

УДК 621.181:662.9

ВАВРИВ Д.М.¹, КАНИЛО П.М.², РАСЮК Н.И.³, ТЫМЧИК А.В.²,
БОРМОТОВ В.Н.¹, КОСТЕНКО К.В.², ШЕВЧЕНКО А.В.¹, СОЛОВЬЕВ Г.В.¹,
ШЕВЦОВА Л.В.¹, ЕРМАК С.А.¹, ШУНЕМАН К.⁴

¹Радиоастрономический институт НАН Украины,

²Институт проблем машиностроения им. А.Н.Подгорного НАН Украины,

³Центральное конструкторское бюро Министерства топлива и энергетики Украины, Харьков

⁴Technichal University Hamburg-Harburg, Germany

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА СЖИГАНИЯ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ СВЧ-ПЛАЗМЕННОЙ ГОРЕЛКЕ

Подано результати експериментальних досліджень СВЧ-плазмової технології спалювання вугільного пилу. Проаналізовано основні закономірності та характеристики взаємодії пилеугольного потоку з СВЧ-плазмою. Наведено оцінки ефективності цієї технології при спалюванні бурого вугілля.

Представлены результаты экспериментальных исследований СВЧ-плазменной технологии сжигания угольной пыли. Проанализированы основные особенности и характеристики взаимодействия пылеугольного потока с СВЧ-плазмой. Приведены оценки эффективности этой технологии при сжигании бурого угля.

Results of experimental investigations of microwave plasma technology of combustion of pulverized coal are presented. Main regularities and characteristics of the interaction of pulverized coal flow with microwave plasma are analyzed. Estimations of the efficiency of this technology for combustion of brown coal are given.

A^P – зольність угля;

C^P – содержание углерода в угле;

$G_{в1}$ – расход воздуха;

$G_{в\Sigma}$ – суммарный расход воздуха через реактор;

G_T – расход угля;

H^P – содержание водорода в угле;

N^P – содержание азота в угле;

O^P – содержание кислорода в угле;

Q_H^P – теплотворная способность топлива;

q_N – удельные энергозатраты;

R_{90} – крупность угольной пыли;

S^P – содержание серы в угле;

$t_{в1}$ – температура первичного воздуха;

V^P – летучие вещества;

$V_{в1}$ – скорость первичного воздуха;

W^P – влажность угля;

X_M – степень конверсии угля, приведенная к массе;

X_T – степень конверсии угля, приведенная к теплоте;

α_1 – коэффициент избытка первичного воздуха;

α_Σ – коэффициент избытка суммарного воздуха;

α_T – коэффициент избытка воздуха на сгоревшее топливо;

$\tau_{пр}$ – время пребывания частиц угля в реакторе;

ПЭВМ – персональная электронно-вычислительная машина;

СВЧ – сверхвысокие частоты;

ТЭС – теплоэлектростанция;

ч.н.м. – частей на миллион.

1. Введение

Украина обладает большими разведанными запасами бурых углей, имеет соответствующие мощности по его добыче, однако их низкая энергетическая ценность (влажность доходит до 60...65 %) ограничивает их использование в энер-

гетике. Основными потребителями бурого угля являются региональные брикетные фабрики и ТЭС. При этом наиболее качественный уголь поступает для производства брикетов, а менее качественный ($Q_H^P = 5700...6300$ кДж/кг) – на ТЭС, что усложняет процесс сжигания и в ряде случаев требует подсветки высокорекреационным топли-

