

Перспективные плазменные технологии топливо использования

Е.И.Карпенко, В.Е.Мессерле, Ю.Е.Карпенко¹

¹Отраслевой Центр плазменно-энергетических технологий РАО «ЕЭС России»
671160 Россия, Гусиноозерск
Улан-Удэнский Филиал Института теплофизики СО РАН,
Отдел физических проблем при Президиуме Бурятского научного центра СО РАН
670047 Россия, Улан-Удэ
e-mail: ofp@pres.bsnet.ru

В настоящей работе представлены перспективные плазменные технологии использования топлив, разработанные и освоенные в промышленном или опытно-промышленном масштабах [1-3]. К ним относятся: плазменная технология безмазутной растопки пылеугольных котлов и стабилизации горения пылеугольного факела на тепловых электростанциях (рис. 1-5), плазменная технология безмазутной стабилизации выхода жидкого шлака в топках с жидким шлакоудалением (рис. 6), плазменная технология термохимической подготовки топлива к сжиганию и газификации углей в комбинированном газификаторе (рис. 7), технология газификации и комплексной переработки твердых топлив в совмещенном плазменном реакторе (рис. 8), плазменная технология переработки энергетических углей в углеродные сорбенты (рис. 9), плазменная технология воспламенения и стабилизации горения угольной пыли во вращающейся печи для спекания глинозема в алюминиевой промышленности и безмазутного обжига клинкера при производстве цемента (рис. 10), плазменная технология утилизации остатков глубокой переработки нефти (рис. 11) и плазменно-циклонная технология обжига кирпича (рис. 12). Перечисленные технологии реализованы с помощью плазменно-топливных систем (ПТС), созданных для повышения эффективности сжигания энергетических углей и снижения вредных выбросов. ПТС (рис. 2) представляют собой пылеугольные горелки, оборудованные электродуговыми плазмотронами (рис. 1), являющимся основным элементом ПТС.



Рис. 1. Электродуговой плазмотрон постоянного тока мощностью до 350 кВт.

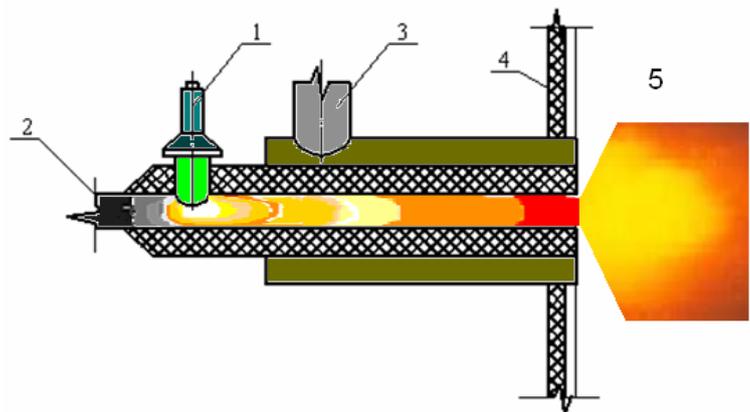


Рис. 2. Прямоточная плазменно-топливная система: 1- плазмотрон, 2 – аэросмесь, 3 – вторичный воздух, 4 – стенка топки котла, 5 – топка.

Технология ПТС основана на плазменной термохимической подготовке угля к сжиганию и заключается в нагреве аэросмеси (угольная пыль + воздух) электродуговой плазмой до температуры выхода летучих и частичной газификации коксового остатка.

Тем самым из исходного низкосортного угля получают высокорекреационное двухкомпонентное топливо (горючий газ + коксовый остаток). При его смешении с вторичным воздухом двухкомпонентное топливо воспламеняется и устойчиво горит в топочной камере (рис. 3). Экспериментально показано, что благодаря двухступенчатому сжиганию пылеугольного топлива при работе плазмотрона в режиме стабилизации пылеугольного факела концентрация NOx на выходе из топки снижается вдвое (рис. 4) с одновременным уменьшением мехнедожога топлива в 4 раза (рис. 5).

В 2002 г. было получено РАЗРЕШЕНИЕ Госгортехнадзора России № РСР 03-7164 на «Применение Систем безмазутной растопки котлов и стабилизации пылеугольного факела с использованием электродуговых плазмотронов, их проектирование, осуществление монтажа, ввода в действие и эксплуатацию плазменного оборудования» и в 2005 году продлено бессрочно. Оценка экономической эффективности внедрения ПТС на пылеугольных ТЭС РАО «ЕЭС России» показала очень высокую перспективность ПЭТ. Установленная мощность угольных ТЭС России составляет около 40 млн. кВт при наличии более 380 пылеугольных котлов [6].



Рис. 3. Фотография топки котла мощностью 200 МВт, оснащенного 4 прямоточными ПТС, в процессе плазменной растопки (вид сверху).

