

УДК 533.6.011:533.9:537.52

Изучение воздействия внешнего магнитного поля на устойчивость электродугового разряда

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

Проведено исследование способов стабилизации и дестабилизации разряда, связанных с наложением внешнего магнитного поля посредством системы линейных токов, включенных последовательно с разрядом. 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. Определены статистические плотности распределения состояний разряда по мощности.

PACS: 52.80.Mg

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

Введение

Экспериментальные исследования влияния внешнего, обычно аксиального, магнитного поля часто проводятся для анализа возможности стабилизации одиночных дуговых разрядов, в частности, в плазмотронах [1, 2]. Теоретически влияние внешнего аксиального магнитного поля проводилось в [3] при исследовании винтовой неустойчивости электрической дуги. Важность анализа 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 дуг разной длины (от 5 см до 2 м) при наличии поперечного внешнего магнитного поля, параллельного собственному магнитному полю разряда, проведено в [7].

В отличие от исследуемой в настоящей статье магнитной системы линейные витки подмагничивания [7] включались параллельно разряду. В результате влияние магнитного поля в [7] было пренебрежимо мало: $I_m = I / N$, где I_m , I — токи в витках и дуге, N — число витков.

В настоящей работе на основе системы линейных токов, включенных последовательно с

разрядом, изготовлена и отлажена магнитная система для создания внешнего магнитного поля, ориентированного либо по направлению магнитного поля, порождаемого собственным током изначально невозмущенного столба дуги, либо против него. В результате $I_m = I$, так как разряд и магнит 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 данных о динамике формы дуги в плотной воздушной атмосфере в наложенном магнитном поле при токах до 400 А и межэлектродных промежутках до 5 см.

В результате проведенных исследований изучено влияние внешнего магнитного поля на движение дугового столба, размеры и скорости перемещения его опорных пятен и динамику струй из них. Изучены статистические плотности распределения состояний разряда по его мощности в зависимости от конфигурации наложенного магнитного поля.

Постановка задачи и схема измерений

Обычно при исследовании газо- и электродинамических быстропротекающих и сугубо нестационарных процессов используется их фото- или видео регистрация с записью на осциллограф зависимостей разрядного тока и напряжения от времени. Это позволяет не только получить картину процесса в целом, но и сравнить между собой отдельные, разнесенные во времени, его участки, проанализировать эти участки картины разряда совместно с другими параметрами, которые синхронно фиксируются в эксперименте [8].

Герман Валентин Остапович, вед. научный сотрудник.

Глинов Александр Петрович, вед. научный сотрудник.

Головин Александр Петрович, ст. научный сотрудник.

Козлов Павел Владимирович, научный сотрудник.

Россия, 119192, г. Москва, Мичуринский пр-т, 1.

Тел. +7 (495) 939-15-28.

E-mail: krestytroitsk@mail.ru

Статья поступила в редакцию 27 августа 2014 г.

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

Особенно такой подход становится актуальным при больших токовых нагрузках (0,1—2 кА) и межэлектродных расстояниях (~30—70 мм), когда разряд имеет мощное сугубо неравномерное по его объему излучение различных зон промежутка.

В настоящей работе основной акцент сделан на уточнении и дополнении экспериментальных исследований [8] протяженного электрического дугового разряда, ориентированного преимущественно вертикально (анод внизу), с квазистационарными токами до 400 А в воздушной среде атмосферного давления на графитовых электродах при наличии внешнего магнитного поля.

Использовавшиеся в экспериментах графитовые электроды имели открытую пористость и представляли собой промышленно изготовленные цилиндрические стержни $\varnothing 16 \times 100$ мм. Специально проведенный с помощью электронного микроскопа анализ показал, что их исходная микроструктура неоднородна и содержит зерна диаметром 1—10 мкм [8].

Детальная постановка задачи по проведению экспериментов и схема измерений подробно изложены в [8]. Поэтому отметим только ее ключевые моменты и особенности исследований данной работы.

Общая схема проведения высокоскоростной регистрации видеоизображений разряда при разных скоростях и выдержках представлена на (рис. 1).