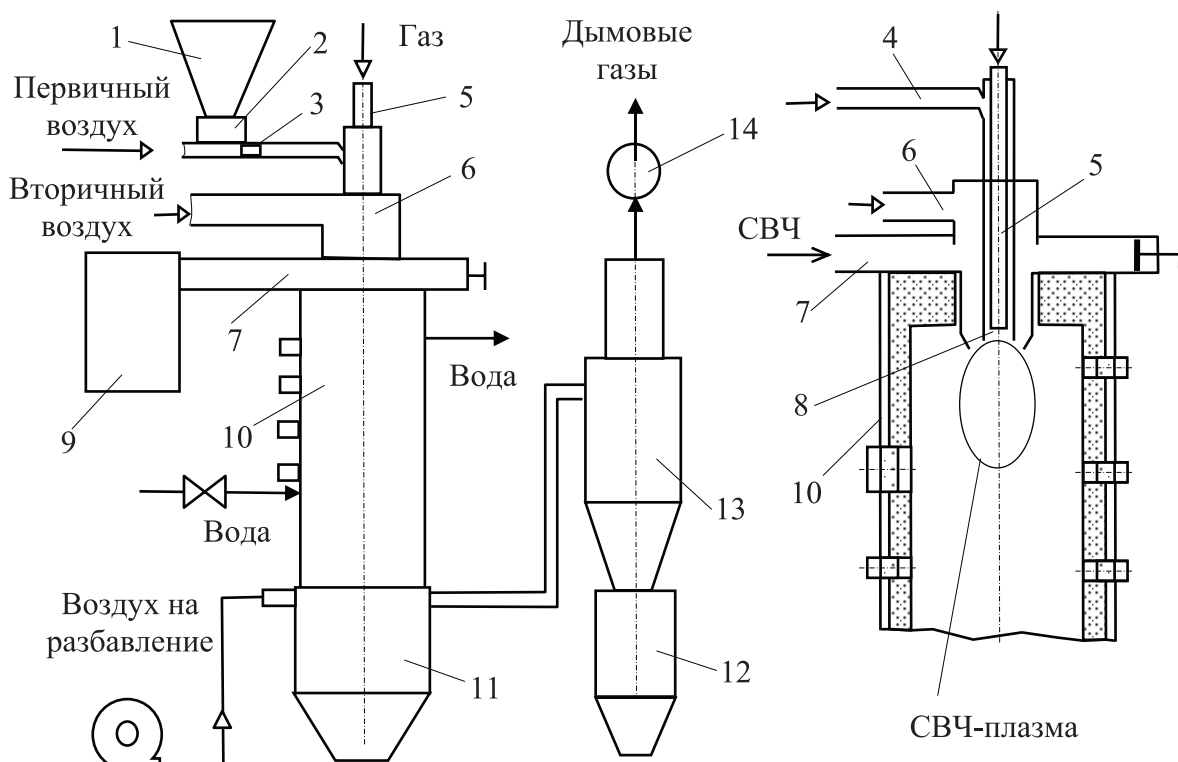


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментального стенда.

вом. Ввиду отсутствия на этих ТЭС газообразного топлива, затруднена и растопка котлов, а содержание сложного мазутного хозяйства очень дорого. Поэтому в ряде случаев растопку осуществляют при помощи дров или солярки (дизтоплива).

В целом отрасль добычи бурого угля имеет перспективу развития. В настоящее время уже имеются программы и бизнес-проекты масштабного использования бурого угля на базе создания мощного регионального энергетического комплекса, однако реализация последних пока сдерживается отсутствием финансирования.

Задачей настоящей работы является экспериментальная проверка возможности использования для розжига и стабилизации горения низкосортных бурых углей СВЧ-технологии, разработанной авторами для целей угольной энергетики [1, 2], а также отработка оптимальных режимов ведения процессов и конструкций СВЧ-горелок. Суть технологии состоит в обработке пылеугольного факела энергией сверхвысоких частот, в результате чего образовавшаяся СВЧ-плазма инициирует раннее воспламенение и ускоренное горение угля.

2. Экспериментальный стенд и методика экспериментов

Исследования проводились на огневом стенде, созданном совместно Институтом проблем машиностроения НАНУ, ХЦКБ “Энергопрогресс” и Радиоастрономическим институтом НАНУ [3]. Принципиальная схема стенда представлена на рис. 1. Он включает в себя бункер пыли 1, питатель пыли 2, смеситель 3, канал пылевоздушной смеси 4, канал природного газа 5, канал вторичного воздуха 6, призматический волновод 7, коаксиальный волновод 8, СВЧ-генератор 9, реактор 10, охладитель газов 11, бункер золы 12, золоуловитель 13, дымосос 14.

