

УДК 66.088

## **Влияние магнитного поля на вольт-амперную характеристику вакуумного дугового разряда**

Духопельников Д. В.<sup>1</sup>, Кириллов Д. В.<sup>1,\*</sup>

\*[kirillovdv@bmstu.ru](mailto:kirillovdv@bmstu.ru)

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

---

В работе изучалось влияние магнитного поля на вольт-амперные характеристики вакуумных дуговых испарителей. Исследовались вакуумные дуговые испарители с двумя схемами фиксации катодного пятна на поверхности катода: с расходящимся осесимметричным и арочным магнитным полем. Показано, что магнитное поле существенно влияет на характер вольт-амперной характеристики в обеих схемах. Напряжение разряда при одинаковой величине магнитной индукции и токе разряда существенно выше при арочном магнитном поле, чем при расходящемся магнитном поле. При увеличении индукции магнитного поля возрастающая вольт-амперная характеристика становится падающей. Показано, что данное явление в полностью ионизованной плазме вакуумного дугового разряда объясняется обратной пропорциональностью параметра Холла от ее концентрации.

**Ключевые слова:** вакуумная дуга, магнитное поле, напряжение, вольт-амперная характеристика, плазма

---

### **Введение**

Технология вакуумного дугового испарения, разработанная в 70-х годах в СССР, в настоящее время широко применяется в машиностроении для осаждения различных функциональных покрытий [1, 2, 3]. В современных дуговых испарителях стабилизация разряда и положения катодной привязки (катодного пятна) осуществляется магнитным полем. Используют **две схемы магнитных систем**: с расходящимся осесимметричным магнитным полем и с арочным магнитным полем [4].

Ранее предпочтение оказывалось системе с расходящимся осесимметричным магнитным полем [5, 6], которая применялась в установках ННВ-6, Булат-3Т, Булат-6, БИ-ПУСК, ПК-200.

Арочное магнитное поле впервые было предложено в работе [7] и используется в дуговых испарителях установок типа NanoArcMaster (Россия, ЦНИИТМАШ-МГТУ им. Н.Э. Баумана) [8], Platit (Швейцария), Ionbond (Швейцария), Oerlikon Balzers (Лихтенштейн).

Поскольку плазма вакуумного дугового разряда практически полностью ионизована, даже слабые магнитные поля (на уровне 0,2 мТл) оказывают существенное влияние на вольт-амперные характеристики разряда. Так, в работе [9] исследованы вольт-амперные



Расчёт топографии магнитных полей производился методом конечных элементов в программной среде Infolytica MagNet v. 7.1.1. При расходящейся конфигурации касательная составляющая магнитного поля, которая обычно значительно меньше, чем нормальная, заставляет катодную привязку смещаться к периферии катода, увеличивая зону выработки. Величина нормальной составляющей не влияет на движение катодной привязки. При арочной конфигурации катодная привязка движется в центре арки, образованной линиями магнитного поля. Нормальная составляющая в центре арки равна нулю, касательная составляющая максимальна, что значительно увеличивает скорость движения катодных пятен.

Напряжения дугового разряда регистрировалось с помощью цифрового мультиметра Tektronix DMM4050. Величина напряжения имеет большие флуктуации относительно номинала. Для снижения погрешности использовалась аппаратная функция усреднения величины по 15 измерениям. Ток разряда задавался непосредственно на сварочном выпрямителе (отклонение тока от номинального значения не более 5 %).

Работы проводились на установке с цилиндрической вакуумной камерой диаметром 700 мм и длиной 700 мм, оснащённой насосами Oerlikon Leybold Trivac D65B и Oerlikon Leybold Turbovac TW 2401. Напуск газа (аргон) осуществлялся регулятором расхода MKS Instr. 2179A и контроллером MKS Instr. 647C. В качестве источника питания дуговых испарителей использовался инверторный сварочный выпрямитель EWM Tetrix 230 AC/DC с блоком согласования и инициации разряда, разработанным в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

