

УДК 533.6.011:533.9:537.52

Стабилизация электродуговых разрядов во внешнем азимутальном магнитном поле

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

Проведено экспериментальное исследование воздействия внешнего квазиазимутального магнитного поля на устойчивость электродугового разряда между стержневыми графитовыми электродами в открытой воздушной атмосфере. Показано, что границы устойчивости разряда существенно зависят от величины и направления токов разряда и магнитной системы, межэлектродного расстояния и числа линейных токов. В проведенных экспериментах с независимым питанием разряда и магнитов показано, что при малых межэлектродных расстояниях (10—20 мм) применение сильных магнитных полей (создаваемых контурными токами, превосходящими ток разряда в 3—5 раз) не приводит к стабилизации дуги, а вызывает быстрое её гашение независимо от направления токов в магнитной системе.

PACS: 52.80.Mg

Ключевые слова: электрическая дуга, скоростная видеорегистрация, магнитное поле, осциллограммы, стабилизация и гашение электрических дуг.

Введение

Статья посвящена экспериментальному исследованию особенностей воздействия внешнего квазиазимутального магнитного поля на стабилизацию или гашение свободной воздушной дуги атмосферного давления между графитовыми (ЗОПГ) электродами [1]. В отличие от [1], во внешнем магнитном поле поведение разряда усложняется наличием дополнительных поперечных сил, приводящих к деформации формы ствола разряда и изменению скоростей перемещения опорных пятен [2, 3].

Эксперименты проведены с помощью магнитной системы (МС) [2], созданной на основе множества линейных токов, формирующих внешнее по отношению к разряду магнитное поле,

ориентированное либо по направлению магнитного поля, порождаемого собственным током изначально невозмущенного столба дуги, либо против него. В отличие от работ [3, 4], рассмотрены варианты электропитания магнитной системы как общей с разрядом, так и от независимого источника.

Постановка задачи

Экспериментальные исследования были основаны на диагностике и анализе осциллограмм тока и напряжения на разрядном промежутке и на визуализации разрядных процессов.

Проводилась скоростная видеосъемка, синхронизированная с записью осциллограмм. Параметры видеосъемки: скорость — 1200 к/с, время экспозиции — 25 мкс. Было проведено более 100 пусков. Межэлектродное расстояние ($l_{мэ}$) варьировалось в пределах 1—70 мм. Диапазоны разрядных токов (I) и токов магнитной системы (I_m) расширены до 1,2 кА. Число линейных токов в магнитной системе варьировалось в пределах: $N = 1—6$.

В результате анализа данных, полученных в проведенных экспериментах, показано, что границы устойчивости разряда существенно зависят от величины и направления токов разряда и магнитной системы, межэлектродного расстояния, радиуса магнитной «клетки» ($R = 40—50$ мм) и числа линейных токов.

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

Статья поступила в редакцию 26 сентября 2016 г.

© Герман В. О., Глинов А. П., Головин А. П., Козлов П. В., Шалеев К. В., 2016

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

К работам по анализу стабильности электрических дуг примыкают проводившиеся ранее исследования устойчивости цилиндрических плазменных сгустков, обжимаемых магнитным полем [11—14].

Основная цель настоящей работы — получение экспериментальных данных о динамике формы дуги в плотной воздушной атмосфере в наложенном квазиазимутальном магнитном поле и определение условий стабилизации или гашения разряда.

Схема измерений

Изучался протяженный электродуговой разряд с квазистационарными токами в воздушной среде атмосферного давления на графитовых электродах при наличии внешнего магнитного поля, обеспечиваемого МС, описанной в [2]. В отличие от [2], теперь число токоведущих стержней изменялось в пределах от 2 до 6 (см. рис. 1).