Собственно реактор выполнен водоохлаждаемым и снабжен огнеупорной обмуровкой. В качестве источника СВЧ-энергии используется магнетронный СВЧ-генератор с выходной мощностью 1...5 кВт. В целом стенд оборудован необходимыми средствами контроля и измерений.

В проведенных экспериментальных исследованиях использовался бурый уголь марки Б Днепровского бурогоугольного бассейна. В состоянии

Табл. 1. Характеристики исследуемого угля

$C^p, \%$	$H^p, \%$	$S^p, \%$	$O^p, \%$	$N^p, \%$	$W^p, \%$	$A^p, \%$	$Q_{н}^p, \text{кДж/кг}$	$V^r, \%$
50,1	4,4	3,7	14,16	0,47	14	13,17	19600	~ 60

добычи открытым способом уголь имеет высокую влажность и низкую калорийность. Перед сжиганием в котлах он подсушивается до влажности 12...16 % и размалывается до крупности, характеризующейся остатком на сите $R_{90} = 50...60 \%$.

Для исследований поставлялся неразмолотый влажный уголь, который перед опытами проходил процесс топливоподготовки, заключающийся в предварительной подсушке (при температуре порядка 60 °С) и размоле кусков до пыли необходимой крупности ($R_{90} = 50 \%$).

Определение экспериментального состава угля и теплоты сгорания осуществлялось в соответствии с существующими стандартами. Результаты анализов представлены в табл. 1.

В опытах аэросмесь подавалась в реактор по пылепроводу, являющимся также внутренним проводником коаксиального волновода. СВЧ-разряд в реакторе образовывался при зажигании искрового разряда у открытого на конце коаксиального волновода плазмотрона, через который поступала электромагнитная волна в СВЧ-диапазоне с выхода магнетрона постоянной генерации и продувочный воздух, оберегающий волновод от попадания в него угольной пыли, и, как следствие, обратного проскока плазмы к магнетрону. Опыты показали, что при подаче в плазмотрон только воздуха, устойчивого зажигания СВЧ-разряда не удается получить при всех возможных на стенде параметрах воздушного потока и конфигурациях выходного сопла. СВЧ-разряд устойчиво образуется только при подаче в плазмотрон пылеугольной аэросмеси. Обусловлен этот эффект, по-видимому, влиянием мелкодисперсных частиц угля как на степень ионизации в плазме, так и на газодинамические характеристики потока в разряде. По визуальным наблюдениям СВЧ-разряд в реакторе является продолжением внутреннего проводника коаксиального волновода и геометрически представляет собой плазменное образование ярко белого цвета цилиндрической формы.

Таким образом, СВЧ-разряд образуется непосредственно в потоке аэросмеси, которая под

воздействием плазменного факела нагревается и воспламеняется. Следует отметить, что одинаково устойчивого воспламенения аэросмеси удалось добиться как на “холодном”, с температурой 10...15 °С воздухе, так и на воздухе, предварительно нагретом до температуры порядка 100 °С. Воспламенившаяся аэросмесь в дальнейшем горит по традиционной для факельного сжигания схеме, при которой выделяются летучие и газифицируется углерод угля. Выделившиеся летучие и продукты газификации окисляются в первичном и продувочном воздухе, выделяя теплоту и нагревая реагирующий поток пылеугольных частиц и их продукты сгорания. В результате на выходе из реактора образуется нагретый до 800...1000 °С двухфазный поток, состоящий в основном из активного коксового остатка, азота, оксида и диоксида углерода, водяного пара, оксида серы, водорода, метана и частиц золы и способный, в условиях натуральных горелок пылеугольных ТЭС, заменить природный газ или мазут при растопке котла и подсветке факела.

