

УДК 533.6.011:533.9:537.52

## О влиянии внешнего магнитного поля на устойчивость электродугового разряда

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

*Разработана стендовая установка для исследования способов стабилизации и дестабилизации разряда, связанных с наложением внешнего магнитного поля на основе системы линейных токов, включенных последовательно в цепь разряда. Получены данные о влиянии конфигурации внешнего магнитного поля на движение и форму дугового столба, размеры и скорости перемещения его опорных пятен и электродных струй-факелов.*

PACS: 52.80.Mg

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

### Введение

Экспериментальные исследования воздействия внешнего магнитного поля на электрические дуги часто проводятся для анализа возможности стабилизации таких разрядов, в частности, в плазмотронах [1, 2]. Теоретически влияние внешнего аксиального магнитного поля проводилось в [3] при исследовании винтовой неустойчивости электрической дуги. Важность анализа воздействия поперечного магнитного поля на разрядные процессы отмечается в [4, 5]. Влияние внешнего поперечного магнитного поля на уменьшение напряжения в вакуумных размыкателях изучено в [6]. Экспериментальное исследование радиационных характеристик длинных (до 2 м) дуг при наличии поперечного внешнего магнитного поля, параллельного собственному магнитному полю разряда, проведено в [7].

При параллельном включении линейных витков подмагничивания влияние магнитного поля в [7] было пренебрежимо мало:  $I_m = I/N$ , где  $I_m$ ,  $I$  — токи в витках и дуге, соответственно, а  $N$  — число витков.

В настоящей работе на основе системы линейных токов, включенных последовательно в цепь разряда, изготовлена и отлажена магнитная систе-

ма для создания внешнего магнитного поля, ориентированного либо по направлению магнитного поля, порождаемого собственным током изначально невозмущенного столба дуги, либо против него. В результате  $I_m = \pm I$ , так как разряд и магнитная система подсоединены к одному источнику тока.

Экспериментальные исследования основаны на диагностике и анализе осциллограмм тока и напряжения на разрядном промежутке и на визуализации разрядных процессов при скоростной видеосъемке (1200—24000 к/с, экспозиция 1—25 мкс).

Основная цель работы — получение экспериментальных данных о динамике формы дуги в плотной воздушной атмосфере в наложенном магнитном поле при токах до 400 А и межэлектродных зазорах до 5 см, а также изучение влияния внешнего магнитного поля на движение дугового столба, размеры и скорости перемещения его опорных пятен и динамику струй из них.

### Постановка задачи и схема измерений

В работе исследуется протяженный электрический дуговой разряд, ориентированный преимущественно вертикально (анод внизу), с квазистационарными токами до 400 А, в воздушной среде атмосферного давления на графитовых электродах [8] и при наличии внешнего магнитного поля. Диаметр стержневых графитовых электродов — 16 мм, длина разрядного промежутка  $l_{мэ}$  — от 3 до 5 см. Инициация разряда осуществлялась смыканием электродов с последующим их раздвижением до выбранного межэлектродного расстояния  $l_{мэ}$  за время  $0,1 \div 0,2$  с. Продолжительность пульсов  $\sim 1—3$  с.

Детальная постановка задачи по проведению экспериментов и схема измерений подробно из-

Герман Валентин Остапович, вед. научный сотрудник.  
Глинов Александр Петрович, вед. научный сотрудник.  
Головин Александр Петрович, ст. научный сотрудник.  
Козлов Павел Владимирович, научный сотрудник.  
Институт механики Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова.  
Россия, 119192, г. Москва, Мичуринский пр-т, 1.  
Тел.: +7 (495) 939-15-28. E-mail: krestytroitsk@mail.ru

Статья поступила в редакцию 10 июня 2014 г.

© Герман В. О., Глинов А. П., Головин А. П., Козлов П. В., 2014

ложены в [8]. Общая схема проведения высокоскоростной регистрации видеоизображений разряда при разных скоростях и выдержках представлена на рис. 1. Зеркала (3) справа и слева предназначены для получения в кадрах трех проекций изображений, что дает представление о пространственной картине разряда. Защитные изоляционные кварцевые трубки свободно надеты на медные стержни (7) магнитной системы.