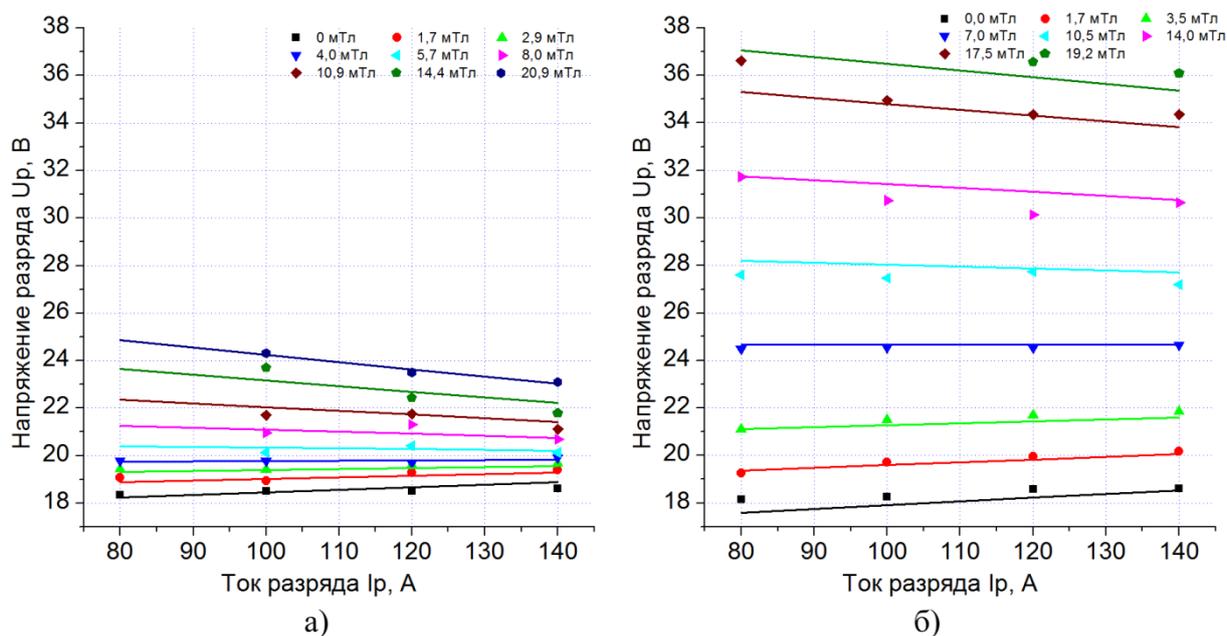
## Эксперимент

Измерение ВАХ проводилось при токе дугового разряда от 80 до 140 А, магнитное поле в обоих случаях изменялось от 0 до 20 мТл. Остаточное давление в вакуумной камере составляло не более  $1 \cdot 10^{-3}$  Па, рабочее давление аргона во время измерений составляло  $1,6 \cdot 10^{-2}$  Па.

На рис. 2 показаны ВАХ разряда при различных значениях индукции магнитного поля для двух описанных конфигураций магнитного поля. При отсутствии магнитного поля и при малых значениях индукции магнитного поля ВАХ разряда является возрастающей. При дальнейшем увеличении индукции магнитного поля ВАХ разряда становится падающей. Переход ВАХ от растущей к падающей происходит при значениях магнитного поля 4,4 мТл и 6,5 мТл для расходящегося и для арочного магнитного поля соответственно.