В целом программа исследований предполагала при постоянных значениях температуры ($t_{в1}$) и скорости ($V_{в1}$) первичного воздуха обеспечить изменение избытка воздуха (1) в широком диапазоне значений, с тем чтобы определить оптимальные условия для воспламенения пылеугольного факела. Опыты проводились при постоянной температуре воздуха ($t_{в}$) равной 100 °С, постоянной мощности СВЧ-разряда порядка 5 кВт и избыточном давлении на входе в реактор.

В табл. 2 представлены значения: расходов угля (G_T), расходов первичного или транспортирующего воздуха ($G_{в1}$), скоростей первичного воздуха ($V_{в1}$), коэффициентов избытка первичного воздуха (α_1), суммарных расходов воздуха через реактор ($G_{в\Sigma}$), коэффициентов избытка суммарного воздуха (α_2), коэффициентов избытка воздуха на сгоревшее топливо (α_t), время пребывания частиц угля в реакторе ($\tau_{пр}$), удельные энергозатраты (q_N).

Табл. 2. Режимные параметры стендовой СВЧ-плазменной горелки

G_T , г/с	G_{B1} , г/с	V_{B1} , м/с	α_1	$G_{B\Sigma}$, г/с	α_Σ	α_r	$\tau_{пр}$, с	q_N , кВт·ч/кг
4	6,7	14	0,24	17	0,6	1,8	0,23	0,33
7	6,7	14	0,14	17	0,35	1,56	0,23	0,19
10	6,7	14	0,1	17	0,24	1,16	0,22	0,13
15	6,7	14	0,065	17	0,16	0,84	0,20	0,09

3. Результаты экспериментальных исследований

Проведенные эксперименты показали, что устойчивость зажигания и стабильность горения пылеугольного факела не зависит от коэффициента избытка первичного воздуха, по крайней мере, в исследованном диапазоне значений, а определяется, прежде всего, стабильностью подачи пыли в реактор и ее дисперсным составом. В целом, исследование работы стендовой горелки проводилось в более неблагоприятных условиях, чем они могут быть реализованы на промышленной горелке. В частности, температура воздуха (100 °С) была значительно ниже, чем в энергетических котлах (200...250 °С) и отсутствовала рециркуляция высокотемпературных газов (900...1200 °С) в зону воспламенения угля (использовался реактор прямоточного типа). Вследствие низкой температуры воздуха и больших потерь теплоты через обмуровку реактора, процесс сгорания проводился при относительно низких температурах, а низкая температура обмуровки не способствовала стабилизации горения за счет радиационного теплообмена. Последнее подтверждается и тем фактом, что при погасании плазмы или при выключении СВЧ-генератора происходит мгновенное прекращение горения угля. Однако даже при отмеченных неблагоприятных условиях процесс горения угля протекал устойчиво во всех исследуемых режимах, при этом воспламенение угля происходило в зоне расположения плазмы.

Важная информация была получена при исследовании изменения температуры газовой фазы вдоль реактора. Динамика изменения температуры представлена на рис. 2. Измерения

проводились стандартными хромель-алюмелевыми термопарами типа ТХА-2088. Термопары устанавливались в смотровые окна (гляделки), расположенные по длине реактора.

Как видно из рис. 2, температура газов на расстоянии 0,1 м от среза пылепровода (т.е. сразу за разрядом) не превышает 200 °С, однако при этом наблюдается стабильное воспламенение и видимое горение частиц угля, что с точки зрения общепризнанного механизма воспламенения и горения угля, обусловленного тепловым эффектом, объяснить сложно.

