

На правах рукописи

МЕРКУЛОВ ВАЛЕРИЙ ВИКТОРОВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПЛАЗМОТРОНА С САМОУСТАНОВЛИВАЮЩЕЙСЯ ДЛИНОЙ ДУГИ

Специальность: 01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2011

Работа выполнена на кафедре инженерной теплофизики Московского энергетического института (технического университета)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Синкевич Олег Арсеньевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, старший
научный сотрудник
Кудреватова Ольга Владимировна
доктор технических наук, доцент
Нгуен Куок Ши

Ведущая организация: Институт электрофизики и электроэнергетики
Российской Академии Наук

Защита состоится 24 июня 2011 г. в 11 часов 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.157.04 при Московском энергетическом институте (техническом университете) по адресу: 111250, Москва, Красноказарменная ул., д.17, корп. Т, кафедра инженерной теплофизики, комн. Т-206.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Московского энергетического института (технического университета).

Автореферат разослан 23 мая 2011 г.

Отзывы на автореферат с подписями, заверенными печатью учреждения, просим направлять на адрес: 111250, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, Ученый совет МЭИ (ТУ)

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.157.04

к.ф.-м.н., доцент

_____ Мика В.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа посвящена экспериментальному исследованию тепловых и электрических характеристик плазмотрона постоянного тока с самоустанавливающейся длиной дуги с секционированным анодом с различной геометрией канала. Работа выполнена в Московском энергетическом институте на кафедре инженерной теплофизики и в отделе плазменных процессов Института новых энергетических проблем, входящего в состав Объединённого института высоких температур Российской Академии Наук, под руководством д.ф.-м.н., проф. Синкевича О.А. и при всесторонней поддержке д.т.н. Э.Х. Исакаева и к.т.н., доц. Глазкова В.В., которым автор выражает благодарность за постановку научной задачи и обстоятельное обсуждение всех ключевых моментов при выполнении диссертационной работы.

Актуальность темы. На сегодняшний день электродуговые нагреватели газа (плазмотроны) являются одним из наиболее распространенных способов получения низкотемпературной плазмы. Это связано с целым рядом преимуществ, которые дает использование плазмотронов: это и возможность нагрева любых газов и смесей до относительно высоких среднемассовых температур (от 1000 до 50000К), и высокий КПД нагрева (до 90%), и значительный ресурс непрерывной работы (до 1000 часов), и возможность получения сверхзвуковых скоростей при использовании профилированных каналов, и относительная простота конструкции экспериментальных установок и их автоматизации с достаточной легкостью в управлении рабочими режимами при одновременной высокой надежности и устойчивости работы, и др. Вместе с тем процесс оптимизации и разработки новых конструкций электродуговых генераторов сопряжен со значительными трудностями, которые обусловлены сложностью и малой изученностью физических явлений, протекающих в плазмотронах. Многообразие и сложность процессов, протекающих в плазмотронах, сдерживают теоретическое исследование плазмотронов. Этим объясняется большое

внимание к эксперименту. Наличие надежных данных о тепловых и электрических характеристиках плазмотронов в зависимости от реализуемых режимных параметров и используемой геометрии каналов позволит более полно использовать потенциальные возможности плазмотронов.

Целью работы являлось экспериментальное исследование тепловых и электрических характеристик плазмотронов постоянного тока с самоустанавливающейся длиной электрической дуги.

Для достижения указанной цели требовалось решение следующих задач:

- 1) модернизация экспериментальной установки и проведение серии экспериментов на плазмотроне постоянного тока с самоустанавливающейся длиной дуги с различной геометрией канала секционированного выходного электрода (анода) для различных режимных параметров и получение массивов соответствующих экспериментальных данных по тепловым и электрическим характеристикам плазмотрона;
- 2) разработка методики и соответствующих компьютерных программ для обработки полученных экспериментальных данных для определения параметров электрической дуги с самоустанавливающейся длиной;
- 3) разработка модели течения газа в канале плазмотрона для определения параметров газового потока;
- 4) обобщение полученных результатов.

Научная новизна:

– в результате проведения серии экспериментов на плазмотроне постоянного тока с секционированным анодом получены массивы экспериментальных данных по локальным тепловым потокам и электрическим характеристикам для различных расходов плазмообразующего газа и номинальных значений силы тока для цилиндрического и конического анодов;

– в результате обработки полученных экспериментальных данных по предложенной методике получены следующие данные: 1) время работы

каждой секции анода и средняя длина электрической дуги; 2) распределения скоростей движения анодных пятен вдоль канала; 3) распределения размеров анодных пятен вдоль канала; 4) плотности электрического тока в анодных пятнах; 5) плотности тепловых потоков в анодных пятнах; 6) напряженности электрического поля дуги в зависимости от рабочих параметров эксперимента и геометрии канала анода. Указанные данные для плазмотрона с расширяющимся каналом выходного электрода получены впервые;

– в результате сопоставления рассчитанных скоростей движения анодных пятен и газового потока установлено, что анодные пятна электрической дуги движутся со скоростями, близкими к среднемаховым скоростям газового потока;

– в результате сопоставления локальных тепловых потоков в анодные секции плазмотрона и времени работы соответствующих секций установлено, что для цилиндрического анода тепловые потери в стенку главным образом обусловлены тепловым потоком из анодного пятна электрической дуги; для конического анода, ввиду больших скоростей движения анодных пятен дуги на первых анодных секциях, необходимо дополнительно учитывать конвективный теплообмен между электродуговой плазмой вблизи анодного пятна и стенкой канала.

Достоверность экспериментальных измерений тепловых и электрических характеристик плазмотрона постоянного тока с самоустанавливающейся длиной дуги подтверждается низкой погрешностью измерений: менее 5 % для локальных тепловых потоков в анодные секции и 1.5% для электрических токов.

Достоверность расчетов параметров газового потока по предложенной модели подтверждается тестированием модели.

Достоверность полученных параметров электрической дуги подтверждается сопоставлением с данными других авторов.

