



УДК 537.527.5 (533.9)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ В УСЛОВИЯХ ЕЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ВОЗДУШНО-ПЫЛЕУГОЛЬНОЙ СМЕСЬЮ*

**М. Л. Жадкевич, В. А. Шаповалов, Г. А. Мельник,
Г. Ф. Торхов, Д. М. Жиров, О. М. Вислобоков,
М. С. Приходько, Е. Ю. Ревякин, А. Н. Пешков**

Исследованы электрические и энергетические параметры трехфазной системы дуг переменного тока в широком диапазоне технологических режимов воздушной плазменной конверсии пылеугольного топлива. Определен состав газа, образующегося в процессе конверсии. Выявлено, что для повышения теплоты сгорания конвертированного газа (увеличения содержания водорода и уменьшения содержания азота в смеси отводимых из плазменного реактора газов) следует проводить воздушно-паровую плазменную конверсию пылеугольного топлива.

Electric and energy parameters of three-phase system of a.c. arcs in the wide range of technological conditions of air plasma conversion of a pulverized-coal fuel were investigated. Composition of gas, formed during conversion process, was determined. It was revealed that to increase the heat of combustion of a converted gas (increase in hydrogen content and decrease in nitrogen content in mixture of gases, removed from a plasma reactor), it is necessary to perform an air-vapor plasma conversion of a pulverized-coal fuel.

Ключевые слова: стабилизация горения; пылеугольное топливо; воздушная плазменная конверсия; плазмотрон; дуга; трехфазная система дуг; вольт-амперная характеристика; конвертированный газ

Несмотря на интенсивное развитие альтернативной энергетики (солнечные, ветряные и другие электростанции, а также получение биогаза) в ближайшие десятилетия ископаемые энергоносители по-прежнему остаются основными источниками энергии. При нынешнем уровне потребления топлива запасы нефти закончатся через 50 лет, природного газа — через 60 лет, а угля — через 220 лет, что вызовет подорожание нефти и газа. По сравнению с углем, газообразное топливо имеет ряд преимуществ, например, простота транспортировки и регулируемой подачи в различных технологических процессах. Также следует учитывать, что применение угля в ряде процессов невозможно из-за наличия зольного остатка. В связи с этим эффективная и экономичная газификация угля является актуальной задачей.

Газ может использоваться во многих отраслях промышленности, в частности, в металлургии как топливо и восстановитель. Генераторный газ, полученный при газификации угля, возможно применять для стабилизации горения пылеугольного факела в топках котлов электростанций и котельных. В настоящее время с этой целью используют природный газ или мазут, что, однако, не решает указанную проблему, поскольку дополнительное топливо имеет высокую стоимость и использование двух различных топлив усложняет инфраструктуру предприятия.

Что касается мазута, то его применение также приводит к ухудшению эколого-экономических показателей котла: на 10... 15 % повышается механический недожог топлива, увеличивается высокотемпературная коррозия экранных поверхностей, на 30... 50 % повышается выход оксидов азота и серы и образуется пятиоксид диванадия, снижаются коэффициент полезного действия (КПД) и надежность оборудования [1–3].

* Работа проведена в рамках программы «Энергосбережение».



В последнее время ведутся разработки по применению плазменных технологий для розжига котлов и стабилизации горения пылеугольного факела. Использование плазмы, по сравнению с мазутной технологией, имеет ряд преимуществ: повышаются эколого-экономические показатели котла, снижается до допустимого уровня (2...3 %) механический недожог топлива. С повышением температуры нагрева аэросмеси увеличиваются реакционная способность топлива и полнота его сгорания [1–6].

В ходе предыдущих исследований установлено, что для надежного зажигания и стабилизации горения аэросмеси достаточно мощности плазматрона, которая не превышает 1 % тепловой мощности зажигаемого угля, а для антрацитов она достигает 2 %. Некоторые авторы считают, что для устойчивой работы системы плазменной стабилизации горения достаточно мощности плазматрона 0,5 % мощности горелки. С увеличением выхода летучих, а также концентрации угля в аэросмеси уменьшаются удельные энергозатраты на плазменный розжиг [1–7].

Оптимальная температура частиц топлива, при которой обеспечивается его надежный розжиг и стабилизация горения пылеугольного факела, колеблется в пределах 800...1200 К. При этом коэффициент избытка окислителя должен составлять 0,1...0,2. Эффективный розжиг топлива имеет место при массовом соотношении воздуха и топлива в пределах 2,50...3,25, хотя в отдельных случаях это соотношение снижали до единицы [1, 4, 7].

В зависимости от соотношения воздуха, кислорода или водяного пара, которые используются для конверсии пылеугольного топлива, может изменяться и соотношение продуктов конверсии [8].

В качестве источника теплоты в плазменных процессах розжига и стабилизации горения топлива используют плазматроны косвенного действия постоянного тока [1–27], общими недостатками которых являются низкий КПД, повышенные тепловые нагрузки на катод и анод, а в связи с этим низкий ресурс плазматронов (50...100 ч) [1, 2], их ограниченная мощность и необходимость остановки процесса для замены электродов или плазматронов. Этих плазматроны имеют возрастающие вольт-амперные характеристики (ВАХ) [5].

