

УДК 621.365.9

Исследования энергетических характеристик вакуумных плазмотронов с полыми катодами

В.А. Сериков¹, П.В. Домаров^{1,2}, М.В. Чередниченко¹, В.С. Чередниченко¹

¹Новосибирский государственный технический университет

²Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mail: Domaroff@yandex.ru

Представлены результаты основных физических процессов, обеспечивающих работу полого катода вакуумных плазмотронов с формированием высокоэнтальпийной плазмы внутри полости. Взаимодействие плазмы с внутренней поверхностью катода определяет температурное поле полого катода и распределение тепловых потоков в вакуумном разряде. На формирование температурного поля в теле катода, кроме прикатодных процессов, оказывают значительное влияние условия теплообмена катода с окружающей средой, характеристики материала катода и его геометрические размеры. Исследования спектров излучения плазмы в полости катода показали, что появление линий спектра зависит от условий возбуждения и определяет границы энергии электронов, ускоренных в прикатодном слое.

Ключевые слова: полый катод, тепловое поле, тепловые потери, прикатодная область, вакуумный плазмотрон.

Введение

В обычном варианте реализация рассматриваемого вакуумного дугового разряда осуществляется с использованием полого катода — цилиндрической трубки с внутренним диаметром d , через которую подается газ в камеру низкого давления. Открытый конец трубки направлен в сторону плоского или кольцевого анода. Длина катодной трубки должна составлять несколько ее внутренних диаметров.

Возможность обеспечения длительного ресурса работы и повышения интегральной эффективности параметров вакуумных плазмотронов с полыми катодами связана не только с эффектами полых катодов, но и с процессами взаимодействия рабочей поверхности катодов с высокоэнтальпийной плазмой внутри полости. Этот фактор имеет самостоятельное теоретическое и прикладное значение, а его изучение основывается на многочисленных результатах исследований этих процессов [1, 2].

Необходимо отметить энергетическую природу процессов внутри полости катода, так как падение потенциала на любом участке электрической цепи характеризует энергозатраты на этом участке при прохождении тока. Именно с этим связана причина,

по которой в разряде с полым катодом падение потенциала в активной зоне близко к напряжению на разрядном промежутке в целом. В этом случае в активной области вводится в плазму и катод энергия, измеряемая приборами внешней цепи. Откуда возникает и как такой процесс развивается, куда в последующем расходуется эта энергия?

Ответы на эти вопросы связаны с преобразованием электрической энергии в полости катода в кинетическую и с рекуперацией вновь в электрическую аналогично тому, как это происходит в МГД-процессах. Рекуперация наблюдается в полости катода в радиальном и осевом направлениях за счет наличия осциллирующих электронов, подачи и торможения плазмы из столба разряда в полости катода и конвекционного (кинетического) выноса плазмы из полости катода для формирования столба разряда [3].

Выделение в полости катода максимальной вводимой в разряд энергии подтверждается экспериментальной зависимостью КПД разряда η от расстояния между катодом и анодом. При уменьшении длины столба разряда, которая ограничивается влиянием отраженной волны от анода на процессы внутри полости катода, этот показатель достигает 88–92 % без существенного снижения напряжения на разряде [3].

Однако теоретическое изучение взаимодействия неравновесной плазмы с поверхностью катодов на сильноточных режимах работы плазмотронов нельзя признать эффективным вследствие неоднозначности постановки таких задач в плазмодинамике. Поэтому результаты настоящей работы основаны на экспериментальных исследованиях полых катодов вакуумных плазмотронов.

1. Экспериментальное исследование плазмы в полости катода вакуумного плазмотрона

Исследования спектров излучения плазмы в полости катода показали, что появление линий спектра зависит от условий возбуждения и определяет границы энергии электронов, ускоренных в прикатодном слое. В качестве плазмообразующих газов использовался аргон, гелий или азот. Разряд зажигается между полым катодом и плоским водоохлаждаемым анодом, расположенным перпендикулярно оси катода. Излучение плазмы наблюдалось через открытый конец катода в направлении оси плазменной системы. Спектры регистрировались монохроматором МДР-23, оборудованным фотоэлектрической системой записи ФЭП-4. Расшифровка длин волн наблюдаемого спектра проводилась по таблицам спектральных линий при использовании эталонного спектра ртутной лампы [4].