Необходимое количество ПТС для внедрения на этих котлах равно 1358 комплектам. При этом объем вытеснения топочного мазута самим углем оценивается в 7,3 млн. тонн условного топлива (тут), а экономия приведенных затрат составляет около 140\$/т [7]. Таким образом, экономический эффект от реализации плазменно-топливных систем на угольных ТЭС России составит более 1 млрд \$/год. При этом себестоимость 1358 комплектов ПТС составляет около 70 млн \$, а время их окупаемости (в зависимости от качества угля и характеристик котла) не превышает 2 лет. Технологии плазменной безмазутной растопки котлов и стабилизации горения пылеугольного факела запатентованы [3]. Только интеллектуальная собственность ЗАО «ОЦ ПЭТ» РАО «ЕЭС России» в области ПЭТ, утвержденная Международным институтом промышленной собственности (г.Москва), составляет около 80 млн \$ [8]. За

время эксплуатации ПТС только на 4 энергоблоках Гусиноозерской ГРЭС (установленной мощностью 200 МВт каждый) уже сэкономлено более 30000 т мазута, стоимостью более 3 млн. \$. При этом снижение вредных выбросов (оксидов азота и серы, монооксида углерода и пятиоксида ванадия) достигает около 13 000 т/год [9].

Эта технология готова к реализации для любых типов энергетических котлов, пылеугольных горелок и углей.

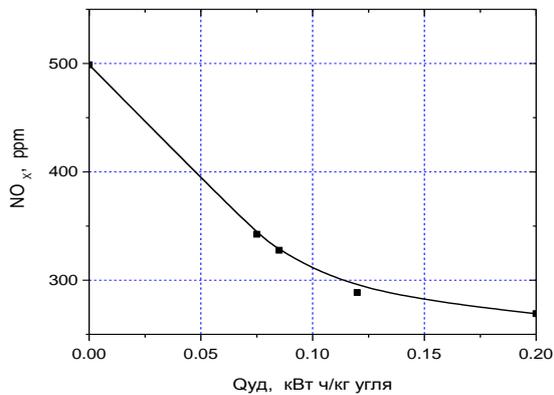


Рис. 4. Снижение концентрации NO_x при плазменной стабилизации горения пылеугольного факела с ростом удельных энергозатрат (Q_{уд}) на процесс.

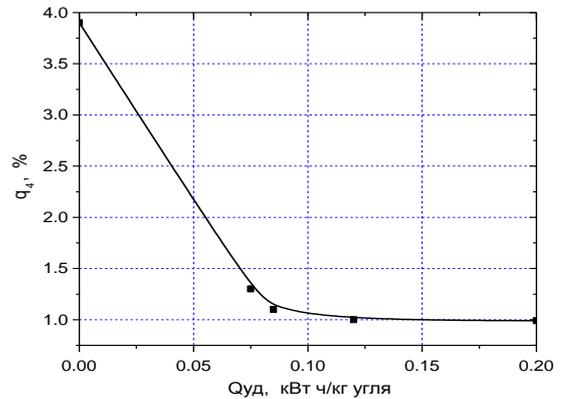


Рис. 5. Снижение мехнедожога топлива (q₄) при плазменной стабилизации горения пылеугольного факела с ростом удельных энергозатрат (Q_{уд}) на процесс.

Для обеспечения жидкого шлакоудаления в топках с жидким шлакоудалением создана плазменная технология безмазутной стабилизации выхода жидкого шлака, основанная на электротермохимической подготовке топлива к сжиганию. Для реализации этой технологии разработана надподовая ПТС, взамен мазутных надподовых форсунок. Схема установки на котле и конструкция надподовых ПТС показаны на рис. 6.

Испытания были проведены на котле БКЗ – 640 Гусиноозерской ГРЭС при паровой нагрузке котла 450 т/ч, т.е. 70 % от номинальной паропроизводительности. Мощность плазмотрона 70 кВт, расход угля через плазменно–угольную горелку 3,7 т/ч. Температура факела на выходе плазменно–угольной горелки достигала 1300⁰С, а температура жидкого шлака повысилась на 70 – 80⁰С, что обеспечило стабильную эвакуацию шлака в топке с жидким шлакоудалением.

