

УДК: 593.141;537.868

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДВУХКАМЕРНОГО ЭЛЕКТРОДУГОВОГО ПЛАЗМОТРОНА ЛИНЕЙНОЙ СХЕМЫ И ВЫБОР ЕГО ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

В.Г. Лукьященко<sup>1</sup>, В.Е. Мессерле<sup>2</sup>, А.Б. Устименко<sup>3</sup>, В.Н. Шевченко<sup>1</sup>, К.А. Умбеткалиев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем горения, 050012 Алматы, ул. Богенбай батыра, 172

<sup>2</sup>Институт Теплофизики СО РАН, 630070, Новосибирск, ул. академика Лаврентьева, 1

<sup>3</sup>Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики  
050040 Алматы, ул. аль-Фараби, 71, E-mail: ust@physics.kz

### Аннотация

В статье представлены результаты экспериментальных исследований двухкамерной (ДК) дуговой плазменной горелки линейной схемы в стендовых и промышленных условиях. Эта дуговая плазменная горелка предназначена для плазменного поджига угольной пыли, его стабилизация и бесперебойный запуск котлов тепловых электростанций на жидком топливе. Мощность плазменной горелки в соответствии с параметрами процесса может варьироваться в диапазоне от 80 до 230 кВт. Плазменная горелка отличается стабильно высокой мощностью воздушно-плазменной горелки. Измеренные вольтамперные характеристики плазменной горелки позволило определить область устойчивой дуги 350-475 А. Параметры плазменной горелки при номинальной мощности 200 кВт и в плазменном потоке газа 1000 л/мин достигаются при токе менее 450 А. Использование осевого и азимутального сканирования была применена в плазменной горелке катодного пятна. Это может увеличить срок службы катода до 200 часов в качестве ресурса массивного анода более 500 часов.

**Ключевые слова:** плазменно-топливные системы, плазмотрон, вольтамперная характеристика, устойчивое горения, электродуговой разряд

### Введение

Плазменно-топливные системы (ПТС) созданы для осуществления безмазутной растопки котлов, подхвата и стабилизации горения пылеугольного факела [1, 2]. ПТС представляет собой модифицированную пылеугольную горелку с установленным на ней электродуговым плазмотроном, являющимся основным элементом ПТС. Разработан электродуговой плазмотрон линейной схемы VORTEX-200 номинальной мощностью 200 кВт.

Мощность плазмотрона в зависимости от технологических параметров может варьироваться от 80 до 230 кВт. Плазмотрон характеризуется стабильными мощным воздушным плазменным факелом.

Испытания показали высокую надежность плазмотрона VORTEX-200 и возможность его эксплуатации в сложных условиях ТЭС (повышенная запыленность и влажность, высокие температуры вблизи котлов).

### Технологические характеристики плазмотрона

Экспериментальные исследования работы плазмотрона и выбор его оптимальных техно-

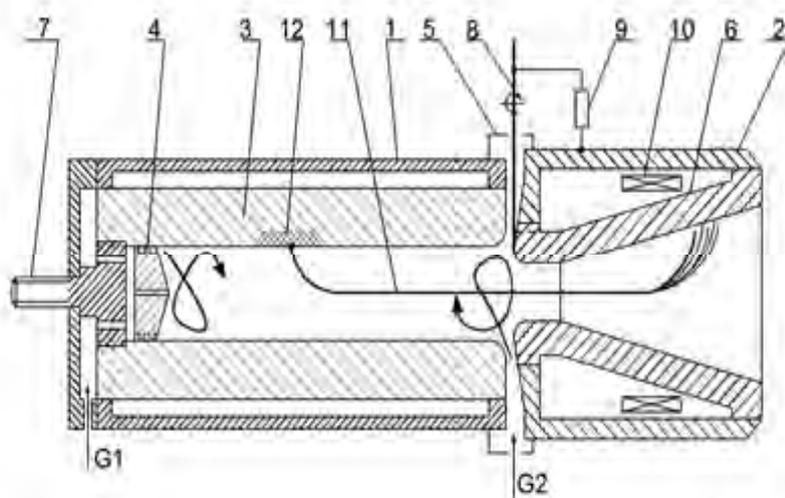
логических параметров проводились как на экспериментальном стенде, так и на пылеугольных горелках в условиях безмазутной растопки котлов БКЗ-420 и БКЗ-160 Алматинских ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3 [3].

