

УДК 621.311.22

Петров С.В.

Институт газа Национальной академии наук Украины

Забулонов Ю.Л.

Института геохимии окружающей среды Национальной академии наук Украины

Т. Яшар Катирджы оглу

Компании АРТЕКС (ARTECS), Турция

СИСТЕМА ПЛАЗМЕННОЙ ПОДСВЕТКИ НИЗКОРЕАКЦИОННЫХ ТОПЛИВ ДЛЯ ТЕПЛОАГРЕГАТОВ

Разработана и исследована система плазменной подсветки низкорреакционных топлив для теплоагрегатов, когда в качестве растопочного и сопровождающего горение топлива может использоваться применяемый в котлоагрегате уголь. В данном исследовании принят бурый уголь БР-1. Показано, что надежное и стабильное воспламенение и горение водоугольной суспензии из такого угля осуществляется с расходом более 100 кг/час при мощности плазмотрона 17,5 кВт. Время жизни электродов такого плазмотрона – более 1 000 часов. В плазменно-угольной горелке обеспечивается полное выгорание углерода с выделением тепловой мощности более 290 кВт. Плазменная система является маломощным компактным модулем, вписывается в конструкцию пылеугольного котлоагрегата и позволяет исключить дополнительное высокорреакционное топливо – мазут или газ.

Ключевые слова: плазменная подсветка, маломощный плазмотрон, низкорреакционный уголь, водоугольная суспензия.

Постановка проблемы. Существует много мировых энергетических прогнозов, которые в основных показателях близки между собой. Баланс между энергогенерирующими секторами определяют конкретные аспекты политических мер, в частности, по сокращению выбросов парниковых газов, основывающихся на ценах на углерод, мандатах и низкоуглеродных технологиях и т. д. Из прогноза Британской нефтегазовой компании BP следует, что до 2050 г. уголь будет основным источником тепловой и электрической энергии в мире, независимо от развития возобновляемых источников энергии [1]. Во многих документах, например, «Долгосрочной программе развития угольной промышленности России на период до 2030 г.» говорится, что уже в скором времени доля угля должна значительно увеличиться в топливном секторе, достигнув 32–35% и т. д. Но пока это только теория. Следует учесть, что в оптимистичных прогнозах закладываются новые технологии топливоиспользования, в т. ч. и так называемые технологии «чистого угля».

Начиная с середины 1960-х гг., пылеугольные ТЭС, которые до настоящего времени

являются базовыми, достигли предела своего совершенства, определяемого законами термодинамики и свойствами материалов, из которых изготавливаются котлы и турбины. При этом за прошедшие годы одновременно существенно повысились капитальные затраты на строительство ТЭС в связи с ужесточением требований к защите окружающей среды от вредных выбросов, и стоимость производства электроэнергии на угольных ТЭС значительно возросла, а их привлекательность снизилась. Главной причиной значительного повышения стоимости производства электроэнергии на угольных ТЭС, построенных в основном в 1960–1970-х гг., специалисты-теплоэнергетики обоснованно признают использование в котлах этих станций крайне неэффективной технологии факельного (пылеугольного) сжигания угля [2]. Причина в том, что для розжига пылеугольных котлов и стабилизации процессов горения (подсветки пылеугольного факела) обычно применяют природный газ или мазут, стоимость которых постоянно растет. Проблема обостряется в теплоэнергетике, где используются малой и средней мощности котлы

с турбулентними вихревыми пылеугольными горелками. Для таких котлов характерны режимы с переменной тепловой нагрузкой. В этом случае практически все время требуется мазутная подсветка пылеугольных горелок, и мазут становится не дополнительным, а вторым основным топливом. При таком сжигании угля содержание углерода в золе достигает 20–30%. Сдерживающими факторами при использовании угля в энергетике всегда были чрезвычайно грязная технология и низкая эффективность его сжигания.

Следует отметить, что для Украины тепловые электростанции, работающие на низкосортных углях, являются базовыми [3]. Поэтому следует ожидать, что обостряющийся дефицит мазута и газа, повышение их стоимости актуализируют разработки и внедрение технологий эффективного безмазутного сжигания высокосольной низкорекреационной угольной пыли. В настоящее время принято считать, что масштабные проекты с долгосрочной окупаемостью трудно реализуемы, поэтому приоритет, исходя из такой логики, должен отдаваться комплексным проектам, направленным на совместную оптимизацию экономических и экологических показателей работы энергогенерирующих предприятий [4].

Анализ последних исследований и публикаций. Для решения проблемы высокоэффективного использования низкосортных твердых топлив при минимальном отрицательном воздействии на окружающую среду в 1983 г., по предложению ведущих специалистов в области плазменной техники и технологии М.Ф. Жукова, Л.С. Полака и др., поддержанному Госкомитетом по науке и технике, были начаты работы по созданию принципиально новой, плазменной технологии сжигания пылевидного топлива с помощью электродуговых нагревателей газа – плазмотронов [5]. Были проведены детальные экспериментальные и теоретические исследования процессов розжига и подсветки пылеугольного факела, разработана теория термохимической подготовки топлива к сжиганию (ТХПТ) [6; 7; 8; 9]. Впервые плазменная технология розжига была применена на Гусиноозерской ГРЭС на котлах типа ТПЕ-215, БКЗ-640, БКЗ-420. Эти разработки долго не получали промышленного распространения и только начали использоваться в течение последних лет на угольных электростанциях развитых стран мира. Сегодня в Китае данной технологией оснащены более 470 угольных котлов суммарной мощностью блоков более 200 млн кВт, что составляет примерно 30% от общей установленной мощно-

