

УДК 537.523.5

Электродуговой генератор плазмы водяного пара*

А.С. Аньшаков^{1,2}, Э.К. Урбах¹, С.И. Радько², А.Э. Урбах¹, В.А. Фалеев¹

¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

²Новосибирский государственный технический университет

E-mail: anshakov@itp.nsc.ru

Приведены результаты исследований дугового плазмотрона для нагрева водяного пара. Впервые реализована конструктивная схема генератора пароводяной плазмы с медными электродами ступенчатой геометрии. Энергетические характеристики плазмотрона и эрозия электродов отражают особенности их поведения при горении дуги в плазмообразующей среде водяного пара. Результаты численного исследования теплового состояния составных медно-стальных электродов существенным образом повлияли на оптимизацию водоохлаждения анода для повышения ресурса его работы.

Ключевые слова: водяной пар, плазмотрон, составной электрод, вольт-амперные характеристики, тепловые потоки, эрозия электродов, тепловой расчет.

Введение

Интерес к дуговой плазме водяного пара возник в 20-х годах прошлого века. В работе [1] сообщается об исследованиях Гердиена и Лотца, Меккера и Бурнхорна, посвященных измерениям напряженности электрического поля и температуры в столбе дуги, стабилизированной водяным вихрем. Из-за высокой температуры дугового разряда горение осуществлялось, по сути, в парах воды, диаметр водяной трубки практически был соизмерим с диаметром столба дуги. Измеренные температура и напряженность поля составили $50 \cdot 10^3$ К и 300 В/см соответственно.

В нашей стране исследования пароводяных генераторов относятся к 60-м годам XX века. В работах [2, 3] приведены экспериментальные результаты по вольт-амперным и эрозионным характеристикам плазмотронов с водяной и магнитной стабилизацией дуги. Показано, что эрозия электродов составляет $10^{-6} \div 10^{-7}$ кг/Кл, а истекающая плазменная струя заметно загрязнена электродными материалами.

Следующим важным шагом для получения плазмы водяного пара стал переход к конструкциям плазмотронов со стабилизацией дугового разряда паровым вихрем. Усилиями А.В. Болотова с сотрудниками (Алма-Ата) и Б.Д. Алымова с сотрудниками (Днепропетровск) было положено начало исследованиям пароводяных генераторов плазмы для практического использования при бурении крепких горных пород и добыче

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по Соглашению о субсидии № 14.613.21.0005 (уникальный идентификатор проекта RFMEF161314X0005).

руды в шахтах [4–7]. В результате проведенных исследований были установлены основные закономерности зависимости электрических характеристик от силы тока дуги, температуры и расхода водяного пара, а также КПД и удельная эрозия электродов. Например, показано, что при расходе пара $G_{\text{п}} = \text{const}$ падение напряжения на дуге с увеличением температуры пара (220–470 °С) уменьшается. То же самое наблюдается в зависимости КПД от температуры пара при $I = \text{const}$. Минимальная удельная эрозия электродов ($\bar{G} = 10^{-7}$ кг/Кл) получена при $T_{\text{п}} = 200\text{--}300$ °С.

Немного позднее к исследованиям пароводяных плазмотронов присоединился Б.И. Михайлов (Новосибирск) под руководством М.Ф. Жукова [8, 9]. Им были получены основополагающие данные по электрическим, тепловым и эрозийным характеристикам, по устойчивости горения дуги в паре и разработаны опытные образцы пароводяных плазмотронов различной мощности [10].

Интерес к пароводяной плазме обусловлен несколькими причинами. Благодаря своим уникальным свойствам по энтальпии, экологичности, широкой доступности она перспективна в технологических процессах металлургии, энергетики, машиностроения, плазмохимии. В технологиях переработки и утилизации техногенных отходов, газификации твердых топлив низкотемпературная плазма водяного пара является не только теплоносителем, но и активным реагентом в физико-химических реакциях. Наконец, пароводяной плазмотрон не образует вредных окислов азота.

Основная задача при создании генератора плазмы водяного пара заключается в том, чтобы не допустить каплеобразования и конденсации пара на водоохлаждаемых поверхностях электроразрядной камеры. В противном случае в любом сечении электродов или на элементах поверхности камеры будет происходить неконтролируемый пробой в промежутке дугового разряда — твердая стенка. При этом получить непрерывное устойчивое горение дуги невозможно. Кроме того, как показывает практика, нельзя обеспечить длительный ресурс работы электродов при попадании воды или паров воды в местах привязки опорных пятен дуги на их рабочей поверхности из-за быстрого разрушения материала электродов.