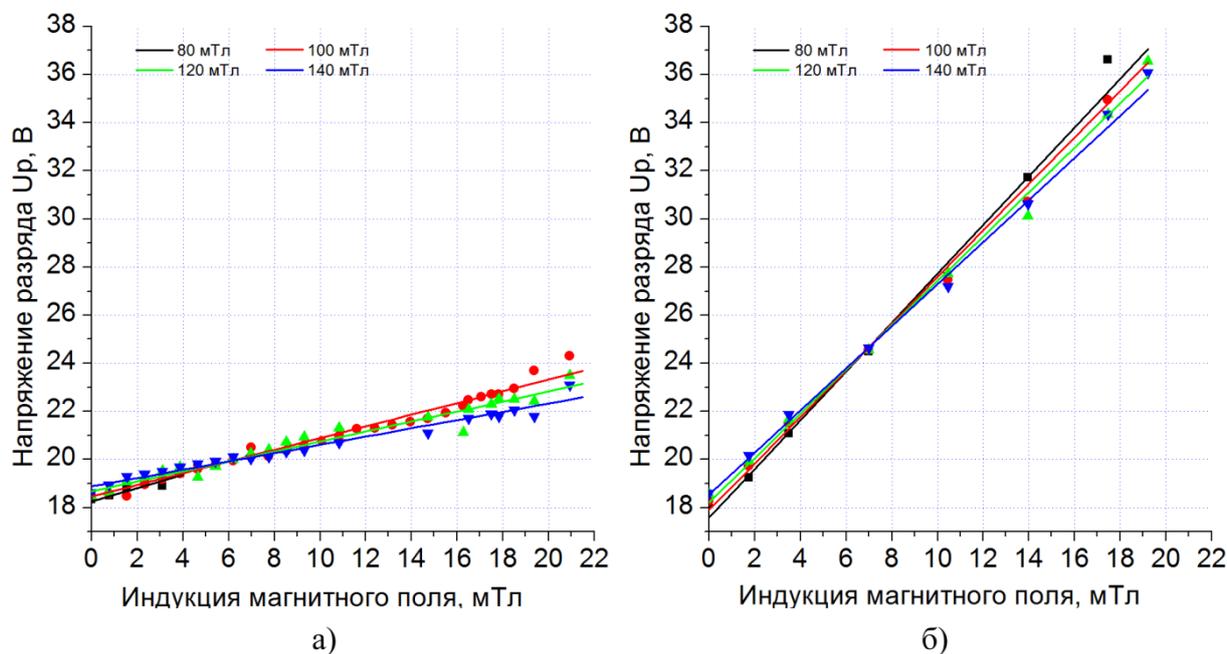
На рис. 3 показаны полученные зависимости напряжения разряда от индукции магнитного поля при постоянных токах разряда. Магнитное поле существенно влияет на напряжение вакуумного дугового разряда. Напряжение при фиксированном разрядном токе линейно возрастает при увеличении индукции магнитного поля от 0 до 20 мТл. Рост напряжения разряда при арочном магнитном поле больше, чем при расходящейся конфигурации: для расходящегося магнитного поля увеличение индукции поля от 0 до 20 мТл вызывает увеличение напряжения с 18,5 В до 24,3 В, в то время как в арочном

магнитном поле увеличение магнитного поля от 0 до 20 мТл вызывает увеличение напряжения с 18,5 В до 37 В.



а) расходящееся магнитное поле; б) арочное магнитное поле  
**Рис. 2.** Вольт-амперные характеристики вакуумного дугового разряда

Повышение напряжения разряда при арочном магнитном поле до 37 В вызывало нестабильную работу и гашение дугового разряда, что связано с характеристиками источника питания.



а) осесимметричное расходящееся магнитное поле; б) арочное магнитное поле

**Рис. 3.** Зависимость напряжения разряда от индукции магнитного поля на поверхности катода при различных токах разряда

## Обсуждение

Напряжение дугового разряда складывается из катодного падения, анодного падения и напряжения на положительном столбе [13]. Толщина катодного слоя в рассматриваемом разряде много меньше длины свободного пробега и высоты циклоиды для электронов и ионов. Поэтому умеренные магнитные поля не должны изменять величину катодного падения. В исследуемом разряде в области анода магнитные поля практически отсутствуют, и их влиянием на анодное падение можно пренебречь. Рассмотрим влияние магнитного поля на проводимость положительного столба исследуемого дугового разряда.

Особенность вакуумно-дугового разряда с интегрально холодным катодом является практически полностью ионизованная металлическая плазма, заполняющая разрядный промежуток [14]. В такой плазме преобладающими являются кулоновские столкновения электрон-ион. При этом проводимость плазмы  $\sigma_0$  определяется, в основном, её температурой и не зависит от ее концентрации [15]. В этом случае ВАХ положительного столба должна быть линейной и возрастающей, что наблюдается в эксперименте при отсутствии магнитного поля.