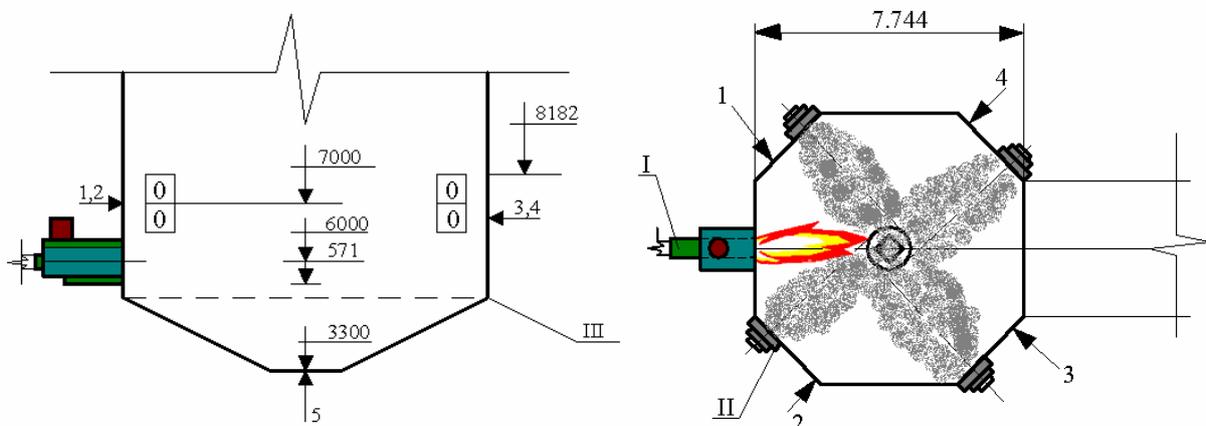


Рис. 6. Схема плазменной стабилизации выхода жидкого шлака в топках с жидким шлакоудалением с использованием надподовых ПТС: I – надподовая ПТС; II – основная пылеугольная горелка; III – линия пода котла.

Таким образом, можно заключить, что надподовые плазменно–угольные горелки стабилизируют выход жидкого шлака в безмазутном режиме работы и готовы к практическому использованию на пылеугольных котлах с жидким шлакоудалением. В объединенной энергосистеме Сибири (ОЭС «Сибирьэнерго») таких котлов более 50 (по состоянию на 2007 г).

Разработана технология плазменной паро-воздушной газификации углей для получения энергетического газа и комбинированный плазменный газификатор для ее осуществления (рис. 7). Эта технология предназначена для решения проблемы безмазутной растопки котла, подсветки пылеугольного факела, стабилизации выхода жидкого шлака в топках с жидким шлакоудалением, снижения выбросов оксидов азота и оксидов серы (при добавке в исходный уголь доломита) и расширения гаммы сортов сжигаемых в одном и том же котле углей без снижения его технико–экономических и экологических показателей. На рис. 7 представлен комбинированный плазменный газификатор, используемый в качестве предтопка для повышения реакционной способности энергетических углей и экологических показателей пылеугольных котлов. На котле БКЗ – 640 (ст. № 1) Гусиноозерской ГРЭС паропроизводительностью 640 т/ч был установлен комбинированный плазменный газификатор с двумя плазменными ступенями. Производительность газификатора по углю составила 32 т/ч. Газ имеет следующий состав [об.%]: $\text{CO}=17,4$; $\text{H}_2=8,7$; $\text{CH}_4=1,5$; $\text{CO}_2=4,7$; $\text{N}_2=67,5$; $\text{NO}_x=40$ – 60 мг/нм^3 ; $\text{SO}_x=100$ – 150 мг/нм^3 .

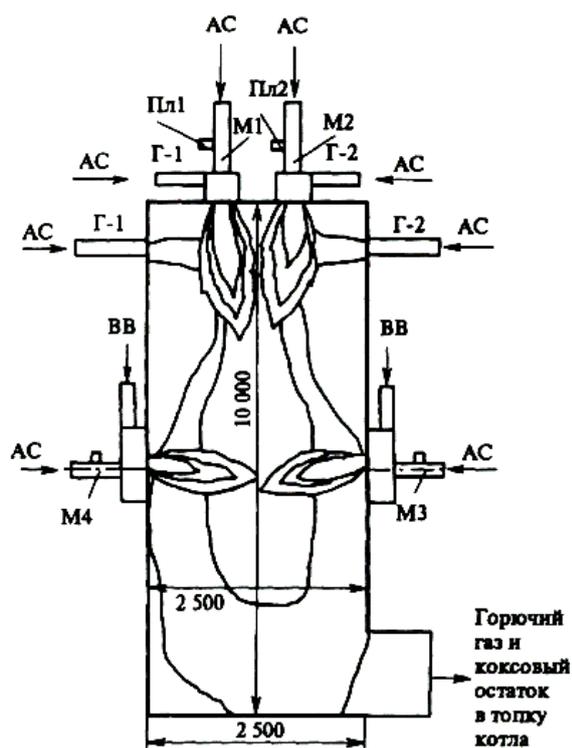


Рис. 7 Схема комбинированного промышленного газификатора: АС – аэросмесь, ВВ – вторичный воздух, Пл – плазмотрон, М – муфелизированная ПТС, Г – пылеугольная горелка.

На рис. 8 представлена пилотная установка для осуществления технологии плазменной газификации и комплексной переработки углей для получения синтез–газа ($\text{CO}+\text{H}_2$), водорода (H_2) и ценных компонентов из минеральной массы углей, ориентированной на перспективу развития нескольких отраслей промышленности (теплоэнергетики, химической промышленности, металлургии). С экологической точки зрения эта технология – наиболее перспективны. Ее суть состоит в нагревании угольной пыли электродуговой плазмой, являющейся окислителем, до температуры полной газификации, при которой органическая масса угля превращается в экологически чистое топливо – синтез-газ, свободный от частиц золы, оксидов азота и серы. Одновременно происходит восстановление оксидов минеральной массы угля и образование ценных компонентов, таких как технический кремний, ферросилиций, алюминий и карбосилиций, а также микроэлементы редких металлов: уран, молибден, ванадий и др.

