

УДК 621.365.22

DOI: 10.24160/1993-6982-2018-6-51-57

Расчет характеристик дуги плазменно-дуговых печей на основе модифицированной модели дуги Меккера

А.М. Кручинин, М.Я. Погребисский, Е.С. Рязанова, А.Ю. Чурсин

Представлен метод расчета характеристик теплообмена электрической дуги со струей газа в плавильном пространстве плазменно-дуговой печи в процессе плавки на основе модифицированной модели столба дуги Г. Меккера. До настоящего времени нет пригодных для практики проектирования методов моделирования и расчета электрических и тепловых характеристик дуги плавильного плазматрона как источника нагрева и нелинейной электрической нагрузки. Положения современной теории нагрева электрической дугой позволяют на основе известной конвективной модели электрической дуги Г. Меккера с привлечением методов теплообменной модели дуги и математического метода универсальных характеристик дуги предложить удобную для практики проектирования методологию расчета теплообменных характеристик и связанных с ними внешних электрических и тепловых характеристик дуги плавильного плазматрона плазменно-дуговой печи. Разработанный для расчета электрических и тепловых характеристик цилиндрической части столба модели Меккера метод универсальных характеристик дуги позволяет простыми алгебраическими методами выполнить расчет характеристик столба дуги в отдалении от катода и, тем самым, конкретизировать математическую модель Меккера. Доказанная консервативность дуги в результате образования на поверхности столба пространственного слоя с повышенной объемной вязкостью разрешают, в соответствии с положениями теории пограничного слоя, применить для поверхности цилиндрической части столба дуги граничное условие третьего рода. Метод универсальных характеристик дуги также помогает связать граничное значение линейной плотности теплового потока на поверхности цилиндрической части столба с температурным профилем столба и, тем самым, конкретизировать зависимость электрических, геометрических и тепловых характеристик плазмы столба от условий теплообмена дуги в рабочем пространстве установки с нагревом электрической дугой.

Предложенный метод позволяет на основе только внешних вольтамперных характеристик дуги идентифицировать теплообменную модель Меккера и рассчитать простым алгебраическим методом структуру и значения тепловых потоков, создаваемых дугой в процессе теплообмена со струей газа плазматрона в плавильном пространстве плазменно-дуговой печи. Приведены примеры характеристик дуги при работе на различных газах для разных стадий плавки — в начале плавки и при расплавлении шихты.

Ключевые слова: электрическая дуга, плазматрон, плазменно-дуговые печи, модель Меккера и теплообменная модель, метод универсальных характеристик.

Для цитирования: Кручинин А.М., Погребисский М.Я., Рязанова Е.С., Чурсин А.Ю. Расчет характеристик дуги плазменно-дуговых печей на основе модифицированной модели дуги Меккера // Вестник МЭИ. 2018. № 6. С. 51—57. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-6-51-57.

Calculating the Arc Characteristics in Plasma Arc Furnaces Based on the Modified Mecker Arc Model

A.M. Kruchinin, M.Ya. Pogrebissky, E.S. Ryazanova, A.Yu. Chursin

The article presents a method for calculating the characteristics of heat transfer between the electric arc and gas jet in the plasma arc furnace melting space in the course of melting on the basis of modified G. Mecker's arc column model. No engineering methods for modeling and calculating the electric and thermal characteristics of the melting plasma generator arc as a source of heating and nonlinear electric load that would be suitable for design purposes have so far been available. The concepts of the modern electric arc heating theory open the possibility to suggest — based on well-known G. Mecker's electric arc convective model, and with attraction of the arc heat transfer model methods and the mathematical method of arc universal characteristics — a methodology for calculating the heat transfer characteristics and the related external electric and thermal characteristics of the arc produced by a plasma arc furnace melting plasma generator that is convenient for being used in design practice. The universal arc characteristics method developed for calculating the electric and thermal characteristics of Mecker's arc column model cylindrical part enables the user to calculate the arc column characteristics at a distance away from the cathode by means of simple algebraic methods, thereby making Mecker's mathematical model more specific. The arc model conservatism has been proven proceeding from the spatial layer with an increased volume viscosity that appears on the column surface. As a result, a boundary condition of the third kind can be applied to

the arc column cylindrical part surface according to the concepts of the boundary layer theory. By using the universal arc characteristics method it is also possible to correlate the heat flux linear density boundary value on the column cylindrical part surface with the column temperature profile and, thereby, link the dependence of the plasma column electric, geometrical and thermal characteristics on the arc heat transfer conditions in the electric arc heated working space of the installation.