В присутствии арочного магнитного поля распространение плазмы идёт в основном поперёк линий магнитного поля, так как перпендикулярная катоду составляющая магнитного поля в центре арки равно нулю. В этом случае проводимость плазмы снижается, и в случае электронной проводимости определяется параметром Холла для электронов  $\beta_e$ :

$$\sigma_{\perp} = \frac{\sigma_0}{1 + \beta_e^2} = \frac{\sigma_0}{1 + \omega_e^2 \tau_e^2}, \quad (1)$$

где  $\omega_e$  – циклотронная частота электрона,  $\tau_e$  – среднее время между соударениями электронов.

Рассмотрим разряд с арочным магнитным полем в прикатодной области. Разобьем положительный столб на два последовательных участка: участок в прикатодной области с магнитным полем длиной  $L_k$  и участок в прианодной области без магнитного поля длиной  $L_a$ . Будем считать, что площадь поперечного сечения положительного столба, плотность тока и напряженность электрического поля на этих участках соответственно равны  $S_k, S_a, j_k, j_a, E_k, E_a$ . Тогда для напряжения на положительном столбе  $U$  и тока разряда  $I$  можно записать:

$$U = E_k L_k + E_a L_a = \frac{j_k}{\sigma_{\perp}} L_k + \frac{j_a}{\sigma_0} L_a = \frac{I}{S_k \sigma_{\perp}} L_k + \frac{I}{S_a \sigma_0} L_a = \left( \frac{L_k}{S_k \sigma_{\perp}} + \frac{L_a}{S_a \sigma_0} \right) I \quad (2)$$

Подставляем в (2) выражение (3) и получаем:

$$U = \left( (1 + \omega_e^2 \tau_e^2) \frac{L_k}{S_k \sigma_0} + \frac{L_a}{S_a \sigma_0} \right) I \quad (3)$$

Выражения для циклотронной частоты и среднего времени между соударениями электронов имеют соответственно вид:

$$\omega_e = \frac{eB}{m_e}, \quad \tau_e = \frac{1}{n_e \langle \sigma_{ei} v_e \rangle} \quad (4)$$

где  $e$  и  $m_e$  – заряд и масса электрона соответственно,  $B$  – величина индукции магнитного поля,  $n_e$  – концентрация плазмы,  $\sigma_{ei}$  – сечение кулоновских столкновений электрон-ион,  $v_e$  – скорость электрона.

Запишем зависимость (3) с учетом (4):

$$U = \frac{l_B}{\sigma_0 S_B} \left[ 1 + \left( \frac{eB}{m_e} \frac{1}{n_e \langle \sigma_{ei} v_e \rangle} \right)^2 \right] I + \frac{l}{\sigma_0 S} I \quad (5)$$

Плазма в столбе вакуумно-дугового разряда практически полностью ионизована, и разряд горит в парах материала катода. Скорость генерации паров определяется коэффициентом эрозии  $k$  и током разряда  $I$ :

$$\frac{dm}{dt} = kI \quad (6)$$

При умеренных значениях индукции магнитного поля, когда оно не оказывает влияния на движение ионной компоненты, а параметр Холла для электронов невелик, концентрация плазмы около катода будет определяться коэффициентом амбиполярной диффузии  $D_a$ , который близок к коэффициенту диффузии ионной компоненты. При этом количество ионов  $dN/dt$  выходящих из катодного пятна в разрядный промежуток должно соответствовать количеству ионов уходящих от катода вследствие распада плазмы со скоростью диффузии:

$$\frac{dN}{dt} = S n_e v = S D_a \nabla n_e \quad (7)$$

где  $n_e$  – концентрация плазмы,  $S$  – площадь столба дуги.