Анализ линий спектров показал, что в спектре излучения аргонной плазмы в полости катода наблюдаются только линии ионизированного аргона с энергией возбуждения в интервале 19–25 эВ. В спектре излучения гелиевой плазмы наблюдаются только линии нейтрального гелия с энергией возбуждения в том же интервале. В спектре излучения азотной плазмы, кроме линий атомарного ионизированного азота с энергией возбуждения в интервале 19–25 эВ, отмечаются полосы первой отрицательной системы полос молекулярного иона азота с энергией возбуждения 18,7 эВ. Кроме линий плазмообразующих газов, в спектре излучения плазмы вблизи поверхности катода наблюдаются линии вольфрама или тантала с энергией возбуждения 3–7 эВ. Интенсивность этих линий быстро падает при удалении от поверхности катода в радиальном направлении.

Отсутствие в спектре излучения линий атомарного аргона, а также линий и полос атомарного и молекулярного азота при наблюдении вдоль потока плазмообразующего газа при непрерывном его течении и значительная интенсивность линий ионизированных атомов и молекул показывают, что ионизация осуществляется прямым электронным

ударом из основного состояния атома или молекулы, минуя промежуточные состояния. При этом отсутствие в спектрах линий с энергией возбуждения, лежащей за пределами интервала 19–25 эВ, указывает на то, что энергия бомбардирующих электронов находится в том же интервале. Присутствие линий материала катода с низкой энергией возбуждения указывает на наличие группы медленных электронов с энергией, не превышающей потенциал возбуждения метастабильных состояний аргона.

Таким образом, анализ спектров излучения плазмы в полости катода показывает наличие двух групп электронов: быстрых с энергией, превышающей 19 эВ, и медленных с энергией, не превышающей энергию возбуждения первого уровня аргона или азота. Эти выводы согласуются с результатами зондовых измерений [3, 4], полученными вблизи среза катода.

Увеличение потенциала плазмы, находящейся в активной зоне, происходит за счет торможения плазменного потока, передаваемого из столба разряда на сверхзвуковом фронте течения плазмообразующего газа, находящегося по оси z вверх по потоку газа выше активной зоны [5].

Часть осциллирующих электронов, обеспечивая ионизацию плазмообразующего газа, передает энергию плазменному потоку, перемещающемуся по оси разряда. Другая часть высокоэнергетичных электронов, осциллирующих в радиальном направлении, преодолевает противоположно направленное электрическое поле в прикатодной области, попадает на поверхность катода и определяет величину тока обратных электронов на катод. Энергия направленного потока электронов к поверхности катода сравнительно легко трансформируется обратно в энергию электрического поля в прикатодной области, повышая потенциал плазмы в этой части разряда.

Вынос плазмы из полости катода имеет кинетический характер и происходит против направления напряженности электрического поля в этой области разряда. На этом участке кинетическая энергия плазменного потока трансформируется в электрическую энергию, существенно понижая потенциал плазмы относительно анода вблизи среза катода. В цепи тока разряда возникает потенциальная «яма», которую условно можно назвать виртуальным катодом. Эта область обнаруживается на фотографиях как темная часть разряда, показанная на рис. 1.

Прямое экспериментальное изучение процессов невозможно из-за высоких температур внутри полости и недоступности этой области для диагностики. Однако одним из важнейших проявлений рассматриваемого взаимодействия плазмы с катодом является тепловое поле наружной поверхности катода, которое можно измерить с необходимой точностью. Последующее решение обратной тепловой задачи численным моделированием тепловых процессов позволяет выявить ряд свойств такого генератора плазмы, отличающих вакуумный плазмотрон с полым катодом от других систем аналогичного назначения [6, 7].

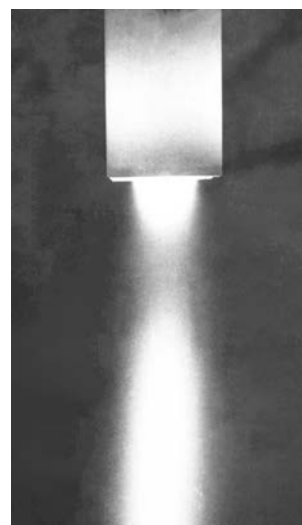


Рис. 1. Область сопряжения прикатодной области со столбом разряда.

