

## ПЛАЗМЕННО-ТОПЛИВНЫЕ СИСТЕМЫ И ПРИНЦИПЫ ИХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

О.А. Лаврищев<sup>1</sup> и А.Б. Устименко<sup>2,3\*</sup>

<sup>1</sup>НИИ экспериментальной и теоретической физики, КазНУ имени аль-Фараби,  
пр. аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>Институт проблем горения, ул. Богенбай батыра, 172, Алматы, Казахстан

<sup>3</sup>ТОО «Плазматехника R&D», ул. Наурызбай батыра, 26, Алматы, Казахстан

### АННОТАЦИЯ

В настоящей статье представлены основные типы плазменно-топливных систем и принципы их функционирования, обеспечивающие эколого-экономические преимущества, по сравнению с традиционными технологиями топливо использования. В плазменно-топливных системах осуществляется облагораживание угля любого качества до его сжигания. В общем случае плазменно-топливная система представляет собой топливное устройство (в которое подается топливо) с плазменным источником. В плазменно-топливных системах осуществляются процессы плазменной подготовки и/или переработки твердых топлив. Основным принцип функционирования плазменно-топливных систем заключается в организации электротермохимической подготовки и/или переработки угольной пыли в электродуговой плазме. Использование плазменно-топливных систем позволяет расширить гамму сжигаемых в одном и том же котле углей и, в конечном счете, снизить чувствительность пылеугольных котлов к качеству топлива. Показано, что важным преимуществом плазменной технологии являются быстрая окупаемость и малозатратность ее внедрения при одновременном снижении выбросов оксидов азота, серы и пятиоксида ванадия и мехнедожога топлива при плазменной подсветке пылеугольного факела, что делает их практически единственным на сегодня реальным средством повышения эколого-экономической эффективности использования твердых топлив и замещения в необходимых объемах дефицитного и дорогого мазута в топливном балансе ТЭС.

*Ключевые слова:* уголь, газифицирующий агент, плазменная газификация, синтез-газ, энергетическая эффективность.

### 1. Введение

В настоящее время интенсивно разрабатываются различные методы газификации, термохимической подготовки и комплексной переработки топлив, позволяющие повысить эффективность их сжигания и снизить при этом вредное воздействие на окружающую среду. Многие исследователи весьма перспективными, по сравнению с огневыми традиционными методами, считают плазменные методы газификации низкосортных топлив для нужд энергетики, металлургии и химической промышленности, использующие электроэнергию в форме низкотемпературной плазмы

[1, 2]. Известные преимущества плазменных процессов (высокая селективность, возможность переработки различных видов топлива, резкое ускорение химических реакций, малые габариты основного оборудования, возможность полной автоматизации, небольшая инерционность, высокая концентрация энергии, экологическая чистота) предопределили использование низкотемпературной плазмы для повышения эффективности использования топлива. Практическое осуществление плазменных процессов переработки угля возможно с помощью плазмоструйных и совмещенных электродуговых реакторов [2–5]. В плазмоструйных реакторах зоны генерации

\*Ответственный автор  
E-mail: ust@physics.kz (А.Б. Устименко)

плазмы и термохимических превращений топлива разделены, они находятся в разных камерах, что снижает тепловой КПД реактора. Плазменная струя в этом случае не содержит химически активных центров и представляет собой обычный высокотемпературный теплоноситель, нагревающий сырье.

В плазменных реакторах совмещенного типа электродуговая зона и зона термохимических превращений угля совмещены в одном рабочем объеме, что повышает энергетическую эффективность процесса, а нагрев сырья осуществляется непосредственно дугой, содержащей активные центры. Использование электродуговой плазмы с высокой концентрацией энергии (200–300 МВт/м<sup>3</sup>) химически активных атомов (O, H, C), радикалов (OH, CH, NO<sub>2</sub>), ионов (O<sub>2</sub><sup>-</sup>, H<sub>2</sub><sup>-</sup>, OH<sup>-</sup>, C<sup>+</sup>, H<sup>+</sup>) и электронного газа способствует многократному ускорению термохимических превращений топлива и окислителя, а, следовательно, более полному и быстрому протеканию процесса газификации. В этой связи, применение плазменного метода газификации во многих случаях энергетически более эффективно, чем использование традиционного огневого метода (автотермическая газификация и комплексная переработка).

Однако использование электродуговой плазмы для плазменной активации горения топлив вместо плазменной струи автоматически не обеспечивает энергетической и термохимической эффективности процесса из-за введения высококонцентрированной энергии плазмы непосредственно в пылеугольный поток, что приводило к быстрой диссипации в обширном топочном пространстве. Такой подход не обеспечивал эффективности электродугового воздействия при активации низкорекреационных углей типа экибастузского угля и Донецкого АШ, хотя и показал удовлетворительные результаты при воспламенении высокорекреационных углей. На положительные аспекты разделения всего пылеугольного потока на две части и сосредоточения воздействия на меньшей из них указывалось в работах [6, 7]. Однако это воздействие предполагалось, в основном, традиционное (за счет сжигания мазута или газа и нагрева угольной пыли продуктами их сгорания), не способное радикальным образом повысить эффективность топливоиспользования и снизить вредные выбросы, т.к. не устранялась первопричина проблемы – совместное сжигание топлив с разной реакционной способностью. Кроме

того, активное воздействие на часть аэросмеси не удавалось локализовать до выхода в топочное пространство и начала смешения с вторичным воздухом, что снижало эффективность такого приема. Даже использование электроэнергии при воспламенении топливом омическим нагревателем в объеме горелочного устройства оказалось пригодным лишь для высокорекреационных углей (>40%) из-за сравнительно низкотемпературного (T = 923 K) инертного нагрева аэросмеси без образования химически активных центров, способствующих повышению реакционной способности низкосортных топлив. Таким образом, используемый в ряде работ несомненно прогрессивный метод разделения потока аэросмеси на различные части и термохимической подготовки меньшей из них в значительной мере проигрывает из-за применения для осуществления последнего малоэффективных приемов (нагрев аэросмеси продуктами сгорания или поверхностью омического нагревателя). При использовании же плазменной струи или электродугового разряда, являющихся высокоэффективным и экологически чистым средством воздействия на пылеугольный поток, наблюдается определенное снижение их эффективности из-за размещения этих высококонцентрированных источников энергии непосредственно в неразделяемом потоке аэросмеси или в корне факела в открытом топочном пространстве. При этом происходит достаточно быстрая диссипация энергии низкотемпературной плазмы, приводящая к уменьшению энергетической эффективности и концентрации активных центров при плазменной активации горения угля, и особенно в случае низкорекреационных топлив. Для устранения перечисленных недостатков и повышения экологической эффективности процесса были разработаны плазменно-топливные системы [8–11].