Тогда, при массе атома металла катода  $M$  и с учетом (6):

$$\frac{dN}{dt} = \frac{kI}{M} = S D_a \nabla n_e \quad (8)$$

В случае плоской геометрии источника плазмы для стационарного случая решением уравнения диффузии является линейная функция [15], и градиент концентрации будет определяться отношением  $\nabla n = n_e / L$ , где  $n_e$  – концентрация плазмы около катода,  $L$  – длина разрядного промежутка. Таким образом, концентрация плазмы около катода  $n_e$  будет определяться током разряда:

$$n_e = \frac{kI}{M} \cdot \frac{L}{S D_a} = KI \quad (9)$$

где  $K$  – некоторая константа.

Подставив (9) в (5) можно получить выражение для зависимости напряжения разряда от тока:

$$U = \left( \frac{L_k}{\sigma_0 S_k} + \frac{L_a}{\sigma_0 S_a} \right) I + \frac{L_k}{\sigma_0 S_k} \left( \frac{eB}{m_e} \frac{1}{K \langle \sigma_{ei} v_e \rangle} \right)^2 \frac{1}{I} \quad (10)$$

Кривая зависимости (10) имеет минимум, который можно найти дифференцированием (10) по току разряда  $I$ :

$$\frac{dU}{dI} = \left( \frac{L_k}{\sigma_0 S_k} + \frac{L_a}{\sigma_0 S_a} \right) - \frac{L_a}{\sigma_0 S_a} \left( \frac{eB}{m_e k \langle \sigma_{ei} v_e \rangle} \right)^2 \frac{1}{I^2} \quad (11)$$

Приравнявая (11) к нулю, получаем значение тока разряда, при котором произойдет изменение наклона ВАХ:

$$I = \frac{eB}{m_e k \langle \sigma_{ei} v_e \rangle} \sqrt{\frac{L_a/S_a}{L_k/S_k + L_a/S_a}} \quad (12)$$

Таким образом, при нулевой индукции магнитного поля  $B = 0$ , графиком функции (10) будет прямая линия, при ненулевой индукции магнитного поля мы получим кривую с минимумом при значении тока определяемом выражением (12) рис. 4.

Характер зависимости ВАХ от магнитного поля, полученных по выражению (10), хорошо согласуется с полученными экспериментальными данными для умеренных токов разряда (левая часть кривых, показанных на рис. 4). В широком диапазоне разрядных токов форма полученных кривых совпадает с результатами работы [9].

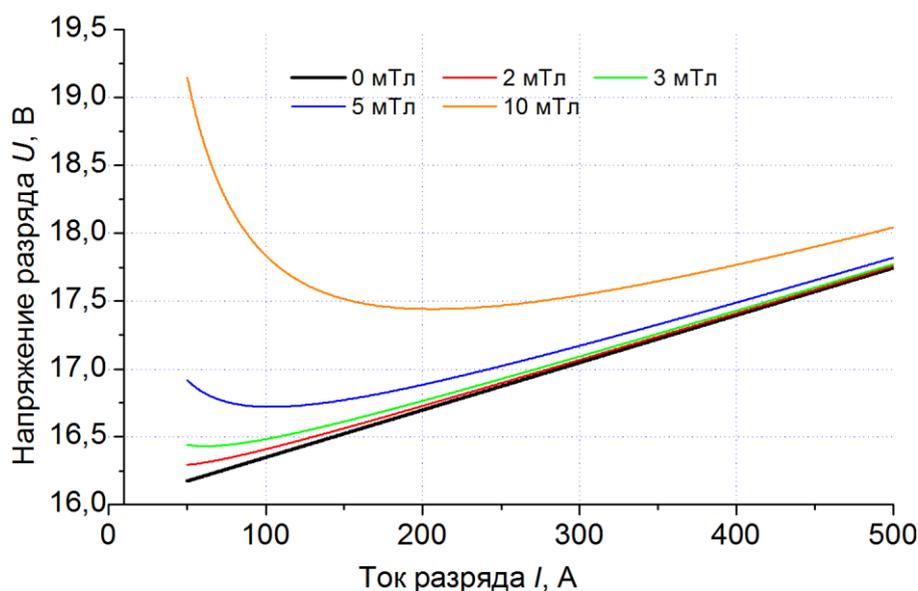


Рис. 4. Общий вид ВАХ вакуумного дугового разряда при различных значениях индукции магнитного поля, полученный по зависимости (10)

Аналогичный результат можно получить для расходящегося магнитного поля. При этом напряжение разряда будет меньше, т.к. в этом случае участок с магнитным полем будет параллелен участку без магнитного поля.

