

УДК 533.6.011:533.9:537.52

## О динамике и особенностях структуры анодных пятен в электродуговом разряде на графитовых электродах во внешнем магнитном поле

В. О. Герман, А. П. Глинов, А. П. Головин, П. В. Козлов

*Экспериментально изучены режимы дугового разряда с круговым движением анодного пятна по торцевой поверхности электрода. Показано, что анодные пятна электрических дуг атмосферного давления на графитовых электродах неоднородны. Наложение внешнего магнитного поля, обжимающего разряд, эти неоднородности существенно сглаживает. Уточнена оценка тока через оптически видимый канал разряда. Получены оценки скоростей опорных пятен и эродирующих с электродов микрочастиц.*

PACS: 52.80.Mg

*Ключевые слова:* электрическая дуга, опорные пятна, столб, скоростная видеорегистрация, магнитное поле, электродные струи, осциллограммы, скорость, микрочастицы.

### Введение

Процессы образования и перемещения опорных пятен в электрических дугах и эрозии их электродов являются в последнее время предметом многих исследований. Наиболее полно эти процессы изучены в вакууме [1—3]. Однако в дугах атмосферного давления указанные процессы осложняются, в частности, взаимодействием летящих частиц и движущихся пятен с плотной воздушной средой. При наличии внешнего магнитного поля такое взаимодействие усложняется возникновением дополнительных поперечных сил, приводящих к деформации формы ствола разряда и изменению скоростей перемещения опорных пятен [4].

Экспериментальные исследования воздействия внешнего магнитного поля на электрические дуги часто проводятся для анализа возможности стабилизации таких разрядов, в частности, в плазмотронах [5, 6]. Теоретически влияние внешнего аксиального магнитного поля проводилось в [7] при исследовании винтовой неустойчивости электрической дуги. Важность изучения воздействия поперечного магнитного поля на разрядные процессы отмечена в [8—10].

Экспериментальное исследование длинных дуг при наличии поперечного внешнего магнитного поля, параллельного собственному магнитному полю разряда (с магнитной системой (МС), сходной с установкой, представленной в [4]), проведено в [11]. В отличие от [4], в [11] было использовано параллельное (в электротехническом смысле) разряду включение линейных витков подмагничивания. В результате (так как разряд и МС запитывались от одного источника тока), влияние внешнего магнитного поля было пренебрежимо мало.

В настоящей работе приводятся результаты исследований по стабилизации разряда с помощью МС, представленной в [4]. Основные цели исследования — получение экспериментальных данных о динамике формы дуги в плотной воздушной атмосфере в наложенном магнитном поле при токах до 400 А и межэлектродных зазорах до 7 см и изучение влияния внешнего магнитного поля на движение дугового столба, размеры и скорости перемещения его опорных пятен и динамику струй из них. Дополнительно предполагается уточнить данные о структуре анодных пятен и распределении токов в межэлектродном промежутке.

### Постановка задачи и схема измерений

Проведенные в настоящей работе исследования основаны на диагностике и анализе осциллограмм тока и напряжения на разрядном промежутке и визуализации разрядных процессов с помощью скоростной видеосъемки (с частотой 1200—24000 к/с, экспозицией 1—25 мкс). Эксперименты проведены для разрядов между стержнеобразными электродами при токах до 400 А и межэлектродных промежутках до 7 см, как с внешним магнитным полем, так и без него.

---

Герман Валентин Остапович, ведущий научный сотрудник.  
Глинов Александр Петрович, ведущий научный сотрудник.  
Головин Александр Петрович, старший научный сотрудник.  
Козлов Павел Владимирович, научный сотрудник.  
Институт механики Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова.  
Россия, 119192, Москва, Минчуринский пр-т, 1.  
Тел. 8 (495) 939-15-28. E-mail: krestytrouitsk@mail.ru

Статья поступила в редакцию 30 июля 2015 г.