By applying the proposed method, it is possible to identify Mecker's heat transfer model using only the arc external volt-ampere characteristics and to calculate, by means of a simple algebraic method, the structure and values of the heat fluxes produced by the arc in the course of heat transfer to the plasma generator gas jet in the plasma arc furnace melting space. Examples of arc characteristics during operation with different gases for different stages of melting, namely, at the beginning of melting and in melting the furnace charge are given.

Key words: electric arc, plasma generator, plasma arc furnaces; Mecker's model, heat transfer model; universal characteristics method.

For citation: Kruchinin A.M., Pogrebissky M.Ya., Ryazanova E.S., Chursin A.Yu. Calculating the Arc Characteristics in Plasma Arc Furnaces Based on the Modified Mecker Arc Model. MPEI Vestnik. 2018;6:51—57. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2018-6-51-57.

Введение

Плазменно-дуговая печь (ПДП) с керамическим тиглем — важный и уникальный плавильный агрегат в специальной качественной электрометаллургии, предназначенный для переплава и вовлечения в основное производство отходов высоколегированных сталей и сплавов в различных отраслях машиностроения. Применение в ПДП плавильных плазмотронов, работающих с аргоном, обеспечивает ведение плавки с минимальными потерями дорогостоящих легирующих элементов, что облегчает прогнозирование в процессе плавки химического состава получаемого сплава. Вместе с тем, до настоящего времени нет пригодных для практики проектирования методов моделирования и расчета электрических и тепловых характеристик дуги плавильного плазмотрона как источника нагрева и нелинейной электрической нагрузки. Методы обобщенных характеристик дуги ПДП являются оценочными и имеют ограниченное применение для решения задач проектирования установок с ПДП при расширении диапазона мощности и перевода печей на работу с плазмообразующим газом другого химического состава, например на работу на азоте или смеси аргона с азотом или водородом [1]. В связи с этим положения современной теории нагрева электрической дугой позволяют на основе известной конвективной модели электрической дуги Г. Меккера с привлечением методов теплообменной дуги и математического метода универсальных характеристик дуги предложить удобную для практики проектирования методологию расчета теплообменных характеристик и связанных с ними внешних электрических и тепловых характеристик дуги плавильного плазмотрона ПДП [1].

Модификация модели дуги Меккера на основе положений консервативности дуги

В основу разработанной и опубликованной в 1955 г. электродинамической модели дуги атмосферного давления заложен физический факт, что в любой дуге атмосферного или близкого к атмосферному давления есть движение потока газа и плазмы, прокачиваемого столбом дуги подобно электродинамическому насосу в результате сжатия тока вблизи катодного пятна. Исходя только из экспериментальных данных и опыта при-

менения дуг в электротермии, сформулировано свойство консервативности длинной дуги, поверхность столба которой подобна твердому телу (представляет собой квазитвердое тело) в процессах теплообмена с окружающей средой. Данное феноменологическое допущение позволило представить структуру дуги (рисунок) в виде конусной части столба со сжатием тока в направлении к катоду и цилиндрической (консервативной) части столба в отдалении от катода за пределами конусной части.

Двухслойная структура столба в модели Меккера помогла оценить роль конвективного нагрева электрической дугой и получить формулу для расчета скорости движения плазмы на выходе из конусной части столба [2]:

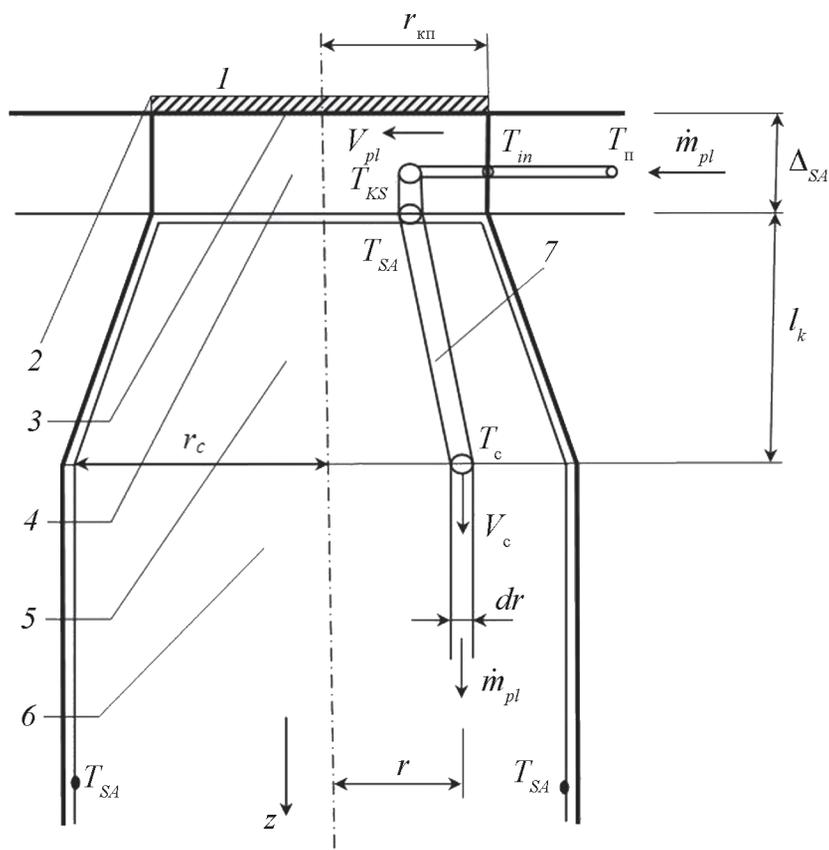
$$V_c = V(r, z = l_k) = r_{\text{кп}} j_k \sqrt{\frac{\mu_0}{2\bar{\rho}_c}} \sqrt{1 - \left(\frac{r_{\text{кп}}}{r_c}\right)^2} \sqrt{1 - \left(\frac{r}{r_c}\right)^2}, \quad (1)$$

где $\bar{\rho}_c$, r_c — среднее значение плотности плазмы и радиуса столба в граничном сечении $z = l_k$; $r_{\text{кп}}$, j_k — радиус катодного пятна и плотность эмиссионного тока в катодном пятне дуги; μ_0 — магнитная постоянная, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Формула (1) является оценочной, однако порядок величин скорости движения плазмы в столбе дуги, рассчитанных по ней, впоследствии был доказан экспериментально в работах Б. Боумэна для дуг большой мощности [3, 4].

Практические исследования позволили оценить длину конусной части столба l_k двухслойной модели дуги в виде соотношения с радиусом цилиндрической части r_c : $l_k = (2,0 \dots 3,0)r_c$.

Более поздние работы, проведенные в Московском энергетическом институте [5] и Гарвардском университете [6] независимо друг от друга в 1965 г., позволили теоретически и экспериментально доказать свойство консервативности столба дуги в отдалении от катода даже при развитой турбулентности в потоке газа, омывающем дугу. Было доказано существование на поверхности столба любой длинной электрической дуги граничного слоя с повышенной объемной вязкостью, препятствующей любому проникновению потока мас-



Структура модели электрической дуги Д. Меккера:

1 — катод; 2 — катодное пятно; 3, 4 — электрофизический и газодинамический слой; 5, 6 — конусная и цилиндрическая (консервативная) части столба; 7 — поток массы плазмы; \dot{m}^{pl} — поток массы плазмы, засасываемый и прокачиваемый столбом дуги; T_{II} — температура печи (средняя температура газовой среды в плавильном пространстве печи); T_{SA} — изотерма внешней границы плазмы столба дуги; T_c — средняя объемная температура цилиндрической части столба; T_{in} — средняя массовая температура потока газа на входе в газодинамический слой структуры дуги; T_{KS} — средняя массовая температура потока плазмы в газодинамическом слое

сы и тепла, в том числе турбулентности, в объем столба из внешней среды. Данное явление консервативности дуги в процессах теплообмена с окружающей средой позволило установить существование ламинарной плазмы в столбе дуги даже при развитой турбулентности ($Re > 10^5$) в наружном потоке газа [7]. Существование двухслойной газодинамической структуры с устойчивой стационарной границей раздела ламинарной и турбулентной газовых сред на поверхности столба дуги однозначно доказывает невозможность переноса массы и тепла через границу раздела и, следовательно, консервативное свойство дуги в процессах теплообмена, в частности, со струей газа плазматрона в плавильном пространстве ПДП [5].