## Выводы

1. Магнитное поле оказывает существенное влияние на ВАХ вакуумно-дугового разряда. При отсутствии магнитного поля и при малых значениях индукции магнитного

поля ВАХ разряда является возрастающей. При дальнейшем увеличении индукции магнитного поля ВАХ разряда становится падающей.

2. Переход ВАХ разряда от возрастающей к падающей происходит при индукции магнитного поля около катода 4,4 мТл и 6,6 мТл для расходящегося и для арочного магнитного поля, соответственно.

3. При арочном магнитном поле увеличение индукции магнитного поля приводит к большим изменениям ВАХ. Напряжение разряда при арочном магнитном поле возрастает значительно больше, чем при расходящемся магнитном поле.

4. Изменение характера ВАХ вакуумно-дугового разряда в магнитном поле можно объяснить обратной пропорциональностью параметра Холла в полностью ионизованной плазме от ее концентрации.

### Список литературы

1. Саксаганский Г.Л. Электрофизические вакуумные насосы. М.: Энергоатомиздат, 1988. 280 с.
2. Дороднов А.М. Некоторые применения плазменных ускорителей в технике // Физика и применение плазменных ускорителей / под ред. А.И. Морозова. Минск: Наука и техника, 1974. С. 330-365.
3. Аксёнов И.И., Падалка В.Г., Хороших В.М. Формирование потоков металлической плазмы: Обзор. М.: ЦНИИАтоминформ, 1984. 83 с.
4. Духопельников Д.В., Жуков А.В., Кириллов Д.В., Марахтанов М.К. Структура и особенности движения катодного пятна вакуумной дуги на протяжённом титановом катоде // Измерительная техника. 2005. № 10. С. 42-44.
5. Андреев А.А., Саблев Л.П., Шулаев В.М., Григорьев С.Н. Вакуумно-дуговые устройства и покрытия. Харьков: ННЦ ХФТИ, 2005. 236 с.
6. Духопельников Д.В., Кириллов Д.В., Воробьев Е.В., Ивахненко С.Г. Влияние выработки катода дугового испарителя на равномерность толщины покрытия и угловое распределение продуктов эрозии // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 4. С. 1-9. DOI: [10.7463/0414.0707391](https://doi.org/10.7463/0414.0707391)
7. Кесаев И.Г., Пашкова В.В. Электромагнитная фиксация катодного пятна // Журнал технической физики. 1959. Т. 29, № 3. С. 287-298.
8. Кириллов Д.В., Рязанов В.А. Исследование профиля выработки катода дугового испарителя при различных токах разряда и индукции магнитного поля // Молодежный научно-технический вестник. Электрон. журн. 2013. № 5. Режим доступа: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/568240.html> (дата обращения 08.07.2015).
9. Agarwal M.S., Holmes R. Arcing voltage of the metal vapour vacuum arc // Journal of Physics D: Applied Physics. 1984. Vol. 17, no. 4. P. 757-767. DOI: [10.1088/0022-3727/17/4/014](https://doi.org/10.1088/0022-3727/17/4/014)

