

УДК 622.61,537.533

П.М. КАНИЛО¹, Д.М. ВАВРИВ², К. ШУНЕМАН², В.В. СОЛОВЕЙ¹, В.Е. КОСТЮК³, К.В. КОСТЕНКО¹¹ *Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков*² *Радиоастрономический институт НАН Украины, Харьков*³ *Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СЖИГАНИЯ НИЗКОРЕАКЦИОННЫХ УГЛЕЙ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ БЕЗ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАЗУТА ИЛИ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Проанализированы топливно-экологические проблемы Украины при традиционном факельном сжигании низкорекреационных углей в котлоагрегатах тепловых электростанций. Рассмотрены более эффективные технологии сжигания: с термохимической подготовкой части пылеугольновоздушной смеси продуктами сжигания природного газа, с применением электродуговых и СВЧ-плазмотронов, а также в кипящем слое. Обоснована, в качестве альтернативной, водородно-кислородная технология сжигания низкосортных углей, обеспечивающая повышение топливной экономичности и ресурса энергетических блоков.

низкорекреационные угли, термохимическая подготовка, плазменная обработка, сжигание в кипящем слое, водородно-кислородная технология сжигания

Введение

Мировое производство электроэнергии в 2000 г. составило примерно 15000 млрд. кВт·ч (в том числе на угле – 5390, на газе – 2540, на нефтепродуктах – 1350), при этом затраты энергоносителей составили 5200 млн. т у.т. (в том числе углей – 1980, газа – 910, нефтепродуктов – 470) [1]. Дальнейшие перспективы развития тепловой энергетики в разных странах связывают в основном с использованием на ТЭС угля, запасы которого весьма велики [2]. Поэтому уголь в настоящее время приобретает ключевое значение в формировании топливно-энергетического баланса Украины, поскольку является единственным отечественным топливом, добыча которого может полностью удовлетворить запросы теплоэнергетики.

Формулирование проблемы. По оценкам Минуглепрома Украины отечественных балансовых запасов углей, при годовом объеме добычи 100 млн.т, хватит на 500 лет. В тоже время качество углей, поступающих на ТЭС и ТЭЦ, значительно ухудши-

лось: зольность, например, углей типа антрацитовый штыб (АШ), возросла с 20% до 30...40%, выход летучих не превышает 6%, а низшая теплота сгорания понизилась от проектных значений 24...25 МДж/кг до 17...20 МДж/кг. Поэтому, при традиционном факельном сжигании таких углей в котлоагрегате, устойчивое воспламенение и горение угольной пыли, а также нормальное шлакоудаление возможны только в условиях мазутной или газовой подсветки факела, доля которых по теплу достигает 30...40%, а годовое использование для этих целей газа и мазута на ТЭС Украины составляет 4...5 млн. т у.т. Кроме того, при таком совместном сжигании ухудшается выгорание антрацита, так как кислород поглощается более реакционными мазутом или газом, а доля углерода при уносе возрастает на 20...25% [3]. При совместном сжигании углей с мазутом возрастают также выбросы с дымовыми газами: оксидов азота (NO_x), примерно на 40...50%, оксидов серы и ванадия, канцерогенных углеводородов.

Тепловые электрические станции, работающие на низкосортных углях типа АШ, являются в на-

стоящее время базовыми для энергетической отрасли Украины, поскольку любое иное топливо, используемое для производства электроэнергии (мазут, природный газ, уран) – это импортируемые топлива, что ставит отечественную энергетику в зависимость от его поставщиков. Поэтому обостряющийся дефицит мазута и природного газа, а также резкое повышение их стоимости требуют разработки и внедрения новых высокоэффективных технологий сжигания низкореакционных углей при существенном снижении потребления мазута и природного газа или, что более актуально, без их использования.

Задачами данного исследования являются анализ проблем, имеющих место при традиционном факельном сжигании низкореакционных углей в котлоагрегатах тепловых электростанций, и обоснование более эффективных технологий сжигания таких углей.