сти страны. Плазменный розжиг используется также в Индонезии (6 блок Индонезийской ТЭС «Суналая», Монголии (Улан-Баторская ТЭЦ), Тайвани (1, 2 блоки Хопингской электростанции, Словакии (ТЭС «Вояны») [4]. Плазменно-топливные системы (далее – ПТС) уже испытаны на большом количестве энергетических котлов паропроизводительностью от 75 до 670 т/ч и оборудованных различными типами пылеугольных горелок (прямоточных, муфельных и вихревых). При испытании плазменно-топливных систем сжигались угли всех сортов (бурый, каменный, антрацит и их смеси). Содержание «летучих» в них составляло от 4 до 50%, содержание золы – от 15 до 48%, и теплота сгорания была в диапазоне от 1 600 до 6 000 ккал/кг. Однако, хотя эти станции с ПТС подключены к сети, дают электроэнергию, они должны проработать до принятия решения о тиражировании проекта после полного цикла испытаний.

Технология ПТС заключается в ударном нагреве части аэросмеси (угольная пыль + воздух) пылеугольной горелки электродуговой плазмой до температуры выхода летучих угля и частичной газификации коксового остатка. Это является достаточным при сжигании низкосортных углей (при постоянной работе плазмотрона) и позволяет осуществить растопку котла при кратковременной, необходимой для достижения растопочных параметров котла, работе плазмотрона. По разным оценкам, электрическая мощность, потребляемая плазмотроном, не превышает 2,5% от тепловой мощности пылеугольной горелки, и составляет 0,3–0,5% от тепловой мощности котла. Принципиальная проблема, которая сдерживает промышленную реализацию плазменно-угольной технологии, заключается в необходимости использования достаточно мощных плазмотронов (свыше 200 кВт). Мощность плазмотрона определяется минимальными относительными затратами энергии, равными отношению тепловых мощностей плазмотрона и пылеугольной горелки, для АШ составляет 1,5–2,0 %. Реальный ресурс непрерывной работы таких плазмотронов в лучшем случае составляет 200–300 часов (декларируется больший, но в реальных условиях никто его не может продемонстрировать). Такого ресурса вполне достаточно для поджига, но не для подсветки [10; 11].

Следует отметить, что, с целью повышения ресурса топливно-плазменной системы, проводятся исследования по использованию СВЧ-плазмотронов [3; 12], поскольку они не требуют

применения специальных угольных или медных электродов, а также потому, что в них возможно создание критической концентрации электронов, т. е. к ударному термическому воздействию подключить плазмохимические эффекты. Это способствует раннему воспламенению холодной углевоздушной смеси и, при относительно малых временах взаимодействия угольных частиц с плазменным факелом (~0,05 с), интенсивному выгоранию углеродных частиц.

Постановка задачи. Целью данного исследования является преодоление основного недостатка плазменно-дуговых систем ТХПТ, связанного с ресурсом работы плазматрона, и обоснование возможности их применения для розжига и подсветки низкорекционной угольной пыли с перспективой тиражирования. Основная идея развиваемого авторами подхода заключается в реализации трехступенчатой схемы умножения мощности плазмы с использованием базового низкосортного угля до уровня мощности мазутного факела, необходимого для достижения растопочных и сопровождающих горение параметров котла. При этом используется маломощный (15–20 кВт) специальный плазматрон с ресурсом работы медных электродов более 1 000 часов.

Изложение основного материала исследования. На первом этапе разработки технологической схемы процесса была приготовлена активированная водоугольная суспензия (далее – ВУС) в двух исполнениях из бурого угля марки БР-1, техническая характеристика которого приведена в табл. 1.

Процесс получения ВУС (исполнение 1) по традиционной схеме включал следующие операции: дробление исходного угля до размера частиц 3 мм;

тонкий помол угля в мельнице совместно с водной фазой и перемешивание. Для приготовления и исследования ВУС из бурого угля БР-1 использовалась лабораторная шаровая барабанная двухкамерная мельница МБЛ-100. Масса разовой порции угля, загружаемого в мельницу, – 10 кг. Соотношение угля и воды определяли по сухой массе угля таким образом, чтобы концентрация суспензии соответствовала заданному значению. В мельнице уголь измельчали преимущественно до класса 0–0,4 мм. Содержание фракции менее 50 мкм составляло ~ 60%. Время измельчения в мельнице – 60 мин. Концентрацию твердой фазы, полученной ВУС, определяли высушиванием при температуре 105°C, гранулометрический состав – методом влажного фракционирования на ситах по стандартной методике. Реологические характеристики определяли на универсальном ротационном вискозиметре Rheotest RN4.1. Суспензии готовились с использованием питьевой воды и добавлением пластификатора (NaOH). Добавка вводилась на первой стадии помола совместно с водной фазой. Таким образом, было получено достаточное для проведения испытаний количество ВУС со следующими характеристиками:

- содержание твердой фазы в ВУС – 52,3%;
- концентрация добавки – 0,1% в расчете на сухую массу угля;
- структурная вязкость – 0,7 Па·с;
- начальное напряжение сдвига – 12,5 Па;
- стабильность – до 30 сут.;
- предел текучести – 1,2–1,4 Па;
- низшая теплота сгорания суспензии – 10 500 кДж/кг.