По всей видимости, высокая эффективность СВЧ-плазменного поджига угольной пыли и высокая интенсивность ее горения обусловлены специфическими особенностями СВЧ-разряда. Для выявления механизма воздействия СВЧ-плазмы на угольную пыль на режиме работы экспериментальной установки $\alpha_\Sigma = 0,165$ (при $t_B = 15$ °С) были проведены измерения температуры продуктов сгорания непосредственно за разрядом (на расстоянии порядка 0,1 м вниз по потоку), а также определен состав газообразных продуктов сгорания в том же сечении реактора и проведен отбор пробы угольных частиц для анализа элементного состава. Кроме того, на том же режиме (по расходу воздуха) и в том же сечении реактора были проведены измерения температуры и концентрации оксидов азота за “чисто” воздушным СВЧ-разрядом (зажигание и стабилизация разряда обеспечивалась подачей золы полностью выгоревшего бурого угля с последующим временным отключением подачи золы). Температура потока за воздушным СВЧ-разрядом составила 150...170 °С, концентрация оксидов азота 600...700 ч.н.м., что свидетельствует о наличии в разряде значительных концентраций атомарного кислорода. Пода-

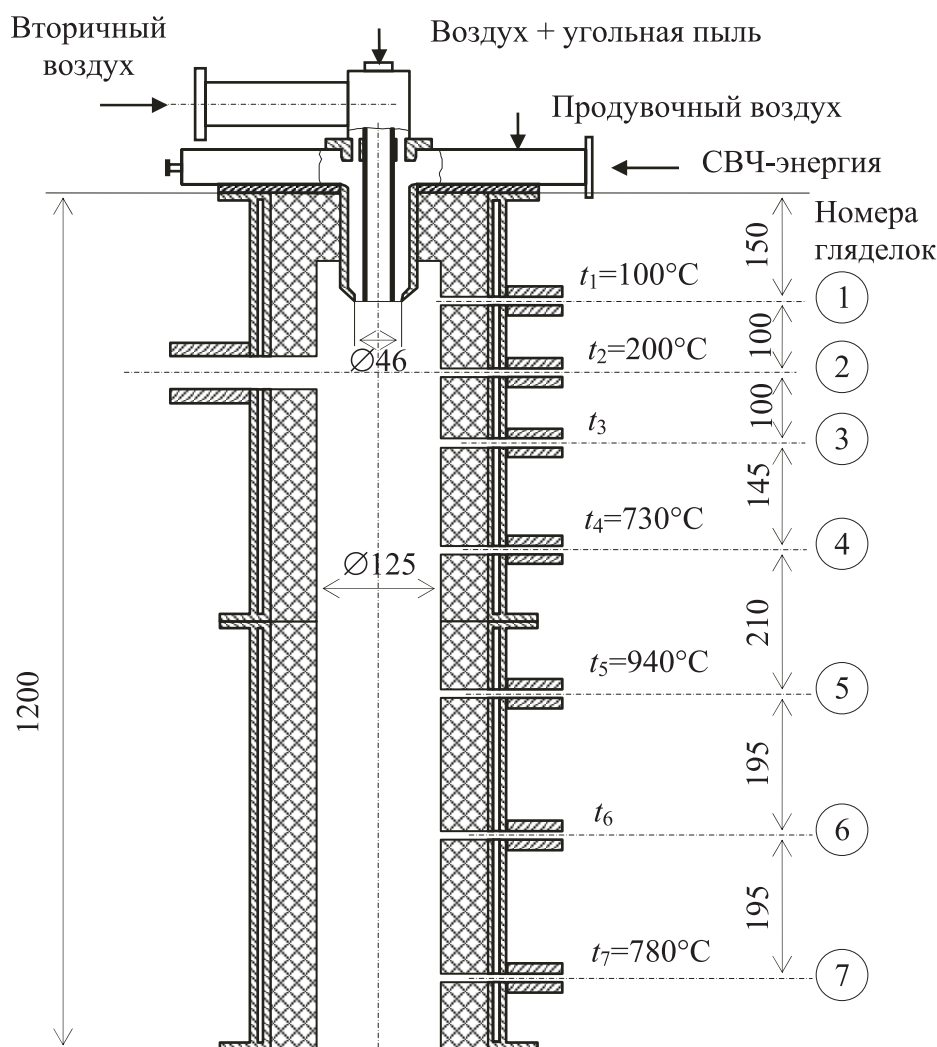


Рис. 2. Схема СВЧ-плазменной горелки.

