

УДК 537.3.523

ДИСКРЕТНАЯ СТРУКТУРА КАТОДНОГО ПЯТНА И ТОКОПРОВОДЯЩЕГО КАНАЛА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ

А.П. Степанов, Ю.В. Сотокина

Юргинский технологический институт (филиал) ТПУ
E-mail: apsuti@rambler.ru

Степанов Анатолий Петрович, ст. преподаватель кафедры сварочного производства Юргинского технологического института (филиала) ТПУ.
E-mail: apsuti@rambler.ru
Область научных интересов: модели электрической дуги, прогрессивные сварочные технологии.

Сотокина Юлия Владимировна, инженер кафедры сварочного производства Юргинского технологического института (филиала) ТПУ.
E-mail: juliazem@bk.ru
Область научных интересов: прогрессивные сварочные технологии, энергосбережение, модели сварочной электрической дуги, эктоны.

На основе анализа известных экспериментальных фактов показано, что при возбуждении электрической дуги в результате автоэлектронной эмиссии возникает ток, который течет через ячейки – микронеровности катода. Выгорание катода происходит по микронеровностям, при этом образуются кратеры на поверхности катода. Данное явление служит причиной дискретной (ячеистой) структуры катода. Установлено, что в результате стекания электронов с микронеровностей образуются тонкие токовые каналы, замыкающие цепь анод-катод электрической дуги. Сделан вывод о том, что токопроводящий канал электрической дуги имеет дискретное строение и представляет собой совокупность тонких каналов, через которые течет основной ток разряда.

Ключевые слова:

Электрическая дуга, катодное пятно, токопроводящий канал.

Эффективное развитие современных сварочных технологий, совершенствование оборудования и материалов неизбежно требует глубоких теоретических знаний о физических явлениях, происходящих в столбе электрической дуги и в приэлектродной области. Однако убедительного теоретического описания дугового разряда до сих пор не существует. В статье на основе обобщения известных экспериментальных фактов показано, что токопроводящий канал электрической дуги имеет дискретное строение и представляет собой совокупность тонких каналов, через которые течет основной ток разряда. Данная модель дуги адекватно отражает происходящие физические процессы при сварке и может быть полезной при исследовании и разработке технологий электродуговой сварки.

Катодное пятно дугового разряда является сильно разогретой и ярко светящейся областью на поверхности катода. Из этой области происходит эмиссия электронов, поддерживающая разряд, а также унос материала катода. Важным свойством катодного пятна является наличие внутренней структуры, проявляющееся в существовании отдельных ячеек или фрагментов катодного пятна. Для корректного теоретического описания процесса эрозии катода, процессов в катодном пятне в настоящее время не существует реальных математических моделей [1]. Остается также неясным механизм замыкания тока дугового разряда на катодах из металлов с низкой температурой плавления и малой величиной удельной эрозии металла [1]. Предложенные физические механизмы сводятся к тому, что поверхность металла в зоне катодного пятна расплавлена, а над поверхностью существует область пространственного заряда, которая определяет всю энергетическую ситуацию прикатодной области. Однако гипотеза о существовании области пространственного заряда не позволяет объяснить всю совокупность явлений в прикатодной области. В подобных физических моделях [2] не учитывается наличие микроструктуры катода, а также закономерности протекания тока через микронеровности катода.

Рассмотрим процесс возбуждения электрической дуги методом соприкосновения и разведения электродов. При подаче напряжения от источника питания в межэлектродном проме-

жутке возникает электрическое поле напряженностью E . При достижении напряженности электрического поля у катода порядка $10^6 \dots 10^8$ В/см происходит автоэлектронная (электростатическая) эмиссия. Произведем оценку величины межэлектродного промежутка h для напряжения зажигания электрической дуги $U = 100$ В, при котором напряженность поля будет равна 10^6 В/см, т. е. возникнут условия для эмиссии электронов из катода. Из формулы для напряженности поля между обкладками плоского конденсатора $E = U/h$ выразим $h = U/E$ и получим $h = 10^{-4}$ см = 100 мкм. Следовательно, при сближении электродов на расстояние около 100 мкм возникает электрическое поле порядка 10^6 В/см, подобное электрическому полю плоского конденсатора.

Поверхность катода имеет микронеровности. Электрическое поле у острия микронеровностей всегда намного сильнее, чем в других местах. Это связано с тем, что радиус кривизны острия много меньше, чем в других местах, поэтому электрическое поле оказывается сильнее.

