

**INVESTIGATION OF TRANSIENT PROCESSES DURING THE EXTINCTION
OF A VACUUM ARC AT CURRENTS CLOSE TO THE THRESHOLD**

*Ilya Lvovich Muzyukin ^a, Pavel Sergeevich Mikhailov,
Dmitry Leonidovich Shmelev, Igor Vladimirovich Uimanov*

Institute of Electrophysics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Amundsen str. 106, Yekaterinburg, 620016, Russia

^a plasmon@mail.ru

ABSTRACT

The work is devoted to the study of the process of spontaneous extinction of a vacuum arc at low currents. New data have been obtained on the behavior of current, voltage, plasma glow, ion flux, and plasma potential during spontaneous extinction. It is shown that during the spontaneous extinction of the vacuum arc, there is a sharp increase in the ion current and a simultaneous jump in the plasma potential at different distances from the cathode. The data obtained indicate a sharp increase in the plasma resistance in the entire space surrounding the discharge gap, which leads to a sharp cutoff of the current and termination of the arc.

KEYWORDS

Cathode spot; vacuum arc; plasma.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПОГАСАНИИ
ВАКУУМНОЙ ДУГИ ПРИ ТОКАХ БЛИЗКИХ К ПОРОГОВЫМ**

*Илья Львович Музюкин ^a, Павел Сергеевич Михайлов,
Дмитрий Леонидович Шмелев, Игорь Владимирович Уйманов*

Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 106

^a plasmon@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Работа посвящена исследованию процесса спонтанного погасания вакуумной дуги при малых токах. Получены новые данные о поведении тока, напряжения, свечения плазмы, потока ионов и потенциала плазмы во время спонтанного погасания. Показано, что во время спонтанного погасания вакуумной дуги происходит резкий рост тока ионов и одновременный скачок потенциала плазмы на разных расстояниях от катода. Полученные данные свидетельствуют о рез-

ком росте сопротивления плазмы во всем пространстве, окружающем разрядный промежуток, что приводит к резкому срезу тока и прекращению действия дуги.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Катодное пятно; вакуумная дуга; плазма.

Введение

Использование вакуумной дуги в нескольких областях научных исследований [1–5] и промышленности [6–8] делает важным понимание условий ее зажигания, устойчивого функционирования и погасания. Одной из основных особенностей вакуумной дуги является феномен внезапного погасания [9]. Исследования процессов устойчивости горения дуги [10] свидетельствуют о том, что внезапное погасание является процессом абсолютно случайным и вероятность этого события не зависит от времени горения дуги. Стационарные модели катодного пятна, основанные на поверхностных процессах испарения и ионизации катодного материала [11, 12], не дают объяснения такому феномену, как внезапное погасание разряда. В классическом понимании горения дугового разряда практически все процессы в дуге определяются таким объектом, как катодное пятно. Катодное пятно представляет собой яркую светящуюся область на катоде, где сосредоточен практически весь ток разряда и протекают процессы испарения и ионизации [13]. Следовательно, стационарное катодное пятно, в котором поддерживается баланс потоков тепла, не должно без внешних причин прекращать свое функционирование. Однако, начиная с 70-х годов 20-го века, начала развиваться нестационарная теория катодного пятна. Эта теория основана на взрывной модели функционирования катодного пятна [14]. Согласно этой модели, элементарная ячейка катодного пятна представляет собой последовательность взрывов микроучастков катодной поверхности. Условия на катоде приводят к неизбежному погасанию катодного пятна на старом месте и появлению его на новом. Подробнее об этой модели расска-

зано в [15]. Эктонная модель катодного пятна позволила разработать теорию спонтанного погасания вакуумной дуги [16]. Действительно, если катодное пятно представляет собой непрерывную смену взрывов и погасаний, то неизбежно настанет момент, когда катодные пятна погаснут одновременно, что приведет к погасанию всей дуги. Предыдущие исследования процесса спонтанного погасания показывали [17], что окончание дугового процесса – крайне быстрый процесс, который занимает несколько наносекунд. Этот процесс, как правило, сопровождается всплеском тока ионов [18], а также всплеском потока горячих электронов [19]. Всплеск ионов может быть объяснен с позиций эктонной модели синхронизацией взрывных процессов, когда непосредственно перед погасанием всех ячеек эти же ячейки должны все вместе взорваться. Однако остается вопрос об остаточной проводимости плазмы, которая остается в промежутке. Как правило, спонтанное погасание резко срезает ток разряда, при этом ток падает сразу до нуля. При этом в плазме должно оставаться достаточное количество плазмы, чтобы регистрировался ток между катодом и анодом по крайней мере на время распада плазмы. Время распада плазмы может быть оценено как время пролета ионов от катода до анода, с хорошо известной скоростью потока плазмы. Например, для меди скорость потока ионов оценивается как $1,2 \cdot 10^6$ см/сек. В этом случае время распада плазменного облака между катодом и анодом при расстоянии катод-анод 1 мм может быть оценено как 80 нс. При этом время среза разряда составляет не более 2–3 нс.