Стабильность готового топлива определяли при хранении в аккумулярующем бункере с использо-

Таблица 1

Техническая характеристика угля БР-1

Параметр	Значение	Метод определения
Влага (рабочее сост.)	35,00%	GOST 11014-81
Зола (рабочее сост.)	11,23%	GOST 11022-95
Зола (сухое сост.)	25,00%	GOST 6382-91
Летучие в-ва (рабочее сост.)	22,70%	
Летучие в-ва (сухое сост.)	59,50%	ISO 195796: 2006
Сера (рабочее сост.)	1,46%	
Сера (сухое сост.)	3,33%	
Kcal/kg, MJ/kg Низшая теплота сгорания (рабочее сост.)	3 100 kcal/kg, 13,02 MJ/kg	ISO 1928: 2009
Kcal/kg, MJ/kg Высшая теплота сгорания (сухое сост.)	6 500 kcal/kg, 27,31 MJ/kg	
Kcal/kg, MJ/kg Высшая теплота сгорания (сухое беззольное сост.)	7 500 kcal/kg, 31,51 MJ/kg	

ванием пробоотборных устройств на нескольких уровнях. При низком качестве суспензию возвращали на переработку в мельницы. После завершения этапа приготовления водоугольную суспензию из резервуара для хранения насосом подавали на сжигание в топливно-плазменную горелку.

Приготовление ВУС (исполнение 2) выполняли кавитационным измельчением угля в водной среде без применения химических присадок в дезинтеграторе мокрого помола – «ГОРИ-ЗОНТ-3000 МК-ВА», в который подавался уголь с размером частиц не более 10 мм. Перед подачей в дезинтегратор вода проходит подготовку в роторно-импульсном аппарате РИА-150-ВУТ. Выход суспензии с заданными параметрами происходил через 1 мин после включения аппарата. Получена ВУС с размером частиц до 50 мкм. Данная суспензия сохраняла стабильность на протяжении 5 суток. Считается, что в результате ударно-кавитационного разрушения угля, в отличие от традиционных механических процессов помола в мельницах раздавливающе-истирающего действия, ВУС приобретает ряд полезных свойств: 1) происходит выделение гуминовых кислот с образованием гуматов, приобретающих желеобразное состояние, что повышает устойчивость против расслоения; 2) высокая эффективность процесса сжигания при активной роли воды, нечувствительность к качеству исходного угля [13; 14].

На основе анализа существующих способов сжигания низкорекреационной угольной пыли и собственных исследований были сформулированы основные принципы оптимальной системы ее воспламенения и сопровождения горения:

- предлагаемая система не должна изменять конструкцию котлоагрегата;

- наиболее сложная часть процесса – воспламенение топлива и его ТХП – должна быть вынесена из топочного пространства в специальный модуль, в котором можно контролировать процесс и управлять им;

- специальный модуль должен быть компактным, высоко теплонеприемным, чтобы обеспечить надежное воспламенение топлива на начальной стадии горения, когда оно еще мало-реакционно;

- наличие различных видов топлива (основное и растопочное) является нежелательным, следует стремиться к использованию одного вида топлива;

- на сегодняшний день наилучшей системой зажигания и сопровождения горения топлива являлась бы плазменная система;

- управление системой зажигания и сопровождение горения должны осуществляться автоматически при использовании процессора или компьютера.

Для реализации такого подхода в качестве растопочного и сопровождающего горение топлива может быть использован применяемый в котлоагрегате уголь, в данном исследовании принят бурый уголь БР-1. Основной проблемой при использовании ВУС, до сих пор окончательно и качественно не решенной, является его низкая реакционная способность на начальном участке горения. Поскольку активное воспламенение топлива определяет его дальнейшее горение, эта проблема сдерживает развитие технологии водо-угольного топлива вообще. Усилия по решению проблемы стабильного и надежного сжигания водоугольного топлива должны быть направлены на интенсификацию воспламенения топлива на начальном участке горения. Задача заключается в том, чтобы за малое время пролета частиц пыли в горелке выгорел твердый углерод и был запущен автотермический механизм горения. Воспламенение и стабилизация горения при использовании ВУС имеет свои особенности [15], которые следует учесть с применением плазменной системы. Это время обезвоживания угольной частицы, которое для размеров менее 50 мкм составит около 0,1 сек с соответствующим временем задержки зажигания в условиях термического удара плазмы. Время задержки зажигания связано с диаметром частиц и обусловлено, скорее всего, необходимостью достижения условия полного испарения воды из её пористой структуры. Для каждого характерного размера частицы ВУС есть предельные по температуре внешней среды условия зажигания. Это обусловлено ростом затрат на нагрев и испарение воды в пористой структуре частицы угля. Можно условно выделить два режима воспламенения: низкотемпературный (<950 К) и высокотемпературный (>950 К). Это обусловлено тем, что при более высоких температурах внешней среды прогрев частицы происходит более интенсивно. Для мелких частиц ВУС (<0,4·10⁻³ м) различие времен задержки зажигания незначительно. В общем случае в диапазоне температур внешней среды (Тс = 900÷1300 К) различие между временами задержки воспламенения не превышает 30%. Воспламенение происходит после полного испарения всей влаги, содержащейся в пористой структуре частиц угля, но при достаточно низких температурах поверхности. В зависимости от температуры поверхности

угольной частицы, от времени до момента её воспламенения можно выделить три характерных участка. Первый соответствует интервалу времени прогрева частицы до температуры кипения (или близкой к ней) и означает ее полное «обезвоживание». Второй участок соответствует периоду прогрева и термического разложения сухого угля. После этого выполняется условие воспламенения ВУС и в дальнейшем температура растет до значений, соответствующих горению. Варьирование массовой доли компонент (воды и непосредственно угля) в достаточно широком диапазоне не оказывает существенного изменения условий и характеристик зажигания малых по размерам частиц водоугольной смеси.