ча угольной пыли привела к незначительному увеличению температуры двухфазного потока за разрядом (до 200 °С) и оставила без изменения уровень концентраций оксидов азота (~700 ч.н.м.). Кроме того, в потоке газов за разрядом появился оксид углерода с концентрацией 0,4 % об. Элементный анализ пробы угольной пыли, отобранной в потоке за СВЧ-разрядом, показал незначительное снижение содержания углерода (на 1,0 %), а также снижение влажности угля на 80 %. Предположительные реакции окисления углерода атомарным кислородом, идущие с пониженной энергией активации, позволяют существенно уменьшить температуру и время задержки воспламенения и тем самым интенсифицировать нагрев частиц, выход летучих и газификацию коксового остатка.

Через большую гяделку (см. рис. 2) дополнительно фиксировались (с помощью пирометра "Проминь") минимальная и максимальная температуры угольных частиц в потоке за СВЧ-плазмой и затем производился снимок потока угольных частиц (с помощью быстродействующего цифрового фотоаппарата). Результаты, полученные после обработки фотографий на ПЭВМ в виде поля температур горящих угольных частиц, приведены на рис. 3.

Суммированные результаты экспериментальных исследований процесса сжигания бурого угля в реакторе представлены на рис. 4.

Эксперименты проводились в области избытков воздуха (0,16...0,6), характерных для реальных режимов работы промышленных пылеугольных горелок. Фактически все эксперименты

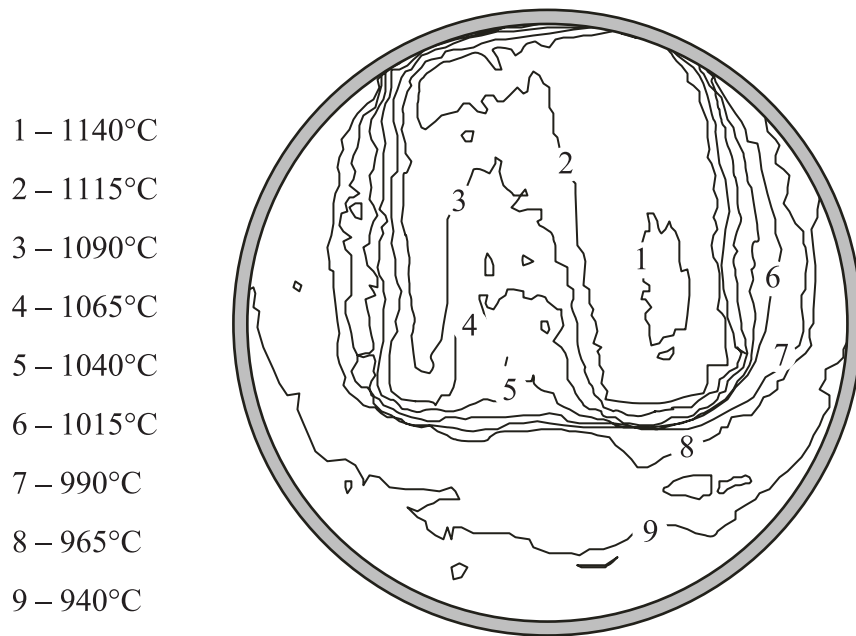


Рис. 3. Распределение температур угольных частиц за СВЧ-плазмой ($t_b = 100$ C; $G_T = 7$ г/с; $\alpha_\Sigma = 0,35$).

