

УДК 621.181:662.9

П.М. КАНИЛО¹, В.В. СОЛОВЕЙ¹, В.Е. КОСТЮК², К.В. КОСТЕНКО¹¹ *Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Украина*² *Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

ВОДОРОДНО-КИСЛОРОДНО-ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СЖИГАНИЯ НИЗКОРЕАКЦИОННЫХ ЭНЕРГОНОСИТЕЛЕЙ

Отмечены топливно-энергетические проблемы Украины, обусловленные ограниченностью нефтегазовой сырьевой базы, низким качеством доступных органических топлив (низкорреакционные высокосольные угли) и несовершенством традиционных технологий их сжигания (дополнительное использование мазута или природного газа). Обоснована необходимость создания в Украине энерготехнологических комплексов, использующих водородно-кислородно-плазменные технологии сжигания и переработки низкорреакционных энергоносителей, а также – производства на их основе синтетических жидких и газообразных топлив. Показана актуальность разработки теоретических основ, методов расчета и анализа рабочих процессов устройств, реализующих указанные технологии. Предложен подход к математическому и физическому моделированию физико-химических процессов в таких устройствах на примере горелки с водородно-кислородной и СВЧ-плазменной термохимической подготовкой пылеугольной аэросмеси.

низкорреакционные топлива, водород, кислород, СВЧ-плазма, комплексные технологии сжигания, физико-химические процессы, методы расчета и анализа

Введение

Аэрокосмическая промышленность, как наиболее наукоемкий сектор отечественной экономики, располагает огромным потенциалом для внедрения высоких технологий в смежные отрасли экономики, в частности, энергетику, трубопроводный транспорт, металлургию, муниципальное хозяйство и т.п. В первую очередь, это касается водородных и плазменных технологий.

Тепловые электрические станции (ТЭС), работающие на низкосортных углях типа АШ, являются в настоящее время базовыми для энергетической отрасли Украины. Ключевое значение в балансе первичных энергоресурсов Украины приобретает уголь, поскольку любые иные топлива, используемые для производства электроэнергии (мазут, природный газ, уран), – это импортируемые топлива, ставящие отечественную энергетику в зависимость от его поставщиков. По оценкам Минуглепрома Украины, отечественных балансовых запасов углей при годовом объеме добычи 100 млн.т хватит на 500 лет и

более.

Проблема использования в энергетике низкорреакционных углей типа донецких антрацитов обостряется по мере увеличения их зольности. В связи с изменением условий угледобычи и уменьшением толщины угольных пластов качество угля, поступающего на электростанции, ухудшается: зольность возросла с 20 до 30 %, а теплота сгорания снизилась с 24 до 17 МДж/кг. В таких условиях устойчивое воспламенение, горение, а также нормальное шлакоудаление возможно только в условиях мазутной или газовой подсветки факела, доля которых по теплу достигает 30 – 40 %. При этом ухудшается выгорание антрацита, так как кислород поглощается более активным газом или мазутом, и доля углерода при уносе возрастает.

Успешное сжигание антрацитов с зольностью до 30 % и более может достигаться в технологиях кипящего слоя, но их промышленное внедрение требует больших капитальных затрат. Одной из менее затратных технологий является предварительная термохимическая подготовка (ТХП) угля, смысл кото-

рой заключается в высокоскоростном ($10^4 - 10^5$ °K/c) нагреве угольной пыли (всей или части): высокотемпературными продуктами сгорания природного газа или мазута [1], потоком воздушной плазмы [2, 3] или СВЧ-энергией [4 – 9]. В результате ТХП угольной пыли образуется высокотемпературная двухфазная смесь, которая состоит из летучих, газообразных продуктов частичной газификации, продуктов сгорания и коксового остатка с характеристиками, сильно отличающимися от характеристик исходного топлива. Этот процесс может быть как одно-, так и многостадийным. Указанные технологии могут реализоваться, как правило, в модернизированном стандартном грелочном устройстве и не потребуют значительных изменений в транспортных магистралях и конструкциях котлоагрегата. Однако перечисленные технологии ТХП угольной пыли не смогут обеспечить безманевренный цикл работы ТЭС, т.е. работу энергоблоков на наиболее экономически выгодных режимах, в том числе при снижении уровня потребления электроэнергии.