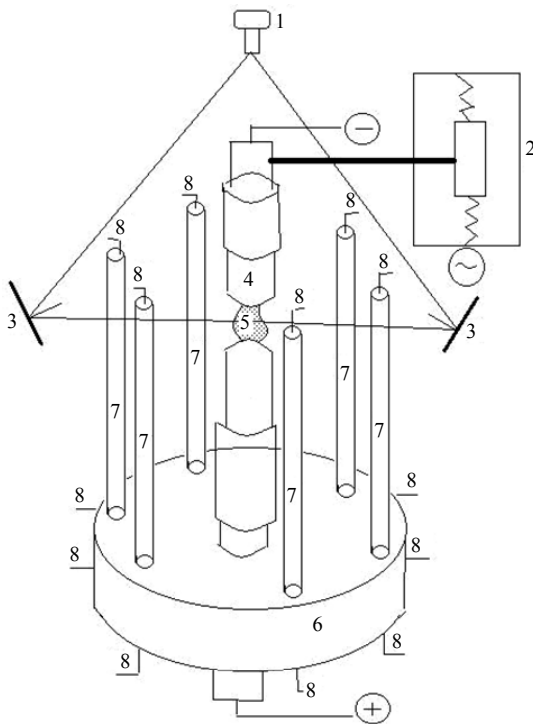


Рис. 1. Схема установки:

- 1 — видеокамера, 2 — механизм раздвижки электродов,
3 — зеркала, 4 — электроды, 5 — дуга, 6 — изоляционная подставка, 7 — стержни в кварцевых трубках,
8 — коммутирующие шины

Диаметр стержневых графитовых электродов (4) — 16 мм, длина разрядного промежутка $l_{мэ}$ — от 3 до 5 см. Инициация разряда осуществлялась смыканием электродов с последующим их раздвижением с помощью механизма раздвижки (2) до выбранного межэлектродного расстояния $l_{мэ}$ за время 0,1—0,2 с. Продолжительность пусков 1—3 с.

Зеркала (3) справа и слева предназначены для получения в кадрах видеокамеры (1) трех проекций изображения разряда, что дает представление о пространственной картине дуги (5).

Токоведущие шины от блока генераторов через 4 сварочных реостата и измерительные шунты расположены далеко (~ 1,5 м) от зоны разряда. К клеммам электродов «+» и «-» шины подведены гибкими петлями (длиной ~ 2 м). Коммутирующие шины (8) обеспечивают последовательное включение витков подмагничивания (7) и дуги в общую цепь. Изоляционная подставка (6) служит тепловым и электрическим экраном от воздействия катодной струи и прианодной области разрядного шнура.

Анод — удлиненный медный стержень, на котором смонтирована державка-основание «клетки», создающей локальные магнитные поля вокруг «осевой линии анод-катод». В качестве изоляции использованы диски из стеклотекстолита. Элементы магнитной системы (стержни, токоподводы, упорно-опорные шайбы — медь или латунь; гайки и стяжные винты — железо) значительно (на 60—70 мм) заходят за зону существования разряда. Кварцевые трубки свободно надеты на медные стержни магнитной системы. Они используются для тепловой и электрической изоляции этих линейных проводников.

Начальный разрядный канал и витки подмагничивания находятся достаточно далеко друг от друга ($R \sim 5$ см) по сравнению с их поперечными размерами ($r \sim 2—3$ мм). Поэтому индукция магнитного поля (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}_θ — единичный вектор, направленный по углу θ в локальной цилиндрической системе координат z, ρ, θ , связанной с конкретной нитью тока; ρ — расстояние от оси z ; $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная (система СИ).

Полагая в качестве параметра ρ 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 $1/\rho$. Более сложные расчеты магнитной системы, образуемой $N+1$ токами разряда и линейными токами, создающими наложенное магнитное поле, показывают, что этот спад происходит еще быстрее, причем с ростом числа токов интенсивность спада увеличивается.

Перед представлением экспериментальных данных оценим теоретически влияние конфигурации внешнего магнитного поля на стабильность разряда. В нулевом приближении стабильный токовый шнур, опирающийся через опорное пятно на расположенные соответственно сверху и снизу катод и анод, находится в центре рассматриваемой системы токов.

Рассмотрим возмущение разрядного шнура в виде его смещения от центральной оси системы в радиальном направлении (в сторону одного из линейных витков подмагничивания) на расстояние δR . Опорными пятнами этот шнур привязан к электродам, так что основное смещение в виде U-образной петли приходится в межэлектродном пространстве. Подобно движению плазменного поршня в канале рельсотрона эта петля будет ускоряться силой электродинамического ускорения $F_{\text{эду}} = L'I^2/2$, где I — разрядный ток, L' — погонная индуктивность [10] воображаемого рельсотрона, канал которого образован двумя направляющими рельсами $z = \pm d/2$ ($d \leq l_{\text{мэ}}$). Это ускорение будет ограничиваться 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, т. е. $F_A \ll F_{\text{эду}}$. Дальнейшее развитие возмущения будет определяться управляющей пондеромоторной силой $F_{\text{упр}}$, обусловленной взаимодействием (в нулевом приближении) 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 смещения шнура δR 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 ($I_m \cdot I < 0$). При спутном направлении указанных токов ($I_m \cdot I > 0$) управляющая сила оказывает только дестабилизирующее воздействие на разряд, а именно 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 удобно ввести 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.

