} \nabla (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \Theta_s) = \\ (-p_s \hat{I} + \hat{\tau}_s) : \nabla \vec{v}_s + \nabla (k_{\Theta_s} \nabla \Theta_s) - \gamma_{\Theta_s} + \varphi_{k,s},$$

где многочлен $(-p_s \hat{I} + \hat{\tau}_s) : \nabla \vec{v}_s$ определяет генерацию энергии, связанную с вязким напряжением; двоеточие обозначает след произведения двух тензоров; $\nabla (k_{\Theta_s} \nabla \Theta_s)$ – диффузионный пе-

ренос гранулярной температуры; k_{Θ_s} – коэффициент диффузии; \hat{I} – единичный тензор; γ_{Θ_s} – энергия взаимодействия между частицами одной фазы; $\varphi_{k,s}$ – энергия взаимодействия между частицами разных фаз.

Для описания турбулентности смеси применяется стандартная $k-\varepsilon$ -модель, т.е. используются ее скорость и плотность. Эмпирические константы в уравнениях для турбулентных характеристик задаются как для $k-\varepsilon$ -модели однофазной среды:

$$\nabla(\rho_m \vec{v}_m k) = \nabla \left(\frac{\mu_{t,m}}{\sigma_k} \nabla k \right) + G_{k,m} - \rho_m \varepsilon; \\ \nabla(\rho_m \vec{v}_m \varepsilon) = \nabla \left(\frac{\mu_{t,m}}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon} G_{k,m} - C_{2\varepsilon} \rho_m \varepsilon),$$

где

$$\rho_m = \sum_{i=1}^N \alpha_i \rho_i;$$

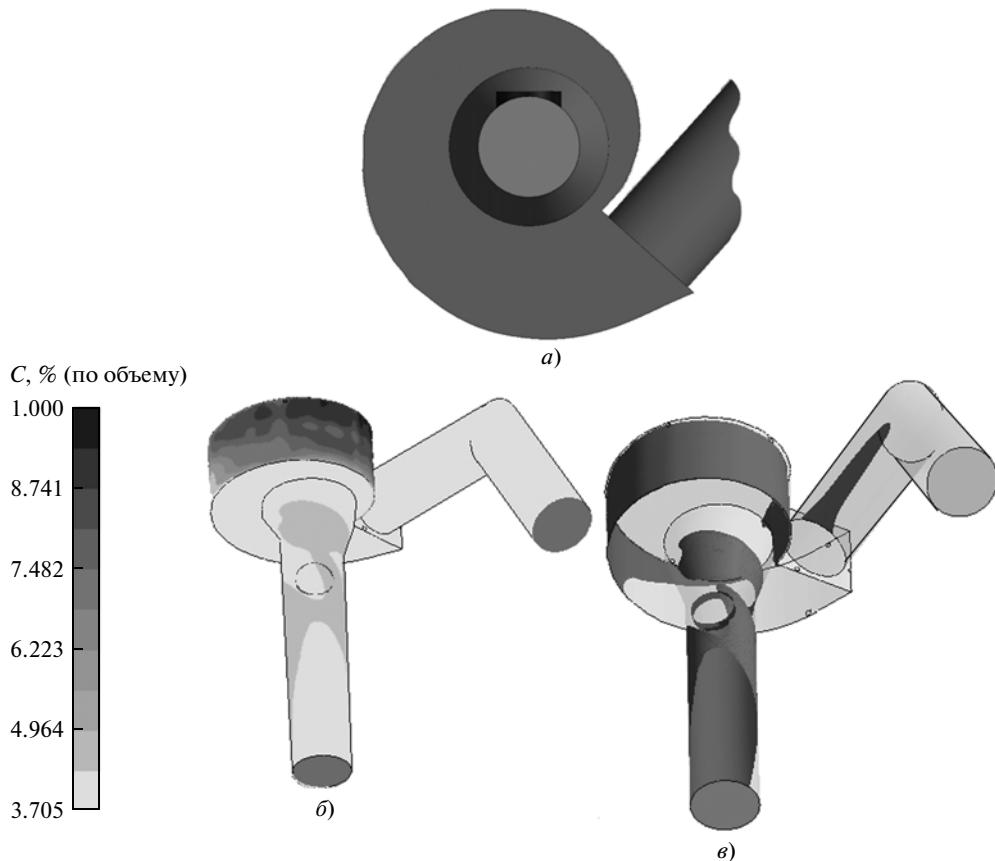


Рис. 10. Результаты расчета течения аэросмеси при угле поворота улиточного аппарата 45° .
а, б – обозначения см. рис. 7; в – $f = 6.5\%$

$$\vec{v}_m = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha_i \rho_i \vec{v}_i}{\sum_{i=1}^N \alpha_i \rho_i}$$

– плотность и скорость смеси;

$$\mu_{t,m} = \rho_m C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

– турбулентная вязкость;

$G_{k,m} = \mu_{t,m} (\nabla \vec{v}_m + (\nabla \vec{v}_m)^T) : \nabla \vec{v}_m$ – генерация энергии турбулентности; ε – скорость диссипации энергии турбулентности; k – кинетическая энергия турбулентности; σ_ε , $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ и C_μ – константы замыкания; T – оператор транспонирования.