Плазмотрон линейной схемы (рис. 1) содержит два водоохлаждаемых корпуса, изолированных друг от друга, в одном из которых установлен полый цилиндрический электрод - катод, с обоих торцов которого расположены завихрители плазмообразующего газа, а в другом установлен выходной электрод - анод-диффузор, имеющий канал с цилиндрическим участком в начале и выходное сопло в виде диффузора в конце. Плазмотрон работает следующим образом. В катодный и анодный узлы подается охлаждающая вода, а через завихрители подается плазмообразующий газ - воздух. На клемму плазмотрона - катода и клемму на корпусе анода подается напряжение постоянного тока от регулируемого источника электропитания. Причем на клемму катода - отрицательный потенциал, а на клемму корпуса анода - положительный. Затем с помощью иглы поджига, соприкасаемой одним концом с анодом и соединенной через токоограничивающее сопротивление с клеммой того же анода,

приводимой в колебательное движение реле и возвратной пружиной, в дуговом промежутке между анодом и катодом возникает искра и образуется электрическая дуга, которая под действием вихревого потока плазмообразующего газа, подаваемого через завихритель, выносится в полость, образованную катодом и анодом.

Поток газа от завихрителя, расположенного между анодом и катодом, разделяется на два вихревых потока: часть поднимается по катоду,

а вторая часть выходит в анод-диффузор с оптимальным углом раскрытия в диапазоне  $26 - 30^\circ$ . Катодный участок дуги вместе с опорным катодным пятном под действием вихревых потоков подвергается азимутальному сканированию и вращается внутри катода в плоскости, перпендикулярной оси плазмотрона, в которой встречаются пристеночные потоки от обоих завихрителей, при этом выработка внутренней части катода происходит в виде узкого кольца.



1 – Корпус катода, 2 – корпус анода, 3 – катод, 4 – катодный завихритель плазмообразующего газа, 5 – промежуточный завихритель плазмообразующего газа, 6 – анод-диффузор, 7 – шпилька токоподвода, 8 – игла поджига, 9 – токоограничивающее сопротивление, 10 – электромагнитная катушка, 11 – электрическая дуга, 12 – кольцо выработки внутренней части катода

Рис. 1 – Схема двухкамерного плазмотрона

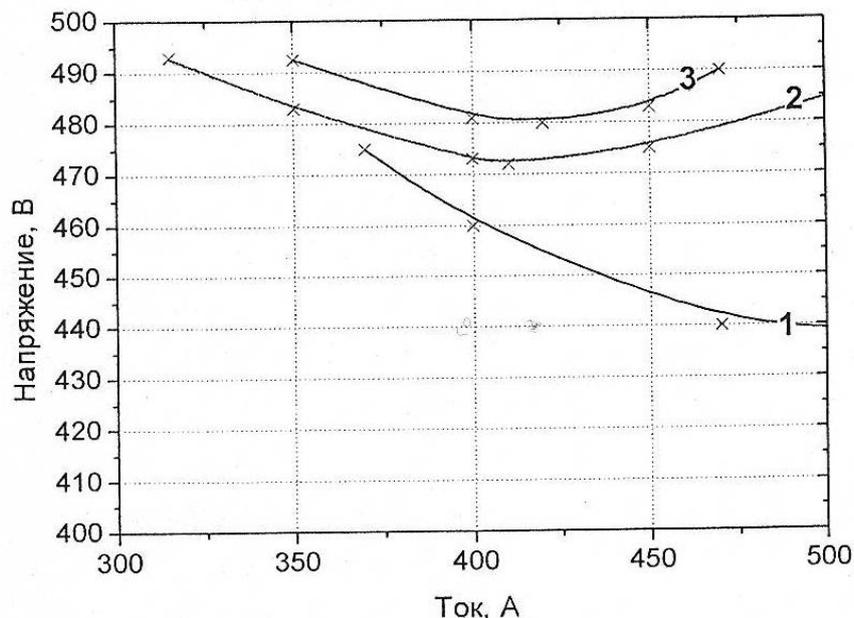
Как показали термодинамические и кинетические расчеты процесса воспламенения в плазменно-топливных системах (ПТС), устанавливаемых в рабочие горелки пылеугольного котла БКЗ-420, при мощности плазмотрона до 200 кВт среднемаховая температура воздушно-плазменного факела, генерируемого плазмотроном, не превышает 4000 К. Это соответствует расходу воздуха через плазмотрон 1000 л/мин ( $60 \text{ м}^3/\text{ч}$ ). Суммарное сечение сопел завихрителя катода ( $G_1$ ) и завихрителя анода ( $G_2$ ) было определено экспериментальным путем из расчета номинального расхода воздуха через плазмотрон при давлении воздуха на входе, не превышающем 2 атм.

