

УДК 533.6:533.9.004.14; 621.039.6

ПЛАЗМЕННО-ЦИКЛОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СЖИГАНИЯ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ

Карпенко Ю.Е.¹, Мессерле В.Е.², Карпенко Е.И.³, Басаргин А.П.⁴

¹Отраслевой Центр Плазменно-Энергетических Технологий РАО «ЕЭС России»

²Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия, Институт проблем горения, Научно-Исследовательский Институт Экспериментальной и Теоретической Физики КазНУ им. Аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

³Бурятский Научный Центр СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия

⁴Читинский Государственный Университет, г. Чита, Россия

Известны циклонная и плазменная технологии, повышающие эффективность использования твердых топлив [1-3]. Совмещение этих технологий в одном устройстве может привести к синергическому эффекту.

В настоящей работе предпринята попытка исследовать совместное влияние циклонной и плазменной технологии на процесс воспламенения и сжигания угля в одном устройстве. Можно выделить два основных направления применения плазменно-циклонной технологии: энергетическое и энерготехнологическое (рис. 1).

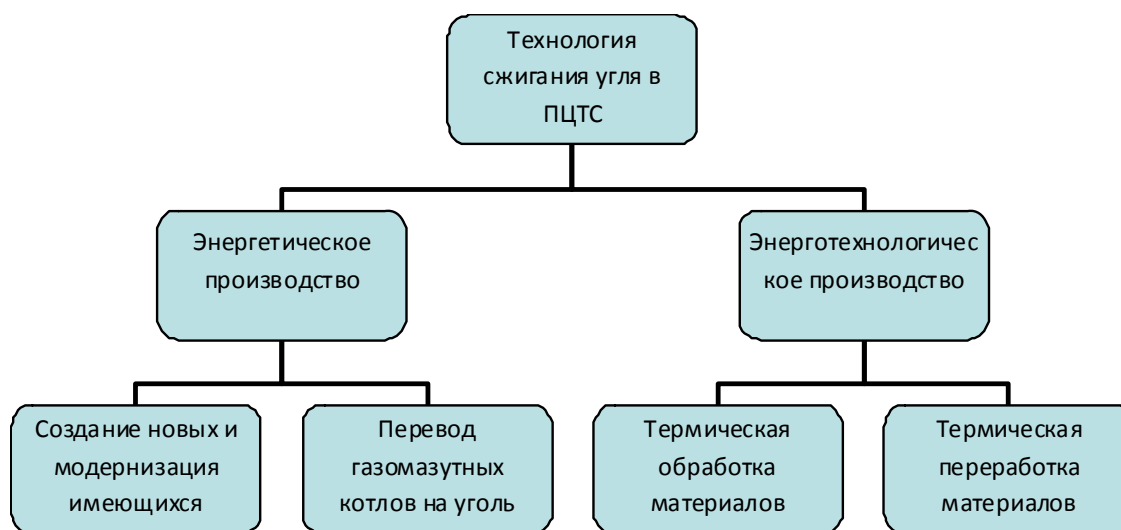


Рис. 1. Схема применения технологии сжигания угля в плазменно-циклонной топливной системе.

В энерготехнологической сфере представленная технология может быть использована для расплава и термической обработки материалов. В энергетической сфере использование плазменно-циклонной топливной системы (ПЦТС) возможно: при создании новых и модернизации имеющихся угольных котлов; при переводе газомазутных котлов на сжигание угля.

При создании новых угольных котлов экономический эффект от внедрения ПЦТС создается за счет снижения расхода топлива и массогабаритных размеров котлоагрегатов при одновременном снижении вредных выбросов. Оснащение существующих пылеугольных котлоагрегатов ПЦТС приведет к снижению расхода топлива. Кроме этого, удаление в циклонной камере расплавленной минеральной части топлива повысит надежность работы поверхностей нагрева котла.

Основной же эколого-экономический эффект при внедрении разрабатываемой технологии ожидается от замещения мазута углем. Экономический эффект от перевода мазутных котлов на уголь обусловлен снижением стоимости используемого топлива. Экологический эффект достигается за счет снижения выбросов диоксидов серы.