Практическая ценность работы. Данные о распределении локальных тепловых потоков по длине канала позволяют определить значения

теплового КПД генератора плазмы и необходимы для выбора оптимальных параметров при создании новых типов генераторов низкотемпературной плазмы с различной геометрией канала выходного электрода мощностью 300-500 кВт и более.

Полученные данные об электрических характеристиках позволяют оптимизировать работу плазмотрона с точки зрения снижения эрозии электродов и увеличении ресурса работы плазмотрона. В частности, было установлено, что при использовании конического анода плотности электрического тока в анодном пятне в среднем меньше в три раза, а плотности теплового потока в среднем меньше в четыре раза, чем при использовании цилиндрического анода. С целью повышения ресурса работы плазмотрона предпочтительнее использовать анод с расширяющимся каналом.

Кроме того, возможность получения обширных данных по параметрам электрической дуги свидетельствует о перспективности предложенного подхода, который может применяться на любых других плазмотронах с секционированным анодом и самоустанавливающейся длиной дуги.

Личный вклад автора:

- при непосредственном участии автора была выполнена модернизация экспериментальной установки и проведена серия экспериментальных исследований на плазмотроне постоянного тока с самоустанавливающейся длиной дуги с различной геометрией канала секционированного выходного электрода для различных режимных параметров;
- разработана методика и написаны соответствующие компьютерные программы для обработки полученных экспериментальных данных;
- получены данные о параметрах электрической дуги с самоустанавливающейся длиной в зависимости от режимных параметров и геометрии канала выходного электрода;
- обобщены результаты экспериментальных исследований тепловых и электрических характеристик.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты экспериментальных исследований тепловых и электрических характеристик плазмотрона постоянного тока с самоустанавливающейся длиной дуги с различной геометрией канала выходного электрода.
2. Методика обработки полученных экспериментальных данных.
3. Параметры электрической дуги с самоустанавливающейся длиной, полученные в результате обработки экспериментальных данных согласно предложенной методике.
4. Одномерная модель течения газа в канале с внутренними источниками тепловыделения. Результаты сопоставления динамических параметров газового потока и электрической дуги.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих конференциях и научных семинарах: XVIII Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в новых энергетических технологиях», Звенигород, 2011 г.; Семинар им. Л.С. Полака, Москва, 25 апреля 2011 г.; The XXVI International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter, Elbrus, 1-7 марта, 2011 г.; XXVII Международная Научно-Техническая Конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», Москва, 24-25 февраля 2011 г.; XVI международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», Москва, 2010 г.; XVII Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в аэрокосмических технологиях». Жуковский, 25-29 мая 2009 г.; XXIV International conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter, Elbrus, 1-7 марта 2009.; XIV международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», 28-29 февраля 2008 г.

Содержание работы отражено в 6 печатных работах, из них 1 – в журнале, рекомендованном ВАК.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы и одного приложения, содержит 67 рисунков и 1 таблицу. Список литературы включает 108 наименований. Общий объем диссертации составляет 124 стр.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность исследований по теме диссертационной работы и изложено краткое содержание глав диссертации, сформулированы научная новизна выполненной работы, практическая значимость и положения, выносимые на защиту.

В первой главе в краткой форме изложены основные аспекты применения плазмотронов, приведена классификация электродуговых плазмотронов, описаны некоторые особенности работы плазмотронов линейной схемы, а также представлен обзор имеющихся работ, посвященных электродуговому плазмотрону. Обусловлена актуальность продолжения исследований тепловых и электрических характеристик плазмотрона с самоустанавливающейся длиной, в том числе плазмотрона с расширяющимся каналом выходного электрода. Сформулированы задачи исследования, обоснован выбор метода исследования.

Во второй главе приводятся: описание экспериментальной установки для исследования тепловых и электрических характеристик плазмотрона постоянного тока с самоустанавливающейся длиной дуги с различной геометрией секционированного выходного электрода; суть выполненной модернизации; диапазоны измерения рабочих параметров эксперимента; автоматизированные системы сбора и первичной обработки получаемых экспериментальных данных; рассчитанные погрешности измерений.

Основными элементами установки являлись: плазмотрон, система электрического питания, система газоснабжения из баллонной рампы,

система водяного охлаждения, газодинамический тракт с теплообменником и вытяжной вентиляцией и система измерений тепловых и электрических параметров. Плазмотрон состоял из катодного и анодного узлов, кольца закрутки газа, изолирующих и уплотняющих прокладок. Основными конструктивными элементами плазмотрона были электроды и канал плазмотрона, которым являлся анод. Анод был выполнен в виде секционированного цилиндрического или конического канала, состоящего из десяти водоохлаждаемых секций, изолированных друг от друга прокладками из фторопласта. Длина каждой секции составляла 6 мм, длина изоляторной межсекционной вставки была равна $h = 0.5$ мм. Поперечные разрезы плазмотронов представлены на рис. 1 а) и б): 1 – катод, 2 – сопло, 3 – анодные секции, 4 – соплодержатель, 5 – изолятор. Диаметр цилиндрического канала был равен 8 мм. Угол между образующей и осью расширяющегося канала составлял 6° , диаметр минимального сечения был равен 4 мм.

