

Одно из перспективных направлений, для которого предложенный метод, по-видимому, является эффективным - моделирование течений газа из частиц, принадлежащих различным веществам, которые могут вступать в химические реакции. Это можно учесть на микроуровне введением нового типа событий, зависящих от переданного импульса и приводящих к изменению количества частиц и их энергий.

Список литературы:

1. Харлоу Ф.Х. Численный метод крупных частиц в ячейках для задач гидродинамики // Вычислительные методы в гидродинамике / Под ред. Б. Олдер, С. Фернбах, М. Ротенберг. – М.: Мир, 1967. – 384 с. 2. Берд Г. Молекулярная газовая динамика. М.: Мир, 1981. – 313 с. 3. Хокни Р., Иствуд Дж. Численное моделирование методом частиц. – М.: Мир, 1987. – 638 с. 4. Чернышев Ю.К. Методы снятия информации о состоянии газового потока в процессе молекулярно-динамического моделирования // Совершенствование энергетических и транспортных турбоустановок методами математического моделиро-

вания, вычислительного и физического экспериментов: Междунар. науч.-техн. конф. (26-29 сент. 1994 г.). – Змиев, 1994. – Ч. 1. – С. 39 – 40. 5. Чернышев Ю.К. Прямое моделирование течения газа в каналах сложной формы при малых числах Кнудсена // Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования: Междунар. науч.-техн. конф. – Харьков: Ин-т проблем машиностроения НАН Украины, 1997. – С. 238 – 240. 6. Левин С.С., Чернышев Ю.К. Алгоритмизация прямого моделирования методом частиц течения газа по каналам сложной формы при малых числах Кнудсена // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Харьков: ХАИ, 2002. – Вып. 14. – С. 54 – 60. 7. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р. Алгоритмы. Построение и анализ. – М.: МЦНМО, 2000. – 955 с. 8. Белоцерковский О.М., Андрущенко В.А., Шевелев Ю.Д. Динамика пространственных вихревых течений в неоднородной атмосфере. Вычислительный эксперимент. – М.: «Янус-К», 2000. – 456 с.

УДК 621.181:662.9

П.М. Канило, д-р техн. наук Н.И. Расюк, канд. техн. наук, А.В. Тымчик, канд. техн. наук, К.В. Костенко, инж., В.Е. Костюк, канд. техн. наук, А.Н. Коваленко, асп.

ОТРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ СВЧ-ПЛАЗМЕННОЙ ГОРЕЛКИ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕЧЕНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОЙ АЭРОСМЕСИ

Введение

Уголь – главный источник энергоресурсов в топливно-энергетическом комплексе Украины. В последнее время, в связи с изменением технологии добычи угля и выработкой запасов на существующих шахтах, качество поступающего на электростанции угля резко ухудшилось [1]. Одним из перспективных путей решения проблемы сжигания низкокачествен-

ных углей, в том числе с низким содержанием летучих, является применение СВЧ-плазмотронов для розжига и стабилизации горения угольной пыли и вывода шлака.

Формулирование проблемы

Цель исследований, результаты которых представлены в данной работе, – отработка конструкции пылеугольного горелочного устройства с СВЧ-

плазмотроном на основе исследования особенностей процесса течения пылеугольной аэросмеси методами вычислительной гидроаэродинамики.

Схема исходного варианта горелочного устройства представлена на рис. 1.