Результаты предварительных испытаний газификатора показали, что при токе 1500А и напряжении на дуге 470 В была достигнута мощность плазменного

газификатора 705кВт. При этом термический КПД плазменного газификатора составил 61%, а полезная выделенная мощность соответственно 430кВт.

После прогрева реактора в течение 30 минут в реакционную зону была подана рабочая смесь, состоящая из угольной пыли, расход которой составил 150кг/ч, и водяного пара при температуре 493К, с расходом 75 кг/ч. Присосы воздуха оказались порядка 30 кг/ч. Замер износа графитового стержневого электрода показал, что его расход составил 0.4 кг/ч.

В процессе плазменной паровой газификации Холбольджинского бурого угля (зольность - 22%, низшая теплота сгорания - 18400 кДж/кг, выход летучих - 44%) были отобраны пробы газа из камеры отвода продуктов газификации и после эксперимента пробы конденсированной фазы во всех узлах установки [18]. Получен синтез-газ, состоящий в основном из CO (41.5%) и H₂ (48.7%). Найдены примеси CO₂ (0.4%), CH₄ (1.4%) и N₂ (8%). В результате рентгенофазового анализа проб твердого остатка определена степень газификации углерода угля, составившая 81%. Полученные результаты позволяют использовать плазменные технологии паровой газификации и комплексной переработки угля для создания пилотной плазменной установки по производству высококалорийного экологически чистого синтез – газа, водорода и ценных компонентов минеральной массы угля (ферросилиций, карбосилиций, технический кремний и др.). При этом основная доля водорода образуется при разложении водяного пара углем, что является весьма перспективным для использования плазменно-паровой газификации в водородной энергетике.