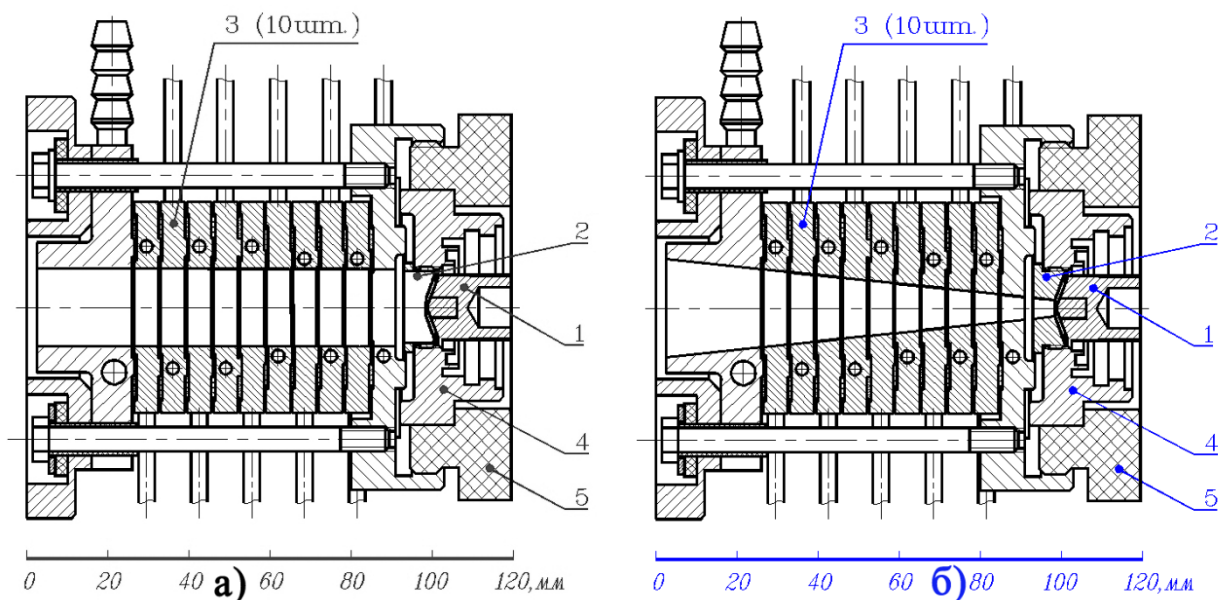


Рис. 1. Поперечные разрезы плазмотронов:
 а) цилиндрический анод; б) конический анод.

В качестве материала анода использовалась медь. Для вихревой стабилизации дуги осуществлялась тангенциальная закрутка газового потока под углом 7° на входе в канал плазмотрона. Катодом служил вольфрамовый

стержень, впрессованный в медный катододержатель конической формы (угол между осью и боковой поверхностью был равен 126°). Диаметр вольфрамового стержня был равен 2 мм.

Для измерения тепловых характеристик плазмотрона использовался калориметрический метод: интегральные и удельные тепловые потоки через катодную и сопловую части плазмотрона, а также через анодные секции плазмотрона, определялись по измерению расходов и температур воды на входах и выходах соответствующих водоохлаждаемых элементов плазмотрона (рис. 2а).

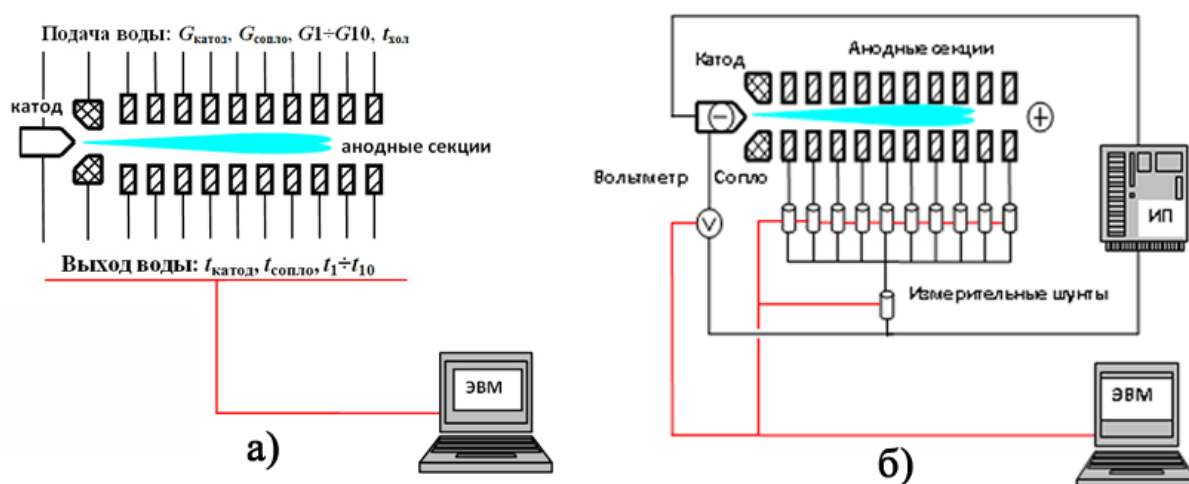


Рис. 2. Схемы измерений тепловых (а) и электрических (б) характеристик плазмотрона

Электрические характеристики плазмотрона измерялись следующим образом. Наличие и значения токов, протекающих по секционированной части выходного электрода, определялись измерением сигналов с коаксиальных шунтов, установленных на каждой из десяти секций анода (рис. 2б). Измерения напряжения между катодом и соплом, катодом и анодом проводились посредством дифференциальных омических делителей. Система измерения электрических параметров основана на использовании аналого-цифровых плат с возможностью одновременного опроса 16-ти измерительных каналов с частотой опроса до 3 МГц. Это позволило измерять как мгновенные значения токов и напряжений, так и усредненные значения по времени. Расход рабочего газа во время эксперимента определялся по

перепаду давления в сужающем устройстве. В качестве сужающего устройства использовалась стандартная диафрагма.

Таким образом, в ходе экспериментов измерялись следующие величины: значения силы тока через секцию №1-10 и падение напряжения катод-анод в каждый момент времени, перепад температур и расходы охлаждающей воды через катод, сопло и десять анодных секций; давление рабочего газа на входе и перепад давления на сужающей диафрагме.

Конструктивные особенности экспериментальной установки и предложенный метод экспериментального исследования позволили провести независимые измерения локальных тепловых и электрических характеристик для каждой из десяти секций конического и цилиндрического анодов с низкой погрешностью: менее 5 % для тепловых потоков в анодные секции и 1.5 % для электрических токов.

