

УДК 537.526.533.9

О.Л. КОТЛЯРОВ, канд. физ.-мат. наук, **В.П. ЯЦЕНКО**, канд. техн. наук (Институт общей энергетики НАН Украины, Киев), **С.В. ПЕТРОВ**, докт. техн. наук, **А.Г. СААКОВ**, канд. техн. наук (ООО «ТОПАС», Киев)

ВОЗМОЖНОСТЬ ПОВЫШЕНИЯ ЭКОНОМИЧНОСТИ ПЛАЗМЕННОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ГОРЕНИЯ НИЗКОСОРТНЫХ УГЛЕЙ

Рассматривается возможность повышения экономичности процесса плазменной стабилизации горения угля за счет предварительного сжигания небольшой его части в дополнительной ступени плазменно-горелочного устройства. Приводятся результаты физического и математического моделирования процессов, происходящих в канале дополнительной ступени. Оценивается экономическая эффективность рассмотренной схемы плазменной стабилизации.

Одним из путей повышения экономической эффективности работы пылеугольных тепловых электростанций (ТЭС) является замена мазута либо газа, используемых для подсветки факела, плазмой. В 80-е годы по инициативе технического управления Минэнерго УССР в КазНИИЭнергетики проводились работы по исследованию плазменного метода воспламенения и стабилизации горения низкорекреационных углей [1]. К настоящему времени в реальных условиях эксплуатации ТЭС накоплен определенный опыт сжигания пылеугольного топлива с применением систем плазменного розжига и подсветки (ПРП) [2]. По данным [3] системы ПРП испытывались на 24 котлах паропроизводительностью от 75 до 670 т/ч на четырнадцати ТЭС России. Всего на пылеугольных станциях было установлено 66 систем плазменной стабилизации. Технологии плазменного розжига и подсветки запатентованы в тринадцати странах.

По сравнению с аналогичными технологиями, в которых используется мазут, плазменные технологии обладают рядом преимуществ: вследствие более высокой химической активности плазмы для розжига и подсветки необходима значительно меньшая мощность; существенно ниже механический недожог (в 2-3 раза) и выход NO_x ; более высокий выход летучих и т.д. [2].

На ТЭС Украины подобные технологии не используются. Это преимущественно связано с достаточно высоким уровнем необходимой электрической мощности и небольшим ресурсом электродов плазмотронов. Относительные затраты электроэнергии на плазмотрон при сжигании углей с низким содержанием летучих достигают 2%. Поскольку именно такие угли в основном поставляются на ТЭС Украины, необходимы исследования, направленные на дальнейшее усовершенствование систем ПРП.

Системы ПРП базируются на предварительной плазменной термохимической подготовке

топлива в специальной плазменной горелке, расположенной вне топки. Традиционная схема использования плазмы для розжига и подсветки горения низкорекреационных углей включает три этапа, два из которых приходится на плазменную горелку [2]. На первом этапе меньшая часть угля (примерно 20%) поступает в камеру термохимической подготовки. Термохимическая подготовка состоит в том, что пылевоздушный поток перемешивается с плазмой, обогащается химически активными частицами (электронами, ионами, радикалами) и нагревается как плазмой, так и за счет тепла сгорания мелких фракций и летучих, а уголь, в условиях недостатка окислителя, частично газифицируется. В результате независимо от качества угля получается высокорекреационное двухкомпонентное топливо – синтез-газ плюс коксовый остаток. Далее (второй этап) это топливо перемешивается с остальной частью угольной пыли, нагревает, частично воспламеняет и газифицирует ее (также при недостатке окислителя). Полное сгорание угля (третий этап) происходит при выходе пылеугольного потока из плазменной горелки в топочное пространство, где в этот поток подается достаточное количество воздуха.