Решение проблемы

Термохимическая подготовка части пылеугольновоздушной смеси продуктами сжигания природного газа. Одной из менее затратных технологий является предварительная термохимическая подготовка (ТХП) угля, смысл которой заключается в высокоскоростном ($10^4 \dots 10^5 \text{C/c}$) нагреве угольной пыли (всей или части) высокотемпературными продуктами сгорания природного газа или мазута. В результате ТХП угольной пыли образуется высокотемпературная двухфазная смесь, которая состоит из летучих, газообразных продуктов частичной газификации, продуктов сгорания и коксового остатка с характеристиками сильно отличающимися от характеристик исходного топлива. Этот процесс может быть как одноступенчатым [2], так и многоступенчатым [4], являющимся более эффективным, в том числе обеспечивающим дополнительное снижение потребления мазута или природного газа. Ука-

занная технология реализуется, как правило, в модернизированном стандартном горелочном устройстве и не требует значительных изменений в транспортных магистралях и конструкций котлоагрегата. В центральной трубе штатной горелки (по которой обычно в котел подается высокореакционное топливо, например природный газ) размещается устройство ТХП всей или части пылеугольновоздушной смеси продуктами сгорания природного газа с последующим зажиганием полученным высокотемпературным двухфазным топливом основной массы угольной пыли поступающей в котел. Горючие газы при ТХП образуются за счет выхода летучих и частичной газификации углерода угольной пыли. Например, в качестве основной одноступенчатой горелки была применена разработанная во ВТИ турбулентная пылегазовая горелка мощностью 35 МВт со встроенной системой предварительной термообработки угольной пыли продуктами сгорания природного газа (см. рис. 1, [2]). Температура разогрева пылегазового потока на выходе из горелки составляла при этом около 1100 К. Использование такой комбинированной горелки обеспечило также снижение уровней выбросов с дымовыми газами NO_x примерно в два раза.

Однако, несмотря на то, что при газовой ТХП угольной пыли, в сравнении с традиционной подачей газа в котел, расходы природного газа снижаются, это не решает полностью экономических проблем газового импорта в Украину. Поэтому в ближайшем будущем для энергетики Украины необходима разработка и внедрение альтернативных технологий сжигания низкосортных углей без применения мазута или природного газа, в том числе с использованием электроэнергии для ТХП высокозольной низкореакционной угольной пыли.

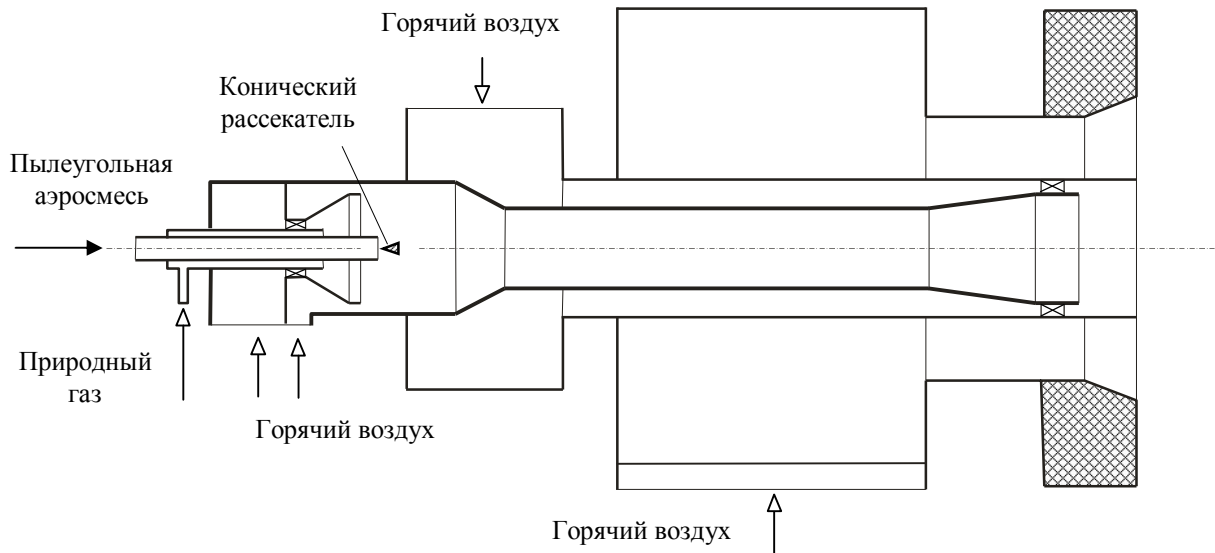


Рис. 1. Схема комбинированной пылегазовой горелки с ТХП угольной пыли

Технологии сжигания угля в кипящем слое. Достаточно эффективное сжигание низкосортных углей с зольностью до 40% и более, в том числе при более низких уровнях выбросов с дымовыми газами оксидов азота и серы, может обеспечиваться в различных модификациях технологий кипящего слоя: сжигание углей в атмосферном пузырьковом кипящем слое; в атмосферном циркулирующем кипящем слое; в кипящем слое под давлением [5]. Основным недостатком энергетических установок с циркулирующим кипящим слоем – их промышленное внедрение требует предельно больших капитальных

затрат, достигающих до 1100\$ на 1 кВт установленной мощности.