Созданный для расчета электрических и тепловых характеристик цилиндрической части столба модели Меккера метод универсальных характеристик дуги позволяет простыми алгебраическими методами выполнить расчет характеристик столба дуги в отдалении от катода и, тем самым, конкретизировать математическую модель Меккера [8]. Доказанная консервативность дуги в результате образования на поверхности

столба пространственного слоя с повышенной объемной вязкостью позволяет, в соответствии с положениями теории пограничного слоя, применить для поверхности цилиндрической части столба дуги граничное условие третьего рода:

$$q_c = \frac{P_\lambda}{2\pi r_c} = \alpha(T_{SA} - T_{OT}), \quad (2)$$

где P_λ — линейная плотность теплового потока на поверхности цилиндрической части столба, вызванного теплопроводностью плазмы; α — физический коэффициент теплоотдачи цилиндрической части столба; T_{OT} — средняя температура окружающей дугу газовой среды, как теплового ядра в процессе теплообмена; q_c — плотность конвективного теплового потока, отводимого от поверхности цилиндрической части столба дуги.

Метод универсальных характеристик дуги позволяет связать граничное значение линейной плотности теплового потока на поверхности цилиндрической части столба P_λ с температурным профилем столба и, тем самым, конкретизировать зависимость электрических, геометрических и тепловых характеристик плазмы

столба от условий теплообмена дуги в рабочем пространстве установки с нагревом электрической дугой [8]. Подобная математическая конкретизация модели Меккера применительно к определенной установке позволяет назвать уточненную математическую модель дуги теплообменной моделью электрической дуги (ТОМЭД). Метод универсальных характеристик дуги и структура модели Меккера составляют, таким образом, методологическую основу новой модели.

Расчет характеристики цилиндрической части столба теплообменной модели электрической дуги плазменно-дуговой печи

Метод универсальных характеристик дуги и структура модели Меккера позволяют идентифицировать характеристику напряженности электрического поля в цилиндрической части столба, используя экспериментальные вольтамперные характеристики и регистрограммы напряжения и температуры, полученные на действующей печи. Для идентификации базовой электрической характеристики ТОМЭД достаточно знания экспериментальных вольтамперных характеристик (ВАХ) дуги, снятых только для начала и конца плавки. Известны экспериментальные характеристики ПДП, полученные на опытной и промышленной печах емкостью 1,5...2 [1] и 3...5 т [9] при работе с аргоном. Исходя из экспериментальных данных и используя особенности структуры модели Меккера, составим обобщенную формулу для расчета напряженности электрического поля столба дуги в отдалении от катода ПДП в зависимости от измеряемой температуры печи, меняющейся в процессе плавки при работе с аргоном:

$$E_c(T_f) = E_n(I) \frac{1,12 - 0,14757 \ln T_f}{1 - 0,1306 \ln T_f}, \quad (3)$$

где E_n — напряженность электрического поля цилиндрической части столба ТОМЭД, рассчитанная для начала плавки для плазмотрона с заданным рабочим током и заданным химическим составом плазмообразующего газа; T_f — абсолютная температура печи, измеряемая в процессе плавки как температура внутренней поверхности футеровки в верхней части стен плавильного пространства, К; I — ток дуги.

Экспериментальные ВАХ дуги, известные из [1], получены для плазмотрона (рабочий ток — 4500 А; диаметры катода $d_k = 0,0254$ м, сопла $d_d = 0,0381$ м) опытной печи емкостью 1,5...2 т, работающей с аргоном (рекомендованный поток массы аргона $\dot{m}_{pl} = 0,003...0,004$ кг/с). С помощью них получена формула (3) напряженности электрического поля цилиндрической части столба ТОМЭД. В связи с этим, указанный плазмотрон в методике расчета теплообменных характеристик дуги можно назвать базовым.