Картина взаимодействия внешнего магнитного поля с собственным магнитным полем дугового столба при его подходе к виткам подмагничивания представлена на рис. 2.

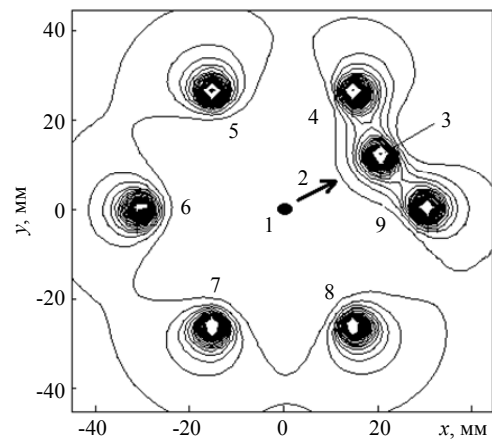


Рис. 2. Расчетная картина магнитных полей (давлений $p_m = B^2/2\mu_0 = \text{const}$) в поперечном сечении $z = 0$: дуга смещена к виткам, $\delta_{\text{маг}} = -1$

1 — невозмущенная дуга, 2 — условное направление её перемещения, 3 — переместившаяся дуга, 4—9 — линейные витки подмагничивания; $R = 3$ см, $I = 200$ А

Видно, что при магнитном факторе $\delta_{\text{маг}} = -1$, соответствующем, согласно теоретическим оценкам, стабилизирующей магнитной системе, расчетное магнитное поле препятствует прохождению дугой магнитного барьера ($r \sim R$). Расчеты показывают, что, когда $\delta_{\text{маг}} = +1$, внешнее магнитное поле не препятствует отклонению дугового столба от

его начального положения ($r = 0$). Отметим, что влияние на дугу магнитной системы значимо только при её приближении к виткам подмагничивания. Для более сильной стабилизации дуги потребуются либо более сильные, либо более близко расположенные к дуге магнитные поля. Но при таком подходе возможны некоторые технические проблемы, как с защитой магнитной системы от дуговой плазмы, так и с раздельным от самого разряда электропитанием от более мощного источника тока.

Применение независимого электропитания для витков подмагничивания позволит в дальнейшем управлять величиной тока витков подмагничивания, а, следовательно, и величиной управляющей силы $F_{упр}$. В результате магнитный фактор перестанет быть дискретным и станет непрерывным параметром, принимающим достаточно произвольные значения, определяемые мощностью источника тока.

Экспериментальные результаты

Питание установки осуществлялось от генераторов 9—10 ГП. Было 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 5 экспериментов при времени экспозиции одного кадра $\tau_{экс} = 1$ мкс и скорости видеорегистрации $f_{рег} = 12000$ или 24000 к/с и 3 эксперимента при $\tau_{экс} = 25$ мкс, $f_{рег} = 1200$ к/с.

Разряд без внешнего магнитного поля. При раздвижке электродов от их короткого замыкания (КЗ) до стационарного межэлектродного зазора $l_{мэ}$ ($I_m = 0$) наблюдалась обычная стабильная картина разряда [8]. Некоторое время она еще сохраняется, но к концу эксперимента переходит в нестационарную форму. Электродные струи-факелы, как от анода, так и от катода мечутся во всем разрядном пространстве; наблюдаются шунтирующие пробои, анодное пятно хаотично перемещается не только по полусферической контактной поверхности электрода, но и заходит на его цилиндрическую часть. От катода исходит более или менее устойчивая расширяющаяся струя, форма которой похожа на «лисий хвост». С течением времени колебания напряжения на межэлектродном промежутке ΔU и тока разряда I на осциллограммах усиливаются, и наступает обрыв тока. При наблю-

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

Наложение на разряд внешнего магнитного поля (токи в разряде и в стержнях клетки — в противоположных направлениях). Поведение разряда более стабильное. Формируются протяженные струи («лисий хвосты») от анода. По разрядной поверхности анода опорные пятна этих струй движутся упорядоченно (рис. 3, $\delta_{маг} = -1$). Причем движение анодного пятна обжатой внешним магнитным полем дуги преимущественно круговое по торцевой окружности электрода. Осциллограммы ΔU и I (общие) более стабильные. По сравнению с нестабилизированной магнитным полем дугой ($\delta_{маг} = 0$) диаметр анодного пятна и скорость его перемещения уменьшаются примерно в 2 раза.

