

и удельного расхода топлив в топливоиспользующих агрегатах в допущении “идеальной печи”.

2. Установлено, что перерасход топлива в условиях поддержания заданного полезного тепловосприятия определяется изменением КПД топки, обусловленного рециркуляцией продуктов сгорания.

3. Установлено, что рециркуляция продуктов сгорания приводит к одинаковому перерасходу топлива, практически независимо от величины α для значений $r \leq 0.2$, а в диапазоне $r = 0.2 \dots 0.3$ для разных α перерасход имеет разную величину.

4. Установлено, что затраты топлива увеличиваются с увеличением α для фиксированной температуры процесса. Влияние α возрастает при увеличении значения T_{fl} .

5. В ходе анализа термодинамических расчетов установлено, что рециркуляция продуктов сгора-

ния приводит к снижению выбросов оксидов азота NO_x .

ЛИТЕРАТУРА

1. Сигал И.Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива.– Л.: Недра.– 1977.– 294 с.
2. Сорока Б.С. Интенсификация тепловых процессов в топливных печах.– Киев: Наукова думка, 1993.– 413 с.
3. Сорока Б.С., Шандор П. Термодинамический анализ энергоэкологической эффективности использования топлива // Пром. теплотехника.– 1999.– Т. 21.– № 6.– С. 43-50.
4. Сорока Б.С. Топливные печи в проблеме интенсификации процессов тепло- и массопереноса// Материалы 5-го Минского международного фо-рума по тепло- и массообмену.– Минск, Белоруссия, 24-28 мая, 2004.– 25 с.

Получено 26.09.2004 г.

* Выполнено под руководством д.т.н., проф. Б.С. Сороки.

УДК 622.61, 537.533

Кукота Ю.П., Бондзик Д.Л., Дунаевская Н.И., Чернявский Н.В.

Институт угольных энерготехнологий НАН и Минтопэнерго Украины

ПЛАЗМЕННЫЙ ПОДЖИГ ВЫСОКОЗОЛЬНЫХ АНТРАЦИТОВ ПРИ ИХ ФАКЕЛЬНОМ СЖИГАНИИ

Запропоновано варіант ступінчастої плазмової термохімічної підготовки антрацитового пилу перед спалюванням в топці пилуугольних котлів. Експериментально досліджено динаміку теплових процесів на початковій стадії взаємодії пилуугольної суміші з повітряною плазмовою струминою. Показано можливість зменшення енерговитрат при безмазуттовому підпалюванні низько реакційного високозольного вугілля.

Предложен вариант ступенчатой плазменной термохимической подготовки антрацитовой пыли перед сжиганием в топке пылеугольных котлов. Экспериментально исследована динамика тепловых процессов в начальной стадии взаимодействия пылеугольной смеси с воздушной плазменной струей. Показана возможность снижения энергозатрат при безмазутном поджиге низкорекреационных высокозольных углей.

A plasma thermochemical variant of pulverized anthracite preparation for its incineration in a coal-fed furnace has been proposed. The dynamics of thermal processes at the initial stage of interaction between an air plasma jet and air pulverized coal jet has been investigated. A possibility of energy expenditure reduction at the oilless ignition of low reactive high ash coals has been shown.

A – зольність, %;

I – ток дуги, А;

V – напруга дуги и выход летучих, В, %;

G – массовый расход, г/с;

P – электрическая мощность, кВт;

$\pm Q$ – тепловыделения и теплопотери, кВт;

T – температура, К, °С;

Q_n^p – теплотворная способность топлива, кДж/кг;

W – влажность, %;
 α – коэффициент избытка воздуха;
 τ – время, с;
 АШ – антрацитовый штывб;
 в – воздух;
 г – на горючую массу;
 пл – плазма;

с – на сухую массу;
 см – смешения с плазмой;
 стр. – струя плазмы;
 у – уголь;
 ТХП –термохимическая подготовка;
 ТЭС – тепловая электростанция,
 СВЧ – сверх высокие частоты.

Введение

Проблема использования в энергетике низко-реакционных 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 с возрастанием зольности с 20 до 27...30 % и снижением теплотворной способности с 24 до 19...20 МДж/кг [1]. В таких условиях устойчивое воспламенение, горение, а также нормальное шлакоудаление возможны только в условиях газомазутной подсветки факела, доля которой по теплу достигает 30...40 %. При этом ухудшается выгорание антрацита, так как кислород поглощается более активным газом или мазутом, а доля углерода при уносе достигает 20...25 %. Обостряющийся дефицит газа и мазута требует разработки и внедрения новых высокоэффективных технологий сжигания высокозольных антрацитов.

