

УДК 621.3.036

Тепловой расчет составного трубчатого электрода в пароводяном плазмотроне*

С.И. РАДЬКО

Создан опытный образец пароводяного плазмотрона и экспериментально были получены его основные энергетические характеристики. Численным методом с помощью программного комплекса (ПК) ANSYS проведен тепловой расчет составного электрода при различных геометриях наружного слоя. На основе расчетных и экспериментальных данных получена оптимальная геометрия составного трубчатого электрода.

Ключевые слова: пароводяной плазмотрон, водяной пар, составной трубчатый электрод, тепловой поток, ПК ANSYS.

ВВЕДЕНИЕ

В ряде промышленных технологий для переработки и утилизации техногенных отходов, газификации твердых топлив низкотемпературная плазма водяного пара является не только теплоносителем, но и активным реагентом в физико-химических реакциях. К числу немаловажных достоинств пароводяного плазмотрона следует отнести отсутствие вредных окислов азота при его работе на водяном паре, чего нельзя сказать о работе на воздушной среде.

На сегодняшний день стационарно работающие плазмотроны на водяном паре включают в конструкцию вольфрамовый катод [1], для работы которого необходима защитная среда в виде аргона или чистого азота, загрязняющих паровую плазму. Кроме того, эти газы достаточно дорогие. В этой связи переход на конструкцию генератора водяной плазмы с медными трубчатыми электродами является актуальной задачей.

1. ОПИСАНИЕ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА

Основу исследуемого однокамерного плазмотрона составляют два полых медных цилиндрических электрода ступенчатой формы, разделенных изолятором (рис. 1) [2]. В изоляторе расположено кольцо закрутки, имеющее 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 – 300 °С. Чтобы исключить конденсацию пара в камере плазмотрона, необходимо поддерживать температуру внутренней поверхности 100 – 150 °С. Это достигается применением составного электрода, состоящего из медного внутреннего цилиндра и внешней обечайки из нержавеющей стали. Внутренний электрод служит анодом (диаметр до уступа $D_1 = 35 \cdot 10^{-3}$ м, диаметр в месте уступа $d_1 = 20 \cdot 10^{-3}$ м).

Толщины медного и стального слоя в первом приближении рассчитывались как для двухслойной стенки при заданном коэффициенте теплоотдачи от охлаждаемой поверхности электрода к потоку воды. Толщина медного слоя была принята $\delta_m = 7 \cdot 10^{-3}$ м, толщина стального слоя $\delta_{ст} = 6.5 \cdot 10^{-3}$ м. Коэффициент теплоотдачи в свою очередь в первом приближении рассчитывался по методике [3] и был принят ≈ 8200 Вт/(м²×К) при расходе охлаждающей воды 0,3 кг/с. Общая длина электрода – анода $L_1 = 180 \cdot 10^{-3}$ м, длина электрода до уступа $l_1 = 162 \cdot 10^{-3}$ м. Расход водяного пара в установившемся режиме равен $4,1 \cdot 10^{-3}$ кг/с.

* Статья получена 27 марта 2013 г.