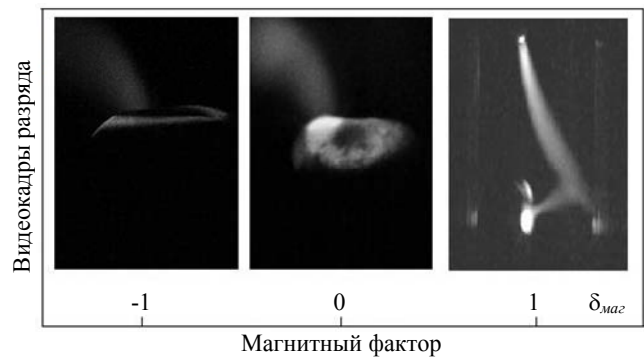


Рис. 3. Картина разряда при различных значениях магнитного фактора $\delta_{маг} = I_m / I$: частота видеосъемки $f_{рег} = 1200$ (1), 24000 к/с (2, 3); время экспозиции $\delta t_{экс} = 25$ (1), 1 мкс (2, 3)

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) не только точечно, но и по достаточно протяженной вдоль стержня поверхности. Это, в конечном счете, приводит к разрыву разрядной цепи (рис. 3, $\delta_{маг} = 1$ ($\delta_{маг} = 0$)).

Результаты статистического анализа состояний квазистационарного разряда в зависимости его мощности $W = IU$, где U — падение напряжения на дуге, при различной конфигурации магнитного поля представлены на рис. 4. Здесь даны гистограммы плотности распределения N_w состояний дуги по мощности.

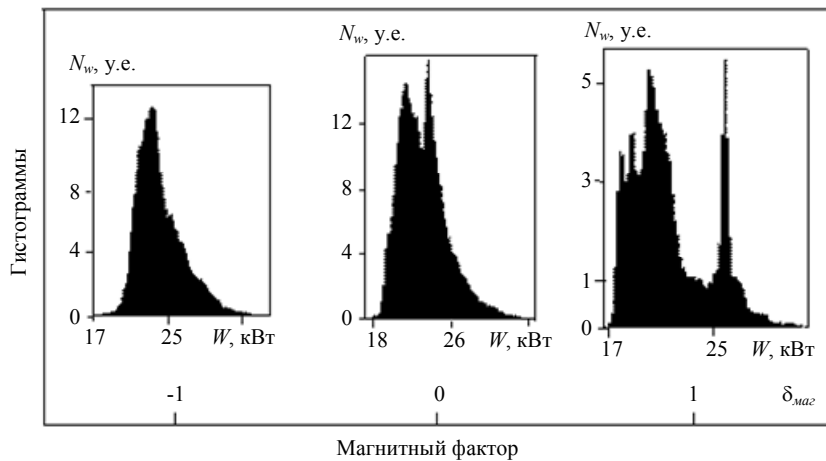


Рис. 4. Зависимость распределения числа состояний разряда N_w по его мощности $W = IU$ от магнитного фактора $\delta_{\text{маг}}$

Таким образом, в первом приближении можно констатировать, что при отсутствии внешнего магнитного поля ($\delta_{\text{маг}} = 0$) наиболее вероятно существование двух режимов разряда при мощностях ~ 22 и 24 кВт. Наложение стабилизирующего ($\delta_{\text{маг}} = -1$) «углового» магнитного поля в зоне магнитного барьера ($r \sim R$), направленного против магнитного поля невозмущенной дуги, приводит к тому, что зависимость $N_w(W)$ имеет только один максимум при $W \approx 24$ кВт. Таким образом, в результате магнитной стабилизации наиболее вероятным становится наиболее мощный разряд из двух существующих без внешнего магнитного поля состояний дуги.

При наложении на дугу дестабилизирующего внешнего магнитного поля ($\delta_{\text{маг}} = +1$) у функции распределения $N_w(W)$ возникает уже четыре локальных максимума. Это говорит о том, что воз-

можно существование нескольких квазистабильных (наиболее вероятных) состояний разряда.

Отметим, что при наложении стабилизирующего магнитного поля наблюдаются следующие факты (см. рис. 5):

1. Прекращается хаотическое перемещение анодного пятна по поверхности электрода, и анодная струя (в течение длительных промежутков ~ 10 — 20 мс) устанавливается строго по центральной оси между электродам

2. Катодная струя, которая в обычных условиях очень стабильна и доминирует в разрядном промежутке, при этом деградирует и даже может поглощаться анодным потоком

3. Стабилизация анодной струи приводит также к заметному увеличению тока разряда и соответствующему падению напряжения на нем.