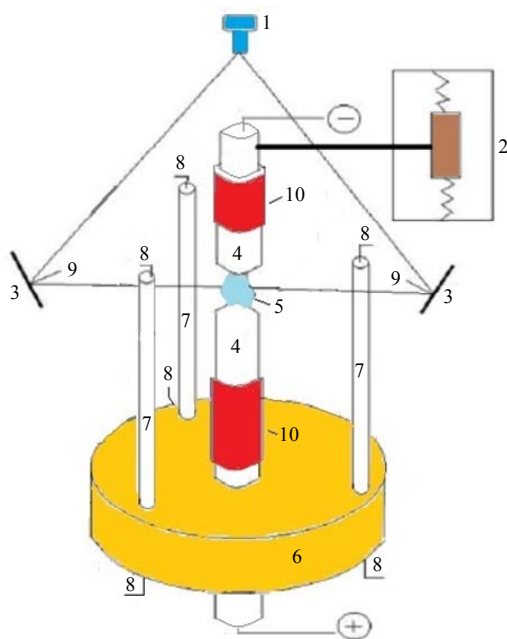


Рис. 1. Схема установки: 1 — видеочкамера, 2 — механизм раздвижки электродов, 3 — зеркала, 4 — электроды, 5 — дуга, 6 — изоляционная подставка, 7 — стержни в кварцевых трубках ($N = 2—6$), 8 — коммутационные шины, 9 — нормали к зеркальным поверхностям, 10 — крепежные зажимы-цанги.

Выбор для разряда графитовых электродов (с открытой пористостью, графит типа ЗОПГ) обусловлен, в частности, их высокой термоэрозивной стойкостью. Возможным механизмом устойчивости пористого электрода к термоударам и перегреву может быть выброс паров наполнителей электродных материалов из тела электрода [1, 15]. Это приводит к понижению в нем давления и температуры. Дополнительно свободное пространство пор таких электродов может выступать как демпфер термических напряжений.

Зажигание дуги 5 (см. рис. 1) обеспечивалось смыканием электродов 4 с последующим их раздвижением с помощью координатного устройства 2 до заданного межэлектродного расстояния l_m за время 0,2—0,3 с. Диаметр стержневых графитовых электродов — 16 мм. Продолжительность разрядных пусков составляла 1—3 с. Квазиазимутальное (тангенциальное) магнитное поле создается протекающими по медным стержням 7 внутри кварцевых трубок линейными токами.

Более подробная постановка задачи по проведению экспериментов и схема измерений изложены в [1]. Для получения представления о пространственной картине разряда проводилась высокоскоростная регистрация видеочкамерой 1 с применением системы зеркал 3, создающих возможность получения панорамных проекций дуги [16]. Наряду с видеорегистрацией изображений разряда синхронно проводилось осциллографирование разрядного тока I , тока I_m в МС и напряжения U на дуге.

Целью эксперимента было получение экспериментальных данных о влиянии силы и направления токов МС на изменение формы разряда, на его стабильность и на возможность производить гашение дуги.

Продолжение (развитие) экспериментов, описанных в [1—4], связано, в частности, с дополнительным применением более простой магнитной системы для изучения стабилизации протяжённого дугового разряда в свободной атмосфере. Изменение коснулось уменьшения числа токоведущих стержней МС с 6-ти до 3-х и приближению их к оси симметрии разрядного промежутка на расстояние в 20 % от прежнего размера этой конструкции. Трёхстержневая структура (см. рис. 1) МС создаёт несколько иную конфигурацию внешнего магнитного поля. В этой конфигурации число плоскостей, направленных от оси симметрии системы к её периферии, на которых напряжённость стабилизирующего магнитного поля равна нулю, уменьшается с 6-ти до 3-х. Это уменьшает объём

областей «пассивного» воздействия магнитного поля на разряд и способствует «активному» управлению разрядом («позитивному» при разной направленности невозмущенного тока дуги и токов в стержнях МС).

Была разработана также и альтернативная (дополнительная) схема питания магнитной системы. В качестве источника тока была применена батарея из сильноточных аккумуляторов, обеспечивающих ток до 3,5 кА при напряжении 12 В. Этот низковольтный источник мощности потребовал применения низкоомной ошиновки в цепях разряда с увеличенным поперечным сечением и отсутствием промежуточных болтовых соединений. Для регулировки тока в цепи магнитной системы был применён набор низкоомных балластных сопротивлений в диапазоне 10—30 мОм. Также была разработана специальная система управления с регулировкой момента включения внешнего магнитного поля. Для измерения тока в данной магнитной системе был применён холловский датчик тока типа ДТХ – 3000 с гальванической развязкой от шинпровода на 10 кВ, позволяющий регистрировать токовый сигнал до 3 кА в частотном диапазоне 0—100 кГц. Панорамная видеосъёмка разряда производилась со скоростью 1200 кадров в секунду камерой CASIO EX – F1 и системой зеркал аналогично экспериментам в [2—4].