Итак, зависимость мировой экономики (в том числе экономики Украины) от сырьевых ресурсов возрастает. Ограниченность запасов природного газа и нефти, снижение качества добываемого в Украине угля диктует необходимость создания микро- и мак-

роэнерготехнологических комплексов, использующих плазменные технологии и обеспечивающих производство водорода и кислорода для:

- эффективного сжигания на ТЭС высокозольных низкорреакционных углей без применения природного газа и мазута [4 – 11];
- аккумулирования энергии (производство водорода и кислорода) с целью выравнивания графика нагрузки ТЭС и АЭС [10, 11];
- сокращения энергоемкости продукции за счет включения в энерготехнологические циклы низкорреакционных энергоносителей, сопутствующих основному производству (например, доменный газ, синтез-газ, биогаз и т.п.);
- дополнительного производства синтетических жидких и газообразных топлив для приоритетных отраслей их потребления (на основе термохимической переработки низкорреакционных органических энергоносителей с использованием водяного пара, водорода и кислорода, а также – применения плазменных технологий [10, 11]).

Возможные схемы водородно-кислородно-плазменных энерготехнологических комплексов на базе угольных ТЭС и АЭС приведены на рис. 1.

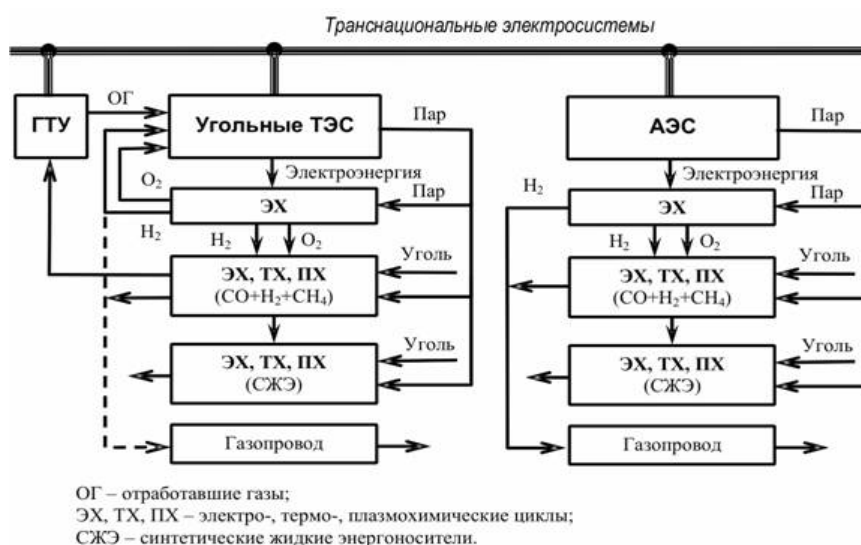


Рис. 1. Угольно-водородно-кислородно-плазменные энерготехнологические комплексы

Формулирование проблемы. Водород и кислород, благодаря своим уникальным физико-химическим свойствам, обладают значительным потенциалом в отношении промотирования горения низкореакционных топлив и, в частности, низкосортных углей. Основные действующие факторы: высокая температура и скорость горения, широкие концентрационные пределы и низкая энергия воспламенения, высокий коэффициент диффузии водородно-воздушных и особенно водородно-кислородных смесей [10, 11]. В настоящее время энерго- и ресурсосберегающие аспекты использования водорода и кислорода для сжигания низкореакционных топлив служат новыми стимулами к проведению дальнейших фундаментальных и прикладных исследований в области создания наукоемких энерготехнологий.

Актуальность разработки теоретических основ, методов расчета и анализа рабочих процессов горелочных устройств, реализующих водородно-кислородно-плазменные технологии сжигания низкореакционных топлив, в значительной мере обусловлена конечностью нефтегазовых ресурсов, научно-технической новизной [8 – 11] и энергоэкологической эффективностью рассматриваемых технологических процессов.