Для исследования процесса спонтанного погасания был проведен эксперимент по комплексному исследованию спонтанного погасания, где было исследовано пове-

дение тока, напряжения, свечения плазмы и потенциала плазмы на разных расстояниях от катода.

1. Экспериментальная установка и методика

Общая схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

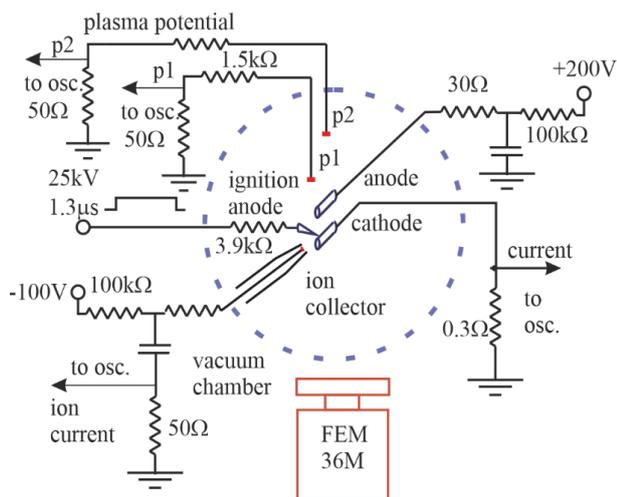


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Fig. 1. The experimental setup

Эксперименты проводились в вакууме при остаточном давлении 10^{-8} мм рт. ст. Вакуум создавался последовательно абсорбирующим насосом на цеолитах и далее магниторазрядным насосом. Диаметр

разрядной камеры 80 мм. Все вакуумные вводы коаксиальные. Electrodes сделаны из вольфрамовой проволоки диаметром 200 мкм. Electrodes очищались электролитическим травлением и множественным зажиганием дуговых разрядов. Разряд поджигался высоковольтным кабельным генератором. Импульс кабельного генератора имел длительность 45 нс и амплитуду 20 кВ. Ток дуги питался конденсатором 40 нФ. Заряд конденсатора составлял 200 В. Также исследовался разряд при использовании только катода и иницирующего электрода. При этом на иницирующий электрод подавался импульс 1,3 мкс. Измерялся ток разряда с помощью шунта 0,3 Ом. Напряжение измерялось с помощью штатного зонда осциллографа. Ток ионов измерялся малогабаритным ионным коллектором. Плавающий потенциал плазмы измерялся одновременно с двух зондов (p1, p2), расположенных на расстояниях 5 мм и 30 мм соответственно. Свечение плазмы измерялось с помощью фотоэлектронного умножителя ФЭУ-36м.

2. Результаты экспериментов и обсуждение

Типичная совместная осциллограмма тока дуги при нестабильном горении и спонтанных погасаниях представлена на рис. 2.