Для реализации такой схемы используются плазмотроны мощностью в несколько сот киловатт. В данной работе исследуется возможность применения более экономичной схемы, для которой достаточно плазмотрона с мощностью на порядок меньшей, со всеми благоприятными последствиями: повышением ресурса непрерывной работы плазмотрона, экономией электроэнергии, снижением капитальных затрат.

Суть предлагаемой схемы такова. К плазменной горелке добавляется дополнительная ступень (ДС). В нее подаются плазменная струя с тепловой мощностью 20-30 кВт и небольшая (менее процента, как показывают численные оценки) часть пылеугольного потока. Здесь создаются ус-

ловия, при которых эта часть угля сгорает в такой степени, чтобы тепловая мощность факела на выходе из ДС составляла несколько сот киловатт, необходимых для поджига и стабилизации горения основной части пылеугольного потока. С другой стороны, в потоке, выходящем из ДС, должно оставаться еще заметное (30-40%) количество нагретых до высокой температуры частиц несгоревшего топлива. Далее факел поступает в камеру термохимической подготовки вместо плазменной струи в традиционной схеме ПРП, которая в основном выполняется без изменений.

Известно, что плазменная струя обладает очень высокой химической активностью. Проигрышное в этом плане отличие пылеугольного факела от плазменной струи той же мощности может быть компенсировано находящимися в нем частицами несгоревшего топлива. Температура этих частиц выше температуры воспламенения, поэтому они должны сразу же загореться при контакте с дополнительным количеством окислителя. Кроме того, благодаря наличию этих частиц степень черноты у факела значительно больше, чем у плазменной струи (известно [4], что из-за малой степени черноты радиационная компонента теплоотдачи у плазменных струй относительно невелика). Учитывая также намного больший по сравнению со струей объем факела, можно ожидать, что эффективность его теплового излучения значительно превысит излучение плазменной струи.

Таким образом, предлагается снизить мощность плазматрона от нескольких сотен до нескольких десятков киловатт, а основную долю необходимой мощности получать за счет сгорания небольшой части того же угля, который подается в топку котла.

Возможность практической реализации такого подхода была показана в экспериментах на физической модели ДС – лабораторном плазмоструйном реакторе. Схема реактора приведена на рис. 1. Реактор состоит из плазматрона 1, канала 2, образованного кварцевой трубой 3 и муфелем 4, а также входных патрубков 5. В экспериментах тепловая мощность $P_{пл}$ воздушно-плазменной струи, вытекающей из сопла плазматрона в канал реактора, изменялась в пределах 5-30 кВт. Топливо, транспортируемое воздухом с массовым расходом $G_{тр}$, подавалось в струю через патрубки 5. В качестве топлива использовалась угольная пыль донецкого антрацита марки АШ с максимальным размером частиц $\delta = 250$ мкм. Массовый расход угольной пыли G_y через каждый патрубок изменялся в пределах 1-15 г/с. Вторичный воздух с

расходом $G_з = \alpha_r G_0 - G_{тр} - G_{пл}$, подавался во входное кольцевое сечение канала 2. Здесь G_0 – расход воздуха, теоретически необходимый для полного сгорания подаваемого угля; $G_{пл}$ – расход плазмы; α_r – коэффициент избытка воздуха. В опытах с помощью калориметрирования измерялось количество тепла, поступающее на внутреннюю стенку муфеля, а также определялся недожог углерода на выходе из реактора.

Установлено [5], что при расходах угля $G_y = 20-30$ г/с и $P_{пл} = 25-30$ кВт тепловая мощность факела P_f на выходе из реактора в 15-20 раз превосходит мощность плазменной струи, а недожог углерода колеблется в пределах 30-70%.