В третьей главе представлена методика обработки полученных экспериментальных данных и соответствующие расчетные формулы; разработана одномерная модель течения газового потока в канале плазмотрона с внутренними источниками тепловыделения, а также представлены результаты тестирования предложенной модели.

Для плазмотронов с самоустанавливающейся электрической дугой длина дуги, прежде всего, зависит от силы тока, геометрии канала, рода и давления газа, полярности выходного электрода, а также от других параметров. Наличие сведений о зависимости длины электрической дуги от режимных параметров позволяет оптимизировать работу плазмотрона с точки зрения снижения удельной эрозии выходного электрода и увеличения КПД плазмотрона. Первоначально было необходимо определить характер и последовательность работы секций с течением времени. После того, как для каждого режима были получены соответствующие данные, среднюю длину электрической дуги можно было найти по формуле:
$$L = \sum_{i=1}^{10} \frac{T_i}{T} \cdot x_i \cdot$$

Здесь T_i – время работы i -ой секции, x_i – координата центра i -ой секции, T – общее время эксперимента. Время работы i -ой секции определялось как $T_i = N_i \cdot \Delta\tau$, где N_i – количество моментов времени, в течение которых дуга была привязана к i -ой секции, $\Delta\tau$ – шаг по времени.

Получив зависимость $x = x(t)$, отследив время работы n -ой секции и в случае выполнения условий, что дуга «пришла» с $(n-1)$ -ой секции, а «ушла» на $(n+1)$ -ую секцию, среднюю осевую составляющую скорости движения анодного пятна по n -ой секции можно было найти как: $V_n = l / (\tau_j - \tau_i)$.

Здесь l – длина секции, τ_i – момент времени, когда дуга «уходит» с секции, τ_j – момент времени, когда дуга «приходит» на секцию.

Диаметры анодных пятен находились при переходе дуги с секции на секцию (рис. 3) по формуле:

$d = \bar{V} \cdot \Delta\tau_n - h$. Здесь d – диаметр анодного пятна дуги, h – толщина межсекционной вставки, $\bar{V} = (V_n + V_{n+1}) / 2$ – средняя скорость движения анодного пятна между n -ой и $(n+1)$ -ой секциями, $\Delta\tau_n$ – время перехода дуги с n -ой на $(n+1)$ -ую секцию.

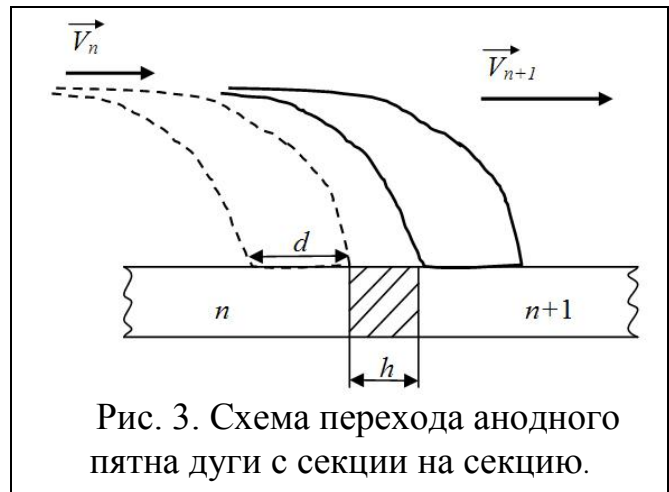


Рис. 3. Схема перехода анодного пятна дуги с секции на секцию.

Плотность тока в анодном пятне можно найти из отношения номинального значения силы тока для данного режима к площади анодного пятна: $j = 4 \cdot I_{nom} / (\pi \cdot d^2)$.

Локальные значения напряженности электрического поля дуги находились из отношения падения напряжения дуги к длине секции:

$E_n = (U_{ka}(\tau_j) - U_{ka}(\tau_i)) / l$. Здесь $U_{ka}(\tau_i)$ – падение напряжения на дуге в момент ее «прихода» на n -ую секцию; $U_{ka}(\tau_j)$ – падение напряжения на дуге, в момент ее «ухода» с n -ой секции; l – длина секции. Полагалось, что при

прохождении электрической дуги по секции форма дуги не меняется, а длина увеличивается на длину секции.

Для определения параметров газового потока была предложена одномерная модель течения газа в канале с внутренними источниками тепловыделения. В качестве удельной мощности погонного тепловыделения задавалась величина $Q = (\bar{E} \cdot I_{nom}) / G$. Здесь \bar{E} – среднее значение напряженности электрического поля дуги, рассчитанное по полученным ранее распределениям напряженности по длине канала для различных рабочих параметров эксперимента, I_{nom} и G – номинальное значение силы тока и массовый расход плазмообразующего газа для данного режима, соответственно. Скорость и температура газового потока находились из численного решения соответствующих дифференциальных уравнений:

$$\frac{dw}{dx} = \frac{w}{\left(\frac{w^2}{RT} \left(1 - \frac{R}{C_p}\right) - 1\right)} \left[\frac{dF}{dx} - \frac{dQ}{C_p T} \right], \quad C_p \frac{dT}{dx} = \frac{1}{\left(\frac{w^2}{RT} \left(1 - \frac{R}{C_p}\right) - 1\right)} \left[-w^2 \frac{dF}{dx} + \frac{dQ}{dx} \left(\frac{w^2}{RT} - 1\right) \right].$$

Предложенная модель была протестирована на стандартных задачах и показала хорошую работоспособность.

В четвертой главе представлены результаты обработки экспериментальных данных согласно предложенной методике и алгоритмам, а также анализ и обобщение результатов экспериментальных измерений локальных тепловых потоков в секционированный анод плазмотрона с различной геометрией канала.

На рис. 4 представлены результаты расчета средней длины электрической дуги в зависимости от режимных параметров и используемого анода.