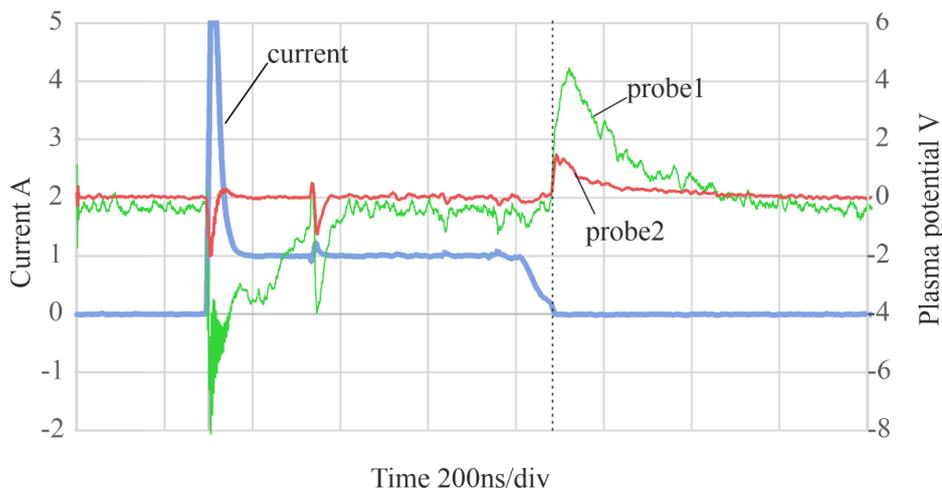


Рис. 2. Осциллограммы тока дуги и потенциалов плазмы при использовании двух электродов

Fig. 2. The waveforms of arc current and plasma potential probe signal. Two electrode feeding was used

Осциллограммы на рис. 2 показывают наличие резких всплесков потенциала плазмы при иницировании разряда, попытках разряда погаснуть и окончательном погасании разряда. При этом иницирование и попытки погаснуть приводят к отрицательному импульсу, а окончательное погасание – к положительному. Еще важно отметить, что всплески потенциала плазмы происходят одновременно на разных расстояниях от разряда. Эти всплески потенциала не могут быть просто сигналами наводки от анода, так как при подаче высоковольтного положительного импульса на анод сигнала с детекторов

не фиксировалось, а при пробое сигнал был отрицательным.

Детально процесс погасания разряда представлен на рис. 3.

Детальное рассмотрение процесса среза тока показывает, что всплеск потенциала плазмы не имеет задержки как на приближенном, так и на удаленном зонде. Очевидно, что распространение потенциала плазмы по ее объему не имеет отношения к скорости ионов плазмы, однако может иметь отношение к электронной компоненте. Измерение потока ионов, представленное на рис. 4, показывает, что характер ионного тока повторяет по форме и длительности сигнал потенциала плазмы.