Одним из основных технологических параметров плазмотронов являются их вольтамперные характеристики (ВАХ), характеризующие устойчивость горения электродугового разряда в плазмотроне. На рис. 2 приведены

ВАХ плазмотрона с различными рабочими параметрами. Кривая 1 характеризует ВАХ плазмотрона с сечением сопел закруточного кольца, равным  $39,26 \text{ мм}^2$ , суммарным расходом воздуха через плазмотрон 875 л/мин и диаметром пережима анода (диаметр его внутренней цилиндрической части), равным 27 мм. Из рисунка видно, что ВАХ в исследованном диапазоне слабопадающая. При повышении тока на 100 А напряжение падает примерно на 20 В. Для обеспечения устойчивого горения дуги, в таких случаях, в цепь электропитания плазмотрона устанавливают балластное сопротивление с возрастающей ВАХ. ВАХ 2 и 3 соответствуют плазмотронам с сечением сопел кольца закрутки  $64,3 \text{ мм}^2$  и суммарному расходу воздуха через плазмотрон 1000 л/мин при разных диаметрах пережима анода (27 и 24 мм соответственно). Из рисунка видно, что ВАХ плазмотронов 2 и 3 до токов 420 А слабопада-

ющие, а при дальнейшем увеличении тока начинают возрастать. Таким образом, в диапазоне токов 350-475 А плазмотроны работают наиболее устойчиво. Кривая 3 на рисунке лежит выше кривой 2, что объясняется повыше-

нием напряжения при большем обжати дуги плазмообразующим газом - воздухом, так как в режиме 3 пережим внутренней цилиндрической части анода был меньше, чем в режиме 2 и составлял 24 мм против 27 мм.



- 1 – Сечение сопел кольца закрутки  $S=39,26 \text{ мм}^2$ , диаметр пережима анода  $d=27 \text{ мм}$ , суммарный расход воздуха через плазмотрон  $G_{\text{в}}=875 \text{ л/мин}$ ;  
 2 –  $S=64,32 \text{ мм}^2$ ,  $d=27 \text{ мм}$ ,  $G_{\text{в}}=1000 \text{ л/мин}$ ;  
 3 –  $S=64,32 \text{ мм}^2$ ,  $d=24 \text{ мм}$ ,  $G_{\text{в}}=1000 \text{ л/мин}$ .

Рис. 2 – Вольтамперные характеристики плазмотрона

На рис. 3 приведены характеристики роста мощности плазмотронов от тока дуги, соответствующие их ВАХ (рис. 2). Из рисунка видно, что для всех трех случаев с увеличением тока растет и мощность, выделяемая в плазмотроне, но для режимов 2 и 3 мощность растет быстрее за счет большего напряжения.

Эрозия медных электродов определяется током дуги и с его ростом резко увеличивается. Поэтому экономически выгодно при равной мощности поднимать напряжение и уменьшать ток.