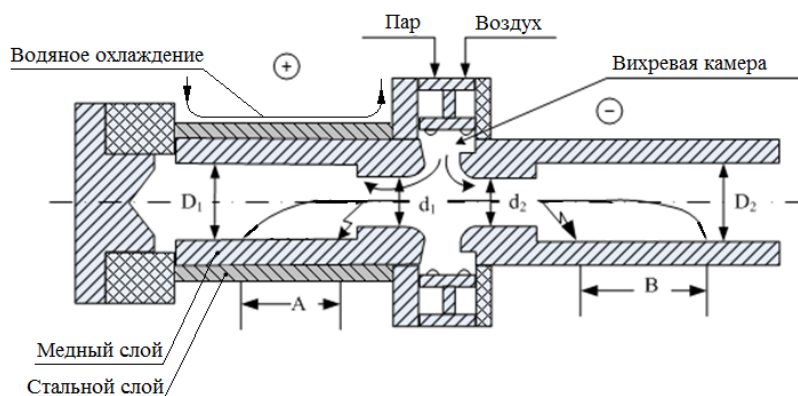


Рис. 1. Схема пароводяного плазмотрона

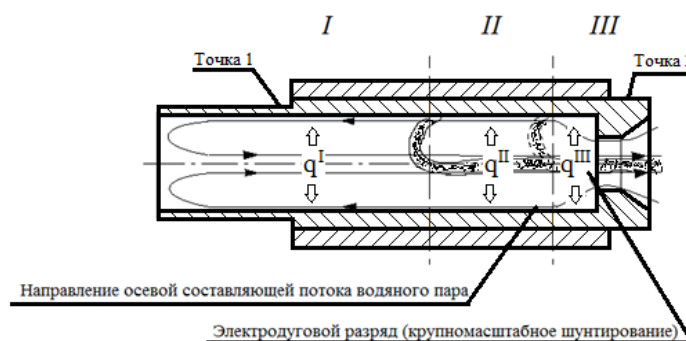


Рис. 2. Схема внутреннего электрода

На указанном плазмотроне была проведена серия экспериментов и при фиксированном токе 200 А были сделаны замеры тепловых потерь в стенку на внутреннем электроде калориметрическим методом, которые составили 5000 Вт. В качестве рабочей среды теплоносителя использовался водяной перегретый пар при температуре 250 – 300 °С. С помощью установки двух хромель-алюмелевых термопар в определенных местах (точки 1 и 2 на рис. 2) были сняты значения температур в определенные промежутки времени (табл. 1). Целью измерения температур являлось сравнение их с данными, полученными расчетным путем. Реальная температура внутри рабочей камеры, как оказалось, сильно отличается от прогнозируемой. На рис. 2 стрелками указано движение водяного пара внутри камеры и местоположение радиальных участков дуги в зонах перемещения и за уступом на А и В.

Таблица 1

Экспериментальные значения температуры

Время, мин	Точка 1, °С	Точка 2, °С
5	125	266
10	101	269
15	75	286
20	72	297
25	72	254

Визуально 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. 2). 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 *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 (зона А). 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: $q^{II} = q_k^{II} + q_{и}^{II} + q_{ч}^{II}$, 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: $q^{III} = q_k^{III} + q_{и}^{III}$.

В количественном отношении тепловой поток зоны *I* намного меньше зон *II* и *III*. В свою очередь в зоне *II* не наблюдается существенного превышения теплового потока в стенку по сравнению с зоной *III*. Анализ медной поверхности электрода указывает на то, что электрод разрушается практически только в зоне горения дуги. Незначительное увеличение теплового потока в зоне *II* наблюдается, по-видимому, вследствие того, что определенная часть выделенного тепла уносится с продуктами разрушения электродов и часть ее передается водяному пару.

На основании полученных данных (табл. 1) в первом приближении можно сделать вывод, что в область стенки, соответствующую зонам *II* и *III* (рис. 2), поступает около 70 % тепла, которое впоследствии передается охлаждающей воде, а остальные 30 % тепла поступают в область стенки, соответствующую зоне *I*.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Разработка требуемой конструкции составного трубчатого электрода с минимальной эрозией является сложной инженерной задачей. Для ее успешного решения необходимо рассчитать оптимальные характеристики самого рабочего режима плазмотрона, которые зависят от многих факторов, а именно: от расхода рабочей среды – теплоносителя в рабочую камеру плазмотрона; от расхода охлаждающей жидкости; от формы охлаждающей поверхности электрода; от вводимой мощности дуги в пароводяной плазмотрон.

Одной из основных целей проведения данного теплового расчета является отыскание 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 [4]. Поэтому задача фиксирования температуры внутренней стенки электрода в области 125 °С будет определять длительность его работы.

Интерфейс ANSYS позволяет легко и эффективно назначать материалы и их свойства различным слоям конструкции. ANSYS предлагает большую библиотеку конечных элементов, которые могут использоваться для создания желаемой модели. Также на выбор пользователя предлагается большой набор нагрузок для задания граничных условий. В нашем случае для определения граничных условий, необходимо знать следующие исходные данные: это в первую очередь геометрические размеры; коэффициент теплоотдачи, который обеспечивается подачей охлаждающей жидкости на внешнюю поверхность электрода; распределение тепловых потоков на внутренней поверхности рабочей камеры. 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.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 3 представлено несколько типов составного электрода. График на каждом из них показывает температурное распределение на внутренней поверхности электрода до уступа. При решении всех этих вариантов к изменяемым параметрам относятся следующие: геометрия второго слоя и коэффициент теплоотдачи охлаждаемой поверхности, который изменялся в соответствии с геометрией (пределы изменения составили от 3 до 25 кВт/(м²×К)). Геометрические параметры медного слоя и распределение тепловых потоков в стенку электрода остава-

лись без изменений и соответствовали параметрам выше описанным. Рассмотрим каждый из представленных вариантов более подробно.