Сжигание в плазменно-циклонной камере совмещает следующие высокоэффективные процессы: электротермохимическая подготовка топлива к сжиганию и последующие вихревое сжигание пылеугольного топлива в циклонной камере, а также удаление расплавленной минеральной части топлива. Предварительная электротермохимическая подготовка топлива и последующее вихревое сжигание угля в циклонной камере в совокупности образуют плазменно-циклонный процесс [4-7]. Организация плазменно-циклонного процесса осуществляется в ПЦТС (рис. 2).

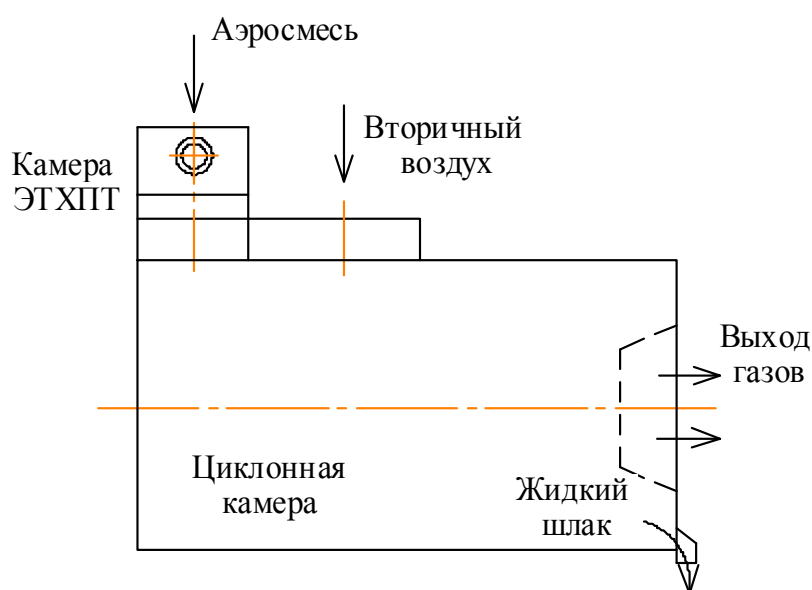


Рис. 2. Схема плазменно-циклонной топливной системы.

При разработке плазменно-циклонной технологии сжигания углей был выполнен комплекс расчетно-теоретических и экспериментальных исследований.

Процесс горения твердого топлива в ПЦТС состоит из целого комплекса явлений: взаимодействия плазменной струи с потоком аэрозоли и воспламенения, движения двухфазного потока, тепло- и массообмена, горения в объеме циклонной камеры и на поверхности ее стенок. При этом каждое явление обусловлено взаимовлиянием друг на друга. Поэтому создание и решение единой системы уравнений, описывающей плазменно-циклонный процесс, является весьма сложной задачей. В связи с этим для математического моделирования процесса

целесообразно использовать поэтапный метод расчета. Этот метод предполагает разбиение ПЦТС на две подсистемы. Первым этапом переработки твердого топлива в ПЦТС является электротермохимическая подготовка топлива, вторым этапом – сжигание этого топлива в циклонной камере. Исходя из этого, алгоритм расчета, реализующий ступенчатый метод расчета, состоит из пяти блоков (рис. 3). Первый блок – исходные данные. Задается необходимая тепловая мощность системы или расход топлива. Вводятся характеристики угля, которые рассчитываются по стандартным зависимостям, объемы продуктов сгорания и необходимое количество воздуха. Задается температура вторичного воздуха.

Во втором блоке проводится расчет ЭТХПТ. На основании термодинамического и кинетического расчетов определяется оптимальная температура ЭТХПТ, при которой происходит стабилизация выхода горючих компонентов. Оцениваются удельные энергозатраты на процесс ЭТХПТ, определяется мощность плазмотрона и параметры на выходе из камеры, а также геометрия камеры ЭТХПТ.

В основе термодинамического расчета лежит математическая модель образования в равновесии газообразных и конденсированных веществ, электронейтральных и ионизированных компонентов. Результатами расчета является база данных теплофизических и термодинамических параметров рабочего тела для заданного давления и температуры. Для термодинамического анализа процесса ЭТХПТ использован программный комплекс TERRA [8].

