

Е.И. Карпенко¹, А.Б. Устименко^{2*}

¹Отраслевой Центр Плазменно-Энергетических Технологий РАО «ЕЭС России»,
Россия, г. Гусиноозерск

²ТОО «Плазмотехника», Казахстан, г. Алматы

*e-mail: ust@physics.kz

ПЛАЗМЕННЫЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ

После нефти уголь вносит наибольший вклад в мировой баланс производства первичных энергетических ресурсов. Так, со времен первого нефтяного кризиса мировое потребление угля увеличилось на 45%, и достигло доли в 22% в общем производстве первичных энергоресурсов (ОПЭР). Уголь более всего используется при производстве электроэнергии: около 40% производимой в мире электроэнергии вырабатывается путем сжигания угля. В статье рассмотрена одна из перспективных технологий – плазменное зажигание и сжигание энергетических углей, применение которой позволяет заменять дорогую нефть дешевым углем на всех тепловых электростанциях. Плазменная технология пуска безмасляных котлов и стабилизации пламени угольной пыли апробирована на ТЭЦ Российской Федерации, Республики Казахстана, Украины, Китая, Монголии, Кореи, Словакии и Сербии. В статье обоснована необходимость развития новых технологий утилизации топлива. Описаны теоретические и экспериментальные методы исследования воспламенения угольной плазмы, термохимической подготовки, сжигания и газификации. В статье обсуждаются методы расчета плазменно-топливных систем. Приведены основные принципы функционирования плазменно-топливных систем и рассмотрены вопросы обеспечения эко-экономических преимуществ по сравнению с традиционными технологиями использования топлива.

Ключевые слова: плазменная технология, плазменное зажигание, сжигание энергетических углей, методы плазменно-топливных систем.

E.I. Karpenko¹, A.B. Ustimenko^{2*}

¹Branch Centre of Plasma- Energy Technologies of the RJS «EES of Russia», Russia, Gusinoozersk

²«Plasmotechnika LLP», Kazakhstan, Almaty

*e-mail: ust@physics.kz

Plasma methods for efficiency of solid fuel utilization improvement

After oil, coal makes the largest contribution to the global balance of primary energy production. Thus, since the first oil crisis, global coal consumption has increased by 45%, and reached a share of 22% in the total production of primary energy resources (PPER). Coal is most used in power generation: about 40% of the world's electricity is generated by burning coal. Necessity of fuel utilization new technologies development is justified. One of the promising technologies is plasma ignition and incineration of power coals, application of which allows substitution of expensive oil by cheap coal in thermal power plants. Plasma technology of oil-free boilers start up and pulverized coal flame stabilization has been tested in thermal power plant of Russia, Republic of Kazakhstan, Ukraine, China, Mongolia, Korea, Slovakia and Serbia. Theoretical and experimental methods of investigation of coal plasma ignition, thermochemical preparation, incineration and gasification are described. Methods of plasma-fuel systems computation are discussed. Ensuring eco-economical advantages in compare with conventional technologies of fuel utilization basic principles of plasma-fuel systems functioning are presented.

Kew words: plasma technology, plasma ignition, incineration of power coals, methods of plasma-fuel systems.

Е.И. Карпенко¹, А.Б. Устименко^{2*}

¹«Ресейдің ЕЭС» РАО плазма-энергетикалық технологиялар орталығы, Ресей, Гусиноозерск қ.

²«Плазмотехника» ЖШС, Қазақстан, Алматы қ.

*e-mail: ust@physics.kz

Қатты отынды пайдалану тиімділігін арттырудың плазмалық әдістері

Мұнайдан кейін көмір алғашқы энергия өндірісінің әлемдік балансына үлкен үлес қосады. Осылайша, алғашқы мұнай дағдарысынан бастап көмірді әлемдік тұтыну 45% -ға өсті және

алғашқы энергетикалық ресурстардың (АЭРӨ) жалпы өндірісіндегі 22% үлеске жетті. Көмір электр энергиясын өндіруде көбірек қолданылады: әлемдегі электр энергиясының шамамен 40% көмірді жағу арқылы өндіріледі. Бұл мақалада отынды кәдеге жаратудың жаңа технологияларын жасау қажеттілігі дәлелденді. Перспективалы технологиялардың бірі плазмалық от жағу және термалды көмірді жағу болып табылатыны белгілі, оны пайдалану жылу электр станцияларында қымбат мұнайды арзан көмірге ауыстыруға мүмкіндік береді. Мұнайсыз қазандықтарды іске қосудың және көмір шаңының жалынын тұрақтандырудың плазмалық технологиясы Ресей Федерациясы, Қазақстан Республикасы, Украина, Қытай, Моңғолия, Корея, Словакия және Сербия жылу энергетикалық станциялардында сынақтан өтті. Көмір плазмасының тұтануын, термохимиялық дайындалуын, жануын және газдануын зерттеудің теориялық және тәжірибелік әдістері сипатталған. Плазмалық отын жүйелерін есептеу әдістері талқыланады. Мақалада отынды пайдаланудың дәстүрлі технологияларымен салыстырғанда экологиялық – экономикалық артықшылықтар беру плазмалық отын жүйелерінің жұмыс істеуінің негізгі принциптері көрсетілген.

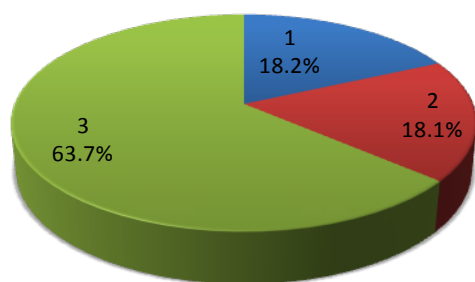
Түйін сөздер: плазмалық технология, плазмалық тұтану, энергия өндіретін көмірлердің жануы, плазмалық-отындық жүйелердің әдістері.

Введение

Поскольку уголь является одним из главных источников энергии XXI века проблеме его эффективного и экологически чистого сжигания во всем мире уделяется большое внимание. Доля угля в запасах ископаемых топлив показана на рис. 1. По сравнению с другими ископаемыми топливами, запасы угля приблизительно в четыре раза превышают запасы нефти (оценочно на 41 год) или запасов газа (на 67 лет) [1].

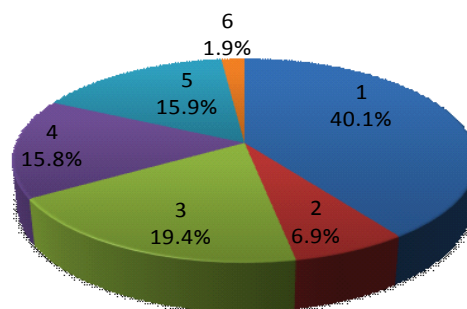
Мировая энергетика в настоящее время и на обозримую перспективу ориентирована на использование органического топлива, главным образом низкосортных углей. Следует отме-

тить, что ухудшение качества энергетических углей наблюдается повсеместно, и не только в странах СНГ, но и в развитых капиталистических странах. Несмотря на то, что за всю историю были подъемы и падения в активности использования угля он и сейчас остается одним из важнейших топлив для выработки энергии, особенно электрической (рис. 2). Согласно статистике 2011 года [3] углем обеспечивается около 24% выработки тепловой энергии и около 40.6 % электрической энергии в мире. При этом в ближайшем будущем ожидается рост его использования. По прогнозам [4] к 2020 году доля угля в мировом топливном балансе превысит 50 %.