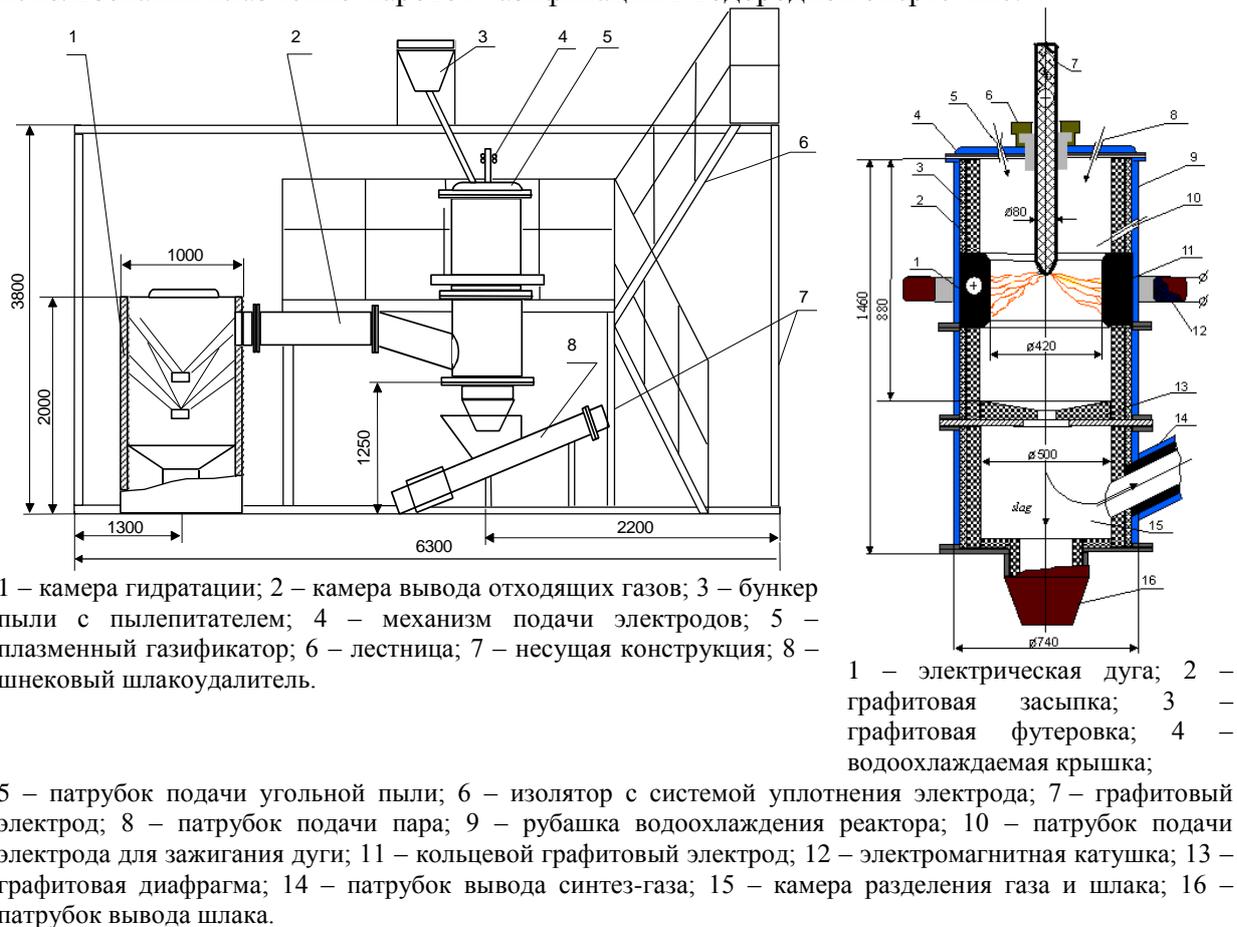


Рис. 8. Пилотная установка для газификации углей с совмещенным плазменным реактором постоянного тока мощностью 1 МВт.

Одним из новых методов получения активных и дешевых сорбентов является плазменная технология переработки энергетических углей в сорбенты (рис. 9). Проведены испытания технологии получения углеродных сорбентов из тугнуйского угля с применением плазменной термохимической подготовки. Полученный сорбент прошел предварительные испытания, которые подтвердили принципиальную возможность его производства по этой технологии. На этой основе совместно с ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского была разработана технологическая схема получения углеродных сорбентов, в которой используются в различных участках технологической цепи три камеры термохимподготовки топлива (ТХПТ) с плазмотронами. В соответствии с полученными экспериментальными данными и выполненными численными исследованиями по компьютерной программе «Плазма–уголь» [4] была разработана опытно–промышленная установка с тремя плазменными ступенями для производства углеродных сорбентов из низкосортных углей производительностью 500 кг сорбента в час [5].

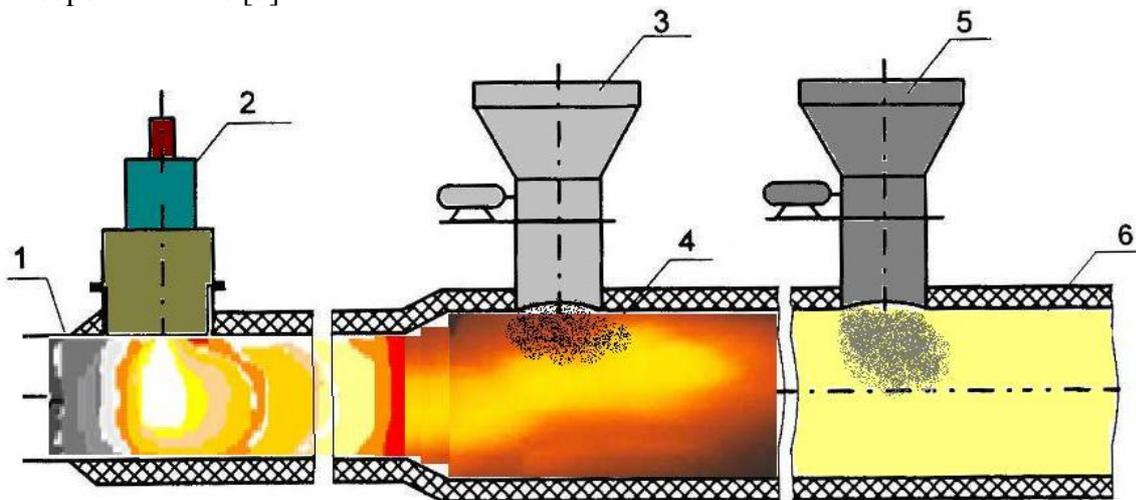


Рис. 9. Схема плазменной установки для переработки энергетических углей в углеродные сорбенты: 1 – ПТС; 2 – плазмотрон; 3 – бункер угольной пыли; 4 – камера ТХПТ; 5 – бункер угольной дробленки, 6 – камера ТХПТ угольной дробленки.

Ачинский глиноземный комбинат имеет 11 вращающихся печей диаметром 5 м и длиной 185 м. Производительность печи по сухому глинозему составляет 102 т/ч. Тепловая мощность печи – 108 МВт. Общий расход мазута на 1 печь – 17700 т/год. Для замещения мазута углем и повышения эколого–экономических показателей была разработана плазменная технология безмазутного воспламенения и стабилизации горения угольной пыли в наклонных вращающихся печах. Согласно этой технологии постоянно работающая в печи мазутная форсунка (рис.10, слева), с расходом мазута 2 т/ч, заменяется на ПТС с расходом угля 3 т/ч (рис.10, справа). Эта технология без существенных изменений может применяться и для безмазутного обжига клинкера для получения цемента.