Анализ существующих методов показывает превосходство плазменной технологии как более простой и удобной, чем розжиг с использованием растопочного топлива. Что касается влияния плазмы, то следует отметить, что общей теории протекания реакций пароплазменной газификации в неравновесных условиях, а во многих случаях даже и подхода к ней, не существует. Имеющийся материал разрознен и крайне немногочислен. Здесь можно ожидать самых неожиданных проявлений. Низкотемпературная плазма атмосферного давления содержит большое количество заряженных и нейтральных активных частиц. Эти активные частицы с высокой способностью излучения энергии могут существенно ускорять химические реакции и осуществлять возможность проведения реакций, которые в нормальных условиях затруднительны. Экспериментальные подтверждения существенного влияния радикалов на пароплазменную газификацию угля в условиях дуговой плазмы атмосферного давления получены в работе [16]. Уголь в условиях плазмы подвергается

реакциям быстрого разложения и диссоциации с выделением летучих веществ и коксового остатка, которые при дальнейшем разложении образуют большое количество активных частиц, включая C_nH_m углеводороды, возбужденные С и Н атомы и т. д. Затем образуются различные газы CO , H_2 и CO_2 благодаря сложному комплексу параллельно-цепных реакций, а именно такие газы, как CO_2 и H_2 , преобразуются или конвертируются в H_2 с выделением множества активных частиц, таких как OH , H радикалы и электроны, которые принимают участие в реакциях окисления по схеме рециклинга.

В ходе проведения данного исследования была разработана, смонтирована и испытана лабораторная установка по сжиганию водоугольного топлива с плазменным зажиганием и сопровождением горения для получения исходных данных при проектировании топливно-плазменной горелки в составе котлоагрегата, работающего на низкорекреационной угольной пыли. Установка включала в себя основные элементы, необходимые для обеспечения процесса розжига и поддержки стабильного процесса горения ВУС: система хранения и регулируемой подачи ВУС; система водо- и газоснабжения; плазменная аппаратура с топливно-плазменной горелкой. Розжиг горелки и стабилизация пламени производились плазмотроном мощностью до 30 кВт (так называемый плазмотрон малой мощности). Это плазмотрон линейной схемы с двумя соосными цилиндрическими электродами и вихревой стабилизацией дуги (рис. 1). Плазмотрон охлаждается водой. Плазмообразующим газом является воздух. При работе на воздухе среднемассовая температура плазменной струи составляла примерно 4 000 К, тепловой КПД – около 80%.

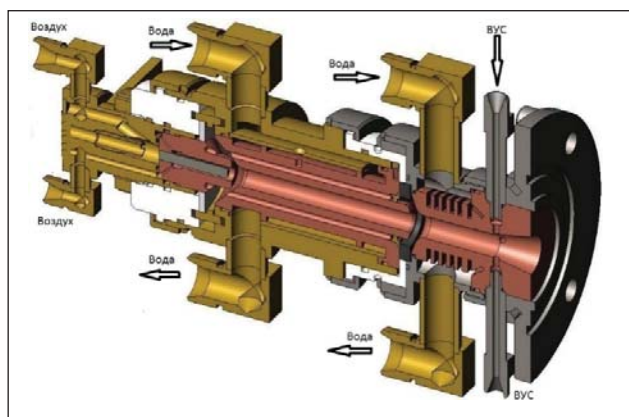


Рис. 1. Плазмотрон для топливно-плазменной горелки

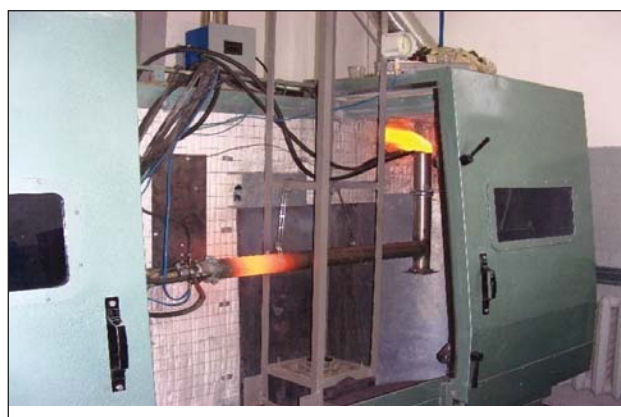


Рис. 2. Экспериментальная плазменно-угольная горелка в работе

Была применена такая система плазменного воспламенения при розжиге плазменно-угольной горелки, когда плазмотрон располагался по оси жаровой трубы. Вид экспериментальной плазменно-угольной горелки (плазмотрон, совмещенный с жаровой трубой) в работе приведен на рис. 2. Плазменная струя, подведенная к корню факела распыляемого топлива, разогревала и зажигала буроугольную ВУС. На рис. 3а приведена плазменная струя в отсутствие подачи ВУС, а 3б – при её подаче.