ТХП угольной пыли с применением электродуговых плазмотронов. К настоящему времени уже накоплен определенный опыт использования электроэнергии с применением дуговых плазмотронов для ТХП высокосольной угольной пыли при безмазутном розжиге пылеугольных котлоагрегатов [6]. Одна из схем комбинированной горелки с воздушно-плазменной ТХП части угольной пыли в первой ступени приведена на рис. 2. [6].

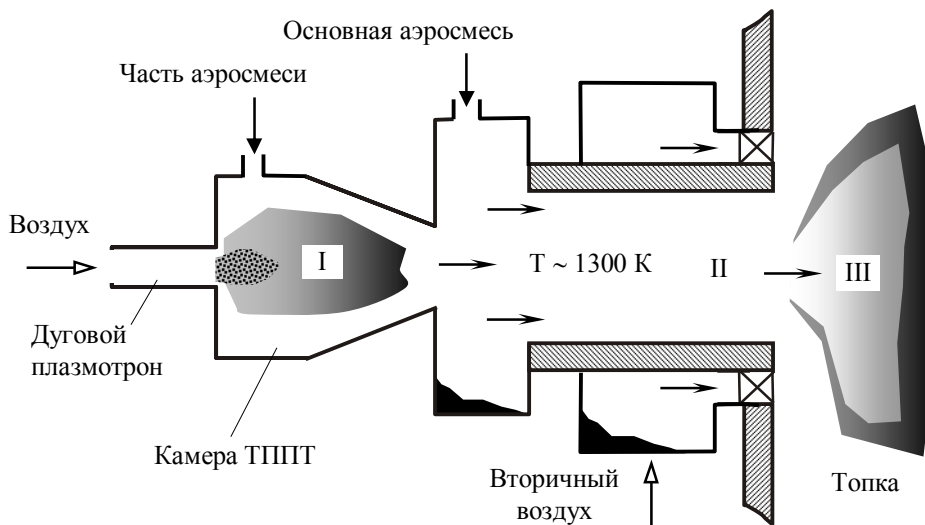


Рис. 2. Схема комбинированной вихревой горелки с дуговым плазмотроном

Сущность этого метода заключается в разделении пылеугольного потока на две части, одна из которых нагревается воздухом, прошедшим через электродуговую плазму, до температуры практически полного выделения летучих угля и частичной газификации коксового остатка. Таким образом, из части аэросмеси (уголь + воздух) получают двухкомпонентное топливо (горючий газ + коксовый остаток), способное воспламенять оставшийся поток аэросмеси и стабилизировать горение в котле. При этом, для большинства котлоагрегатов с горизонтальными вихревыми горелками имеется возможность их малозатратной модернизации с заменой газомазутных форсунок воздушно-плазменными устройствами для ТХП части пылеугольной аэросмеси. К недостаткам таких технологий можно отнести: неэффективное использование низкотемпературной воздушной плазмы, т.к. через дуговую плазму не транспортируется угольная пыль, а только воздух, а также – низкая эксплуатационная надежность работы дуговых плазмотронов.