В настоящей статье рассматриваются различные плазменно-топливные системы (ПТС) и принципы их функционирования.

## **2. Плазменно-топливная система для безмазутной растопки пылеугольных котлов**

Как следует из самого определения системы, в общем случае ПТС представляет собой топливное устройство (в которое подается топливо) с плазменным источником. В ПТС осуществляются процессы плазменной под-

готовки и/или переработки твердых топлив. Основной принцип функционирования ПТС заключается в организации электротермохимической подготовки и/или переработки угольной пыли в электродуговой плазме. Сущность его заключается в нагреве пыли плазмой, являющейся окислителем, до температуры полной газификации, при которой осуществляется конверсия органической массы угля в свободный от оксидов серы и азота синтез-газ, с одновременным восстановлением минеральной массы угля и получением ценных компонентов (технического кремния, ферросилиция, глинозема и карбосилиция). Тем самым из низкосортного угля можно получить, в отличие от известных технических решений, в едином технологическом процессе экологически чистое топливо - синтез-газ, являющийся одновременно потенциальным газом-восстановителем и сырьем для синтеза жидких топлив, а также извлечь из минеральной массы угля (ММУ) ценные компоненты, включая и микроэлементы (уран, молибден, ванадий и др.).

Плазменная термохимическая подготовка топлива к сжиганию является частным случаем электротермохимической переработки угольной пыли. Суть термохимической подготовки топлива заключается в нагреве при дефиците кислорода потока пылеугольной смеси в специальной камере до температуры, превышающей температуру самовоспаления данного угля (рис. 1). При этом происходит практически полный выход летучих и возможно частичное сгорание и/или газификация углерода угля. В результате, на выходе из камеры термохимической подготовки топлива в топку полученная топливная смесь или высокорекреакционное двухкомпонентное топливо (газ + коксовый остаток) воспламеняется при смешении с вторичным воздухом и устойчиво горит без использования для стабилизации факела второго вида высокорекреакционного топлива. Нагрев аэросмеси, представляющей собой взвесь частиц угля в воздухе в камере термоподготовки, может быть осуществлен за счет сжигания газообразного, жидкого или твердого топлива, электродуговой плазмой или другим способом подвода тепловой энергии. Технология термоподготовки должна обеспечить надежную работу при использовании углей различного качества (с различной зольностью, влажностью и выходом летучих). Плазменная технология ТХПТ на практике была опробована на всех типах углей, приведенных в таблице 1.

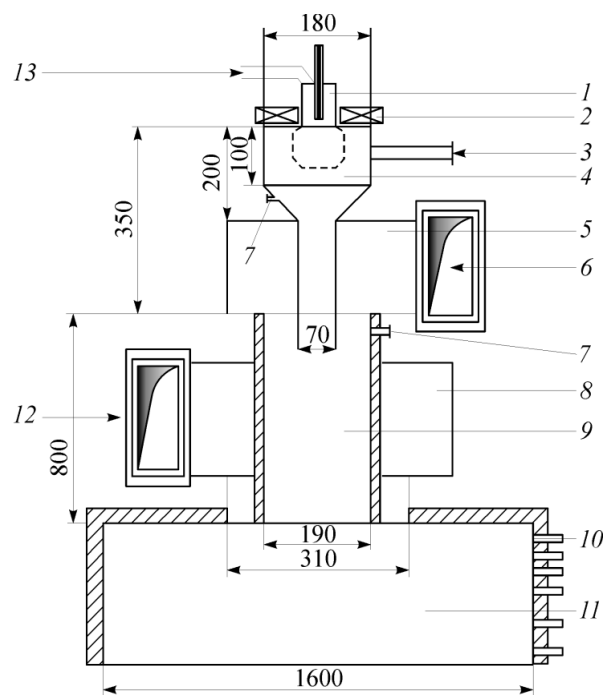


Рис. 1. Схема компоновки камеры ЭТХПТ с плазмотроном и вихревой пылеугольной горелкой: 1 – плазмотрон; 2 – электромагнитная катушка; 3 – аэросмесь; 4 – камера ЭТХПТ; 5 – улитка аэросмеси; 6 – аэросмесь; 7 – лючок для измерения температуры и отбора проб газа; 8 – улитка вторичного воздуха; 9 – центральная труба горелки; 10 – лючки для измерений температуры и отбора проб газа и коксового остатка; 11 – топочная камера; 12 – вторичный воздух; 13 – плазмообразующий воздух.

Таблица 1. Теплотехнические характеристики твердых топлив

| Тип угля       | $W^w$ | $A^d$ | $V^{daf}$ | $Q_{w,1}^w$ (ккал/кг) |
|----------------|-------|-------|-----------|-----------------------|
| Сланец         | 40–50 | 75–80 | 48–50     | 1600–2000             |
| Лигнит         | 32–40 | 28–35 | 23–27     | 1900–2100             |
| Бурый          | 25–35 | 15–20 | 35–50     | 3000–3800             |
| Каменный       | 5–12  | 20–56 | 15–40     | 4000–5000             |
| Антрацит       | 5–8   | 25–35 | 4–10      | 4300–6200             |
| Петрококк      | 1–2   | 2–3   | 3–4       | 8800–9700             |
| Угольная смесь | 10,4  | 48,5  | 38,2      | 3150                  |

Процесс плазменной термохимической подготовки топлива к сжиганию осуществляется в ПТС (рис. 1). Плазмотрон 1 устанавливается на футерованный канал аэросмеси горелки, которая тем самым преобразуется в ПТС. Поступающая в горелку аэросмесь взаимодействует с плазменной струей, вытекающей из сопла – анода плазмотрона. Средняя температура плазменной струи составляет 3000–5000 °С