2. Тепловое поле полого катода

На формирование температурного поля в теле катода наряду с прикатодными процессами оказывают значительное влияние условия теплообмена катода с окружающей средой, характеристики материала катода и его геометрические размеры. Исследования проводились на газопроточных полых катодах простой цилиндрической формы [5], открытой со стороны разрядного объема. Исходные параметры изменялись в следующих диапазонах: рабочий ток и определяющий геометрический размер I/d от $4 \cdot 10^4$ до $12 \cdot 10^4$ А/м, расход плазмообразующего газа (аргона) от 10^{-5} до $4 \cdot 10^{-5}$ кг/с, давление в рабочей камере от 2 до 6 Па. Катоды с внутренними диаметрами $d_1 = 10, 18, 20$ мм и толщиной $\delta = 2,5$ и 5 мм изготавливались из вольфрама.

Базовым электродом в экспериментах был катод диаметром $d_1 = 10$ мм, так как при питании разряда от источника без пульсаций напряжения на нем можно обеспечить режим, близкий к номинальному. Перед измерениями катоды тренировались для завершения процессов радиальной перекристаллизации; исходная пористость вольфрама составляла $\Pi = 0,25$ [8].

На рис. 2 приведена общая схема теплового взаимодействия катода с окружающим пространством и внутренней полостью, участвующей в теплообмене с плазмой. Здесь 1 — цилиндрическая внутренняя поверхность полости катода, формирующая кондуктивный поток в катод $q_{\text{конд}}$, 2 — наружная поверхность катода, определяющая радиационный и термоэмиссионный теплообмен с окружающей средой $Q_{\text{бп}}$, 3 — эффективная поверхность полости, через которую формируется радиационный поток с торца и внутренней поверхности катода, прилегающей к открытому концу полости $Q_{\text{п}}$, 4 — торцевая поверхность внутренней полости, воспринимающая радиационный поток переизлучения и кондуктивный осевой поток теплоты, формирующий поток в катодо-

держатель $Q_{\text{кд}}$.

Обозначив через q_{Σ} суммарную плотность теплового потока на внутренней поверхности катода, взаимодействующей с плазмой, можно записать [2]:

$$q_{\Sigma} = q_{\text{конд}} - E_p - q_0,$$

где $q_{\text{конд}}$ — плотность потока на внутренней поверхности катода, E_p — плотность потока результирующего излучения с поверхности I (1) внутри полости, q_0 — прочие потоки энергии, учитывающие излучение плазмы, химические реакции на поверхности, теплообмен с нейтральным газом и др.

Энергообмен плазмы с катодом наиболее полно отражает кондуктивный тепловой поток, который выражается как

$$q_{\text{конд}} = -\lambda \left(\partial T / \partial r \right) \Big|_{r=r_1} = q_i + q_e^{\text{обр}} - q_{\text{эм}} + E_p + q_0,$$

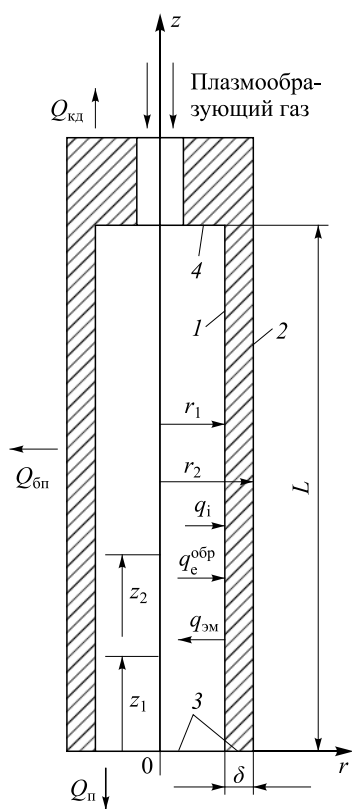


Рис. 2. Схема теплового взаимодействия катода с окружающим пространством.

где q_i , $q_e^{\text{обр}}$ — потоки, приносимые на катод ионами и обратными электронами, $q_{\text{эм}}$ — поток, уносимый с поверхности катода электронами эмиссии в плазму.