ТХП угольной пыли с применением СВЧ-плазмотронов. Вместе с тем, на пути непосредственного использования электроэнергии для ТХП низкосортных углей перспективным представляется применение в модернизированных горелках СВЧ-плазмотронов. Такие плазмотроны легко генерируют плазму без электродов практически в любом месте потока пылеугольновоздушной смеси, например, в зоне «стартового факела» горелки. Возможное использование СВЧ-генераторов, питающих плазмотроны, в импульсном или пульсирующем режимах со значительным снижением потребляемой мощности. Применение СВЧ-плазмы дает целый ряд дополнительных преимуществ: высокая температура и большая концентрация энергии в единице объема пылеугольной аэросмеси, значительное количество возбужденных частиц (атомов, радикалов, ионов, электронов), простота автоматизации управления процессом в силу невысокой инерционности

плазмы. Благодаря высокой температуре плазмы попадающие в нее частицы угольной пыли испытывают тепловой удар и дробятся, в результате чего увеличивается поверхность взаимодействия топлива с окислителем и интенсифицируются химические реакции. В условиях высоких температур в зоне СВЧ-плазменной ТХП угольной пыли происходит резкое увеличение парогазовых продуктов. Оставшийся полукокс, содержащий 50...70% органической массы исходного угля, имеет более пористую структуру, чем исходный уголь, и горит активнее. Поэтому важно было изучить особенности взаимодействия угольной пыли с СВЧ-плазмой и определить энергетические характеристики СВЧ-плазменной ступени ТХП угольной пыли.

Для проведения этих исследований в Институте проблем машиностроения (ИПМаш) НАН Украины совместно с Радиоастрономическим институтом (РИ) НАН Украины и Харьковским центральным конструкторским бюро (ХЦКБ) «Энергопрогресс» был создан испытательный комплекс (рис. 3), проведены численные (с участием Национального аэрокосмического университета «ХАИ») и экспериментальные исследования энергетических и экологохимических показателей СВЧ-плазменного реактора с ТХП пылеугольновоздушной смеси [7 – 9].

В верхней части реактора расположен коаксиальный СВЧ-плазмотрон. Внутренний проводник коаксиального волновода выполнен в виде трубы, по которой поступает первичный воздух с угольной пылью. СВЧ-энергия и вторичный воздух подаются между внутренним и внешним проводниками коаксиального волновода. В качестве СВЧ-генератора используется промышленная установка на магнетроне непрерывного действия с максимальной мощностью 5 кВт. Энергия от генератора поступает в плазмотрон через циркулятор и прямоугольный волновод. Плазменный факел возбуждается при наличии потока пылеугольновоздушной смеси в плазмотроне. За зоной СВЧ-плазменного факела («стар-

тового факела»), а также в нижней части реактора расположены системы отбора продуктов ТХП угольной пыли для газового анализа, а также – сис-

темы отбора твердых частиц с последующей оценкой их структуры и элементного состава.