Из графиков видно, что в случае конического анода длина дуги в зависимости от режимных параметров ведет себя несколько по-другому, чем в случае цилиндрического анода: длина дуги максимальна при максимальном расходе и значениях тока, близким к максимальным. В то же время при

расходах азота $G = (2\div 4)$ г/с средняя длина электрической дуги практически не зависит от номинального значения силы тока.

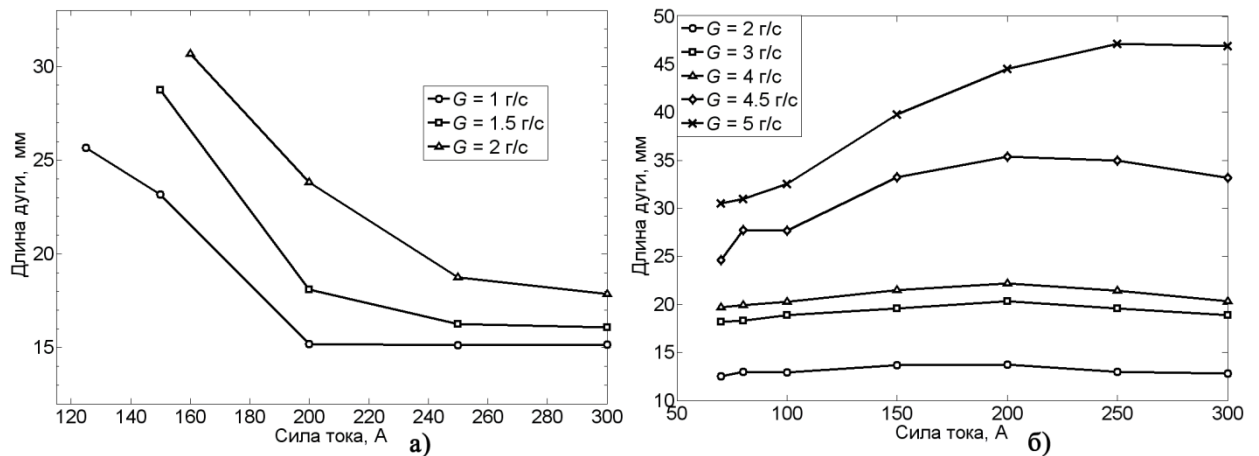


Рис. 4. Средняя длина дуги в зависимости от рабочих параметров:
а) цилиндрический анод; б) конический анод.

На рис. 5 представлены результаты расчета скоростей движения анодных пятен дуги для разных режимов.

Из графиков видно, что для цилиндрического анода скорость движения анодного пятна растет по длине канала, в то время как в коническом аноде скорость движения анодного пятна резко падает по длине. Скорости движения анодных пятен в цилиндрическом аноде были сопоставлены со скоростями газового потока, рассчитанными по предложенной модели для соответствующих рабочих параметров (рис. 6).

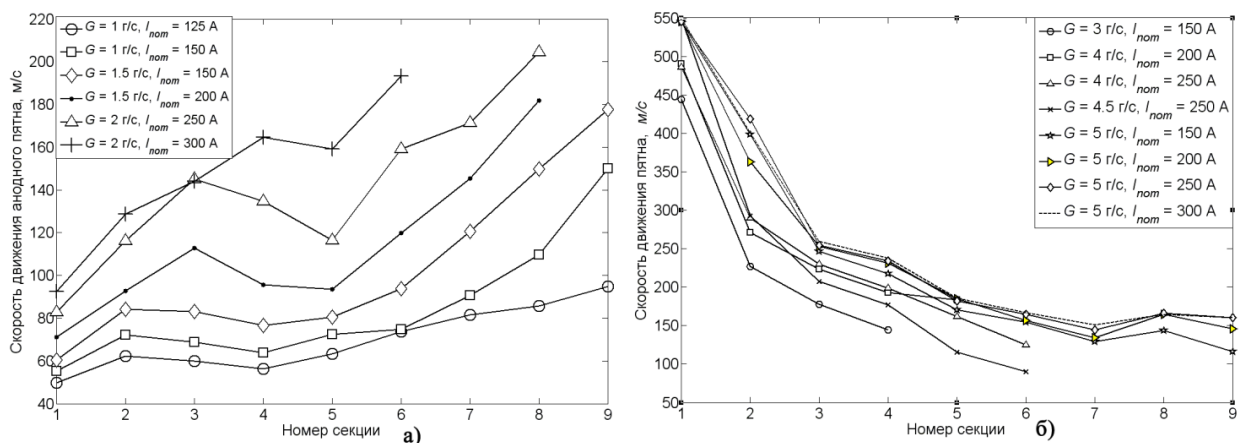


Рис. 5. Скорости движения анодных пятен электрической дуги вдоль канала:
а) цилиндрический анод; б) конический анод.

Из графика видно, что скорости движения анодной привязки электрической дуги коррелируют с соответствующими среднемассовыми скоростями газового потока. Был сделан вывод, что движение электрической дуги в канале плазмотрона обусловлено ее

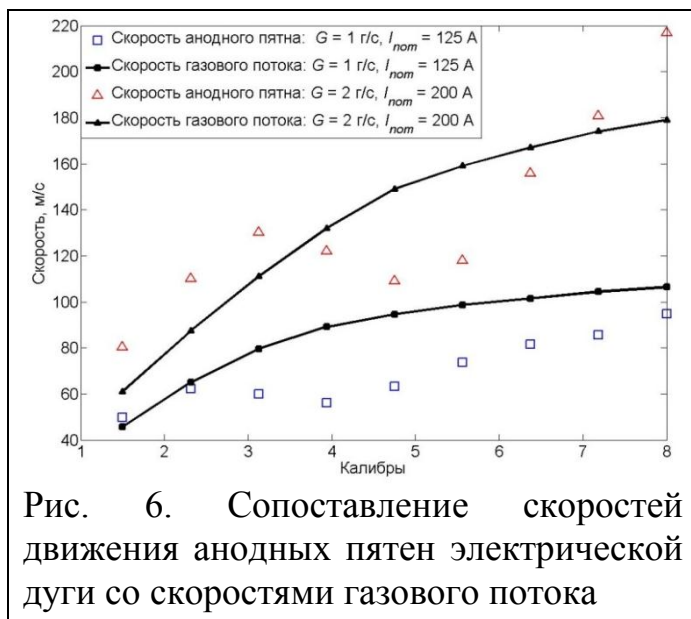


Рис. 6. Сопоставление скоростей движения анодных пятен электрической дуги со скоростями газового потока

газодинамическим взаимодействием с потоком плазмообразующего газа, а скорости движения анодного пятна в частности и электрической дуги в целом близки к среднемассовым скоростям движения газового потока.