Для базового плазмотрона, работающего в начале плавки, $T_f = 1220$ К при токе дуги 4500 А, напряженность электрического поля цилиндрической части столба ТОМЭД составит:

$$E_{nb} = E_n(I_{\text{раб}}) = 388,5 \text{ В/м}. \quad (4)$$

Характеристики цилиндрической части столба ТОМЭД в соответствии с положениями модели Меккера рассчитаны методом универсальных характеристик дуги в программной процедуре в цикле изменения линейной плотности теплового потока на поверхности цилиндрической части столба P_λ , вызванного теплопроводностью плазмы. В процедуре итерационным методом решена нелинейная система алгебраических уравнений баланса энергии, линейной проводимости, радиуса и линейной плотности излучения консервативной (цилиндрической) части столба дуги.

$$P_\lambda = E_c I - P_\varepsilon, \text{ Вт/м}; \quad (5)$$

$$g = \frac{I}{E_c(I)}, \text{ См}\cdot\text{м}; \quad (6)$$

$$r_c^2 = \frac{g}{\tilde{g}(P_\lambda)}, \text{ м}^2; \quad (7)$$

$$P_\varepsilon = \tilde{P}_\varepsilon(P_\lambda) r_c^2. \quad (8)$$

При решении (5) — (8) использованы универсальные характеристики проводимости $\tilde{g}(P_\lambda)$ и излучения $\tilde{P}_\varepsilon(P_\lambda)$ дуги для заданного химического состава плазмообразующего газа.

Граничное условие третьего рода (2) на поверхности цилиндрической части столба дуги ПДП примет вид:

$$q_c = \frac{P_\lambda}{2\pi r_c} = \alpha(T_{SA} - T_{ST}),$$

где T_{ST} — средняя температура струи по длине дуги, для ПДП, работающей с аргоном, $T_{ST} = 1750$ К.

Приведенный метод может быть применен для дуги в газовой среде атмосферного давления заданного химического состава. Однако, для этого необходимы универсальные характеристики дуги и значение средней напряженности электрического поля в удаленной от катода части столба. Для оценочных расчетов в случае ПДП можно считать справедливой формулу относительной напряженности электрического поля, как функции температуры печи (3), полученную для плавки шихты в аргоне. Значение масштаба данной функции зависит от абсолютного среднего значения напряженности электрического поля столба в отдалении от катода при рабочем токе дуги. Расчет параметра ТОМЭД ПДП при этом выполняют методом универсальных характеристик дуги.

В результате действия указанной математической процедуры рассчитывают характеристики теплообме-

на дуги с газовой струей плазмотрона ПДП заданной мощности, работающего с заданным химическим составом плазмообразующего газа. Для решения этой задачи необходимо знать универсальные характеристики дуги для заданного рода плазмообразующего газа.

Расчет характеристик теплообмена части столба дуги со струей газа плазмотрона ПДП в отдалении от катода можно, с допустимой для проектирования ПДП степенью приближения, выполнить на основе известных характеристик детально проработанной модели теплообмена между стенкой и полуграниченной изотермической струей (модели плоской струи) [10 — 13].

Если взять ее для более сложного случая теплообмена дуги со струей газа в плавильном пространстве ПДП, то формула безразмерного коэффициента теплоотдачи цилиндрической части столба ТОМЭД ПДП будет выглядеть как

$$Nu = \frac{ab_0}{\lambda} = 0,178 \left(\frac{\rho}{\frac{13}{15}\rho_0} \right)^{13/15} \times \left(\frac{4\dot{m}_g}{\pi(d_d + d_k)} \right)^{13/15} \left(\frac{l_a}{b_0} \right)^{-2/5},$$

где ρ_0 — плотность струи в выходном сечении сопла плазмотрона; \dot{m}_g — поток массы плазмообразующего газа в плазмотроне; l_a — длина дуги; b_0 — ширина модели плоской струи плазмотрона, $b_0 = (d_d - d_k)/2$, d_d, d_k — диаметры сопла и катода плазмотрона.

С учетом масштаба температур в решении задачи теплообмена дуг допустим, что $T_{sA} - T_{sT} = \text{const}$. В этом случае условие подобия для плотности теплового потока на поверхности цилиндрической части столба ТОМЭД ПДП, связанного с процессом теплопроводности плазмы, выглядит следующим образом:

$$q_{ac} \sim \left[\lambda \left(\frac{\rho}{\eta\rho_0} \right)^{13/15} \right]^{1/2} \left[l_a^{-2/5} b_0^{-3/5} \left(\frac{\dot{m}_g}{d_d + d_k} \right)^{13/15} \right]^{1/2}, \quad (9)$$

Здесь η — динамическая вязкость плазмы.