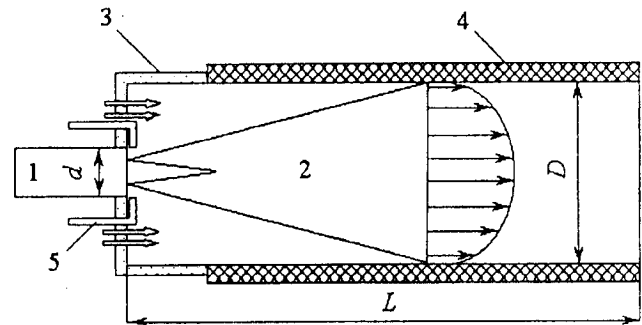


Рис. 1

Для математического сопровождения экспериментов была разработана модель рассматриваемого процесса. Она учитывает струйный характер газодисперсного потока до места его соприкосновения со стенками канала (рис. 1), фазовые переходы в частицах (испарение воды, плавление золы), обратное влияние частиц на поток газа, их радиационный теплообмен со стенками канала. Учитывается также переход золы из частиц в газовый поток. Считается, что расплавленная зола в мелкодисперсном состоянии «сдувается» с частиц в газовый поток [6] и мгновенно принимает его скорость и температуру. Горение описывается законом Аррениуса с учетом конечной скорости диффузии окислителя к поверхности частицы.

Модель учитывает зависимость темпа расширения двухфазной струи вдоль канала от параметров рабочего процесса. Кроме того, учитывается тот факт, что вторичный воздух не сразу во всем своем объеме контактирует с топливом, а более или менее равномерными порциями подмешивается к струе вдоль канала. На начальном участке струи окислитель находится в значительном недостатке, поэтому здесь происходит термоподготовка рабочей смеси. Полный контакт вторичного воздуха с топливом достигается лишь в конце струи и в неструйной части потока.

Общая схема расчета такова. На первом этапе находится положение границ двухфазной струи, образовавшейся при смешении потоков плазмы, угольной пыли и транспортирующего воздуха. Ввиду сложности теоретического описания рассматриваемого течения границы струи находятся с помощью упрощенного подхода, в котором основную роль играют следующие допущения:

а) граничная поверхность струи является конечной, причем угол ее раскрытия на основном участке такой же, как и на начальном;

б) струя является гомогенной, а наличие в ней частиц проявляется в соответствующем увеличении ее плотности;

в) частицы и газ имеют одинаковые скорости и температуры;

г) процессы горения и радиационный теплообмен не учитываются.

После определения границ струи упрощения в) и г) снимаются, и далее двухфазное течение в пределах этих границ рассчитывается более корректно, с учетом неравновесности по скоростям и температурам, а также других факторов, упоминавшихся выше.

До момента полного расплавления золы в частице объем частицы считается неизменным (модель прочного золотого каркаса [6]), а ее плотность убывает. После расплавления золы объем частицы начинает уменьшаться из-за перехода капелек золы и выгоревшего углерода в газовый поток, а ее плотность фиксируется и далее считается неизменной (модель сегрегирующей золы [6]).

Геометрические параметры струи определялись на основе обобщения теории [7]. Физические свойства газа считаются такими же, как у воздуха (подача большого количества вторичного воздуха в струю делает ее преимущественно воздушной). Параметры переноса в газовой фазе вычисляются по удельной энтальпии газа h_g с помощью зависимостей [4]

$$\bar{\eta}_g = \bar{h}_g^{0,415}, \quad \bar{\lambda}_g / \bar{c}_{pg} = \bar{h}_g^{0,562},$$

где η_g – вязкость; λ_g – теплопроводность; c_{pg} – изобарная удельная теплоемкость газа. Безраз-

мерные значения этих величин, помеченные чертой сверху, получены делением на их значения при стандартных условиях. Плотность газа находится по его температуре T_g из таблиц [8], причем давление газа вдоль канала считается равным атмосферному.