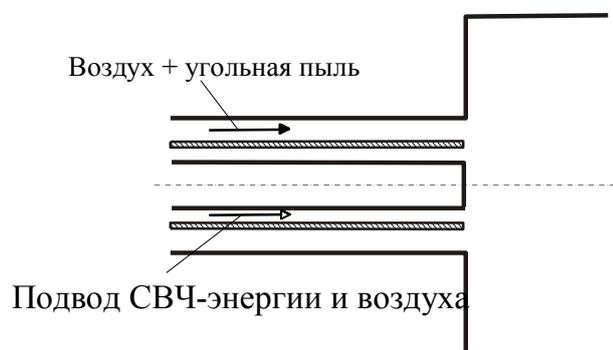


Рис. 1. Схема исходного варианта горелочного устройства

По результатам экспериментальных исследований, приведенных в работе [2], СВЧ-разряд представляет собой плазменный факел ослепительно белого цвета, цилиндрической формы, локализованный на оси топочного объема горелки. При характерных для СВЧ-плазмотронов малых временах контакта аэросмеси и плазмы (~ 1 мс) [3], принципиальным недостатком исходного варианта горелочного устройства является то, что угольная пыль, подаваемая через наружный контур, не попадает в разрядный объем. Конструктивным решением, направленным на устранение указанного недостатка, может быть установка в наружном контуре горелочного устройства специального дефлектора. Дефлектор делит поток пылеугольной аэросмеси на две части, одна из которых направляется в область СВЧ-разряда. Угол наклона концевой кромки дефлектора необходимо подобрать таким образом, чтобы частицы угля гарантированно попадали в разрядный объем.

Траектории угольных частиц определяются структурой двухфазного полидисперсного потока, которая, в свою очередь, сильно зависит от конструктивных и режимных параметров горелочного устройства.

Решение проблемы

Физическая и математическая модели

Для исследования процесса течения пылеугольной аэросмеси в горелочном устройстве были разработаны физическая и математическая модели движения двухфазной полидисперсной нереагирующей среды (воздух + угольная пыль).

В физической модели, разработанной для описания движения двухфазной среды, приняты следующие основные допущения: течение несущей воздушной среды квазистационарное, турбулентное, несжимаемое, изотермическое; гравитация отсутствует; частицы сферические; турбулентность изотропная; турбулентное рассеивание частиц отсутствует; частицы не оказывают влияния на параметры турбулентности.

Течение в горелочном устройстве моделируется как двухфазная смесь с эйлеровым описанием газовой фазы (сплошная среда) и лагранжевым описанием движения частиц (траекторная модель). Взаимодействие фаз учитывается на основе модели "частица – источник в ячейке" [4], в соответствии с которой присутствие частицы в потоке проявляется через дополнительные источники импульса в уравнениях сплошной фазы.

Двухмерное осесимметричное квазистационарное турбулентное течение непрерывной среды в горелочном устройстве моделируется полной системой осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, замыкаемых k - ε моделью турбулентности

$$\nabla(V) = 0, \quad (1)$$

$$\rho(\nabla V)V = -\nabla p + \nabla[\nabla(\mu_{\text{эф}}V)] + S_F, \quad (2)$$

$$\rho(\nabla V)k = \nabla[(\mu_{\text{эф}} / \sigma_k) \nabla k] + S_k, \quad (3)$$

$$\rho(\nabla V)\varepsilon = \nabla[(\mu_{\text{эф}} / \sigma_\varepsilon) \nabla \varepsilon] + S_\varepsilon, \quad (4)$$

где V – скорость газа;

ρ – плотность газа;

p – давление;

$\mu_{\text{эф}}$ – коэффициент эффективной вязкости;

k – кинетическая энергия турбулентности;

$\sigma_k=1,0$ и $\sigma_\varepsilon=1,22$ – эмпирические коэффициенты;

ε – скорость диссипации кинетической энергии турбулентности;

S_k и S_ε – источниковые члены, определяемые выражениями

$$S_k = G - C_D \rho \varepsilon, \quad (5)$$

$$S_\varepsilon = C_1 \frac{\varepsilon}{k} G - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (6)$$

где $C_D = 1,00$, $C_1 = 1,44$, $C_2 = 1,92$ – эмпирические коэффициенты;

G – член, характеризующий генерацию кинетической энергии турбулентности, обусловленную градиентами осредненных скоростей.

$$G = \mu_T \frac{\partial \tilde{v}_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \tilde{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{v}_j}{\partial x_i} \right). \quad (7)$$

В уравнениях (2)-(4) $\mu_{эф} = \mu + \mu_T$ – коэффициент эффективной вязкости,

где μ – коэффициент динамической вязкости газовой смеси;

$\mu_T = C_\mu \rho k^2 / \varepsilon$ – коэффициент турбулентной вязкости ($C_\mu = 0,09$ – эмпирический коэффициент).

Источниковый член S_F в уравнении сохранения импульса (2) включает обмен импульсом между непрерывной и дисперсной фазой.

Движение дисперсной фазы (частиц угля) рассматривается в лагранжевом описании. Весь диапазон начальных размеров частиц делится 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 описывается формулой Розина-Раммлера

$$Y_d = e^{-(d/\bar{d})^n}, \quad (8)$$

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

\bar{d} – константа размера;

n – параметр распределения.