В плазменно-угольной горелке (рис. 1) решена задача достаточно быстрого смешения поперечно подаваемого сырья и теплоносителя в минимальном объеме реакционной зоны. Смешение происходит в интенсивно соударяющихся между собой встречных струях ВУС. В этом случае столкновение струй приводит к их самодроблению и интенсивной турбулизации потока. Взаимодействие потока горячей дуговой плазмы с распыленной холодной ВУС начинается в зоне прианодной части столба электрической дуги. Оптимизация смесителя сводилась к выбору такой геометрии (диаметр и угол раскрытия канала сопла плазмотрона, диаметр и углы отверстий для подачи ВУС по отношению к оси канала плазмотрона), при которой обеспечивается равномерное распределение распыленной ВУС в канале. Количество поперечных струй – 2 либо 4. Следует отметить, что для обеспечения требуемой дальнотойности необходимо было с высокой точностью поддерживать величину гидродинамических параметров – небольшие изменения расходов или температуры приводят к весьма значительным колебаниям дальнотойности. Все это необходимо учитывать при проектировании плазмохимического смесителя.

Процесс горения ВУС в топливно-плазменной горелке (рис. 1) можно вести в двух режимах – режиме «полного выгорания» и режиме «газифи-

кации». Первый обусловлен подачей всего воздуха, необходимого для горения непосредственно на вход жаровой трубы, второй предполагает работу горелки с недостатком окислителя. Во втором случае дополнительный воздух вдувается в переходный газоход или топку котла. Таким образом, режим «газификации» предполагает ступенчатое сжигание топлива.

Геометрическая схема топливно-плазменной горелки, предназначенной для отработки указанных технических решений в лабораторных условиях, имеет две секции: плазменный модуль предгазификации, содержащий плазмотрон с форкамерой, и модуль газификации/полного выгорания (жаровая труба с $Du = 150$ мм) с узлом вдува вторичного воздуха. В экспериментах по газификации жаровую трубу теплоизолировали.

Процесс розжига ВУС осуществлялся в следующем порядке. Включался плазмотрон (рис. 3а) и осуществлялся прогрев форкамеры до появления светимости внутренней поверхности участка. После прогрева форкамеры потоком плазмы в течение 1,5–2 мин до температуры 700–750°C открывался кран на трубопроводе, осуществлялась подача ВУС с расходом 100–400 кг/час (рис. 3б) и происходило устойчивое зажигание и стабильное горение ВУС. При работе плазмотрона были зафиксированы следующие параметры: диаметр сопла анода – 10 мм, длина форкамеры – 20 мм, внутренняя поверхность форкамеры и жаровой трубы обмурована теплоизоляционным материалом. Расход плазмообразующего воздуха $G=20 \text{ нм}^3/\text{час}$, ток дуги $I=50$ А, напряжение на дуге $U=350$ В, мощность $N=17,5$ кВт, длина начального участка плазменной струи – 15 см. Плазмотрон работал устойчиво как в режиме прогрева плазмы, так и при подаче суспензии через форсунки.

В процессе исследований подтвердились эрозийные характеристики электродов плазмотрона

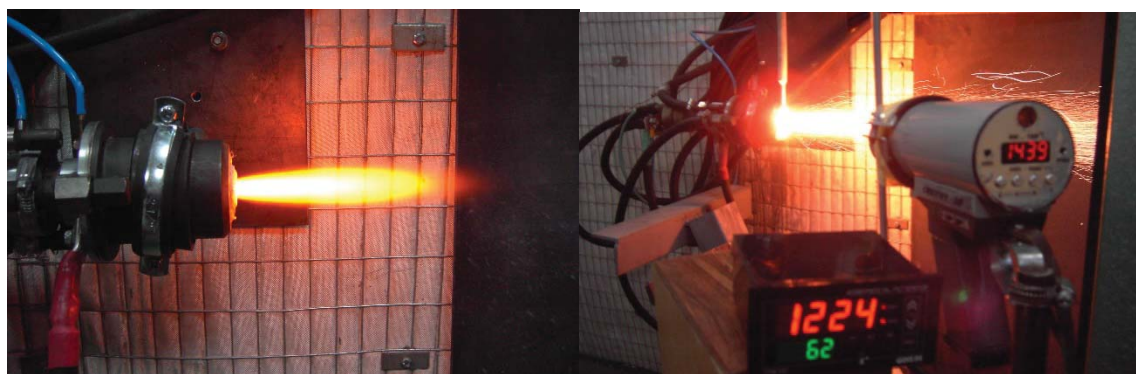


Рис. 3. Плазменная струя, а – отсутствие подачи ВУС, б – подача ВУС

(рис. 1). Эрозия медного полого катода в воздушной атмосфере составляет порядка $\approx 2 \cdot 10^{-9}$ кг/Кл, средний уровень эрозии анода ниже и составляет $\approx 4 \cdot 10^{-11}$ кг/Кл. Эрозия медных электродов определяется плотностью теплового потока, температурой поверхности и скоростью перемещения приэлектродных участков дуги. При обеспечении хорошей стабильности работы электродов сегодня можно говорить о гарантированном ресурсе в воздушной среде катода плазмотрона (рис. 1) более

1 000 часов, анода – 2 000 часов при токе 50 А и глубине срабатывания материала $1,5 \cdot 10^{-3}$ м.