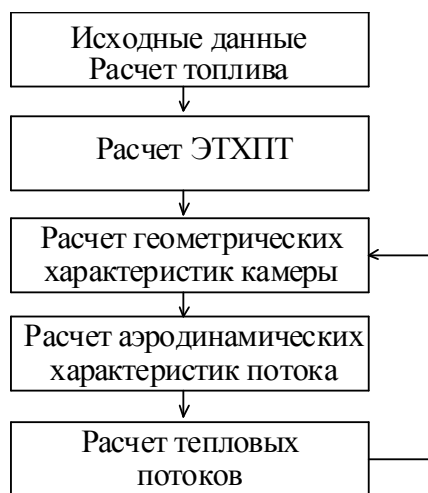


Рис. 3. Алгоритм расчета плазменно-циклонной топливной системы.

В основу кинетического расчета положена математическая модель движения, нагрева и кинетики термохимических превращений угольных частиц в плазменных устройствах. Модель процесса описывает двухфазный (полидисперсные угольные частицы + газ окислитель) химически реагирующий поток, распространяющийся в канале с внутренним источником тепла. Результатами расчета является база данных теплофизических параметров рабочего тела для заданного давления и температуры с привязке к геометрии ПЦТС. Для кинетического расчета использованы специализированные программы «Плазма-уголь» [9] и «Плазма-муфель» [10].

Третий блок предназначен для определения геометрических характеристик циклонной камеры, основными из которых являются: диаметр и длина камеры; ширина, высота и число входных каналов, а также площадь входа; диаметр, длина и площадь выходного сопла. На основе известных значений допустимого теплового напряжения сечения циклонных камер и данных первого и второго блоков рассчитывается определяющий размер – диаметр циклонной камеры и остальные характерные размеры.

В четвертом блоке осуществляется расчет аэродинамических характеристик циклонной камеры. В ходе расчета определяются следующие аэродинамические характеристики: радиус границы ядра потока, радиус, характеризующий положение максимума тангенциальной скорости, максимальная скорость на границе ядра потока. Конечным результатом расчета этого блока является определение значения коэффициента сопротивления циклонной камеры.

В пятом блоке производится расчет тепловых потоков по уравнениям теплового баланса, которые составлены с учетом рекомендации КазНИИ энергетики [1]. Распределение тепловых потоков плазменно-циклонной топливной системы описывается следующим уравнением:

$$Q_1 + Q_{ЭТХПТ} + Q_B = Q_2 + Q_{изл} + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7,$$

где Q_1 – теплота, выделяемая при сгорании электротермохимически подготовленного топлива; $Q_{ЭТХПТ}$ – теплосодержание топлива, подвергнутого ЭТХПТ; Q_B – теплота, вносимая вторичным воздухом; Q_2 – теплота уходящих из ПЦТС газов; $Q_{изл}$ – излучение теплового потока через выходное сопло; Q_3 – потери тепла от химического недожога топлива; Q_4 – потери тепла от механического недожога топлива; Q_5 – теплота, переданная охлаждающему агенту; Q_6 – потери тепла с жидким шлаком; Q_7 – прочие потери тепла.

Расчет производится итерационным методом при задаваемых температурах пленки жидкого шлака и газа на выходе. В итоге определяется истинное теплонпряжение сечения камеры и возможна коррекция геометрии (диаметра циклонной камеры). Завершающим этапом расчета является оценка перепада давления в циклонной камере с учетом неизотермичности процесса.

По представленной инженерной методике расчеты ПЦТС выполнены в системе «Mathcad». В расчетах принята мощность ПЦТС 17,5 МВт, что соответствует 50% нагрузке водогрейного котла мощностью 35 МВт. В расчете использовался Харанорский бурый уголь с выходом летучих $V = 44\%$, низшей теплотой сгорания $Q_H^P = 13133$ кДж/кг и составом на рабочую массу: $C^P = 33,5\%$; $H^P = 2,2\%$; $O^P = 10,3\%$; $S^P = 0,3\%$; $N^P = 0,5\%$; $A^P = 13,2\%$; $W^P = 40\%$. Дисперсный состав угольной пыли соответствует таковому при ее промышленном помоле. Температура пылеугольной аэросмеси на входе в ПЦТС 80 °С. Масштабное значение теплового напряжения сечения циклонной камеры: $q_F = 14$ МВт/м². Температура подогрева вторичного воздуха – 300 °С. Коэффициент избытка воздуха 1,08.