На входе расчетной области для всех фаз задан фиксированный расход, на выходе – фиксированное давление. На твердых стенках модели задано условие прилипания для газовой и дисперсных фаз. Для определения пульсационных характеристик течения вблизи стенок был использован метод пристеночных функций.

На рис. 7–10 представлены результаты расчета для вариантов с углом поворота подвода аэросмеси улиточного аппарата $\varphi = 0–45^\circ$, отсчитываемым от оси плазмотрона.

Максимальная концентрация угольной пыли наблюдается в улиточном аппарате, где происходит циркуляция пыли (см. рис. 7, а). Взаимодействие между угольными частицами с накоплением в улитке становится более интенсивным. Учет этого взаимодействия позволяет корректно описать выход частиц в канал с плазмотроном. Основным местом выхода частиц является переход улитка–конфузор. Эта особенность конструкции определяет формирование “жгута” частиц. Характер движения частиц можно представить по распределению объемной концентрации угольных частиц вблизи внутренней поверхности улиточного аппарата и камеры плазменного воспламенения аэросмеси (см. рис. 7, б), а также из рис. 7, в, на котором изображена изоповерхность (поверхность с одинаковой концентрацией рассматриваемой величины) объемной концентрации угольных частиц f .

После выхода в канал частицы под действием инерционных сил движутся по спирали вдоль его

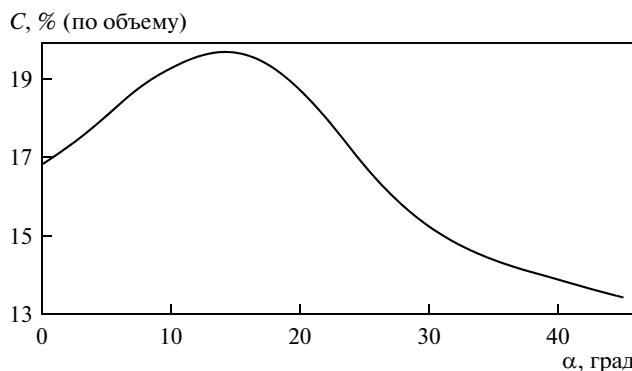


Рис. 11. Зависимость изоповерхности объемной концентрации угольной пыли от угла поворота улиточного аппарата

стенки. Траектории угольных частиц зависят от их размера. Частицы наиболее мелкой фракции довольно равномерно распределены по стенкам канала. При увеличении размера частиц движение пылеугольного потока приобретает вид "жгута".

При сравнении рис. 7, ϑ –10, ϑ можно сделать вывод, что движение основной массы угольной пыли в трубе зависит от угла поворота улиточного аппарата (рис. 11). Это наглядно демонстрируют распределение и изоповерхность объемной концентрации угольной пыли на рис. 7–10. Из рис. 11 видно, что оптимальным вариантом относительно попадания "жгута" аэросмеси в область выхода факела от плазмотрона является угол поворота улиточного аппарата на 15° (см. рис. 8), при котором доля угольной пыли, проходящей через сечение плазмотрона, составляет 19.5% общей массы, подаваемой в улиточный аппарат.

На основании результатов численных расчетов улиточные аппараты трех ПТС на котле БКЗ-420 Алматинской ТЭЦ-2 были повернуты на 15° относительно оси плазмотрона для проведения испытаний плазменного воспламенения высокозольного экибастузского угля. Во время испытаний плазмотроны работали на средней мощности 190 кВт каждый. Расход угольной пыли через каждую ПТС составлял 2.5–3.1 т/ч, расход первичного воздуха – 2240–2640 м³/ч при нормальных условиях [12], расход вторичного воздуха – 40% номинального значения. Результаты испытаний показали, что при оптимальном угле поворота улиточных аппаратов, равном 15° , достигается устойчивое воспламенение пылеугольного факела (рис. 12). Из рисунка видно, что яркость факела при этом увеличилась (температура ядра факела достигала 1022°C), а площадь светящейся части факела возросла примерно в 1.5 раза.

Выводы

1. Применение ПТС на пылеугольных котлах повышает эффективность сжигания энергетиче-



Рис. 12. Пылеугольный факел от ПТС в начальный момент (а) и через 5 мин после подачи угля (б). Температура в ядре факела, °С: а – 835; б – 1022

ских углей при одновременном снижении вредных выбросов.

2. Результаты испытаний ПТС на котле БКЗ-420 Алматинской ТЭЦ-2 в режиме растопки котла из холодного состояния свидетельствуют о возможности воспламенения высокозольных экибастузских углей в холодной топке без подогрева первичного воздуха.