В настоящее время стационарно работающие пароводяные плазмотроны или модельные устройства обязательно включают в конструкцию термоэмиссионный (вольфрамовый) катод, для защиты которого от окислительной среды применяются аргон или чистый азот (при мощности устройств лабораторного назначения до 40–50 кВт и токе дугового разряда 100–150 А в качестве катода используется термохимический (гафниевый) катод без защитного газа). При этом разрядная камера плазмотрона имеет сложное конструктивное решение от конфузора до многоселевого (регенеративного) ввода пара [11–13]. Наличие защитного газа существенно загрязняет плазму водяного пара. Например, для плазмотрона ЭДП–217 при расходе пара $(1\text{--}5) \cdot 10^{-3}$ кг/с требуется расход азота в количестве $(0,5\text{--}0,7) \cdot 10^{-3}$ кг/с [10]. Это уже получается водоазотная плазма. Такой состав затрудняет проведение численных расчетов технологических процессов при использовании пароводяной плазмы.

Экспериментальная установка

Для устранения загрязнения плазменной струи инородными газами и упрощения конструкции дугового плазмотрона для нагрева водяного пара была предложена и реализована схема однокамерного плазмогенератора с медными электродами [14, 15]. Основу плазмотрона с паровихревой стабилизацией дугового разряда составляют два трубчатых медных электрода ступенчатой геометрии, разделенных изолятором и завихрителями (рис. 1). Внутренний электрод I является анодом ($d_1 = (18\text{--}21,5) \cdot 10^{-3}$ м),

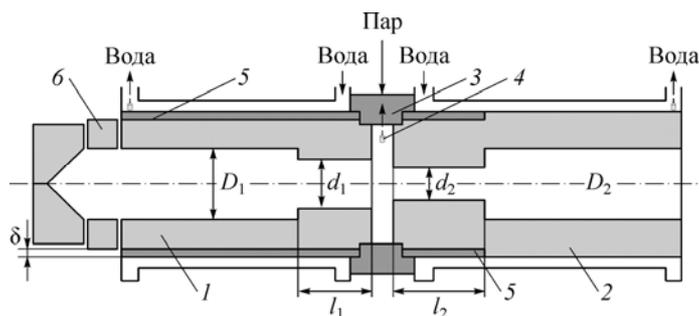


Рис. 1. Конструктивная схема пароводяного плазмотрона.

1 — анод, 2 — катод, 3 — изолятор, 4 — кольцо закрутки, 5 — стальная обечайка, 6 — изолятор.

выходной электрод 2 — катодом ($d_2 = (14,5-17) \cdot 10^{-3}$ м). Соотношения D_1/d_1 и D_2/d_2 лежат в интервале 1,4–1,6. Длины участков электродов до уступа $l_1 = (18-24) \cdot 10^{-3}$ м и $l_2 = (28-31) \cdot 10^{-3}$ м в экспериментах выбирались из условия горения дуги за уступами. Общая длина электродов L_1 и $L_2 = 180 \cdot 10^{-3}$ м. Толщина стенки медного электрода за уступом равна $7 \cdot 10^{-3}$ м, толщина стальной обечайки $\delta = 6,5 \cdot 10^{-3}$ м. Изолятор 6 предотвращает попадание опорного пятна дуги на торец задней крышки. Постановка в этом месте завихрителя переводит конструкцию плазмотрона в двухкамерный вариант. Кольцо закрутки 4 имеет два ряда тангенциальных отверстий. Через один ряд в плазмотрон на стадии запуска поступает подогретый до 160 °С воздух, через другой — водяной пар с температурой $250-350$ °С.

Для исключения конденсации пара на водоохлаждаемых электродах необходимо поддерживать температуру их рабочих поверхностей выше температуры насыщенного пара. Достигается это косвенным охлаждением медных электродов путем применения цилиндрической обечайки 5 из нержавеющей стали 12Х18Н10Т с толщиной стенки δ по всей длине анода и на начальном участке катода до уступа (коэффициенты теплопроводности $\lambda_{\text{cu}} = 331$ ккал/(м·ч·град) и $\lambda_{\text{ст}} = 13,8$ ккал/(м·ч·град)). Участок выходного электрода за уступом, где находится опорное пятно дуги, охлаждается непосредственно водой. Первоначально толщина стенки трубчатой стальной обечайки δ рассчитывалась для двухслойной стенки при заданном коэффициенте теплоотдачи от охлаждаемой поверхности электрода к потоку воды, который рассчитывался в первом приближении по методике [16] и был принят равным 8200 Вт/(м²·К) при расходе охлаждающей воды $0,3$ кг/с. При этом предусматривалось, чтобы обечайка в процессе расширения медного слоя электрода не подвергалась деформации. Затем толщина и конфигурация стенки стальной обечайки 5 рассчитывались для составного электрода-анода на ПК ANSYS [17]. Расчет проводился для реальных тепловых потоков от дугового разряда в стенку электрода при измеренных температурах анода на входном участке и в конце его (результаты расчета смотри ниже).