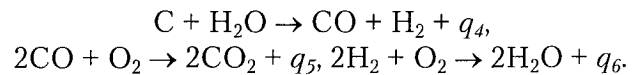
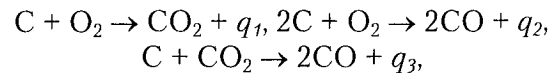
Плотность ρ_l и удельная теплоемкость c_l частицы зависят не только от температуры, но и от состава частицы:

$$\rho_l = \rho_{l0}(C_f + A + V + W),$$

$$c_l = (c_f C_f + c_a A + c_v V + c_w W) / (C_f + A + V + W),$$

где ρ_{l0} – начальная плотность частицы; c_f, c_a, c_v, c_w – удельные теплоемкости углерода, золы, летучих и воды; C_f, A, V, W – массовые доли этих компонентов угольной частицы в данном сечении потока, взятые относительно ее начальной массы. Удельные теплоемкости летучих и воды считаются постоянными. Зависимости величин c_f и c_a от температуры t_l до 1000°C берутся из [9]. При t_l выше 1000°C эти параметры считаются постоянными.

Горение угля описывается следующими химическими реакциями [10]



Первые четыре из них – гетерогенные (считаем, что они протекают на поверхности частиц), две последние – гомогенные. Параметры реакций приведены в табл. 1, где E_j, k_{oj} – энергия активации и предэкспонента в законе Аррениуса [11, 12], j – порядковый номер реакции. Размерность k_{oj} : м/с – для гетерогенных реакций; 1/с – для гомогенных.

Предполагается, что тепло гетерогенных реакций, кроме первой, целиком идет на нагрев частицы. Тепло первой реакции делится между час-

Таблица 1

j , номер реакции	1	2	3	4	5	6
q_j , кДж/моль	395	219	-176	-131	571	481
E_j , кДж/моль	158,8	217,5	179,7	87,8	96,8	129
k_{oj} , м/с; 1/с	$4,16 \cdot 10^5$	$1,32 \cdot 10^9$	$8,28 \cdot 10^4$	6,57	$7,05 \cdot 10^6$	$2,14 \cdot 10^{14}$

тицей и газом следующим образом: долю этого тепла, равную $G_{C_1}/(G_{C_1} + G_{gC_2})$, относим к частице, остальную его часть – к газу.

Численные исследования выполнялись при следующих значениях параметров процесса: материал плазмы – воздух; температура плазмы $T_{пл} = 2-7$ тыс. К; тепловая мощность плазменной струи $P_{пл} = 10-30$ кВт; начальная скорость плазменной струи $u_{пл} = 50-200$ м/с; расход угля $G_y = 3-30$ г/с; длина и диаметр канала реактора $L = 50$ см, $D = 10-13$ см; диаметр сопла плазматрона $d = 0,8-1,5$ см. Рассматривался донецкий АШ стандартного элементного состава [13] с влажностью $W^p = 1\%$ и зольностью $A^p = 34\%$. Расчеты проводились для монодисперсной пыли и полидисперсной, состоящей из трех фракций с распределением размеров по Розину-Раммлеру. В основном рассматривалась угольная пыль с максимальным размером частиц $\delta_{max} = 100$ мкм, однако некоторые расчеты производились для частиц с $\delta_{max} = 50$ мкм с целью выявить характер влияния размеров частиц на рабочий процесс.

Исследования позволили выявить некоторые общие особенности рабочего процесса в ДС. Установлена принципиальная роль вторичного воздуха, а также величины угольных частиц. Расчеты указывают также на то, что температура в канале ДС заметно выше, чем в камере ТХП обычной трехступенчатой схемы, и значительно превосходит температуру плавления золы.

С последним обстоятельством связан основной, по-видимому, недостаток предлагаемого подхода, состоящий в выпадении расплавленной золы на стенки канала. Кроме того, возрастает тепловая нагрузка на стенки. Необходимо отметить, однако, что в этом плане зола на стенках канала играет положительную роль, являясь теплоизолирующим фактором.