На практике в качестве материала электродов плазматронов применяют водоохлаждаемую медь и графит. При использовании в качестве плазмообразующего агента воздушно-пылеугольной смеси эрозия медного электрода составляет $(1,3...2,5) \cdot 10^{-6}$ г/Кл, а графитового — $(4,0...5,6) \cdot 10^{-5}$ г/Кл. При токе дуги 200...1000 А напряжение на дуге равно 280...400 В [5, 9, 10, 11].

Удельные затраты электроэнергии плазматрона косвенного действия на розжиг и стабилизацию основного факела в экспериментах достигают 1 кВт·ч на 1 кг угля, а значение соотношения массы пылеугольного топлива и воздуха в аэросмеси, которая подается в плазменную струю, поддерживается близким к единице. При этом в плазматрон подается

20 % общей массы топлива, которое вводится в камеру [1, 2, 5].

В настоящее время плазменные технологии в энергетике не нашли широкого промышленного применения. Основными причинами этого являются невозможность обеспечить непрерывность процессов горения из-за низкого ресурса плазматронов, сложность их монтажа в существующих горелках, зашлакованность рабочего тракта горелок и повышение температуры их деталей и узлов до недопустимых значений.

Для внедрения плазменных технологий в энергетику нужно решить задачи повышения ресурса плазматронов и КПД указанного процесса, а также разработки новых способов применения плазматронов. Одним из путей решения проблем, связанных с применением плазменной технологии розжига и стабилизации горения пылеугольного факела, является использование многодуговых плазменных нагревателей переменного тока с вынесенными дугами [28–30], которые горят на среднюю точку в плазме. Этот подход базируется на достижениях Института электросварки им. Е. О. Патона в области разработки трехфазных плазменных комплексов переменного тока, применяемых в качестве источников теплоты в процессах специальной электрометаллургии, а также на результатах исследований особенностей горения дуги при использовании в качестве плазмообразующего природного газа или пропан-бутана. Применение в металлургии многодуговых плазменных нагревателей переменного тока с вынесенными дугами, которые горят на среднюю точку в плазме, обусловлено их высокими КПД и ресурсом, а также практически неограниченной мощностью. Работа такого нагревателя предусматривает использование нескольких дуг большой длины, погруженных в нагреваемый поток. При этом обеспечивается эффективный массообмен между высокотемпературными плазменными струями и потоком и продуктивно используется тепло, которое выделяется в средней точке плазмы. Все это предопределяет высокие эффективность нагрева воздушно-пылеугольной смеси и КПД. При горении дуг на среднюю точку в плазме сопло, предназначенное для формирования плазменной струи воздушно-пылеугольной смеси, является электрически нейтральным. Его тепловые нагрузки значительно ниже, чем в плазматронах косвенного действия. В связи с этим ресурс сопла достаточно высокий, мощность плазменного нагревателя не ограничена его ресурсом и может повышаться за счет наращивания количества дуг при том значении тока, при котором гарантируется высокий ресурс электрода. В конструкции плазматрона необходимо предусмотреть наращивание электродов без выключения источников питания. Следует отметить, что источники переменного тока более дешевы и просты в эксплуатации, чем постоянного.

Чтобы решить в комплексе проблемы, которые препятствуют использованию плазменной техно-

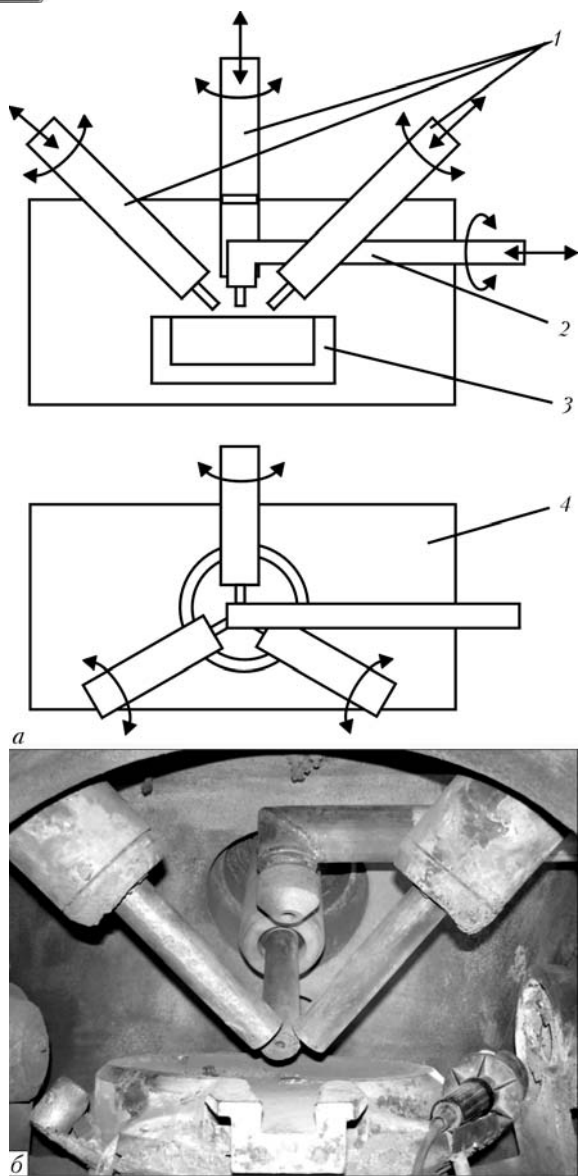


Рис. 1. Схема (а) и внешний вид (б) экспериментального трехфазного плазменного реактора: 1 — плазменные нагреватели; 2 — фурма; 3 — шлакоуловитель; 4 — камера