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

$$m_p \frac{d\bar{u}_p}{dt} = 0,5 C_R S_p \rho |\bar{v} - \bar{u}_p| (\bar{v} - \bar{u}_p) \quad (9)$$

Здесь $m_p = \rho_p \pi d_p^2 / 6$ – масса частицы,

ρ_p – плотность частицы,

\bar{u}_p – скорость частицы,

$S_p = 0,25 \pi d_p^2$ – площадь миделевого сечения частицы,

d_p – диаметр частицы,

ρ – плотность газа,

\bar{v} – скорость газа.

Коэффициент аэродинамического сопротивления частицы C_R рассчитывается по эмпирической зависимости для одиночной сферы.

Во время расчета траекторий частиц отслеживается импульс, приобретаемый или теряемый 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 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_i); ее скорость (компоненты $\bar{u}_{p i}$); диаметр; массовый расход частиц, следующих вдоль траектории. Предполагается, что при столкновении со стенкой частица упруго отражается от нее.

Метод численного решения

Дискретизация исходных дифференциальных уравнений в частных производных (1)-(4) произво-

дится методом конечных объемов с применением схемы второго порядка точности для аппроксимации конвективных членов. Решение, получающихся в результате систем линейных алгебраических уравнений, выполняется методом Гаусса-Зейделя с использованием алгоритма SIMPLE [5]. Интегрирование системы обыкновенных дифференциальных уравнений (9) осуществляется методом Рунге-Кутты второ-

го порядка с переменным шагом по времени.

Решение отыскивалось в осесимметричной расчетной области, изображенной на рис. 2 и рис. 4, дополненной успокоительным участком протяженностью шесть калибров. Расчетная область покрывалась неравномерной расчетной сеткой, включавшей около 30 тысяч контрольных ячеек.