Теоретические подходы к описанию физико-химических процессов

В настоящее время одним из наиболее экономичных и удобных способов детального анализа сложных физических и химических процессов становится численный эксперимент. Достигнутые в последние десятилетия успехи в развитии вычислительной техники и численных методов моделирования турбулентных реагирующих течений позволяют надеяться на решение задач теоретического исследования основных аспектов рабочего процесса устройств, реа-

лизующих водородно-кислородно-плазменные технологии сжигания низкореакционных топлив, в постановках, достаточно реалистичных для обоснованного снижения объема экспериментальных работ при их доводке.

При математическом моделировании физико-химических процессов водородно-кислородно-плазменной ТХП пылеугольной аэросмеси должны быть описаны следующие наиболее значимые явления (рис. 2):

- турбулентное течение и конвективный теплообмен;
- механика многофазных турбулентных течений, включающая турбулентное рассеивание частиц и обмен массой, количеством движения и энергией между фазами;
- турбулентное смешение;
- выход летучих;
- гомогенное горение летучих и водорода;
- гетерогенное горение коксового остатка;
- радиационный теплообмен;
- гетерогенные реакции активации водорода.

Кроме того, если представляют интерес явления шлакования, образования сажи, промежуточных химических компонентов, экологически вредных веществ, то потребуются дополнительные подмодели.

Конструкция и расчетный режим работы реактора позволяют полагать рабочую среду в нем двухфазной полидисперсной многокомпонентной смесью реагентов (воздуха, угольных частиц, водорода и кислорода) и продуктов гомогенных и гетерогенных химических реакций, газы – термодинамически совершенными, течение несущей газовой фазы – трехмерным, неизотермическим, турбулентным, квазистационарным, несжимаемым, а множество угольных частиц – неплотным. Последнее допущение делает возможным раздельное описание газовой и дисперсной фаз: в постановках Эйлера и Лагранжа соответственно (так называемый траекторный под-

ход). Такой подход позволяет наиболее естественно описать полидисперсность частиц и их рассеивание турбулентными вихрями. При этом обмен массой, количеством движения, энергией и химическими компонентами между фазами может быть учтен с

помощью модели «частица – источник в ячейке», в соответствии с которой присутствие частиц в потоке проявляется через дополнительные источниковые члены в уравнениях сохранения газовой фазы.