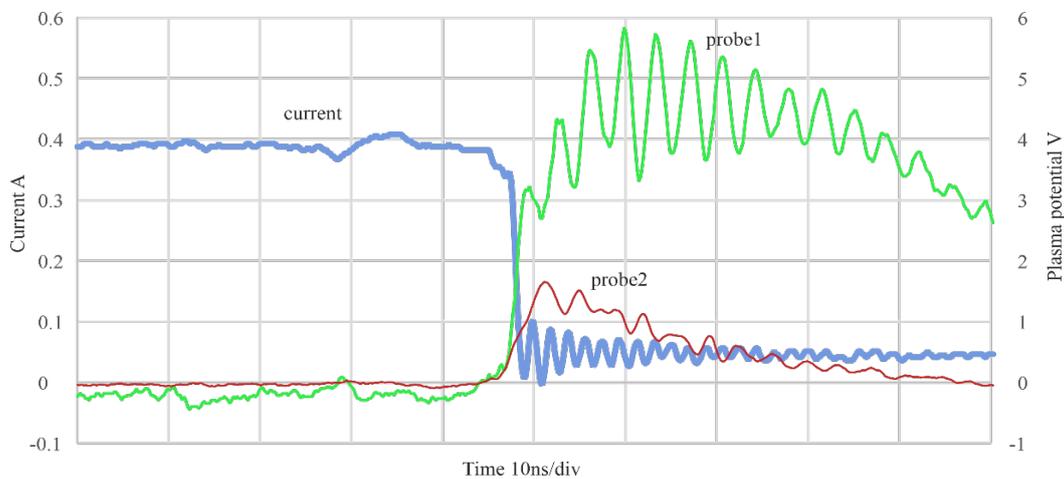


Рис. 3. Часть осциллограммы дуги с процессом среза тока

Fig. 3. The waveform part of vacuum arc burning showing the discharge chopping

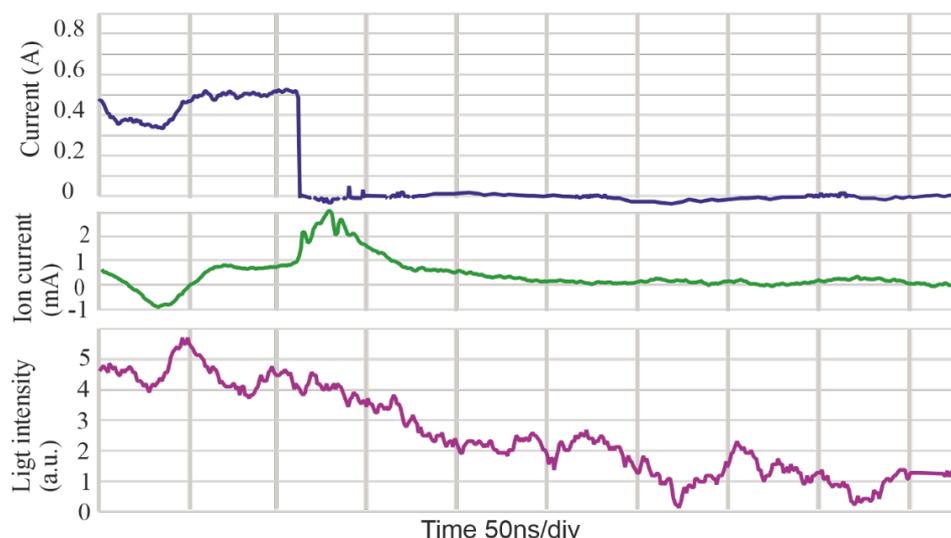


Рис. 4. Часть осциллограммы дуги с процессом среза тока

Fig. 4. The waveform part of vacuum arc burning showing the discharge chopping

Совместные измерения тока разряда напряжения, потенциала плазмы и свечения дуги представлены на рис. 5.

Осциллограммы на рис. 5 позволяют утверждать, что всплеск потенциала плазмы не следует, а предшествует всплеску падения напряжения на дуге. При этом, несмотря на резкий срез тока, свечение плазмы снижается плавно еще от 500 нс до 2 мкс, что говорит о плавном снижении концентрации плазмы в области разряда. Свечение плазмы содержит множество локальных всплесков, которые, как правило, невозможно привязать к особенностям сигнала на других осциллограммах. Иногда свечение плазмы может начать плавное снижение до процесса обрыва, но такое происходит не всегда.

В результате исследований можно сделать вывод: прекращение горения дуги связано не с исчезновением плазмы из разрядного промежутка, а с изменением качества самой плазмы, а именно способности ее проводить электрический ток.

По всей видимости процесс спонтанного погасания связан с резким уменьшением проводимости плазмы. Такое уменьшение проводимости описано в литературе как аномальное сопротивление плазмы [20]. Связан этот эффект с развитием турбулентности в области плазмы и имеет причину в развитии одной из множества плазменных неустойчивостей.

Элементарная теория аномального сопротивления плазмы изложена в монографии [21].