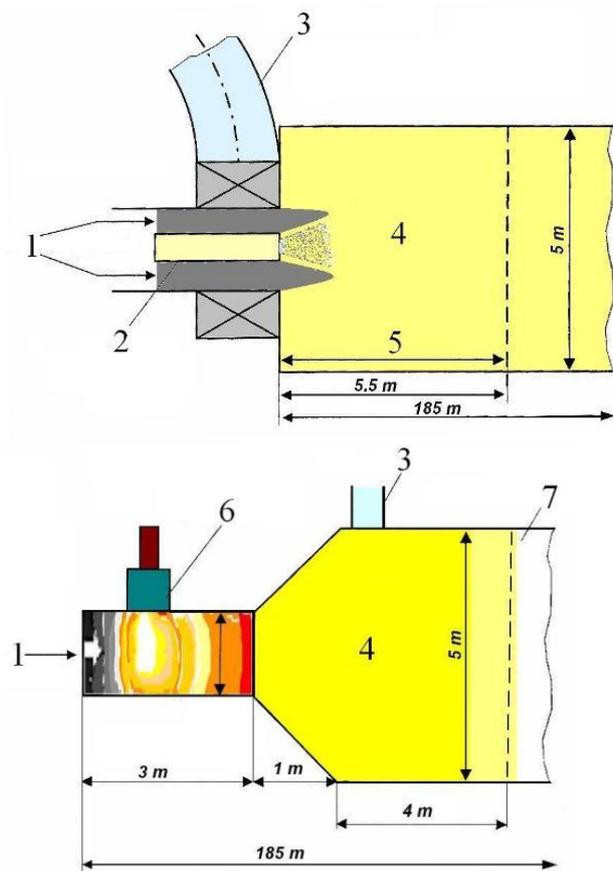


Рис. 10. Схема воспламенения аэросмеси в существующей обжиговой печи (слева) и с использованием ПТС (справа): 1 – аэросмесь; 2 – мазутная форсунка; 3 – вторичный воздух; 4 – вращающаяся обжиговая печь; 5 – зона горения; 6 – ПТС с 3 плазмотронами, расположенными под углом 120° ; 7 – конец зоны горения.

При современных ценах на мазут и уголь экономический эффект от внедрения плазменной технологии на 1 печи Ачинского глиноземного комбината составляет более 30 млн.руб/год, а в целом для комбината более 330 млн.руб/год.

При увеличении глубины переработки нефти на нефтеперерабатывающих заводах (НПЗ) России возрастает выход светлых нефтепродуктов, снижается выход топочного мазута и увеличивается масса тяжело утилизируемых отходов глубокой переработки нефти (ОГПН). На существующих НПЗ выход ОГПН (в зависимости от качества нефти) может составлять от 4 до 6%. Например, на крупнейшем в Европе НПЗ АО «Нафтохим» (г. Бургас, Болгария) выход ОГПН достигает 180000 т/год при переработке 12 млн. тонн сырой нефти в год.

Традиционная технология утилизации ОГПН предполагает их сжигание в специальных вращающихся газовых печах. При этом степень конверсии ОГПН не превышает 30–40 %, а удельные энергозатраты достигают 100–120 кВт ч/т утилизируемых ОГПН. Для повышения эффективности процесса утилизации ОГПН разработана и испытана плазменная технология утилизации ОГПН, основанная на предварительной плазменной термохимической подготовке ОГПН к сжиганию в специальной камере. При производительности плазменной установки 1 т/ч (рис. 11) опытные удельные энергозатраты составили 33 кВт ч/т, что в 3-4 раза ниже существующих.