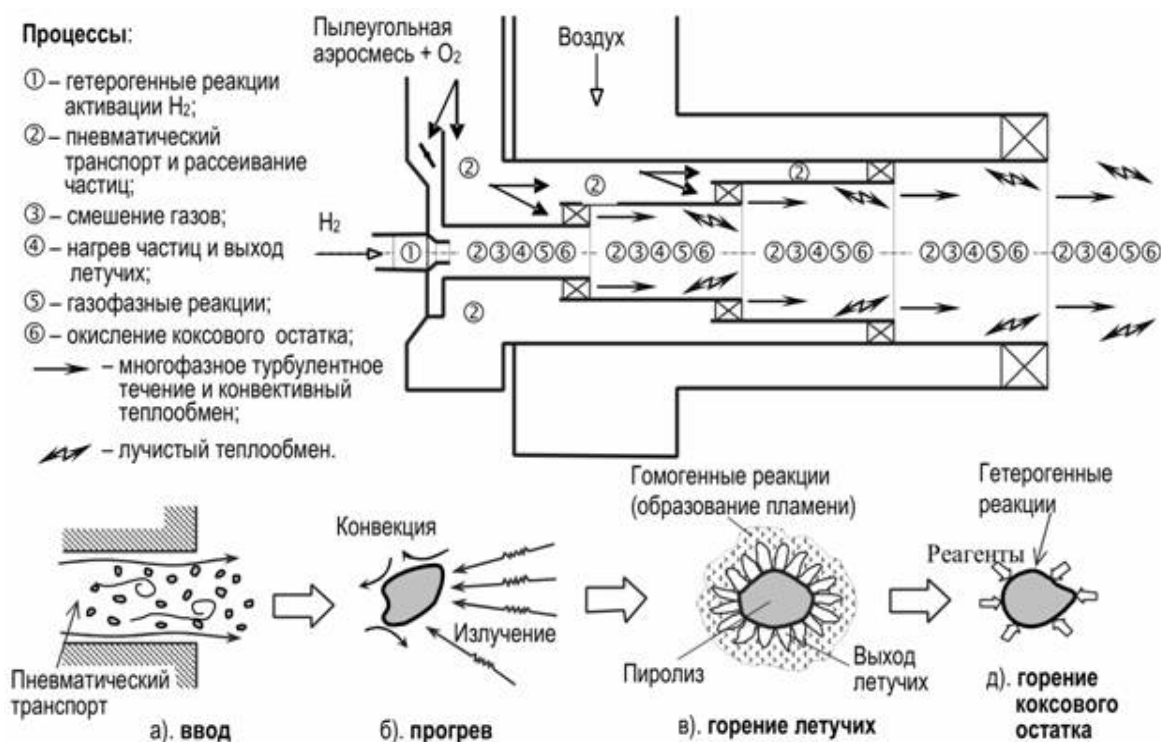


Рис. 2. Схема реактора водородно-кислородной ТХП пылеугольной аэросмеси и основные процессы в нем

В рамках принятых допущений поведение газовой фазы описывается полной системой трехмерных осредненных по Фавру уравнений Навье-Стокса, замыкаемой полуэмпирической моделью турбулентности $k-\epsilon$ типа. Входящие в уравнения источниковые члены вычисляются с помощью моделей гомогенного (турбулентного) горения водорода, выхода и гомогенного (турбулентного) горения летучих, гетерогенного горения коксового остатка и модели межфазного взаимодействия «частица – источник в ячейке». Связь между термодинамическими переменными устанавливает уравнение состояния смеси идеальных газов. Весь диапазон начальных размеров угольных частиц (полагаемых сферическими) делится на конечное число дискретных интервалов;

каждый из них представляется средним диаметром, для которого выполняется расчет траектории и тепломассообмена. При этом каждая моделируемая частица представляет собой «пакет» частиц с одинаковыми траекториями. Последние определяются интегрированием уравнений движения материальных точек, подверженных действию сил тяжести и аэродинамического сопротивления. Тепломассообмен угольных частиц может быть описан тремя моделями: моделью теплообмена инертной частицы; моделью выхода летучих и моделью выгорания коксового остатка [12]. Дифференциальные уравнения в частных производных газовой фазы должны быть дополнены соответствующими граничными, а обыкновенные дифференциальные уравнения «представи-

тельных" частиц и химической кинетики – соответствующими начальными условиями, после чего они могут быть решены известными численными методами [13 – 15].

Учитывая, что численная реализация описанной выше математической модели потребует больших затрат вычислительных ресурсов, химия горения должна быть значительно упрощена и детальные кинетические схемы с сотнями реакций не могут быть включены. Упрощенный кинетический механизм горения может включать следующие одноступенчатые реакции [16]:

- первичный пиролиз угля с образованием коксового остатка, летучих и смол;
- окисление коксового остатка с образованием оксида углерода;
- окисление легких летучих с образованием оксида углерода, водорода и водяного пара;
- окисление смол с образованием оксида углерода и водорода;
- окисление оксида углерода с образованием диоксида углерода;
- окисление водорода с образованием водяного пара.

Окисление водорода происходит очень быстро, в связи с чем скорость последней реакции в первом приближении можно полагать бесконечно большой. В противном случае необходимо включить в модель кинетическую схему окисления водорода.

Скорости химических реакций могут быть рассчитаны по уравнению Аррениуса.

Для учета взаимодействия между химическими процессами и турбулентностью могут быть использованы два подхода: основанный на концепции разрушения турбулентного вихря, и основанный на использовании функции плотности распределения вероятности [17].

Модели разрушения вихря основаны на допущении, что масштаб времени, необходимый для сме-

шения реагентов, больше, чем временной масштаб в условиях, контролируемых исключительно кинетикой. Согласно этим моделям реакция происходит в том случае, когда топливо и окислитель смешаны, т.е. при столкновении молекул реагентов. Топливо, окислитель и продукты сгорания полагаются содержащимися в мелких вихрях, которые должны разрушиться перед тем, как может произойти смешение. Модель, основанная на концепции разрушения вихря, предложенная Магнуссоном (EDC), обеспечивает возможность включать в схему реакции детальные кинетические механизмы химических реакций (т.е. промежуточные химические компоненты). Модель EDC основана на идее, что диссипация энергии турбулентности в тепло и смешение на молекулярном уровне (а значит, и химические реакции), происходят в тонких структурах, которые могут быть описаны как реакторы идеального смешения. Пространство внутри расчетной ячейки полагается заполненным тонкими структурами и окружающим их течением. Все гомогенные реакции полагается протекающими в тонких структурах. Для определения скорости реакции в тонких структурах определяются массовая доля, занимаемая тонкими структурами γ^* и среднее время пребывания реагирующей среды в тонких структурах τ^* .