логии, целесообразно применить следующую схему построения комплекса плазменного розжига и стабилизации горения пылеугольного топлива в топках энергетических котлов.

Вблизи энергетического котла или на территории станции располагается реактор для воздушной, паровой или воздушно-паровой плазменной конверсии пылеугольного топлива, используемого на предприятии. Плазменный реактор оборудуется трех- или многофазной системой плазменных нагревателей переменного тока, дуги которых горят на среднюю точку в плазме. Плазменный реактор, кроме прямых функций газификации топлива, может улавливать и удалять шлак с тем, чтобы создаваемый в результате конверсии газ не содержал частицы, которые могут зашлаковывать рабочие тракты основной горелки и котла. Газы, образующиеся в результате плазменной конверсии пылеугольного топлива, при заданной температуре и давлении подаются по трубопроводу в основную горелку и сжигаются непосредственно в топочном пространстве

котла в зоне выхода из горелки основной массы воздушно-пылеугольной смеси. Таким образом, конвертируемый в плазменном реакторе газ выполняет функцию розжига и стабилизации горения основной пылеугольной смеси в наиболее экономичном режиме. При этом конструкция основной горелки не требует никаких доработок. Незначительно изменяется также и тепловой режим работы ее деталей и узлов.

Из приведенного выше следует, что предложенная схема позволяет полностью избежать недостатков, присущих действующим плазменным технологиям и оборудованию.

Разработка плазменной технологии и оборудования для розжига низкосортного пылеугольного топлива в топках энергетических котлов невозможна без прогнозирования электрических и энергетических характеристик дуги в условиях взаимодействия плазменных струй с воздушнопылеугольной смесью. Знать значения этих параметров необходимо для обеспечения стабильного горения дуги в условиях розжига низкосортного пылеугольного топлива в топках энергетических котлов и определения рабочего диапазона параметров системы плазменно-дуговой нагреватель-электрический источник питания.

Напряжение дуги в процессе розжига и стабилизации горения зависит от многих факторов — состава и расхода компонентов воздушно-пылеугольной смеси, их влажности, тока, длины дуги и др. В зависимости от диапазона изменений напряжения дуги в тот или иной период процесса, требований к стабильности горения дуги и ее энергетических показателей выбирается напряжение холостого хода источника питания и наклон его внешней ВАХ.

Целью настоящей работы является исследование и оптимизация ВАХ и градиента напряжений трехфазной системы дуг переменного тока в широком диапазоне технологических режимов, получение эмпирических зависимостей для расчета ВАХ, а также определение состава газа, образующегося в процессе плазменной конверсии пылеугольного топлива.

Отличие процесса горения каждой дуги из трехфазной системы дуг от горения одиночной дуги состоит во взаимном влиянии электромагнитных и тепловых полей столбов дуг, что обуславливает определенную особенность их пространственного размещения и перемещения, расположения активных пятен на электродах и нагреваемых объектах [28–30]. Необходимо отметить, что если для одиночной дуги характерен режим горения в холодном пространстве, то для трехфазной системы дуг типичным является горение в горячем пространстве с частичной компенсацией затрат энергии из столба одной дуги затратами энергии из столбов соседних дуг. Горение трехфазной системы дуг на среднюю точку в плазме также обуславливает определенные особенности их электрических режимов. Наличие отличий в условиях горения трехфазной системы дуг и одиночной дуги вызвало необходимость всестороннего исследования их обобщенных ВАХ в широком диапазоне технологических режимов.

Для проведения экспериментов использовали трехфазный плазменный реактор для нагрева и кон-



версии пылеугольного топлива (рис. 1). Конструкции реактора и систем его электро-, водо-, газо- и пылеснабжения предусматривали использование трех плазменных нагревателей 1 с полыми графитированными электродами, установленными равномерно по окружности с наклоном к горизонту (поверхности шлакоуловителя 3) в герметичной камере 4. Угол наклона плазменных нагревателей регулировали в пределах 30... 60°, а длину дуги в диапазоне и 0... 450 мм. Это обеспечивало возможность установки плазменных нагревателей в позиции, при которых дуга горит на дно шлакоуловителя или на среднюю точку в плазме.

Для проведения экспериментов достаточным был диапазон тока дуги 0,5... 3,0 кА и напряжения холостого хода трехфазного источника питания 220... 575 В. Источник питания представлял собой комплекс трехфазного дросселя насыщения и разделительного трехфазного трансформатора. Источник питания имел ВАХ с крутизной падения 0,30... 0,45 В/А, что обеспечивало стабильность горения дуг переменного тока в условиях значительных колебаний напряжения дуг, обусловленных изменениями технологических параметров процесса.