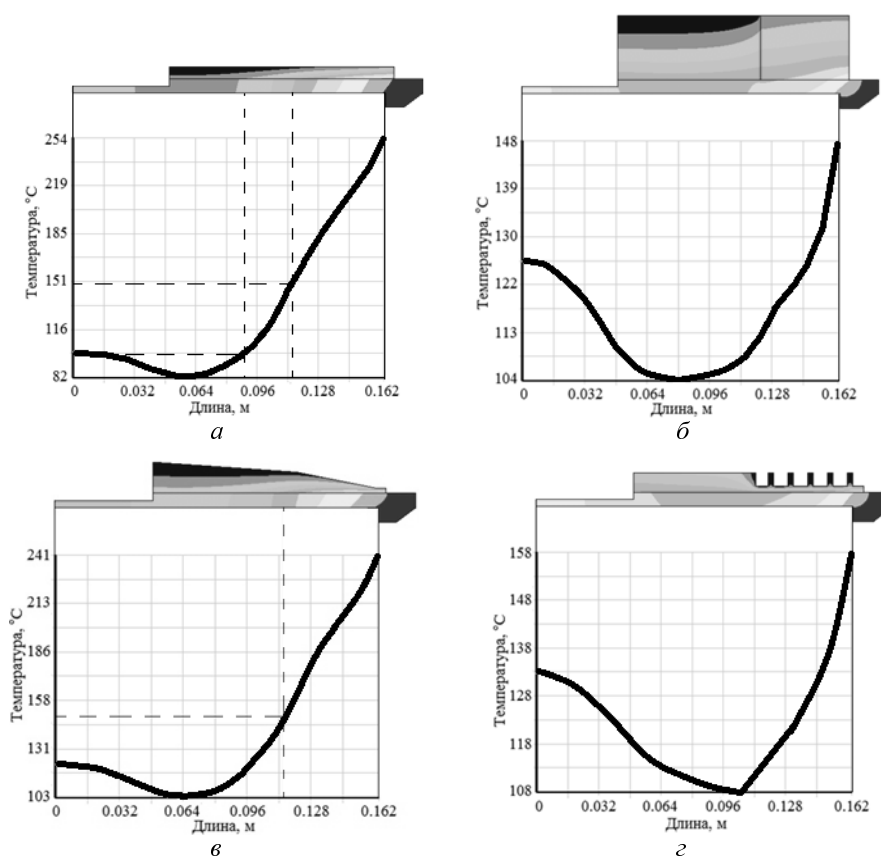


Рис. 3. Некоторые схемы составных электродов

На рис. 3, *а* представлено численное решение составного электрода для плазмотрона, на котором непосредственно проводились эксперименты. Основной недостаток данной конструкции, как видно из графика, это то, что она не обеспечивает требуемый температурный режим на внутренней поверхности электрода. Участок, температура которого входит в диапазон 100 – 150 °С, очень мал (на графике отмечен пунктирными линиями). Как уже было отмечено, это приводит к высокой эрозии электрода.

На рис. 3, *б* представлен случай, когда второй слой электрода – составной. В области, соответствующей зонам *II* и *III* (рис. 2), второй слой сделан из алюминия, а в области соответствующей зоне *I* – из нержавеющей стали. Для достижения требуемого температурного режима толщина внешнего слоя потребовалась намного толще, чем для случая, отображенного на рис. 3, *а*. В результате, как видно из графика, можно добиться требуемого распределения температуры на внутренней поверхности электрода. Недостатком данного варианта являются трудности в эксплуатации, так как дополнительные стыковочные места приводят к усложнению конструкции плазмотрона в целом.