Наибольший интерес с научной и практической точек зрения при переработке ВУС в топливно-плазменной горелке представляет режим газификации. Возможность проведения процесса газификации в данной конструкции при недостатке окислителя гарантирует режим «полного выгорания». Исследованиями, выполненными в работе [17], установлено, что при температурах процесса 1 500–2 500 К практически единственными компонентами синтез-газа, получаемого при газификации ВУС, являются H_2 и CO . Содержание их в газовой фазе достигает 93–97%. Энергетические затраты при этом составляют 3,0–3,5 кВт·ч/кг, теплота сгорания получаемого синтез-газа при плазменной газификации составляет 11,5–12,5 МДж/м³ и на 10–30% превышает теплоту сгорания газа при парокислородной газификации. Это обусловлено повышенным содержанием водорода ($H_2=50-55\%$) в синтез-газе, который получают при плазменной газификации угля, по сравнению с содержанием водорода ($H_2=35-45\%$) при парокислородной газификации. Для снижения энергетических затрат процесса плазменной газификации ВУС целесообразно использовать комбинированную алло-автотермическую газификацию, сочетающую плазменную ступень с традиционной автотермической ступенью газификации.

Лимитирующая стадия – это процесс газификации твердого углерода ВУС, происходит за счет протекания двух основных реакций:

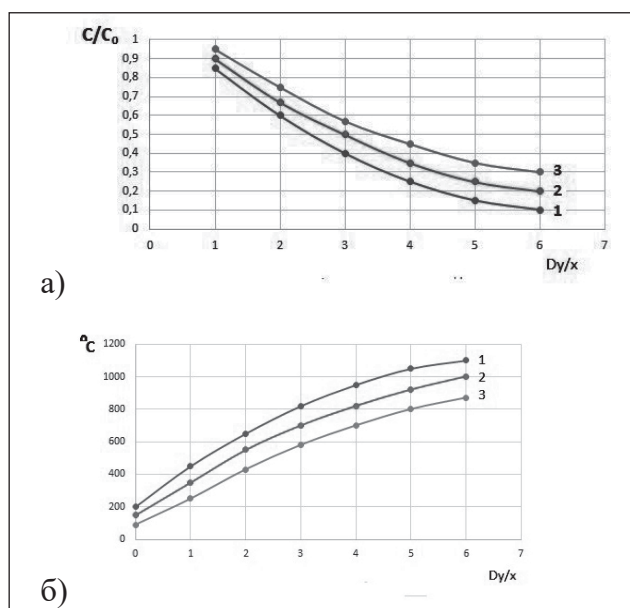
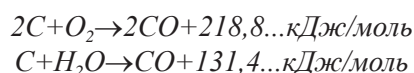


Рис. 4. Зависимости распределения по длине жаровой трубы: а – степени выгорания углерода, б – температуры стенки. 1 – расход ВУС – 100 кг/час, вторичного воздуха – 150 $nm^3/ч$; 2 – расход ВУС – 200 кг/час, вторичного воздуха – 300 $nm^3/ч$; расход ВУС – 300 кг/час, вторичного воздуха – 450 $nm^3/ч$

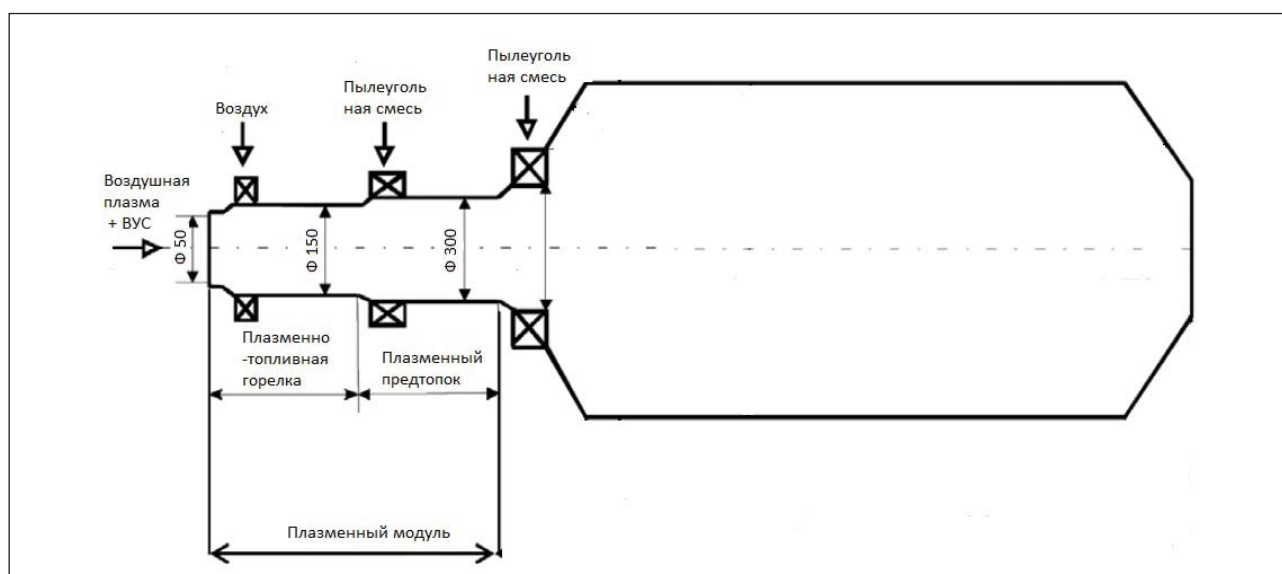


Рис. 5. Геометрическая схема плазменного модуля для розжига и подсветки пылеугольного факела