Расчет производился с использованием компьютерных программ «TERRA» и «Плазма-муфель». Основные результаты расчета представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты расчета ПЦТС мощностью 17,5 МВт

Рассчитываемая величина	Размерность	Численное значение
Расход топлива	кг/с	1,481
Оптимальная температура ЭТХПТ	К	1200
Электрическая мощность плазмотрона	кВт	150
Диаметр камеры ЭТХПТ	м	0,4
Длина камеры ЭТХПТ	м	2,0
Геометрические характеристики циклонной камеры:		
– диаметр	м	1,33
– длина	м	1,663
– площадь входа	м ²	0,104
– диаметр выходного сопла	м	0,585
– длина выходного сопла	м	0,333
Теплота, выделяемая при сгорании топлива, подвергнутого ЭТХПТ	кВт	16580
Теплосодержание топлива, подвергнутого ЭТХПТ	кВт	4019
Теплота, вносимая вторичным воздухом	кВт	2834
Теплота уходящих из ПЦТС газов	кВт	20410
Излучение теплового потока через выходное сопло	кВт	110,192
Потери тепла от химического недожога топлива	кВт	248,627
Теплота, переданная охлаждающему агенту	кВт	2318
Потери тепла с жидким шлаком	кВт	104,102
Прочие потери тепла	кВт	234,281
Тепловое напряжение сечения камеры	МВт/м ²	17,745
Перепад полного давления	Па	1755

В результате расчета получены основные данные, необходимые для проектирования ПЦТС и для создания дополнительных систем регенерации тепла, теряемого при охлаждении корпуса ПЦТС и жидкого шлака.

Для проверки эффективности плазменно-циклонной технологии сжигания твердых топлив на базе Отраслевого центра плазменно-энергетических технологий (ОЦ ПЭТ) РАО «ЕЭС России» была сконструирована экспериментальная плазменно-циклонная камера, производительностью по топливу 1 т/ч (рис. 4).

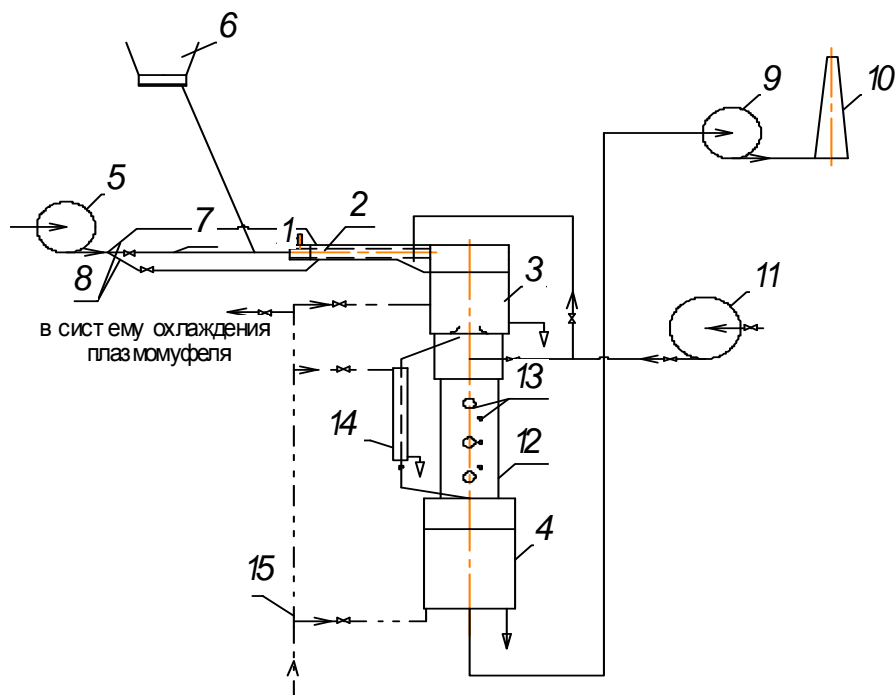


Рис. 4. Схема экспериментальной установки: 1- плазмотрон; 2- ПТС; 3- циклонная камера; 4- котел-утилизатор; 5- дутьевой вентилятор первичного и вторичного воздуха; 6- бункер пылевидного топлива с питателем; 7- трубопровод первичного воздуха; 8- трубопроводы вторичного воздуха; 9- дымосос; 10- дымовая труба; 11- дутьевой вентилятор вторичного воздуха и охлаждения уходящих газов; 12- газоход; 13- измерительные отверстия; 14- охлаждаемый отбор газов для анализа; 15- трубопровод охлаждающей воды.