Основная часть

Успешное сжигание антрацитов с зольностью до 40% достигается в технологиях кипящего слоя [2], но их промышленное внедрение требует больших капитальных затрат. Одной из менее затратных технологий является предварительная термохимическая подготовка (ТХП) угля, смысл которой заключается в высокоскоростном (10^4 - 10^5 °C/с) нагреве угольной пыли (всей или части) высокотемпературными продуктами сгорания газа [3], потоком воздушной плазмы [4] или СВЧ-энергией [1]. Хотя при газовой ТХП в сравнении с подсветкой расходы газа снижаются в 3-4 раза, это не решает полностью экономических проблем газового импорта. Поэтому в ближайшем будущем одной из возможных альтернатив встает проблема использования электроэнергии для ТХП угля. Уже известен положительный опыт приме-

нения плазмотронов [5] для безмазутного розжига пылеугольных котлоагрегатов на углях широкого спектра мета-морфизма, включая антрацит, однако возможность длительной стабилизации горения высокозольных антрацитов остается дискуссионной. Для стабилизации горения высокозольного антрацита необходим или дополнительный ввод теплоты в топку, или сокращение времени воспламенения угольных частиц, что при том же общем времени пребывания частиц в нижней части топки увеличивает их время горения, степень выгорания и тепловыделения факела. Поскольку ввод в топку дополнительной теплоты за счет плазмотронов явно нецелесообразен, их использование может способствовать только организации раннего поджига аэросмеси. До определенного уровня зольности это обеспечивает стабилизацию горения и является фактически “плазменной подсветкой”.

Для высокозольных антрацитов возможны 2 варианта термохимической подготовки:

1. Высокотемпературный, в котором одноступенчатая обработка части (≈ 20 %) угля при достаточно высокой мощности плазмотрона обеспечивает нагрев остальной части аэросмеси за счет сгорания летучих и части углерода в камере ТХП. Его реализация возможна с жидким шлакоудалением в котловых горелках с вертикальным выходом факела вниз.

2. Низкотемпературный, в котором обработка тех же 20 % угля производится ступенчато, с промежуточными вводами аэросмеси, с таким расчетом, что обработка следующей порции обеспечивается тепловыделением предыдущей. При этом процесс плазменной ТХП происходит только на 1-й ступени, который также сопровождается броском температуры до 1400 °C, однако последний погашается до 800...900 °C вводом в камеру следующей порции аэросмеси. Многоступенчатый подвод аэросмеси позволяет не только стабилизи-

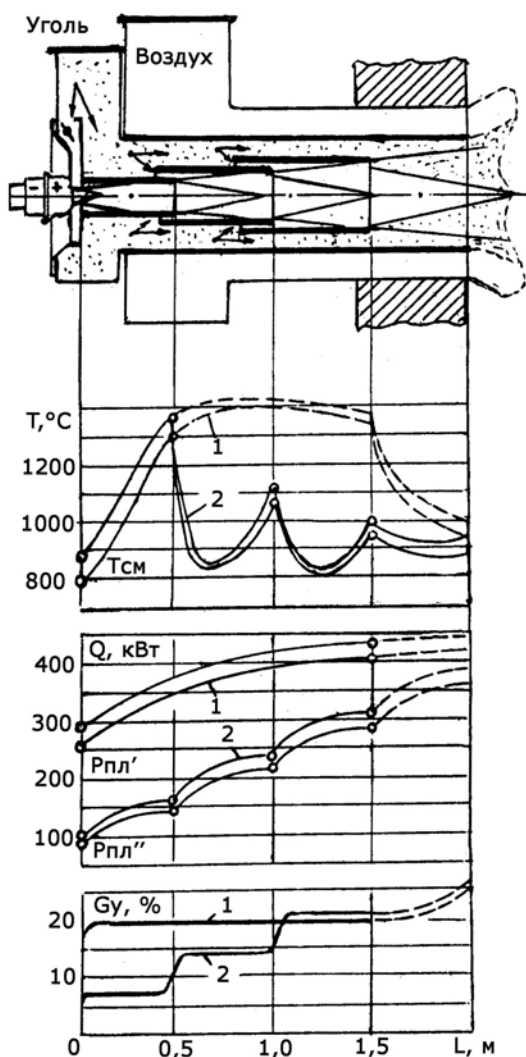


Рис. 1. Распределение температур, тепловыделений и расходов угля АШ на термохимическую подготовку вдоль оси горелки ВТИ-3,5 т/ч.