Большое влияние вторичного воздуха на рабочий процесс обусловлено тем, что его массовый (стехиометрический) расход намного превосходит расход угля. Вторичный воздух подается в канал ДС в виде спутного потока к двухфазной струе и в значительной степени определяет ее динамику, температуру и геометрию. Он оказывает на струю разностороннее и противоречивое воздействие. С одной стороны, способствует горению, с другой – удлиняет струю, изменяет ее скорость и захлаживает. Увеличение дальности струи особенно заметно при больших расходах угля. Например, при $G_y = 18$ г/с и $\alpha_t = 1,2$ струя расширяется таким образом, что ее внешние границы касаются стенки канала реактора

лишь вблизи его выходного сечения. Конверсия углерода при этом достигает значения $\alpha_c = 0,505$ при температуре второй (основной по массе) фракции $t_f = 1280^\circ\text{C}$. При уменьшении расхода вторичного воздуха его захлаживающий эффект в целом снижается, однако из-за уменьшения длины струи большая часть его переносится на начальный участок струи, на котором угольная пыль воспламеняется. В результате условия воспламенения пыли ухудшаются, и возникает тенденция к снижению температуры потока на выходе ДС.

Противоречивый характер воздействия вторичного воздуха на струю приводит к тому, что зависимость значения коэффициента умножения тепловой мощности струи ϵ (характеризующего относительный рост этой величины в реакторе) на выходе ДС от коэффициента избытка окислителя α_t является немонотонной и имеет максимум при некотором значении α_t , которое может быть найдено по разработанной нами модели. Этот результат иллюстрирует рис. 2 для случая $G_{пл} = 2$ г/с, $G_y = 18$ г/с, $G_{тр} = 1,3$ г/с, $d = 0,009$ м, $D = 0,12$ м, $T_{пл} = 5000$ К, температура стенки канала $T_{ст} = 1773$ К. На рис. 3 приведены результаты расчетов продольного распределения коэффициента ϵ для слу-

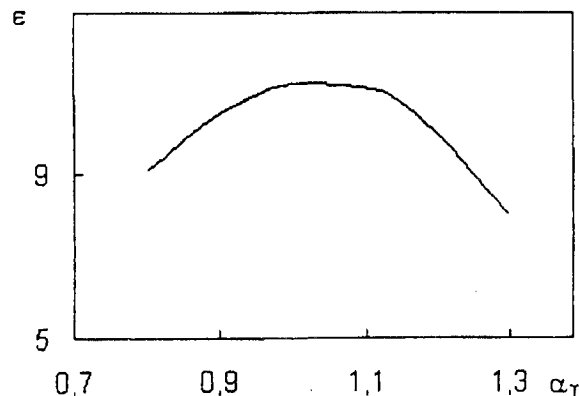


Рис. 2

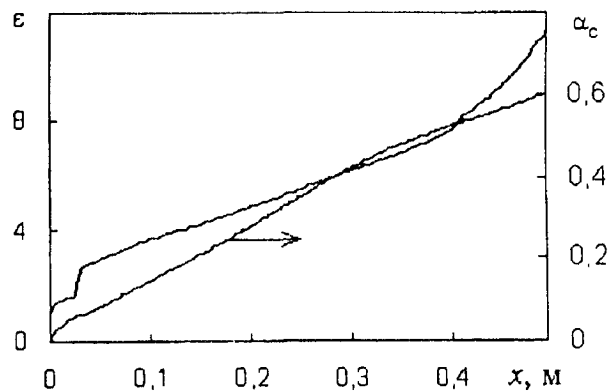


Рис. 3

чая $\delta_{\text{max}} = 100$ мкм, $G_{\text{пл}} = 1,7$ г/с, $G_y = 10$ г/с, $G_{\text{гр}} = 1,2$ г/с, $d = 0,0092$ м, $D = 0,1$ м, $T_{\text{пл}} = 4300$ К, $T_{\text{ст}} = 1773$ К, $\alpha_r = 1,2$.