Теоретические предпосылки устойчивости

К рассматриваемой в настоящей работе задаче о поддержании устойчивости дугового разряда с помощью МС в виде расположенных на его периферии линейных токов, создающих магнитное поле, обжимающее разряд (рис. 1), примыкает решенная ранее (в 50 годах прошлого века) задача об устойчивости плазменного цилиндра, помещенного в хорошо проводящий коаксиальный кожух (см., например, [11]). Там стабилизация разряда осуществляется магнитным полем, создаваемым наводимыми в кожухе вихревыми токами, противоположно направленными току разряда, ориентированному вдоль оси цилиндра.

Решалась в цилиндрической системе координат (r, φ, z) линейная задача устойчивости на основе модели идеальной магнитной гидродинамики, где r — радиус, φ — угол, z — осевая координата. Рассматривались малые возмущения, пропорциональные величине $\exp[i(m\varphi + kz - \omega t)]$, где t — время; m, k — волновые числа по угловому и осевому направлению, ω — частота. Рассмотрен случай длинных (по оси z) волн, т.е. $k = 0$. При отсутствии в фоновой плазме осевого магнитного

поля получено следующее условие устойчивости плазменного цилиндра:

$$m \left[1 + \frac{(b/a)^{2m} + 1}{(b/a)^{2m} - 1} \right] > 2 \quad (1)$$

где $b = R$, $a = r_d$ — радиусы кожуха и дугового столба соответственно.

Переходя в (1) к пределу при $m = 0$, получим условие устойчивости не для винтовых (трехмерных), а двумерных возмущений типа «змеек или перетяжек» ([11, 14])

$$\ln \left(\frac{b}{a} \right) < \frac{1}{2}. \quad (2)$$

В результате из (2) следует, что для устойчивости к указанным возмущениям должно выполняться условие

$$\frac{R}{r_d} < \sqrt{e} \approx 1,65. \quad (3)$$

В свободных дугах в воздушной атмосфере (при токах в несколько сотен ампер) величина r_d составляет несколько (3—5) мм. Если бы в наших экспериментах использовался для стабилизации разряда (относительно рассматриваемых возмущений) проводящий кожух, то согласно (3) он должен быть расположен достаточно близко к самому разрядному каналу. Такое техническое решение реализовать трудно из-за проблемы защиты кожуха от интенсивных тепловых потоков дуговой плазмы и необходимости обеспечить его электрическую изоляцию. В нашей же МС отношение радиусов (3) существенно (на порядок) выше, а положительный эффект достигается обеспечением должной конфигурации и величины внешнего магнитного поля.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Разработанная и примененная в экспериментах модернизированная сильноточная магнитная система для исследования дугового разряда в открытой атмосфере во внешнем магнитном поле позволила реализовать режимы стабильного горения вертикального дугового разряда в воздушной среде между цилиндрическими графитовыми электродами при токах до 500 А и межэлектродных зазорах до 60 мм и определить границы устойчивых режимов дуги (см. рис. 2). Эти границы определены на основе синхронной обработки и анализа осциллограмм и видеоизображений. Дополнительно проводился визуальный осмотр поверхностей электродов.

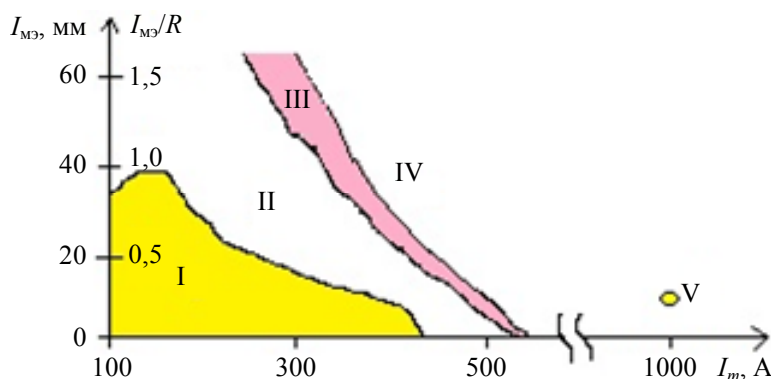


Рис. 2. Диаграмма влияния внешнего магнитного поля на режимы горения разряда: I — самогашение разряда, II — нестационарные дуги, III — переходная область, IV — квазистационарные дуги. С ростом тока (I_m) в магнитной системе до 1 кА и более наблюдается дестабилизация и быстрое гашение разряда (точка V); I_{mz} — межэлектродное расстояние, R — радиус стержневой МС; запитывание МС и разряда — последовательно, от одного источника; токи невозмущенного разряда и магнитной системы направлены противоположно; магнитный фактор $\delta_m = 1$ (I—IV); запитывание МС и разряда от независимых источников, $\delta_m = 4$ (V).