Нагреватель воздуха представляет собой змеевик из трубки внутренним диаметром 6 мм. Материал — нержавеющая сталь, нагрев трубки осуществляется электрическим током (постоянным или переменным). Скорость и расход воздуха — теплоносителя — должны обеспечивать теплообмен в условиях турбулентного режима течения. Длина трубки для заданного расхода воздуха выбирается по параметрам имеющегося источника электропитания с регулируемой силой тока. Температура воздуха на входе в разрядную камеру контролируется хромель-алюмелевой термопарой и составляет не ниже 160 °С.

Для генерации водяного пара разработан парогенератор с принудительной циркуляцией воды. Он состоит из змеевика переменного сечения (чередование трубок

из нержавеющей стали диаметром 6 и 8 мм) и демпфера, который служит для сглаживания гидродинамических пульсаций, которые возникают на испарительном участке парогенератора. Нагрев змеевика осуществляется от управляемого источника тока АПР-404. Расход вырабатываемого водяного пара от $2 \cdot 10^{-3}$ до $5 \cdot 10^{-3}$ кг/с определялся по расходу воды. Температура пара на входе в разрядную камеру плазмотрона измеряется хромель-алюмелевой термопарой и цифровым мультиметром М-838 с точностью $\pm 2\%$. Применение уступов в трубчатых электродах в дуговом плазмотроне обеспечивает сокращение длины дуги по сравнению с использованием в нем полых цилиндрических электродов, а также требуемый размах колебаний приэлектродных участков по рабочей поверхности для обеспечения технологического ресурса работы электродов. Основное внимание в проводимых исследованиях уделялось внутреннему электроду-аноду по двум причинам. Известно, что эрозия медного трубчатого анода существенно меньше эрозии катода в одинаковых условиях. Кроме того, при переходе в режим плавильного плазмотрона проще добиться длительного ресурса работы электрода, если он будет анодом.

Выходной электрод-катод сделан заведомо длинным, чтобы исключить выход дугового пятна на торец электрода или наружный корпус при изменении силы тока разряда.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Вольт-амперные характеристики дуги. Они являются важнейшей энергетической характеристикой электродугового плазмотрона. При заданных геометрических размерах разрядной камеры они определяют область устойчивого горения дугового разряда и являются определяющими для выбора параметров источника электропитания.

Поскольку запуск пароводяного плазмотрона осуществляется на горячем воздухе с последующим переходом на водяной пар, то необходимо проследить за динамикой изменения напряжения на дуге. Установлено, что уже при небольшом расходе пара $G_{\text{п}}$ к плазмообразующему воздуху напряжение резко возрастает, а при последующем увеличении $G_{\text{п}}$ и уменьшении расхода воздуха $G_{\text{в}}$ (при этом сумма $G_{\text{п}} + G_{\text{в}} = \text{const}$) напряжение на дуге увеличивается гораздо медленнее [15].

На рис. 2 приведены сравнительные вольт-амперные характеристики дуги при работе плазмотрона на воздухе и на водяном паре при одинаковых расходах рабочей среды. Видно, что напряжение на дуге при горении в водяном паре в 1,3–1,35 раз выше, чем на воздухе. Измеренная средняя по длине дуги напряженность поля E в паре составила 18–20 В/см. Как известно, E в плазмотронах с самоустанавливающейся длиной дуги, стабилизированной воздушным вихрем, составляет 12–14 В/см. То есть различие в условиях горения дугового разряда на оси электродов при наличии или отсутствии водородсодержащей среды существенно сказывается на величинах падения напряжения на дуге.

На рис. 3 приведены вольт-амперные характеристики дуги в водяном паре. В исследованном диапазоне токов они имеют падающий вид, так как оба радиальных участка

дуги свободно перемещаются в осевом направлении несмотря на наличие уступов в электродах. Заметим, что в однокамерном плазмотроне для нагрева воздуха с выходным ступенчатым электродом и торцевым катодом вольт-амперные характеристики дуги

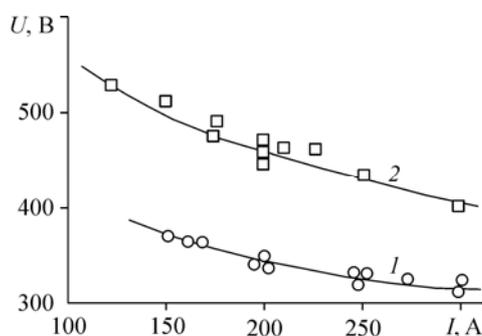


Рис. 2. Сравнительные вольт-амперные характеристики дуги в воздушной среде (1) и в водяном паре (2).

$$G = 4,1 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с.}$$

Рис. 3. Вольт-амперные характеристики дуги в водяном паре.

Расход пара: $3 \cdot 10^{-3}$ (1), $4 \cdot 10^{-3}$ (2), $5 \cdot 10^{-3}$ (3) кг/с.

имеют возрастающий вид при $I/d \approx 100$ А/см [18]. Здесь же приведены линии равных мощностей (пунктиры), показывающие устойчивую связь диапазона рабочих параметров плазмотрона с исследуемыми геометрическими размерами разрядной камеры.