Система водоснабжения была рассчитана на охлаждение узлов плазменных нагревателей, шлакоуловителя и камеры, а также фурмы 2 (см. рис. 1), предназначенной для подачи воздушно-пылеугольной смеси в столбы и среднюю точку трехфазной системы дуг при ее мощности до 2000 кВт·А. Регулирование состава воздушно-пылеугольной смеси и соотношения компонентов осуществляли с помощью систем подачи воздуха и пыли, которая обеспечивала расход воздуха и пылеугольного топлива от 1 до 30 кг/ч (каждого).

Таким образом, созданный экспериментальный трехфазный плазменный реактор обеспечивал широкий диапазон технологических режимов для исследования электрических и теплоэнергетических параметров трехфазной системы дуг.

В качестве топлива использовали донецкий антрацит АШ [31], основные характеристики которого представлены ниже:

Сухая масса, %:	
Зола	18,0
Сера общая	1,9
Сера сульфатная	0,1
Сера колчеданная	1,1
Горючая масса, %:	
Сера колчеданная	1,4
Сера органическая	0,8
Углерод	92,5
Водород	1,8
Азот	1,0
Кислород	2,5
Теплота сгорания горючей массы, кДж/кг:	
В бомбе	33820
Низшая	33150
Выход летучих, %	4
Теплота сгорания топлива низшая, кДж/кг	
	25120

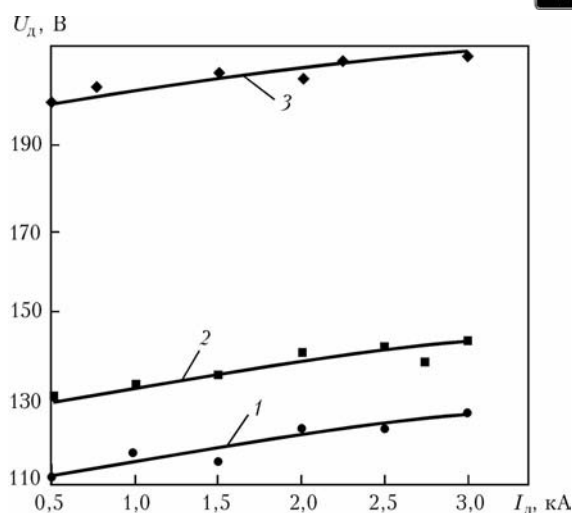


Рис. 2. Семейство ВАХ дуги при $L_d = 10$ (1), 15 (2) и 30 (3) см

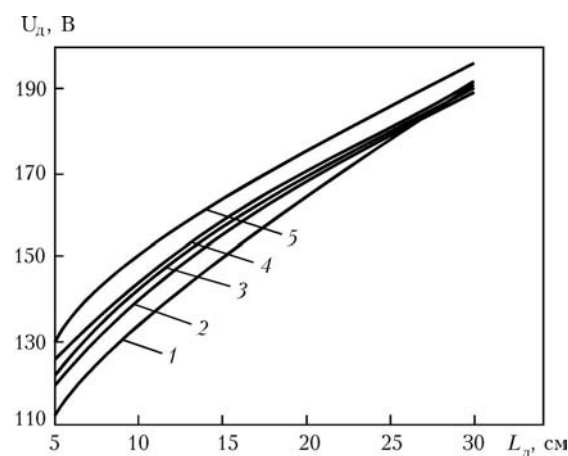


Рис. 3. Зависимость напряжения U_d дуги от ее длины L_d при $I_d = 1,0$ (1), 1,5 (2), 2,0 (3), 2,5 (4) и 3,0 кА

Реактор оборудован приборами для измерения тока и напряжения дуг каждого плазменно-дугового нагревателя, затрат воздуха и угольной пыли в фурме. Кроме того, в патрубке для отвода газов, которые образовались в процессе нагревания и конверсии смеси воздуха и угольной пыли, была вмонтирована отводная труба для забора проб газов, анализ состава которых выполняли с помощью хроматографа «Газохром 3101».

Результаты исследований основных электрических параметров дугового разряда в условиях взаимодействия плазменных струй трехфазной системы дуг с воздушно-пылеугольной смесью в зависимости от длины L_d дуги, расхода G воздушно-пылеугольной смеси и соотношения ее компонентов, давления P_k газов в камере реактора представлены на рис. 2–6. В экспериментах, кроме оговоренных случаев, расход воздуха G_v составлял 1 кг/ч, а угольной пыли $G_y = 0,32$ кг/ч.