Здесь (на рис. 2) в областях I—IV электрическая цепь разряда и МС соединены последовательно, питаются от одной генераторной группы и их токи направлены противоположно. В указанном случае магнитный фактор $\delta_m = I_m/I = 1$. В области V магнитная система запитывалась от батареи аккумуляторов. В экспериментах, соответствующих диаграммной области I, наблюдалось достаточно быстрое самогашение разряда. Для зоны II характерно стабильное горение разряда, но зажигаемые дуги существенно нестационарны (их электрическое сопротивление может изменяться в разы). Имеется достаточно узкая переходная от неустойчивых дуг (II) к дугам устойчивым квазистационарным (IV) — область III. Область V наполнена пока всего несколькими экспериментальными данными.

Характерные режимы горения разряда приведены на рис. 3. Случаю реализации разряда внутри конструкции пассивной МС (без внешнего магнитного поля, что соответствует нулевому току $I_m = 0$) отвечает фрагмент 1 рис. 3. На осциллограммах тока и напряжения дуги можно выделить три временных интервала (ТI, ТII, ТIII), отвечающие следующим режимам: горение дуги при раздвижке электродов до заданного расстояния I_{mz} между ними (ТI); нестационарные дуги (ТII); квазистационарные дуги (ТIII), которые при увеличении длительности горения дуги могут потерять стабильность [1].

На осциллограммах (фрагмент 2) виден процесс стабилизации разряда при включении МС. Видеокадр стабилизированной дуги представлен на фрагменте 3. Фрагменты 4 и 5 этого же рисунка

показывают осциллограммы и видеокадр, характеризующие развал разряда за счет существенного увеличения длины изогнутого токового канала при сильном внешнем магнитном поле. Такой эффект не зависит от направления тока МС, так как обусловлен привязкой опорного анодного пятна на боковой цилиндрической поверхности электрода. В результате прианодный шнур дуги существенно отклоняется от осевого (вертикального) направления МС, что создает осевые составляющие магнитного поля. На стабилизацию таких (пусть и коротких) дуг созданная МС не рассчитана. Этот негативный эффект слаб при малых и умеренных токах в МС. При увеличении силы тока в стержнях МС суммарная сила, действующая на дугу, («положительная» на столб плюс «негативная» на анодный шнур) становится в целом «негативной».

Видно (см. фрагменты 2 и 3 на рис. 3), что устойчивое горение протяжённого дугового разряда во внешнем магнитном поле обеспечивает стабилизацию положения катодной струи, которая в этом режиме практически полностью занимает весь разрядный промежуток. Фрагмент 3 на рис. 3 похож на классическую картину атмосферной дуги на угольных электродах [17, 18].

Отметим, что при стабилизации горения протяжённой электрической дуги существенно снижается её сопротивление и увеличивается ток, который может достигать 80 % от величины тока короткого замыкания при иницировании дуги. При стабилизации дуги существенно изменяется её акустическое поле, а именно, исчезает резкий звук (шипение или вой) и регистрируется только мягкий звук, похожий на шелест листьев.

