

УДК 621.181:662.9

**Ю.М. МАЦЕВИТЫЙ¹, Д.М. ВАВРИВ², П.М. КАНИЛО¹, В.Е. КОСТИЮК³,
А.Н. КОВАЛЕНКО³**

¹*Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины*

²*Радиоастрономический институт НАН Украины*

³*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗАКРУТКИ ПОТОКА В СВЧ-ПЛАЗМЕННОЙ ГОРЕЛКЕ НА ВЫГОРАНИЕ ПЫЛЕУГОЛЬНОЙ АЭРОСМЕСИ

Представлены экспериментальные данные, полученные на установке, предназначенной для исследования СВЧ-плазменной технологии поджига и сжигания угольной пыли. Выполнено численное исследование течения и горения пылеугольной аэросмеси в СВЧ-горелке при наличии закрутки потока и при ее отсутствии. На основании анализа расчетных данных выдвинута гипотеза о положительном влиянии закрутки потока на поджигающую способность факела СВЧ-горелки.

пылеугольное топливо, термохимическая подготовка, СВЧ-плазма, закрутка потока, горение, вычислительная гидроаэродинамика

Постановка проблемы и ее связь с научными и практическими задачами

Качество углей, поступающих на тепловые электростанции (ТЭС), с каждым годом ухудшается (повышенная зольность, низкий уровень выхода летучих и т.д.). В традиционных котлах ТЭС для обеспечения розжига и стабилизации процессов сжигания таких углей используются все более значительные добавки мазута (до 40% от тепловой мощности котлоагрегата) или природного газа, стоимость которых постоянно растет [1]. Как известно, при совместном сжигании угля с мазутом возрастают: механический недожог топлива (на 15% и более), выбросы оксидов азота (на 40 – 50%), а также – выбросы оксидов серы, оксидов ванадия и канцерогенных углеводородов. Кроме того, современные технологии переработки нефти обеспечивают резкое снижение доли остаточного мазута. Поэтому нарастающий дефицит мазута стимулирует разработку безмазутных технологий розжига и стабилизации горения пылеугольного факела, среди которых перспективными представляются методы предварительной термохимической подготовки (ТХП) к сжиганию пылеугольных топлив. Суть ТХП заключается в высокоскоростном

нагреве (10^4 – 10^5 К/с и более) угольной пыли (всей или ее части) высокотемпературными продуктами сгорания мазута или газа, а также – потоками плазмы.

Одним из важных направлений в решении этой проблемы является применение плазмотермической подготовки пылевидного топлива перед сжиганием. К настоящему времени уже накоплен определенный опыт разработки и применения плазменных горелок (на основе дуговых плазмотронов) для розжига и стабилизации горения угольной пыли [2]. Вместе с тем представляется более перспективным применение в таких горелках СВЧ-плазмотронов, поскольку они не требуют использования специальных угольных электродов и дают возможность получить однородное и легко контролируемое образование плазмы практически в любом месте горелки или топки. СВЧ-энергия, необходимая для поджига плазмы, достаточно просто может быть введена в топочный объем горелки или в канал транспортировки угольной пыли на существующем оборудовании ТЭС без внесения в него существенных конструктивных изменений [3].

Технология применения СВЧ-плазмотронов для розжига и стабилизации горения угольной пыли до последнего времени оставалась малоизученной. В

связи с этим возникла необходимость подробного теоретического и экспериментального исследования особенностей рабочего процесса СВЧ-плазменной горелки, в частности, влияния закрутки потока на выгорание пылеугольной аэросмеси, подвергшейся СВЧ-плазмотермической обработке.

Обзор публикаций и выделение нерешенных частей проблемы. В топливосжигающих устройствах наряду с другими возможностями воздействия на характеристики пламени часто используется закрутка потока [4, 5]. Известно, что закрутка влияет на крупномасштабную структуру течения и пропорционально своей интенсивности изменяет ширину струи, скорость эжекции, размер, форму, устойчивость факела и интенсивность процесса горения. Сложное взаимное влияние плазмы, несущей и дисперсной фаз в закрученном турбулентном реагирующем потоке пылеугольной аэросмеси объективно ограничивает информативность экспериментальных методов исследования рабочего процесса СВЧ-плазменной горелки.

В настоящее время численный эксперимент становится одним из наиболее экономичных и удобных способов детального анализа сложных физических и химических процессов. При моделировании плазменных горелок на основе дуговых плазмотронов авторами работы [6] с помощью нульмерной термодинамической модели рассчитаны зависимости состава продуктов активированной плазмой пылеугольного потока от температуры, давления и мощности плазменного источника. Авторы работы [7] выполнили одномерные кинетические расчёты горелки-муфеля по ступенчатой методике. Авторы работы [8] выполнили моделирование процесса термохимической подготовки топлива в реакторе с электродуговым плазмотроном в двухмерной постановке без закрутки. При этом наличие плазмы учитывалось только постановкой соответствующих температурных граничных условий на входе в реактор, а при сравнении с экспериментальными

данными в качестве аналога источника плазмы использовалась газовая горелка.