В соответствии с условием подобия ТОМЭД (9) выведем формулу для расчета граничной плотности теплового потока на поверхности цилиндрической части столба ТОМЭД проектируемой ПДП с плазмотроном заданной мощности для начала плавки твердой шихты после завалки $T_n = 1220$ К

$$q_c = q_{cb} \frac{K_m}{K_{mb}} \frac{K_\lambda}{K_{\lambda b}}, \quad (10)$$

где q_{cb} — рассчитанная на основе (3), (4) плотность теплового потока на поверхности цилиндрической части столба ТОМЭД базового плазмотрона для начала плавки.

Определение q_{cb} по (4) — (8) с помощью метода универсальных характеристик дуги дает значение $q_{cb} = 0,263 \cdot 10^{-6}$ Вт/м² для начала плавки. При этом физически условный коэффициент теплоотдачи цилиндрической части столба дуги базового плазмотрона $\alpha_{cb} = 46,846$ Вт/(м²·К).

В (10) критерии теплофизического и газодинамического подобий равны

$$K_\lambda = \left[\lambda(1750 \text{ К}) \left(\frac{\rho(1750 \text{ К})}{\eta(1750 \text{ К})\rho_0(700 \text{ К})} \right)^{13/15} \right]^{1/2}; \quad (11)$$

$$K_m = \left[l_a^{-2/5} b_0^{-3/5} \left(\frac{\dot{m}_g}{d_d + d_k} \right)^{13/15} \right]^{1/2}. \quad (12)$$

Для расчета плотности теплового потока на поверхности цилиндрической части столба ТОМЭД проектируемой ПДП по (10) следует выполнить расчет указанных критериев (11), (12):

- K_λ, K_m — для плазмотрона заданных мощности и рода газа;

- $K_{\lambda b}, K_{mb}$ — для базового плазмотрона, для которого была идентифицирована формула напряженности электрического поля цилиндрической части столба дуги (2), (3).

Для длины дуги $l_a = 1$ м базовое значение критерия газодинамического подобия K_{mb} составляет 1,3. Для плазмотрона, работающего с аргоном, $K_{\lambda b} = 9,952$.

Используя формулу подобия (10) теплообмена части столба дуги, удаленной от катода, можно вычислить характеристики теплообмена для плазмотрона ПДП заданной мощности при работе с газом заданного химического состава. В качестве примера (табл. 1, 2) были рассчитаны характеристики теплообмена и параметры части столба, удаленной от катода на расстояние $z > l_k = 0,11$ м, для плавильного плазмотрона с рабочим током 10 000 А, диаметрами катода 0,0508 м и сопла 0,00762 м, работающим с аргоном (рекомендованный поток массы аргона \dot{m} составляет от 0,01 до 0,012 кг/с). Значения средней температуры столба, рассчитанные по средней в объеме столба проводимости плазмы, также представлены в табл. 1, 2

$$\sigma(T_c) = \tilde{g}(P_{\lambda c}) / \pi.$$

Погрешность расчета характеристик дуги по предлагаемой методике не превышает $\pm 5\%$ относительно характеристик, полученных на промышленных печах.

Заключение

Предложенный математический метод универсальных характеристик дуги позволяет на основе только внешних ВАХ дуги $U_a = f(I, l_a)$ идентифицировать теплообменную модель Меккера и рассчитать простым

Таблица 1

Характеристики части столба дуги в отдалении от катода плазмотрона ПДП с рабочим током 10 кА при работе с газами различного химического состава в начале плавки шихты с $T_{\text{н}} = 1220 \text{ К}$

Характеристика	Плазмообразующий газ			
	Аргон	Гелий	Азот	смесь Ar 90% + N ₂ 10%
\dot{m} , кг/с	0,0117	0,0105	0,0086	0,0115
$q_{\text{с}}$, Вт/м ²	$0,267 \cdot 10^6$	$33,86 \cdot 10^6$	$0,408 \cdot 10^6$	$0,338 \cdot 10^6$
$r_{\text{с}}$, м	0,0401	0,0157	0,0554	0,0297
$E_{\text{с}}$, В/м	445,5	879	475,8	1135
$T_{\text{с}}$, К	11360	25200	9 580	10410
P_{λ} , Вт/м	$67,4 \cdot 10^3$	$3341 \cdot 10^3$	$142 \cdot 10^3$	$63 \cdot 10^3$
$P_{\text{с}}$, Вт/м	$4,3877 \cdot 10^6$	$5,446 \cdot 10^6$	$4,616 \cdot 10^6$	$11,285 \cdot 10^6$