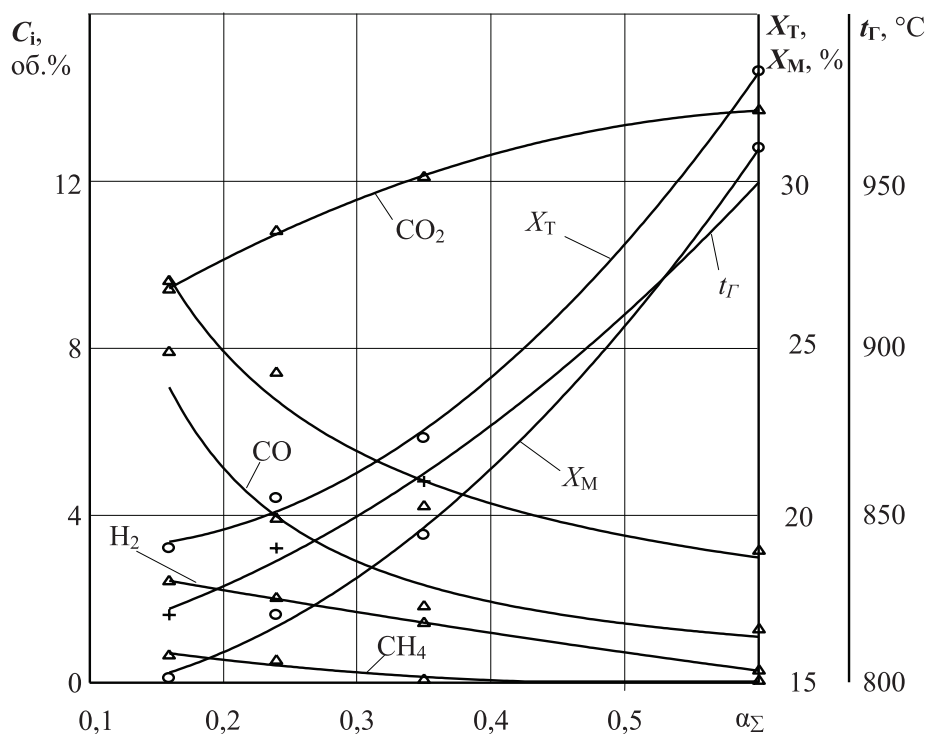


Рис. 4. Концентрации продуктов сгорания, степень конверсии углерода и уровни температур продуктов сгорания на выходе из плазмохимического реактора.

проводились в режиме газификации угля. Как видно из рисунка, избыток воздуха очень сильно влияет на режим горения (газификации) и в общем итоге на состав продуктов сгорания. При

низких избытках воздуха преобладает процесс разложения и выхода летучих угля и в продуктах сгорания находится много горючих газов (CO , H_2 , CH_4) при минимальном содержании продук-

тов полного горения (CO_2 и H_2O). Температура газов (t_r) в этом случае наименьшая (820°C). Такой режим является благоприятным с точки зрения надежности работы конструкционных материалов горелки и дальнейшего воспламенения остальной части угля после его смешения с продуктами плазмохимической обработки растопочной части угля. Обращает на себя внимание, что значения степени конверсии угля, приведенные к массе (X_M) и теплоте (X_T), сильно отличаются друг от друга. Так, для режима $\alpha_s = 0,16$ степень конверсии по массе составила 15 %, а по теплоте – 19 %. Очевидно, что при низких избытках воздуха конверсия осуществляется за счет выхода наиболее легких и калорийных компонентов летучих угля. Увеличение избытка воздуха до 0,24 приводит к резкому изменению состава продуктов сгорания, в частности, увеличивается концентрация CO_2 и снижаются концентрации горючих газов (CO , H_2 , CH_4). Увеличивается при этом и степень конверсии угля соответственно до 20,5 % по теплоте и до 17 % по массе. Последнее свидетельствует о выходе менее калорийных фракций. Рост концентрации CO_2 сопровождается повышением температуры газов на выходе из реактора. Дальнейшее увеличение избытка воздуха приводит к аналогичному снижению в продуктах сгорания концентраций горючих газов и увеличению концентрации CO_2 . Наблюдается и рост степени конверсии угля. При избытке воздуха 0,35 степень конверсии угля составляет 22 % по теплоте и 19,4 % по массе. По-прежнему наблюдается и рост температуры продуктов сгорания на выходе из реактора. Резкое увеличение степени конверсии угля наблюдается при избытке воздуха на уровне 0,6. На этом режиме значения степени конверсии и по теплоте и по массе максимально сближаются и находятся на уровне 31...33 %. Температура газов на выходе из реактора выросла до 950°C . Такой режим неблагоприятный с точки зрения надежности работы конструкционных материалов горелки, возможности шлакования реактора и дальнейшего воспламенения основной массы топлива. Наиболее оптимальным режимом можно считать работу реактора с избытком воздуха на уровне 0,35...0,4.