Для анализа энергообмена плазмы с катодом запишем балансовые уравнения плотностей теплового потока и плотностей тока на внутренней поверхности катода:

$$q_{\Sigma} = q_i + q_e^{\text{обр}} - q_{\text{эм}}, \quad (1)$$

$$j_{\Sigma} = j_i + j_e^{\text{обр}} - j_{\text{эм}},$$

или в интегральном виде:

$$Q_{\Sigma} = Q_i + Q_e^{\text{обр}} - Q_{\text{эм}}, \quad (2)$$

$$I_{\Sigma} = I_i + I_e^{\text{обр}} - I_{\text{эм}}.$$

Суммарный тепловой поток Q_{Σ} в соответствии с уравнением (2) формирует кондуктивный поток в катод $Q_{\text{конд}}$ и лучистые тепловые потоки: $Q_{\text{п}}^{\text{R}}$ — поток излучения из полости катода, $Q_{\text{кд}}^{\text{R}}$ — поток излучения, поглощенный поверхностью 4 (см. рис. 2) водоохлаждаемого катододержателя:

$$Q_{\Sigma} = Q_{\text{конд}} + Q_{\text{п}}^{\text{R}} + Q_{\text{кд}}^{\text{R}}. \quad (3)$$

Кондуктивный тепловой поток $Q_{\text{конд}}$ рассеивается в окружающую среду по трем составляющим теплообмена: излучением через боковую поверхность катода $Q_{\text{бп}}^{\text{R}}$, излучением с поверхности торца катода $Q_{\text{т}}^{\text{R}}$ и теплопроводностью в охлаждаемый катододержатель Q_{λ} . Следовательно, с учетом джоулева тепловыделения в катоде $Q_{\text{дж}}$ расходная часть кондуктивного потока выражается как

$$Q_{\text{конд}} = Q_{\text{бп}}^{\text{R}} + Q_{\text{т}}^{\text{R}} + Q_{\lambda} - Q_{\text{дж}}. \quad (4)$$

Анализ уравнений (1) и (2) показывает, что составляющие их правой части экспериментально трудноразделимы. Однако суммарный тепловой поток может быть найден экспериментально измерением температуры поверхностей по уравнениям (3) и (4), и в результате определены зависимости тепловых потерь от тока разряда $Q_{\Sigma}(I_{\Sigma})$, диаметра внутренней полости катода $Q_{\Sigma}(d_1)$, толщины стенки катода $Q_{\Sigma}(\delta)$ и от расхода плазмообразующего газа $Q_{\Sigma}(G_{\text{г}})$.

Полые катоды, рассматриваемые в настоящей работе, имеют тепловые постоянные, значительно превышающие постоянные времени элементарных процессов, протекающих в полости катода. Это позволило при стабилизации электрических режимов и расходов плазмообразующего газа обеспечить необходимую точность определения температуры наружной поверхности катода $T_2(z)$ методом измерения цветовой температуры на двух длинах волн: $\lambda_1 = 5 \cdot 10^{-7}$ м и $\lambda_2 = 4 \cdot 10^{-7}$ м. Диагностика интенсивности излучения осуществлялась монохроматором и системой фотоэлектрической регистрации. Два значения интенсивности для координаты z обрабатывались по уравнению [2]:

$$T_2 = C (1/\lambda_2 - 1/\lambda_1) [\ln(I_1/I_2) + 5\ln(\lambda_1/\lambda_2) + 2\ln(\varepsilon_2/\varepsilon_1) + \ln(K_2/K_1)]^{-1},$$

где I_1 , I_2 — амплитуды пика самопишущего прибора при фотоэлектрической регистрации излучения на длинах волн λ_1 и λ_2 ; K_1 , K_2 — коэффициенты преобразования интенсивности оптического излучения в электрический сигнал; ε_1 , ε_2 — коэффициенты излучения металла (вольфрама) на длинах волн λ_1 и λ_2 ; C — энергетическая постоянная,

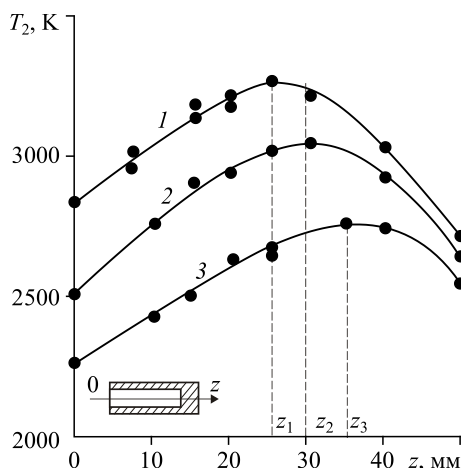


Рис. 3. Распределение температуры T_2 по длине наружной поверхности полого катода при $d_1/d_2 = 0,74$, $G = 1,3 \cdot 10^{-5}$ кг/с.