1 – одноступенчатый процесс;
2 – трехступенчатый процесс.

ровать температурный уровень ниже точки плавления золы но и уменьшить долю топлива, вводимого в струю плазмы на 1-й ступени, что снижает потребную мощность плазмотрона. Для большинства котлоагрегатов с горизонтальными горелками возможность их мало-затратной модернизации с заменой газомазутных форсунок плазменными по второму варианту ТХП является весьма актуальной и составляет цель данного исследования.

Для оценки ожидаемого эффекта проведен сравнительный анализ параметров потока в промышленной котловой горелке ВТИ производительностью 3,5 т/ч с одно- и 3-х ступенчатым му-

фелем (рис. 1). Тепловая мощность горелки для АШ с зольностью 27 %, выходом летучих 4 % и $Q^H_P = 21400$ кДж/кг составляет ≈ 20 МВт. Аэро-смесь повышенной концентрации (5:1) подается с $T_0 \approx 100$ °С. На ТХП подается 20% топлива.

Расчет выполнялся для двух вариантов первоначального нагрева смеси: до 900 и 800 °С. Средние теплоемкости угля и воздуха приняты $C_y \approx C_b \approx 1,1$ кДж/кг °С. Некоторые результаты расчетов приведены на рис.1.

Анализ результатов показывает, что примерно одинаковая тепловая мощность на выходе из 3х-ступенчатого муфеля достигается при мощности плазмотрона примерно в 3 раза меньшей, чем в однокаскадном муфеле, а температура факела на выходе из III ступени $\sim 950 - 1000$ °С лежит ниже границы плавления золы. Коэффициент K_3 (отношение затрат электроэнергии плазмотрона к тепловой мощности горелки) снижается до 1,5 % против ~ 4 % в однокаскадном режиме. Эти результаты наглядно показывают преимущества каскадного поджига.

Для экспериментального изучения процессов

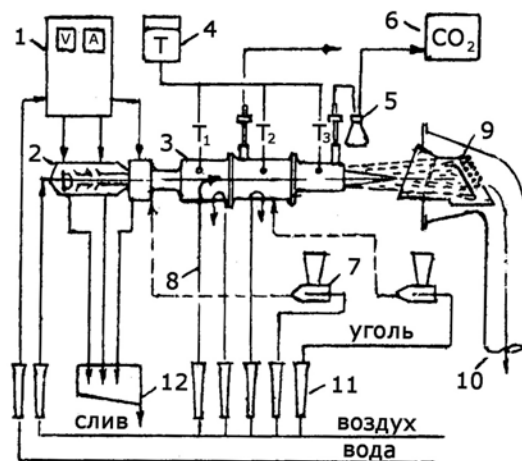


Рис. 2. Технологическая схема установки ППА-2. 1 – Источник питания и пульт управления, 2 – плазмотрон, 3 – реактор, 4 – приборы записи температур, 5 – зонды-пробоотбор-ники, 6 – масспектрометр, 7 – дозаторы угледодачи, 8 – вторичный воздух, 9 – пылеуловитель, 10 – дымосос, 11 – расходомеры РС-5, 12 – приборы контроля теплопотерь охлаждения на сливе.