При достижении напряженности внешнего электрического поля порядка $10^6 \dots 10^8$ В/см с выступов микронеровностей будет происходить автоэлектронная эмиссия. Под действием внешнего электрического поля электроны проводимости микроострий немедленно придут в упорядоченное, направленное движение и будут «стекают» с острия.

Для проводников выполняется принцип электронейтральности: в отсутствие электрического тока заряды распределяются только на поверхности проводника. В толще металла электродов электрическое поле равно нулю. Следовательно, в результате ухода электронов с острия в области выступа появится локально некомпенсированный положительный заряд (рис. 1) и, следовательно, локальное электрическое поле.

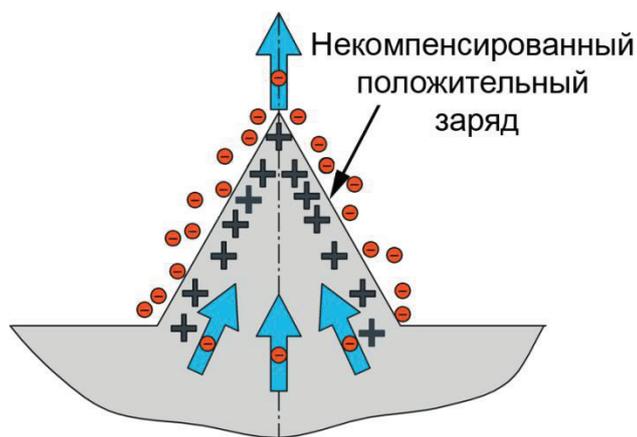


Рис. 1. Образование некомпенсированного положительного заряда в объеме микровыступа

Под воздействием сил этого поля электроны из приповерхностной зоны катода придут в движение. Они будут двигаться к направлению выступа для компенсации избыточного положительного заряда выступа. В итоге устанавливается динамическое равновесие между уходом электронов и их приходом, т. е. возникнет ток, текущий через микроострие. Под воздействием этого тока будет происходить джоулев нагрев металла микронеровности катода, плавление и испарение микровыступов и образование кратера на поверхности катода.

Наличие субструктуры катодного пятна было установлено экспериментально при исследовании эрозионных структур, оставляемых вакуумной дугой на тонкопленочных катодах [3]. По данным [3] каждая ячейка катодного пятна переносит ток, равный удвоенному пороговому току горения дуги $2i_p$. Существование ячеек проявляется в виде микрократеров в месте присутствия пятна. Ячеистая (дискретная) микроструктура катодного пятна проявляется при самых различных условиях горения дуги (ток $1 \div 10^3$ А, время $10^{-8} \div 10^{-2}$ с, разные катодные материалы и т. д.), а также проявляется в других формах газового разряда.

В ряде работ по исследованию высоковольтных наносекундных разрядов в воздухе атмосферного давления обнаружена микроструктура токовых каналов, представляющая собой совокупность тонких каналов микронного диаметра. Так в [4] при исследовании высоковольт-

ного диффузного разряда обнаружены микроканалы диаметром $\Delta_{\text{mic}} = 5 \dots 10 \text{ }\mu\text{m}$, объединенные в скопления $N \sim 1000$ штук при среднем расстоянии $D \sim 100 \text{ }\mu\text{m}$ между ними.

Аналогичная микроструктура обнаружена в искровом разряде наносекундного диапазона, формируемом в однородном и резко-неоднородном промежутках [5]. На рис. 2, а приведен отпечаток токового канала искрового разряда на заземленном электроде. Амплитуда напряжения на промежутке 25 kV, длительность фронта нарастания 15 ns. Амплитуда тока искры 3 kA. Диаметр отпечатка канала $\Delta = 0,4 \text{ mm}$. Видно, что искра обладает внутренней микроструктурой, представляющей собой скопление микроканалов диаметрами $\Delta_{\text{mic}} = 5 \dots 10 \text{ }\mu\text{m}$, примерно равномерно распределенных по сечению канала. Среднее расстояние между каналами 20 μm . В центральной части отпечатка в результате оплавления металла отдельные микроканалы сливаются, образуя кратеры диаметром 20...30 μm . Общее количество микроканалов $N = 600 - 900$ штук. Аналогичная картина регистрировалась и на потенциальном электроде.