Методы, основанные на функции плотности распределения вероятности (ПРВ), описывают взаимодействие химических процессов и турбулентности статистически. Осредненные по Фавру значения обобщенной переменной ϕ (например, температура или концентрация химического компонента) рассчитываются как

$$\bar{\phi} = \int_{-\infty}^{\infty} \phi \tilde{p}(\phi) d\phi, \text{ где } \tilde{p}(\phi) = \frac{1}{\bar{\rho}} \int_0^{\infty} \rho p(\phi) d\rho.$$

Функция плотности распределения вероятности $\tilde{p}(\phi)$ описывает вероятность того, что значение пе-

ременной ϕ находится между ϕ и $\phi + \Delta\phi$, и обычно аппроксимируется β -функцией. Реагирующая система может быть описана с помощью переменной, получившей название "коэффициент смеси":

$$z = (Y - Y_0) / (Y_F - Y_0),$$

где Y – массовая доля элемента;

индексы F и O относятся к топливу и окислителю соответственно.

Коэффициент смеси является консервативным скаляром, поэтому на него влияют диффузия и конвекция, но не влияет скорость реакции. Благодаря этому удастся избежать сложных вычислений источников члена, обусловленного химической реакцией. Однако, эта модель наиболее приемлема в ситуациях, когда скорость реагирования определяется турбулентностью, что противоречит выдвинутой нами гипотезе о преобладании цепного механизма высокоскоростного горения над тепловым при водородно-кислородной ТХП низкоресакционных топлив.

В связи с этим для моделирования процессов водородно-кислородной ТХП пылеугольной аэросмеси предлагается использовать модель, основанную на концепции разрушения вихря EDC, которая может учитывать турбулентное смешение в комбинации с детальной химической кинетикой.

Экспериментально-исследовательская установка

В ИПМаш НАН Украины (г. Харьков) разработан стенд для исследования процессов сжигания пылеугольного факела с использованием водорода (в том числе прошедшего металлургидридную активацию), кислорода и СВЧ-плазмы (рис. 3).

Стенд включает в себя:

- трубчатый реактор водородно-кислородно-плазменной ТХП угольной пыли с системами подачи воздуха, водорода, кислорода и других газов;

- систему подачи угольной пыли, обеспечивающей ее расход от 1 до 15 г/с;

- СВЧ-генератор мощностью 5 кВт с циркулятором и волноводной системой;

- коаксиальный СВЧ-плазмотрон, расположенный в верхней части реактора;

- измерительную аппаратуру для контроля параметров функционирования систем стенда (давлений, температур, расходов);

- систему отбора и анализа проб продуктов сгорания;

- контрольно-измерительную аппаратуру для исследования процессов ТХП угольной пыли.

Реактор имеет цилиндрическую форму высотой 1 м и диаметром 0,125 м. Стенки его сделаны водоохлаждаемыми и изнутри футерованы огнеупорным корундовым бетоном, обеспечивающим минимальные потери СВЧ-энергии в камере. В корпусе реактора имеются смотровые окна со съемными освинцованными термостойкими стеклами, через которые контролируются процессы, происходящие в реакционной зоне.

Золошлаковые частицы из нижней части реакционной камеры сбрасываются в золосборник. Более тонкая очистка газов осуществляется в циклоне.

Выводы и перспективы дальнейших разработок в данном направлении

1. Дан анализ топливно-энергетических проблем Украины, обусловленных ограниченностью нефтегазовой сырьевой базы, низким качеством доступных органических топлив (низкоресакционные высозолые угли) и несовершенством традиционных технологий их сжигания, связанных с дополнительным использованием импортируемого природного газа или мазута, стоимость которых постоянно растет.