в зависимости от электрической мощности плазмотрона и расхода плазмообразующего воздуха. Основным принципом плазменной ТХПТ к сжиганию заключается в ступенчатом характере воздействия плазменного источника на пылеугольное топливо: вначале плазменная струя (электродуговая плазма) взаимодействует с небольшой частью аэросмеси 3, в результате нагрева которой выделяются летучие угля, и осуществляется частичная газификация коксового остатка с образованием высокорекреационного двухкомпонентного топлива (горючий газ + коксовый остаток). Затем уже само высокорекреационное двухкомпонентное топливо, окисляясь в первичном воздухе аэросмеси, нагревает остальную аэросмесь, не контактирующую непосредственно с плазменным источником, компенсируя эндотермический эффект газификации основной части угля. Тем самым компактный плазменный факел активирует небольшую часть топлива, а ВДТ, полученное из этой незначительной части топлива, ступенчато активирует основной поток аэросмеси. Таким образом, реализуется алло-автотермический характер превращения твердых топлив, когда аллотермический источник (электродуговая плазма) выполняет роль активатора, который при определенных услови-

ях переводит процесс ТХПТ в автотермический самоподдерживающийся режим. В результате плазменной термохимической подготовке подвергается все проходящее через ПТС топливо. При выходе в топочную камеру и смешении с вторичным воздухом оно интенсивно воспламеняется и устойчиво горит, в свою очередь, стабилизируя процесс горения пылеугольных факелов, не подвергнутых плазменной ТХПТ.

На рис. 2 и 3 представлены схемы основных типов разработанных прямооточных и вихревых ПТС, которые иллюстрируют процесс плазменной термохимической подготовки угля к сжиганию. Из рисунков видно, что холодная аэросмесь поступает в ПТС, где она нагревается в зоне плазменного факела, образуя из низкосортного высокорекреационное двухкомпонентное топливо. Последнее удовлетворяет современным эколого-экономическим требованиям.

В случае углей низкой реакционной способности ( $V^{daf} < 30\%$ ) поток аэросмеси перед ПТС разделяют на две неравные части (рис. 1 и 3). Меньшая из них поступает камеру с плазменным источником. Нагрев большей части аэросмеси происходит в результате окисления меньшей, прошедшей плазменную ТХПТ, части топлива. В случае высокорекреационных углей

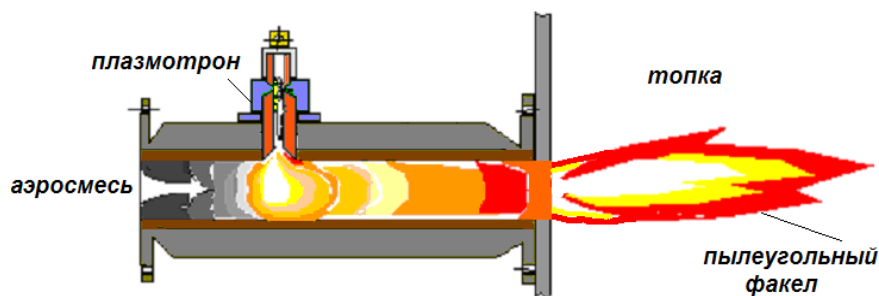


Рис. 2. Схема прямооточной ПТС.

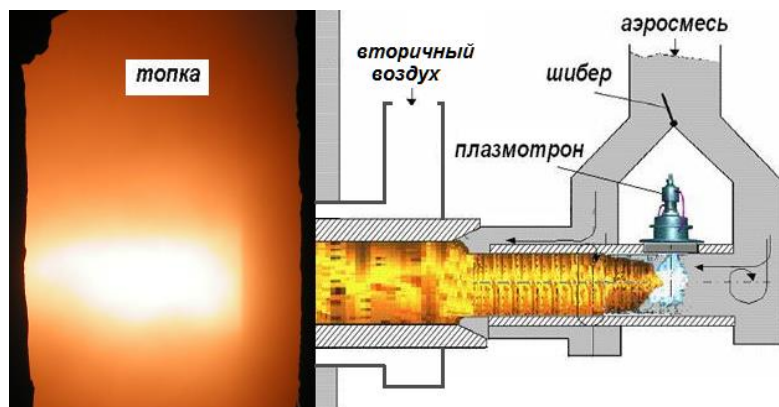


Рис. 3. Схема вихревой ПТС.

( $V^{daf} > 30\%$ ) аэросмесь предварительно разделять нет необходимости (рис. 2). Тем не менее, с плазменным факелом непосредственно контактирует 3–5% аэросмеси, что предопределяется естественными теплофизическими границами компактного плазменного факела, горящего в объеме ПТС [12]. Схема прямоточной ПТС (рис. 2) применяется на Гусиноозерской ГРЭС (Россия), сжигающей высокорреакционные Тугнуйские каменные угли, вихревая ПТС (рис. 3) используется на ТЭС «Ганшун» (Китай), ТЭС «Вояны» (Словакия), а в 2011 году была испытана на Алматинской ТЭЦ-2 (Казахстан) [8, 9].

В последнее время значительный интерес к использованию ПТС на ТЭС помимо Китая, где 87% электроэнергии вырабатывается на пылеугольных ТЭС, проявляют Казахстан, Россия, Германия, Турция, Корея и Индия, в которых доля пылеугольных ТЭС в энергетике составляет 88, 30, 60, 47, 50 и 70% соответственно. В настоящее время для некоторых ТЭС из этих стран разработаны технические решения и выполнены проекты оснащения ПТС с плазмотронами постоянного тока номинальной мощностью 200 кВт для пылеугольных котлов паропроизводительностью от 75 до 1650 тонн в час (Шахтинской ТЭЦ (Казахстан), Рефтинской ГРЭС (Россия), ТЭС Ятаган (Турция), ТЭС Ганшун и ТЭС Южное море – Цзин-нэн (Китай), ТЭС ТаеАн (Корея)). На рис. 4–7 представлены технические решения по оснащению пылеугольных котлов ПТС на вышеупомянутых ТЭС. Характеристики плазмотрона, как основного элемента ПТС, устанавливаемых на этих ТЭС, приведены в таблице 2.