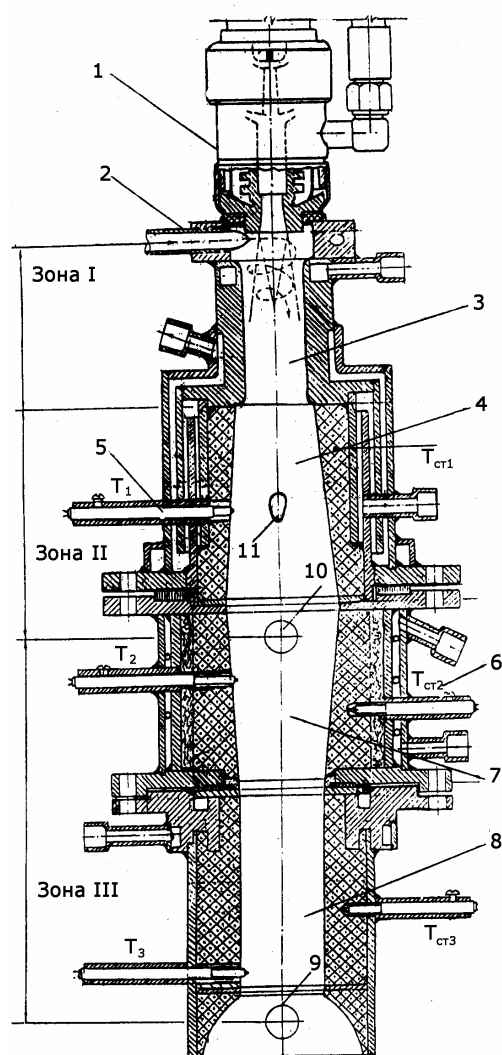


Рис. 3. Экспериментальный реактор плазменного поджига антрацита. 1 – плазмотрон, 2 – углеподача, 3 – камера смешения, 4 – камера термоллиза, 5 – термопары ППР, 6 – термопары ХА, 7 – камера сгорания летучих, 8 – камера конверсии углерода, 9,10 – отбор проб на анализ, 11 – подвод вторичного воздуха.

была создана установка плазменного поджига антрацита ППА-2 с плазмотроном мощностью 10...50 кВт, которая дала возможность изучить

процессы в начальной ступени ТХП при непосредственном контакте угля с воздушной плазменной струей. Схема установки ППА-2 показана на рис. 2. Агрегат углеподачи состоит из роторного или дискового дозаторов с воздушными эжекторами, обеспечивающими расходы угля 1...5 г/с с регулируемой концентрацией от 5:1 до 1:1. Использовалась угольная пыль Трипольской ТЭС – антрацит АШ с $A^c = 27\%$, влажностью после сушки $W^p = 0,6\%$ и $V^x = 4...6\%$.

Конструкция плазменного реактора показана на рис. 3. В зоне I происходит интенсивное смешение аэросмеси с плазменной струей. Расход аэросмеси подбирается так, чтобы температура смеси была не ниже 800...900 °С, при этом начинается термодеструкция угольных частиц и выделение летучих веществ. В зоне II происходит окончательное выделение летучих и их горение. При этом температура факела быстро возрастает и по соотношению температур в точках T_1, T_2, T_3 можно судить о месте и времени их сгорания. В зоне III происходит частичное горение коксового остатка или его газификация при недостатке кислорода с образованием горючих газов CO и H_2 . Рис. 4 иллюстрирует наличие таких режимов в зависимости от коэффициента избытка воздуха в начальной аэросмеси. В режиме конверсии углерода с выходом CO и H_2 температура потока снижается и вероятность проведения процесса ТХП без расплавления золы возрастает. В реакторе также предусмотрена возможность подачи дополнительно вторичного воздуха и вторичного угля.

При исследовании динамики процессов ТХП проводились достаточно длительные (более часа) с точки зрения тепловой стабилизации пуски. При фиксированной мощности плазмотрона и заданном расходе воздуха менялся расход угля от 1,5 до 4 г/с за счет повышения его концентрации в аэросмеси, образуя последовательный ряд режимов.

Рассмотрено 5 характерных режимов плазменной ТХП. Из них первый режим соответствует минимально возможной по устойчивости дуги мощности плазмотрона (11,6 кВт), остальные при мощности 15 кВт. При КПД плазмотрона 0,63 вносимая струей плазмы тепловая энергия соответствует 7...10 кВт. Полученные данные позволяют составить тепловые балансы для каждой зоны реактора и проанализировать общее течение процессов ТХП.

На рис. 5 показано распределение тепловыделений и тепловых потерь вдоль оси реактора, схематически изображенного под осью абсцисс. Последняя при известном расходе, температуре и скорости потока может интерпретироваться как ось времени с нулем на срезе плазмотрона, что позволяет оценить время протекания отдельных процессов. На оси ординат отложена тепловая мощность факела и тепловая мощность плазмотрона $P_{пл}$. Струя плазмы последовательно теряет мощность в зоне А на охлаждение катода $-Q_K$,

анода $-Q_A$ и камеры смешения $-Q_1$. В зоне Б начинается и в зоне В завершается выделение и горение летучих $+Q_L$. В зоне Г – горение кокса Q_C за вычетом потерь охлаждения II и III камеры реактора $-Q_2, -Q_3$. Пунктирные кривые к точке Е показывают остаток тепловой мощности плазменной струи в потоке продуктов сгорания. В зоне Д, за пределами выходного сопла, происходит дожигание CO и H_2 , с выделением теплоты $+Q_D$.