Исследования кинетической характеристики ВУС с помощью дериватографа [18] показывают, что горение происходит с высокой скоростью даже при низких температурах 300...400°C, когда заканчивается горение летучих и начинается переход к выгоранию коксового остатка. Таким образом, подтверждается тезис о том, что усилия по решению проблемы стабильного и надежного сжигания ВУС должны быть направлены на интенсификацию воспламенения топлива на начальном участке горения. Эта задача решается с помощью плазмотрона малой мощности. Дальнейший процесс автотермического окисления будет определяться разницей между количеством тепла, которое выделяется в результате первой реакции, и теплом, которое поглощается в результате второй реакции.

В результате исследований [19] подтверждено, что при распылении ВУС образуется полидисперсный поток, содержащий как чисто угольные частицы, так и водоугольные капли, имеющие в своем составе тонкие угольные частицы, окруженные жидкой фазой. Очевидно, что механизмы воспламенения и сжигания полидисперсного потока капель ВУС различны. Для проектирования новых конструкций горелок и определения оптимальных режимов работы выполнены базовые экспериментальные исследования на стенде (рис. 2) по степени среднемассового выгорания углерода по длине с соответствующим распределением температуры стенки футерованной жаровой трубы. Забор пыли осуществлялся водоохлаждаемым зондом по оси жаровой трубы. На рис. 4 приведены усредненные зависимости степени выгорания углерода (а) и распределения температуры стенки (б) по длине жаровой трубы плазменно-угольной горелки для ВУС исполнения 1. Видно, что основной выход летучих и их горение происходят в зоне подачи вторичного воздуха, где избыток воздуха очень мал (порядка 0,2–0,4) за счет тепла, излучаемого футеровкой. Горение же коксового остатка продолжается по всей длине при подаче всего воздуха, необходимого для горения в жаровой трубе, и степень выгорания топлива на выходе, равная $\leq 90\%$ (дальнейшее дожигание коксового остатка должно проходить в

следующей секции или в топочной камере котла). Температура стенок соответствовала верхнему пределу измерения $\leq 1\ 100^\circ\text{C}$. При использовании ВУС исполнения 2 степень выгорания углерода и, соответственно, температура стенки повышаются приблизительно на 10%. Причина пока не понятна, но, чтобы связать этот эффект с лучшей активацией угольной пыли, необходимы дополнительные исследования. Исходя из степени выгорания углерода при расходах ВУС 100–300 кг/час, можно заключить, что при использовании плазмотрона для интенсификации воспламенения на начальном участке мощностью 17,5 кВт может быть получена тепловая мощность в выходном факеле порядка 260–700 кВт

Ухудшение качества топлива, моральное старение, физический износ котлов и оборудования привели к снижению КПД котлов до $80 \div 82\%$ и увеличению до $40 \div 45\%$ (по тепловыделению) доли природного газа или мазута. При этом дефицитное высокорекреационное топливо расходуется не только на подсветку пылеугольного факела, но и на компенсацию дефицита пыли, вызванного недостаточной производительностью при работе котла на топливе ухудшенного качества. Предлагаются различные варианты решения проблемы, но они в основном частичные [20]. Реальный путь повышения эффективности работы котлов прежних поколений при работе на низкосортных углях ухудшенного качества, а также полного отказа от использования остродефицитного нефтегазового топлива без кардинального изменения технологии сжигания и конструкции топочного устройства – поэтапная реконструкция существующих котлоагрегатов путем модернизации или замены существующих технологий и оборудования на комбинированные плазменные системы (рис. 5).

Выводы. Из приведенного анализа можно заключить, что плазменная технология, даже если не принимать во внимание экологическую сторону проблемы, является более простой и удобной для розжига и сопровождения горения низкорекреационных углей, чем с применением растопочного топлива, и может быть рекомендована для использования в энергетике.

Список литературы:

1. Прогноз развития мировой энергетики до 2030 г. ВР 2011. 80 с. URL: https://www.bp.com/content/dam/bpcountry/ru_ru/folder/Energy_outlook_2030_rus_2011.pdf.
2. Кравченко А. Глобальные проблемы Украинской теплоэнергетики. Электрик. № 9. 2013. С. 38–41.
3. Канило П.М., Ваврив Д.М., Шунеман К., Соловей В.В., Костюк В.Е., Костенко К.В. Альтернативные технологии сжигания низкорекреационных углей в теплоэнергетических установках без дополнительного использования мазута или природного газа. Авиационно-космическая техника и технология. 2006. № 10 (36). С. 82–90.