Полученные вольтамперные характеристики дуги обобщены в критериальном виде (все величины в системе СИ):

$$U = 2280 (I^2/Gd_2)^{-0,17} (G/d_2)^{0,20} (pd_2)^{0,25},$$

диапазон определяющих параметров составляет: $I^2/Gd_2 = 1,79 \cdot 10^8 - 1,61 \cdot 10^9$ А·с/(кг·м), $G/d_2 = 0,161 - 0,269$ кг/(м·с), $pd_2 = 20,4 \cdot 10^{-2}$ Па·м, где d_2 — диаметр выходного электрода до уступа (рис. 1). Точность формулы невелика ($\pm 10\%$), но польза от нее очевидна для оценочных расчетов разрядной камеры плазмотрона другой мощности.

Тепловые потоки в электроды. Они измерены калориметрическим методом в диапазонах силы тока разряда — 150–300 А и расходов воздуха и водяного пара — $3 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-3}$ кг/с. Как и ожидалось, основные тепловые потери приходятся на выходной электрод (в 3,4 раза больше, чем в анод), а по величине они практически одинаковы для воздуха и водяного пара. Последнее можно объяснить разницей интегральных коэффициентов поглощения воздуха и пара, когда лучистая составляющая теплового потока в паре меньше, чем в воздушной среде. С другой стороны, тепловые потоки в электроды от дуговых пятен в обеих плазмообразующих средах примерно одинаковы. Но кондуктивная составляющая в паре выше, чем в воздухе. Наконец, вкладываемая в дуговой разряд мощность на паре больше, чем на воздухе. Совместное разнонаправленное действие указанных факторов приводит к равным значениям тепловых потоков в электроды при горении дуги в рассматриваемых средах.

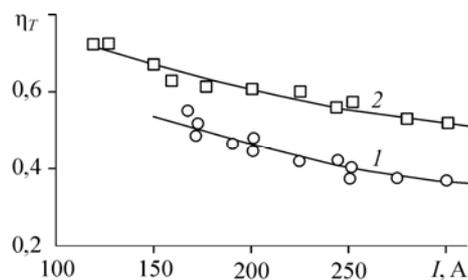
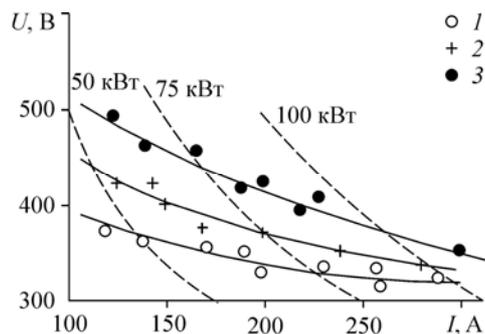
В результате измерений тепловых потерь в стенки разрядной камеры $Q_{\text{п}}$ проведен расчет теплового КПД плазмотрона по формуле $\eta_{\text{T}} = 1 - Q_{\text{п}}/U \cdot I$. Полученные данные при одинаковых расходах воздуха и пара приведены на рис. 4. КПД пароводяного плазмотрона составляет 0,55–0,70 и превышает данные при работе на воздухе. Аналогичные значения КПД получены для пароводяных плазмотронов с торцевым термокатодом [10]. Оптимизация длины выходного электрода-катода в струйном режиме работы позволит повысить КПД плазмотрона до 0,8, а в плавильном режиме — до 0,85–0,9.

Тепловой расчет составного трубчатого электрода. Обратимся к схеме исходного внутреннего электрода-анода (рис. 5), состоящего из медной трубки с обратным уступом и стальной обечайки (заштрихованные области), и назовем электрод составным (медносталльным).

Разработка требуемой конструкции составного трубчатого электрода с минимальной эрозией является сложной инженерной задачей. Для ее успешного решения необходимо

Рис. 4. Зависимость теплового КПД плазмотронов от тока дуги при работе на воздухе (1) и водяном в паре (2).

$G = 4 \cdot 10^{-3}$ кг/с.



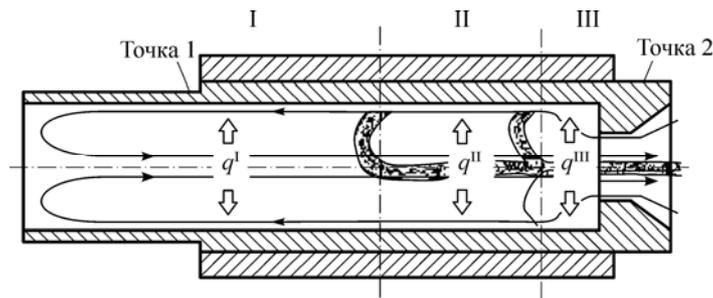


Рис. 5. Схема составного электрода-анода.
I–III — характерные зоны тепловых потоков.