Таблица 2

Характеристики части столба дуги в отдалении от катода плазмотрона ПДП с рабочим током 10 кА при работе с газами различного химического состава в период расплавления шихты

Характеристика	Плазмообразующий газ			
	Аргон	Гелий	Азот	смесь Ar 90% + N ₂ 10%
	Температура печи, К			
	1500	1500	1300	1500
\dot{m} , кг/с	0,0117	0,0105	0,0086	0,0115
$q_{\text{с}}$, Вт/м ²	$0,218 \cdot 10^6$	$2,75 \cdot 10^6$	$0,398 \cdot 10^6$	$0,283 \cdot 10^6$
$r_{\text{с}}$, м	0,0429	0,0289	0,0561	0,0318
$E_{\text{с}}$, В/м	415,6	819,6	470	1059
$T_{\text{с}}$, К	11 100	16 400	9 600	10 200
P_{λ} , Вт/м	$58,7 \cdot 10^3$	$498,7 \cdot 10^3$	$140,4 \cdot 10^3$	$56,5 \cdot 10^3$
$P_{\text{с}}$, Вт/м	$4,0965 \cdot 10^6$	$4,697 \cdot 10^6$	$4,560 \cdot 10^6$	$10,528 \cdot 10^6$

алгебраическим методом структуру и значения тепловых потоков, создаваемых дугой в процессе теплообмена со струей газа плазмотрона в плавильном пространстве плазменно-дуговой печи. Консервативная

(цилиндрическая) часть столба электрической дуги, существующая в отдалении от катода, является методологической основой в построении теплообменной модели электрической дуги.

Литература

1. Бортничук Н.И., Крутянский М.М. Плазмодуговые плавильные печи. М.: Энергоиздат, 1981.
2. Maecker H. Plasmaströmungen in Lichtbogen Infolge Eigen-magnetischer Kompression // Zeitschrift für Physik. 1955. No. 141. Pp. 198—216.
3. Bowman V. Measurements of Plasma Velocity Distributions in Freeburning DC Arcs up to 2160 // J. Phys. D.: Appl. Phys. 1972. No. 5. Pp. 1422—1432.
4. Bowman, B., Kruger, K. Arc Furnace Physics. Dusseldorf: Verlag Stahleisen GmbH, 2009.
5. Кручинин А.М. Дуга в потоке газа как объект регулирования замкнутой автоматической системы // Доклады науч.-техн. конф. по итогам науч.-исслед. работ за 1964 — 1965 гг. М.: МЭИ, 1965. С. 75—95.

References

1. Bortnichuk N.I., Krutyanskiy M.M. Plazmodugovye Plavil'nye Pechi. M.: Energoizdat, 1981. (in Russian).
2. Maecker H. Plasmaströmungen in Lichtbogen Infolge Eigen-magnetischer Kompression. Zeitschrift für Physik. 1955;141:198—216.
3. Bowman V. Measurements of Plasma Velocity Distributions in Freeburning DC Arcs up to 2160. J. Phys. D.: Appl. Phys. 1972;5:1422—1432.
4. Bowman, B., Kruger, K. Arc Furnace Physics. Dusseldorf: Verlag Stahleisen GmbH, 2009.
5. Kruchinin A.M. Duga v Potoke Gaza kak ob'ekt Regulirovaniya Zamknuoy Avtomaticheskoy Sistemy. Doklady Nauch.-tekhn. Konf. po Itogam Nauch.-issled. Rabot za 1964 — 1965 gg. M.: MPEI, 1965:75—95. (in Russian).

6. **Runstadler Jr.** Laminar and Turbulent Flow of Argon Arc Plasma // Proc. AIAA Plasmadynamics Conf. Monterey: Am. Inst. Aeronaut. Astron., 1966.

7. **Kruchinin A.M., Sawicki A.** A Method of Modelling Heat Transfer and Gasodynamic Processes in Arc Plasma Generators // High Temperature Material Processes. 2003. V. 7. Iss. 4. Pp. 501—524.