На рис. 7 представлены результаты расчета средних диаметров анодных пятен электрической дуги в зависимости от рабочих параметров и используемого анода. Из графиков следует, что для цилиндрического и конического анодов средний диаметр анодного пятна прямо пропорционален номинальному значению силы тока и, в некоторой степени, обратно пропорционален расходу плазмообразующего газа. Хотя для расширяющегося канала зависимость от расхода несколько более сложная и немонотонная.

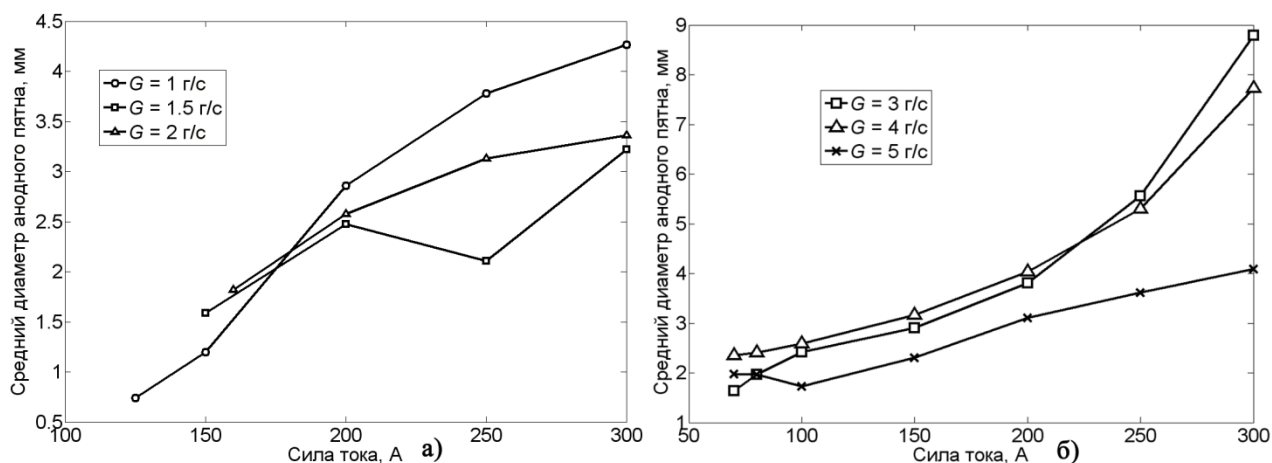


Рис. 7. Средние значения диаметров анодного пятна в зависимости от рабочих параметров: а) цилиндрический анод; б) конический анод.

Также были рассчитаны значения плотностей электрического тока в анодных пятнах электрической дуги. Значения, полученные для цилиндрического анода, хорошо согласуются со средними значениями плотностей тока, характерных для контрагированных анодных привязок. Полученные плотности тока в анодном пятне при горении дуги в коническом аноде несколько ниже, чем для цилиндрического анода и близки к значениям, характерным для диффузионных анодных привязок. Таким образом, анод с расширяющимся каналом оказывается в более выигрышном положении, т.к. снижение плотности тока в анодных пятнах дает уменьшение эрозии анода, что увеличивается ресурс работы анода в частности и плазмотрона в целом.

Кроме того, были рассчитаны распределения напряженности электрического поля дуги вдоль канала анодов различной конфигурации. Полученные значения были усреднены и сопоставлены (рис. 8) с данными других авторов, исследовавших горение стабилизированных дуг в цилиндрических каналах разного диаметра [1].

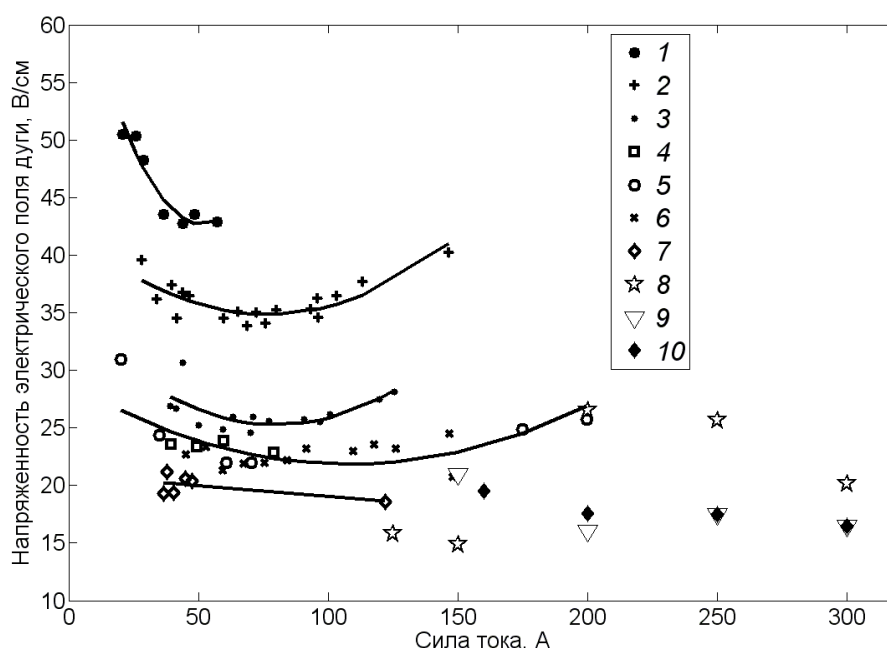


Рис. 8. Зависимость напряженности электрического поля в столбе дуги в азоте от тока для разных диаметров канала d : 1 – 2 мм; 2 – 3 мм; 3 – 4 мм; 4-6 – 5 мм; 7 – 6 мм; 8-10 – 8 мм, секционированный анод.