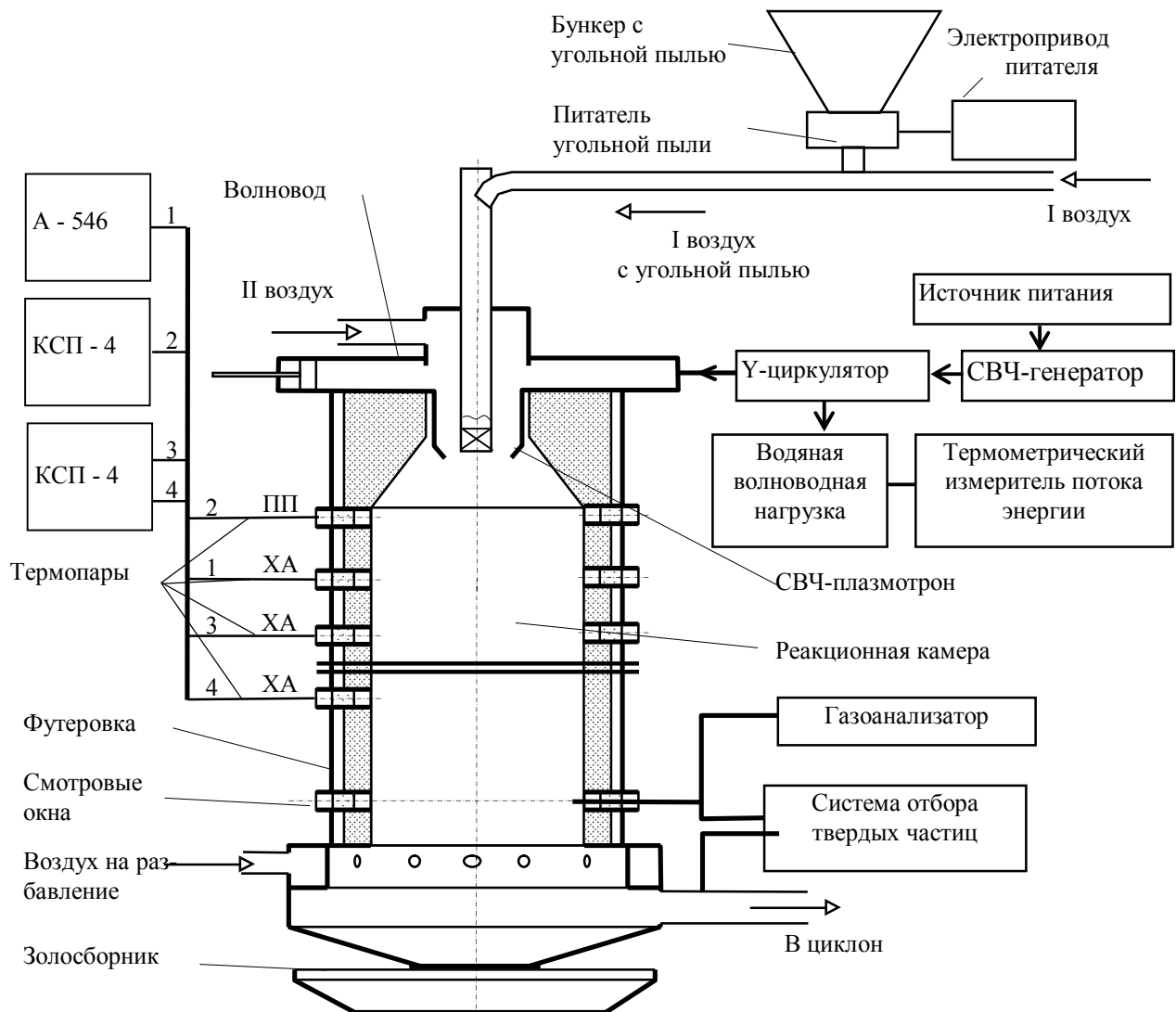


Рис. 3. Схема стэнда с СВЧ-плазмохимическим реактором

На рис. 4 представлен снимок СВЧ-плазмо-пылеугольновоздушного факела с закруткой аэро-смеси на выходе из плазмотрона. На выходе из плазмотрона происходит расслоение разряда на множество плазменных шнуров, которые прецессируют вокруг оси. Это явление может быть связано с развитием температурной неоднородности факела.

Угольные частицы в СВЧ-плазме, термодинамическая температура которой достигает ~ 5000 К, претерпевают тепловой удар, в результате которого

частицы дробятся на десятки мелких осколков, а минеральные составляющие при этом отслаиваются (рис. 5), что приводит к увеличению реакционной способности топлива.

Тепловой взрыв пылеугольных частиц многократно ускоряет выход летучих за счет более развитой поверхности реагирования и появления очень мелких частиц, которые нагреваются до температуры выделения летучих гораздо быстрее, чем крупные частицы. Далее, на стадии газозафазных реакций,

заметно интенсифицирующее воздействие термоэлектрической составляющей СВЧ-плазмы, проявляющееся в ускорении химических превращений за счет перехода к реакциям (с электронами и ионами) с более низкими значениями энергии активации. Например, при переходе от молекулярных к атомарным формам кислорода указанный параметр снижается на порядок и более.

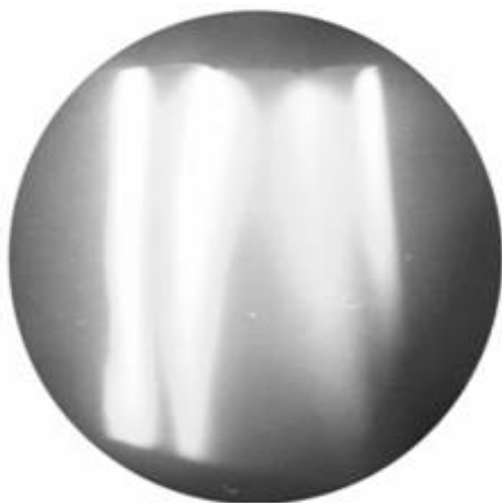
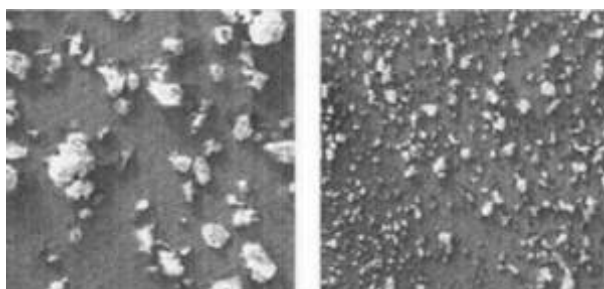