Расчеты показывают, что, варьируя значения параметров процесса, для частиц с максимальным размером $\delta_{\text{max}} = 100$ мкм, можно добиться умножения тепловой мощности струи на выходе ДС в 10-12 раз при конверсии углерода $\alpha_c = 0,3-0,6$. Факел на выходе ДС содержит значительное количество угольных частиц крупных фракций с температурой 1300-1700°C и скоростью 40-80 м/с. Температура и скорость газового потока на выходе примерно такие же, как и у частиц. Газовая фаза в основном состоит из азота и двуокиси углерода.

Установлено, что расчеты для моно- и полидисперсной пыли дают не очень отличающиеся конечные температуры частиц, однако коэффициенты ϵ и α_c в полидисперсном случае заметно выше.

В заключение приведем результаты оценки экономических показателей эффективности замены мазутной подсветки плазменной. Оценка выполнена применительно к ТЭЦ-3 ГКХ «Александрияуголь» на основе данных о работе ТЭЦ в 2001 году, когда потребление мазута было наибольшим. Исходные величины, выбранные для проведения расчетов, приведены в табл. 2. В расчете принимается, что за счет снижения механического недожога q_4 при переходе от мазутной к плазменной технологии суммарное тепловыделение в топке котла существенно не изменится.

Эксплуатационные расходы при использовании мазутной подсветки составляют величину $C_1 = C_m + C_{\text{мх}}$, где C_m , $C_{\text{мх}}$ – расходы на мазут и содержание мазутного хозяйства. В соответствии с данными табл. 2 $C_1 = 1,185$ млн грн./год. При использовании плазменной технологии эксплуатационные расходы $C_2 = C_3 + C_3 + C_a + C_{\text{эл}}$, где C_3 , C_3 , $C_{\text{эл}}$, C_a – затраты на электроэнергию, заработную плату операторов, электроды для плазмотронов и амортизационные расходы.

Затраты $C_3 = c_3 Q_{\text{уд}} G_{\text{ут}}$, где c_3 – цена электроэнергии, $Q_{\text{уд}}$ – удельные расходы электроэнергии на плазменную обработку угля, кВт·ч/т у.т., $G_{\text{ут}}$ – расход условного топлива.

В традиционных схемах плазменной подсветки для рассматриваемого бурого Александрийского угля величина ($Q_{\text{уд}}$ может быть выбрана по экспериментальным результатам [2], в соответствии с которыми $Q_{\text{уд}} \sim 30$ кВт·ч/т у.т.

Таблица 2

Величина	Значение*
Годовой расход мазута на подсветку, тыс. т	2,1
Расход бурого угля, тыс. т	373
Калорийность угля, МДж/кг	6,914
Калорийность мазута, МДж/кг	39,805
Годовые затраты условного топлива, тыс. т	90,8
Число плазмотронов на котле, шт.	2
Число котлов, шт.	3
Средняя стоимость мазута, грн./т	549
Цена электроэнергии, грн./кВт·ч	0,178
Стоимость содержания маз. хозяйства, грн./т	15,3
Стоимость электродов плазмотрона, грн./шт.	125
Стоимость плазменной системы, тыс. грн./шт.	250

* Данные взяты из предложения ООО «ТОПАС» по реконструкции ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3 ГКХ «Александрияуголь».

В предлагаемой схеме эта величина, исходя из приведенных выше теоретических результатов, может быть в 10-15 раз ниже. Примем $Q_{\text{уд}} = 3$ кВт·ч/т у.т. Тогда $C_3 = 0,049$ млн грн./год.

Примем также, что шесть плазменных установок в смену обслуживают три оператора. При трехсменной работе и 40-часовой рабочей неделе необходимо 15 человек. Тогда, при среднемесячной заработной плате оператора 500 гривен, с учетом налогов и отчислений величина C_3 составляет 0,135 млн грн./год.