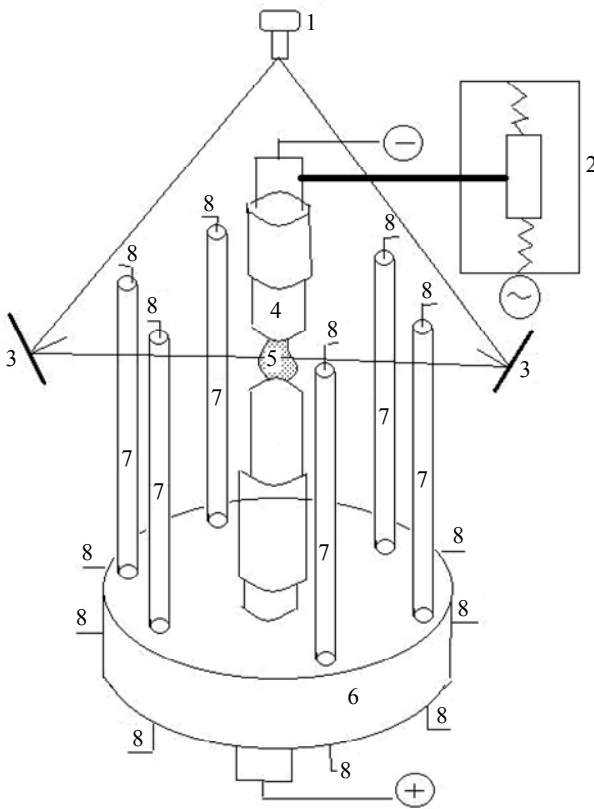


Рис. 1. Схема установки: 1 — видеокамера, 2 — механизм раздвижки электродов, 3 — зеркала, 4 — электроды, 5 — дуга, 6 — изоляционная подставка, 7 — стержни в кварцевых трубках, 8 — коммутационные шины

Начальный разрядный канал и витки подмагничивания находятся достаточно далеко друг от друга ( $R \sim 5$  см) по сравнению с их поперечными размерами ( $r \sim 2\text{—}3$  мм). Поэтому индукция магнитного поля  $\mathbf{B}$  в среднем (горизонтальном,  $z = 0$ ) поперечном сечении установки может быть в окрестности каждого витка и самого разрядного шнура рассчитана по модели прямолинейной нити тока бесконечной длины [9]:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \frac{I}{2\pi r} \mathbf{i}_\theta \quad (1)$$

где  $\mathbf{i}_\theta$  — единичный вектор, направленный по углу  $\theta$  в локальной цилиндрической системе координат  $z, r, \theta$ , связанной с конкретной нитью тока;

$\rho$  — расстояние от оси  $z$ ;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м — магнитная постоянная (система СИ).

Полагая в качестве параметра  $\rho$  характерный радиус линейного провода  $r = 2,5$  мм, для токов  $I = 100\text{—}400$  А из (1) получим максимальные значения магнитных полей в установке  $B_{\max} = 8\text{—}32$  мТ, соответственно. Однако при приближении дугового шнура к линейным проводам, создающим наложенное магнитное поле, эта величина (при противоположной ориентации токов в разряде и витках) может возрасти вдвое. Вдали от зон протекания токов ( $\rho \gg r$ ) магнитное поле спадает, согласно (1), как  $1/\rho$ . Расчеты магнитной системы, образуемой  $N+1$  токами разряда и линейными токами, создающими наложенное магнитное поле, показывают, что этот спад происходит еще быстрее, а с ростом  $N$  интенсивность спада увеличивается.

Оценим теоретически влияние конфигурации внешнего магнитного поля на стабильность разряда. В нулевом приближении стабильный токовый шнур проходит вдоль центральной оси магнитной системы (рис. 1) и опирается через опорные пятна на расположенные соответственно сверху и снизу катод и анод.

Рассмотрим возмущение разрядного шнура в виде его смещения от центральной оси системы в радиальном направлении (в сторону одного из линейных витков подмагничивания) на расстояние  $\delta R$ . Опорными пятнами этот шнур «привязан» к электродам, так что основное смещение шнура в виде  $U$ -образной петли происходит в межэлектродном пространстве. Подобно движению плазменного поршня в канале рельсотрона эта петля будет ускоряться силой электродинамического ускорения  $F_{\text{эду}} = LI^2/2$ , где  $I$  — разрядный ток,  $L'$  — погонная индуктивность [10] воображаемого рельсотрона, канал которого образован двумя направляющими рельсами  $z = \pm d/2$  ( $d \leq l_m$ ). Это ускорение ограничивается силой аэродинамического сопротивления  $F_A$ , но на начальном этапе ускорения (когда скорости перемещения шнура достаточно малы) и при достаточно сильных токах этой силой можно пренебречь  $F_A \ll F_{\text{эду}}$ . Дальнейшее развитие возмущения будет определяться управляющей пондеромоторной силой  $F_{\text{упр}}$ , обусловленной взаимодействием линейных токов шнура дуги и витка подмагничивания, в направлении которого движется возмущенный разряд. В результате определяющий баланс сил  $F$ , действующих на возмущенный шнур, имеет следующий вид:

$$F = F_{\text{эду}} + F_{\text{упр}}, \quad F_{\text{упр}} = \mu_0 \frac{I_m I}{2\pi(R - \delta R)} d \quad (2)$$

где  $R$  — радиус системы (расстояние от центра до витков подмагничивания).

Для стабилизации дугового шнура (уменьшения его смещения  $\delta R$  от центра) величина  $F$  (см. (2)) должна быть отрицательной ( $\delta R < R$ ), что возможно только, когда токи разряда и витков имеют противоположные направления и отталкиваются друг от друга ( $I_m I < 0$ ). При спутном направлении указанных токов ( $I_m I > 0$ ) управляющая сила оказывает только дестабилизирующее воздействие на разряд: шнур может притянуться к витку подмагничивания. Влияние рассматриваемой магнитной системы на разряд зависит от направления токов разряда и витков подмагничивания. Ток в этих витках по величине равен току разряда ввиду запитки всей системы от одного источника напряжения.

Для характеристики магнитной системы введем параметр отношения тока в витках и тока разряда. Назовем его магнитным фактором  $\delta_{\text{маг}} = I_m / I$ . Нейтральному случаю отсутствия внешнего поля соответствует  $\delta_{\text{маг}} = 0$ . Дестабилизирующая и стабилизирующая магнитная система рассматриваемой конструкции, когда токи  $I_m = \pm I$ , характеризуется величинами  $\delta_{\text{маг}} = \pm 1$  соответственно. Применение независимого электропитания для витков подмагничивания позволит в дальнейшем управлять величиной тока витков подмагничивания, а, следовательно, и величиной управляющей силы  $F_{\text{упр}}$ . В результате магнитный фактор перестанет быть дискретным и станет непрерывным параметром, принимающим достаточно произвольные значения, определяемые мощностью источника тока.

### Экспериментальные результаты

Проведено три серии пусков: без наложения внешнего магнитного поля (ток в витках подмагничивания  $I_m = 0$ ) и с внешним магнитным полем, как при  $I_m = I$ , так и при  $I_m = -I$ . В каждой серии проведено до 5 пусков при экспозиции одного кадра  $\tau_{\text{экс}} = 1$  мкс и скорости видеорегистрации  $f_{\text{рег}} = 12000$  или  $24000$  к/с и 3 эксперимента при  $\tau_{\text{экс}} = 25$  мкс,  $f_{\text{рег}} = 1200$  к/с.

**Разряд без внешнего магнитного поля ( $I_m = 0$ ).** Электродные струи-факелы (особенно в конце пуска), мечутся во всем разрядном пространстве. Анодное пятно хаотично перемещается не только по полусферической, контактной разряду поверхности электрода, но и заходит на его цилиндрическую часть. От катода исходит более или менее устойчивая расширяющаяся струя. С течением времени колебания напряжения на межэлектродном промежутке  $\Delta U$  и тока разряда  $I$  на осциллограммах усиливаются, и наступает обрыв

тока. При наблюдавшемся неупорядоченном движении анодного пятна (рис. 2, магнитный фактор  $\delta_{\text{маг}} = 0$ ) его диаметр (по оценкам видеоизображений) составлял  $d_s \approx 3 \pm 1$  мм, скорость перемещения  $v_s \approx 50 \pm 5$  м/с.