Рис. 4. СВЧ-разряд в закрученном потоке пылеугольной аэросмеси



а

б

Рис. 5. Частицы угольной пыли отобранные из потока за зоной СВЧ-плазмы: а – при отсутствии СВЧ-плазмы; б – при наличии СВЧ-плазмы (снимки получены на растровом электронном микроскопе)

Результаты исследований экспериментальной установки:

- СВЧ-разряд образуется непосредственно в потоке пылеугольновоздушной смеси на выходе из плазмотрона;
- устойчивое воспламенение аэросмеси обес-

печивается как на «холодном» (15 °С), так и на предварительно прогретом (100 °С) воздухе;

- выделившиеся летучие и продукты частичной газификации угля окисляются в первичном и продувочном воздухе, нагревая реагирующий поток пылеугольных частиц;

- при коэффициенте избытка первичного воздуха $\alpha_1 \approx 0,16$ степень конверсии углерода по массе составлял 15%, а по теплу – 19%;

- на выходе из плазмохимического реактора образуется нагретый до 1100...1300 К двухфазный поток, состоящий в основном из активного коксового остатка, азота, оксида и диоксида углерода, водяного пара, водорода, метана, мелкодисперсной золы и способный, в условиях натуральных вихревых горелок пылеугольных ТЭС, заменить природный газ или мазут при растопке котла и подсветке факела.

В проведенных экспериментах достигнут удельный расход электроэнергии на воспламенение и горение угольной пыли на уровне 0,09 кВт/кг. В условиях реальных промышленных горелок удельные энергозатраты будут значительно ниже из-за использования более высоких температур первичного и вторичного воздуха и более совершенной аэродинамики факела.

При дальнейшей отработке СВЧ-плазменных технологий сжигания углей, в том числе на промышленном образце горелки, особое внимание необходимо обратить на обеспечение:

- стабильной и равномерной подачи угольной пыли к СВЧ-плазменной горелке;

- равномерного и осесимметричного расположения СВЧ-плазмы на выходе из плазмотрона;

- оптимизации газодинамического взаимодействия потока пылеугольновоздушной смеси с плазмой с целью увеличения времени пребывания угольных частиц в объеме плазмы.

Однако, несмотря на указанные преимущества СВЧ-плазменных технологий сжигания низкорреакционных высокозольных углей, следует отметить,

что разработка, создание и внедрение в энергетику мощных СВЧ-плазмотронов, а также систем обеспечения их безопасной работы потребует также больших капитальных затрат и времени. Кроме того, такие плазменные системы не смогут обеспечить безманевренный цикл работы мощных энергетических установок, т.е. работу ТЭС на наиболее эффективных режимах, в том числе при снижении уровня потребления электроэнергии.

Водородно-кислородная ТХП угольной пыли.

Более перспективным представляется использование части электроэнергии, вырабатываемых на угольных ТЭС, для производства водорода и кислорода (например, путем электролиза воды или водяного пара) с дальнейшим их использованием для ТХП пылевидного топлива перед сжиганием в котлах энергоустановок. Причем, уже имеется опыт применения электролизеров на ТЭС для производства водорода, используемого для охлаждения электрогенераторов. При этом, как показали исследования экспериментальной установки, не только исключается использование природного газа и мазута при выработке электроэнергии или тепла, но существенно возрастает эффективность водородно-кислородной технологии ТХП угольной пыли (из-за уникальных физико-химических свойств водорода и кислорода), а также повышаются: топливная экономичность ТЭС и ТЭЦ (понижается механический недожог топлива) и экологическая безопасность (снижаются, по сравнению с использованием мазута, уровни выбросов с дымовыми газами: углерод – азот – и серосодержащих газообразных вредных веществ, тяжелых металлов, канцерогенных углеводородов). В том числе повышается эксплуатационная экономичность и ресурс энергетических блоков, вследствие их работы на одном наиболее экономичном режиме, причем, независимо от уровня использования электроэнергии или тепла внешними потребителями. Избыточная мощность энергоблока будет использоваться для выработки водорода, излишки

которого будут поступать, например, в существующую газовую магистраль для дальнейшего использования как во внутреннем хозяйстве ТЭС или ТЭЦ, так и для передачи другим потребителям.