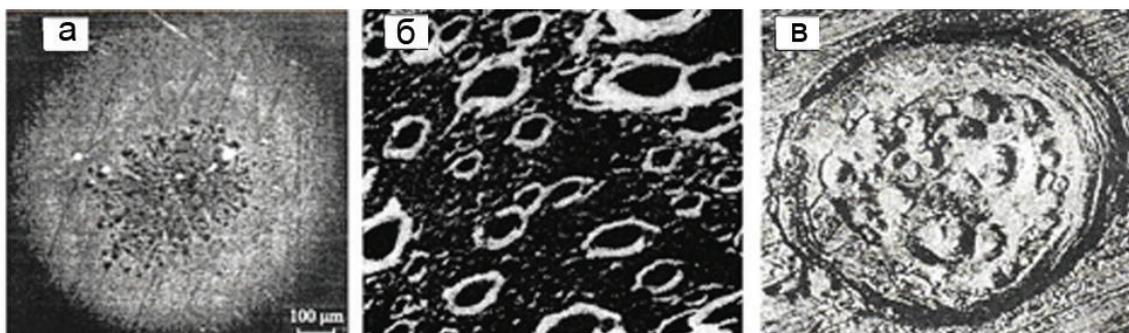


Рис. 2. Отпечатки: а) искры на заземленном электроде; б) катодного пятна вакуумной дуги; в) катодного пятна открытой сварочной дуги $I = 60 \text{ A}$

На рисунке 2, б показаны кратеры на оксидированном молибденовом катоде для катодных пятен первого типа электрической дуги в вакууме. Микрофотография получена при наложении тангенциального к поверхности катода магнитного поля [5].

В работе [6] установлено, что катодное пятно открытой сварочной дуги, горящей между металлическими электродами, состоит из автономных пятен. На рис. 2, в приведен отпечаток катодного пятна открытой сварочной дуги, горящей между электродами из стали Ст.3 диаметром 10 мм. Режим горения импульсной дуги: $I_d = 60 \text{ A}$, $U_d = 24 \text{ В}$, время импульса $t_{\text{и}} = 0,01 \text{ с}$.

Таким образом, при возбуждении в дуговых и искровых разрядах в результате автоэлектронной эмиссии микронеровности поверхности катода становятся эмиссионными центрами (рис. 3), через которые течет основной ток катода. В результате на поверхности катода образуется совокупность эмиссионных центров – катодное пятно, которое представляет собой сильно разогретую область катода размером $10^{-3} \dots 10^{-4} \text{ см}$, к которой примыкает ярко светящаяся плазма, состоящая полностью или частично из материала катода.

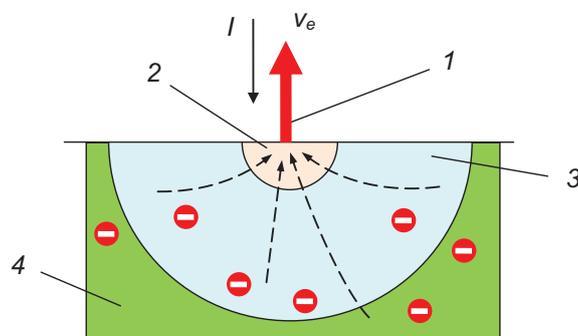


Рис. 3. Схематическое изображение эмиссионного центра катода: 1 – поток электронов с микронеровности (токовая нить); 2 – зона испарения и формирования токовой нити; 3 – жидкая фаза; 4 – твердая фаза

При «стекании» электронов с микронеровности образуется тонкий токовый канал (токовая нить, микродуга), замыкающий межэлектродный промежуток. Вследствие испарения вещества микронеровности разрушаются, при этом напряженность поля уменьшается, ток с микронеровности прекращается, микродуга гаснет. Однако вблизи присутствует другой выступ шероховатости, на который перемещается (зажигается) микродуга. Происходит непрерывное перемещение микродуг, что является основной причиной блуждания катодного пятна. Катодное пятно перемещается по поверхности и является источником высокоскоростных струй плазмы. Обычно горение дуги начинается с появления быстроперемещающихся пятен (скорость $\sim 10^3 \dots 10^4$ см/с), которые затем переходят в медленноперемещающиеся пятна (скорость $10 \dots 10^2$ см/с). Выгорание катода происходит по микронеровностям, при этом образуются кратеры на поверхности катода. Непрерывное движение микродуг катодного пятна является причиной ячеистой (дискретной) структуры катода.