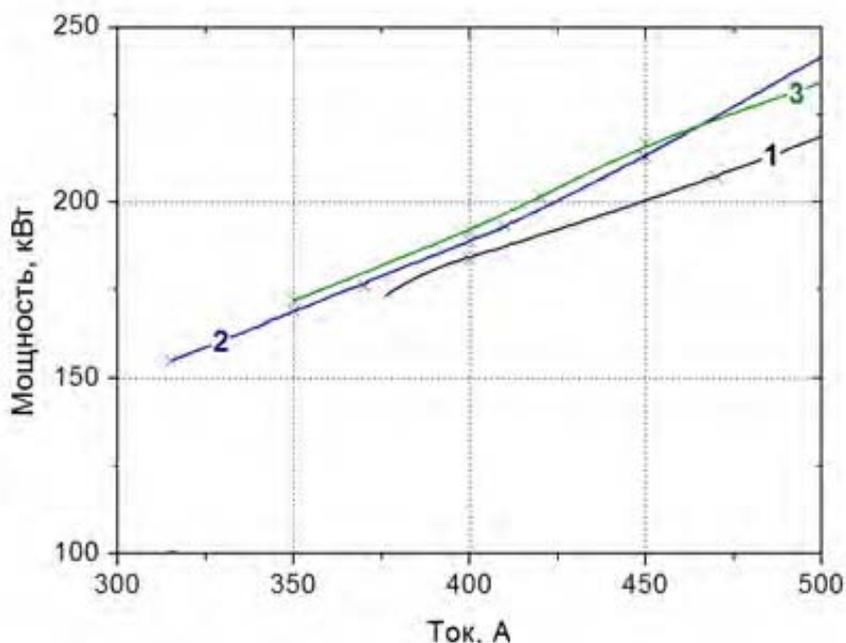
#### Сканирование катодного пятна дуги на внутренней поверхности катода

Поток газа от завихрителя, расположенного между водоохлаждаемым анодом и катодом, разделяется на два вихревых потока: часть поднимается по катоду, а вторая часть выходит в анод. Катодный участок дуги вместе с опорным катодным пятном под действием вихревых потоков подвергается азимутально-

му сканированию и вращается внутри катода в плоскости, перпендикулярной оси плазмотрона, в которой встречаются пристеночные потоки от обоих завихрителей, при этом внутренняя часть катода вырабатывается в виде узкого кольца. По оценке при такой выработке ресурс работы катода может составить 60-70 часов.

Эрозия электрода определяется массой выработанного (эродированного) материала электрода. Ресурс работы электрода зависит, в свою очередь, от распределения уноса материала электрода с его поверхности в результате эрозии. Известно, что чем больше подвергнутая эрозии поверхность электрода, тем выше ресурс его работы при одинаковых значениях тока [4].

Для повышения ресурса катода ширину зоны выработки его поверхности можно значительно увеличить путем осевого сканирования приэлектродного участка дуги изменением газодинамических параметров, в дополнение к азимутальному перемещению за счет крутки потока плазмообразующего газа.



- 1 –  $S=39,26 \text{ мм}^2$ ,  $d=27 \text{ мм}$ ,  $G_B=875 \text{ л/мин}$ ;  
 2 –  $S=64,32 \text{ мм}^2$ ,  $d=27 \text{ мм}$ ,  $G_B=1000 \text{ л/мин}$ ;  
 3 –  $S=64,32 \text{ мм}^2$ ,  $d=24 \text{ мм}$ ,  $G_B=1000 \text{ л/мин}$ .

Рис. 3 – Характеристики роста мощности плазмоторнов от тока дуги, соответствующие их вольтамперным характеристикам

Газодинамическое сканирование достигается изменением отношения  $G_2/G_1$  – расходов воздуха через завихрители плазмоторна, с помощью внешнего устройства, соединенного с ними патрубками, по синусоидальному закону с частотой от нескольких сотых долей до единиц Гц и амплитудой 10-20 % от средних значений  $G_1$  и  $G_2$ . При этом по указанному режиму изменяется один из расходов  $G_1$  и  $G_2$ , либо изменяются и  $G_1$  и  $G_2$  в противофазе. Как показали эксперименты, зона выработки внутренней поверхности катода вдоль оси плазмоторна, а, следовательно, и ресурс электрода могут быть увеличены в несколько раз.