Предлагаемая технология предварительной водородно-кислородной ТХП угольной пыли (рис. 6) является многоступенчатой, например 4-х ступенчатой (с целью минимизации расхода водорода), причем на первой ступени устройства ТХП угольной пыли будет производиться термохимическая обработка не более 20% угольной пыли с образованием стартового водородно-кислородно-пылеугольно-воздушного факела с суммарным коэффициентом избытка окислителя $0,2 \leq \alpha < 0,6$ и максимальной температурой смеси на выходе из "стартового факела" на уровне 1550...1600 К. Такой уровень температур необходим для дальнейшей ТХП угольной пыли в следующей ступени устройства. При этом эффективность водородно-кислородной ТХП угольной пыли может быть еще повышена при подаче в «стартовый факел» активированного водорода, например при его пропускании через металлгидридный активатор, и/или при подаче в «стартовый факел» дополнительного более эффективного окислителя, например атомарного кислорода, озона и т.д.

На последующих ступенях устройства будет подводиться (с закруткой потока) пылеугольно-воздушная смесь также обогащенная кислородом, получаемым одновременно с водородом при электролизе воды или водяного пара. На каждой последующей ступени нагрев и ТХП подаваемой части угольной пыли будет осуществляться за счет сгорания летучих и части активного углерода (кокса), подготовленных в предыдущей ступени. Причем, на выходе из устройства ТХП угольной пыли температура подготовленной многокомпонентной горючей смеси должна быть на уровне 1150...1200 К, т.е. должна быть достаточной для дальнейшего эффективного воспламенения и сжигания ее в котлоагрегате, но находиться ниже границы плавления золы.

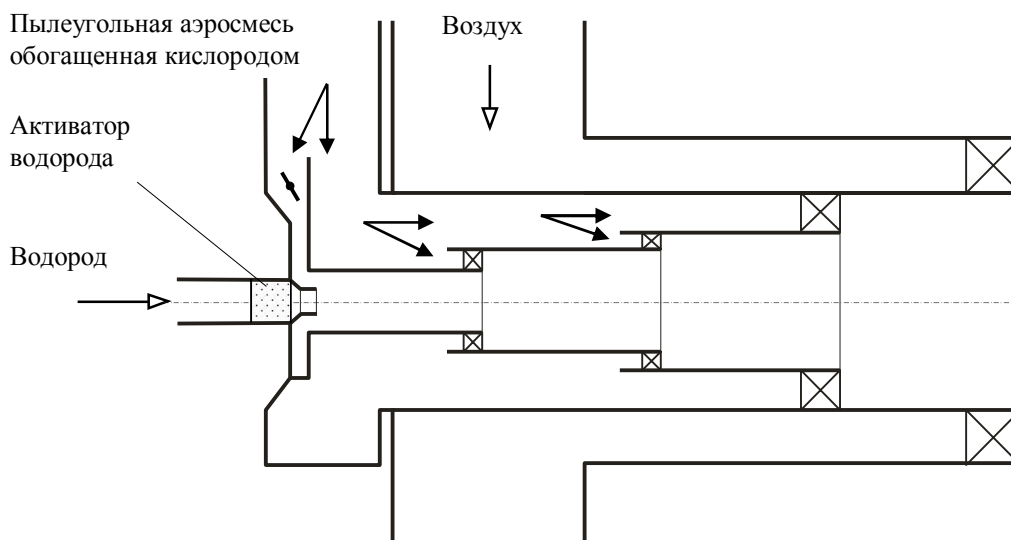


Рис. 6. Схема реактора водородно-кислородной ТХП пылеугольновоздушной смеси

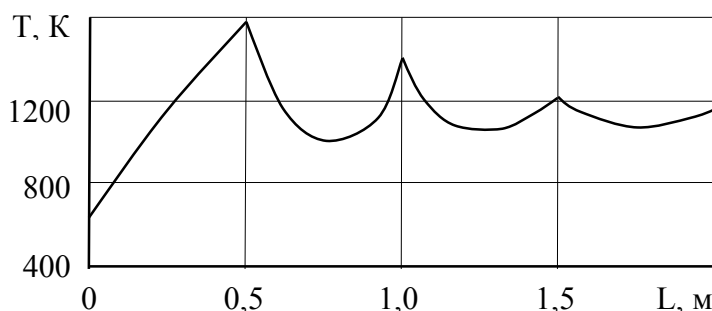


Рис. 7. Изменение температуры вдоль реактора водородно-кислородной ТХП пылеугольновоздушной смеси