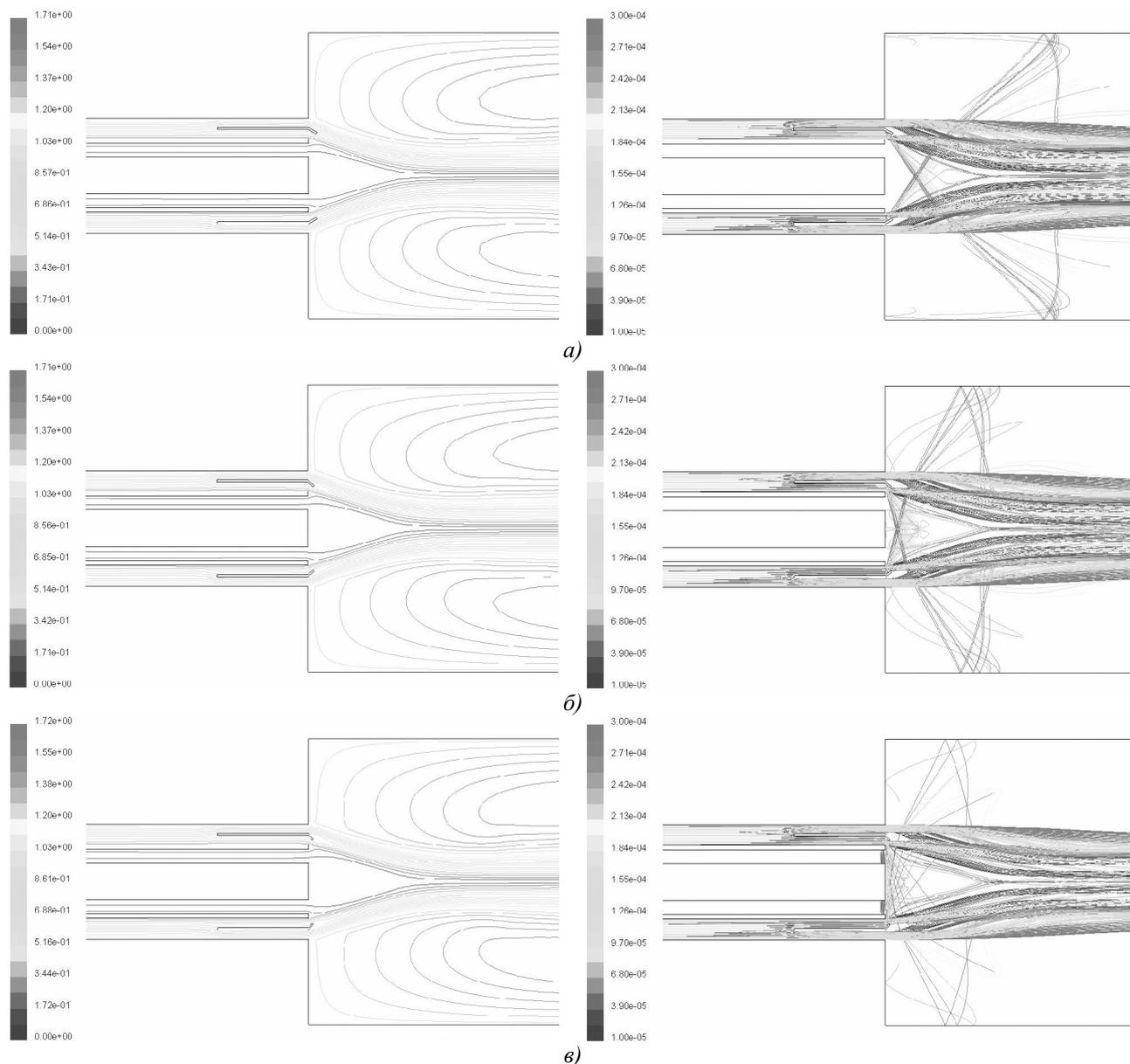


Рис. 2. Структура течения пылеугольной аэрозольной смеси в горелочном устройстве при $\alpha_0 = 25^\circ$ (а), $\alpha_0 = 45^\circ$ (б) и $\alpha_0 = 55^\circ$ (в): слева – линии тока воздуха, раскрашенные в соответствии со значением функции тока, кг/с; справа – траектории угольных частиц, раскрашенные в соответствии со значением диаметра, м.