10. Pavelescu D., Dumitrescu G., Nitu S., Trusca V., Pavelescu D. Jr. The Influence of the Axial Magnetic Field upon the Low Voltage Electric Arc in Vacuum // IEEE Transactions on Power Delivery. 1999. Vol. 14, no. 3. P. 948-953. DOI: [10.1109/61.772339](https://doi.org/10.1109/61.772339)
11. Аксёнов И.И. Вакуумная дуга в эрозионных источниках плазмы. Харьков: ННЦ ХФТИ, 2005. 212 с.
12. Духопельников Д.В., Кириллов Д.В., Рязанов В.А., Наинг Чжо Вин. Оптимизация траектории движения катодного пятна для повышения равномерности выработки катода вакуумного дугового испарителя // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 10 (22). DOI: [10.18698/2308-6033-2013-10-1042](https://doi.org/10.18698/2308-6033-2013-10-1042)
13. Райзер Ю.П. Физика газового разряда: учеб. руководство: для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1992. 536 с
14. Месяц Г.А., Баренгольц С.А. Механизм генерации аномальных ионов вакуумной дуги // Успехи физических наук. 2002. Т. 172, № 10. С. 1113-1130. Mesyats G.A., Barengol'ts S.A. Mechanism of anomalous ion generation in vacuum arcs. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 2002, vol. 172, no. 10, pp. 1113-1130. (English version of journal: *Physics-Uspekhi*, 2002, vol. 45, no. 10, pp. 1001-1018. DOI: [10.1070/PU2002v045n10ABEH001247](https://doi.org/10.1070/PU2002v045n10ABEH001247) ).
15. Чен Ф. Введение в физику плазмы: пер. с англ. / под ред. Кручины Е.Н. М.: Мир, 1987. 398 с. [Chen F.F. Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion. Vol. 1. Plasma Physics. 2<sup>nd</sup> ed. New York: Plenum Press, 1984.]

## **Influence of Magnetic Field on Vacuum Arc Discharge Volt-Ampere Characteristics**

D.V. Duhopel'nikov<sup>1</sup>, D.V. Kirillov<sup>1,\*</sup>

[\\*kirillovdv@bmstu.ru](mailto:kirillovdv@bmstu.ru)

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

---

**Keywords:** cathodic arc, vacuum arc, voltage, volt-ampere characteristic, magnetic field, plasma

---

The vacuum arc evaporation technology was developed in the 70-s in the USSR and widely used nowadays for deposition of various functional coatings. Magnetic field provides stabilization of the discharge and cathode spot movement in arc evaporators. Usually, are used two types of magnetic systems: with divergent axisymmetrical magnetic field and with an arch-like magnetic field. The systems with the arch-like magnetic field allow a flexible control of the trajectory and the speed of the moving cathode spot and, recently, have been increasingly frequently used in facilities of vacuum arc deposition of coatings.

Since the plasma of vacuum arc discharge is almost in completely ionized state even the weak magnetic fields have a significant influence on the vacuum arc discharge volt-ampere characteristics (VAC). Unfortunately, with a wealth of materials concerning the vacuum arc discharge there is still insufficient information about the influence of magnetic field magnitude and shape on the arc discharge VAC of the industrial arc evaporators

This work studies the effect of magnetic fields on VAC of two different arc evaporators with a titanium cathode, which possess axial and arch-like magnetic field.

It was shown that the magnetic field significantly affects the VAC behavior changing it from increasing to descending one. The transition of VAC curves behavior from growing to descending one occurs at magnetic field values of 4.4 mT and 6.5 mT for axial and arch-like magnetic field, respectively.

Voltage at fixed discharge current linearly increases with raising magnetic field induction. The discharge voltage growth with the arch-like magnetic field is greater than with its axial configuration.

At the same time in the work the analytical expressions are given. These equations show that the VAC shape modification of the vacuum arc discharge in an external magnetic field may be explained by the inverse proportionality of the Hall parameter on its concentration in completely ionized plasma. A general view of VAC dependence on the magnetic field magnitude is obtained.