1 – нефть, 2 – газ, 3 – уголь

Рисунок 1 – Мировые разведанные запасы ископаемых топлив [2]



1 – уголь, 2 – жидкое топливо (мазут, соляра), 3 – газ, 4 – атомная энергия, 5 – гидроэнергия, 6 – другие (солнечная, ветровая, геотермальная энергия, отходы, включая растительного происхождения)

Рисунок 2 – Распределение энергоносителей по производству электроэнергии в мире [3]

Рисунок 3 показывает долю первичных энергоносителей в прошлом и будущем. Данные исследования основаны на прогнозе доступности и роста потребности в энергии [5, 6]. Из рисунка следует, что доля нефти и газа в выработке энергии к 2100 г. будет снижаться, а доля угля – возрастать.

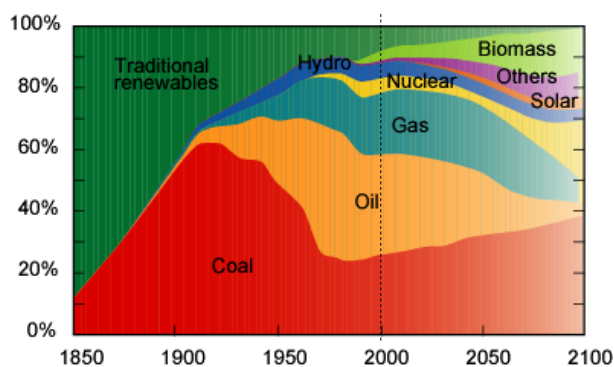


Рисунок 3 – Доля первичных энергоносителей в период с 1850 по 2100 годы

Непосредственное сжигание низкосортных углей, обладающих высокой зольностью (40-50%), влажностью (30-40%), серосодержанием (1-3%) и низким выходом летучих (5-15%), в существующих топочных устройствах связано со значительными трудностями из-за ухудшения воспламенения и выгорания топлива, увеличения мехнедожога и вредных пылегазовых выбросов (парниковых газов, золы, оксидов азота и серы). Достаточно сказать, что проблема выбросов парниковых газов (двуоксида углерода, метана и др.) и вызванное этим общее потепление переросла в настоящее время в общечеловеческую проблему, связанную с глобальным изменением климата на земле, затоплением огромных территорий суши, опустыниванием и др.

Кроме того, для современного развития мировой теплоэнергетики характерно сокращение использования дефицитного жидкого топлива, являющегося ценным сырьем для нефтеперерабатывающей промышленности, и расширение применения твердых топлив, качество которых неуклонно снижается. В мировой практике принято обогащать угли перед их сжиганием. Однако нельзя ожидать обогащения углей в объемах, необходимых для ТЭС России и стран СНГ, особенно из-за большой стоимости обогащения. Кроме того, в результате обогащения можно снизить зольность и влажность углей, тогда как

увеличить реакционную способность, т.е. выход летучих (тощие угли, антрацит имеют выход летучих 4-12%), путем обогащения невозможно. Для улучшения воспламенения и стабилизации горения низкосортных углей с низким выходом летучих и высокой зольностью [7] существуют дополнительные мероприятия, которые в основном сводятся к утонению помола (до $R_{90}=6-8\%$), подогреву аэросмеси (до 150°C) и вторичного воздуха (до 400°C), подаче угольной пыли высокой концентрации (до 50 кг/кг) с последующим разбавлением и, наконец, совместному сжиганию с углем мазута или природного газа. Последнее техническое решение получило самое широкое распространение.

В мире на растопку пылеугольных котлов из холодного или горячего состояния, подхват и стабилизацию горения пылеугольного факела расходуют более 50 млн. тонн мазута и дизтоплива в год. На ТЭС растопка котлов (время растопки 3-14 часов) производится несколько раз в год (до 25 и более пусков ежегодно на один котел), а подсветка пылеугольного факела осуществляется периодически при потускнении факела или снижении нагрузки. Для котлов различной паропроизводительности в соответствии с «Инструкцией по их эксплуатации» расходуются разное количество мазута (таблица 1).

Таблица 1 – Расход мазута на растопку котлов различной паропроизводительности

Паропроизводительность котла, т/ч	Расход мазута на 1 растопку, т
50 - 75	3 - 6
160 - 200	10 - 25
220 - 420	30 - 80
640 - 670	80 - 100
950	100 - 140
1650	150 - 250
2650	250 - 350

Однако, существующая в теплоэнергетике практика использования для растопки котлов и стабилизации горения низкосортных углей, дефицитных мазута и природного газа не решает проблемы, так как их совместное сжигание с углем приводит к повышению мехнедожога и выбросов оксидов азота и серы (в случае стабилизации горения пылеугольного факела высокосернистым мазутом). Использование для растоп-

ки котлов и подсветки пылеугольного топлива огромного количества мазута является одной из причин снижения эффективности топливоиспользования и низких экологических показателей работы тепловых электростанций. Резкое ужесточение в последнее время требований к повышению эффективности топливоиспользования и защите окружающей среды от вредных выбросов явилось мощным стимулом для развития новых перспективных технологий подготовки к сжиганию и комплексной переработки топлив, позволяющих решить вышеуказанные проблемы.

Плазменные методы термохимической переработки твердых топлив

Среди технических решений, предлагаемых для осуществления предварительной подготовки к сжиганию и комплексной переработки углей, наиболее прогрессивными представляются плазменные методы термохимической переработки твердых топлив. Эти методы основаны на использовании для нагрева и термохимических превращений органической и минеральной части углей электроэнергии, преобразуемой в энергию плазмы в электродуговых плазмотронах.

Широкое распространение в народном хозяйстве высокоэффективной плазменной технологии (в химии, металлургии, машиностроении, обрабатывающей промышленности и др.) предопределило ее использование для вышеназванных задач энергетики. Применение для плазменной термохимической подготовки и переработки топлив электродуговой плазмы с высокой концентрацией энергии, на 1-2 порядка превышающей таковую в существующих огневых устройствах, наличие в ней химически активных центров (атомов, свободных радикалов, ионов и электронного газа), практически отсутствующих в обычных топочных процессах, способствует энергетически кинетически более эффективному, чем в традиционных огневых методах, осуществлению нагрева и термохимических превращений углей. Наиболее разработаны две формы использования электроэнергии: в форме энергии низкотемпературной плазмы [8, 9] для воспламенения пылеугольного факела и в виде джоулевого тепла при прохождении электрического тока через углеродосодержащий материал (электрокипящий слой) [10] или через омическое сопротивление (электрозапальник резисторного типа) [11, 12]. Были разработаны различные конструкции растопочных пылеугольных горелок как у нас в стране, так и за рубежом. Преобразование элек-

троэнергии в энергию электродугового разряда позволяет более активно воздействовать на процессы воспламенения и стабилизации горения твердых топлив. У истоков этого направления в энергетике стояли исследователи Blackburn P.R., Reason I. (Англия) [13, 14], Cioffi P.L. (США) [15], Tuppeny W.H. (США) [16], Drouet M.G., Duverger D., Ashard I.L. (Канада) [8, 17].

Исследования в этой области проводятся в ряде научных коллективов России и стран СНГ – в Отраслевом центре плазменно-энергетических технологий РАО «ЕЭС России», Институте теплофизики СО РАН, Институте нефтехимического синтеза РАН, ОАО «ЭНИН им. Г.М. Кржижановского», ОАО «Всероссийский теплотехнический институт», Институте угольных энерготехнологий НАН Украины, Институте физики НАН Киргизии, ОАО КазНИИ энергетики им. Академика Ш.Ч. Чокина, НИИ экспериментальной и теоретической физики Казахского Национального Университета им. аль-Фараби МОН РК, Институте проблем горения МОН РК, ТОО «НТО Плазмотехника» в Казахстане и др. В дальнем зарубежье исследования плазменного воспламенения и стабилизации горения пылеугольного факела осуществляют известные энергетические фирмы США, Канады, ФРГ, Китая, Кореи, Турции (Бабкок Уилкоккс, Комбашн Инжиниринг, Вестингауз, Сидбек Норминс, Штайнмюллер, Фостер Уиллер, Лоеше, Янтай Луньян, Нанкинская электротехническая компания, Электроэнергетическая компания ХАНА, Турецкий Национальный плазменный центр, и др.), которые уже имеют и опыт промышленной эксплуатации электродуговых плазмотронов на ряде электростанций Китая, Кореи, США и Канады [8, 18, 19].