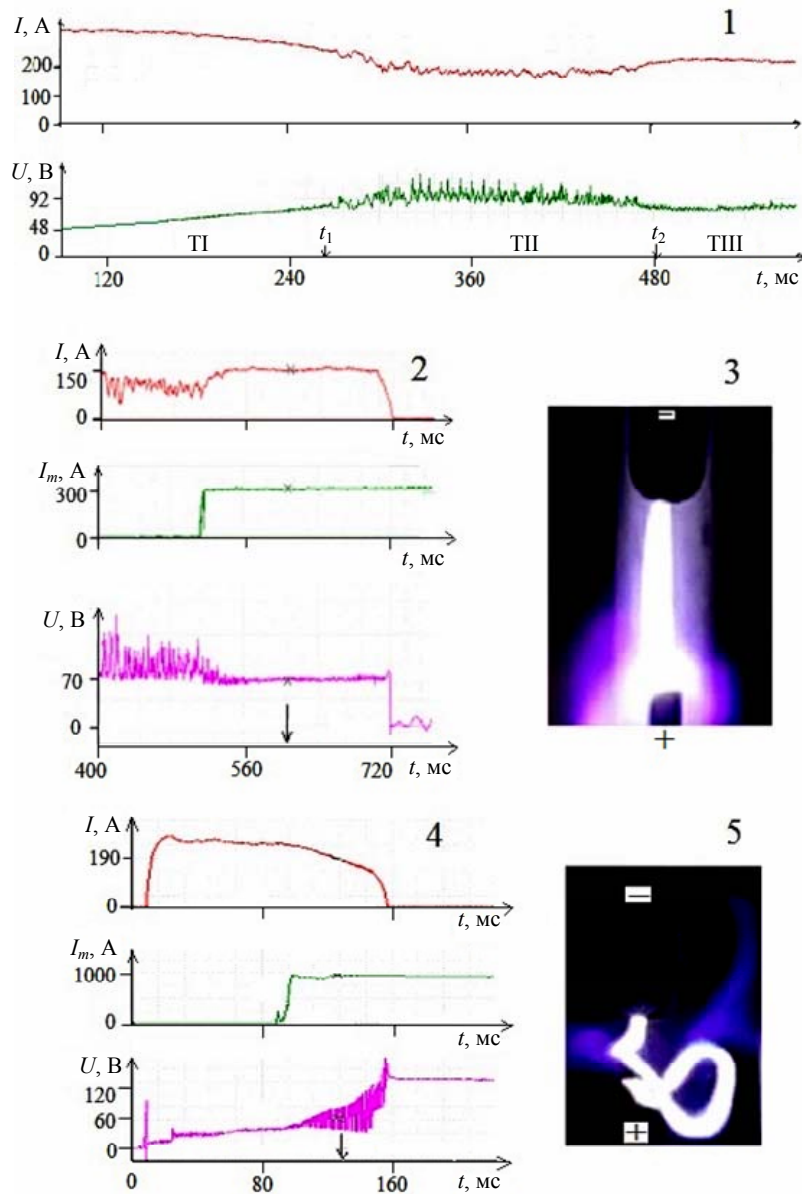


Рис. 3. Режимы горения разряда при наложении внешнего (квазиазимутального) магнитного поля: 1 — типичные режимы горения разряда без внешнего поля (ток МС $I_m = 0$); I — ток, U — напряжение дуги; T_I — зона раздвижки электродов, T_{II} — переходные процессы в дуге, T_{III} — квазистационарные дуги; $N = 6$ — число стержней клетки; 2 — осциллограммы и 3 — видеокадр при $t = t_*$ стабилизированного внешним магнитным полем разряда ($N = 3$, $\delta_m = 2$); 4 — осциллограммы и 5 — видеокадр при $t = t_*$ дестабилизированного сильным внешним магнитным полем разряда ($N = 3$, $I_m = 1,2$ кА; $\delta_m = 5$).

Заключение

В работе проведено экспериментальное исследование воздействия внешнего азимутального магнитного поля на устойчивость протяженного электродугового разряда между стержневыми графитовыми электродами в открытой воздушной атмосфере. Показано, что границы его устойчивости существенно зависят от величины и направления токов разряда и магнитной системы и межэлектродного расстояния. Экспериментально получена оценка диапазона токов магнитной системы, обеспечивающих стабилизацию дуги: $1 < I_m/I < 3$. В проведенной серии экспериментов с независи-

мым запитыванием разряда и магнитов показано, что при малых межэлектродных расстояниях (10—20 мм) применение сильных магнитных полей (создаваемых контурными токами магнитной системы, превосходящими ток разряда в 3—5 раз) не приводит к стабилизации дуги, а вызывает быстрое её гашение независимо от направления токов в магнитной системе.

Работа выполнена в Институте механики МГУ при частичной поддержке гранта РФФИ № 14-01-00399.