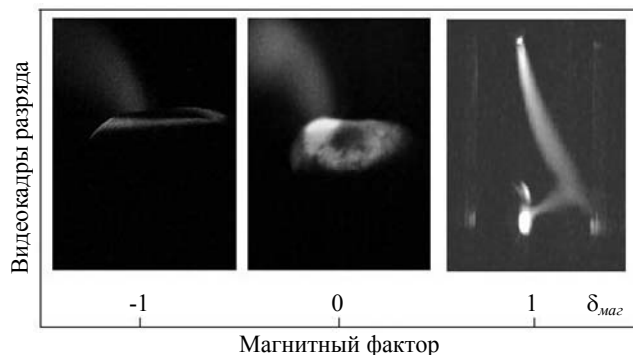


Рис. 2. Картина разряда при различных значениях магнитного фактора  $\delta_{\text{маг}} = I_m / I$ : частота видеосъемки  $f_{\text{рег}} = 1200$  (1),  $24003$  к/с (2, 3); экспозиция  $\delta_{\text{экс}} = 25$  (1),  $1$  мкс (2, 3)

**Наложение на разряд внешнего магнитного поля (токи в разряде и в стержнях клетки — в противоположных направлениях).** Поведение разряда более стабильное. Формируются протяженные струи от анода. По разрядной поверхности анода опорные пятна этих струй движутся упорядоченно (рис. 2,  $\delta_{\text{маг}} = -1$ ). Причем движение анодного пятна обжатой внешним магнитным полем дуги преимущественно круговое по торцевой окружности электрода. Осциллограммы  $\Delta U$  и  $I$  (общие) более стабильные. По сравнению с нестабилизированной магнитным полем дугой ( $\delta_{\text{маг}} = 0$ ) диаметр анодного пятна и скорость его перемещения уменьшаются примерно в 2 раза.

**Дестабилизирующее внешнее магнитное поле (токи в разряде и стержнях клетки спутные).** Визуально (по кадрам видео) движение разряда еще более хаотичное. Наблюдается тенденция прилипания разряда к стержню клетки (в зоне искривления шнура разряда), приводящая к разрыву разрядной цепи (рис. 2,  $\delta_{\text{маг}} = 1$ ).

При наложении стабилизирующего магнитного поля (рис. 3) прекращается хаотическое перемещение анодного пятна по поверхности электрода, и анодная струя (в течение длительных промежутков  $\sim 10$ — $20$  мс) устанавливается строго по центральной оси между электродами. Катодная струя, которая в обычных условиях очень стабильна и доминирует в разрядном промежутке, при этом может поглощаться анодным потоком. Стабилизация анодной струи приводит также к заметному росту (на  $10$ — $25$  %) тока разряда и падению напряжения на нем, что связано с изменением протекания тока в приэлектродных зонах.

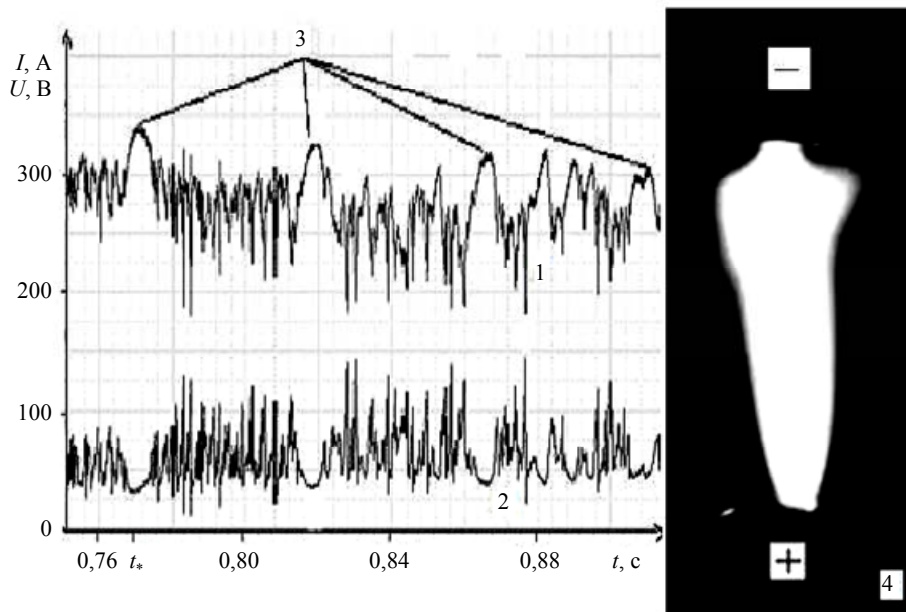


Рис. 3. Магнитная стабилизация анодной струи вертикального разряда: 1 — осциллограмма тока ( $I$ ), 2 — зависимость напряжения ( $U$ ) на межэлектродном промежутке от времени ( $t$ ), 3 — пики тока, 4 — видеокادر разряда при  $t = t_*$ ,  $\delta_{\text{маг}} = -1$