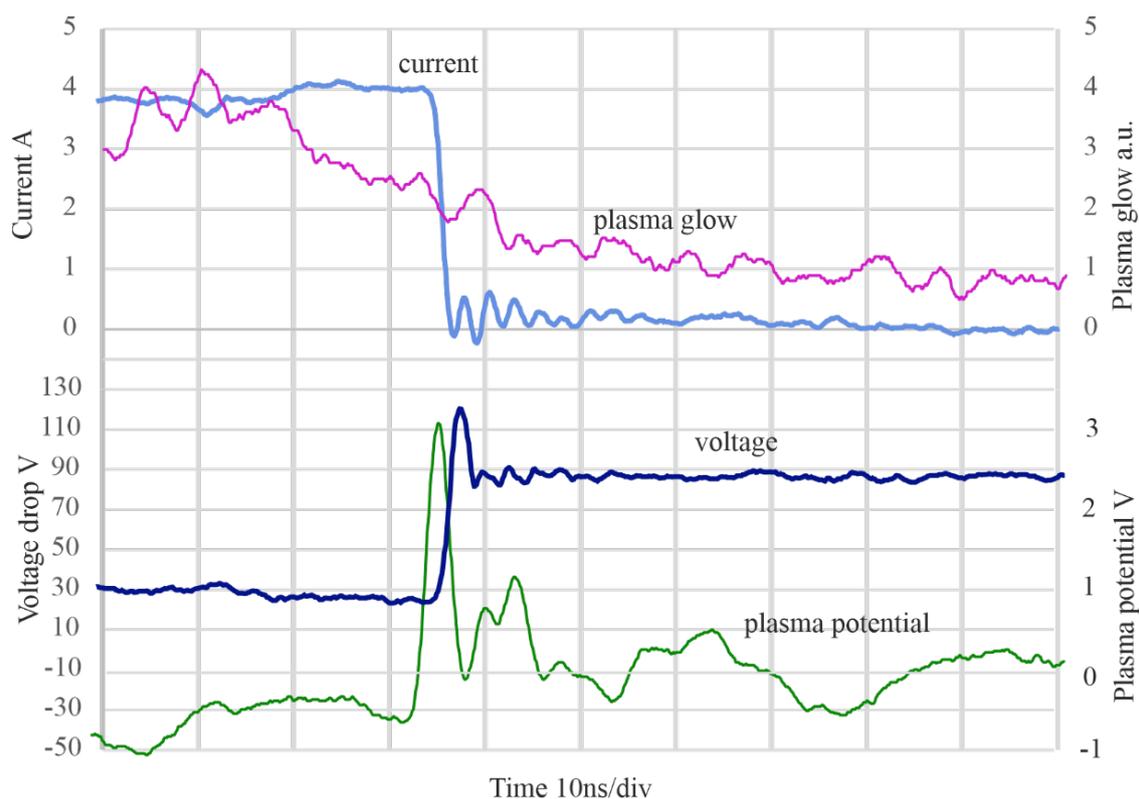


Рис. 5. Часть осциллограммы дуги с процессом среза тока с одновременными измерениями тока, напряжения, потенциала плазмы и свечения плазмы

Fig. 5. Part of the waveform of the arc with the current chopping process with simultaneous measurements of current, voltage, plasma potential and plasma glow

Общая формула для проводимости плазмы может быть записана как:

$$\sigma = \frac{ne^2}{mv}, \quad (1)$$

где n – концентрация электронов; e – элементарный заряд; m – масса электрона; v – частота столкновений электронов.

Для ионно-звуковой неустойчивости.

$$v_{eff} = \frac{W\omega_p}{n_0T_e}, \quad (2)$$

где W – плотность мощности колебаний; ω_p – плазменная частота; n_0 – концентрация электронов; T_e – электронная температура. Следовательно, при падении концентрации плазмы и увеличении мощности колебаний проводимость плазмы должна падать.

С нашей точки зрения процесс погасания происходит следующим образом: если учесть эктонную модель катодного пятна [14], в которой жизненный цикл катодного пятна представляет собой последовательность взрывов микроучастков катода, поступление плазмы в разрядный промежуток в отдельной ячейке катодного пятна происходит неравномерно. При этом если все действующие ячейки катодного пятна действуют не синхронно, то общее поступление плазмы в промежуток происходит постоянно без существенных провалов. Если же в какой-то момент ячейки синхронизируются, то происходит сначала резкий выброс плазмы в промежуток, а после этого поступление плазмы прекращается. В этот момент концентрация плазмы резко падает. Однако питающая разряд цепь будет стремиться сохранить ток разряда за счет собственной индуктивности. При падении концентрации плазмы (концентрации электронов) n_e сохранение тока $j = n_e v_e$ означает увеличение дрейфовой скорости электронов v_e . Однако известно [21], что при превышении дрейфовой скорости электронов v_e скорости ионного звука v_s развивается ионно-звуковая неустойчивость, которая, в свою очередь, приводит к аномаль-

ному сопротивлению плазмы и, возможно, к разрывам в плазме. Такие области аномального сопротивления и плазменных разрывов должны приводить к электродинамическому перераспределению потенциала в окружающей плазме. Вероятнее всего, этот процесс и наблюдается при измерениях плавающего потенциала зондами p1, p2. Именно развитие плазменной неустойчивости приводит к резкому обрыву тока и препятствует возобновлению функционирования катодных пятен, и происходит прекращение разряда. При этом электрическая прочность промежутка сохраняется на время существования плазменной турбулентности и разрыва.

Выводы

Спонтанное погасание дуги представляет собой процесс, быстро развивающийся одновременно на расстояниях порядка сантиметров. Это процесс приводит к резкой потере проводимости плазмы, общее количество которой уменьшается плавно. Модель процесса погасания дуги может быть основана на явлении аномального сопротивления плазмы в условиях развития плазменных неустойчивостей. Эти неустойчивости, в свою очередь, развиваются как следствие неравномерности генерации плазмы при синхронизации эктонных процессов.