В экспериментальной установке тепловые потери Q_1, Q_2, Q_3 безвозвратны, но для муфеля I ступени котловой горелки (рис. 1) они полезны, т.к. передаются аэросмеси, обтекающей его наружную поверхность. Потери на охлаждение плазмотрона $Q_K + Q_A$ в обоих случаях безвозвратны. Пунктирная линия режима V к точке Ж дает представление о полной тепловой мощности I ступени:

$\Sigma Q = Q_L + Q_C + Q_D + \Sigma Q_{1,2,3} = 24,4 \text{ кВт}$,
из которых 14,8 кВт (за вычетом $P_{стр} = 9,6 \text{ кВт}$) получены за счет процессов ТХП и достаточны для

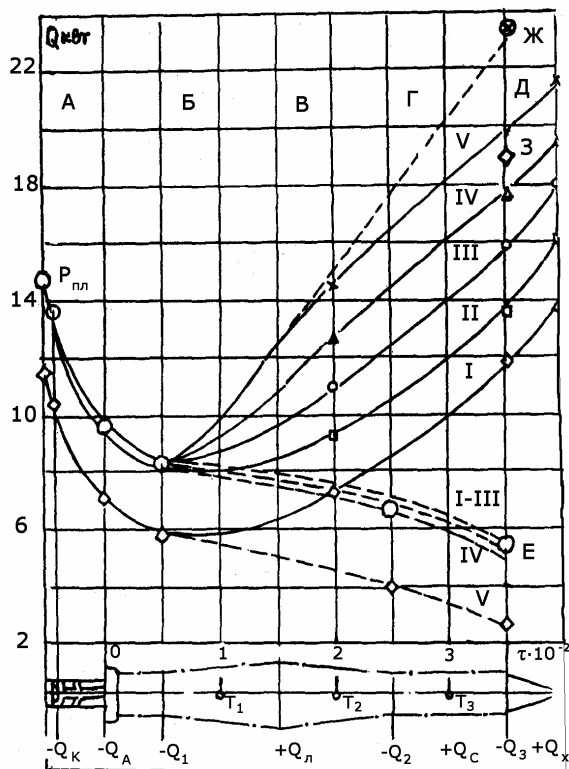


Рис. 5. Динамика тепловых процессов в реакторе ТХП.

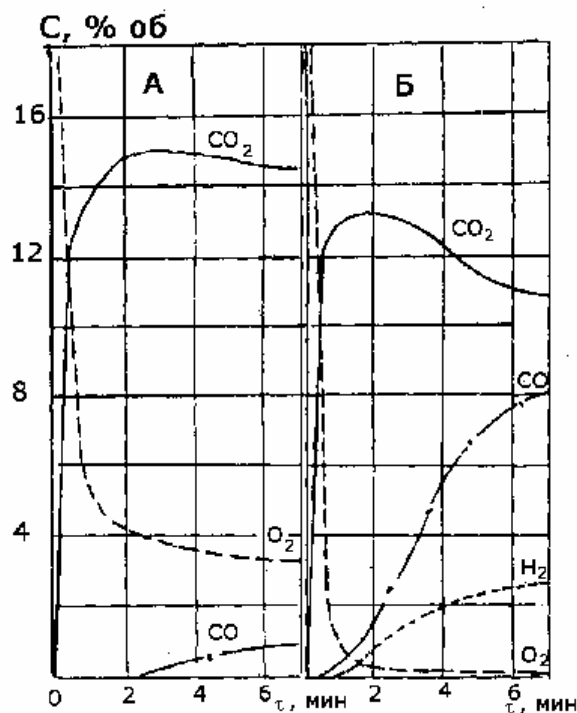


Рис. 4. Составы газовой фазы после ТХП. А – режим горения $\alpha \geq 0,22, T_1=900, T_2=1300 \text{ }^\circ\text{C}$. Б – режим конверсии $\alpha \leq 0,12, T_1=950, T_2=1100 \text{ }^\circ\text{C}$ (обозначения T_1 и T_2 см. рис. 3).