Интересным представляется случай, когда второй слоя выполнен в форме конфузора (рис. 3, *в*). Но как показывает проведенный численный расчет данного типа, он также не обеспечивает требуемое температурное распределение на внутренней поверхности электрода. Видно, что изменение толщины второго слоя относительно слабо влияет на температурный режим внутри разрядной камеры.

На рис. 3, *г* представлен наиболее оптимальный тип составного внутреннего электрода, так как он учитывает все недостатки вышеописанных вариантов. На внешней поверхности второго слоя в наиболее нагруженной области (зоны *II* и *III*) нарезана прямоугольная 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 L) поток воды остается ламинарным и отток тепла от второго слоя не такой значительный. Такая ситуация позволит фиксировать требуемую температуру на внутренней медной поверхности электрода и оптимизировать его удельную эрозию. Последующие эксперименты подтвердили справедливость расчетного материала, приведенного на рис. 3, 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований, полученные с помощью ПК ANSYS, показали адекватность в сравнении с данными, полученными экспериментальным путем. Исследования позволили установить конструктивную форму трубчатого составного электрода, обеспечивающую заданный интервал температур на рабочей поверхности электрода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Михайлов Б.И. Электродуговые генераторы пароводяной плазмы. Ч. 2 / Б.И. Михайлов // Теплофизика и аэромеханика. – 2003. – Т. 10. – № 4. – С. 637–657.
 [2] Аньшаков А.С. Электродуговой плазматрон для нагрева водяного пара / А.С. Аньшаков, С.И. Радько, Э.К. Урбах и др. // Теплофизика и аэромеханика. – 2012. – Т. 19. – № 6. – С. 761–763.
 [3] Основы расчета плазматронов линейной схемы / Под общей редакцией М.Ф. Жукова. – Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1979.
 [4] Михайлов Б.И. Влияние температуры цилиндрических электродов на их эрозию / Б.И. Михайлов, А.Н. Тимошевский, Э.К. Урбах // Изв. СО АН СССР, сер. техн. наук. – 1985. – № 10. – Вып. 2. – С. 69–73.

REFERENCES

- [1] Mihajlov B.I. Jelektrodugovye generatory parovodjanoj plazmy. Ch. 2 // Teplofizika i ajeromehanika, 2003. T. 10, № 4. S. 637–657.
 [2] An'shakov A.S., Rad'ko S.I., Urbah Je.K. i dr. Jelektrodugovoj plazmotron dlja nagreva vodjanogo para // Teplofizika i ajeromehanika, 2012. T.19, № 6. s. 761–763.
 [3] Osnovy raschjota plazmotronov linejnoj shemy / Pod obshhej redakciej M.F. Zhukova. Novosibirsk: ITF SO AN SSSR, 1979.
 [4] Mihajlov B.I., Timoshevskij A.N., Urbah Je.K. Vlijanie temperatury cilindricheskikh jelektrodov na ih jeroziju // Izv. SO AN SSSR, ser. tehn. nauk, 1985. №10, vyp. 2. s. 69–73.

Радько Сергей Иванович, аспирант кафедры автоматизированных электротехнологических установок Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – электротехнология высокотемпературных процессов, генерация термической плазмы. E-mail: sergejradko@yandex.ru

S.I. Radko

Thermal calculation of a composite tubular electrode in steam plasmatron

In a number of industrial technologies for the processing and disposal of industrial waste, gasification of solid fuels, low-temperature plasma of water vapor is not only the heat transfer medium, but also an active agent in the physical and chemical reactions. Among the important advantages of the steam plasma torch is the absence of harmful nitrogen oxides during its work on water vapor, which can not be said about the work on the air.

To date, stationary plasma generators running on steam include the construction of a tungsten cathode, for work that requires a protective environment in the form of pure argon or nitrogen pollutants steam plasma. Furthermore, these gases are relatively expensive. In this context, the transition to the structure of the plasma generator water with copper tubular electrodes is an actual problem.

Prototype of steam-plasma torch has been realized. The experimental method was used to obtain the basic power characteristics. On the basis of the calculated and experimental data obtained optimal geometry of the composite tubular electrode

Key words: plasma, discharge, water-steam plasma torch, water vapor, the composite tubular electrode, heat flow, capacity, service life.