рассчитать оптимальные характеристики самого рабочего режима плазмотрона, которые зависят от многих факторов, а именно: от расхода рабочей среды в разрядную камеру плазмотрона, от расхода охлаждающей жидкости, от формы охлаждающей поверхности электрода, от вводимой мощности дуги в пароводяной плазмотрон.

Одной из основных целей проведения теплового расчета является нахождение оптимальных условий охлаждения составного электрода для достижения на всей его рабочей поверхности температуры 100–150 °С. Известно, что с повышением температуры анода от 100 до 300 °С удельная эрозия электрода возрастает от $2 \cdot 10^{-10}$ до $1 \cdot 10^{-9}$ кг/Кл [19]. Поэтому задача фиксирования температуры внутренней стенки электрода в области 110–125 °С будет определять длительность его работы.

При фиксированном токе (200 А) были сделаны замеры тепловых потерь в стенку внутреннего электрода калориметрическим методом, которые составили 5000 Вт. С помощью установки двух хромель-алюмелевых термопар в определенных местах (точки 1 и 2 на рис. 5) были сняты значения температур в определенные промежутки времени. В установившемся режиме горения дуги (через 15–25 мин. после запуска) температура в точке 1 составляла 72–75 °С, в точке 2 — 260–290 °С. Целью измерения температур являлось сравнение их с данными, полученными расчетным путем. На рис. 5 стрелками указано движение водяного пара внутри камеры и местоположение радиального участка дуги в зоне перемещения за уступом с учетом крупномасштабного шунтирования.

В распределении тепловых потоков в стенку внутреннего трубчатого электрода по длине можно выделить три зоны: I — зона минимальных тепловых потоков, II — зона максимальных тепловых потоков, III — зона входа и истечения нагретого газа (рис. 5). Конечно, такое деление на зоны условно, резкой границы между ними нет, однако представляется, что оно соответствует физической картине протекающих процессов.

Зона I. Рабочее тело движется вдоль электрода у его стенки и возвращается обратно по его оси. Тепловой поток в стенку области I состоит лишь из конвективного теплового потока: $q^I = q_k^I$.

Зона II. Район горения дуги. Опорное пятно дуги не только вращается по рабочей поверхности электрода, но и перемещается вдоль оси в определенных границах. В экспериментах длина зоны II составляла $\approx 1,5 \div 2D_1$. Здесь к тепловому потоку от горячего газа добавляется энергия, подводимая путем переноса заряженных частиц от дугового пятна. Действительно, анализ эродированных следов на электроде совпадает с областью максимальных тепловых потоков. Тепловой поток в стенку области II состоит из: $q^II = q_k^II + q_{и}^II + q_{ч}^II$, где $q_{и}^II$ — лучистый поток, $q_{ч}^II$ — поток от заряженных частиц.

Зона III. В пристенной области водяной пар движется в направлении к зоне II, а в приосевой области нагретый пар движется в противоположном направлении. Таким образом, тепловой поток в стенку области III состоит из: $q^III = q_k^III + q_{и}^III$.

В количественном отношении тепловой поток зоны I намного меньше тепловых потоков зон II и III. В свою очередь в зоне II не наблюдается существенного превышения теплового потока в стенку по сравнению с зоной III. Анализ рабочей поверхности электрода указывает на то, что электрод разрушается только в зоне местонахождения опорного пятна дуги.

На основании полученных данных в первом приближении можно сделать вывод, что в область стенки, соответствующую зонам II и III (рис. 5), поступает около 70–75 % тепла, которое впоследствии передается охлаждающей воде, а остальные 25–30 % тепла поступают в область стенки, соответствующую зоне I.

Интерфейс ANSYS позволяет достаточно просто и эффективно выбирать материалы и их свойства различным слоям конструкции. На выбор пользователя предлагается большой набор нагрузок для задания граничных условий. В нашем случае для определения граничных условий необходимы следующие исходные данные: геометрические размеры электрода; коэффициент теплоотдачи, который обеспечивается подачей охлаждающей жидкости на внешнюю поверхность электрода; распределение тепловых потоков на внутренней поверхности электрода. Все эти экспериментальные данные для реальной конструкции плазмотрона имеются. Решатели ANSYS обеспечивают основу для получения высокоточных результатов анализа, используя которые можно получить оптимальные параметры конструкции электрода.

На рис. 6а, 6б представлено два типа составного электрода. График на каждом из них показывает температурное распределение на внутренней поверхности электрода до уступа. При решении этих вариантов к изменяемым параметрам относятся следующие: конфигурация водоохлаждаемой обечайки и коэффициент теплоотдачи охлаждаемой поверхности, который изменялся в соответствии с этой конфигурацией (пределы изменения составили от 3 до 25 кВт/(м²×К)). Геометрические параметры медного слоя и распределение тепловых потоков в стенку электрода оставались без изменений и соответствовали вышеописанным параметрам.