Из-за наличия множества микронеровностей на поверхности катода в момент возбуждения дуги образуется множество токовых нитей, при этом происходит взаимодействие между ними. Токовая нить подобна проводнику с током. Известно [7], что проводники с током, текущим в одном направлении, притягиваются, а электронные пучки в вакууме отталкиваются. Поэтому необходимо выяснить характер и величину силы взаимодействия между токовыми нитями.

Рассмотрим две токовые нити в частично ионизированной среде, которые подключены к источнику постоянного напряжения. Предположим, что радиус их одинаковый и равен r . Расстояние между осями нитей обозначим через l . Предположим, что через данные нити протекает одинаковый ток I . Необходимо оценить силу взаимодействия между токовыми нитями.

На каждой токопроводящей нити находится избыточный поверхностный заряд. Поэтому кроме магнитной силы притяжения F_m необходимо учитывать и электрическую силу, возникающую из-за наличия поверхностного заряда на проводниках.

Обе силы направлены в противоположные стороны. Электрическая сила обуславливает отталкивание проводов (из-за одноименного знака поверхностного заряда), магнитная – их притяжение (вследствие протекания тока в одном направлении).

Величина отношения этих сил [7]:

$$\frac{F_m}{F_э} = \frac{\mu_0 \ln^2 l/r}{\varepsilon_0 \pi^2 R^2},$$

где F_m – магнитная сила, $F_э$ – электрическая сила; $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная; $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6}$ Гн/м – магнитная постоянная; R – сопротивление нитей.

Результирующая сила взаимодействия обращается в нуль, когда последнее отношение равно единице. Это будет при некотором сопротивлении токовых нитей, которое обозначим через R_0 , где

$$R_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \cdot \frac{\ln l/r}{\pi}.$$

Если $R < R_0$, то $F_m > F_э$ – нити притягиваются, если $R > R_0$, то $F_m < F_э$ – нити отталкиваются.

Однако, оценивая взаимодействие между двумя параллельными токовыми нитями в частично ионизированной среде, нужно учесть факт экранировки избыточного поверхностного заряда ионами.

При движении электронов по токопроводящей нити имеется избыточный поверхностный заряд и возникает радиальное электрическое поле (рис. 4).

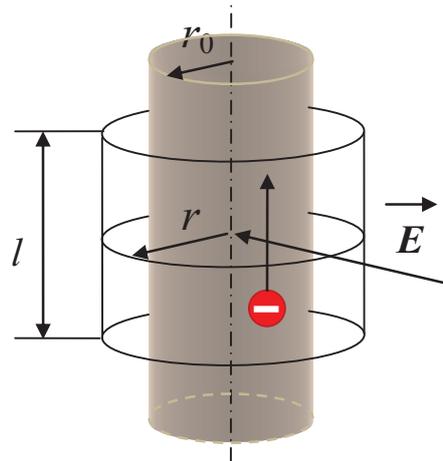


Рис. 4. Электрическое поле токопроводящей нити

Напряженность поля $E = \tau/r$, где $\tau = Q/l$ линейная плотность зарядов. Учитывая, что напряженность поля равна градиенту от потенциала $E = -d\varphi/dr$, находим потенциал φ :

$$\varphi = -\int_{r_0}^r E dr = -\int_{r_0}^r \frac{\tau}{r} dr = -2\tau \ln \frac{r}{r_0} + \varphi_0.$$

Под воздействием этого потенциала ионы, находящиеся в непосредственной близости от токовой нити, будут притягиваться и компенсировать объемный заряд. Следовательно, на границе токовой нити образуется слой положительно заряженных ионов, который будет экранировать этот проводник от действия электрических сил со стороны других токовых нитей.

Таким образом, основной силой взаимодействия токовых нитей в частично ионизированной среде является магнитная сила (сила Ампера). Эта сила приводит к взаимному притяжению токовых нитей с одинаковым направлением токов. Величину этого магнитного взаимодействия можно оценить, приняв для упрощения расчетов следующие допущения. Во-первых, предположим, что токовые нити имеют цилиндрическую форму и параллельны друг другу. Во-вторых, для расчетов будем использовать модель двух проводников с жестко зафиксированными концами.

При параллельности токовых нитей I_1 и I_2 сила, приходящаяся на единичную длину (dF/dl), может быть определена следующим образом. По закону Ампера на элемент тока dh (рис. 5) действует сила

$$dF = B_2 I_1 dh, \quad (1)$$

где F – сила Ампера; B_2 – индукция магнитного поля, создаваемого током I_2 в этой точке.