$I/d_1 = 11,6 \cdot 10^4$ (1), $7,5 \cdot 10^4$ (2), $4 \cdot 10^4$ (3) А/м;

$z_1 - z_3$ — точки удаления от торца полого катода внутрь.

равная $1,438 \cdot 10^{-2}$ м·К. Значения K_1 и K_2 определялись путем тарировки системы измерения по излучению эталонной ленточной лампы типа СИ-2-10. Излучательные способности ε_1 и ε_2 зависят от температуры, поэтому задача решалась итерационным методом путем расчета цветовой температуры при значениях ε_1 и ε_2 из [5]. Затем по найденной температуре

вычислялись новые значения ε_1 , ε_2 и рассчитывалась соответствующая температура и т.д. Такая процедура сходилась уже после двух итераций. На уровне рабочих температур 2700–3400 К абсолютная погрешность в измерении температуры составляла $\Delta T < 100$ К.

На рис. 3 приведены зависимости температуры наружной стенки катода от длины $T_2(z)$ для трех значений критерия I/d_1 . Изучение токовых режимов на катодах различных диаметров позволило установить, что для каждого катода существует оптимальный диапазон рабочих токов. Нижняя граница диапазона тока $I_{\min}$ определяется устойчивостью работы на малых токах, а верхняя граница $I_{\max}$ — максимально допустимой температурой катода, не превышающей температуру плавления материала катода на внутренней поверхности. Значение $I_{\max}$ возрастает с увеличением диаметра. Максимальное значение критерия I/d_1 для вольфрамовых катодов равно $12,5 \cdot 10^4$ А/м, для катодов из тантала — $11 \cdot 10^4$ А/м [8].

Тепловые потери в катоде в зависимости от тока разряда для различных катодов приведены на рис. 4.

Анализ экспериментальных результатов показывает, что суммарные тепловые потери в катоде при изменении рабочего тока меняются незначительно: при увеличении тока в 3 раза потери возрастают в среднем на 20–22 %. С уменьшением расхода плазмообразующего газа величина потерь при увеличении тока также возрастает. Однако общий уровень этих изменений лежит в пределах погрешности определения тепловых потоков [2, 5].

Слабая зависимость тепловых потерь от параметров разряда и характер изменения профиля температуры $T_2(z)$ показывают, что увеличение тока разряда вызывает сжатие области, где происходит интенсивный электро- и теплообмен катода с плазмой, плотность

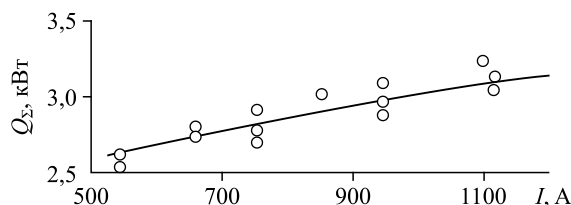


Рис. 4. Тепловые потери в катоде с $d_1 = 10$ мм, $\delta = 3,5 - 5$ мм; $G = (1,2 - 1,6) \cdot 10^{-5}$ кг/с; газ — аргон.

Рис. 5. Обобщенная зависимость линейной плотности тепловых потерь для катодов различного диаметра.
 $d_1/d_2 = 0,5 - 0,75$; $G > G_{\min}$; вольфрам.

теплового потока в этой зоне возрастает, а полный тепловой поток изменяется незначительно. Этим свойством системы плазмотронов с полыми катодами объясняется эффективность эксплуатационных характеристик.

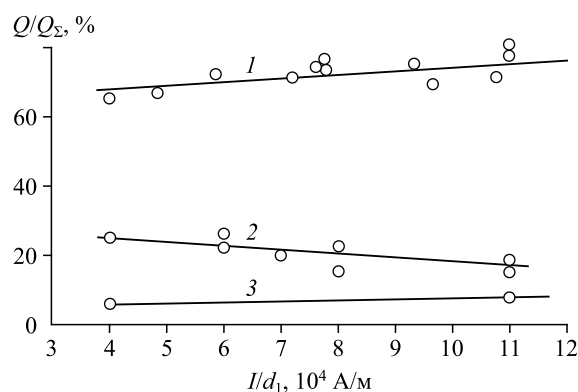
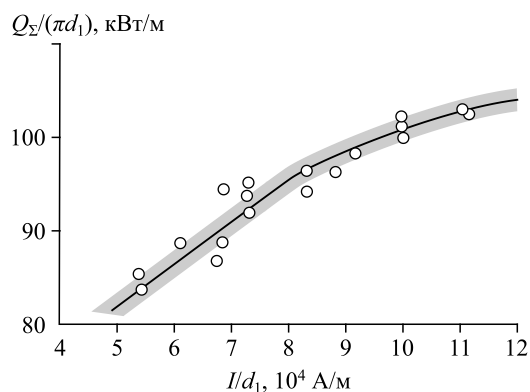