На рис. 6а представлено численное решение модели составного электрода для плазмотрона, на котором непосредственно проводились эксперименты (здесь $l_1 = 18 \cdot 10^{-3}$ м (рис. 1)). Основным недостатком данной конструкции, как видно из графика, состоит в том, что она не обеспечивает требуемый температурный режим на внутренней поверхности электрода в зоне нахождения опорного пятна дуги. Участок, температура которого входит в диапазон 100–150 °С, очень мал (на графике отмечен пунктирными линиями). Поэтому не стоит надеяться на низкие значения удельной эрозии анода. Рассмотренные схемы составных электродов, когда обечайка выполнена в форме конфузора из алюминия (в зонах II и III, рис. 5) и стали (в зоне I), не дали положительных результатов.

На рис. 6б представлен наиболее оптимальный тип составного внутреннего электрода, так как он учитывает все недостатки других вариантов. На внешней поверхности второго слоя в наиболее нагруженной области (зоны II и III) нарезана четырехзачодная трапециевидальная резьба. Такой конструктивный прием приводит к турбулизации охлаждающего потока, что в свою очередь приводит к увеличению коэффициента теплоотдачи в несколько раз и, как итог, к более интенсивному охлаждению составного электрода. При этом в менее нагруженной области (зона I) поток воды остается ламинарным и отток тепла от второго слоя не такой значительный. Такая ситуация позволяет фиксировать требуемую температуру на внутренней медной поверхности электрода в месте пребывания опорного пятна дуги и оптимизировать его удельную эрозию. Последующие эксперименты подтвердили справедливость расчетного материала, приведенного на рис. 6б.

Удельная эрозия электрода–анода. Важнейшей характеристикой эффективности и надежности пароводяного, как и любого другого, плазмотрона является ресурс работы электродов. В настоящей работе проведены экспериментальные исследования удельной

эрозии электродов $\bar{G} = \Delta m/I \cdot t$, кг/Кл, где Δm — масса эродированного материала, определяемая методом взвешивания электрода до и после эксперимента в течение времени t , с. Время испытаний составляло от 20 мин. до 2 часов при токах дугового разряда 180–200 А. Расход водяного пара был примерно постоянным и составлял $4 \cdot 10^{-3}$ кг/с. Результаты экспериментов для внутреннего электрода–анода приведены на рис. 7 (данные по \bar{G} для выходного электрода–катода располагаются несколько ниже — в диапазоне 10^{-9} – 10^{-8} кг/Кл).

Здесь необходимо сделать следующие замечания.

1. Температура сухого перегретого пара на входе в разрядную камеру плазмотрона составляет около 300 °С. Можно предположить, что и рабочая поверхность электрода в месте расположения опорных пятен дуги близка к этой температуре. Тогда по аналогии с воздушной плазмой [18] минимальное значение \bar{G} будет составлять 10^{-9} кг/Кл. Для того, чтобы получить величину удельной эрозии \bar{G} анода на уровне 10^{-10} кг/Кл, необходимо снизить температуру рабочей поверхности электрода путем косвенного охлаждения до 110–125 °С.

По результатам расчета распределения температуры вдоль электрода–анода была изменена система охлаждения стальной обечайки за счет ее профилирования (рис. 6*b*). К сожалению, трапецеидальная резьба была нарезана на всей длине нержавеющей трубки (обечайки), что могло привести к захлаживанию участка электрода в зоне I (рис. 5) и появлению здесь конденсации пара или даже капелек воды. В таком случае получить величину \bar{G} на уровне 10^{-9} – 10^{-10} кг/Кл (как на воздухе) не удастся. Для проверки этих предположений необходимо проведение новой серии экспериментов.

2. Критерий работоспособности анода в виде $G/pD_1 \geq 4 \cdot 10^{-6}$ [18] по техническим причинам не выполняется из-за малого расхода газа (здесь G — расход водяного пара, кг/с; p — давление в разрядной камере, Па; D_1 — диаметр анода за уступом, м). Необходимо его увеличение в 2,5–3 раза для выполнения указанного неравенства. Повышение расхода газа положительно скажется и на величине теплового КПД плазмотрона (при $I = 200$ – 300 А значение η_T увеличится примерно на 10 %).

Полученный результат исследований удельной эрозии (рис. 7) можно признать вполне удовлетворительным. Во-первых, его не с чем сравнить в мировой литературе. Имеющиеся данные по эрозии медных трубчатых анодов относятся к выходному электроду. Например, в паровихревом плазмотроне с торцевым гафниевым катодом