2. Предложены и запатентованы принципиально

новые СВЧ-плазменные и водородно-кислородно-плазменные технологии сжигания высокотемпературных низкореакционных углей без применения природного газа или мазута.

3. Отмечено, что водородно-кислородно-

плазменные технологии обеспечат работу энергетических блоков ТЭС на наиболее экономичных режимах, и это будет также способствовать повышению их параметрической надежности и ресурса при снижении экологической опасности.

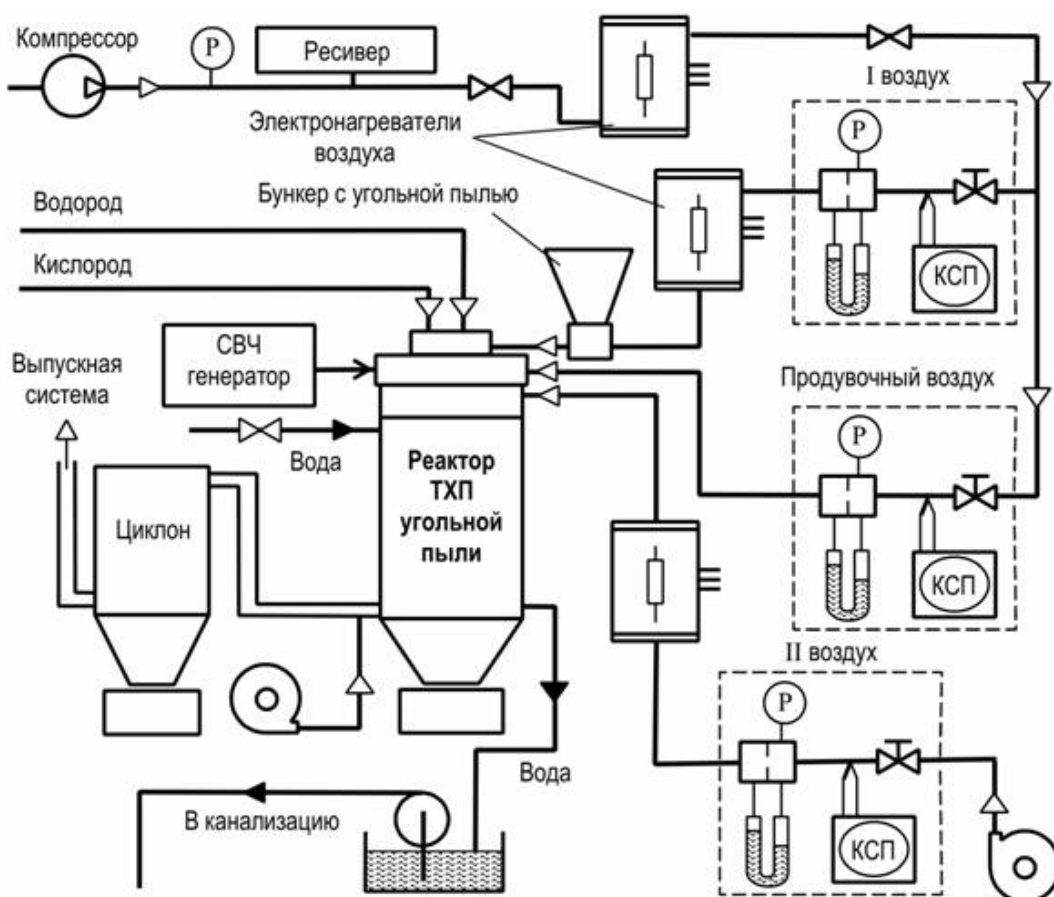


Рис. 3. Схема стенда с экспериментальной водородно-кислородной пылеугольной горелкой

4. Обоснована необходимость создания в Украине энерготехнологических комплексов, использующих водородно-кислородно-плазменные технологии сжигания и переработки низкореакционных энергоносителей, а также – производства на их основе синтетических жидких и газообразных топлив.