8. **Кручинин А.М.** Физические основы теплообменной модели электрической дуги в электротехнологии // Электротехнология в первом десятилетии XXI века: Сб. докл. науч.-техн. семинара, посвященного 100-летию профессора М.Я. Смелянского. М.: Изд-во МЭИ, 2013. С. 55—77.

9. **Никольский Л.Е., Смоляренко В.Д., Кузнецов Л.Н.** Тепловая работа дуговых сталеплавильных печей. М.: Металлургия, 1981.

10. **Юдаев Б.И., Михайлов М.С., Савин В.К.** Теплообмен при взаимодействии струй с преградами. М.: Машиностроение, 1977.

11. **Нгуен-Куок Ши.** Основы математического моделирования низкотемпературной плазмы. М.: Изд. дом МЭИ, 2013.

12. **Nguen-Kuok Shi.** Theory of Low-temperature Plasma Physics. Springer International Publ., 2017.

13. **Планковский С.И., Брега Д.А.** Моделирование процесса горения свободно горящей дуги атмосферного давления // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. 2012. № 53. С. 63—70.

6. **Runstadler Jr.** Laminar and Turbulent Flow of Argon Arc Plasma. Proc. AIAA Plasmadynamics Conf. Monterey: Am. Inst. Aeronaut. Astron., 1966.

7. **Kruchinin A.M., Sawicki A.** A Method of Modelling Heat Transfer and Gasodynamic Processes in Arc Plasma Generators. High Temperature Material Processes. 2003;7;4:501—524.

8. **Kruchinin A.M.** Fizicheskie Osnovy Teploobmennoy Modeli Elektricheskoy Dugi v Elektrotekhnologii. Elektrotekhnologiya v Pervom Desyatiletii XXI veka: Sb. Dokl. Nauch.-tekhn. Seminara, Posvyashchennogo 100-letiyu Profescora M.Ya. Smelyanskogo. M.: Izd-vo MPEI, 2013:55—77. (in Russian).

9. **Nikol'skiy L.E., Smolyarenko V.D., Kuznetsov L.N.** Teplovaya Rabota Dugovyh Staleplavil'nyh Pechey. M.: Metallurgiya, 1981. (in Russian).

10. **Yudaev B.I., Mihaylov M.S., Savin V.K.** Teploobmen pri Vzaimodeystvii Struy s Pregradami. M.: Mashinostroenie, 1977. (in Russian).

11. **Nguen-Kuok Shi.** Osnovy Matematicheskogo Modelirovaniya Nizkotemperaturnoy Plazmy. M.: Izd. dom MEI, 2013. (in Russian).

12. **Nguen-Kuok Shi.** Theory of Low-temperature Plasma Physics. Springer International Publ., 2017.

13. **Plankovskiy S.I., Brega D.A.** Modelirovanie Protssesa Gorennya Svobodno Goryashchey Dugi Atmosfernogo Davleniya. Otkrytye Informatsionnye i Komp'yuternye Integrirovannye Tekhnologii. 2012;53:63—70. (in Russian).

Сведения об авторах:

Кручинин Анатолий Михайлович — доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий НИУ «МЭИ», e-mail: ancuchinin@yandex.ru

Погребисский Михаил Яковлевич — кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий НИУ «МЭИ», e-mail: PogrebisskiyMY@mpei.ru

Рязанова Елена Сергеевна — ведущий инженер кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий НИУ «МЭИ», e-mail: RiazanovaYS@mpei.ru

Чурсин Андрей Юлианович — ведущий инженер кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий НИУ «МЭИ», e-mail: ChursinAY@mpei.ru

Information about authors:

Kruchinin Anatoliy M. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Electric Supply of Industrial Enterprises and Electrotechnology's Dept., NRU MPEI, e-mail: ancuchinin@yandex.ru

Pogrebissky Mikhail Ya. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Electric Supply of Industrial Enterprises and Electrotechnology's Dept., NRU MPEI, e-mail: PogrebisskiyMY@mpei.ru

Ryazanova Elena S. — Leading Engineer of Electric Supply of Industrial Enterprises and Electrotechnology's Dept., NRU MPEI, e-mail: RiazanovaYS@mpei.ru

Chursin Andrey Yu. — Leading Engineer of Electric Supply of Industrial Enterprises and Electrotechnology's Dept., NRU MPEI, e-mail: ChursinAY@mpei.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 11.10.2017

The article received to the editor: 11.10.2017