Известно, что при ТХП угольной пыли динамика конверсии углерода осуществляется в две стадии: быстрой (конверсия более 50% углерода за время менее 0,2 с) и последующей, более медленной, протекающей в рамках традиционного диффузионно-кинетического механизма. При этом добавки кислорода к пылеугольновоздушной смеси приводят к снижению температуры воспламенения угольной пыли и росту степени конверсии углерода на первой (быстрой) стадии термохимической подготовки [3].

Расчетные уровни распределения температур потока в горелочном устройстве с 4-х ступенчатой водородно-кислородной ТХП угольной пыли представлены (в качестве примера) на рис. 7.

Расчетные данные по стоимости энергии, водимой с водородом и кислородом в виде химической энергии и физического тепла, получаемых по предлагаемой технологии, зависит от себестоимости электроэнергии на ТЭС и колеблется в диапазоне 0,7 ... 0,9 коп./МДж.

Для сравнения стоимость аналогичной единицы энергии в природном газе при цене 100\$ за 1000м³ составляет 1,2 коп./МДж, а при цене 150\$ за 1000м³ – 1,8 коп./МДж.

Заключение

Выполненный анализ топливно-экологических проблем Украины при традиционном факельном сжигании низкорреакционных углей в котлоагрегатах

тепловых электростанций показал необходимость разработки более эффективные технологии их сжигания.

Таковыми технологиями могут быть: ТХП части пылеугольновоздушной смеси продуктами сжигания природного газа, ТХП с применением электродуговых и СВЧ-плазмотронов, а также в кипящем слое. В качестве альтернативной, может быть предложена водородно-кислородная технология сжигания низкосортных углей, обеспечивающая повышение топливной экономичности и ресурса энергетических блоков.

Литература

1. Степанов А.В., Кухарь В.П. Достижения энергетики и защита окружающей среды. – К.: Наук. думка. – 2004. – 207 с.
2. Ольховский Г.Г., Тумановский А.Г. Применение новых технологий при техническом перевооружении угольных ТЭС // Теплоэнергетика. – 2003. – № 9. – С. 7-18.
3. Плазменный поджиг высокосольных антрацитов при их факельном сжигании / Ю.П. Кукота, Д.Л. Бондзик, Н.И. Дунаевская, Н.В. Чернявский // Промышленная теплотехника. – 2004. – Т. 26, № 4. – С. 146-151.
4. Дунаевская Н.И. Влияние трохимической подготовки на свойства высокосольного антрацита

при его факельном сжигании. – Дисс. ... кандидата техн. наук: 05.14.04. – К., 1999. – 190 с.

5. Корчевой Ю.П., Майстренко А.Ю., Топал А.И. Экологически чистые угольные технологии. – К.: Наук. думка. – 2004. – 187 с.
6. Оптимизация процесса сжигания энергетических углей с использованием плазменных технологий / В.Е. Мессерле, А.С. Аскарлова, А.Б. Устищенко, Е.И. Карпенко // Теплоэнергетика. – 2004. – № 6. – С. 60-65.
7. Использование СВЧ-энергии для сжигания высокосольных антрацитов на ТЭС / П.М. Канило, Н.И. Расюк, Д.М. Ваврив и др. // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2001. – № 3. – С. 3-7.
8. Исследование СВЧ-плазменной технологии сжигания низкосортных углей / В.И. Казанцев, Д.М. Ваврив, П.М. Канило и др. // Теплоэнергетика. – 2002. – № 12. – С. 39-44.
9. Исследования процесса сжигания угольной пыли в экспериментальной СВЧ-плазменной горелке / Д.М. Ваврив, П.М. Канило, В.Е. Костюк и др. // Проблемы машиностроения. – 2005. – Т. 8, № 3. – С. 79-86.

Поступила в редакцию 15.06.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.П. Герасименко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.