5. Показана актуальность разработки теоретических основ, методов расчета и анализа рабочих процессов устройств, реализующих указанные технологии, в том числе предложен подход к математическому и физическому моделированию физико-

химических процессов в таких устройствах на примере горелки с водородно-кислородной и СВЧ-плазменной термохимической подготовкой пылеугольной аэросмеси.

Литература

1. Степанов А.В., Кухарь В.П. Достижения энергетики и защита окружающей среды. – К.: Наук. думка, 2004. – 207 с.
2. Карпенко Е.И., Мессерле В.Е. Введение в плазменно-энергетические технологии использова-

ния твердых топлив. – Новосибирск: Наука, 1997. – 119 с.

3. Оптимизация процесса сжигания энергетических углей с использованием плазменных технологий / В.Е. Мессерле, А.С. Аскарова, А.Б. Устименко, Е.И. Карпенко // Теплоэнергетика. – 2004. – № 6. – С. 60-65.

4. Использование СВЧ-энергии для сжигания высокосольных антрацитов на ТЭС / П.М. Канило, Н.И. Расюк, К.В. Костенко и др. // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2001. – № 3. – С. 3-7.

5. Исследование СВЧ-плазменной технологии сжигания низкосортных углей / Д.М. Ваврив, В.И. Казанцев, П.М. Канило и др. // Теплоэнергетика. – 2002. – № 12. – С. 39-45.

6. Microwave plasma combustion of coal / P.M. Kanilo, V.I. Kazantsev, N.I. Rasyuk // Fuel (82). – 2003. – P. 187-193.

7. СВЧ-плазменная технология сжигания низкосортных углей / П.М. Канило, В.Е. Костюк, К.В. Костенко и др. // Пробл. машиностроения. – 2004. – Т. 7, № 2. – С. 72-77.

8. Пат. на корисну модель 8305 Україна, МПК⁷.F23Q5/00. Спосіб НВЧ-плазмової технології запалювання і стабілізації згоряння вугілля / Д.М. Ваврів, П.М. Канило, М.І. Расюк та ін. (Україна); ІПМаш НАН України; У 2005 04380; заявл. 10.05.05; опубл. 15.07.05; бюл. № 7. – 5 с.

9. Исследование процесса сжигания угольной пыли в экспериментальной СВЧ-плазменной горелке / Д.М. Ваврив, П.М. Канило, В.Е. Костюк и др. // Проблемы машиностроения. – 2005. – Т. 8, № 3. – С. 79-86.

10. Альтернативные технологии сжигания низко-реакционных углей в теплоэнергетических установках без дополнительного использования мазута или природного газа / П.М. Канило, Д.М. Ваврив, В.Е. Костюк и др. // Авиационно-космическая техника и технология. – 2006. – № 10(36). – С. 82-90.

11. Пат. на корисну модель 18409 Україна, МПК⁷.F23Q5/00. Спосіб спалювання низькосортного вугілля / Ю.М. Мацевитий, П.М. Канило, В.В. Соловей та ін. (Україна); ІПМаш НАН України; У 2006 03987; заявл. 10.04.06; опубл. 15.11.06; бюл. № 11. – 5 с.

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

13. Приходько А.А. Компьютерные технологии в аэрогидродинамике и тепломассообмене. – К.: Наук. думка, 2003. – 380 с.

14. Кравченко И.Ф., Костюк В.Е., Педаш Ю.В. Численное исследование гидродинамического и теплового взаимодействия факела пускового воспламенителя с воздушным потоком внутри жаровой трубы // Вестник двигателестроения. – 2005. – № 2. – С. 37-43.

15. Костюк В.Е., Коваленко А.Н. Численное моделирование рабочего процесса СВЧ-плазменной горелки // Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці. – К.: ІПМЕ НАНУ. – 2004. – Вип. 25. – С. 94-101.

16. Heikkinen J.M. Characterisation of Supplementary Fuels for Co-combustion with Pulverised Coal. MSc. Dissertation, Environmental and Energy Engineering Tampere University of Technology, Tampere, Finland, 2005. – 183 p.

17. Poinso T., Veynante D. Theoretical and Numerical Combustion. – Philadelphia: R.T. Edwards Inc., 2001. – 490 p.

Поступила в редакцию 19.01.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Д.Ф. Симбирский, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.