Традиционные технологии сжигания твердых топлив приводят к более высокому уровню выброса вредных веществ, чем при сжигании жидкого и газообразного топлива. Рост доли твердых топлив в энергобалансе ТЭС требует создания новых более эффективных и экологически чистых технологий их использования. В частности, существующая в теплоэнергетике практика совместного сжигания мазута с углем ухудшает основные показатели пылеугольных тепловых электростанций.

Для повышения эффективности использования твердых топлив, снижения доли мазута и природного газа в топливном балансе тепловых электростанций и снижения вредных пылегазовых выбросов была разработана плазменная технология воспламенения, термохимической подготовки и сжигания углей [20 – 29].

В 1980 году по инициативе Госкомитета по науке и технике СССР Госплан СССР утвердил программу ОЦ.008 «Плазмохимическая переработка углей и шламов гидрогенизации углей» для решения проблемы эффективной и экологически приемлемой утилизации низкосортных твердых топлив. Главными организациями по разработке технологии и плазменного оборудования были определены Институт нефтехимического синтеза АН СССР, КазНИИ Энергетики Минэнерго СССР и Институт Теплофизики СО АН СССР. По результатам этой программы в 1986 году была разработана отраслевая научно-техническая программа Минэнерго СССР ОНТП 00.00.01. «Повышение эффективности использования низкосортных топлив на тепловых электростанциях». Главными организациями были назначены Всесоюзный теплотехнический институт и КазНИИ Энергетики Минэнерго СССР [19].

Разработанная технология и плазменно-топливные системы для ее осуществления были успешно испытаны в 1989 году на Усть-Каменогорской ТЭЦ (Казахстан) и на Мироновской ГРЭС (Украина), в 1995 году на Баодийской ТЭС (Китай) и в 1996 на Алматинской ТЭЦ-3 (Казахстан) [20]. В 1995 г. работы по дальнейшему развитию и внедрению ПТС получили мощный импульс в России (г. Гусиноозерск), где для этих целей был создан Отраслевой Центр Плазменно-Энергетических технологий РАО «ЕЭС России» [24]. С 1998 года по настоящее время совершенствование плазменных технологий переработки твердых топлив продолжается в рамках совместных проектов Казахстана и России представителями отраслевой, академической и вузовской науки.

За этот период разработано и испытано на ТЭС три поколения плазменно-топливных систем (ПТС) (таблица 2). Из таблицы видно, что ПТС установлены и испытаны в России, Казахстане, Украине, Корее, Китае, Словакии и Монголии на 31 котле паропроизводительностью от 75 до 950 т/ч, оснащенных различными системами пылеприготовления (прямого вдувания и с промежуточным бункером) и разными типами пылеугольных горелок (прямоточные, муфельные и вихревые). При испытаниях ПТС сжигались все типы энергетических углей (бурые, каменные, антрациты и их смеси) с содержанием летучих от 4 до 50%, зольностью от 15 до 56% и теплотой сгорания от 1600 до 6200 ккал/кг.

В ПТС первого поколения использовался плазмотрон с подаваемым стержневым графитовым катодом и кольцевым медным водоохлаж-

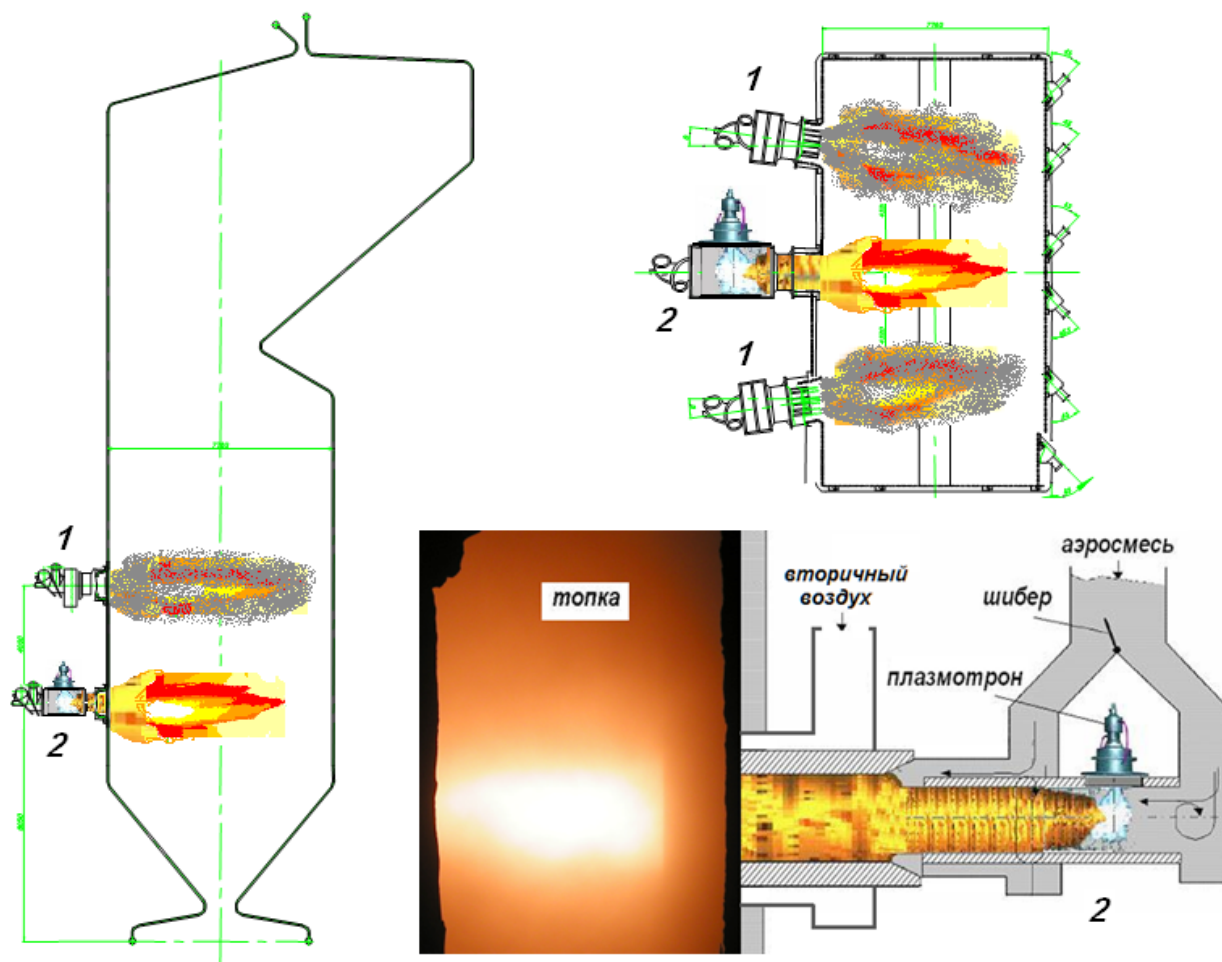
даемым анодом. ПТС первого поколения были внедрены на котле Ч-200 Баодийской ТЭС. Компания Yantai Longyuan Electric Power Technology Co., Ltd (Китай), модернизировав эти ПТС первого поколения, распространила их еще на 500 котлах Китая с установленной мощностью более 300 млн. кВт [30, 31]. В ПТС второго поколения (1996-2001) использовались плазмтроны уже со сменными медными водоохлаждаемыми катодом и анодом. Источники электропитания обеспечивали устойчивую параллельную работу одновременно нескольких плазмтронов от одного трансформатора. При испытаниях ПТС второго поколения на Шаогуанской ТЭС (Китай) в 1999-2001 г.г. от одного трансформатора работало 8 ПТС. В 2007 году на котле ВГ-75/39-М ТЭС «Золотая Гора» в г. Шеньян и в 2009 г. на ТЭС «Ганшун» в г. Шанси (Китай) испытаны ПТС третьего поколения [19]. В отличие от предыдущих поколений ПТС был обеспечен безосцилляторный пуск и безбалластный режим работы плазмтронов. Мощность плазмтрона может варьироваться в широком интервале от 80 до 300 кВт [32].