При проведении экспериментов применялись стандартные методики, основанные на фиксации временного и температурного режимов, а также состава уходящих газов. Экспериментальное исследование проводилось в два этапа. Первый – достижение устойчивого воспламенения и горения топлива с фиксацией температурного режима посредством термопар и тепловизора и состава уходящих газов [7]. Второй этап – сжигание пылеугольного топлива с массовой добавкой цеолита Шивыртуйского месторождения Забайкальского края для снижения выбросов NO_x .

После запуска плазмотрона и прогрева установки в ПТС подавалось топливо. Параметры на этом этапе фиксировались каждые тридцать секунд. Воспламенение топлива наблюдалось в первую минуту после подачи топлива. В последующие тридцать секунд продолжался набор температуры. Время выхода на стационарный режим работы экспериментальной установки, при котором установились постоянная температура горения, составило полторы минуты. Устойчивое воспламенение и горение топлива в ПТС согласуется с результатами расчета (табл. 1) и свидетельствует о правильном подборе соотношения топливо-воздух. Набранный температурный режим в дальнейшем оставался неизменным даже при сжигании топлива с цеолитом. Это подтверждает устойчивость процесса плазменно-циклонного сжигания топлива.

Золоулавливание в циклонной камере достигло 95%. По данным химического анализа шлака механический недожог топлива составил всего 0,9%. Содержание монооксида углерода (CO) при стационарном режиме не превышало 5 мг/нм^3 , в результате чего химический недожог составил 1,3%. Снижение хими-

ческого недожога может быть достигнуто повышением коэффициента избытка воздуха до 1,1. Содержание диоксида серы в дымовых газах при стационарном режиме составило 108 мг/м^3 . Традиционно высокое для циклонных топок содержание оксидов азота (800 мг/м^3) в уходящих газах [1], при сжигании угля в ПЦТС составило $464 - 487 \text{ мг/м}^3$.

Сжигание угольно-цеолитовой смеси с добавкой цеолита 5, 10, 15, 20, 25 и 30 30% производилось последовательно. Содержание диоксида серы в дымовых газах находилось на уровне 108 мг/м^3 и практически не изменялось при добавлении цеолита, что объясняется малым содержанием серы ($S^P = 0,6\%$) в топливе. Содержание монооксида углерода не превышало 5 мг/м^3 . Анализ результатов измерения концентрации оксидов азота показал, что при сжигании угольно-цеолитовой аэросмеси заметное уменьшение оксидов азота в дымовых газах началось с 10% добавки цеолита, и составило 60 мг/м^3 на каждые последующие 10% добавки (рис. 5).

Результаты измерения температуры показали, что температурный режим в дальнейшем оставался практически неизменным даже при сжигании топлива с добавкой цеолита вплоть до 30%. Это объясняется устойчивостью плазменно-циклонного процесса сжигания топлива: стабильное воспламенение топлива обеспечивает его электротермохимическая подготовка, а в циклонной камере, за счет высокой турбулизации потока происходит активное выгорание топлива.

Выполненные эксперименты подтвердили возможность сжигания пылеугольного топлива в плазменно-циклонной камере. Плазменно-циклонный процесс обладает хорошей устойчивостью, даже при наличии в топливе минеральных компонентов свыше 40%. Золоулавливание в плазменно-циклонной камере достигает 95%. Содержание в уходящих газах оксидов азота не превышает 487 мг/м^3 , а оксидов серы 108 мг/м^3 . Механический недожог топлива не превышает 0,9%, химический недожог 1,3%. Добавление от 10% до 30% цеолита к топливу приводит к снижению концентрации оксидов азота в отходящих газах с 464 до 329 мг/м^3 соответственно.