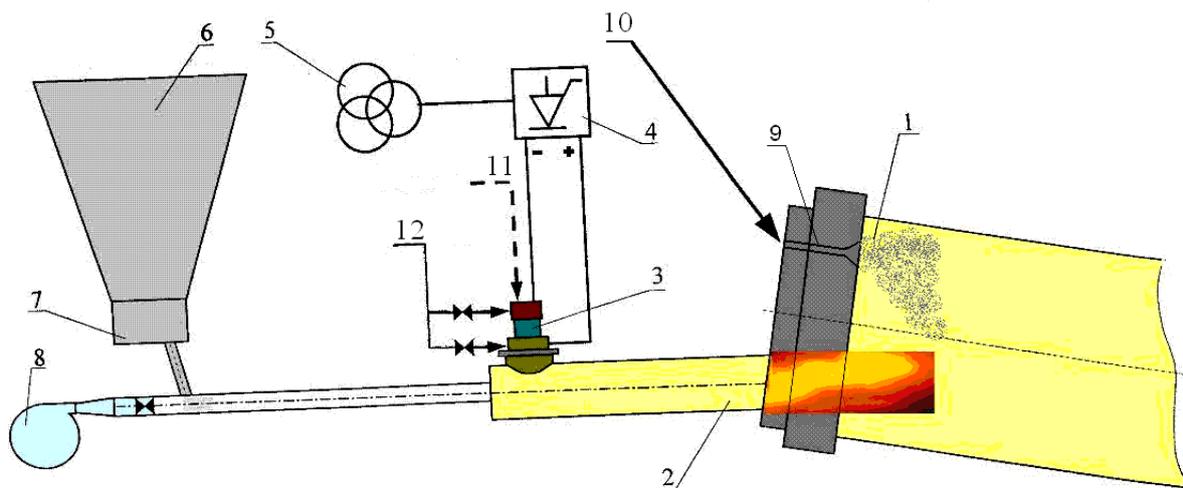


Рис. 11 Схема установки для сжигания остатков глубокой переработки нефти с использованием ПТС: 1 – вращающаяся печь; 2 – ПТС; 3 – плазмотрон; 4, 5 – источник электропитания плазмотрона; 6 – бункер угольной пыли; 7 – пылепитатель; 8 – вентилятор; 9 – форсунка подачи ОГПН; 10 – подогретые ОГПН; 11 – охлаждающая вода; 12 – сжатый воздух.

При этом экономический эффект для НПЗ АО «Нафтохим» (г.Бургас) при утилизации 90000 т ОГПН в год с использованием технологий ПТХП, по сравнению с обычными вращающимися газовыми печами, составляет около 1 млн.\$/год или 10 \$ на 1 т утилизируемых ОГПН.

На одну вращающуюся печь для утилизации ОГПН необходимо устанавливать две ПТС. Срок окупаемости плазменного оборудования при утилизации ОГПН на НПЗ не превышает 4 месяцев. Время изготовления одного производственного модуля с двумя ПТС (производительностью 12 т/ч по утилизируемым ОГПН) составляет 6–8 месяцев, включая его проектирование. Подготовлено коммерческое предложение по использованию ПТС для утилизации ОГПН на НПЗ России и Болгарии.

В настоящее время для сушки и обжига кирпичей в качестве теплоносителей используются газ или уголь. Несмотря на очевидную простоту и удобство применения газа в условиях Бурятии эта технология непригодна из-за его отсутствия. На проектируемом в г. Улан-Удэ заводе по производству кирпичей предполагается использовать угольное топливо, подаваемое через верхние лючки печи. При таком методе обжига весьма трудно обеспечить равномерное и однородное распределение температуры по сечению и объему сушильной и обжиговой секции. Большая неравномерность температуры может приводить к увеличению выхода бракованных и некондиционных кирпичей.

Для получения более равномерного распределения температуры и потока горячего воздуха в объеме печи предлагается технология, основанная на применении плазменно-энергетических технологий топливоиспользования.

Традиционно кирпич обжигают в специальных печах (кольцевых и туннельных) продуктами сгорания природного газа. Горячий газ можно получать сжиганием угля в плазменно-циклонной камере (рис. 12). В циклонную камеру тангенциально через ПТС подается двухкомпонентное высокорекреакционное топливо, получаемое в процессе ТХПТ. В процессе его горения в циклонной камере под действием центробежных сил жидкий шлак, образовавшийся от горения угля, отбрасывается к стенкам циклона и стекает вниз в шлакоприемник. Горячий газ с температурой 1000÷1200 К по центральной трубе при помощи дымососа направляется в общий коллектор. Из

коллектора горячий газ распределяется по секциям печи для обжига кирпича. Расчетная удельная объемная теплонапряженность плазменно-циклонной камеры составляет $3\div 4 \text{ МВт/м}^3$.

По этой технологии розжиг пылеугольного потока производится при помощи особых свойств низкотемпературной плазмы ($T=2500\div 3500 \text{ К}$), генерируемой плазмотроном постоянного тока линейной схемы.

Пылеугольный поток подается от пылепитателя на муфельную горелку, на которой установлен плазмотрон. При взаимодействии пылеугольного потока с факелом плазмотрона (низкотемпературной плазмой) частицы угля подвергаются электротермохимической подготовке и воспламеняются. Из горелки вытекает поток нагретого до $T=1100\text{--}1200 \text{ К}$ газа.