---

© Герман В. О., Глинов А. П., Головин А. П., Козлов П. В., 2015

Исследуется протяженный электрический дуговой разряд с квазистационарными токами в воздушной среде атмосферного давления на графитовых электродах при наличии внешнего магнитного поля, обеспечиваемого МС [4].

Для электродов использовался графит на основе ЗОПГ, силицированной с помощью SiC. Диаметр стержневых графитовых электродов — 16 мм, длина разрядного промежутка  $l_{мэ}$  — от 3 до 7 см. Инициация разряда осуществлялась смыканием электродов с последующим их раздвижением до выбранного межэлектродного расстояния  $l_{мэ}$  за время 0,1–0,2 с. Продолжительность пусков варьировалась от 1 до 3 с. Детальная постановка задачи по проведению экспериментов и схема измерений подробно изложены в [12].

Для получения в кадрах дополнительных проекций изображений разряда проводилась высокоскоростная регистрация с применением зеркал [13]. Это дает представление о пространственной картине разряда.

Синхронно с видео регистрацией изображений разряда проводилось осциллографирование разрядного тока  $I$  и напряжения  $U$ .

Ранее в работе [14] (при экспериментальном исследовании распределения концентрации заряженных частиц) в межэлектродном пространстве свободно горящей атмосферной дуги были оценены доли токов, текущих через яркий оптически видимый канал дуги ( $\delta_{вид}$ ) с повышенной плотностью тока и периферийную («диффузную») зону разряда ( $\delta_{диф}$ ) с существенно меньшей плотностью тока. Оказалось (см. [14]), что

$$\delta_{вид} \equiv \frac{I_{вид}}{I} \approx 0,5; \quad \delta_{диф} \equiv \frac{I_{диф}}{I} \approx 0,5 \quad (1)$$

где  $I_{вид}$ ,  $I_{диф}$  — токи через оптически видимый канал разряда и его периферию соответственно.

В настоящей работе сделана попытка численные значения параметров  $\delta_{вид}$  и  $\delta_{диф}$ , представленных в правых частях формул (1), несколько уточнить. Применялся метод составных электродов (с включением в цепь каждой секции омического шунта). Подобный подход использован ранее для анализа распределения тока на аноде движущейся дуги в работе [15]. В нашей работе анод разрезался всего лишь на две части продольным его рассечением либо по плоскости, проходящей через ось симметрии электрода, либо по цилиндрической поверхности, имеющей ту же ось симметрии, что и электрод.

Ранее неоднородности формы ствола дуги изучались в ряде работ [4, 16, 17]. При этом наиболее частая форма их проявления — шунтирующие дуги [12]. Между тем теоретические работы [18, 19] показывают, что в воздушных дугах в уз-

ких (порядка нескольких мм) зазорах между графитовыми электродами возможно развитие многоканальных разрядов. Представляется интересным найти хотя бы качественные экспериментальные подтверждения этим предсказаниям.

### Экспериментальные результаты

Проведено три серии пусков без наложения внешнего магнитного поля (ток в витках подмагничивания  $I_m = 0$ ): серия 1 — протяженный разряд ( $l_{мэ} = 3–7$  см); 2 — короткая дуга ( $l_{мэ} = 3–10$  мм); 3 — составной (секционированный) анод. Четвертая серия пусков проводилась уже с внешним магнитным полем.

#### Протяженный разряд

Для анализа движения микрочастиц в разрядном промежутке были использованы экспериментальные данные в горизонтальном разряде при токах  $\approx 55$  А на электродах, покрытых SiC. Диаметр стержневого анода  $d_a = 11$  мм, катода  $d_c = 4$  мм. Расстояние между электродами 65 мм.

Для того чтобы одновременно фиксировать изображение разряда в двух перпендикулярных плоскостях, использовалось определенным образом установленное зеркало [13]. Трехмерные эффекты, наблюдаемые при рассмотрении боковой (фронтальной) и горизонтальной проекции видеоизображения, просматриваются на рис. 1.