Рабочий объем СВЧ-плазменной горелки характеризуется высокой неоднородностью температурного поля из-за присутствия СВЧ-разряда, вследствие чего допущения об одномерности или заданном профиле температуры на входе становятся неприемлемыми.

Цель данной статьи состоит в исследовании закономерностей влияния закрутки потока в СВЧ-плазменной горелке на выгорание пылеугольной аэросмеси с учетом локальной неоднородности течения.

Изложение основного материала исследования с обоснованием полученных результатов

Ниже представлены экспериментальные и расчетные данные по СВЧ-плазмотермохимической подготовке пылевидного бурого угля с закруткой пылеугольной аэросмеси без нее. Схема экспериментальной установки для указанных исследований представлена на рис. 1.

Закрутка потока достигалась установкой в канал подачи пылеугольной аэросмеси лопаточного завихрителя (рис. 2).

Применение СВЧ-плазмы, реализуемой в потоке пылеугольной аэросмеси, с высокой концентрацией энергии и наличием в ней химически активных центров (атомов, радикалов, ионов и электронного газа) способствует энергетически более эффективному, чем в традиционных огневых методах и при использовании воздушно-электродуговой плазмы, нагреву и термохимическим преобразованиям угольных частиц. При этом угольные частицы в СВЧ-плазме, термодинамическая температура которой достигает ~ 5000 К, претерпевают тепловой удар, в результате которого частицы дробятся на десятки мелких осколков, а минеральные составляющие при этом отслаиваются (рис. 3), что приводит к увеличению реакционной способности топлива.

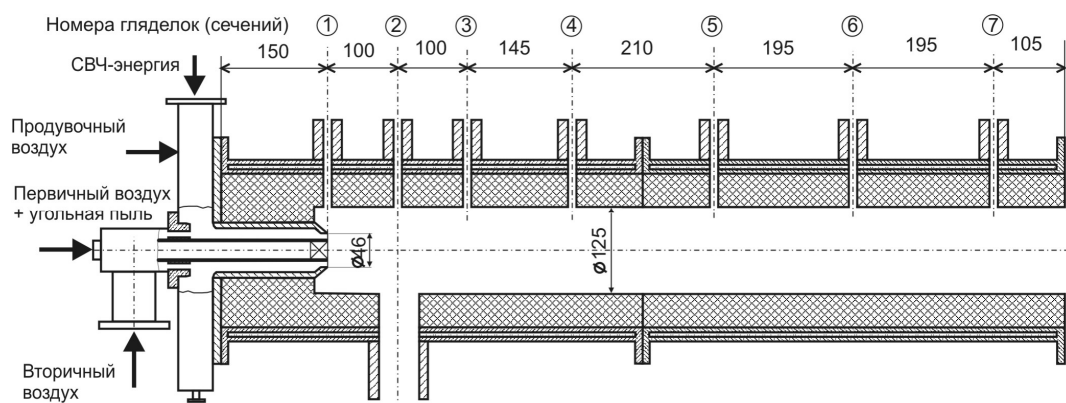


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

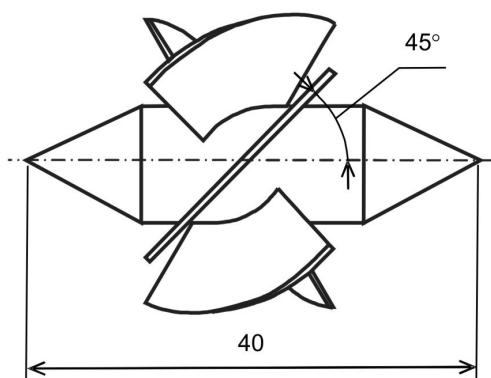


Рис. 2. Схема лопаточного завихрителя

Тепловой взрыв пылеугольных частиц многократно ускоряет выход летучих за счет более развитой поверхности реагирования и появления очень мелких частиц, которые нагреваются до температуры выделения летучих гораздо быстрее, чем крупные частицы. Далее, на стадии газофазных реакций, заметно интенсифицирующее воздействие термоэлектрической составляющей СВЧ-плазмы, проявляющееся в ускорении химических превращений за счет перехода к реакциям (с электронами и ионами) с более низкими значениями энергии активации. Например, при переходе от молекулярных к атомарным формам кислорода указанный параметр снижается на порядок и более.