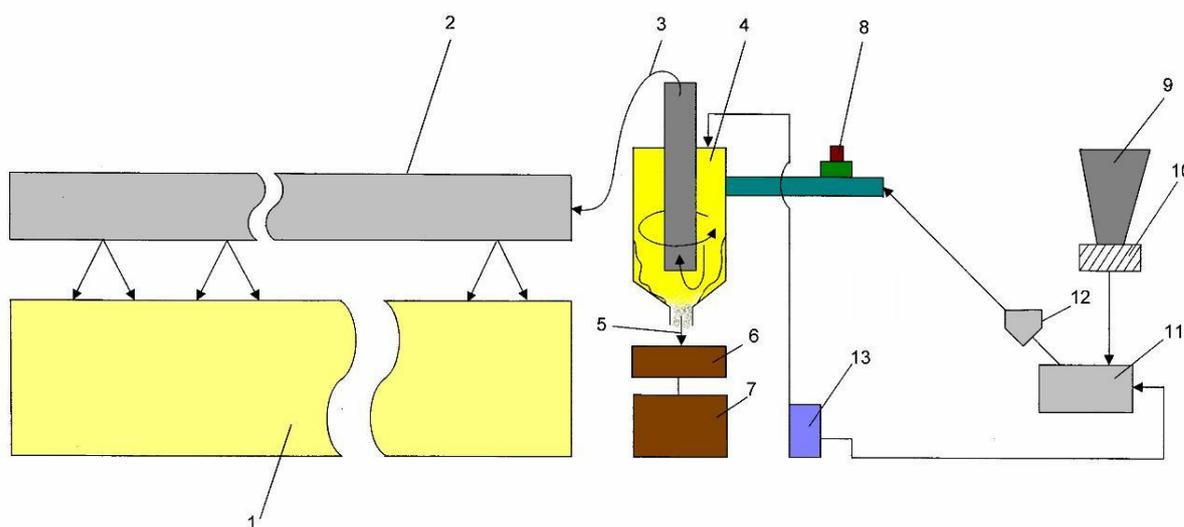


Рис. 12. Схема обжига кирпича на кольцевой печи с плазменно-циклонным принципом сжигания топлива: 1 - кольцевая печь; 2 - футерованный короб подачи горячих газов; 3 - горячие газы; 4 - циклонная топка; 5 - жидкий шлак; 6 - доработка шлака; 7 - утилизатор шлака; 8 - плазмотрон; 9 - бункер сырого угля; 10 - питатель угля; 11 - мельница; 12 - сепаратор пыли; 13 - дутьевой вентилятор.

Технико-экономическая оценка эффективности сушки и обжига кирпича в кольцевой печи с плазменно-циклонной камерой показала, что при производительности печи 20 млн. штук кирпича в год экономический эффект составляет около 2 млн.руб/год с одновременным двухкратным снижением вредных газов в атмосферу. В настоящее время опытно-промышленная установка с плазменно-циклонной камерой для расхода угля 800 кг/ч готовится к запуску в Отраслевом Центре Плазменно-Энергетических Технологий.

Представленные плазменные технологии обеспечивают энергетически эффективное и экологически приемлемое использование твердых топлив в базовых отраслях промышленности.

Список литературы

- [1]. Карпенко Е.И., Лукьященко В.Г., Мессерле В.Е., А.Б. Устименко, А.В. Яковенко. Новые технологии топливоиспользования и переработки минерального сырья. // Горение и плазмохимия, Том 2, №2, 2004, С. 117-146
- [2]. Karpenko E.I. Messerle V.E., Ustimenko A.B. New Plasma Technologies for Fuels Utilization. // Proceedings of the 3rd International Workshop and Exhibition on Plasma Assisted Combustion (IWEPAC), September 18-21, 2007, Falls Church, USA, P.83-85

[3]. Карпенко Е.И., Мессерле В.Е., Перегудов В.С. Способ плазменного воспламенения пылеугольного топлива (варианты) и плазменная пылеугольная горелка (варианты). // Патент Российской Федерации №2210032 от 10.08.03 Бюллетень Изобретений 22, Приоритет 28.12.2000.

[4]. Gorokhovski M., Karpenko E.I., Lockwood F.C., Messerle V.E., Trusov B.G., Ustimenko A.B. Plasma Technologies for Solid Fuels: Experiment and Theory. // Journal of the Energy Institute. 2005. V. 78. N 4. P. 157-171.

[5]. Блохин А.И., Бычков А.М., Карпенко Е.И., Кенеман Ф.Е., Стельмах Г.П., Мессерле В.Е. Энерготехнологическое производство углеродных сорбентов на ТЭС с применением плазмотронов. // Новое в российской электроэнергетике. 2002. № 9.

[6]. Карпенко Е.И., Жуков М.Ф., Мессерле В.Е. и др. Научно-технические основы и опыт эксплуатации плазменных систем воспламенения углей на ТЭС (безмазутная растопка котлов и стабилизация горения пылеугольного факела). – Новосибирск: Наука, 1998. – 137 с.

[7]. Карпенко Е.И., Мессерле В.Е., Чурашев В.Н. и др. Эколого-экономическая эффективность плазменных технологий переработки твердых топлив. – Новосибирск: Наука, 2000. – 159 с.

[8]. Сертификаты оценки стоимости интеллектуальной собственности ЗАО «ОЦ ПЭТ» РАО «ЕЭС России». Регистрационные номера 325, 326, 327 от 21.06.99. – Международный институт промышленной собственности. – М.: 1999. – 39 с.

[9]. Karpenko E.I., Messerle V.E., Ustimenko A.B. Plasma-Fuel Systems for Enhancement Coal Gasification and Combustion / Abstracts of Work-in-Progress Poster Presentations of 30th International Symposium on Combustion // University of Illinois at Chicago, July 25-30, 2004.-5F4-03;-P.423.