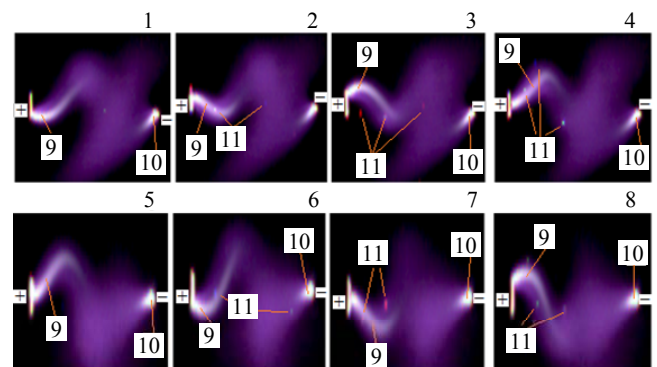


Рис. 1. Видеокдры горизонтального разряда с периодическим вращением анодной струи по образующей электрода: вид на анод сбоку (1–4) и снизу, в зеркале (5–8), соответствующие моменты времени  $t_1 = t_5$ ,  $t_2 = t_6$ ,  $t_3 = t_7$ ,  $t_4 = t_8$ ; скорость видеосъёмки  $f_{рег} = 10\,000$  к/с; интервал времени между кадрами  $\delta t_{кадр} = 0,7$  мс; 9, 10 — анодный и катодный факелы; 11 — летящие с анода макрочастицы; материал поверхностного слоя анода — SiC

На основании данных об этих проекциях можно оценить движение опорного анодного пятна по торцевой поверхности электрода\*. Оно

\* Под поверхностной частью пятна (в каверне) движение плазменной среды может быть более сложным и в настоящей работе не рассматривается.

может быть прослежено на схеме обработки изображений (см. рис. 2, диаграмма 1). Поскольку между четырьмя последовательными положениями перемещающегося пятна (Sp1–Sp4) интервал времени  $\delta t_{\text{кадр}}$  одинаков, то период вращения пятна  $T_{Sp} = 4 \times \delta t_{\text{кадр}} = 2,8$  мс. Отсюда можно найти линейную скорость перемещения пятна по торцевой поверхности анода

$$V_{Sp} = \frac{2\pi R}{T_{Sp}} \quad (2)$$

где  $R = d_a / 2$  — радиус цилиндрического анода. Полагая  $R \approx 6$  мм, из (2) найдём значение  $V_{Sp} \approx 10$  м/с.

Такое (достаточно медленное) движение опорного пятна по квазистационарной траектории вызывает эрозию анода (на рис. 1 видны летящие частицы 11).

Это движение пятна вращательное. Оно увлекает в движение и всю анодную струю (рис. 1, струи 9), оказывает на плазму дуги центробежное воздействие с ускорением

$$a = \frac{V_{Sp}^2}{R}. \quad (3)$$

При этом катодная струя (рис. 1, 10) остается стабильной. Из выражения (3) следует, что отношение  $a/g \sim 1,5 \cdot 10^3$ , где  $g$  — ускорения свободного падения на поверхности Земли. Такое интенсивное вращение струи должно вызвать соответствующую достаточно сильную вихревую закрутку воздуха вокруг анода, чтобы это центробежное воздействие уравновесить. Величину скорости воздушного вихря можно оценить как  $V_w \sim (a w)^{1/2}$ , где  $w$  — характерное расстояние от оси симметрии анода до вихревой зоны (толщина пограничного слоя). Полагая  $w = 5$  мм, получим  $V_w \sim 9$  м/с, что по порядку величины совпадает со скоростью пятна  $V_{Sp}$ .