Рис. 6. Распределение тепловых потерь в катодe ($d_1 = 10$ мм).

1 — излучение с наружной поверхности катода,
 2 — катододержатель, 3 — излучение с торца
 (газ — аргон).

На рис. 5 приведена зависимость величины тепловых потерь, отнесенных к единице длины окружности на внутренней поверхности катода. Эта характеристика в диапазоне малых и средних токов ($I/d_1 \leq 7 \cdot 10^4$ А/м) имеет линейный характер и может быть аппроксимирована выражением

$$Q_{\Sigma}/(\pi d_1) = 74 + 0,017 I,$$

а при увеличении I/d_1 интенсивность изменения $Q_{\Sigma}/(\pi d_1)$, кВт/м уменьшается. Следовательно, тепловая и энергетическая эффективности полых катодов с увеличением рабочих токов возрастают.

Характерные распределения тепловых потерь по составляющим для катода диаметром $d_1 = 10$ мм, $\delta = 5$ мм при различных режимах работы приведены на рис. 6. Основной вклад в потери дает излучение с боковой поверхности катода. При этом основную роль играет область протяженностью около одной трети длины катода вблизи максимума температуры [3].

Заключение

Проведен анализ основных физических процессов, обеспечивающих работу полого катода вакуумных плазмотронов с формированием высокоэнтальпийной плазмы внутри полости.

Установлено, что ионизация газа осуществляется прямым электронным ударом из основного состояния атома, минуя промежуточные состояния. Этим определяется устойчивость работы вакуумного плазмотрона и независимость режимов работы от внешних воздействий на разряд. Взаимодействие плазмы с внутренней поверхностью катода определяет температурное поле полого катода и распределение тепловых потоков в вакуумном разряде. Доказано увеличение тепловой энергетической эффективности полых катодов с возрастанием рабочих токов. Результаты исследований могут быть использованы при создании промышленных вакуумных плазмотронов с полыми катодами.

Список литературы

1. Чередниченко В.С., Чередниченко М.В. Вакуумные плазменные электропечи с полым катодом // Электрометаллургия. 2002. № 2. С. 18–27.
2. Чередниченко В.С., Аньшаков А.С., Кузьмин М.Г. Плазменные электротехнологические установки. М.: ИНФРА-М, 2020. 601 с.
3. Чередниченко В.С., Юдин Б.И. Теплофизические процессы в вакуумных плазменных электропечах для нагрева порошковых материалов // Электрометаллургия. 2008. № 1. С. 30–35.
4. Cherednichenko A.V., Cherednichenko V.S., Bikeev R.A., Serikov V.A. Electrothermal processing of tantalum capacitor powders // J. Phys. Conf. Series: Materials Sci. and Engng. 2019. Vol. 560. P. 012100-1–012100-5.
5. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Вводный том из 4 кн. / Под ред. В.Е. Фортова. М.: Наука, 2000. 505 с.
6. Аньшаков А.С., Урбах Э.К., Чередниченко В.С., Кузьмин М.Г., Урбах А.Э. Исследование генератора термической плазмы технологического назначения // Теплофизика и аэромеханика, 2015. Т. 22, № 6. С. 805–808.
7. Cherednichenko A.V., Zuev S.P., Serikov V.A. Features of the operating modes of a hot hollow cathode in a vacuum arc discharge // J. Phys. Conf. Series: Materials Sci. and Engng. 2019. Vol. 560. P. 012122-1–012122-6.
8. Чередниченко А.В. Параметры газовых разрядов в пусковых режимах вакуумных плазмотронов с полыми катодами // Электрометаллургия. 2020. № 6. С. 18–26.

*Статья поступила в редакцию 25 июля 2022 г.,
после доработки — 3 ноября 2022 г.,
принята к публикации 8 декабря 2022 г.*