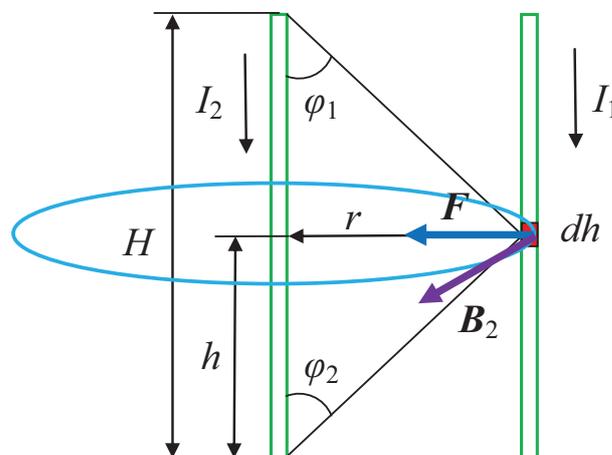


Рис. 5. Сила Ампера, действующая на элемент тока dh

По закону Био–Савара–Лапласа

$$B_2 = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I_2}{l} (\cos \varphi_1 + \cos \varphi_2), \quad (2)$$

где l – расстояние между токовыми нитями I_1 и I_2 ; φ_1 и φ_2 – углы, под которыми из рассматриваемой точки видны концы противоположного токового канала.

Выразим косинусы углов через соответствующие стороны треугольников (рис. 5), выбрав в качестве переменной величины расстояние h до поверхности плоского электрода:

$$\cos \varphi_1 = \frac{H-h}{\sqrt{(H-h)^2 + l^2}}; \quad \cos \varphi_2 = \frac{h}{\sqrt{h^2 + l^2}},$$

где H – полная длина токовых нитей.

Из уравнений (1) и (2) находим

$$\frac{dF}{dh} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{4\pi l} \left(\frac{H-h}{\sqrt{(H-h)^2 + l^2}} + \frac{h}{\sqrt{h^2 + l^2}} \right). \quad (3)$$

Учитывая, что наибольшая магнитная сила будет приходиться на центральную часть токовой нити ($h = H/2$), уравнение (3) для этого сечения примет вид

$$\left(\frac{dF}{dh} \right)_{\max} = \frac{\mu_0 I_1 I_2 H}{8\pi r \sqrt{H^2 + 4l^2}}. \quad (4)$$

Для определения силы взаимодействия двух токовых нитей возьмем следующие параметры микронеровностей: $r = 0,1 \cdot 10^{-4}$ см = $1 \cdot 10^{-7}$ м, $l = 3,1 \cdot 10^{-6}$ м. Оценим величину этой силы при следующих параметрах тока: $I_1 = I_2 = 1$ мА = 10^{-3} А; $H = 10$ мкм = 10^{-5} м; $l = 3$ мкм = $3 \cdot 10^{-6}$ м. Из формулы (4) получаем: $(dF/dh)_{\max} = 9,98 \cdot 10^{-9}$ Н. Учитывая, что масса электрона $m_e = 0,911 \cdot 10^{-30}$ кг, видно, что сила взаимодействия между токовыми нитями очень большая.

Выражение (4) можно использовать лишь для приближенной оценки силы магнитного взаимодействия, возникающего между двумя токовыми нитями. Если в реальных условиях концы токовых нитей имеют возможность перемещаться, то в результате возникает положительная обратная связь: с уменьшением расстояния между ними сила магнитного притяжения возрастает, способствуя еще большему сближению токовых нитей.

Для проверки проведенного анализа взаимодействия двух токовых нитей провели эксперимент. От двух источников питания подали напряжение на медные электроды (рис. 6). Зажгли электрические дуги на электродах (ток дуги $I = 5 \dots 6$ А) при большом расстоянии между ними. При сближении электродов на расстояние 6...8 мм друг от друга дуги притягивались и образовывали «вилку» с одним общим катодным пятном (рис. 7). При перемене полярности напряжения поведение дуг было аналогичным.