Как видно из рисунков, характер кривых ВАХ дуг трехфазной системы слабо возрастающий, их наклон (крутизна) колеблется в пределах $(3,6... 6,0) \cdot 10^{-3}$ В/А, а градиент напряжения дуги ΔU_d — в пределах 2,7... 10,0 В/см. Наклон ВАХ и градиент напряжения дуги зависят от расхода и

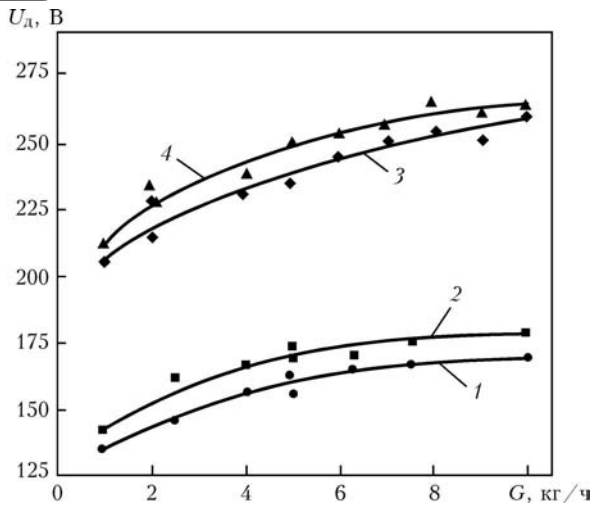


Рис. 4. Зависимость напряжения на U_d дуге от расхода G воздушно-пылеугольной смеси: 1 — $I_d = 1$ кА, $L_d = 15$ см; 2 — $I_d = 3$ кА, $L_d = 15$ см; 3 — $I_d = 1$ кА, $L_d = 30$ см; 4 — $I_d = 3$ кА, $L_d = 30$ см

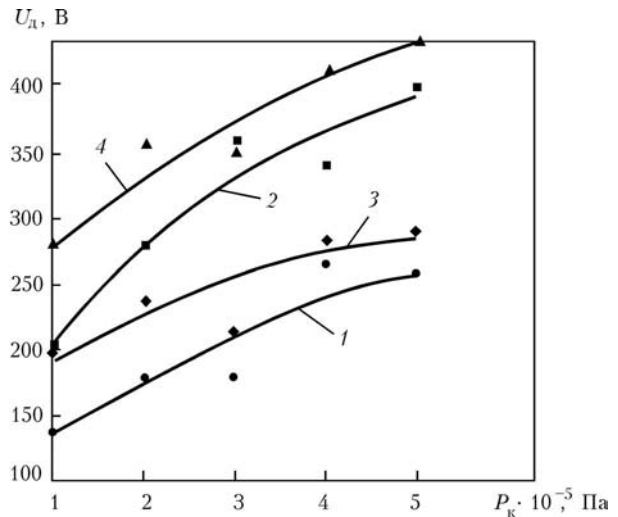


Рис. 5. Зависимость напряжения на U_d дуге от давления P_k газов в камере: 1 — $I_d = 1$ кА, $L_d = 15$ см; 2 — $I_d = 1$ кА, $L_d = 30$ см; 3 — $I_d = 3$ кА, $L_d = 15$ см; 4 — $I_d = 3$ кА, $L_d = 30$ см

состава воздушно-пылеугольной смеси, а также давления газов в камере реактора.

Максимальная крутизна ВАХ отмечалась при сравнительно малой длине дуг, с увеличением их длины она уменьшалась, поскольку при этом уменьшается стабилизирующее влияние плазмообразующих смесей на столбы дуг, вследствие чего возрастает диаметр их токопроводящей площади. В итоге становится более заметной взаимная стабилизация горения каждой из дуг за счет компенсации их тепловых потерь тепловыми потерями из столбов соседних дуг, что приводит к уменьшению электрического сопротивления столбов дуг. Отмечается также тенденция роста крутизны ВАХ и градиента напряжения дуги при увеличении затрат плазмообразующей воздушно-пылеугольной смеси и повышении давления в камере реактора. Это происходит в связи с возрастанием затрат энергии столбов дуг на нагревание и ионизацию смеси, а также с увеличением затрат энергии из столбов дуг с повышением

плотности газов, в окружении которых горят дуги. При уменьшении соотношения массовых затрат воздуха и пылеугольного топлива градиент напряжения дуги также уменьшается. Очевидно, токопроводящее пылеугольное топливо, попадая в столб дуги, способствует уменьшению его электрического сопротивления.

Значения напряжения дуги и форма ВАХ дуг при горении их на токопроводящую поверхность и среднюю точку в плазме при варьировании технологическими параметрами практически не отличаются.

В целом следует отметить, что во всем диапазоне варьирования током, длиной дуги, составом и соотношением составных частей воздушно-пылеугольной смеси, а также давлением газов в камере реактора трехфазная система дуг горела стабильно, колебания напряжения и силы тока не превышали 15 % среднего их значения.

Анализ и обобщение экспериментальных электрических параметров трехфазной системы дуг позволили получить эмпирическую зависимость для расчета их ВАХ в широком диапазоне варьирования током и длиной дуг, а также давлением газов в камере реактора:

$$U_d = 2,2 (2,3L_d I_d^{1/L_d^{1,05}} + 10)(1 \cdot 10^{-5} P_k)^n G^m \text{ [В]}, \quad (1)$$

где n, m — показатели степени, которые выбираются соответственно в пределах 0,35... 0,43 и 0,05... 0,10 (меньшие значения показателей степени соответствуют меньшим соотношениям массовых расходов воздуха и угольной пыли).