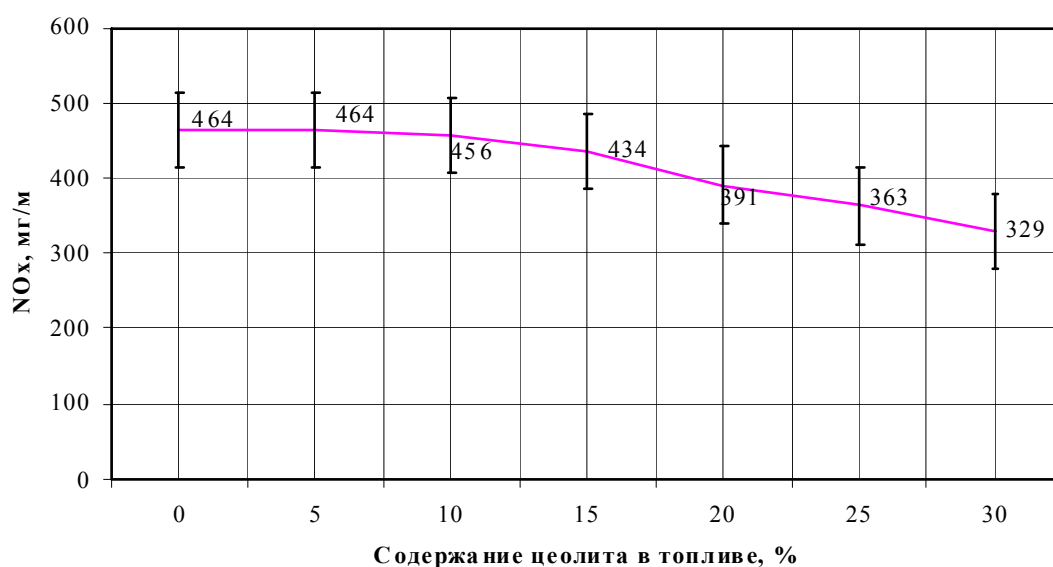


Рис. 5. График зависимости содержания оксидов азота в дымовых газах от массовой добавки цеолита к топливу

Литература

1. Резняков А.Б., Устименко Б.П., Вышенский В.В., Курмангалиев М.Р. Теплотехнические основы циклонных топочных и технологических процессов. Алма-Ата: Наука КазССР, 1974. 373 с.
2. Мессерле В.Е., Устименко А.Б., Аскарлова А.С., Карпенко Е.И., Локтионова И.В. Оптимизация процесса сжигания энергетических углей с использованием плазменных технологий. // Теплоэнергетика, №6, 2004, С.60-65
3. Karpenko E.I., Messerle V.E., Ustimenko A.B. Plasma-Aided Solid Fuel Combustion. // Proceedings of the Combustion Institute, 2007. V.31, Part II. P.3353-3360
4. Войчак В.П., Мессерле В.Е., Сакипов З.Б. Исследование аэродинамики и теплообмена плазменно-циклонной электродуговой камеры. // Тезисы доклада VI Всесоюзной конференции по генераторам низкотемпературной плазмы, Фрунзе, 1974. С. 165.
5. Войчак В.П., Мессерле В.Е., Шалина К.К. Экспериментальное исследование сопротивления и теплообмена циклонно-плазменного реактора постоянного тока. // Материалы VII Всесоюзной конференции по генераторам низкотемпературной плазмы, т. 1, Алма-Ата, 1977. С. 246-249.
6. Карпенко Е.И., Мессерле В.Е., Карпенко Ю.Е., Иванов С.А., Басаргин А.П. Плазменно-циклонные камеры (варианты). // Патент РФ № 2425284 / Бюл. №21 от 27.07.2011 г. приоритет 31.12.2009 г.
7. Басаргин А.П., Иванов С.А., Карпенко Е.И., Карпенко Ю.Е. Экспериментальная установка для исследования сжигания пылеугольного топлива в плазменно-циклонной камере. Материалы Всероссийской научно-практической конференции: «Кулагинские чтения». Чита: ЧитГУ, 2009. Ч.II. С. 101–104.
8. Gorokhovski M., Karpenko E.I., Lockwood F.C., Messerle V.E., Trusov B.G., Ustimenko A.B. Plasma Technologies for Solid Fuels: Experiment and Theory. // Journal of the Energy Institute, 2005, V 78, N 4, P.157-171.
9. Kalinenko R.A., Levitski A.A., Messerle V.E., Polak L.S. Sakipov Z.B., Ustimenko A.B. Pulverized Coal Plasma Gasification // Plasma Chemistry and Plasma Processing. New-York, London, Paris, 1993. № 1. V. 13. P. 141-167.
10. Мессерле А.В. Математическое моделирование процессов термохимической подготовки пылеугольных топлив к сжиганию в горелочных устройствах с плазменным источником //Химия Высоких Энергий, 2003. №1. С. 35.