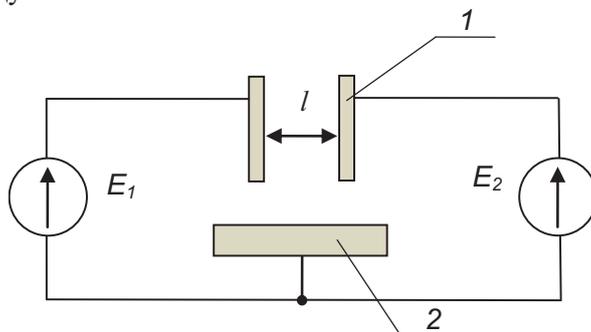


Рис. 6. Схема эксперимента по взаимодействию двух электрических дуг: 1 – два независимых электрода; 2 – общий электрод

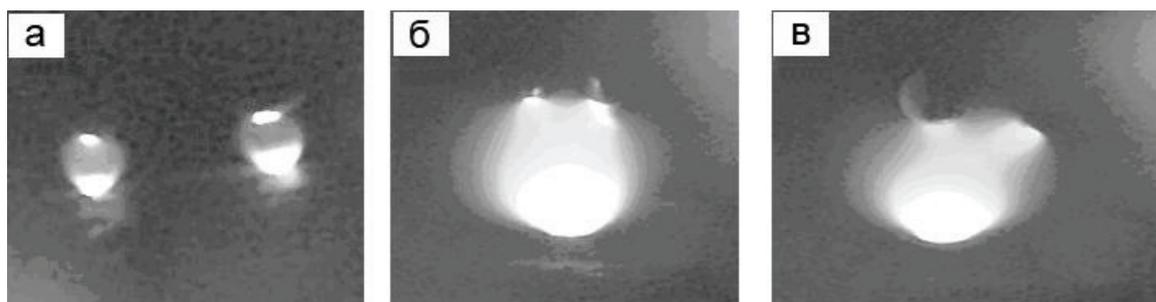


Рис. 7. Взаимодействие двух дуг: а) до сближения электродов; при сближении: б) на прямой полярности; в) на обратной полярности

В результате теоретического анализа и проведенного эксперимента можно сделать следующий вывод: в частично ионизированной среде токовые нити притягиваются и, следовательно, в межэлектродном промежутке не происходит формирование объемного пространственного заряда.

В момент возбуждения электрической дуги в межэлектродном промежутке из-за наличия множества микронеровностей на электродах образуются множество токовых нитей, но одна из них, в месте максимальной напряженности электрического поля, является основной, к которой притягиваются остальные. Притяжение токовых нитей происходит до тех пор, пока не начнут действовать кулоновские силы отталкивания, т. е. в итоге возникнет состояние динамического равновесия между силами притяжения и отталкивания. Следовательно, токопроводящий канал электрической дуги представляет собой совокупность тонких каналов, через которые течет основной ток разряда.

В настоящее время не существует экспериментальных приборов, которые могут зафиксировать дискретную структуру плазменного столба электрической дуги. Тем не менее, визуально дискретность токопроводящего канала при горении электрической дуги проявляется в наличии факелов, плазменных струй, пучков, плазменных выбросов и т. п. Дискретная структура катодного пятна и токопроводящего канала наблюдается в разных типах электрического разряда и, значит, является фундаментальным свойством электрической дуги и газового разряда в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энциклопедическая серия «Энциклопедия физики плазмы». Кн. 4 / под ред. В.Е. Фортова. – М.: Наука, 2000. – 527 с.
2. Болотов А.В., Козырев А.В., Королев Ю.Д. Модель катодного слоя вакуумной дуги при немонотонном распределении потенциала в прикатодной плазме // Физика плазмы. – 1993. – Т. 19. – Вып. 5. – С. 709–803.
3. Кесаев И.Г. Катодные процессы электрической дуги. – М.: Наука, 1968. – 244 с.
4. Буранов С.Н., Горохов В.В., Карелин В.И. и др. Микроструктура токовых каналов и убагание электронов в высоковольтных диффузных разрядах атмосферного давления. Исследования по физике плазмы / под ред. В.Д. Селемира, А.Е. Дубинова. – Саров, 1998. – 368 с.
5. Месяц Г.А. Эктоны. Часть 2. – Екатеринбург: УИФ, Наука, 1994. – 249 с.
6. Норин П.А., Малышев Н.И. Структура, геометрические и физические характеристики катодного пятна открытой сварочной дуги // Сварочное производство. – 2001. – № 9. – С. 3–5.
7. Иродов И.Е. Электромагнетизм. Основные законы. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2001. – 352 с.

Поступила 25.04.2012 г.