На рис. 4 представлен снимок СВЧ-плазмопылеугольно-воздушного факела с закруткой аэро-смеси на выходе из плазмотрона. На выходе из плазмотрона происходит расслоение разряда на множество плазменных шнуров, которые прецесси-

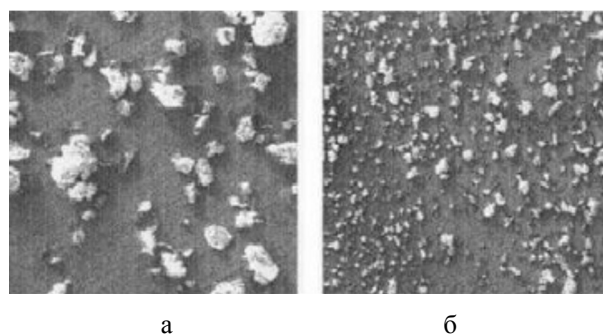


Рис. 3. Частицы угольной пыли отобранные из потока в сечении 2 (см. рис.1): а – при отсутствии СВЧ-плазмы; б – при наличии СВЧ-плазмы (снимки получены на растровом электронном микроскопе)

руют вокруг оси. Это явление может быть связано с развитием температурной неоднородности факела.

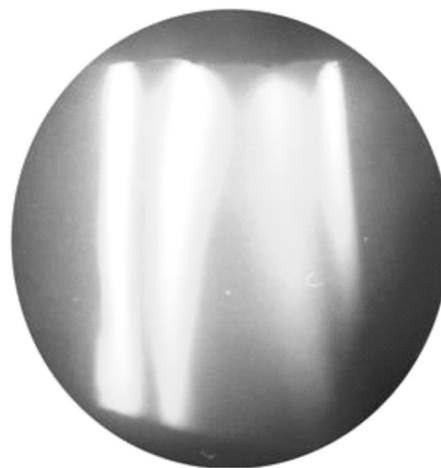


Рис. 4. СВЧ-разряд в закрученном потоке пылеугольной аэро-смеси

На рис. 5 приведены измеренные пирометром уровни температур угольных частиц за СВЧ-плазмой (сечение 2, рис. 1), полученные на экспериментальной установке на режиме: расход уголь-

ной пыли – 7 г/с, температура воздуха транспортирующего угольную пыль – 370 К, суммарный коэффициент избытка воздуха – 0,35.

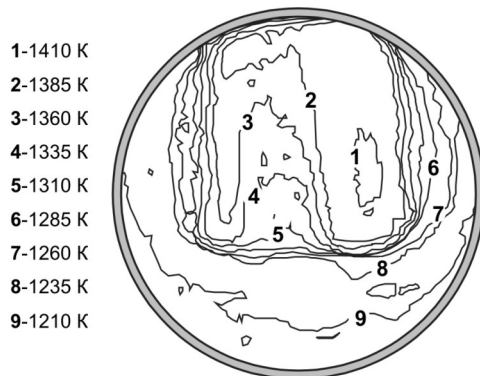


Рис. 5. Распределение температур угольных частиц за СВЧ-плазмой в сечении 2 (см. рис.1)

Приведенные на рис. 5 данные подтверждают неоднородность уровней температур угольных частиц на выходе из зоны СВЧ-плазмы.

В табл. 1 приведены технические характеристики экспериментальной СВЧ-горелки и исходные данные для ее численного моделирования.

Таблица 1
Исходные данные расчета СВЧ-горелки

Тепловая мощность СВЧ-плазмы, кВт	4,3
Объем СВЧ-плазмы, м ³	4,6·10 ⁻⁶
Удельная тепловая мощность СВЧ-плазмы, кВт/м ³	9,4·10 ⁵
Массовый расход частиц угля, г/с	4,3
Массовый расход первичного воздуха, г/с	7,1
Массовый расход вторичного воздуха, г/с	4,5
Массовый расход продувочного воздуха, г/с	5,0
Коэффициент избытка воздуха	0,56
Температура первичного воздуха, К	392
Температура вторичного воздуха, К	340
Температура продувочного воздуха, К	340
Начальная температура частиц угля, К	392
Минимальный диаметр частиц угля, мкм	20
Максимальный диаметр частиц угля, мкм	400
Медианный диаметр частиц угля, мкм	198
Показатель степени в формуле Розина-Раммлера	2,47

При математическом описании течения и горения пылеугольной аэросмеси в СВЧ-горелке принимались следующие основные допущения: течение несущей газовой среды квазистационарное, турбулентное, несжимаемое, химически реагирующее; плазма моделируется как локальный

тепловой источник заданной мощности; плавучестью, объемной вязкостью, вязким нагревом и лучистым теплообменом пренебрегаем; угольные частицы сферические; объемом, занимаемым частицами, пренебрегаем; горение угольных частиц включает процессы выхода и воспламенения летучих и выгорания коксового остатка; турбулентность изотропная; турбулентное рассеивание частиц отсутствует; частицы не оказывают влияния на параметры турбулентности.