Выявленный с помощью схемы обработки проекций (см. рис. 2, диаграмма 1) круговой характер движения анодного пятна\* был уточнен непосредственной видеосъемкой разряда и поверхности анода (под углом). На рис. 2 (кадр 2) приведены данные для вертикального разряда на графитовых (ЗОПГ) электродах  $\varnothing 15$  мм, межэлектродное расстояние 35 мм, в свободной воздушной атмосфере. Анод вверху, катод — внизу разрядного промежутка.

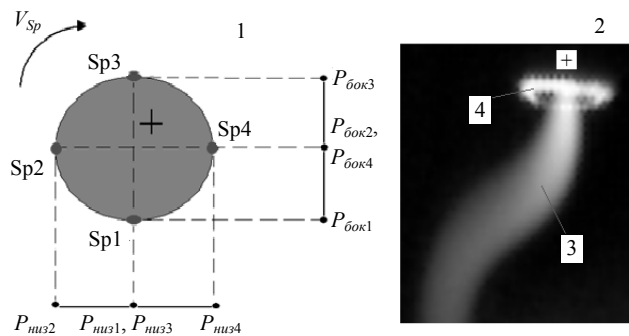


Рис. 2. Диаграмма перемещения опорного пятна по торцевой поверхности анода (1) и видеокادر вертикального разряда (2): точки  $P_{бок1}–P_{бок4}$  — положение пятна на горизонтальной проекции видеозображения (вид сбоку);  $P_{низ1}–P_{низ4}$  — положение пятна на проекции видеозображения, соответствующей виду снизу; цифры в нижних индексах (1–4) отвечают моментам времени кадров рис. 1; Sp1–Sp4 — положение пятна в моменты  $t_1–t_4$  на аноде;  $V_{Sp}$  — скорость перемещения пятна по поверхности электрода; 3 — столб дуги, 4 — послесвечение трека анодных пятен;  $f_{рез} = 12000$  к/с, экспозиция  $\delta t_{экс} = 1$  мкс, ток  $I = 220$  А, напряжение  $U = 110$  В, материал электродов — ЗОПГ

Винтовая форма шнура образуется одновременным движением воздуха, увлекающегося шнуром разряда, по окружности электрода и поступательным движением анодной струи в сторону катода. Представляется, что радиус раскручивающейся траектории определяется из баланса пондеромоторной и центробежной сил с одной стороны и аэродинамического сопротивления окружающей воздушной среды с другой. Следует отметить, что на рис. 1 просматриваются треки довольно крупных (до 1 мм) частиц, летящих с поверхности анода в направлении катода. По проведенным оценкам скорости микрочастиц в анодной струе  $V_p$  так же  $\sim 10$  м/с. Летящие частицы отражаются от катодной струи (рис. 1, 10) в различных направлениях.

### Разряд в узких зазорах

Дуговые разряды при вертикальной и горизонтальной ориентации электродов изучались ранее подробно в [12]. В воздушных дугах атмосферного давления многоканальность возникает при шунтировании и расслоении. Другим примером образования неоднородности разряда является его контракция. В экспериментах [20] показано, что многоканальность локализации токов возможна также и в разрядах между пористыми электродами при прокачке через них электролита при давлениях, меньших атмосферного, и зазорах, меньших 5 мм. Для численного моделирования разрядных неоднородностей жидкой или газообразной сплошной среды можно использовать тепловую модель разряда и модель конвекции в при-

\* Время существования таких квазистационарных разрядов с самоорганизующимся круговым движением анодного пятна может быть достаточно продолжительным ( $\sim 20$  мс [12]).

ближении Буссинеска. Структурная картина одномерных стационарных (фоновых) решений дана в [18, 19]. В этих же работах проведен анализ спектров малых возмущений фона и показано, что на падающих участках вольт-амперных характеристик разряда возможно развитие пространственно периодических структур со многими токовыми каналами. Анализ проведенных ранее экспериментов с дугами между графитовыми электродами [4, 12, 16, 17] показал, что многоканальность возможна не только в зоне столба разряда, но и в приэлектродных областях. В расширенных видеоданных и осциллограммах указанных экспериментов в узких зазорах наблюдалось образование двух шнуров и их последующее слияние в один токовый канал.