На рис. 4 представлен поперечный разрез топки котла RFK-210 мощностью 210 МВт и

Таблица 2. Технические характеристики плазмотрона

|  |                            |
|--|----------------------------|
| Мощность плазмотрона, кВт                    | 50–350                     |
| Напряжение, В                                | 250–400                    |
| Ток дуги, А                                  | 200–900                    |
| Масса плазмотрона, кг                        | 25–35                      |
| Ресурс электродов плазмотрона, ч             | 250 (катод);<br>500 (анод) |
| Расход плазмообразующего газа (воздух), кг/ч | 20–80                      |
| Температура плазменного факела, К            | 3000–6000                  |
| Масса источника электропитания, кг           | 450                        |

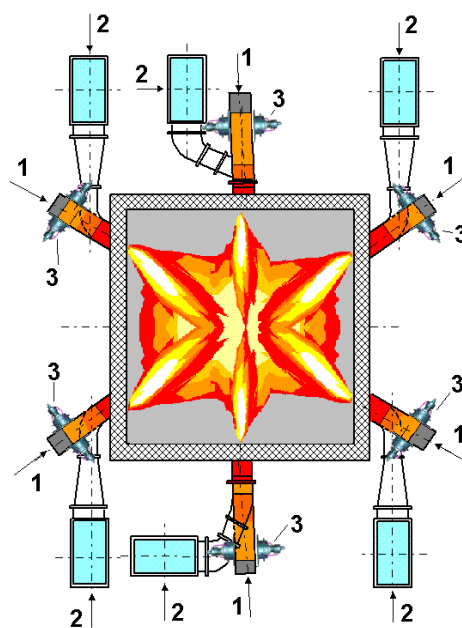


Рис. 4. Компоновка ПТС с топкой котла RFK-210 ТЭС Ятаган (Турция): 1 – аэросмесь; 2 – вторичный воздух; 3 – плазмотрон на прямоточной ПТС.

расходом лигнита (табл. 1) 250 т/ч. Котел оснащен 48 прямоточными пылеугольными горелками, распределенными по 6 блокам и расположенными в четыре яруса. 12 плазмотронов устанавливается в муфелизированные каналы горелок нижнего яруса, обеспечивая воспламенение лигнита с расходом до 7.25 т/ч через каждый канал.

На рис. 5 показана схема установки ПТС на одном корпусе двухкорпусного котла ПК-39-II

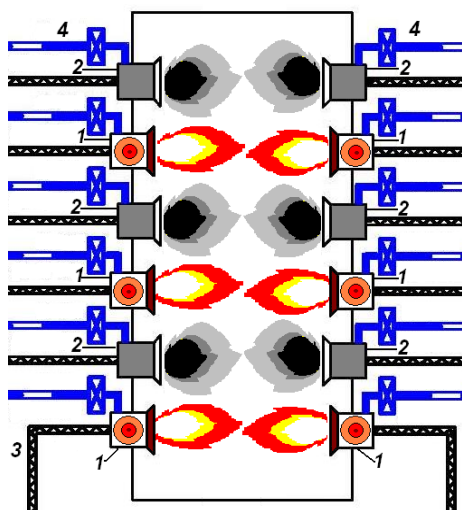


Рис. 5. Компоновка ПТС с топкой двухкорпусного котла ПК-39-II Рефтинской ГРЭС (Россия): 1 – вихревая ПТС; 2 – основная пылеугольная горелка; 3 – аэросмесь; 4 – вторичный воздух.

мощностью 300 МВт и расходом каменного угля 83 т/ч на один корпус котла. Топка корпуса оснащена 12 вихревыми пылеугольными горелками, расположенными по 6 горелок с фронта и с тыла в два яруса. Расход угольной пыли через каждую горелку составляет 7 т/ч. Вместо 6 основных пылеугольных горелок нижнего яруса устанавливается 6 вихревых ПТС, обеспечивающих безмазутную растопку котла и стабилизацию горения пылеугольного факела.

Схема установки прямооточных ПТС на котле ВГ-75/39-М приведена на рис. 6. Котел оснащен 8 пылеугольными горелками, расположенными по углам котла в два яруса. Котел работает на низкосортном каменном угле (табл. 1). Номинальный расход угля на котел 18,75 т/ч, а через одну горелку – 2,35 т/ч. 2 ПТС были установлены в нижнем ярусе горелок с фронта котла. Изнутри горелки футерованы керамическими вставками толщиной 50 мм. В процессе испытаний ПТС через 5–10 сек после включения плазмотронов и подачи угольной пыли на выходе обоих ПТС были получены факелы красного цвета с температурой 850–900 °С. Мощность каждого плазмотрона составляла 160 кВт ( $I=400$  А,  $U=400$  В). При расходе угольной пыли через каждую ПТС 2 т/ч концентрация пыли в аэросмеси составляла 0,5–0,6 кг/кг. Через 20 мин работы ПТС температура факелов в топке достигла 1300 °С и наблюдалось устой-

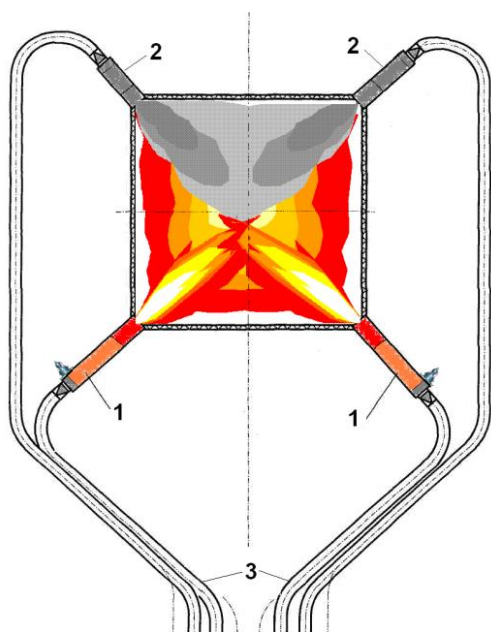


Рис. 6. Компоновка ПТС с топкой котла ВГ-75/39-М ТЭС «Золотая Гора» (Китай): 1 – прямооточная ПТС; 2 – основная пылеугольная горелка; 3 – пылепровод.

чивое горение топлива в топке при работающих плазмотронах. После достижения устойчивого горения в топке и подачи угольной пыли через основные пылеугольные горелки, не оборудованные плазмотронами, и дальнейшего роста параметров котла (давление и температуры пара, температуры вторичного и первичного воздуха) испытания плазменной безмазутной растопки были завершены.