Пылеугольная аэросмесь моделировалась как двухфазная смесь с эйлеровым описанием газовой фазы (сплошная среда) и лагранжевым описанием движения угольных частиц (траекторная модель). Взаимодействие фаз учитывалось на основе модели «частица – источник в ячейке» [9], в соответствии с которой присутствие частицы в потоке проявляется через дополнительные источники в уравнениях сохранения сплошной фазы.

При сделанных выше допущениях поведение газовой фазы может быть описано системой дифференциальных уравнений в частных производных, состоящей из осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, двух уравнений дифференциальной модели турбулентности k-ε типа [10] и уравнений массовой доли химических компонентов вида:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = S_m; \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial u_j u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} = S_{fi}, \quad j = 1, 2, 3; \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial u_j h}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_m}{Pr_m} \right) \frac{\partial h}{\partial x_j} = S_{q1} + S_{q2}; \quad (3)$$

$$\rho \frac{\partial u_j k}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu + \frac{\mu_m}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} - \rho(G - \epsilon) = 0; \quad (4)$$

$$\rho \frac{\partial u_j \epsilon}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu + \frac{\mu_m}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} - \rho(C_{\epsilon 1} G - C_{\epsilon 2} \epsilon) \frac{\epsilon}{k} = 0; \quad (5)$$

$$\rho \frac{\partial u_j Y_i}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_m}{Sc_m} \right) \frac{\partial Y_i}{\partial x_j} = R_i + S_i, \quad (6)$$

где u_j – декартовы компоненты вектора осредненной скорости газа;

x_j – декартовы координаты;

S_m – источник массы, обусловленный межфазным взаимодействием;

ρ – плотность газа;

p – давление газа;

τ_{ij} – компоненты тензора напряжений, определяемые выражением

$$\tau_{ij} = (\mu + \mu_m) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad (7)$$

μ – динамическая вязкость;

μ_m – турбулентная вязкость, определяемая по формуле Колмогорова – Прандтля [11]

$$\mu_m = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (8)$$

C_μ – эмпирический коэффициент;

k – кинетическая энергия турбулентности;

ε – удельная скорость диссипации кинетической энергии турбулентности;

S_{ff} – источник количества движения, обусловленный межфазным взаимодействием;

h – удельная энтальпия, определяемая выражением

$$h = \sum_i Y_i \left(\Delta h_{fi}^0 + \int_{T^0}^T c_{pi}(T) dT \right), \quad (9)$$

Y_i – массовая доля химического компонента i ;

Δh_{fi}^0 – удельная энтальпия образования химического компонента i ;

T – температура газа;

T^0 – стандартная температура;

c_{pi} – удельная теплоемкость химического компонента i при постоянном давлении;

Pr – число Прандтля;

Pr_m – турбулентное число Прандтля;

S_{q1}, S_{q2} – источники теплоты, обусловленные СВЧ-плазмой и межфазным взаимодействием с частицами соответственно;

$\sigma_k, \sigma_\varepsilon, C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}$ – эмпирические коэффициенты;

G – член, характеризующий генерацию кинетической энергии турбулентности за счет сдвиговых напряжений, определяемый выражением

$$G = \mu_m \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right); \quad (10)$$

Sc – число Шмидта;

Sc_m – турбулентное число Шмидта;

R_i – массовая скорость образования (расходования) химического компонента i , определяемая выражением

$$R_i = \sum_k R_{ik}, \quad (11)$$

R_{ik} – массовая скорость образования (расходования) компонента i в реакции k ;

S_i – источник массовой доли химического компонента i , обусловленный межфазным взаимодействием.

Система уравнений (1) – (6) является не замкнутой. Необходимая для ее замыкания связь между термодинамическими переменными p , T и ρ устанавливается уравнением состояния смеси идеальных газов

$$p = R\rho T \sum_i \frac{Y_i}{M_i}, \quad (12)$$

где R – универсальная газовая постоянная;

M_i – молекулярная масса химического компонента i .

Для определения источников членов S_m в уравнении (1), S_{ff} – в уравнении (2), S_{q2} – в уравнении (3) и S_i – в уравнении (6) используется модель межфазного взаимодействия. Для определения источников члена S_{q1} в уравнении (3) используется модель СВЧ-плазмы. Для определения источников члена R_i в уравнении (6) используется модель горения летучих.

Зависимость теплофизических свойств компонентов газовой фазы от температуры учитывалась при помощи аппроксимационных формул.

Движение и тепломассообмен дисперсной фазы (угольной пыли) рассматривалось в лагранжевом описании. Весь диапазон начальных размеров угольных частиц делился на конечное число дискретных интервалов; каждый из них представляется средним диаметром, для которого выполняется траекторный расчет. При этом каждая моделируемая частица – это «пакет» частиц с одинаковыми траекториями. Распределение частиц по размерам описывалось формулой Розина–Раммлера

$$Y_d = e^{-(d/\bar{d})^n}, \quad (13)$$

где Y_d – массовая доля частиц с диаметром, большим d ;

\bar{d} – медианный диаметр частиц;

n – параметр распределения.