Последний пример реализации ПТС третьего поколения на Алматинской ТЭЦ-2 (табл. 2) представлен на рис. 4 [33]. Во время испытаний температура факелов от ПТС составляла 1050-1070°C (фото на рис.4). Зафиксировано, что скорость повышения температуры горячего воздуха в режиме растопки котла из холодного состояния соответствовала скорости повышения температуры при мазутной растопке котлоагрегата.

При использовании ПТС мазут, дизельное топливо или природный газ заменяют самой угольной пылью, подвергаемой термохимической подготовке в объеме пылеугольной горелки с использованием электродуговых плазмтронов, являющихся основным элементом ПТС. Технология ПТС основана на плазменной термохимической подготовке угля к сжиганию. Она заключается в нагреве аэросмеси (угольная пыль + воздух) электродуговой плазмой до температуры выхода летучих угля и частичной газификации коксового остатка. Тем самым из исходного угля независимо от его качества из аэросмеси получают высокорекреакционное двухкомпонентное топливо (горючий газ + коксовый остаток). При его смешении с вторичным воздухом в топке котла двухкомпонентное топливо воспламеняется и устойчиво горит без использования дополнительного топлива (мазут или природный газ), традиционно используемого для растопки котлов из холодного состояния и стабилизации горения факела низкосортного энергетического угля.

Таблица 2 – Промышленные испытания ПТС на ТЭС Евразии

№	Месторасположение ТЭС	Тип и количество котлов с ПТС	Паропроизводительность котла, т/ч	Кол-во ПТС, шт.
Российская Федерация				
1.	Гусинозерская ГРЭС (г.Гусиноозерск, 1994-1995)	ТПЕ-215 – 2 котла БКЗ-640 – 2 котла	670 640	8 7
2.	Черепетская ГРЭС (г. Суворов, 1997)	ТП-240 – 1 котел	240	4
3.	Нерюнгринская ГРЭС (г. Нерюнгри, 1997)	КВТК-100 – 1 котел	116 МВт	2
4.	Партизанская ГРЭС (г. Партизанск, 1998)	ТП-170 – 1 котел	170	2
5.	Улан-Удэнская ТЭЦ-2 (г. Улан-Удэ, 1997)	ТПЕ-185 – 1 котел	160	2
6.	Хабаровская ТЭЦ-3 (г. Хабаровск, 1998)	ТПЕ-216 – 1 котел	670	4
Украина				
7.	Кураховская ТЭС (г. Курахово, 1998-1999)	ТП-109 – 1 котел	670	4
8.	Мироновская ГРЭС (г. Мироновка, 1989)	ТП-230 – 1 котел	230	2
Казахстан				
9.	Алматинская ГРЭС (г. Алма-Ата, 1996)	БКЗ-160 – 1 котел	160	2
10.	Усть-Каменогорская ТЭЦ (г.Усть-Каменогорск, 1989)	ЦКТИ-75 – 2 котла	75	4
11.	Алматинская ТЭЦ-2 (г. Алматы, 2011)	БКЗ-420 – 1 котел	420	6
Монголия				
12.	Улан-Баторская ТЭЦ-4 (г. Улан-Батор, 1994)	БКЗ-420 – 8 котлов	420	16
13.	Эрдэнэтская ТЭЦ (г. Эрдэнэт, 1995)	БКЗ-75 – 1 котел	75	1
Китай				
14.	Баодийская ТЭС (г. Баоди, 1995)	Ч-200 – 1 котел	200	3
15.	Шаогуанская ТЭС (г. Шаогуан, 1999-2001)	F-220/100-W – 1 котел К-75 – 1 котел	230 75	4 1
16.	ТЭС «Золотая Гора» (г. Шеньян, 2007)	BG-75/39-M – 1 котел	75	2
17.	ТЭС «Ганшун» (г. Шанси, 2009)	BG-950/150 – 1 котел	950	4
Северная Корея				
18.	Восточно-Пхеньянская ТЭС (г. Пхеньян, 1993)	Е-210 – 1 котел	210	3
Словакия				
19.	ТЭС «Вояны» (г. Велки-Капушаны, 2000)	TAVICI – 1 котел	350	2
Сербия				
20.	Белградская ТЭС «Никола Тесла» (г. Обреновац, 2007)	ТП-210 – 1 котел	650	16



1 – штатная вихревая двухпоточная пылеугольная горелка, 2 – ПТС

Рисунок 4 – ПТС и схема их компоновки на котле БКЗ-420 АТЭС-2

Эта технология весьма актуальна для применения не только на пылеугольных ТЭС, но и в других базовых отраслях (цементная и химическая промышленность, металлургия, стройиндустрия), использующих твердое топливо и продукты его переработки.

Перспективной технологией для замещения кокса, жидкого топлива и природного газа в вышеназванных отраслях промышленности является плазменная газификация низкосортных твердых топлив с получением высококалорийного синтез-газа.

Реализация новых плазменных термохимических технологий подготовки к сжиганию и комплексной переработки твердых топлив обеспечивается, в конечном счете, уровнем разработки методов расчета исследуемых процессов и плазменных устройств для их осуществления. Последние тесно связаны с расчетно-теоретическими и экспериментальными исследованиями

теплофизических процессов движения и нагрева угольных частиц и термохимических процессов их последующих превращений в электродуговых устройствах. Крайняя сложность и взаимообусловленность рассматриваемых процессов, характеризующаяся наличием газовой, твердой и жидкой фаз и многокомпонентностью во всех фазовых состояниях, приводит к необходимости математического моделирования указанного комплекса процессов с определением теплофизических констант расчетно-теоретическими и эмпирическими методами с помощью компьютеров и специально созданных экспериментальных установок.

Работы по повышению эффективности использования твердых топлив с использованием плазменных технологий выполнялись в соответствии с программами и заданиями: Отраслевая научно-техническая программа Минэнерго СССР ОНТП 00.00.01, 1986-1990 г.г.; Задание

РАО «ЕЭС России» 03.00 (шифр СИ 8205), тема – Создание опытно-промышленной системы безмазутного растопки и подсветки пылеугольного факела с помощью электродуговых плазмотронов, 1992-1995 г.г.; Программа РАО «ЕЭС России» «Разработка новых технологий использования низкосортного твердого топлива в отрасли «Электроэнергетика», 1993 г.; Протокол Научно-технического совета РАО «ЕЭС России» от 19.05.97 г. по теме: «Система безопасной растопки и подсветки пылеугольных котлов с использованием плазмотронов»; Приказ РАО «ЕЭС России» «О мерах по повышению надежности работы и технического уровня производства», 2002 г.; а также работа выполнялась в рамках Международных проектов (Grant “Copernicus”, INCO : International Scientific Cooperation Projects (1998-2002), № IC-CT-98-0516 “Plasma Gasification of the Power Coals”; Grant “Copernicus”, INCO 2: International Scientific Cooperation Projects 2 (2001-2004), № ICA2-CT-2001-10006, “Improvement of Coal Combustion Efficiency and Decrease of Harmful Emission under the Influence of Plasma – ICEDHE”; Грант ISTC К-746, (2002-2006) “Plasma Technologies of Solid Fuels Processing for Power Engineering and Metallurgy”).