### Составные аноды\*

Экспериментально изучены режимы перераспределения тока в разделенных надвое пористых (ЗОПГ) анодах, позволившие уточнить оценки доли диффузной составляющей тока ( $\approx 0,5$ ) в воздушных дугах, полученные ранее в работе [14]. Проведено сопоставление разрядного тока и токов в составляющих частях анода с синхронным просмотром видеоизображений, дающих информацию о месте расположения опорного пятна. Это позволило оценить долю диффузной составляющей тока в пределах 0,35—0,65.

### Внешнее магнитное поле

Для наложения на локализованный в заданном объеме разряд внешнего магнитного поля применялась магнитная система [4, 17] из линейных токов, расположенных на периферии токового канала и параллельных электродам. Без магнитной стабилизации область анодного пятна может быть весьма неоднородна (рис. 3, кадры 3, 5).

Наложение стабилизирующего магнитного поля, обжимающего канал разряда, структуру анодного пятна существенно изменяет (рис. 3, кадры 4, 6). Оно становится более компактным и однородным.

\* В экспериментах электрическая прочность межсекционного зазора ( $\sim 1$  мм) контролировалась замером электрического сопротивления (более 10 МОм). Приповерхностный зазор в аноде (на глубину более 15 мм) был воздушным. Зазор ниже был заполнен твердотельным термостойким изолятором. Похожий способ защиты от межсекционных шунтирований применялся ранее в многоканальных дуговых ускорителях [21].

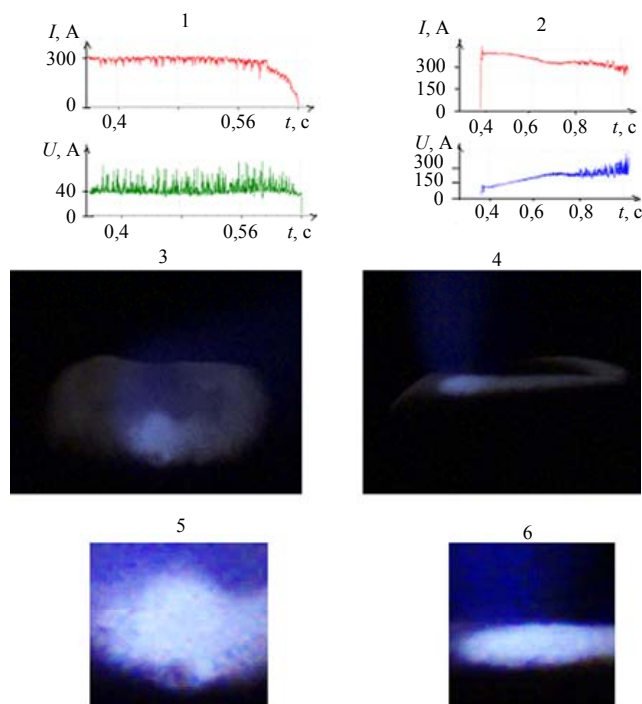


Рис. 3. Влияние магнитного поля на структуру анодного пятна: 1, 2 — осциллограммы; внешнее магнитное поле  $B_{\text{ex}} = 0$  (1, 3, 5) и  $B_{\text{ex}}$  — стабилизирующее тангенциальное магнитное поле (2, 4, 6); 3, 4 — видеокадры; 5, 6 — увеличенные вырезки пятен

### Заключение

Проведено экспериментальное исследование свободной воздушной дуги атмосферного давления и потока микрочастиц, вылетающих с поверхности графитовых электродов. Рассмотрены режимы разряда с круговым движением опорного анодного пятна по торцевой поверхности электрода.

Показано, что анодные пятна электрических дуг атмосферного давления на графитовых электродах неоднородны. Наложение тангенциального внешнего магнитного поля, обжимающего разряд, эти неоднородности существенно сглаживает.