Затраты на электроды $C_{\text{эл}} = c_{\text{эл}} N B_{\text{пл}} / B_{\text{эл}}$, где $c_{\text{эл}}$ – цена электродов, N – их количество, $B_{\text{пл}}$, $B_{\text{эл}}$ – число часов работы плазменной системы и электродов. Для традиционной схемы $B_{\text{эл}} \sim 200-300$ ч. В предлагаемой схеме эта величина может быть в 1,5-2 раза большей. Примем $B_{\text{эл}} = 450$ ч. Тогда при непрерывной годовой работе плазмотрона $C_{\text{эл}} = 14,6$ тыс. грн./год.

Амортизационные расходы $C_a = aK$, где a – коэффициент амортизационных отчислений, $a = 0,06$, K – капитальные вложения. Примем, что $K = K_{\text{пл}}$, где $K_{\text{пл}}$ – стоимость установленных на котле плазменных систем. С учетом данных табл. 2 $C_a = 0,09$ млн грн./год.

Тогда экономия при использовании предлагаемой схемы на ТЭЦ-3 в 2001 году составила бы величину $\Delta C = C_1 - C_2 = 0,896$ млн грн./год, или 76% от суммы затрат на мазут и мазутное хозяйство. Срок окупаемости $T = K / (C_1 - C_2) = 1,7$ года. При традиционной схеме $Q_{\text{уд}} = 30$ кВт·ч/т у.т., $B_{\text{эл}} = 300$ ч и $\Delta C = 0,38 C_1$, $T = 3,3$ года.

Следует заметить, что в расчете не учитывается снижение экологического ущерба из-за уменьшения выбросов оксидов азота, высокотемпературной коррозии, диоксида серы в про-

дуктах сгорания в результате замены мазутной подсветки плазменной.

Таким образом, приведенные результаты свидетельствуют о том, что использование

предлагаемой схемы подсветки пылеугольного факела позволит снизить затраты на выработку электрической и тепловой энергии и сэкономить ценное газомазутное топливо.

1. Сакипов З.Б., Мессерле В.Е., Иманкулов Э.Р. и др. Способ плазменной стабилизации горения низкорреакционных углей // Энергетика и электрификация. – 1990. – №1. – С. 5-7.
2. Плазменная безмазутная растопка котлов и стабилизация горения пылеугольного факела / М.Ф. Жуков, Е.И. Карпенко, В.С. Перегудов и др. – Новосибирск: Наука, 1995. – 295 с.
3. Алексеенко С.В., Бурдуков А.П., Чернова Г.В., Чурашев В.Н. Энергоэффективные и экологически чистые технологии при реконструкции и модернизации угольной теплоэнергетики // Изв. РАН. Энергетика. – 2003. – №2. – С. 52-63.
4. Жуков М.Ф., Коротеев А.С., Урюков Б.А. Прикладная динамика термической плазмы. – Новосибирск: Наука, 1973. – 304 с.
5. Петров С.В. Плазменная обработка низкорреакционных углей // Вісник східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2003. - №11 (69). – С. 71-80.
6. олков Э.П., Зайчик Л.И., Першуков В.А. Моделирование горения твердого топлива. – М.: Наука, 1994. – 320 с.
7. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. – М.: Физматиз, 1960. – 715 с.
8. Энгельшт В.С., Гурович В.Ц., Десятков Г.А. и др. Теория столба электрической дуги. – Новосибирск: Наука, 1990. – 376 с.
9. Агроскин А.А., Глейбман В.Б. Теплофизика твердого топлива. – М.: Недра, 1980. – 256 с.
10. Бабий В.И., Куваев Ю.Ф. Горение угольной пыли и горение пылеугольного факела. – Энергоатомиздат, 1986. – 208 с.
11. Померанцев В.В., Арефьев К.М., Ахмедов Д.Б. и др. Основы практической теории горения – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 312 с.
12. Плазмохимическая переработка угля / М.Ф. Жуков, Р.А. Калинин, А.А. Левицкий, Л.С. Полак. – М.: Наука, 1990. – 200 с.
13. Теплотехнический справочник. – М.: Энергия, 1976. – Ч. 2. – 896 с.