На рис. 7 показана компоновка двух ПТС с топкой котла БКЗ-75, оборудованного четырьмя аксиально-лопаточными вихревыми трехканальными пылеугольными горелками, установленными по две горелки с фронта и с тыла в один ярус. Расход пыли Карагандинского каменного угля зольностью 35,1% через каждую горелку составляет 3,2 т/ч. 2 ПТС устанавливаются с фронта котла и обеспечивают безмазутный режим работы котла при его растопке и стабилизации горения пылеугольного факела.

Для демонстрации преимуществ ПТС в таблице 3 приведено сравнение основных показателей мазутной и плазменной технологий растопки котлов и подсветки пылеугольного факела. Как видно из таблицы применение ПТС только на ТЭС России и Казахстана обеспечит экономию топочного мазута стоимостью около 1,2 млрд. долл. США и снижение эксплуатационных затрат на 70%.

Использование ПТС обеспечивает повышение эффективности воспламенения и сжига-

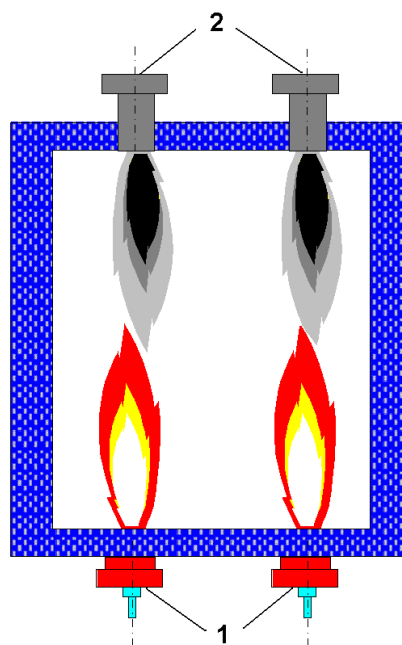


Рис. 7. Компоновка ПТС с топкой котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭС (Казахстан): 1 – вихревые ПТС; 2 – основные пылеугольные горелки.

ния энергетических углей, позволяет исключить расходование дефицитного мазута на растопку и подсветку котла, снизить мехнедожог топлива, а также обеспечивает широкие возможности для автоматизации процесса розжига, стабилизации горения пылеугольного факела в котлах и уменьшения вредных выбросов в окружающую среду. На рис. 8 и 9 представлены результаты экспериментов по снижению выбросов  $\text{NO}_x$  и мехнедожога топлива при плазменном воспламенении угля в топке котла, выполненных на лабораторной ПТС, показанной на рис. 1. При работе плазмотрона в режиме стабилизации пылеугольного факела концентрация  $\text{NO}_x$  снижается вдвое, благодаря двустадийному режиму сжигания

топлива (ПТС и топка котла), с одновременным уменьшением мехнедожога топлива в 4 раза.

Таким образом, разработанные и испытанные в промышленных условиях ПТС обеспечивают стабильное воспламенение и повышают эффективность сжигания угля при одновременном снижении вредных выбросов от пылеугольных ТЭС. ПТС устраняют необходимость использования дорогостоящих газа и мазута для растопки котлов и стабилизации горения пылеугольного факела. Экономический эффект от внедрения ПТС зависит от соотношения цен на уголь, газ, мазут, в зависимости от которых срок окупаемости варьируется от 12 до 24 месяцев.

Таблица 3. Сравнительные показатели традиционной технологии с плазменной

| Существующая технология с использованием мазута       | Плазменная технология с использованием плазменно-топливных систем |
|---|---|
| 1. Расход мазута на ТЭС России                        |   |
| 5.1 млн. т/год<br>(стоимость более 2 млрд. долл. США) | 0   |
| 2. Расход мазута на ТЭС Казахстана                    |   |
| ~1 млн. т/год<br>(стоимость около 500 млн. долл. США) | 0   |
| 3. Капвложения на ТЭС                                 |   |
| Мазутное хозяйство: 100%                              | Плазменно-топливные системы: 3-5%                                 |
| 4. Эксплуатационные затраты                           |   |
| 100%  | 28-30%  |
| 5. Расход электроэнергии на собственные нужды ТЭС     |   |
| На мазутное хозяйство: 3-5%                           | На ПТС: 0,5-1,0%  |

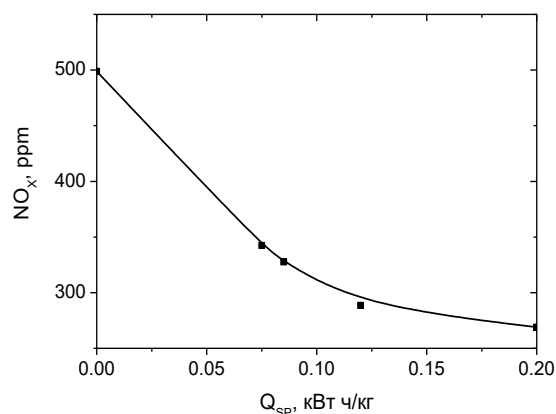


Рис. 8. Снижение концентрации  $\text{NO}_x$  при плазменной стабилизации горения пылеугольного факела в зависимости от удельных энергозатрат на процесс, приведенных к 1 кг угля.

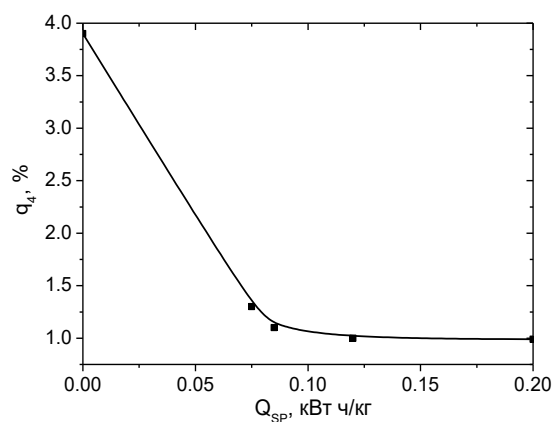


Рис. 9. Снижение мехнедожога при плазменной стабилизации горения пылеугольного факела в зависимости от удельных энергозатрат на процесс, приведенных к 1 кг угля.