Однако дальнейшее развитие плазменно-энергетических технологий в немалой степени сдерживается из-за отсутствия адекватных математических моделей, позволяющих рассчитывать с необходимой точностью процессы, происходящие внутри ПТС.

В отличие от традиционных способов термохимической подготовки топлива (ТХПТ) к сжиганию плазменной технологии присущи определенные особенности [25, 34]:

истечение плазменной струи в поток происходит со скоростью ~200 м/сек при огромном градиенте температур между струей и потоком, т.е. интенсивность турбулентного переноса тепла в поток аэросмеси (смеси угольной пыли с воздухом) очень высока, что способствует ее быстрому прогреву и воспламенению;

экспериментально установлено, что угольные частицы при взаимодействии с высокотемпературной плазменной струей при скорости нагрева 10^3 - 10^4 град/с подвергаются тепловому удару и из-за термических напряжений раскалываются на десятки фрагментов, что приводит к резкому увеличению поверхности реагирования и соответственно росту скорости выделения тепла при горении, т.е. ускорению ТХПТ [35]. Кроме того, при плазменной ТХПТ в качестве топлива для нагрева аэросмеси используется

часть угольной пыли, являющейся основным топливом. Это существенно упрощает технологический процесс в целом.

Преимущества использования ПТС

Рассматривая вышеприведенные факторы совместно с инженерно-технологическими решениями, можно выделить основные преимущества использования ПТС по сравнению с традиционными решениями:

технологичность ТХПТ с использованием ПТС. С точки зрения технологичности мазутная ТХПТ более сложна: она с неизбежностью требует наличия мазутного хозяйства с общеизвестными, присущими ему проблемами. При мазутной ТХПТ появление дополнительных звеньев в цепи воспламенения делает более неопределенной возможность ее применения в режиме подхвата факела. В то же время, в силу практически безинерционного запуска плазмотрона, нет препятствий к использованию плазменной ТХПТ в таком режиме;

компоновка ПТС с котельным оборудованием. При мазутной термоподготовке (например [36]) камера ТХПТ имеет внутренний диаметр, равный 630 мм, уменьшить который в несколько раз, по-видимому невозможно. Встроить такую камеру в существующую горелку практически не удастся. Наиболее вероятное решение – установка камеры в специально созданной для нее амбразуре, что связано с дополнительными затратами на переоборудование котла. Вновь установленная, достаточно громоздкая оснастка, создаст определенные трудности в обслуживании котельного оборудования на рабочих площадках, где и без того часто наблюдается дефицит свободных площадей. Благодаря более высокой энергетической эффективности плазменной ТХПТ габариты ПТС позволяют встроить ее в основную горелку котла без изменения определяющих параметров последней;

экологические аспекты. При плазменной ТХПТ нагрев потока аэросмеси осуществляется в основном в результате горения определенной части угля. При этом азот топлива, ответственный за образование «топливных» оксидов азота, составляющих до 90-95 % выбросов NO_x , выходит вместе с летучими угля и в условиях дефицита окислителя образует молекулярный азот. Из последнего могут образоваться только «термические» оксиды азота. Более того, из-за дефицита окислителя температура газов в ПТС существенно ниже температуры факела в топке

и «термические» оксиды азота практически не образуются. При мазутной ТХПТ необходимо для протекания процесса термохимической подготовки тепло поступает в результате горения мазута. Выгорание мазута должно быть полным. При этом должен быть обеспечен избыток кислорода, необходимый для термохимических преобразований угля в камере ТХПТ. Из-за более высокой реакционной способности мазута, в сравнении с углем, горение будет происходить в условиях повышенного избытка воздуха и при более высокой температуре, чем горение угля. В этом случае более вероятны условия для образования как «топливных», так и «термических» оксидов азота. Как правило, содержание серы в мазуте выше, чем в угле, что влечет за собой увеличение эмиссии оксидов серы. В мазуте присутствует ванадий, который образует канцероген – пентаоксид ванадия. Ванадий также является причиной высокотемпературной коррозии поверхностей нагрева, а в угле его практически не бывает;

экономические показатели. Как правило, стоимость мазута в несколько раз выше стоимости угля в пересчете на условное топливо. Это делает использование ПТС для осуществления плазменной термохимической подготовки топлива к сжиганию быстро окупаемым (используемый ранее топочный мазут замещается самой угольной пылью). Срок окупаемости плазменной системы безмазутного воспламенения углей, как правило, не превышает 1-2 лет и зависит от соотношения цен на уголь, мазут и электроэнергию.

Для численного исследования плазменных технологий и проектирования оборудования для их осуществления используются следующие математические модели и компьютерные программы.

Автоматизированная программа термодинамических расчетов многокомпонентных гетерогенных систем TERRA [37].

Компьютерная программа «Плазма-уголь» для расчетов процессов движения, нагрева и кинетики термохимических превращений угольных смесей с различными окислителями (воздух, водяной пар, кислород, диоксид углерода) в плазменно-топливных системах (одномерная модель) [38].

Компьютерная программа «Плазма-муфель» для расчетов безмазутного воспламенения аэро-смеси в муфельизированных плазменно-топливных системах [39, 40].

Компьютерные программы FLOREAN (Теплотехнический институт, г. Брауншвайг, Гер-

мания) [28], CINAR ICE (Империял Колледж Лондон, Великобритания) [41] и KIVA-F (Руанский Университет, Франция) для трехмерных расчетов топок пылеугольных энергетических котлов, в том числе оснащенных ПТС [42-44].

Компьютерные программы для термодинамического анализа

Для термодинамического анализа процессов широко используется универсальная программа расчета многокомпонентных гетерогенных систем TERRA, которая отработана для высокотемпературных процессов. В отличие от традиционных в химической термодинамике методов расчета параметров равновесия с использованием энергии Гиббса, констант равновесия и закона действующих масс Гульдберга и Вааге, универсальная программа термодинамических расчетов TERRA, базируется на принципе максимума энтропии для изолированных термодинамических систем, находящихся в состоянии равновесия. Методическую основу термодинамического расчета составляют фундаментальные законы термодинамики совместно с законами сохранения массы, энергии и электрического заряда. Это позволяет для закрытых термодинамических систем построить математическую модель для общего случая образования в равновесии газообразных и конденсированных веществ, электронейтральных и ионизированных компонентов.

В общем случае исследуемая система является гетерогенной, состоит из нескольких разнородных фаз, отделенных видимыми границами, и все индивидуальные газообразные вещества входят в один состав газовой фазы. Конденсированные компоненты могут образовывать отдельные фазы. При этом присутствие газовой фазы считается обязательным для любой из рассматриваемых систем, в то время как конденсированные вещества могут отсутствовать. Равновесие подобных систем в соответствии со вторым началом термодинамики характеризуется максимумом энтропии относительно термодинамических степеней свободы, к числу которых относятся температура (T), давление (P) и концентрации компонентов равновесной смеси C_i . После достижения полного термодинамического равновесия фазовый и химический составы рассматриваемых систем должны быть однозначно связаны с остальными параметрами состояния (P , T , g , U) где g и U - соответственно плотность и внутренняя энергия системы.

Программа TERRA обладает собственной базой термодинамических свойств индивидуальных веществ, которая постоянно пополняется и уточняется. В настоящее время в банке данных содержатся термодинамические функции для 3500 индивидуальных веществ в интервале температур 300-6000К. Расчеты термохимической плазменной подготовки угля в ПТС выполняются с помощью математической модели движения, теплопереноса и термохимических превращений пылеугольного топлива в горелочном устройстве с плазменным источником. Модель описывает двухфазный (угольные частицы и газ-окислитель) химически реагирующий поток, с внутренним источником тепла (электрическая дуга, плазменный факел или экзотермические реакции).