Сравнение ВАХ, полученных по формуле (1), с данными экспериментов показало, что расчетные значения напряжений хорошо совпадают с экспериментальными.

Одним из важнейших энергетических параметров трехфазной системы дуг является ее мощность. В исследуемом диапазоне значений тока (0,5... 2,5 кА) она составляла от 470 до 1250 кВт. Этой мощности вполне достаточно для розжига и стабилизации го-

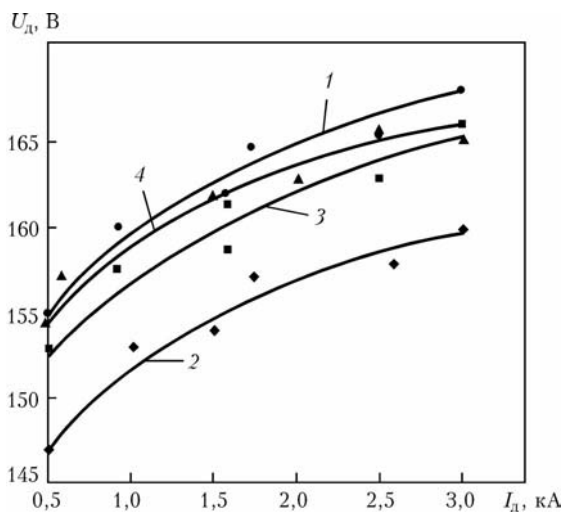


Рис. 6. Семейство ВАХ дуги при разных расходах компонентов воздушно-пылеугольной смеси ($L_d = 15$ см): 1 — $G_b = 5,8$ кг/ч, $G_y = 1,8$ кг/ч; 2 — $G_b = 5,8$ кг/ч, $G_y = 3,7$ кг/ч; 3 — $G_b = 11,6$ кг/ч, $G_y = 2,1$ кг/ч; 4 — $G_b = 11,4$ кг/ч, $G_y = 5,5$ кг/ч



Таблица 1. Химический состав газа (об. %), полученный в результате плазменной воздушной конверсии пылеугольного топлива (антрацита)

№ опыта	Соотношение расход, кг/ч, + воз- дух: топ- ливо		Н ₂	СО	СО ₂	N ₂	
	воздуха	топлива					
1	7,5	1,1	6,80	2	8	21	69
2	7,5	1,6	4,70	3	22	5	70
3	15,0	2,5	6,00	3	13	14	70

рения топлива горелок крупных действующих тепловых электростанций и топок энергетических котлов [1–7]. Расчет подтвердил, что при этом диапазоне мощностей легко обеспечить за 1 ч нагрев до 1000 °С и конвертирование от 1300 до 3500 кг воздушно-пылеугольной смеси.

Проведенные исследования показали, что удельная эрозия полого графитированного электрода плазменно-дугового нагревателя при $I_d = 0,5...3,0$ кА не превышает $5,0 \cdot 10^{-5}$ г/Кл даже при неблагоприятном соотношении массовых затрат воздуха и топлива. Очевидно, что со снижением этого соотношения следует ожидать и уменьшения эрозии электродов.

На основании результатов исследований можно рассчитать основные исходные электрические и энергетические параметры плазменного нагревательного комплекса и источника питания трехфазного реактора для нагрева и конверсии воздушно-пылеугольной смеси: $I_d = 1...3$ кА; фазное напряжение холостого хода трехфазного источника питания — 550 В; крутизна внешней ВАХ источника питания — не менее 0,5 В/А.

Одним из важнейших показателей эффективности плазменной воздушной конверсии пылеугольного топлива является состав полученного газа. Проведены исследования его состава (табл. 1) в зависимости от расхода и соотношения воздуха и угольной пыли (антрацита). Полученный газ отбирали для анализа на выходе из камеры перед системой вентиляции. Как указывалось ранее, концентрацию газов Н₂, СО, СО₂ измеряли хроматографом «Газохром 3101». Очевидно, что оставшимся компонентом газовой смеси является N₂, который составляет основу воздуха.

Стехиометрически для пылеугольного топлива данного состава соотношение воздуха и топлива должно равняться 5, чтобы перевести весь углерод в монооксид. Больше соотношение может привести к увеличению содержания СО₂, что доказано экспериментально. В опытах оптимальное соотношение было около 4. Это можно объяснить увлечением неучтенного воздуха вместе с угольной пылью, осаждением последней на некоторых участках пылепровода и недожогом углерода в камере. При этом, естественно, снижается КПД процесса газификации. Указанные недостатки можно избежать усовершенствованием системы пылеснаб-

Таблица 2. Расчетный состав (об. %) газа при различных видах конверсии пылеугольного топлива

Окислитель	Н ₂	СО	N ₂	Калорийность, кДж,	
				на 1 кг антрацита	на 1 м ³ газа
Воздух (3,5 м ³)	0	33	67	17560	4180
Кислород (0,7 м ³)	0	100	0	17560	12540
Пар (1,4 м ³)	50	50	0	32600	11700

жения реактора и использованием камеры, футерованной огнеупорными материалами, что приведет к повышению температуры газов в камере, а также увеличить полноту сгорания топлива.