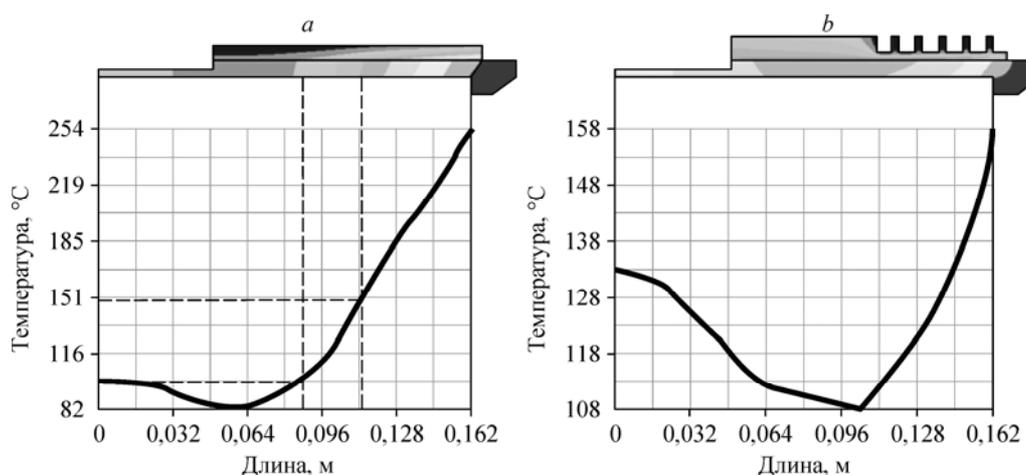


Рис. 6. Распределение температуры по длине рабочей поверхности электрода.
a — трубчатая стальная обечайка, *b* — конфигурация стальной обечайки с трапецеидальной резьбой.

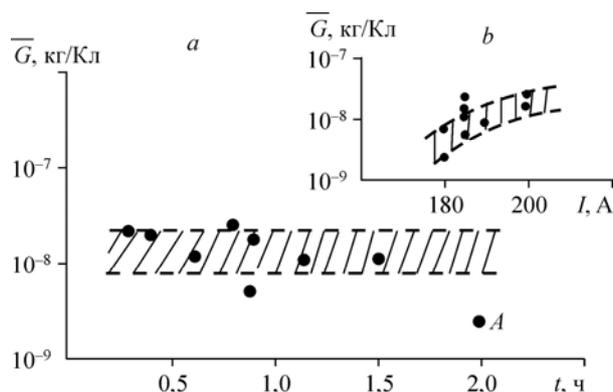


Рис. 7. Зависимость удельной эрозии анода от времени испытаний (а) и тока дугового разряда (б).
Расход водяного пара $G_{\text{п}} \approx 4 \cdot 10^{-3}$ кг/с, $D_1 = 30 \cdot 10^{-3}$ м.

при $d_A = 18 \cdot 10^{-3}$ м и расходе пара $G = 2,2 \cdot 10^{-3}$ кг/с с температурой 300 ± 50 °С в диапазоне токов 100–550 А удельная эрозия анода составила $(2-6) \cdot 10^{-10}$ кг/Кл (при наличии соленоида с индукцией осевого магнитного поля в области рабочего участка анода 0,026 Тл) [10]. Во-вторых, частичное изменение конфигурации стальной обечайки на основе численных расчетов привело к заметному снижению удельной эрозии электрода (см. точку А на рис. 7, $\bar{G} = 1,7 \cdot 10^{-9}$ кг/Кл). В-третьих, по аналогии с плазмотронами для нагрева воздуха необходимо обеспечить высокую скорость перемещения дугового пятна — около 20 м/с (за счет увеличения расхода пара или применением внешнего магнитного поля). За счет оптимизации системы водоохлаждения требуется довести температуру рабочей поверхности электрода до минимальной температуры выше насыщенного пара (порядка 110 °С). При соблюдении этих условий возможно получение значений \bar{G} анода на уровне 10^{-10} – 10^{-9} кг/Кл для обеспечения длительной непрерывной работы электродов.

В настоящее время для исследованной конструктивной схемы пароводяного плазмотрона с учетом достаточно протяженной эродированной зоны (0,12–0,13 м за уступом) ресурс работы электродов можно оценить в 250–300 ч при токе дугового разряда 180–250 А.

Заключение

1. Разработана принципиально новая конструктивная схема электродугового плазмотрона с медными трубчатыми электродами ступенчатой конфигурации для генерации пароводяной плазмы без применения загрязняющих ее состав инородных газов (азот, аргон).

2. Экспериментально исследованы электрические, тепловые и ресурсные характеристики пароводяного плазмотрона мощностью 40–100 кВт, отражающие особенности горения дугового разряда в водяном паре с температурой 300 ± 50 °С.

3. Численные результаты исследований распределения температуры по длине составного электрода с помощью ПК ANSYS показали адекватность в сравнении с экспериментальными данными. Они позволили установить оптимальную конструктивную конфигурацию трубчатого составного электрода для реализации заданного интервала температур на рабочей поверхности анода.

4. Полученные экспериментальные данные по эрозии электродов с учетом обширной эродированной зоны за уступами позволяют обеспечить ресурс их работы порядка 250–300 ч при силе тока дугового разряда 150–250 А.