Траектории частиц моделировались путем интегрирования уравнения баланса сил, действующих на частицу, которое уравнивает инерцию частицы с силой аэродинамического сопротивления

$$\frac{du_{pj}}{dt} = -\frac{3\rho C_R}{4\rho_p d_p} (u_{pj} - u_j) \sqrt{\sum_j (u_{pj} - u_j)^2}, \quad (14)$$

$$j = 1, 2, 3,$$

где u_{pj} – декартовы компоненты вектора скорости частицы;

t – время;

ρ – плотность газа;

C_R – коэффициент аэродинамического сопротивления частицы;

Re_p – относительное число Рейнольдса частицы;

ρ_p – плотность частицы;

d_p – диаметр частицы;

u_j – декартовы компоненты вектора скорости газа.

Для вычисления C_R использовалась эмпирическая зависимость $C_R(Re_p)$ для одиночной сферы (Re_p – относительное число Рейнольдса частицы).

Тепломассообмен угольных частиц описывается тремя моделями [12]: моделью теплообмена инертной частицы; моделью выхода летучих и моделью выгорания коксового остатка.

Модель теплообмена инертной частицы применяется до тех пор, пока температура частицы T_p не превысит температуру выхода летучих T_v . При этом температура частицы полагается постоянной по объему и изменяется в соответствии с балансом тепла, определяемым уравнением:

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = \alpha S_p (T_\infty - T_p), \quad (15)$$

где m_p – масса частицы;

c_p – удельная теплоемкость частицы;

T_p – температура частицы;

t – время;

α – коэффициент теплоотдачи;

S_p – площадь поверхности частицы;

T_∞ – локальная температура газа.

Модель выхода летучих используется, когда температура угольной частицы достигает температуры начала выхода летучих T_v и остается в силе до тех пор, пока масса частицы m_p превышает начальную массу нелетучих компонентов в частице

$$T_p \geq T_v \text{ и } m_p > (1 - f_{v,0})m_{p,0},$$

где $f_{v,0}$ – массовая доля летучих, изначально присутствующих в частице.

Тепломассообмен частицы во время выхода летучих описывается системой уравнений

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = \alpha S_p (T_\infty - T_p) + \frac{dm_p}{dt} h_v; \quad (16)$$

$$\frac{dm_p}{dt} = -f_{v,0} m_{p,0} K_v, \quad (17)$$

где h_v – удельная теплота образования летучих;

$m_{p,0}$ – начальная масса частицы;

K_v – константа скорости выхода летучих.

Модель выгорания коксового остатка применяется по окончании выхода летучих и до тех пор, пока не выгорит весь коксовый остаток:

$$(1 - f_{v,0} - f_k)m_{p,0} < m_p < (1 - f_{v,0})m_{p,0},$$

где f_k – массовая доля кокса изначально присутствующего в частице.

Тепломассообмен частицы при выгорании коксового остатка описывается системой уравнений

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = \alpha S_p (T_\infty - T_p) - f_h \frac{dm_p}{dt} H_u, \quad (18)$$

$$\frac{dm_p}{dt} = -4\pi d_p D_{i,m} \frac{Y_{O_2} T_\infty \rho}{S_\kappa (T_p + T_\infty)}, \quad (19)$$

где f_h – эмпирический коэффициент;

H_u – удельная теплота сгорания кокса;

$D_{i,m}$ – коэффициент бинарной диффузии кислорода в азоте;

Y_{O_2} – локальная массовая доля кислорода в газе;

$m_{p,0}$ – начальная масса частицы;

S_κ – стехиометрический коэффициент.

После того, как весь коксовый остаток выгорит, частица состоит из зольного остатка, и для нее справедлива модель теплообмена инертной частицы – уравнение (15).

Во время расчета траекторий частиц отслеживаются импульс, энергия и масса, приобретаемые или теряемые потоком частиц, следующих вдоль данной траектории. Затем эти значения включаются в расчет непрерывной фазы. Таким образом, учитывается обратное влияние дискретной фазы на континуум. Это двухстороннее межфазное взаимодействие учитывается поочередным решением уравнений дисперсной и непрерывной фаз до тех пор, пока решения обеих фаз не установятся.

На границах расчетной области задаются следующие граничные условия непрерывной фазы: на входных границах задаются значения независимых переменных; на стенках задаются условия прилипания; на выходной границе принимаются «мягкие» граничные условия. Для описания турбулентного пограничного слоя используются функции стенки.

При моделировании дискретной фазы задаются начальные условия для каждого «пакета» частиц: положение частицы (координаты x_j); ее скорость (компоненты u_{pj}); диаметр; температура; массовый

расход частиц, следующих вдоль траектории. Предполагается, что при столкновении со стенкой частица упруго отражается от нее.