Показано, что в электродуговых разрядах атмосферного давления возможны многоканальные режимы, например, в достаточно узких (несколько мм) зазорах между графитовыми электродами. Уточнена оценка тока через оптически видимый канал разряда.

Авторы признательны проф. Г. А. Любимову за внимание и интерес к работе, а также сотруднику СЕДАТЭК Н. А. Киселеву за проведение демонстрационной съемки разряда с помощью высокоскоростной видеокамеры Phantom Miro 310.

*Исследования разрядов многоканальных и во внешнем магнитном поле выполнены при частичной поддержке РФФИ: гранты № 13-01-00305 и № 14-01-00399 соответственно.*

*Работа выполнена в Институте механики МГУ.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кобайн Дж., Эккер Г., Фаррел Дж. и др. Вакуумные дуги. — М.: Мир, 1982.
2. Раховский В. И. Физические основы коммутации электрического тока в вакууме. — М.: Наука, 1970.
3. Dyuzhev G. A., Lyubimov G. A., and Shkol'nik S. M. // IEEE Transactions on Plasma Sciences. 1983. V. PS-11. No. 1. P. 36.
4. Герман В. О., Глинов А. П., Головин А. П. и др. // Прикладная физика. 2014. № 4. С. 35.
5. Жуков М. Ф., Урюков Б. А., Энгельшт В. С. и др. Теория термической электродуговой плазмы. — М.: Наука, 1987.
6. Глебов И. А., Рутберг Ф. Г. Мощные генераторы плазмы. — М.: Энергоатомиздат, 1985.
7. Синкевич О. А. // ДАН СССР. 1985. Т. 280. № 1. С. 99.
8. Недоспасов А. В., Хаит В. Д. Основы физики процессов в устройствах с низкотемпературной плазмой. — М.: Энергоатомиздат, 1991.

9. Брон О. Б., Сушков Л. К. Потоки плазмы в электрической дуге выключающих аппаратов. — Л.: Энергия, 1975.
10. Алферов Д. Ф., Евсин Д. В., Лондер Я. И. // Прикладная физика. 2006. № 1. С. 29.
11. Bauchire J. M., Hong D., Riquel H. Radiative Energy Measurements of Pulsed High-Current Arcs // The 20th Int. Symp. On Plasma Chemistry (ISPC): Philadelphia USA at Loews Hotel, July 20—24, 2011.
12. Герман В. О., Глинов А. П., Головин А. П. и др. // Прикладная физика. 2012. № 6. С. 108.
13. Копыл П. В. / Труды X конференции-конкурса молодых ученых НИИ механики МГУ, 11—14 октября 2009 года. С. 195.
14. Герман В. О., Ершов А. П., Козлов П. В. и др. // Изв. РАН. МЖГ. 2009. № 1. С. 142.
15. Друэ, Боде, Жютра // Ракетн. техн. и космонавтика. 1975. Т. 13. № 7. С. 109.
16. Герман В. О., Глинов А. П., Головин А. П. и др. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 4. С. 459.
17. Герман В. О., Глинов А. П., Головин А. П. и др. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 5. С. 498.
18. Глинов А. П. // Изв. РАН. МЖГ. 2015. № 3. С. 25.
19. Глинов А. П. // Изв. РАН. МЖГ. 2015. № 4. С. 25.
20. Галимзянов И. И., Гайсин А. Ф. / XLII Международная конференция по физике плазмы и УТС, 9—13 февраля 2015 г. С. 287.
21. Глинов А. П., Дегтев Ю. Г., Кондратенко А. К. и др. // Прикладная физика. 2002. № 5. С. 59.