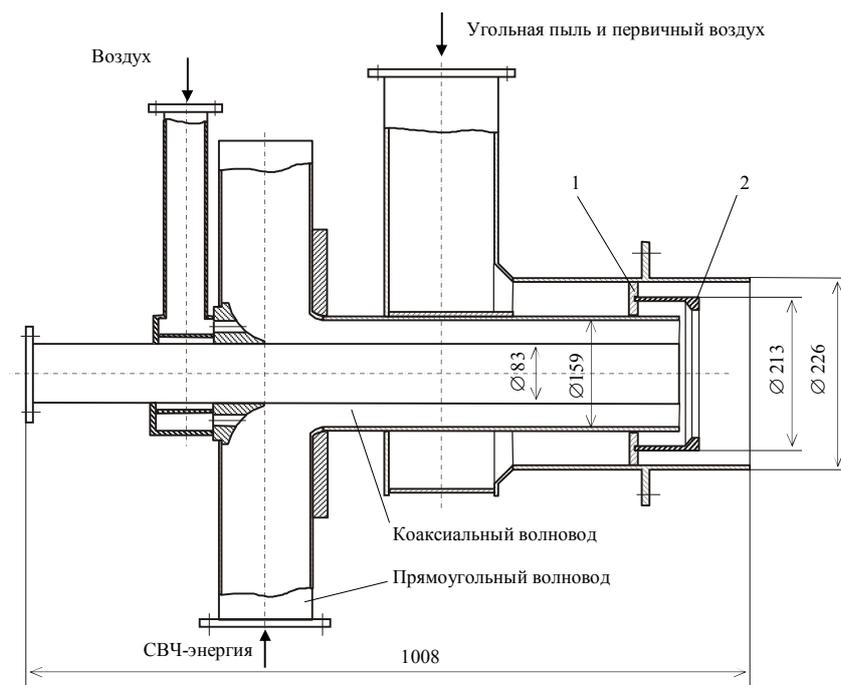


Рис. 3. Эскиз прототипа промышленного образца горелочного устройства

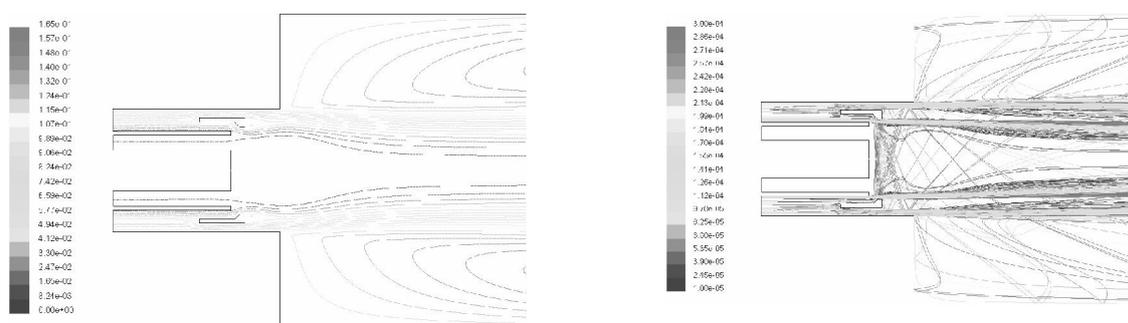


Рис. 4. Структура течения пылеугольной аэрозоли в прототипе промышленного образца горелочного устройства: слева – линии тока воздуха, раскрашенные в соответствии со значением функции тока, кг/с; справа – траектории угольных частиц, раскрашенные в соответствии со значением диаметра, м

Исходные данные расчетов

Численное моделирование течения пылеугольной аэрозоли проведено для трех вариантов конструкции горелочного устройства, различающихся значениями угла отклонения выходной кромки дефлектора: 25, 45 и 55 градусов, а также для спроектированного на основе анализа результатов численного исследования прототипа промышленного образца горелочного устройства (рис. 3).

Для всех вариантов в качестве топлива использовался бурый уголь ($\rho_p = 1250 \text{ кг/м}^3$) следующего помола ($d_{\min} = 10 \text{ мкм}$, $d_{\max} = 300 \text{ мкм}$; $\bar{d} = 120 \text{ мкм}$, n

$= 0,8$). Количество представительных частиц выбиралось равным 10. Начальное положение частиц определялось координатами центров граней расчетных ячеек, описывающих входные отверстия. Начальная скорость частиц полагалась равной скорости воздуха, истекающего из входных отверстий. Массовый расход угольной пыли $G_T = 0,16 \text{ кг/с}$. Массовый расход воздуха в горелочное устройство $G_B = 0,67 \text{ кг/с}$, давление воздуха на входе в горелочное устройство $p_B^* = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}$, температура воздуха $T_B^* = 300 \text{ К}$.

Результаты вариантных расчетов и их анализ

Результаты расчетов трех вариантов конструкции горелочного устройства, различающихся значениями угла наклона выходной кромки дефлектора α_d , представлены на рис. 2. Из рисунка видно, что во всех вариантах горелочного устройства траектории угольных частиц в основном близки к линиям тока воздуха, за исключением тех частиц, которые сталкиваются с поверхностью задней кромки дефлектора. Последние, отразившись от поверхности дефлектора, существенно изменяют свои траектории, приближаясь к зоне разрядного промежутка. Крупные частицы между столкновениями со стенками движутся по траекториям, близким к прямолинейным. Мелкие частицы увлекаются потоком воздуха тем в большей степени, чем меньше их диаметр. Угол наклона концевой кромки дефлектора α_d практически не влияет на общую картину течения воздуха, но оказывает сильное влияние на траектории отразившихся от дефлектора частиц. С увеличением угла α_d концентрация угольных частиц вблизи разрядного объема возрастает. При $\alpha_d = 55^\circ$ наиболее крупные частицы, отраженные дефлектором, достигают торцевой поверхности центрального электрода и, многократно отражаясь от стенок, проникают в воздушный канал первого контура. Это может приводить к повышенному эрозионному износу и подгоранию торца центрального электрода.

Разработка оптимального конструктивного решения

С учетом результатов численного исследования течения пылеугольной аэросмеси был спроектирован прототип промышленного образца пылеугольной горелки с СВЧ-плазмотроном, эскиз которого представлен на рис. 3. Монтируемый на радиальных стойках 1 дефлектор 2 выполнен с максимальным углом наклона концевой кромки $\alpha_d = 55^\circ$. Для

уменьшения риска эрозионного износа и подгорания центрального электрода отражающая поверхность задней кромки дефлектора смещена относительно торца центрального электрода на 5 мм вниз по потоку. С целью увеличения долговечности в условиях эрозионного износа и воздействия высоких температур кромка дефлектора выполнена массивной.