Дискретизация исходных дифференциальных уравнений в частных производных (1) – (5) производилась методом контрольных объемов с применением схемы второго порядка точности для аппроксимации конвективных членов. Решение, получающихся в результате систем линейных алгебраических уравнений, выполнялось методом Гаусса-Зейделя с использованием алгоритма SIMPLE [13]. Интегрирование системы обыкновенных дифференциальных уравнений (14) – (19) осуществлялось методом Рунге-Кутты второго порядка с переменным шагом по времени. Решение отыскивалось в осесимметричной расчетной области, соответствующей проточной части экспериментальной установки (см. рис. 1). Расчетная область покрывалась неравномерной расчетной сеткой, включавшей 30 тысяч контрольных ячеек.

В табл. 2 приведено сравнение рассчитанных и измеренных при помощи хромель-копелевой термопары значений температуры газа на оси СВЧ-горелки в сечении 7 (см. рис. 1) при наличии закрутки потока первичного воздуха и без нее.

Удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных данных свидетельствует в пользу адекватности разработанной численной модели течения и горения пылеугольной аэросмеси.

Таблица 2

Температура газа (К) на оси СВЧ-горелки в сечении 7

	Закрутка есть	Закрутки нет
Расчет	1269	1252
Эксперимент	1143	1203
Различие	11%	4%

На рис. 6 – 13 представлены расчетные данные о распределении локальных параметров пылеугольной аэросмеси в рабочем объеме СВЧ-горелки при наличии и при отсутствии закрутки потока первичного воздуха.

Из рис. 6 видно, что закрутка потока первичного воздуха не приводит к качественным изменениям общей структуры течения газовой фазы в рабочем объеме СВЧ-горелки. Как при наличии лопаточного

завихрителя, так и без него в потоке имеются две зоны: основное струйное течение в приосевой области и локальное циркуляционное течение за обратным уступом в головной части горелки.

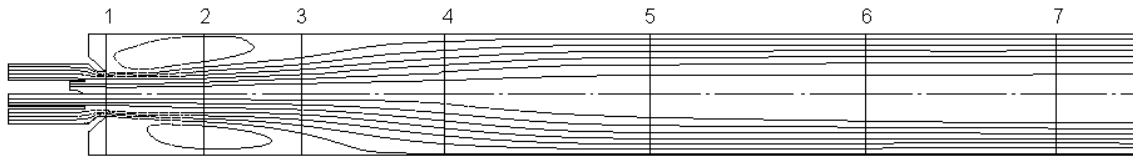


Рис. 6. Линии тока газа:
вверху – при наличии лопаточного завихрителя; внизу – при отсутствии лопаточного завихрителя

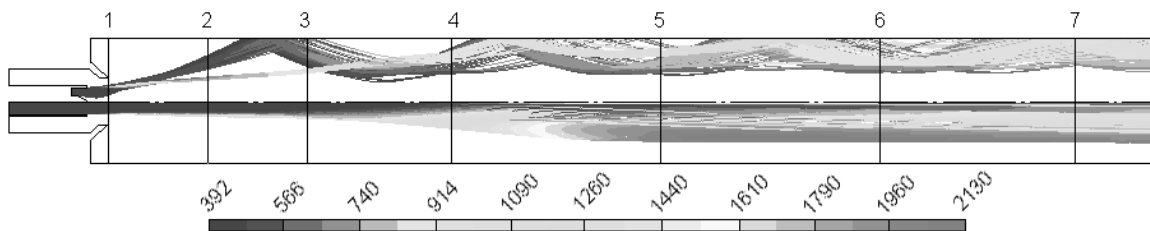


Рис. 7. Траектории частиц угля, окрашенные в соответствии с их температурой (К):
вверху – при наличии лопаточного завихрителя; внизу – при отсутствии лопаточного завихрителя

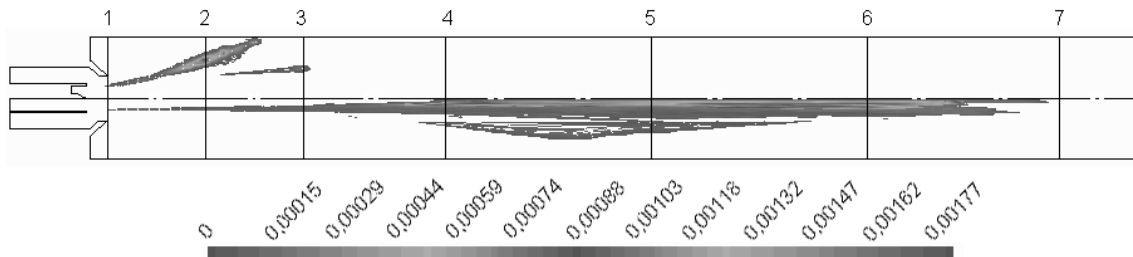


Рис. 8. Изолинии скорости выхода летучих (г/с):
вверху – при наличии лопаточного завихрителя; внизу – при отсутствии лопаточного завихрителя