В целом степень конверсии бурого угля марки Б1 несколько ниже, чем газового угля в анало-

гичных условиях. Это можно объяснить большой влажностью угольной пыли (14 %), что является нормой при сжигании бурого угля в топках энергетических котлов и более низкой жаропроизводительностью. Анализ газового состава продуктов сгорания показывает, что, как и в случае сжигания газовых углей, в первую очередь выгорают летучие вещества, что соответствует общепризнанному механизму горения углей. Концентрация SO_2 в продуктах сгорания невысокая и соответствует степени конверсии на уровне 2 %. СВЧ-плазменная стабилизация горения угля позволит также снизить уровни образования оксидов азота.

В проведенных экспериментах достигнут удельный расход электроэнергии на воспламенение угля на уровне 0,09 кВтч/кг, что, однако, не является предельным из-за ограниченной производительности питателя пыли на стенде. 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.

4. Заключение

В результате выполнения данной работы экспериментально подтверждено, что в основе СВЧ-плазменной технологии повышения реакционной способности и эффективности сжигания пылеугольно-воздушной смеси лежат физико-химические превращения угольной пыли и окислителя, включающие суперпозицию следующих процессов:

- нагрев аэросмеси (угольной пыли) до температуры деструкции;
- деструкцию угольных частиц с выделением летучих продуктов;
- газофазные реакции летучих и окислителя;
- нагрев коксового остатка с газовой фазой.

Основные преимущества СВЧ-плазменных технологий подготовки высокосольных низкорективных углей к сжиганию перед традиционными технологиями заключаются в:

- дроблении угольной пыли в зоне СВЧ-плазмы;

- увеличении скоростей реакций окисления и газификации угольной пыли;
 - увеличении полноты выгорания угольной пыли (снижение мехнедожога) при соответствующей организации СВЧ-плазменной подготовки (предварительное повышение реакционной способности части пылеугольного потока) и дальнейшем ступенчатом сжигании угольной пыли в котле ТЭС;
 - снижении габаритов плазменно-энергетических устройств, вследствие более высоких скоростей химических реакций при использовании СВЧ-плазмы;
 - снижении уровней образования оксидов азота, вследствие появления возможностей управления составом газовой фазы продуктов горения и газификации;
 - снижении уровней выбросов с дымовыми газами оксидов серы и азота, тяжелых металлов и канцерогенных углеводородов при безмазутной растопке и подсветке пылеугольного факела в котлах ТЭС.
- При дальнейшей отработке СВЧ-плазменных технологий сжигания низкокачественных 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 пылеугольно-воздушной смеси с плазмой, с целью увеличения пребывания угольных частиц в объеме плазмы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ваврив Д.М.* Отработка СВЧ-технологии поджига угольной пыли на экспериментальной установке / В.И.Казанцев, П.М.Канило, М.М.Левин, Н.И.Расюк и др. // Труды международной научно-технической конференции “Совершенствование турбоустановок...”. – Харьков. – 2000. – С. 126–130.
2. *Ваврив Д.М.* Исследование СВЧ-плазменной технологии сжигания низкосортных углей. / Д.М. Ваврив, В.И. Казанцев, П.М. Канило и др. // Теплоэнергетика. – 2002. – № 12. – С. 39 – 45.
3. *Канило П.М.* Экспериментальный стенд для исследования СВЧ-технологий сжигания высокозольных углей. / П.М. Канило, Н.И. Расюк, Д.М. Ваврив и др. // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2001. – №1. – С. 3 – 7.

Получено 15.06.2005 г.