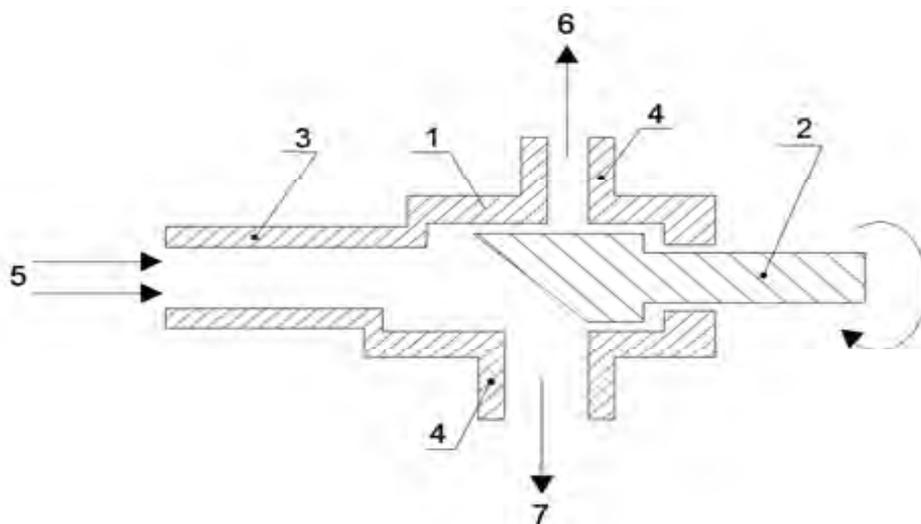
Было определено, что изменение отношения  $G_2/G_1$ , взятого за базовое (а), 15 % (б), 20 % (в) и 25 % (г) ведет к увеличению расстояния от следа катодного пятна до выходного торца катода соответственно на 60 % (б), 85 % (в) и 100 % (г). При этом кольцевой след привязки катодного пятна сдвигается с 22 мм (режим а) на 45 мм (режим г). Учитывая, что кольцевой след эрозии на поверхности катода составляет по ширине 8-12 мм, циклическое изменение отношения  $G_2/G_1$  на 25 % приведет к увеличению ширины кольца привязки дуги примерно в 3 раза.

Для реализации режима непрерывного сканирования катодного пятна вдоль оси плазмоторна было изготовлено устройство сканирования (УС) катодной привязки дуги. Принцип сканирования катодной привязки дуги основан на изменении анодного и катодного потоков плазмообразующего газа через плазмоторн. Изменение плазмообразующих потоков в данном устройстве происходит за счет изменения проходного сечения каналов подачи плазмообразующего газа. Поскольку суммарный поток газа (анодного и катодного) должен оставаться постоянным, то приращение потоков по анодному и катодному каналам подачи газа должно происходить в противофазе (сдвинуты друг относительно друга на 180°).

В основу УС положен принцип изменения проходного сечения газовой цепи подачи к плазмоторну плазмообразующего газа путем вращения заслонки определенной конфигурации. Принцип работы УС поясняет рис. 4. В цилиндрическом корпусе (1) находится вращающийся вал (2) со скосом специальной формы, который при вращении перекрывает отверстия выходных штуцеров (4). Через входной штуцер (3) плазмообразующий газ подается в УС. Для одновременного обеспече-

ния газом анодной и катодной ветвей в устройстве устанавливается два выходных штуцера (4) под углом, необходимым для по-

лучения сдвига фазы изменения газовых потоков (90-180).



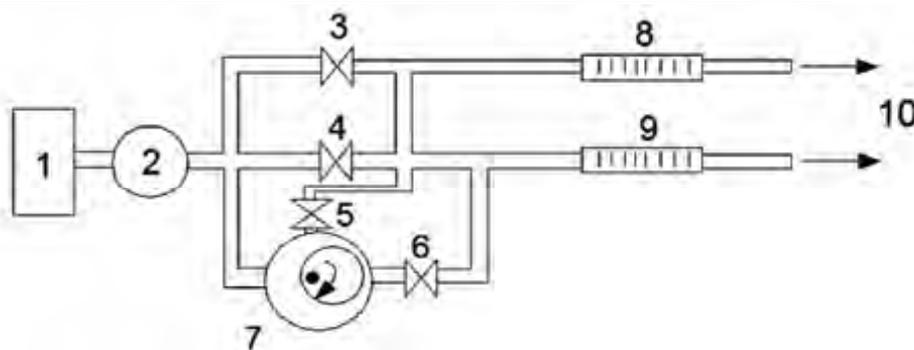
1 – корпус, 2 – вал, 3 – входной штуцер, 4 – выходные штуцера, 5 – плазмообразующий газ, 6 – плазмообразующий газ к катоду, 7 – плазмообразующий газ к аноду

Рис. 4 – Схема устройства сканирования

Экспериментально подобранный период изменения давления составляет 30 с при изменении давления в пределах 0,6-1,5 атм для анода и 0,6-1,3 атм для катода.