В полученном газе присутствует довольно мало водорода, что объясняется незначительным содержанием летучих в антраците. Очевидно, что при использовании угля с большим содержанием летучих объемная доля Н₂ увеличивается. Повышенное содержание водорода в газе в опыте № 4 (табл. 1) можно объяснить наличием влаги в воздухе и в пыли. Из этого следует, что для повышения содержания водорода в смеси газов, отводимых из реактора, следует проводить конверсию пылеугольного топлива воздухом, обогащенным водяным паром.

В табл. 2 представлен расчетный состав и калорийность генераторного газа при конверсии угля, содержащего 75 об. % С и минимальное количество летучих. Из таблицы видно, что наивысшая удельная калорийность генераторного газа наблюдается при кислородной конверсии, а максимальная калорийность газа, получаемого из 1 кг твердого топлива, при конверсии паром.

ВЫВОДЫ

1. Кривые ВАХ дуг трехфазного плазменного нагревательного комплекса с полыми графитированными электродами в условиях взаимодействия плазменных струй с воздушно-пылеугольной смесью возрастают незначительно. Их наклон колеблется в пределах $(3,6...6,0) \cdot 10^{-3}$ В/А, а градиент напряжения дуги в этих условиях — в пределах 2,7... 10,0 В/см.

2. Наклон кривых ВАХ и градиент напряжения дуги зависят от расхода и состава воздушно-пылеугольной смеси и давления газов в камере реактора.

3. Оптимальное массовое соотношение смеси воздуха и пылеугольного топлива при воздушной плазменной конверсии составляет 4...5. При этом образуется смесь газов СО + Н₂ с содержанием не менее 25 об. %.

4. Для повышения теплоты сгорания конвертированного газа (увеличения содержания водорода и уменьшения содержания азота в смеси газов, отводимых из плазменного реактора) следует проводить воздушно-паровую или воздушно-кислородную плазменную конверсию пылеугольного топлива.