Аэросмесь поступает в камеру, в которой происходит тепломассообмен между газом и электрической дугой, газом и частицами, частицами различных фракций. Учитываются также гидродинамическое сопротивление и теплообмен со стенкой двухфазного реагирующего потока. Рассматриваются следующие химические превращения топлива и окислителя: выделение летучих из угля, их изменения в газовой фазе, а также реакции газификации углерода топлива. Система обыкновенных дифференциальных уравнений включает в себя уравнения концентраций компонентов (уравнения химической кинетики) вместе с уравнениями для скоростей и температур газа и частиц. Плазменный источник учтен в виде внутреннего источника тепла с эмпирическим распределением тепловыделения вдоль оси ПТС в уравнении сохранения энергии. Модель также отличается подробным описанием кинетики химических реакций (всего 116 химических реакций), общая схема которых, наряду с реакциями выделения первичных продуктов, учитывает реакции их дальнейших превращений. Температурная зависимость констант скорости описывается законом Аррениуса.

Математическая модель реализована в виде компьютерной программы «Плазма-уголь». Поскольку одномерная модель не позволяет учесть эффект радиальной неоднородности потока, была разработана полуэмпирическая модель добавления новых порций аэросмеси к первоначальной зоне реакций, создающейся при смешении плазменной струи с аэросмесью. Данная модель реализована в виде программы Плазма-муфель. В отличие от «Плазма-уголь», в программе «Плазма-муфель» состав газовой фазы рассчитывается, исходя из предположения тер-

модинамического равновесия, которое оправдывается высокими скоростями протекания процессов превращений в газовой фазе по сравнению с реакциями на поверхности угольных частиц. Это допущение позволяет использовать для расчета химических взаимодействий и связанных с ними тепловых эффектов, а также концентраций компонентов газовой фазы универсальные термодинамические методы, использующие принцип максимума энтропии (программа TERRA), и отказаться от рассмотрения одновременно протекающих сотен химических реакций.

Компьютерные программы «Плазма-уголь» и «Плазма-муфель» проверены на тестовых примерах и показали свою работоспособность в условиях проведения серийных расчетов. Каждый расчет на персональном компьютере занимает около 90 секунд, что позволяет проводить серийные расчеты для параметрических анализов. Расчеты по программам дают возможность не только выяснить сущность процессов, приводящих к воспламенению угольных частиц под действием потока воздушной плазмы, но также определять геометрические параметры горелочного устройства для работы с конкретными типами углей.

Для математического моделирования процессов, происходящих в трехмерном пространстве топочных устройств при сжигании угля, используются компьютерные программы CINAR ICE, FLOREAN и KIVA-F, основанные на численном решении трехмерных уравнений переноса энергии и вещества с учетом химических реакций. Все три математические модели представляют собой сложную систему нелинейных трехмерных дифференциальных уравнений в частных производных, состоящую из уравнений неразрывности среды, состояния идеального газа и движения двухфазной среды, уравнений теплопереноса, химической кинетики и диффузии для компонентов реагирующей смеси с учетом радиационного и турбулентного переноса, описываемого с помощью k - ϵ -модели турбулентности.

Во всех моделях рассматривается упрощенная химическая модель горения, в которой отсутствуют промежуточные реакции и образование промежуточных компонентов, учитывается лишь выделение летучих из угля, их окисление до оксидов углерода и выгорание углерода. Компьютерные программы позволяют определять компоненты скорости $\{u, v, w\}$, поля температур, давлений, концентраций продуктов горения, включая образование оксидов азота.

Отметим, что в программах CINAR ICE и KIVA-F поведение газовой фазы двухфазного реагирующего потока описывается на основе подхода Эйлера, в то время как поведение индивидуальных частиц описывается на основе подхода Лагранжа. В программе FLOREAN для описания как газовой фазы так и частиц используется подход Эйлера, при котором предполагается, что скорость твердых частиц совпадает со скоростью газа, т.е. эффект проскальзывания – пренебрежимо мал.

Все указанные программы были верифицированы путем сравнения расчетных данных с результатами экспериментов в стендовых и натурных условиях [41 – 44].

Заключение

Современное состояние проблемы сжигания и переработки энергетических углей и методов повышения эффективности их использования на ТЭС, предприятиях металлургии и химической промышленности, обеспечивающих минимальный уровень вредных выбросов, требует разра-

ботки и применения новых технологий топливоиспользования, включая плазменные.

Одной из перспективных технологий топливоиспользования является плазменная технология воспламенения и сжигания энергетических углей, позволяющая заменить дешевым углем дорогостоящие и дефицитные газ и мазут на ТЭС и котельных. Плазменная технология безмазутной растопки котлов и стабилизации горения пылеугольного факела испытана на ряде ТЭС России, Казахстана, Украины, Китая, Монголии, Кореи, Словакии и Сербии.

Описаны теоретические и экспериментальные методы исследования и испытания плазменных процессов воспламенения, термохимической подготовки, сжигания и газификации углей. Представлены методы расчета ПТС, основанные на нульмерной, одномерных и трехмерных математических моделях.

Представлены основные принципы функционирования ПТС, обеспечивающие эколого-экономические преимущества, по сравнению с традиционными технологиями использования твердых топлив.

Литература

- 1 WCI. Coal Facts, Edition with 2004 data. – World Coal Institute, London, 2005.
- 2 British Petrol Statistical Review of World Energy, June 2011, British Petrol, London.
- 3 Key World Energy Statistics 2011 Edition, Internю Energy Agency, OECD/IEA, Paris.
- 4 Cletcins K. World power policy. Using a technology of a three-stage combustion for NOx suppression on solid fuel boilers in Europe and CIS //Opening Rep. Europ. Commission for Power Engineering and Transport. – Moscow: Russian J.S.Co. “United Power System of Russia”. All-Russian Technical Institute. – 2000. – P. 4-17.
- 5 WCI 2000, Good News from Coal, World Coal Institute, London, <http://www.wci-coal.com>
- 6 Bilger R. W. The Future for Energy from Combustion of Fossil Fuels //Proc. of the 5th Internю Confio on Technologies and Combustion for a Clean Environment, ‘Clean Air’, 1999, Lisbon, Portugal. –1999. – P. 617.
- 7 Бурдуков. А.П. Проблемы развития угольной теплоэнергетики. //Сб. II Межд. Симп. Горение и плазмохимия. – 2003. – С.40-47.
- 8 Drouet M.G. La technologie des plasmas. Potentiel d’application au Canada //Revue generale d’electricite – 1986. – N 1. – P. 51–56.
- 9 Дьячков Б.Г., Полонский И.Я., Салимов М.А. и др. Интенсификация факельных процессов электрическим разрядом.-М.:Энергоатомиздат. – 1976. – 87с.
- 10 Дьячков Б.Г., Блинова В.А., Нефедова М.Г. Эффективность топливно – электрических процессов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 136 с.
- 11 Сеулин Н.А., Видин Ю.В. Пылеугольные растопочные горелки с электрозапальным устройством резисторного типа //Теплообмен в парогенераторах: Всесоюз. конф.- Новосибирск. – 1988. – С.187-190.
- 12 Сеулин Н.А., Осокин Л.Г., Иванников В.М. О безмазутной растопке и подсветке парогенераторов, сжигающих канско-ачинские угли //Электрические станции. – 1986. – № 10. – С.21-22.
- 13 Blackburn P.R. Ignition of pulverized coal with Arc Heated Air //Energy. – 1980. – Vol.4, № 3. – P. 98-99.
- 14 Blackburn P.R. Pulverized coal heated igniter system //Pat. №1585943 (B). – 1982. – № 3.
- 15 Cioffi P.L., Barsin A.A., Tattoli O.R. Plasma arc ignition of pulverized coal. Winter Meeting ASME.-Washington. Nowember 15020. – 1981. – P.5-9.
- 16 Tuppeny W.H. Effect of changing coal supply and steam generator design //Proc. American Power Conference. – 1978. – Vol.40. – P.367-380.
- 17 Duverger D., Ashard I.L. The upsurge plasmas in industry //Revue energetique (France). – 1986. – Vol.37, No 385. – P.574-592.