## References

1. Saksaganskii G.L. *Elektrofizicheskie vakuurnnye nasosy* [Electrophysical vacuum pumps]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 280 p. (in Russian).
2. Dorodnov A.M. Some applications of plasma accelerators in engineering. In book: Morozov A.I., ed. *Fizika i primeneniye plazmennyykh uskoritelei* [Physics and application of plasma accelerators]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1974, pp. 330-365. (in Russian).
3. Aksenov I.I., Padalka V.G., Khoroshikh V.M. *Formirovaniye potokov metallicheskoy plazmy: Obzor* [Formation of metal plasma flows: Overview]. Moscow, TsNIIatominform Publ., 1984. 83 p. (in Russian).
4. Dukhopel'nikov D.V., Zhukov A.V., Kirillov D.V., Marakhtanov M.K. Structure and Features of the Motion of a Cathode Spot on a Continuous Titanium Cathode. *Izmeritel'naya tekhnika*, 2005, no. 10, pp. 42-44. (English version of journal: *Measurement Techniques*, 2005, vol. 48, iss. 10, pp. 995-999. DOI: [10.1007/s11018-006-0010-2](https://doi.org/10.1007/s11018-006-0010-2) ).
5. Andreev A.A., Sablev L.P., Shulaev V.M., Grigor'ev S.N. *Vakuumno-dugovyye ustroystva i pokrytiya* [Vacuum-arc devices and coatings]. Kharkov, Publ. of National Science Center of Kharkov Institute of Physics and Technology, 2005. 236 p. (in Russian).
6. Dukhopel'nikov D.V., Kirillov D.V., Vorob'ev E.V., Ivakhnenko S.G. The influence of cathode excavation of cathodic arc evaporator on thickness uniformity and erosion products angle distribution. *Nauka i obrazovaniye MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2014, no. 4, pp. 1-9. DOI: [10.7463/0414.0707391](https://doi.org/10.7463/0414.0707391) (in Russian).
7. Kesaev I.G., Pashkova V.V. Electromagnetic fixation of the cathode spot. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 1959, vol. 29, no. 3, pp. 287-298. (in Russian).
8. Kirillov D.V., Ryazanov V.A. The research of generation profile of cathode of arc evaporator with various discharge currents and magnetic field induction. *Molodezhnyi nauchno-tekhnicheskii vestnik MGTU im. N.E. Baumana = Youth Science and Technology Herald of the Bauman MSTU*, 2013, no. 5. Available at: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/568240.html> , accessed 08.07.2015. (in Russian).
9. Agarwal M.S., Holmes R. Arcing voltage of the metal vapour vacuum arc. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1984, vol. 17, no. 4, pp. 757-767. DOI: [10.1088/0022-3727/17/4/014](https://doi.org/10.1088/0022-3727/17/4/014)
10. Pavelescu D., Dumitrescu G., Nitu S., Trusca V., Pavelescu D. Jr. The Influence of the Axial Magnetic Field upon the Low Voltage Electric Arc in Vacuum. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1999, vol. 14, no. 3, pp. 948-953. DOI: [10.1109/61.772339](https://doi.org/10.1109/61.772339)
11. Aksenov I.I. *Vakuurnnaya duga v erozionnykh istochnikakh plazmy* [Vacuum arc in erosion plasma sources]. Kharkiv, KhFTI Publ., 2005. 212 p. (in Russian).
12. Dukhopelnikov D.V., Kirillov D.V., Ryazanov V.A., Kyaw Win Naing. Cathode spot path optimization to increase cathode uniform excavation of vacuum arc vaporizer. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii = Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, no. 10. DOI: [10.18698/2308-6033-2013-10-1042](https://doi.org/10.18698/2308-6033-2013-10-1042) (in Russian).

13. Raizer Yu.P. *Gas Discharge Physics*. Berlin, New York, Springer-Verlag, 1991. 449 p. (Russ. ed.: Raizer Yu.P. *Fizika gazovogo razryada*. Moscow, Nauka Publ., 1992. 536 p.).
14. Mesyats G.A., Barengol'ts S.A. Mechanism of anomalous ion generation in vacuum arcs. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 2002, vol. 172, no. 10, pp. 1113-1130. (English version of journal: *Physics-Uspekhi*, 2002, vol. 45, no. 10, pp. 1001-1018. DOI: [10.1070/PU2002v045n10ABEH001247](https://doi.org/10.1070/PU2002v045n10ABEH001247) ).
15. Chen F.F. *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion. Vol. 1. Plasma Physics*. 2<sup>nd</sup> ed. New York, Plenum Press, 1984. (Russ. ed.: Chen F.F. *Vvedenie v fiziku plazmy*. Moscow, Mir Publ., 1987. 398 p.).