### 3. Плазменно-топливная система для газификации твердого топлива

При плазменно-паровой или воздушной газификации и комплексной переработке углей [13–16] в электродуговую зону реактора (ПТС) поступает 100% топлива и эндотермический эффект реакций газификации полностью компенсируется энергией плазмы. При этом удельные энергетические затраты для такого процесса значительно превышают таковые для плазменной ТХПТ. В ряде случаев высокие энергетические затраты оправданы, так как из органической массы угля (ОМУ) получают высококалорийный экологически чистый синтез-газ с содержанием водорода и монооксида углерода до 96–98%, а из ММУ восстанавливают ценные компоненты (технический кремний, карбосилиций, ферросилиций, оксиферроалюминий и т.д.). На рис. 10 приведена ПТС для осуществления плазменной газификации твердого топлива.

Основная особенность осуществления плазменных технологий с использованием ПТС заключается в согласовании необходимого физического времени пребывания реагентов в ПТС с заданной степенью газификации углерода перерабатываемого топлива. При высоком уровне температур (3000–5000 К) необходимое время пребывания угольных частиц и окислителя достаточно мало и составляет 0,001–0,1 с, тогда как при более низком уровне температур (1000–2000 К) оно увеличивается до 0,15–0,3 с [12]. Таким образом, заданную степень превращения топлива в ПТС можно достигать за счет повышения температур процесса, либо за счет увеличения времени пребывания реагентов в ПТС при сравнительно невысоких температурах.

### 4. Преимущества использования ПТС

Из известных технологий использования твердых топлив с учетом необходимости повышения технико-экономических и экологических показателей ТЭС плазменно-энергетические технологии топливоиспользования обладают рядом нижеследующих преимуществ по сравнению с традиционными технологиями, включая сжигание в кипящем и циркулирующем кипящем слое [17]:

- облагораживание угля любого качества происходит до его сжигания за счет термохимической подготовки топлива, результатом которой является повышение реакционной

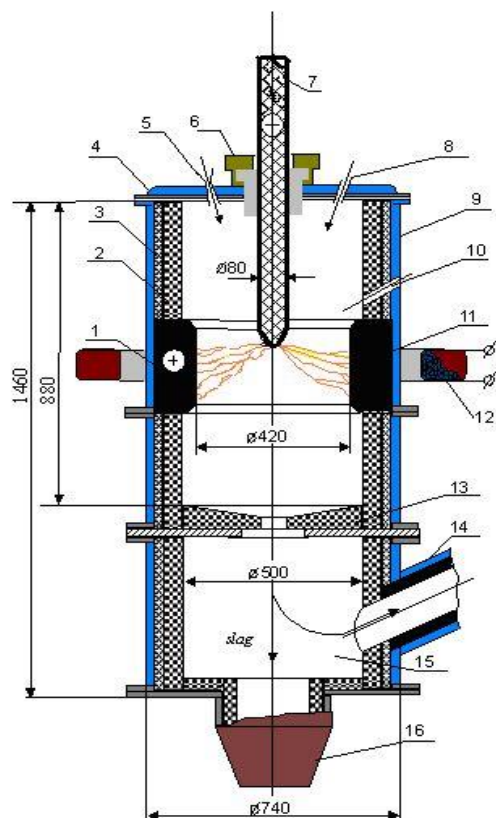


Рис. 10. ПТС для газификации углей – плазменный реактор совмещенного типа: 1 – электрическая дуга; 2 – графитовая засыпка; 3 – графитовая футеровка; 4 – водоохлаждаемая крышка; 5 – патрубок подачи угольной пыли; 6 – изолятор с системой уплотнения электрода; 7 – графитовый электрод; 8 – патрубок подачи пара; 9 – рубашка водоохлаждения реактора; 10 – патрубок подачи электрода для зажигания дуги; 11 – кольцевой графитовый электрод; 12 – электромагнитная катушка; 13 – графитовая диафрагма; 14 – патрубок вывода синтез-газа; 15 – камера разделения газа и шлака; 16 – патрубок вывода шлака.

способности и рекомбинация атомарного азота топлива, выходящего вместе с летучими, в молекулярный азот. По этой причине образование оксидов азота из молекулярного азота возможно преимущественно при температурах в топке выше 1700 °С (термические оксиды азота);

- малые затраты на плазменное оборудование по причине его небольших габаритов и высокой концентрации энергии в электродуговых плазмотронах (порядка 200–250 МВт/м<sup>3</sup>);

- малые значения относительной электрической мощности плазмотронов для электротермохимической подготовки топлива (0,5–1,5%) от тепловой мощности пылеугольных горелок, на которые их устанавливают. Для сравнения, затраты электроэнергии на соб-



ственные нужды обычных пылеугольных котлов составляют 8–10%;

- использование плазменно-энергетических технологий на ТЭС позволяет расширить гамму сжигаемых в одном и том же котле углей и, в конечном счете, снизить чувствительность пылеугольных котлов к качеству топлива;

- низкая инерционность систем плазменно-воспламенения, предоставляющая возможность их использования в режиме “подхвата” факела;

- быстрая окупаемость и малозатратность внедрения плазменно-энергетических технологий при одновременном снижении выбросов оксидов азота, серы и пятиоксида ванадия и мехнедожога топлива при плазменной подсветке пылеугольного факела делает их практически единственным на сегодня реальным средством повышения эколого-экономической эффективности использования твердых топлив и замещения в необходимых объемах дефицитных и дорогих мазута и природного газа в топливном балансе ТЭС России.

Плазменные технологии дают существенную экономию жидкого и газообразного углеводородных топлив, традиционно используемых для растопки котлов и стабилизации горения низкосортных углей.

В отличие от традиционных способов ТХПТ к сжиганию плазменной технологии присущи определенные особенности:

- истечение плазменной струи в поток происходит со скоростью  $\sim 200$  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 соответствующему росту скорости выделения тепла при горении, т.е. ускорению ТХПТ. 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.

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 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  $\text{NO}_x$ , выходит вместе с летучими углем 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 необходимое 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 – пятиокись 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.

## 5. Заключение

Представлены основные типы плазменно-топливных систем и принципы их функционирования, обеспечивающие эколого-экономические преимущества, по сравнению с традиционными технологиями топливоиспользования.

В ПТС осуществляется облагораживание угля любого качества до его сжигания. Использование ПТС позволяет расширить гамму сжигаемых в одном и том же котле углей и, в конечном счете, снизить чувствительность пылеугольных котлов к качеству топлива.