УС было изготовлено из бронзы для уменьшения трения вращающихся деталей. Размер и форма скоса вала определяют плавность приращения воздушного потока и отсутствие ступенчатости при переходе от макси-

мальных к минимальным значениям его расходов. Вращение вала обеспечивается электроприводом. В УС использовался электродвигатель РД с дополнительным червячным редуктором, обороты выходного вала которого обеспечили вращение вала УС со скоростью 1 об/мин. Схема включения УС в цепи управления плазмотроном показана на рис. 5.



1 – компрессор, 2 – воздушный редуктор, 3, 4, 5, 6 – регулирующие вентили, 7 – сканирующее устройство, 8, 9 – ротаметры анода и катода, 10 – плазмообразующий воздух к плазмотрону

Рис. 5 – Схема включения устройства сканирования в цепи управления плазмотроном

УС работает следующим образом. Плазмообразующий газ (воздух) поступает от компрессора 1 при давлении 6 атм с номинальным расходом 1500 л/мин через редуктор давления 2 и вентили 3 и 4 на ротаметры расхода возду-

ха в анодном и катодном каналах 8, 9. Вентили 3 и 4 регулируют расход воздуха на аноде и катоде при пусковом режиме (0,6 атм). На эти же ротаметры в противофазе подается дополнительный воздух от УС. УС обеспечивает

плавное нарастание расхода воздуха от пускового режима до рабочего режима (1,5 атм) и обратно по анодному и катодному каналам в противофазе. Таким образом, УС выполняет функцию приращения давления от пускового значения (0,6 атм) до рабочего (1,5 атм) с последующим снижением давления. После чего цикл повторяется.

При испытании УС с плазматроном "VORTEX-200" были получены следующие характеристики УС:

- изменение давления в цепи анода: 0,6-1,5 атм.;
- изменение давления в цепи катода: 0,6-1,4 атм.;
- изменение расхода воздуха в цепи анода: 570 - 660 л/мин;
- изменение расхода воздуха в цепи катода: 350-500 л/мин;
- время нарастания газового потока: 13 с;
- время уменьшения газового потока: 14 с;
- время стабильно максимального давления на катоде: 2 с;
- время стабильно минимального давления на катоде: 1 с;
- габаритные размеры (включая электропривод) – 230 мм x 100 мм x 80 мм;
- вес УС с электроприводом – 2,5 кг.

Использование СУ позволяет увеличить поверхность эрозии катода, что приводит к повышению ресурса работы электродов плаз-

мотрона. Сканирование привязки катодного пятна приводит к трехкратному увеличению поверхности эрозии медного электрода, что соответствует повышению ресурса работы катода до 200 часов. Ресурс работы массивного водоохлаждаемого анода составляет более 500 часов.

### Литература

1. Messerle V.E., Karpenko E.I., Ustimenko A.B., Lavrichshev O.A. Plasma preparation of coal to combustion in power boilers // Fuel Processing Technology, **2013**. V. 107. 93–98.
2. Messerle V.E., Ustimenko A.B. Plasma technologies for fuel conversion // High Temperature Material Processes. **2012**. V.16 (2). P. 97–107.
3. Мессерле В.Е., Карпенко Е.И., Устименко А.Б., Тютеебаев С.С., Карпенко Ю.Е., Еремина Т.В. Моделирование и испытания плазменно-топливных систем на котле БКЗ-420 Алматинской ТЭЦ-2 // Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления, Научный журнал. **2012**. № 2 (37). С. 21-27.
4. Перегудов В.С., Урюков Б.А. Область устойчивой работы плазматрона большой длины // Изв. СО АН СССР. - Сер. техн. наук. **1980**. Вып. 1. № 3. С. 71 - 73.