термообработки следующей порции угля на II ступени. Коэффициент увеличения тепловой мощности струи $K_1 = 24,4/9,6 = 2,45$. Кривая режима 1 с минимальной мощностью плазменной струи 7 кВт располагается эквидистантно по отношению к кривым II-IV и с увеличением расхода угля темпы возрастания выходной мощности превосходят аналогично: $\Sigma Q = 19,1$, $\Sigma Q - P_{\text{стр}} = 12,1$ кВт, $K_1 = 19,1/7,0 = 2,73$. Точка 3 для режима 1 аналогична по смыслу точке Ж режима V.

Анализ данных для режимов 1 и 11 показал, что снижение мощности плазмотрона на 23 % слабо влияет на процент конверсии углерода (24 и 26 %) и практически не влияет на выход и горение летучих. Отсюда следует вывод, что наращивание тепловой мощности муфеля при ТХП должно производиться не за счет плазмотрона, а за счет правильной дозировки аэросмеси и оптимизации ее горения в муфеле. При оптимальных соотношениях расхода плазмы и аэросмеси удельные энергозатраты на поджиг антрацита составляют 0,28...0,33 кВт·ч/кг угля, что совпадает с литературными данными [5].

Одними из важных результатов является экспериментально определенное время протекания процессов смешения и нагрева частиц: $(4...6) \cdot 10^{-3}$ с, выхода и сгорания летучих: $(2...3) \cdot 10^{-2}$ с, при полном времени пребывания в реакторе $\leq 4 \cdot 10^{-2}$ с. Это дает возможность рассчитывать протяженность ступеней муфеля в котловой горелке. Например, длина муфеля I ступени горелки (рис. 1) при скорости потока 20 м/с не должна превышать 0,4...0,5 м. Кратковременность основных процессов ТХП позволяет создавать компактные многоступенчатые поджиговые устройства вписывающиеся как по длине, так и по диаметру в габариты стандартных вихревых горелок.

Выводы

На данном этапе установка не позволяла исследовать процессы дожигания термически обработанного угля. Время полного сгорания частиц 0,05 мм и менее лежит в пределах 0,6...0,8 с, что в 20 раз превышает время их пребывания в реакторе. На следующем этапе исследований предусмотрена такая возможность испытания многоступенчатой плазменной ТХП в ИУЭ НАНУ на стенде

ВГП-100, имеющем камеру сгорания длиной 4 м, а также на опытно-промышленной плазменной горелке котлоагрегата ТПП-210 Приднепровской ТЭС, созданной Научно-инженерным центром “Экология-Геос” совместно с персоналом электростанции [6]. Результаты данных исследований переданы в НИЦ “Экология-Геос” и могут стать полезными для оптимизации работы горелки.

Полученные результаты показывают возможность малозатратной реконструкции горизонтальных котловых горелок не только для поджига, но и для стабилизации горения антрацитового факела. При сохранении имеющихся на котловых горелках коммуникаций газовой подсветки они могут включаться лишь на 20...30 минут при замене электродов плазмотрона, чем достигается значительная экономия “посветочного” газа. При вне-

дрении этой технологии могут быть решены проблемы ресурса плазмотронов, золового заноса горелочных устройств, экономии газа и угля за счет снижения недожега.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Канило П.М., Расюк Н.И. и др.* Использование СВЧ-энергии для сжигания высокосольных антрацитов на ТЭС// Экологические и ресурсосбережение.- 2001.- № 3.- С. 3-7.
2. *Корчевой Ю.П., Майстренко А.Ю.* Перспективы технологии кипящего слоя для переработки высокосольных углей. Препринт.- Киев: Знание, 1990.- 20 с.
3. *Корчевой Ю.П., Дунаевская Н.И., Вовчук и др.* Изменение характеристик коксозольного остатка антрацитов в процессе термохимической подготовки// Пром. теплотехника.- 1999.- Т 21.- № 6.- С.51-56.
4. *Карпенко Е.И., Мессерле В.П., Перегудов В.С.* Плазменная термохимическая подготовка углей для снижения потребления мазута на ТЭС // Теплоэнергетика.- 2000.- № 1.- С. 24-28.
5. *Дьяков А.Ф., Карпенко Е.И., Мессерле В.Е.* Плазменно-энергетические технологии и их место в теплоэнергетике// Теплоэнергетика.- 1998.- № 6.- С.28.
6. *Волошин А.И., Емельяненко В.И., Фесак Г.И. и др.* Обоснование и создание технологии безмазутного сжигания низкосортного угольного топлива на ТЭС. Отчет НИЦ "Экология-Геос" и Минтопэнерго Украины.- Днепропетровск.- 2000 г.- 49 с.

Получено 25.10.2004 г.