Важным преимуществом технологии ПТС является быстрая окупаемость и малозатратность внедрения плазменной технологии при одновременном снижении выбросов оксидов азота, серы и пятиоксида ванадия и мехнедожога топлива при плазменной подсветке пылеугольного факела, что делает их практически единственным на сегодня реальным средством повышения эколого-экономической эффективности использования твердых топлив и замещения в необходимых объемах дефицитного и дорогого мазута в топливном балансе ТЭС.

При плазменной термохимической подготовке топлива к сжиганию нагрев потока аэро-

смеси осуществляется в основном в результате горения определенной части угля. При этом азот топлива, ответственный за образование «топливных» оксидов азота, составляющих до 90–95% выбросов  $\text{NO}_x$ , выходит вместе с летучими углями и в условиях дефицита окислителя образует молекулярный азот.

## Благодарность

Авторы поздравляют доктора технических наук, профессора Мессерле В.Е. с юбилеем, желают здоровья, благополучия, творческих успехов и благодарят за интерес к работе и вклад в разработку и развитие плазменно-энергетических технологий.

## Литература

- [1]. He X., Ma T., Qiu J., Sun T., Zhao Z., Zhou Y. and Zhang J. Mechanism of Coal Gasification in a Steam Medium under Arc Plasma Conditions // *Plasma Sources Science and Technology*. – 2004. – Vol.13, №3. – P.446–453.
- [2]. Karpenko E.I., Messerle V.E., Ustimenko A.B. Plasma-aided solid fuel combustion // *Proceedings of the Combustion Institute*. – 2007. – Vol.31, №2. – P.3353–3360.
- [3]. Pfender E. Thermal Plasma Technology: Where Do We Stand and Where Are We Going? // *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. – 1999. – Vol.19, №1. – P.1–31.
- [4]. Qiu J., He X., Sun T., Zhao Z., Zhou Y., Guo S., Zhang J. and Ma T. Coal Gasification in Steam and Air Medium under Plasma Conditions: A Preliminary Study // *Fuel Processing Technology*. – 2004. – №85. – P.969–982.
- [5]. Lee Y.C., Chyou Y.P., Pfender E. Particle dynamics and particle heat and mass transfer in thermal plasmas. Part II. Particle heat and mass transfer in thermal plasmas // *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. – 1985. – Vol.5, №4. – P.391–413.
- [6]. Ибрагимов М.Х., Марченко Е.М., Тувальбаев Б.Г. Разработка новых решений по сжиганию низкорекреационных и забалластированных углей. // *Энергетика и электрификация*. – 1987. – №1. – С.11–14.
- [7]. Ибрагимов М.Х., Марченко Е.М., Тувальбаев Б.Г. Анализ способов стабилизации пылеугольного факела // *Энергетика и электрификация*. – 1990. – №1. – С.8–10.
- [8]. Karpenko E.I., Karpenko Yu.E., Messerle V.E., Ustimenko A.B. Use of Plasma Fuel Systems at Thermal Power Plants in Russia, Kazakhstan, China, and Turkey // *High Energy Chemistry*. – 2009. – Vol.43, №3. – P.224–228.

- [9]. 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, №6. – P.456–461.
- [10]. Messerle V.E., Karpenko E.I., Ustimenko A.B. Plasma Assisted Power Coal Combustion in the Furnace of Utility Boiler: Numerical Modelling and Full-Scale Test // *Fuel*. – 2014. – Vol.126. – P.294–300.
- [11]. Messerle V.E., Karpenko E.I., Ustimenko A.B., Lavrichshev O.A. Plasma preparation of coal to combustion in power boilers // *Fuel Processing Technology*. – 2013. – Vol.107. – P.93–98.
- [12]. Jankoski Z., Lockwood F.C., Messerle V.E., Karpenko E.I., Ustimenko A.B. Modelling of the Pulverised Coal Plasma Preparation for Combustion // *Thermophysics and Aeromechanics*. – 2004. – Vol.11, №3. – P.461–474.
- [13]. Kalinenko R.A., Kuznetsov A.P., Levitsky A.A., Messerle V.E., Mirokhin Yu.A., 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.
- [14]. Galvita V., Messerle V.E., Ustimenko A.B. Hydrogen production by coal plasma gasification for fuel cell technology // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2007. – Vol.32, №16. – P.3899–3906.
- [15]. Messerle V.E., Ustimenko A.B., Lavrichshev O.A. Plasma coal conversion including mineral mass utilization // *Fuel*. – 2017. – Vol.203. – P.877–883.
- [16]. Messerle V.E., Ustimenko A.B. Plasma processing of uranium-containing solid fuels // *Fuel*. – 2019. – Vol.242. – P.447–454.
- [17]. Karpenko E., Messerle V. The Current Status and Prospects of Using Plasma-Energy Technologies in Heat Power Industry // *Proceeding of the Sixth International Conference on Technologies and Combustion for a Clean Environment “Clean Air”*. Vol. II. Porto, Portugal, 2001. – P.791–794.
- [4]. Qiu J, He X, Sun T, Zhao Z, Zhou Y, Guo S, Zhang J, Ma T (2004) *Fuel Processing Technology*. 85:969–982. DOI:10.1016/j.fuproc.2003.11.035
- [5]. Lee YC, Chyou YP, Pfender E (1985) *Plasma Chemistry and Plasma Processing* 5(4):391–413. DOI:10.1007/BF00566011
- [6]. Ibragimov MKh, Marchenko EM, Tuvalbaev BG (1987) *Energy and electrification [Energetika i elektrifikatsiya]* 1:11–14. (In Russian)
- [7]. Ibragimov M.Kh., Marchenko E.M., Tu-valbaev B.G. (1990) *Energy and electrification. [Energetika i elektrifikatsiya]* 1:8–10. (In Russian)
- [8]. Karpenko EI, Karpenko YuE, Messerle VE, Ustimenko AB (2009) *High Energy Chemistry* 43(3):224–228. DOI:10.1134/S0018143909030114
- [9]. Karpenko EI, Karpenko YuE, Messerle VE, Ustimenko AB (2009) *Thermal Engineering*. 56(6):456–461. DOI:10.1134/S0040601509060020
- [10]. Messerle VE, Karpenko EI, Ustimenko AB (2014) *Fuel* 126:294–300. DOI:10.1016/j.fuel.2014.02.047
- [11]. Messerle VE, Karpenko EI, Ustimenko AB, Lavrichshev OA (2013) *Fuel Processing Technology* 107:93–98. DOI:10.1016/j.fuproc.2012.07.001
- [12]. Jankoski Z, Lockwood FC, Messerle VE, Karpenko EI, Ustimenko AB (2004) *Thermophysics and Aeromechanics* 11(3):461–474.
- [13]. Kalinenko RA, Kuznetsov AP, Levitsky AA, Messerle VE, Mirokhin YuA, Polak LS, Sakipov ZB, Ustimenko AB (1993) *Plasma Chemistry and Plasma Processing* 13(1):141–167. DOI:10.1007/bf01447176
- [14]. Galvita V, Messerle VE, Ustimenko AB (2007) *International Journal of Hydrogen Energy* 32 (16):3899–3906. DOI:10.1016/j.ijhydene.2007.05.039
- [15]. Messerle VE, Ustimenko AB, Lavrichshev OA (2017) *Fuel* 203:877–883. DOI:10.1016/j.fuel.2017.05.037
- [16]. Messerle VE, Ustimenko AB (2019) *Fuel* 242:447–454. DOI:10.1016/j.fuel.2019.01.050
- [17]. Karpenko E, Messerle V (2001) *The Current Status and Prospects of Using Plasma-Energy Technologies in Heat Power Industry. Proceeding of the Sixth International Conference on Technologies and Combustion for a Clean Environment “Clean Air”*. Vol. II. Porto, Portugal, 2001. P.791–794.