1. *Применение систем плазменного воспламенения угольной пыли в котлах Таштагольской производственно-отопительной котельной* / А. Н. Тимошевский, И. М. Засыпкин, С. П. Ващенко, Ю. Г. Векессер // *Новости теплоснабжения*. — 2002. — № 1. — С. 14–21.
2. *Обоснование применения плазменной технологии для безмазутного воспламенения факела в топках прогенератора ТЭС* / Э. Р. Иманкулов, А. А. Кабарин, Н. П. Крылова и др. // <http://www.aipet.kz>.
3. Мерсерле В. Е., Сакипов З. Б. Плазменная термохимическая подготовка твердых топлив к сжиганию // Плазменное воспламенение и сжигание топлива: Материалы междуз. науч.-техн. конф. Николаев. кораблестроит. ин-та им. адм. С. О. Макарова, г. Николаев, май 1989 г. — Николаев, 1989. — С. 16–17.
4. Дробчик В. В. Разработка технологии зажигания и стабилизации горения пылевидных твердых топлив на основе устройства с вынесенной плазменной дугой: Автореф. дис. канд. техн. наук. — Томск, 2004. — 29 с.
5. Плазменная горелка с источником питания для розжига и стабилизации горения донецкого АШ / Ш. Ш. Ибраев, М. М. Полячек, Н. Л. Новиков, Т. М. Сейтимов // Плазменное воспламенение и сжигание топлива: Материалы междуз. науч.-техн. конф. Николаев. кораблестроит. ин-та им. адм. С. О. Макарова, г. Николаев, май 1989 г. — Николаев, 1989. — С. 33–34.
6. Плазменная безмазутная растопка котлов и стабилизация горения пылеугольного факела / М. Ф. Жуков, Е. И. Карпенко, В. С. Перегудов и др. — Новосибирск: Наука, 1995. — 304 с. — Т. 16: Низкотемпературная плазма.
7. Моделирование процессов термохимических превращений в плазменном реакторе / Р. А. Калинин, А. П. Кузнецов, А. А. Левицкий и др. // Плазменное воспламенение и сжигание топлива: Материалы междуз. науч.-техн. конф. Николаев. кораблестроит. ин-та им. адм. С. О. Макарова, г. Николаев, май 1989 г. — Николаев, 1989. — С. 18–22.
8. Войчак В. П., Гончаров А. Г., Карпов Е. Г. О создании плазменных генераторов для переработки экибастузских углей // Там же. — С. 38–39.
9. Сейтимов Т. М., Сакипов З. Б., Ибраев Ш. Ш. Плазмотрон для воспламенения и сжигания низкорекционных углей // Там же. — С. 35–36.
10. Ибраев Ш. Ш. Electroды плазмотронов для воспламенения и сжигания углей // Там же. — С. 36–38.
11. Фридланд М. Г. О работе электродов сжатой дуги в плазмообразующих средах на основе углеводородов // Топливо-плазменные горелки. — Киев: Наук. думка, 1977. — С. 44–47.
12. К проблеме снижения энергозатрат на плазменный розжиг и стабилизацию горения пылеугольного факела / С. В. Петров, А. Г. Саков, О. Л. Котляров, В. П. Яценко // *Технич. термодинамика*. — 2000. — № 3. — С. 85–87.
13. Петров С. В. Плазменная обработка низкорекционных углей // *Вісник Східн. укр. нац. ун-та ім. В. Даля*. — 2003. — № 11. — С. 71–79.
14. Мерсерле В. Е., Сакипов З. Б. Термохимический метод подготовки к сжиганию твердых топлив с использованием низкотемпературной плазмы // *Химия твердого топлива*. — 1988. — № 4. — С. 123–127.
15. Плазменный розжиг и стабилизация горения пылеугольных топлив / В. В. Бушуев, М. Ф. Жуков, Г. М. Мунгалов и др. // *Теплообмен в парогенераторах: Тез. докл. Всесоюз. конф., г. Новосибирск, 28–30 июня 1988 г.* — Новосибирск, 1988. — С. 12–13.
16. Термообработка угольной пыли плазменной струей в условиях промышленных котлов / В. С. Перегудов, Б. А. Поздняк, Л. И. Пугач и др. // *Высокотемпературные запыленные струи в процессах обработки порошковых материалов: Тез. докл. междунар. рабочего совещ., г. Новосибирск, 6–10 сент. 1988 г.* — Новосибирск, 1988. — С. 167–172.
17. Электрохимическая подготовка низкорекционных углей. Математическая модель и эксперимент / Р. А. Калинин, А. А. Левицкий, В. Е. Мерсерле, Ю. А. Миронин // *Химия высоких температур*. — 1990. — 24, № 3. — С. 272–277.
18. Экспериментальное исследование пиролиза бурых углей / З. Б. Сакипов, В. Е. Мерсерле, Ш. Ш. Ибраев и др. // Там же. — 1986. — 20, № 1. — С. 61–67.
19. Термохимическая подготовка бурых углей при различных избытках окислителей / В. Е. Мерсерле, З. Б. Сакипов, А. Б. Устименко // *Химия высоких энергий*. — 24, № 1. — С. 80–83.
20. Результаты стендовых испытаний плазменной стабилизации горения низкорекционных углей / З. Б. Сакипов, Э. Р. Эмажкуллов, В. Е. Мерсерле и др. // *Энергетика и электрификация*. — 1989. — № 2. — С. 14–16.
21. Носач В. Г., Заемонец В. Ф., Захаров Ф. И. Исследование термохимической защиты графитированных электродов // *Топливоплазменные горелки*. — Киев: Наук. думка, 1977. — С. 47–49.
22. Фролов В. А., Фридберг А. Э., Горяев Г. А. Исследование эрозии медновольфрамового анода электродугового нагревателя газа // Там же. — С. 49–51.
23. Пат. № 2132515 РФ, МКИ F 23 Q/00. Способ плазменного розжига и стабилизации горения пылеугольного факела / А. Т. Неклеса, А. И. Гаврилюк, В. В. Блинов. — Оpubл. 27.06.99.
24. А. с. № 1732119 СССР, МКИ F 23 Q 5/00. Устройство для воспламенения пылеугольного топлива / В. В. Булгаков, А. Н. Волобуев, Г. М. Мунгалов и др. — Оpubл. 07.05.92.
25. Пат. № 33029 України, МКВ F 23 Q5/00. Установка для плазмового розпалу і стабілізації горіння пилвоугільного факела / А. Т. Неклеса. — Оpubл. 15.08.02.
26. Пат. № 55429 України, МКВ F 23 Q 5/00. Пристрій для запалювання пилвоугільного палива / А. Т. Неклеса, В. С. Ключенко, В. В. Проців. — Оpubл. 15.04.2003.
27. Плазменно-енергетические технологии использования твердых топлив / В. Е. Мерсерле, З. А. Мансуров, А. Б. Устименко, Е. И. Карпенко // http://www.unesc.org/ie/capact/ppp/pdfs/plasmaenergy_kzkhstntxt.pdf.
28. Некоторые возможности обработки стали в дуговых и плазменных ковшах-печах / Г. А. Мельник, О. С. Забарилло, М. Л. Жадкевич и др. // *Пробл. спец. электрометаллургии*. — 2002. — № 1. — С. 26–31.
29. Перспективы использования плазменных источников теплоты в агрегатах внепечной обработки стали. Сообщ. 1, 2 / Г. А. Мельник, О. С. Забарилло, А. А. Ждановский и др. // Там же. — 1991. — № 2. — С. 60–66; № 3. — С. 86–92.
30. Трехфазные плазменные нагревательные комплексы и перспективы их применения. Сообщ. 1, 2 / Б. Е. Патон, Ю. В. Латаш, О. С. Забарилло и др. // Там же. — 1985. — № 1. — С. 50–55; № 2. — С. 53–57.
31. Справочник машиностроителя. — В 6 т. — Т. 2 / Под ред. Н. С. Ачеркана. — М.: Машиностроение, 1955. — 559 с.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

Поступила 07.02.2008