По результатам калориметрических измерений были получены массивы данных по зависимостям локальных тепловых потоков в анодные

секции плазмотрона от геометрии анода и рабочих параметров эксперимента. Некоторые результаты измерения локальных плотностей тепловых потоков представлены на рис.9-10.

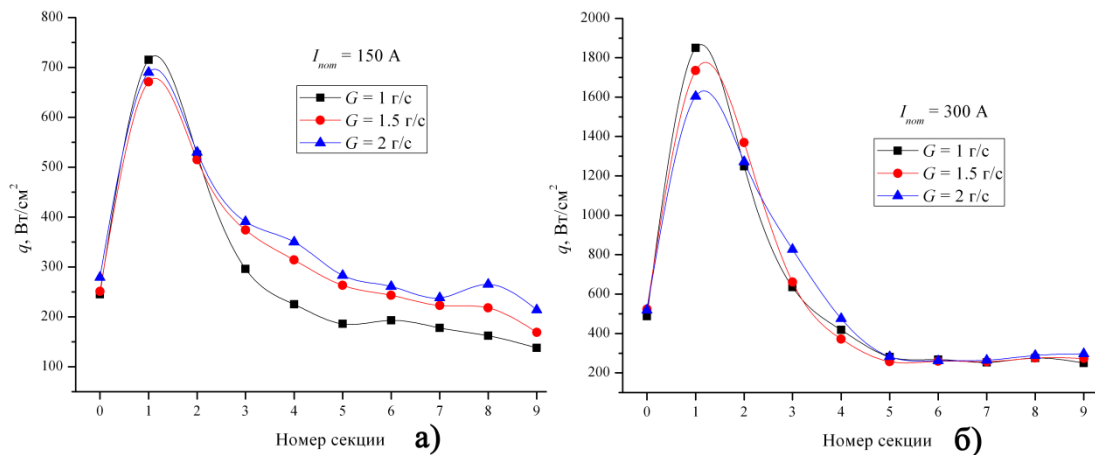


Рис. 9. Тепловые потоки в секции цилиндрического анода в зависимости от расхода азота: а) $I_{nom} = 150$ А; б) $I_{nom} = 300$ А.

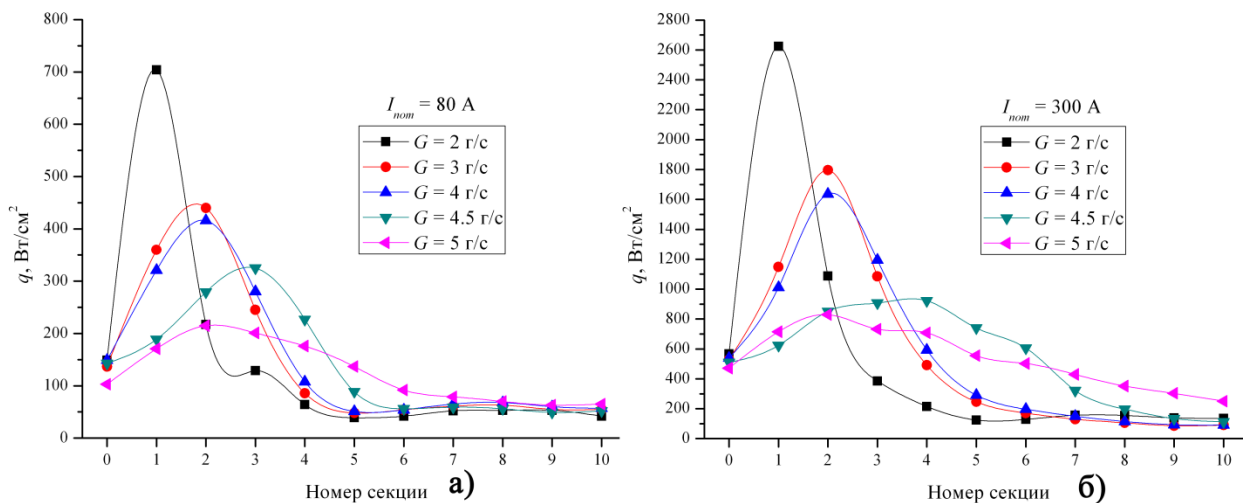


Рис. 10. Тепловые потоки в секции конического анода в зависимости от расхода азота: а) $I_{nom} = 80$ А; б) $I_{nom} = 300$ А.

На рис. 11 представлено сопоставление безразмерных локальных тепловых потоков в анодные секции Q_i и времен привязки дуги к соответствующим секциям T_i .

Из графиков видно, что для цилиндрического анода тепловые потоки в секции хорошо коррелируют со временем пребывания дуги на соответствующих секциях. Для конического анода при введении поправки $(V_i/\bar{V})^{0.8}$ (V_i и \bar{V} – скорость движения анодного пятна по i -ой секции и средняя скорость по всем секциям, соответственно), учитывающей

конвективный теплообмен между анодным пятном дуги и стенкой канала, наблюдалась та же картина. Это позволило утверждать, что тепловые потоки в стенку канала анода обусловлены тепловым потоком из анодного пятна электрической дуги.