## About dynamics and features of anodic spots structure in electric arc on graphite electrodes in an exterior magnetic field

*V. O. German, A. P. Glinov, A. P. Golovin, and P. V. Kozlov*

Institute of Mechanics of Lomonosov Moscow State University  
1 Michurinskiy av., Moscow, 119192, Russia  
E-mail: krestytroitsk@mail.ru

*Received July 30, 2015*

***Modes of arc discharge with a circular motion of an anodic spot on a face surface of an electrode are experimentally studied. It is shown that anodic spots of electrical arc of atmospheric pressure on graphitized electrodes are impure. Superposition of the exterior magnetic field, which is pressing out discharge, smoothes these spots heterogeneity essentially. The current assessment through optically visible canal of discharge is specified. Assessments of speeds of basic spots and micro particles, flowing from electrodes, are received.***

PACS: 52.80.Mg

**Keywords:** electrical arc, basic spots, pole, high-speed video registration, magnetic field, electrode jets, oscillograms, speed, micro particles.

#### REFERENCES

1. J. Kobain, G. Ekker, J. Forrel, et al., *Vacuum Arcs* (Mir, Moscow, 1982) [in Russian].
2. V. I. Rakhovskii, *Physical Foundations of Commutation of Electric Current in Vacuum* (Nauka, Moscow, 1970) [in Russian].
3. G. A. Dyuzhev, G. A. Lyubimov, and S. M. Shkol'nik, *IEEE Transactions on Plasma Sciences* **PS-11** (1), 36 (1983).

4. V. O. German, A. P. Glinov, A. P. Golovin, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 4, 35 (2014).
5. M. F. Zhukov, B. A. Uryukov, V. S. Engel'sht, et al., *Theory of Thermic Electroarc Plasma* (Nauka, Moscow, 1987) [in Russian].
6. I. A. Glebov and F. G. Rutberg, *Power Generators of Plasma* (Energoatomizdat, Moscow, 1985) [in Russian].
7. O. A. Sinkevich, *DAN USSR* **280**, 99 (1985).
8. A. V. Nedospasov and V. D. Khait, *Foundations of Physical Processes in the Low-Temperature Plasma Devices* (Energoatomizdat, Moscow, 1991) [in Russian].
9. O. B. Bron and L. K. Sushkov, *Plasma Streams in the Electric Arc of Shutting Down Devices* (Energia, Leningrad, 1975) [in Russian].
10. D. F. Alferov, D. V. Evsin, and Ya. I. Londer, *Prikladnaya Fizika*, No. 1, 29 (2006).
11. J. M. Bauchire, D. Hong, and H. Riquel, *Radiative Energy Measurements of Pulsed High-Current Arcs*, in *Proc. 20th Int. Symp. Plasma Chemistry* (ISPC: Philadelphia USA at Loews Hotel, July 20—24, 2011).
12. V. O. German, A. P. Glinov, A. P. Golovin, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 6, 108 (2012).
13. P. V. Kopyl, in *Proc. X Conf. Young Scientists* (MGU, Inst. Mechan. October 11—14, 2009). P. 195.
14. V. O. German, A. P. Ershov, p. V. Kozlov, et al., *Izv. RAN. MZhG*. No. 1, 142 (2009).
15. Drue, Bode, Jutra, *Rak. Tekhn. Kosmonavt.* **13** (7), 109 (1975).
16. V. O. German, A. P. Glinov, A. P. Golovin, et al., *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **1**, 459 (2013).
17. V. O. German, A. P. Glinov, A. P. Golovin, et al., *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **2**, 498 (2014).
18. A. P. Glinov, *Izv. RAN. MZhG*. No. 3, 25 (2015).
19. A. P. Glinov, *Izv. RAN. MZhG*. No. 4, 25 (2015).
20. I. I. Galimzyanov and A. F. Gaisin, in *Proc. XLIII Intern. Conf. Plasma Physics* (Russia, Zvenigorod, February 9—13, 2015). P. 287.
21. A. P. Glinov, Yu. G. Degtev, A. K. Kondratenko, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 5, 59 (2002).