## EXPERIMENTAL STUDY OF TWO-CAMERA ELECTRIC ARC PLASMATRON OF LINEAR SCHEME AND CHOISE OF ITS OPTIMAL TECHNOLOGICAL PARAMETERS

V.G. Lukyachshenko<sup>1</sup>, V.E. Messerle<sup>2</sup>, A.B. Ustimenko<sup>3</sup>, V.N. Shevchenko<sup>1</sup>, K.A. Umbetkaliev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of combustion problems, 050012 Almaty, Bogenbai batyra, 172

<sup>2</sup>Institute of thermophysics of SB RAS, 630070, Novosibirsk, Academician Lavrentiev, 1

<sup>3</sup>Research institute for experimental and theoretical physics,

Almaty, Al-Farabi Kazakh National University av., 71, E-mail: ust@physics.kz

### Abstract

This paper presents the results of experimental studies dual-chamber DC arc plasma torch of linear circuit in bench and industrial conditions. This arc plasma torch is designed for plasma ignition of pulverized coal flame, its stabilization and fuel oil free start up boilers of thermal power plants. Power of the plasma torch according to the process parameters can vary from 80 to 230 kW. The plasma torch is characterized by stable high power air plasma torch. The measured current-voltage characteristics of the plasma torch allowed determining the area of sustainable arc 350-475 A. The parameters of the plasma torch at its rated capacity of 200 kW and a plasma gas flow of 1000 l/min are achieved at currents less than 450 A. Application of the azimuthal and axial scanning cathode spot plasma torch was applied. It can increase the life of the cathode up to 200 h at a resource of the massive anode more than 500 h.

**Keywords:** plasma-fuel systems, plasma torch, current-voltage characteristic, sustainable combustion, electric discharge

**СЫЗЫҚТЫ НОБАЙЛЫ ЕКІ-КАМЕРАЛЫ ЭЛЕКТРОДОҒАЛЫ ПЛАЗМОТРОННЫҢ  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛДЫ ЗЕРТТЕУЛЕР МЕН ОНЫҢ ОҢТАЙЛЫ ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ  
ПАРАМЕТРЛЕРІН ТАҢДАУ****В.Г. Лукьященко<sup>1</sup>, В.Е. Мессерле<sup>2</sup>, А.Б. Устименко<sup>3</sup>, В.Н. Шевченко<sup>1</sup>, К.А. Умбеткалиев<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Институт проблем горения, 050012 Алматы, ул. Богенбай батыра, 172<sup>2</sup>Институт Теплофизики СО РАН, 630070, Новосибирск, ул. академика Лаврентьева, 1<sup>3</sup>Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики  
050040 Алматы, ул. аль-Фараби, 71, E-mail: ust@physics.kz**Аннотация**

Бұл мақалада стендтік және өндірістік жағдайларда екі камералы доғалық плазмалық оттықтың сызықтық сұлбасының тәжірибелік зерттеулердің нәтижелері көрсетілген. Бұл доғалық плазмалық оттық көмір тозаңының плазмалық жануына арналған, оның біркелкі және көп мәселе тудырмайтындай сұйық жанармайлық жылу электростанциялардың қазандардың қосылуы үшін. Процесстің параметрлеріне байланысты плазмалық оттықтың қуаты 80-230 кВт арасындағы интервалда болады. Плазмалық оттық ауа-плазмалық оттықтың біркелкі жоғары қуатпен ерекшеленеді. Плазмалық оттықтың вольтамперлік қасиеттерін өлшеу доғаның тұрақтылығының аймағын 350-475 А анықтау үшін мүмкіндік берді. Номиналды қуаты 200 кВт болғанда және плазмалық газ ағының 1000 л/мин болуы токтың 450 А төмен болғанда қол жеткізіледі. Катодтық дақтың плазмалық оттығында осьтік және азимуттық сканирлеу қолданылған болатын. Бұл катодтың жұмыс істеу уақытын 200 сағатқа дейін ұзартуы мүмкін массивтік анодтың көзі ретінде 500 сағаттан артық уақытқа дейін.

**Түйінді сөздер:** плазмалық-отындық системалар, плазмотрон, вольтампер сипаттамалар, тұрақты жағу, электр разряд