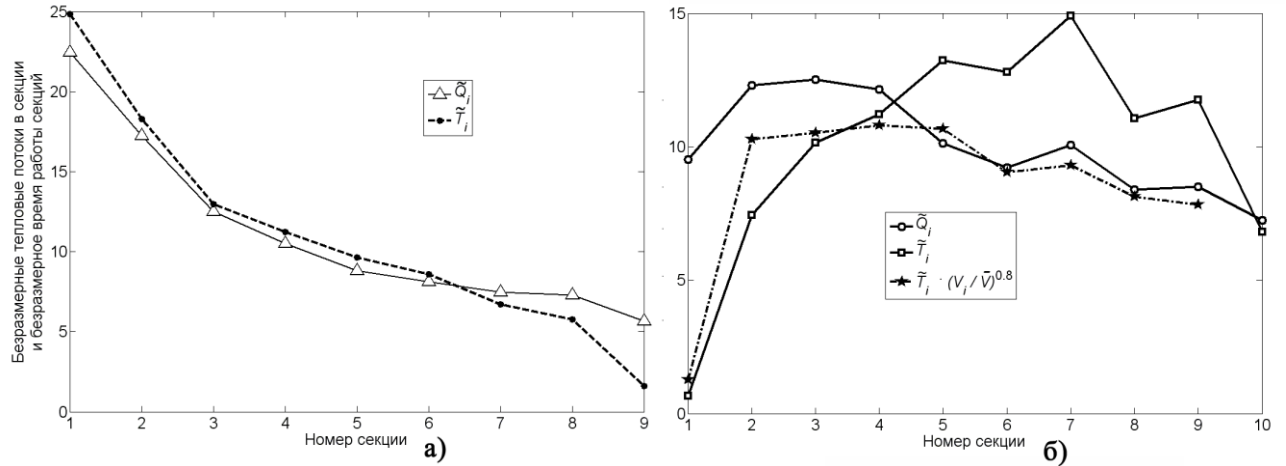


Рис. 11. Безразмерные тепловые потоки в анодные секции и времена привязки дуги: а) цилиндрический анод, $G = 1 \text{ г/с}$, $I_{nom} = 125 \text{ А}$; б) конический анод, $G = 5 \text{ г/с}$, $I_{nom} = 200 \text{ А}$.

Тепловой поток через анодное пятно был оценен исходя из следующих соображений. Если за все время эксперимента T в i -ую секцию пришел тепловой поток Q_i , то количества тепла Q_i^s , отведенное данной секцией, будет равно: $Q_i^s = T \cdot Q_i$. В то же время суммарное тепловыделение через анодное пятно за общее время T_i , пока анодное пятно было на i -ой секции, можно найти по аналогичной формуле: $Q_i^s = T_i \cdot Q_i^n$, где Q_i^n – тепловой поток через анодное пятно. Таким образом, тепловой поток в анодном пятне можно найти из соотношения: $Q_i^n = Q_i \cdot T/T_i$. Плотности тепловых потоков можно найти из отношений Q_i^n к площади анодного пятна. Анализ полученных результатов показал, что для конического анода плотности тепловых потоков в анодных пятнах в среднем в 3-4 раза меньше, чем в анодных пятнах цилиндрического анода.

Выводы

1. Проведена серия экспериментальных исследований тепловых и электрических характеристик плазмотрона постоянного тока с самоустанавливающейся длиной дуги и секционированным анодом с различной геометрией канала. Получены данные по локальным тепловым потокам в анодные секции и сопло плазмотрона в зависимости от рабочих параметров эксперимента, рода плазмообразующего газа и геометрии используемого анода. Получены массивы данных по значениям силы тока через каждую секцию и падению напряжения дуги в каждый момент времени.
2. Разработана методика и, созданы компьютерные программы обработки полученных массивов экспериментальных данных, позволившие определить следующие параметры электрической дуги с самоустанавливающейся длиной в зависимости от геометрии канала анода и рабочих параметров: 1) средняя длина дуги; 2) скорость движения анодного пятна дуги; 3) размеры анодного пятна дуги; 4) плотность электрического тока в анодном пятне; 5) плотность теплового потока в анодном пятне электрической дуги; 6) распределение напряженности электрического поля дуги по длине канала плазмотрона.
3. Проведены расчеты параметров газового потока по предложенной одномерной модели течения газа в канале с внутренними источниками тепловыделения. Рассчитанные скорости движения газового потока сопоставлены со скоростями движения анодных пятен. Установлено, что анодные пятна электрической дуги движутся со скоростями, близкими к среднемассовым скоростям газового потока.
4. Полученные результаты измерения локальных тепловых потоков в анодные секции сопоставлены со временем пребывания анодного пятна электрической дуги на соответствующих секциях. Сделан вывод, что локальные тепловые потери в анодные секции в значительной степени определяются временем пребывания анодного пятна электрической дуги на соответствующих секциях.

Основное содержание диссертационной работы отражено в следующих публикациях:

- 1. Синкевич О.А., Глазков В.В., Меркулов В.В. Динамика электрической дуги в плазмотроне с цилиндрическим секционированным каналом выходного электрода // Вестник МЭИ. – 2011. – №2. – С. 28-33.**
2. Merkulov V.V., Sinkevich O.A., Glazkov V.V. Experimental research of electric arc in plasma torch with sectioned anode // XXVI International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter. Elbrus, 2011. Book of Abstracts. – P. 190.
3. Синкевич О.А., Меркулов В.В. Экспериментальное исследование электрической дуги в плазмотроне с секционированным анодом // XXVII МНТК студентов и аспирантов. – Москва, 2011. – Т. 3. – С. 67-68.
4. Mordinsky V.B., Merkulov V.V., Sinkevich O.A., Glazkov V.V. Experimental and theoretical investigation of the plasma torch with expanding channel for the coating purposes // XXIV International conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter. – Elbrus, 2009. – P. 253-255.
5. Меркулов В.В., Глазков В.В. Численное моделирование течения газа, нагрева и плавления частиц корунда в процессе напыления. XIV международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». – Москва, 2008. – Т. 3. – С. 20-21.

Список цитированной в автореферате литературы:

1. Асиновский Э.И., Кириллин А.В., Низовский В.Л. Стабилизированные электрические дуги и их применение в теплофизическом эксперименте. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 264 с.

Подписано в печать

Печ.л.

Тираж

Заказ

Полиграфический центр, Красноказарменная, 13.