- 18 Вербовецкий Э.Х., Котлер В.Р. Замена мазута углем при растопке и подсветке факела в пылеугольных котлах // Энергохозяйство за рубежом. – 1984. – №4. – С. 1-8.
- 19 Karpenko E. I., Karpenko Yu. E., Messerle V. E., Ustimenko A. B. Using Plasma-Fuel Systems at Eurasian Coal-Fired Thermal Power Stations // Thermal Engineering. – 2009. – Vol.56, N 6. – P.456-461.
- 20 Сакипов З.Б., Мессерле В.Е., Ибраев Ш.Ш. Электротермохимическая подготовка углей к сжиганию. – Алматы: Гылым, 1993. – 259 с.
- 21 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. – 1993. – Vol. 13. № 1. – P.141-167.
- 22 Жуков М.Ф., Карпенко Е.И., и др. Плазменная безмазутная растопка котлов и стабилизация горения пылеугольного факела/ Под ред. В.Е.Мессерле и В.С.Перегудова. – Новосибирск: Сиб. предпр. РАН «Наука», 1995. – 304 с.
- 23 Карпенко Е.И., Буянтуев С.Л., и др. Плазменно-энергетические процессы и аппараты в решении природоохранных задач. – Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 1992. – 114 с.
- 24 Карпенко Е.И., Жуков М.Ф., Мессерле В.Е., Буянтуев С.Л., Дьяков А.Ф., Перегудов В.С. Научно-технические основы и опыт эксплуатации плазменных систем воспламенения углей на ТЭС (безмазутная растопка котлов и стабилизация горения пылеугольного факела). – Новосибирск: Наука. Сиб. предприятие РАН, 1998. – 137 с.
- 25 Карпенко Е.И., Мессерле В.Е. Введение в плазменно-энергетические технологии использования твердых топлив. – Новосибирск: Наука, Сиб.отд. РАН, 1997. – 118 с.
- 26 Карпенко Е.И., Мессерле В.Е. Плазменно-энергетические технологии использования твердых топлив. //Энциклопедия низкотемпературной плазмы. / Под ред. академика РАН Фортова, В.Е. – М.: Наука, 2000. – Т.4. – С.359-370.
- 27 Карпенко Е.И., Мессерле В.Е. Плазменно-энергетические технологии топливоиспользования. Т.1. Концепция и расчетно-теоретические исследования плазменно-энергетических технологий. – Новосибирск: Наука, Сиб. предприятие РАН, 1998. – 385 с.
- 28 Карпенко Е.И., Мессерле В.Е., Журавель Н.М., Чурашев В.Н. Эколого-экономическая эффективность плазменных технологий переработки твердых топлив. – Новосибирск: Наука. Сиб. изд. фирма РАН. – 2000. – 159 с.
- 29 Даутов Г.Ю., Тимошевский А.Н., Урюков Б.А., ..., Карпенко Е.И., Мессерле В.Е., Перегудов В.С., Устименко А.Б., ... Генерация низкотемпературной плазмы и плазменные технологии: Проблемы и перспективы (Плазменно-энергетические технологии для улучшения экологических и экономических показателей сжигания и газификации пылевидного угля, С.341-366). Низкотемпературная плазма. – Т. 20. – Новосибирск: Наука, 2004. – 464 с.
- 30 Янтайская электромеханическая компания “Лунюань” Лтд. Плазменная Технология Зажигания и Поддержания Горения на Пылеугольных Котлах //Электрические станции. – 2008. – № 2.
- 31 Gao H., Chui E., Runstedler A. Tang H. Numerical investigation of plasma ignition process in a utility boiler //Proc. of 6th International Workshop and Exhibition on Plasma Assisted Combustion (IWEPA), Heilbronn, Germany, 13-15 September. – 2010. – P. 69
- 32 Karpenko E.I., Messerle V.E., Ustimenko A.B. Plasma-aided solid fuel combustion //Proc. of the Combustion Institute. Elsevier. – 2007. – Vol. 31. Part II. – P. 3353-3360.
- 33 Messerle V.E., Karpenko E.I., Ustimenko A.B. Plasma Supported Coal Ignition and Combustion //Programme and abstracts for the International Conference on Coal Science and Technology (ICCS&T 2011), Oviedo-Spain 9-13 October, 2011, P.33-34, Proceedings. – P.A8.
- 34 Казанцев В.И., Ваврив Д.М., Канило П.М., Расюк Н.И., Шунеман К., Грицаенко С.В., Тымчик А.В., Мессерле А.В. Исследование СВЧ-плазменной технологии сжигания низкосортных углей //Теплоэнергетика. – 2002. – №12. – С.39-44.
- 35 Бритвин О.В. О мерах совершенствования топливной политики в электроэнергетике на перспективный период // Доклад на НТС РАО “ЕЭС России” и научного совета РАН 28.03.2000 г. – 27 с.
- 36 Мессерле В.Е., Сакипов З.Б., Синярев Г.Б., Трусов Б.Г. Термодинамический анализ плазмохимической переработки углей //Химия высоких энергий. – 1985. – Т.19, № 1. – С.160-162.
- 37 Keay M. The View from Europe – and elsewhere. – World Coal Institute, London, Oxford Energy Forum, February 2003. – Is. 52. www.worldcoal.org
- 38 WCI. Coal Power for Progress. – World Coal Institute, London, – 2000. <http://www.wci-coal.com>
- 39 Мессерле А. В. Математическое моделирование процессов термохимической подготовки пылеугольных топлив к сжиганию в горелочных устройствах с плазменным источником //Химия Высоких Энергий. – 2004. – Т.38, №1. – С.35-40.
- 40 Мессерле А. В. Численное исследование процессов плазмохимической подготовки пылеугольных топлив к сжиганию //Горение и плазмохимия. – 2003. – №1. – С.42–49.
- 41 Янкоски З., Локвуд Ф., Мессерле В.Е., Карпенко Е.И., Устименко А.Б. Моделирование плазменной подготовки угольной пыли к сжиганию //Теплофизика и аэромеханика. – 2004. – Т.11, № 3. – С. 473-486.
- 42 Камалова Г.А., Мессерле В.Е., Найманова А.Ж., Устименко А.Б. Моделирование турбулентных реагирующих течений в топочных устройствах //Теплофизика и аэромеханика. – 2008. – Т.15, № 1. – С. 149-161.
- 43 Мессерле В.Е., Устименко А.Б., Аскарлова А.С., Нагибин А.О. Горение пылеугольного факела в топке с плазменно-топливной системой //Теплофизика и аэромеханика. – 2010. – Т. 17, № 3. – С.467-476.
- 44 Мессерле В.Е., Аскарлова А.С., Устименко А.Б., Карпенко Е.И., Локтионова И.В. Оптимизация процесса сжигания энергетических углей с использованием плазменных технологий //Теплоэнергетика. – 2004. – №6. – С.60-65.