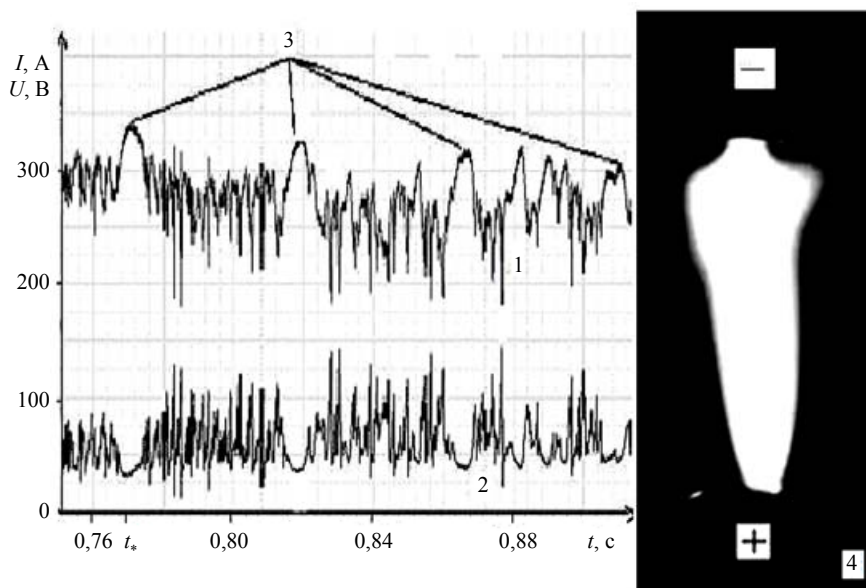


Рис. 5. Магнитная стабилизация анодной струи вертикального разряда:

1 — осциллограмма тока (I), 2 — зависимость напряжения (U) на межэлектродном промежутке от времени (t), 3 — пики тока, 4 — видеокادر разряда при $t = t^*$, $\delta_{\text{маг}} = -1$

Таким образом, обнаружено, что стабилизирующее влияние внешнего магнитного поля приводит к качественно новому состоянию анодного потока в разряде, а именно: катодная струя, которая в обычных условиях очень стабильна и доминирует в разрядном промежутке, при этом деградирует и даже может поглощаться анодным потоком. Можно сказать, что анодный и катодный потоки могут меняться ролями для разряда во внешнем стабилизирующем магнитном поле. Стабилизация анодной струи приводит также к заметному увеличению тока разряда на 10—25 % и соответствующему падению напряжения на нем, что может быть связано с изменением протекания тока в приэлектродных зонах.

Заключение

Создана стендовая установка для исследования способов стабилизации и дестабилизации разряда, связанных с наложением внешнего магнитного поля на основе системы линейных токов, включенных последовательно с разрядом. Внешнее магнитное поле в ней может быть направлено либо по направлению магнитного поля, порождаемого собственным током изначально невозмущенного столба дуги, либо против него.

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.

В частности, приведены примеры, как стабилизирующего, так и дестабилизирующего воздействия внешнего магнитного поля на разряд в зависимости от его конфигурации. Получены статистические функции распределения электрического сопротивления и мощности дуги различных режимов воздействия магнитного поля на разряд. Их анализ показал стабилизирующее воздействие на разряд обжимающего его внешнего магнитного поля и дестабилизирующее (вплоть до гашения) — при растягивающем воздействии наложенного поля.

Получены первые данные о влиянии конфигурации и величины внешнего магнитного поля на

движение и форму дугового столба, размеры и скорости перемещения его опорных пятен.

Показано, что при наложении стабилизирующего магнитного поля:

- возможно прекращение хаотического перемещения анодного пятна по поверхности электрода, и анодная струя (в течение длительных промежутков ~ 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 деградирует и даже может поглощаться анодным потоком;

- стабилизация анодной струи приводит также к заметному увеличению тока разряда и соответствующему падению напряжения на разряде.

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.
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
7. Vauchire J. M., Hong D., Riquel H. / 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. и др. // 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.

Studying of an exterior magnetic field action on stability of an electric arc

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 August 27, 2014

Examination of expedients of the discharge stabilisation and destabilization, related to superimposition of an exterior magnetic field due to system of the linear currents included consistently with the discharge is conducted. 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. Statistical density functions of the discharge states versus power are studied.

PACS: 52.80.Mg

Keywords: an electrical arc, velocity video shooting, a magnetic field, basic spots, electrode streams, oscillograms, velocity, statistics, stabilisation.

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].