Заключение

Результаты численного моделирования структуры течения пылеугольной аэросмеси в прототипе промышленного образца горелочного устройства, представленные на рис. 4, подтверждают правильность принятых конструктивных решений. Как видно из рис.4, угольные частицы, отразившиеся от задней кромки дефлектора, формируют повышенную концентрацию угольной пыли вблизи СВЧ-разряда и в то же время не достигают торцевой поверхности центрального электрода.

Дальнейшие работы, связанные с созданием СВЧ-плазменных горелок для угольных ТЭС, будут базироваться на численном исследовании взаимодействия СВЧ-плазмы с газодинамической структурой потоков угольной пыли и физическом моделировании процессов на экспериментальных установках.

Список литературы:

1. *Современное состояние угольных электростанций Украины и перспективы их развития* / Ю.П. Корчевый, А.Ю. Майстренко, А.К. Шидловский, С.В. Яцкевич // *Экотехнологии и ресурсо-сбережение*. – 1996. – № 3. – С. 3 – 8;
2. *Исследование СВЧ-плазменной технологии поджига низкосортных углей на экспериментальной установке* / Д.М. Ваврич, П.М. Канило, В.И. Казанцев, Н.И. Расюк // *Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования: Тр. Междунар. науч.-техн. конф.* – Харьков: ИПМаш НАНУ, 2003. – С. 265 – 269.
3. Дресвин С.В., Бобров А.А., Лелевкин В.М. ВЧ-

и СВЧ-плазмотроны // Низкотемпературная плазма. – Т. 6. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1992. – 319 с. 4. Кроу. Численные модели течений газа с небольшим содержанием частиц // Теорет. основы инж. расчетов. – 1982. – № 32. – С. 114 – 122. 5.

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.

УДК 621.436

Д.Д. Матиевский, канд. техн. наук, А.Е. Свистула д-р техн. наук

ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЗДУШНОГО ЗАРЯДА ЦИЛИНДРА ДИЗЕЛЯ НА САЖЕВЫДЕЛЕНИЕ И ИНДИКАТОРНЫЙ КПД

Введение

В цилиндре дизеля в результате струйного смешения образуется крайне неоднородный состав смеси, а диффузионное сгорание неоднородной смеси всегда сопровождается интенсивным сажевыделением. Основная причина этого явления заключается в реальном существовании локальных физических условий для протекания реакций высокотемпературного пиролиза углеводородов топлива. Несгоревшая в цилиндре дизеля сажа представляет собой так называемый механический недожог топлива и входит составной частью в понятие теплоты сгорания. Основная масса сажи выгорает на линии расширения несвоевременно, отчего выделившаяся теплота используется малоэффективно, с низким КПД. Одновременно, в результате высокой излучательной способности сажи значительно возрастают потери энергии в виде лучистой теплоты. Кроме этого, некоторая доля теплоты, выделившейся при сгорании сажи, отводится и конвективным путем. Таким образом, как было показано в работе [4], можно предположить, что участие сажи в рабочем цикле оказывает влияние на индикаторный КПД через неполноту и

несвоевременность сгорания, радиационный и конвективный теплообмен.

Методика исследования

Для проведения математического прогнозирования влияния переменности состава топливно-воздушной смеси в зоне горения на сажевыделение, параметры рабочего цикла и индикаторный КПД цикла дизеля надо знать: изменение состава топливно-воздушной смеси в зоне горения $\alpha_r = \psi(\varphi)$, характеристику тепловыделения $x = f(\varphi)$.

Из существующих методик учета состава топливно-воздушной смеси в зоне горения наибольший интерес представляет методика Н.Ф. Разлейцева, доведенная до численного решения, отличающаяся простотой и позволяющая учесть зависимость коэффициента выгорания $x(\varphi)$ от коэффициента $\alpha_r(\varphi)$ или введенного понятия степени использования воздушного заряда ξ_v [1].

$$\alpha_r(\varphi) = \alpha \xi_v / x. \quad (1)$$

Здесь величина $\xi_v = f(\bar{\varphi}_z)$ однозначно устанавливает связь между значением коэффициента избытка воздуха в зоне горения $\alpha_r(\varphi)$ и характеристикой выгорания топлива $x(\varphi)$ и отражает степень эффек-