Список литературы

1. Финкельбург В., Меккер Г. Электрические дуги и термическая плазма. М.: Изд-во иностранной литературы, 1961. 370 с.
2. Даутов Г.Ю., Жуков М.Ф. Некоторые результаты исследований свойств дуги, стабилизированной водой // ПМТФ. 1962. № 2. С. 32–36.
3. Рудяк Э.М., Болотов А.В., Кудасов Б.М. Энергетические характеристики водяного плазматрона // Тезисы докл. VI Всесоюз. конф. по генераторам низкотемп. плазмы. Фрунзе: ИФМ АН Кирг. ССР, 1974. С. 177–180.
4. Алымов Б.Д., Полуянский С.А., Галяс А.А. и др. Исследование тепловых параметров плазменных горелок, работающих на воздухе, воздушно-водяной смеси, паре // Тр. IV Всесоюз. конф. «Физика, техника и применение низкотемпературной плазмы», Алма-Ата, 1–3 декабря 1970. Алма-Ата: КазПТИ, 1970. С. 551–553.
5. Болотов А.В., Кудасов Б.М., Рудяк Э.М., Касьянов В.Е. К вопросу создания генераторов водяной плазмы для разрушения горных пород // Тр. IV Всесоюз. Конф. «Физика, техника и применение низкотемпературной плазмы», Алма-Ата, 1–3 декабря 1970. Алма-Ата: КазПТИ, 1970. С. 556–558.
6. Болотов А.В., Рудяк Э.М., Кудасов Б.М., Касьянов В.Е., Деграф Э.Д. Исследование характеристик электрической дуги, обдуваемой водяным паром в плазматроне двухстороннего истечения // Тез. докл. V Всесоюз. Конф. по генераторам низкотемп. плазмы. Т. I. Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1972. С. 218–221.
7. Алымов Б.Д., Полуянский С.А., Лебедев В.Я. Исследование параметров вихревого плазматрона, работающего на водяном паре // Тез. докл. V Всесоюз. конф. по генераторам низкотемп. плазмы. Т. I. Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1972. С. 222–225.
8. Михайлов Б.М., Ефремов В.П. Исследование линейных электродуговых генераторов водяной плазмы // Мат. к VII Всесоюз. конф. по генераторам низкотемп. плазмы. Т. 1. Алма-Ата: АЭИ, 1977. С. 15–18.
9. Михайлов Б.И. Анализ работы пароводяных плазматронов // Тез. докл. VIII Всесоюз. конф. по генераторам низкотемп. плазмы. Ч. 3. Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1980. С. 68–71.
10. Жуков М.Ф., Засыпкин И.М., Тимошевский А.Н., Михайлов Б.И., Десятков Г.А. Электродуговые генераторы термической плазмы // Новосибирск: Наука, 1999. 712 с.
11. А. с. СССР №792614, кл. H05 B7/18. Электродуговой подогреватель газа / Аньшаков А.С., Ефремов В.П., Жуков М.Ф., Михайлов Б.И. // Открытия. Изобретения. 1980. № 48. Патент: БИ, 1997. № 15. 262 с.
12. Михайлов Б.И. Электродуговые генераторы пароводяной плазмы. Ч. 2 // Теплофизика и аэромеханика. 2003. Т. 10, № 4. С. 637–657.
13. Charakhovski L., Marquesi A., Otani C., Petraconi G., Bicudo R., da Silv A.S. Steam plasma torch with regenerative cooling // VII Int. Conf. Plasma Physics and Plasma Technology, Minsk, Belarus, Sept. 17–21, 2012. Vol. II. Minsk: IPh NASB, 2012. P. 723–726.
14. Anshakov A., Urbakh E., Radko S., Urbakh A., Faleev V., Ma T., Xin F. Electric-arc steam heater with copper tubular electrodes // Contr. VII Int. Conf. Plasma Physics and Plasma Technology, Minsk, Belarus, Sept. 17–21, 2012. Vol. II. Minsk: IPh NASB, 2012. P. 727–729.
15. Аньшаков А.С., Радько С.И., Урбах Э.К., Урбах А.Э., Фалеев В.А. Электродуговой плазматрон для нагрева водяного пара // Теплофизика и аэромеханика. 2012. Т. 19, № 6. С. 761–763.
16. Основы расчета плазматронов линейной схемы / Под общ. ред. М.Ф. Жукова. Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1979. 148 с.
17. Радько С.И. Тепловой расчет составного трубчатого электрода в пароводяном плазматроне // Научный вестник НГТУ. 2013. № 4(53). С. 210–214.
18. Чердинченко В.С., Аньшаков А.С., Кузьмин М.Г. Плазменные электротехнологические установки. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. 602 с.
19. Михайлов Б.И., Тимошевский А.Н., Урбах Э.К. Влияние температуры цилиндрических электродов на их эрозию // Изв. СО АН СССР. Серия техн. наук. 1985. № 10, вып. 2. С. 69–73.

*Статья поступила в редакцию 17 июня 2014 г.,
после доработки — 29 сентября 2014 г.*