Благодарности / Acknowledgments

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00360, <https://rscf.ru/project/23-19-00360/>.

The research was carried out with financial support of Russian Science Foundation, grant № 23-19-00360, <https://rscf.ru/en/project/23-19-00360/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schuelke T., Becker M., Grotjohn T. A., Asmussen J. The vacuum arc plasma source and its applications // The 31st IEEE International Conference on Plasma Science, 2004. P. 309–315. DOI: 10.1109/PLASMA.2004.1339993.

2. Miernik K. VACUUM ARC PLASMA SOURCES // High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes. 2001. V. 5, Iss. 3. DOI: 10.1615/HighTempMatProc.v5.i3.100.
3. Brown I. G. Vacuum arc ion sources for particle accelerators and ion implantation // IEEE Transactions on Plasma Science. 1993. V. 21, No. 5. P. 537–546. DOI: 10.1109/27.249640.
4. Brown I. G. Vacuum arc ion sources // Rev Sci Instrum. 1994. V. 65. P. 3061–3081. DOI: 10.1063/1.1144756.
5. Kuang-Oscar Yu. Modeling for Casting & Solidification Processing. Boca Raton: CRC Press, 2001. P. 720. DOI: 10.1201/9781482277333.
6. Anders A. Cathodic Arcs: From Fractal Spots to Energetic Condensation. New York: Springer, 2008. P. 562.
7. Eichmeier J. A., Thumm M. (eds). Vacuum Electronics: Components and Devices. Springer Science & Business Media, 2008. P. 408–422.
8. Toya H., Hieda K., Saitou T. Preliminary Study on Arc Welding in Vacuum // International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, (Matsue, Japan), 2006. P. 762–765. DOI: 10.1109/DEIV.2006.357414.
9. Mesyats G. Cathode Phenomena in a Vacuum Discharge: The Breakdown, the Spark, and the Arc. Moscow: Nauka, 2000. P. 399.
10. Кесаев И. Г. Катодные процессы электрической дуги. М.: Наука, 1968. 244 с.
11. Beilis I. I. The vacuum arc cathode spot and plasma jet: Physical model and mathematical description // CPP. 2003. V. 43, Iss. 3–4. P. 224–236.
12. Lafferty J. M. Vacuum Arcs. Theory and Application 1st Edition. Wiley, 1980. 1st edition P. 372.
13. Boxman R. L. Handbook of Vacuum Arc Science & Technology: Fundamentals and Applications (Materials Science and Process Technology Series). William Andrew, 1997. 1st edition. P. 773.
14. Mesyats G. A. Ecton mechanism of the vacuum arc cathode spot // IEEE Transactions on Plasma Science. 1995. V. 23, No. 6. P. 879–883. DOI: 10.1109/27.476469.
15. Shmelev D. L., Litvinov E. A. The computer simulation of the vacuum arc emission center // IEEE Transactions on Plasma Science. 1997. V. 25, No. 4. P. 533–537. DOI: 10.1109/27.640661.
16. Barendolts S. A. Structure and time behavior of vacuum arc cathode spots // IEEE Transactions on Plasma Science. 2003. V. 31, Iss. 5. P. 809–816.
17. Muzyukin I., Zemskov Y. On charged particle flux parameters at vacuum arc current instability and chopping. // Proceedings – International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, ISDEIV. 2018. V. 28. P. 419–422. DOI: 10.1109/DEIV.2018.8537135.
18. Muzyukin I. L. Measurement of time dependence of energy and mass-charge composition of ion flux in short vacuum arc with nanosecond resolution // J. Phys. D: Appl. Phys. 2018. V. 51. Article number 315202. DOI: 10.1088/1361-6463/aacfbf.
19. Muzukin I. L. Time-resolved investigations of the accelerated electron flow from the cathode region of a vacuum arc // IEEE Transactions on Plasma Science. 2005. V. 33, No. 5. P. 1560–1563. DOI: 10.1109/TPS.2005.856496.
20. Sagdeev R. Z., Galeev A. A. Nonlinear plasma theory. T. O'Neil, D. Book (ed.) Amsterdam: Benjam N. Y., 1969. P. 122.
21. Artsimovich L. A. A Physicist's ABC of Plasma Physics. Moscow: Mir, 1978. P. 300.