4. Елин В.Н. Технология плазменного розжига и поддержания горения в пылеугольных котлах. Уголь. 2011. № 4. С. 12–13.
5. Тимошевский А.Н., Засыпкин И.М., Ващенко С.П., Комарицын В.К. Применение систем плазменного воспламенения угольной пыли в котлах Таштагольской производственно-отопительной котельной. Новости теплоснабжения. 2002. № 1 (17). С. 14–21.
6. Плазменная безмазутная растопка котлов и стабилизация горения пылеугольного факела / под ред. В.Е. Мессерле. Новосибирск: Наука. 1996. 415 с.
7. Жуков М.Ф. Плазмохимическая переработка угля. М.: Наука, 1990. 315 с.
8. Жуков М.Ф., Калинин Р.А., Левицкий А.А., Полак Л.С. Плазмохимическая переработка угля. М.: Наука, 1990. 200 с.
9. Карпенко Е.И., Мессерле В.Е. Плазменноэнергетические технологии топливоиспользования. Новосибирск: Наука, 1998. 385 с.
10. Петров С.В., Саков А.Г., Котляров О.Л., Яценко В.П. К проблеме снижения энергозатрат на пламенный розжиг и стабилизацию горения пылеугольного факела. Техническая электродинамика. 2004. № 3. С. 84–87.
11. Петров С.В., Литовкин В.В. К вопросу о применении плазмы для эффективного сжигания низкорекреационных углей. Энергетика и электрификация. 2005. № 3. С. 36–40.
12. 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.
13. Дубинский Ю.Н., Карпов Е.Г., Калоша Е.Ю. Кавитационное водоугольное топливо – технология будущего. The international conference Heat Power Engineering and Environmental Protection. TENOR 2011 Ugljevik, (Republic of Srpska, Bosnia and Herzegovina), 14–16 September. 2011. P. 49–56.
14. Морозов А.Г. Гидроударные технологии в производстве водоугольного топлива. Энергобезопасность и энергосбережение. 2010. № 2 (32). С. 12–15.
15. Сыродой С.В. Термическая подготовка и зажигание частиц водоугольного топлива применительно к топкам котельных агрегатов: дисс. ... канд. техн. наук: 05.14.14. Томск, 2014. 130 с.
16. Xiaojun He, Tengcai Ma, Jieshan Qiu, Tianjun Sun, Zongbin Zhao, Ying Zhou, Jialiang Zhang. Mechanism of coal gasification in a steam medium under arc plasma conditions. Plasma Sources Science and Technology. 2004. № 13. P. 446–453.
17. Булат А.Ф., Шумриков В.В., Алымов Б.Д., Холявченко Л.Т., Васильев Л.М. Плазменная газификация водоугольных топлив. Геотехническая механика: Межд. сб. научн. тр. ИГТМ НАН Украины. Днепрпетровск, 2006. Вып. 67. С. 185–196.
18. Овчинников Ю.В., Бойко Е.Е., Серант Ф.А. Проблемы сжигания водоугольного топлива и предложения по разработке технологии сжигания. Доклады АН ВШ РФ. 2015. Январь – март. № 1 (26). Технические науки. С. 85–93.
19. Мурко В.И., Федяев В.И., Карпенко В.И., Засыпкин И.М., Сенчурова Ю.А., Риестерер А. Результаты исследований процессов распыления и сжигания суспензионного угольного топлива. Современная наука. 2012. № 1 (9). С. 89–96.
20. Шуваева Н.М., Борисенко О.М., Борисенко О.А. Повышение эффективности подготовки к факельному сжиганию низкорекреационных углей Украины. Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. 2005. № 36. С. 124–129.

СИСТЕМА ПЛАЗМОВОГО ПІДСВІЧУВАННЯ НИЗЬКОРЕАКЦІЙНИХ ПАЛИВ ДЛЯ ТЕПЛОАГРЕГАТІВ

Розроблена та досліджена система плазмового підсвічення низькорекреационних палив для теплоагрегатів, якщо в якості розпалювального та супроводжуючого горіння палива може використовуватися застосоване в котлоагрегаті вугілля. У даному дослідженні прийняте буре вугілля БР-1. Показано, що надійне та стабільне спалахування і горіння водовугільної суспензії із такого вугілля здійснюється з витратами більше ніж 100 кг/год за потужності плазмотрона 17,5 кВт. Термін життя електродів такого плазмотрона – понад 1 000 годин. В плазмово-вугільному пальнику забезпечується повне вигорання вуглецю з виділенням теплової потужності понад 290 кВт. Плазмова система є малопотужним модулем, який вписується в конструкцію пиловугільного агрегату і дозволяє виключити додаткове високореакційне паливо – газ, мазут.

Ключові слова: плазмове підсвічування, малопотужний плазмотрон, низькорекреационне вугілля, водовугільна суспензія.

PLASMA LIGHTING SYSTEM OF LOW-REACTIVE FUELS FOR HEAT-GENERATING SETS

A system for the plasma lighting of low-reaction fuels for heat-generating sets was developed and investigated, when coal used in the boiler can be used as the ignition and accompanying combustion of fuel. In this study brown coal BR-1 was adopted. It is shown that reliable and stable ignition and combustion of coal-water suspension from such coal is carried out at a flow rate of more than 100 kg/hr with a 17,5 kW plasmatron power. The lifetime of electrodes of such a plasma torch is more than 1 000 hours. In the plasma coal burner, complete carbon burn-out is achieved with the release of a thermal power of over 290 kW. The plasma system is a low-power compact module that fits into the design of a pulverized coal boiler and allows excluding additional high-reaction fuel – fuel oil or gas.

Key words: *plasma lighting, low-power plasmatron, low-reaction coal, water-coal suspension.*