References

- 1 WCI, Coal Facts, 2005 Edition with 2004 data, World Coal Institute, London, 2005.
- 2 British Petrol Statistical Review of World Energy, British Petrol, London, June 2011.
- 3 Key World Energy Statistics 2011 Edition, International Energy Agency, (OECD/IEA, Paris, 2011).
- 4 K. Cletcins, World power policy. Using a technology of a three-stage combustion for NO_x suppression on solid fuel boilers in Europe and CIS, Opening Rep. Europ. Commission for Power Engineering and Transport, (Moscow: Russian J.S.Co. "United Power System of Russia". All-Russian Technical Institute, 2000), pp. 4-17.
- 5 WCI 2000, Good News from Coal, World Coal Institute, London, (2000).
- 6 R.W. Bilger, The Future for Energy from Combustion of Fossil Fuels, Proc. of the 5th International Conference on Technologies and Combustion for a Clean Environment, 'Clean Air', 1999, Lisbon, Portugal, p. 617 (1999).
- 7 A.P. Burdukov, Problems of coal heat-and-power engineering, Proc. of II International Symposium on Combustion and plasmochemistry, 40-47 (2003). (in Russ).
- 8 M.G. Drouet, Revue generale d'electricite, 1, 51-56 (1986).
- 9 B.G. Diachkov, et al, Intensification of flame processes by electric discharge, (Moscow, Energoatomizdat, 1976), 87 p. (in Russ).
- 10 B.G. Diachkov, V.A. Blinova, and M.G. Nefedova, Efficiency of fuel-electrical processes, (Moscow, Energoatomizdat, 1989), 136 p. (in Russ).
- 11 N.A. Seulin and Yu.V. Vidin, Pulverised coal start up burners with electrical fuse device of resistor type, Proc. of All USSR conference on Heat exchange in steam generators, Novosibirsk, 187-190 (1988). (in Russ).
- 12 N.A. Seulin, et al, Electrical stations, 10, 21-22 (1986). (in Russ).
- 13 P.R. Blackburn, Energy, 4 (3), 98-99 (1980).
- 14 P.R. Blackburn Pulverized coal heated igniter system, Pat. №1585943 (B), 3 (1982).
- 15 P.L. Cioffi, A.A. Barsin, and O.R. Tattoli, Plasma arc ignition of pulverized coal, (Winter Meeting ASME, Washington, November 15020, 1981), pp.5-9.
- 16 W.H. Tuppeny, Effect of changing coal supply and steam generator design, Proc. American Power Conference, 40, 367-380 (1978).
- 17 D. Duverger and I.L. Ashard, Revue energetique (France), 37 (385), 574-592 (1986).
- 18 E.Kh. Verbovetski and V.R. Kotler, Energy management abroad, 4, 1-8 (1984). (in Russ).
- 19 E.I. Karpenko, Yu.E. Karpenko, V.E. Messerle, A.B. Ustimenko, Thermal Engineering, 56 (6), 456-461 (2009).
- 20 Z.B. Sakipov, V.E. Messerle, and Sh.Sh. Ibraev, Electrothermochemical preparation of coal to burning, (Almaty, Gilim, 1993), 259 p. (in Russ).
- 21 R.A. Kalinenko, et al, Plasma Chemistry and Plasma Processing, 13 (1), 141-167 (1993).
- 22 M.F. Zhukov, E.I. Karpenko, et al, Plasma oil-free start up of boilers and pulverised coal flame combustion stabilization, Ed. V.E. Messerle and V.S. Peregodov, (Novosibirsk, Siberian enterprise RAS «Nauka», 1995), 304 p. (in Russ).
- 23 E.I. Karpenko, et al, Plasma-power processes and devices in nature conservation tasks solution, (Ulan-Ude, BSC SB RAS, 1992), 114 p. (in Russ).
- 24 E.I. Karpenko, et al, Scientific and technical basis and experience of exploitation of plasma systems for coal ignition at TPP (oil-free start up of the boilers and pulverized coal flame stabilization), (Novosibirsk, Nauka. Siberian enterprise RAS, 1998), 137 p. (in Russ).
- 25 E.I. Karpenko, V.E. Messerle, Introduction in plasma-power technologies of solid fuels utilization, (Novosibirsk, Nauka. Siberian enterprise RAS, 1997), 118 p. (in Russ).
- 26 E.I. Karpenko, V.E. Messerle, Plasma-power technologies of solid fuels utilization. // Encyclopedia of low temperature plasma, Ed. Academician of RAS V.E. Fortov, (Moscow, Nauka, 2000), Vol.4, 359-370. (in Russ).
- 27 E.I. Karpenko, V.E. Messerle, Plasma-power technologies of fuel use. V.1. Concept and design-theoretical researches of plasma-power technologies, (Novosibirsk: Nauka. Siberian enterprise RAS, 1998), 385 p. (in Russ). (in Russ).
- 28 E.I. Karpenko, V.E. Messerle, N.M. Zhuravel, V.N. Churashev Eco-economic efficiency of plasma technologies of solid fuel processing, (Novosibirsk, Nauka. Siberian enterprise RAS, 2000), 159 p. (in Russ).
- 29 G.Yu. Dautov, A.N. Timoshevski et al, Generation of low temperature plasma and plasma technologies: Problems and perspectives (Plasma-power technologies for improvement of ecological and economical indexes of dust coal incineration and gasification, pp.341-366). Low-temperature plasma, Vol. 20, (Novosibirsk, Nauka, 2004), 464 p. (in Russ).
- 30 Yantai electromechanical company "Lunian" Ltd, Plasma Technology of Ignition and Combustion Stabilization at Pulverized Coal Fired Boilers, Electrical stations, 2 (2008). (in Russ).
- 31 H. Gao, E. Chui, A. Runstedler, H. Tang Numerical investigation of plasma ignition process in a utility boiler //Proc. of 6th Intern. Workshop and Exhibition on Plasma Assisted Combustion (IWEPAC), Heilbronn, Germany, 13-15 September, pp. 69 (2010).
- 32 E.I. Karpenko, V.E. Messerle, A.B. Ustimenko Plasma-aided solid fuel combustion, Proce. of the Combustion Institute, Elsevier, 31, (II), 3353-3360 (2007).
- 33 V.E. Messerle, E.I. Karpenko, A.B. Ustimenko Plasma Supported Coal Ignition and Combustion, Programme and abstracts for the Intern. Conf. on Coal Science and Technology (ICCS&T 2011), Oviedo-Spain 9-13 October, 33-34 (2011).

- 34 V.I. Kazantsev, et al, *Thermal Engineering*, 49 (12), 1006-1011 (2002). (in Russ).
- 35 O.V. Britvin About arrangements of fuel politics perfection in power engineering on perspective period, Report at STU of RJC "UES Russia" and Scientific Council of RAS 28.03.2000, 27 p. (in Russ).
- 36 V.E. Messerle, et al, *High Energy Chemistry*, 19 (1), 160-162 (1985). (in Russ).
- 37 M. Keay, *The View from Europe – and elsewhere*, World Coal Institute, (London, Oxford Energy Forum, Issue 52, February 2003).
- 38 WCI, *Coal Power for Progress*, World Coal Institute, London, (2000).
- 39 A.V. Messerle, *High Energy Chemistry*, 38 (1), 35-40 (2004). (in Russ).
- 40 A.V. Messerle, *Combustion and plasmachemistry*, 1, 42–49 (2003). (in Russ).
- 41 Z. Jankoski, et al, *Thermophysics and Aeromechanics*, 11 (3), 461-474 (2004). (in Russ).
- 42 G.A. Kamalova, et al, *Thermoph. and Aeromechanics*, 15 (1), 139-151 (2008). (in Russ).
- 43 V.E. Messerle, et al, *Thermoph. and Aeromechanics*, 17 (3), 435-444 (2010). (in Russ).
- 44 V.E. Messerle, et al, *Thermal Engineering*, 51 (6), 488-493 (2004). (in Russ).