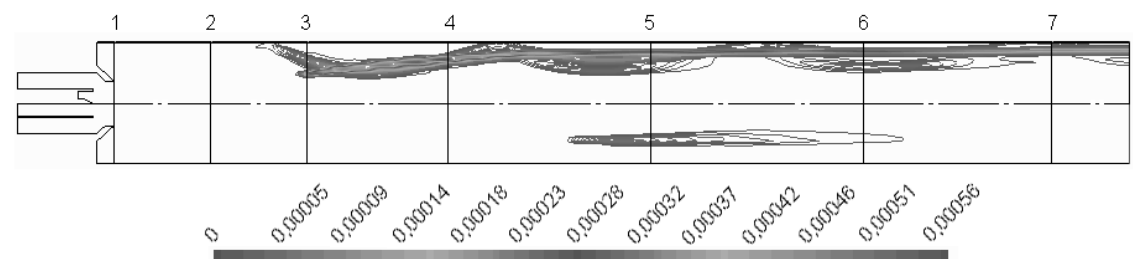


Рис. 9. Изолинии скорости выгорания коксового остатка (г/с):
вверху – при наличии лопаточного завихрителя; внизу – при отсутствии лопаточного завихрителя

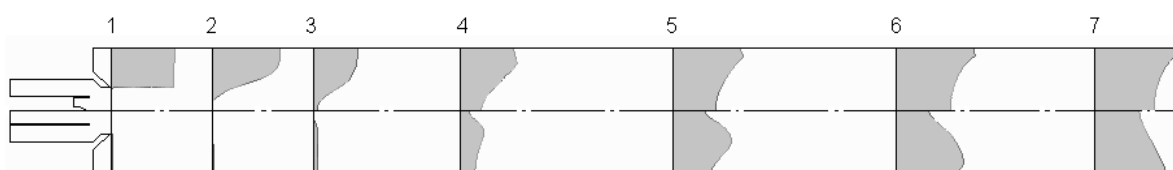


Рис. 10. Эпюры концентрации CO_2 в сечениях 1 – 7:
вверху – при наличии лопаточного завихрителя; внизу – при отсутствии лопаточного завихрителя

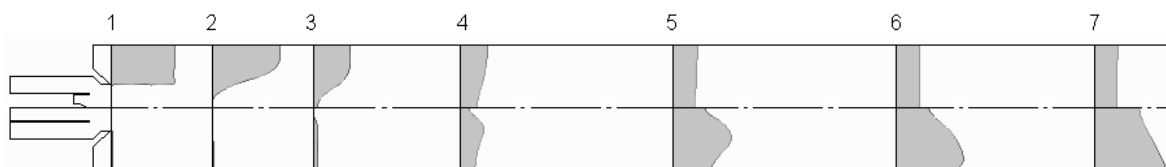


Рис. 11. Эпюры концентрации H_2O в сечениях 1 – 7:
вверху – при наличии лопаточного завихрителя; внизу – при отсутствии лопаточного завихрителя



Рис. 12. Эпюры концентрации O_2 в сечениях 1 – 7:
вверху – при наличии лопаточного завихрителя; внизу – при отсутствии лопаточного завихрителя

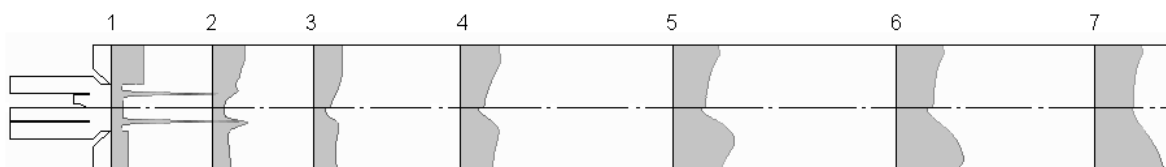


Рис. 13. Эпюры температуры газа в сечениях 1 – 7:
вверху – при наличии лопаточного завихрителя; внизу – при отсутствии лопаточного завихрителя

В то же время, наличие закрутки качественно изменяет поведение дисперсной фазы (рис. 7). При отсутствии закрутки вся угольная пыль концентрируется в приосевой области, не взаимодействуя с боковыми стенками горелки.

При наличии закрутки возникает центробежная сила, отклоняющая частицы в радиальном направлении. Это приводит к столкновению частиц с боковыми стенками.

Отразившись от боковых стенок, частицы устремляются к оси горелки, где располагается образованный завихрителем «вихревой шнур». Попав в область более интенсивной закрутки, частицы под воздействием центробежных сил снова отклоняются к боковым стенкам. Процесс повторяется многократно, пока частицы не покинут рабочую область. При этом частицы разных диаметров, отличаясь по инерционности, следуют по различным траекториям.