## References

- [1]. He X, Ma T, Qiu J, Sun T, Zhao Z, Zhou Y, Zhang J (2004) *Plasma Sources Science and Technology*. 13(3):446–453. DOI:10.1088/0963-0252/13/3/011
- [2]. Karpenko EI, Messerle VE, Ustimenko AB (2007) *Proceedings of the Combustion Institute* 31(2):3353–3360. DOI:10.1016/j.proci.2006.07.038
- [3]. Pfender E (1999) *Plasma Chemistry and Plasma Processing* 19(1):1–31. DOI:10.1023/A:1021899731587

## Plasma-fuel systems and principles of their functioning

O.A. Lavrichshev<sup>1</sup> and A.B. Ustimenko<sup>2,3\*</sup>

<sup>1</sup>Research Institute of Experimental and Theoretical Physics, al-Farabi Kazakh National University, 71 Al-Farabi Ave., Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>Institute of Combustion Problems, 172 Bogenbay batyr str., Almaty, Kazakhstan

<sup>3</sup>Plasmatechnics R&D LLP, 26 Nauryzbay Batyr st. Almaty, Kazakhstan

### Abstract

This article presents the main types of plasma-fuel systems and the principles of their operation, which provide environmental and economic benefits compared to traditional fuel-use technologies. In plasma-fuel systems, coal of any quality is upgraded before it is burned. In general, a plasma-fuel system is a fuel device (a device into which fuel is supplied) with a plasma source. In plasma-fuel systems, the processes of plasma preparation and/or processing of solid fuels are carried out. The basic principle of the operation of plasma-fuel systems is the organization of electrothermochemical preparation and/or processing of coal dust in electric arc plasma. The use of plasma-fuel systems makes it possible to expand the range of coals burned in the same boiler and, ultimately, reduce the sensitivity of pulverized coal boilers to fuel quality. It is shown that an important advantage of the plasma technology is the quick payback and low cost of its implementation, while reducing emissions of nitrogen oxides, sulfur and vanadium pentoxide and fuel burnout during plasma stabilization of a pulverized coal flame. This makes them practically the only real means of improving the environmental and economic efficiency of using solid fuels and replacing scarce and expensive fuel oil in the fuel balance of TPPs in the required volumes.

*Keywords:* coal, gasifying agent, plasma gasification, synthesis gas, energy efficiency.

## Плазмалық-отындық жүйелер және олардың жұмыс істеу принциптері

О.А. Лаврищев<sup>1</sup> және А.Б. Устименко<sup>2,3\*</sup>

<sup>1</sup>Эксперименталды және теоретикалық физика ғылыми зерттеу институты, Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, әл-Фараби даңғ. 71, Қазақстан

<sup>2</sup>Жану проблемалар институты, Бөгенбай батыр к., 172, Алматы, Қазақстан

<sup>3</sup>ЖШС «Плазматехника R&D», Наурызбай батыр к., 26, Алматы, Қазақстан

### Аңдатпа

Бұл мақалада плазмалық отын жүйелерінің негізгі түрлері және дәстүрлі отын пайдалану технологияларымен салыстырғандағы олардың экологиялық – экономикалық басымдылықтарын қамтамасыз ететін, жұмыс істеу принциптері берілген. Плазмалық отындық жүйелерде кез келген сападағы көмірді өртеуге дейінгі кезеңде оны тазарту жүзеге асырылады. Жалпы айтқанда, плазмалық отын жүйесі дегеніміз – плазмалық көзі бар (отын салынатын құрылғы) отын құрылғысы болып табылады. Плазмалық отындық жүйелерде плазмалық даярлау немесе қатты отындарды өңдеу процесстері жүзеге асырылады. Плазмалық-отын жүйелері жұмысының негізгі принципі – электр доғалық плазмада көмір шаңын электрохимиялық дайындау мен өңдеуді ұйымдастыру. Плазмалық отын жүйелерін пайдалану бір қазандықта жағылатын көмірлердің ауқымын кеңейтуге және сайып келгенде, ұнтақ көмір қазандарының отын сапасына сезімталдығын төмендетуге мүмкіндік береді. Плазмалық технологияның маңызды артықшылығы азот оксидтерінің, күкірт оксидтерінің және ванадий пентоксидінің шығарындыларын және ұнтақталған көмір алауын плазмалық жарықтандыру кезінде отынның механикалық күйіп қалуын азайту кезінде тез өтелу және оны енгізудің төмен құны екендігі көрсетілген, және бұл оларды қатты отынды пайдаланудың экологиялық және экономикалық тиімділігін арттырудың және ЖЭО отын балансындағы тапшы және қымбат мазутты қажетті көлемде ауыстырудың іс жүзінде бірден-бір нақты құралына айналдырады.

*Кілт сөздер:* көмір, газдаушы агент, плазмалық газификация, синтез-газ, энергетикалық тиімділік.