### Заключение

Для разрядов между стержневыми графитовыми электродами при токах до 400 А и межэлектродных промежутках до 5 см проведено экспериментальное исследование динамики формы и движения дуги в плотной воздушной атмосфере в наложенном магнитном поле. Приведены примеры, как стабилизирующего, так и дестабилизирующего воздействия внешнего магнитного поля на разряд в зависимости от его конфигурации. Получены данные о влиянии конфигурации и величины внешнего магнитного поля на движение и форму дугового столба, размеры и скорости перемещения его опорных пятен.

Авторы признательны Н. А. Киселеву (СЕДАТЭК) за проведение демонстрационной съемки разряда с помощью высокоскоростной видеокамеры Phantom Miro 310.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (№ 14-01-00399).

### Литература

1. Жуков М. Ф., Урюков Б. А., Энгельшт В. С. и др. Теория термической электродуговой плазмы. — М.: Наука, 1987. Т. 1, 2.
2. Глебов И. А., Рутберг Ф. Г. Мощные генераторы плазмы. — М.: Энергоатомиздат, 1985.
3. Синкевич О. А. // ДАН СССР, 1985. Т. 280. № 1. С. 99.
4. Недоспасов А. В., Хаит В. Д. Основы физики процессов в устройствах с низкотемпературной плазмой. — М.: Энергоатомиздат, 1991.
5. Брон О. Б., Сушков Л. К. Потоки плазмы в электрической дуге выключающих аппаратов. — Л.: Энергия, 1975.
6. Алферов Д. Ф., Евсин Д. В., Лондер Я. И. // Прикладная физика 2006, № 1, с. 29—36.
7. 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.
8. Герман В. О., Глинов А. П., Головин А. П., Козлов П. В., Любимов Г. А. // Прикладная физика. 2012. № 6. С. 108.
9. Том Р., Тарр Дж. Магнитные системы МГД-генераторов и термоядерных установок. — М.: Энергоатомиздат, 1985.
10. Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А. Расчет индуктивностей: Справочная книга. — Л.: Энергоатомиздат, 1986.

## About influence of an exterior magnetic field on stability of an electric arc

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

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

Received June 10, 2014

***Bench installation is developed for examination of expedients of stabilisation and destabilization of the discharge, related to superimposition of an exterior magnetic field on the basis of system of the linear currents included consistently with the discharge. The data about influence of a configuration of an exterior magnetic field on a motion and the shape of the arc pole, the sizes and velocities of travel of its basic spots and electrode streams-torches is obtained.***

PACS: 52.80.Mg

**Keywords:** electrical arc, high speed video shooting, magnetic field, basic spots, electrode streams, oscillograms, velocity.

### References

1. M. F. Zhukov, B. A. Uryukov, V. S. Engel'sht, et al., *Theory of Thermal Electroarc Plasma* (Nauka, Moscow, 1987) [in Russian].
2. I. A. Glebov and F. G. Rutberg, *Powerful Plasma Generators* (Energoatomizdat, Moscow, 1985) [in Russian].
3. O. A. Sinkevich, Dokl. Phys. (USSR) **280**, 99 (1985).
4. A. V. Nedospasov and V. D. Khait, *Foundation of Physical Processes in Devices with Low-Temperature Plasma* (Energoatomizdat, Moscow, 1991) [in Russian].
5. O. B. Bron and L. K. Sushkov, *Plasma Flows in the Electric Arc* (Energia, Leningrad, 1975) [in Russian].
6. D. F. Alferov, D. V. Evsin, and Ya. I. Londer, *Prikladnaya Fizika*, No. 1, 29 (2006).
7. J. M. Bauchire, D. Hong, and H. Riquel, in *Proc. 20th Int. Symp. on Plasma Chemistry* (Philadelphia USA at Loews Hotel, July 20—24, 2011).
8. V. O. German, A. P. Glinov, A. P. Golovin, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 6, 108 (2012).
9. R. Tom and J. Tarr, *Magnetic Systems of MHD Generators* (Energoatomizdat Moscow, 1985) [in Russian].
10. P. L. Kalantarov and L. A. Tseitlin, *Calculation of Inductance Coil: Handbook* (Energoatomizdat, Moscow, 1986) [in Russian].