Сильное влияние закрутки на траектории частиц приводит к существенно различной локализации зон

выхода летучих и зон выгорания коксового остатка при наличии закрутки и без нее, что видно из рис. 8 и 9.

Обнаруженные особенности рабочего процесса СВЧ-горелки обуславливают различия в пространственном распределении продуктов сгорания и кислорода (рис. 10 – 12). При наличии закрутки концентрации CO_2 и H_2O в головной части горелки максимальны, а при отсутствии – минимальны. Для O_2 имеет место обратная картина. При наличии закрутки концентрация H_2O в выходной части горелки ниже, чем при ее отсутствии, и она более равномерно распределена по радиусу, тогда как концентрации CO_2 в обоих случаях имеют близкие значения. При наличии закрутки на выходе из горелки имеется кислород, тогда как при отсутствии закрутки его там практически нет.

Влияние закрутки на температуру газа слабее, но также имеет место (рис. 13): при наличии закрутки температура газа в выходной части горелки несколько ниже и распределена более равномерно, чем при ее отсутствии.

Выводы и перспективы дальнейших разработок в данном направлении

Исходя из вышеизложенного, можно сделать следующие выводы. Закрутка пылеугольной аэро-смеси практически не приводит к качественным изменениям общей структуры течения газовой фазы в рабочем объеме СВЧ-горелки, однако качественно изменяет поведение дисперсной фазы. Сильное влияние закрутки на траектории угольных частиц приводит к существенной локализации зон выхода летучих и выгорания коксового остатка непосредственно за СВЧ-плазмой. Показано, что при наличии закрутки температура продуктов плазмотермической переработки пылеугольной аэро-смеси на выходе из СВЧ-горелки распределена более равномерно, чем при ее отсутствии, а различие в расчетных и экспериментально полученных данных не превышает 11 %, что свидетельствует об адекватности разработанной численной модели течения и СВЧ-плазмотермохимической переработки пылеугольной аэро-смеси в исследуемой СВЧ-плазменной горелке.

Перспективы дальнейших исследований авторы видят в экспериментальном подтверждении гипотезы о положительном влиянии закрутки пылеугольной аэро-смеси на поджигающую способность факела СВЧ-плазменной горелки и дальнейшем совершенствовании численной модели путем использования более точных моделей СВЧ-плазмы, турбулентности и горения.

Литература

1. Корчевой Ю.П., Майстренко А.Ю., Шидловский А.К., Яцкевич С.В. Современное состояние угольных электростанций Украины и перспективы их развития // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 1996. – № 3. – С. 3 – 8.
2. Карпенко Е.И., Мессерле В.Е. Введение в плазменно-энергетические технологии использования твердых топлив. – Новосибирск: Наука, 1997. – 119 с.
3. Ваврив Д.М., Канило П.М., Казанцев В.И., Расюк Н.И. и др. Исследование СВЧ-плазменной технологии поджига низкосортных углей на экспериментальной установке // Труды междунар. науч.-

техн. конф. «Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования». – Х.: ИПМаш НАНУ, 2003. – С. 265 – 269.

4. Хзмалян Д.М. Теория топочных процессов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.

5. Закрученные потоки / А. Гупта, Д. Лилли, Н. Сайред. – М.: Мир, 1987. – 588 с.

6. Математическое моделирование электротермохимической подготовки энергетических углей к сжиганию с учетом образования оксидов азота / В.Е. Мессерле, З.Б. Сакипов, А.Б. Устименко и др. // Материалы Всесоюзной науч.-техн. конф. «Математическое моделирование в энергетике». – К.: ИПМЭ АН УССР, 1990. – С. 265 – 269.

7. Karpenko E.I., Messerle V.E., Ustimenko A.V. 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.

8. Булат А.Ф., Волошин А.И., Кудинов П.И. Технология плазменной подготовки пылеугольного топлива // Труды III российской национальной конференции по теплообмену. – М.: Издательство МЭИ, 2002. – Т. 3. – С. 173 – 176.

9. Кроу. Численные модели течений газа с небольшим содержанием частиц // Теоретические основы инженерных расчетов. – 1982. – № 32. – С. 114 – 122.

10. Launder B.E., Spalding D.B. Lectures in Mathematical Models of Turbulence. Academic Press, London, England, 1972.

11. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1978. – 736 с.

12. Волков Э.П., Зайчик Л.И., Першуков В.А. Моделирование горения твердого топлива. – М.: Наука, 1994. – 320 с.

13. Vandoormaal J.P., Raithby G.D. Enhancements of the SIMPLE Method for Predicting Incompressible Fluid Flows. // Numer. Heat Transfer. – 1984. – No. 7. – P. 147 – 163.

Поступила в редакцию 20.05.2005

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Н.Я. Говорущенко, Национальный автомобильно-дорожный университет, Харьков.