3. Численные исследования вихревой ПТС с подачей аэросмеси через улиточный аппарат показали, что распределение объемной концентрации угольной пыли в месте установки плазмотрона зависит от угла поворота улиточного аппарата.

4. Результаты натурных испытаний подтвердили, что при оптимальном расчетном угле поворота улиточных аппаратов, равном 15° относительно оси плазмотрона, достигается устойчивое плазменное воспламенение пылеугольного факела в топке котла БКЗ-420, так как весь пылеугольный поток проходит через область выхода плазменного факела от плазмотрона.

Список литературы

- Мессерле В.Е., Устименко А.Б. Плазмохимические технологии переработки топлив // Изв. вузов. Химия и химическая технология. 2012. Т. 55. Вып. 4. С. 30–34.
- Моделирование и испытания плазменно-топливных систем на котле БКЗ-420 Алматинской ТЭЦ-2 / В.Е. Мессерле, Е.И. Карпенко, А.Б. Устименко, С.С. Тютебаев, Ю.Е. Карпенко, Т.В. Еремина // Вестник Восточно-Сибирского гос. ун-та технологий и управления. 2012. № 2 (37). С. 21–27.
- Pulverized coal torch combustion in a furnace with plasma-coal system / V.E. Messerle, A.B. Ustimenko,

- A.S. Askarova, A.O. Nagibin // Thermophysics and Aeromechanics. 2010. V. 17. № 3. P. 435–444.
4. **Messerle V.E., Karpenko E.I., Ustimenko A.B.** Plasma assisted power coal combustion in the furnace of utility boiler: numerical modelling and full-scale test // Fuel. June 15, 2014. V. 126. P. 294–300. DOI information: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2014.02.047>
 5. **Tests** of plasma-fuel systems in Almaty TPP-2 / V.E. Messerle, A.B. Ustimenko, S.S. Tyutebaev, V.G. Lukiaschenko, V.N. Shevchenko, I.G. Stepanov, K.A. Umbetkaliev, A.O. Nagibin, V.N. Kozak, O.A. Lavrichshev, E.I. Karpenko, S.V. Lobitsin, Yu.E. Karpenko // Proc. of the 7th Intern. scientific conf. "Modern achievements in physics and physical education". Kazakhstan, Almaty, Oct. 3–5, 2011. P. 3–5.
 6. **Application** of plasma-fuel systems in Almaty TPP-2 / V.E. Messerle, A.B. Ustimenko, V.G. Lukiaschenko, V.N. Shevchenko, I.G. Stepanov, K.A. Umbetkaliev, A.O. Nagibin, V.N. Kozak, E.I. Karpenko, S.V. Lobitsin, Yu.E. Karpenko // Proc. of VI Intern. symposium on theoretical and applied plasmachemistry. Sept. 3–9, 2011. Ivanovo: Ivanovo State Chemical-Engineering University, 2011. P. 392–395.
 7. ANSYS FLUENT User's Guide. Release 14.0. ANSYS, Inc. November 2011.
 8. **Yu-chun Zhang, Zhen-bo Wang, You-hai Jin.** Simulation and experiment of gas-solid flow field in short-contact cyclone reactors // Chem. Eng. Research and Design. 2013. V. 91. Iss. 9. P. 1768–1776.
 9. **CFD modeling** for pipeline flow of fine particles at high concentration / D.R. Kaushal, T. Thinglas, Yuji Tomita, Shigeru Kuchii, Hiroshi Tsukamoto // Intern. J. Multiphase Flow. 2012. V. 43. P. 85–100.
 10. **Sonali Swain, Swati Mohanty.** A 3-dimensional Eulerian–Eulerian CFD simulation of a hydrocyclone // Applied Mathematical Modelling. 2013. V. 37. P. 2921–2932.
 11. **CFD simulation** of the high shear mixing process using kinetic theory of granular flow and frictional stress models / Anders Darelius, Anders Rasmusson, Berend van Wachem, Ingela Niklasson Bjorn, Staffan Folestad // Chem. Eng. Sci. 2008. V. 63. P. 2188–2197.
 12. **О результатах** промышленных испытаний плазменно-топливных систем (ПТС) на пылеугольном котле БКЗ-420-140-7с ст. № 3 Алматинской ТЭЦ-2 / В.Е. Мессерле, А.Б. Устименко, В.Г. Лукьянченко, В.Н. Шевченко, И.Г. Степанов, К.А. Умбеткалиев, В.Н. Козак, А.Л. Синдеев, С.В. Лобычин, Ю.Е. Карпенко, Д.С. Сапрыкин, Р.Д. Тохтаев // Сб. материалов VII Междунар. симпозиума "Горение и плазмохимия". Алматы: КазНУ им. Аль-Фараби, 2013. С. 229–232.