ЛИТЕРАТУРА

1. Герман В. О., Глинов А. П., Головин А. П., Козлов П. В., Любимов Г. А. // Прикладная физика. 2012. № 6. С. 108.
2. Герман В. О., Глинов А. П., Головин А. П., Козлов П. В. // Прикладная физика. 2014. № 4. С. 35.
3. Герман В. О., Глинов А. П., Головин А. П., Козлов П. В. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 5. С. 498.
4. Герман В. О., Глинов А. П., Головин А. П., Козлов П. В. // Прикладная физика. 2015. № 5. С. 33.
5. Жуков М. Ф., Урюков Б. А., Энгельшт В. С. и др. Теория термической электродуговой плазмы. Т. 1, 2. — 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. Ладиков-Роев Ю. П., Черемных О. К. Математические модели сплошных сред. — Киев: Наукова Думка, 2010.
12. Шафранов В. Д. // Физика плазмы и проблемы управляемых термоядерных реакций. — М.: Изд-во АН СССР, 1958. Т. 4. С. 61.
13. Крускал М., Шварцшильд М. // Проблемы современной физики. 1956. № 2. С. 108. (М.: Изд-во иностр. лит.).
14. Кролл Н., Трайвеллис А. Основы физики плазмы. — М.: Мир, 1975.
15. Герман В. О., Глинов А. П., Головин А. П., Козлов П. В., Любимов Г. А. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 4. С. 459.
16. Копыл П. В. / Труды X конференции-конкурса молодых ученых НИИ механики МГУ, 11—14 октября 2009 г. С. 195.
17. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. — М.: Наука, 1987.
18. Финкельбург В., Меккер Г. Электрические дуги и термическая плазма. — М.: ИЛ, 1961.

Stabilisation of an electric arc in the external azimuthal magnetic field

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

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

Received September 26, 2016

Consideration is given to the experimental research of influence of an external quasi-azimuthal magnetic field on stability of the electric arc between rod graphite electrodes in open air atmosphere. It is shown that borders of stability essentially depend on the value and direction of currents of the discharge and magnetic system, inter-electrode distance and number of linear currents. In the spent experiments with an independent food of the discharge and magnets, it is shown that at small inter-electrode distances (10—20 mm) application of strong magnetic fields (created by the contour currents surpassing a current of the category in 3—5 times) does not lead to arc stabilization, and causes its fast clearing irrespective of a direction of currents in magnetic system.

PACS: 52.80.Mg

Keywords: electric arc, high-speed video registration, magnetic field, oscillograms, stabilisation and clearing of electric arc.

REFERENCES

1. V. O. German, A. P. Glinov, A. P. Golovin, P. V. Kozlov, and G. A. Lyubimov, Prikl. Fiz., No. 6, 108 (2012).
2. V. O. German, A. P. Glinov, A. P. Golovin, and P. V. Kozlov, Prikl. Fiz., No. 4, 35 (2014).
3. V. O. German, A. P. Glinov, A. P. Golovin, and P. V. Kozlov, Usp. Prikl. Fiz. **2**, 498 (2014).
4. V. O. German, A. P. Glinov, A. P. Golovin, and P. V. Kozlov, Prikl. Fiz., No. 5, 33 (2015).
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, Doklady Akademii Nauk 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, *Prikl. Fiz.*, No. 1, 29 (2006).
11. J. P. Ladikov-Roev and O. K. Cheremnyh, *Mathematical Models of Continuous Environments* (Kiev, Naukova Dumka, 2010) [in Russian].
12. V. D. Shafranof, *Physics of Plasma and a Problem of Operated Thermonuclear Reactions*. (Moscow, Publishing House AS of the USSR, 1958. V. 4. P. 61) [in Russian].
13. M. Kruskal, and M. Shvartshild, *Problems of Modern Physics*. (Moscow, Publishing House Inostrannaya Literatura, 1956. No. 2. P. 108) [in Russian].
14. Nicholas A. Krall and Alvin W. Trivelpiece. *Principles of Plasma Physics*. (N.Y.: McGRAW-HILL, 1973).
15. V. O. German, A. P. Glinov, A. P. Golovin, P. V. Kozlov, G. A. Lyubimov, *Usp. Prikl. Fiz.* **1**, 459 (2013).
16. P. V. Kopyl, in *Proc. X Conf. Young Scientists* (MGU, Inst. Mechan. October 11–14, 2009). P. 195.
17. Yu. P. Raizer, *Physics of Gas Discharge* (Nauka, Moscow, 1987) [in Russian].
18. W. Finkelburg and H. Maecker, *Electrische Bo''gen und Thermishes Plasma* (Handbuch der Physik, Bd. XXII, S. 254–444, 1956).