

Math-Net.Ru

All Russian mathematical portal

P. S. Gura, V. I. Sysun, Yu. D. Khromoi, Motion
of the channel of a pulsed high-current vacuum
discharge in a magnetic-field,
TVT, 1984, Volume 22, Issue 2, 248–253

<https://www.mathnet.ru/eng/tvt5644>

Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that
you have read and agreed to these terms of use
<https://www.mathnet.ru/eng/agreement>

Download details:

IP: 18.97.9.171

May 22, 2025, 14:07:47



УДК 537.523

**ДВИЖЕНИЕ КАНАЛА ИМПУЛЬСНОГО СИЛЬНОТОЧНОГО
ВАКУУМНОГО РАЗРЯДА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ***Гура П. С., Сысун В. И., Хромой Ю. Д.*

Экспериментально исследован импульсный вакуумный разряд между плоскими электродами в магнитном поле. Определены траектория и скорость движения разрядного канала в диапазонах тока 0,1–2,5 кА и магнитного поля 0,01–0,5 Т. Экспериментальные данные аппроксимированы аналитической зависимостью.

Исследования движения разрядного канала в магнитном поле в первую очередь вызваны необходимостью снижения эрозии электродов коммутирующих приборов при протекании больших токов [1–3]. Для этого необходимо заставить разрядный канал перемещаться по определенной фиксированной траектории по поверхности электродов. В [4, 5] показано, что под действием составляющей магнитного поля, направленной вдоль оси коаксиальных электродов, канал газового разряда вращается в плоскости, перпендикулярной оси. Стабилизация разряда в заданной зоне достигается использованием немагнитной вставки цилиндрической формы в магнитном экране соленоида. Немагнитная вставка в соленоиде также использовалась в [6, 7] для фиксации катодного пятна ртутного разряда в определенной зоне плоской катодной поверхности. В [8, 9] исследовалось движение катодного пятна вакуумной дуги в магнитном поле, создаваемом проводником с током, установленным со стороны нерабочей поверхности катода. Во всех случаях катодное пятно двигалось вдоль проводника с током. Анализ конфигурации магнитного поля в рассмотренных выше работах показывает, что перемещение разрядного канала происходит под действием составляющей магнитного поля, перпендикулярной электрическому полю разрядного промежутка, траектория же этого движения стабилизируется в максимуме составляющей магнитного поля, параллельной электрическому полю.

Отметим, что использование соленоидов с сердечниками и немагнитными вставками в импульсных приборах затруднено вследствие конечного времени диффузии и изменения магнитного поля, а также вследствие громоздкости и энергоемкости приборов.

В ряде работ фиксация траектории движения дуги достигалась применением электродов с малым поперечным размером рабочей поверхности: кольцевые электроды [10, 11], чашеобразные электроды [12] и рельсотронная конструкция [13]. Однако это приводит к интенсивной эрозии электродов в сильноточных разрядах.

Большое значение для коммутирующих приборов имеет скорость перемещения разрядного канала, с увеличением которой уменьшается эрозия электродов, но одновременно возрастает падение напряжения и выделение мощности в разрядном промежутке. Измерения скорости перемещения разрядного канала в [4, 5, 7, 11, 12, 14, 15] показали, что она растет с ростом разрядного тока и напряженности магнитного поля, однако значение этой скорости и характер ее зависимости от тока и магнитного поля весьма различны для различных уровней тока, давления среды, межэлектродного расстояния и других факторов. При токах порядка килоампер канал разряда движется в направлении силы Ампера, при токах до сотен ампер — в противоположную сторону. Данные по вакуумному разряду имеются только в [12] для электродов с тонкой рабочей кромкой при существенном расплавлении мест привяжки дуги.

Таким образом, очевидна необходимость специальных исследований условий фиксации траектории движения канала разряда и скорости этого движения в импульсном вакуумном разряде применительно к коммутирующим приборам.

На рис. 1 показана конструкция макета, в котором выполнялись исследования. Разряд возбуждался между плоскими электродами диаметром 210 мм, межэлектродное расстояние составляло 10 мм. Использовались анод из молибдена вакуумной плавки толщиной 2,5 мм и сменные катоды из молибдена и меди вакуумной плавки толщиной 2 мм. Коаксиальная система токоподвода к электродам исключала влияние создаваемого ими магнитного поля. Разряд инициировался пробоем по торцу керамической

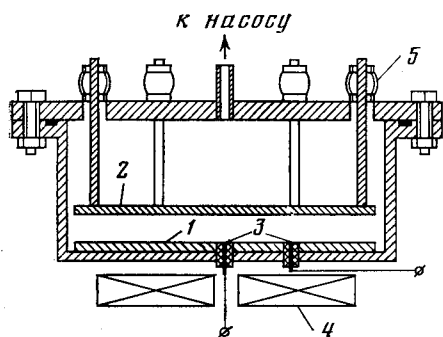


Рис. 1

Рис. 1. Экспериментальный макет: 1 — катод, 2 — анод; 3 — вспомогательные электроды, 4 — магнитная катушка, 5 — изолированные вводы

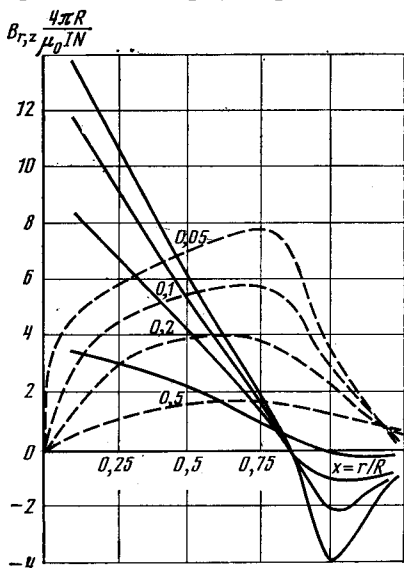


Рис. 2

Рис. 2. Распределение составляющих магнитного поля плоской катушки: сплошные кривые — аксиальная составляющая B_z , штриховые кривые — радиальная составляющая B_r . Цифры у кривых — величина z/R_0

трубки между вспомогательным проволочным электродом и катодом. Под катодом для формирования магнитного поля располагалась плоская спиральная катушка диаметром 160 мм с отпайкой на диаметре 90 мм. Плоская спиральная катушка обеспечивала получение наибольшего отношения радиальной составляющей магнитного поля к осевой у поверхности катода, что позволяло снизить ее индуктивность и тем самым способствовать достижению высокой скорости нарастания тока и поля. Электроды перед сборкой подвергались травлению, обезжириванию и сушке. Исследования выполнялись при непрерывной откачке паромасляным насосом с вымораживанием паров масла. Давление остаточных газов в объеме не превышало $(1-3) \cdot 10^{-3}$ Па. Электрическая схема содержала два линейных модулятора: один для питания разрядной цепи, второй — для магнитной катушки. Ток регулировался изменением напряжения заряда формирующих линий в пределах 150–2500 А. Длительность импульса разрядной цепи составляла 1,3 мс, магнитной катушки — 3 мс. Импульс тока в магнитной катушке опережал разрядный импульс на 0,5–0,6 мс, что больше времени проникновения магнитного поля через катод.

Регистрация траектории движения канала, скорости его дрейфа и ширины зоны фиксации выполнялась методом автографов. Исследования проводились в следующей последовательности. Предварительно электроды обезжиривались и очищались несколькими десятками импульсов тока с амплитудой до 5 кА. Затем в разрядный промежуток напускался водород

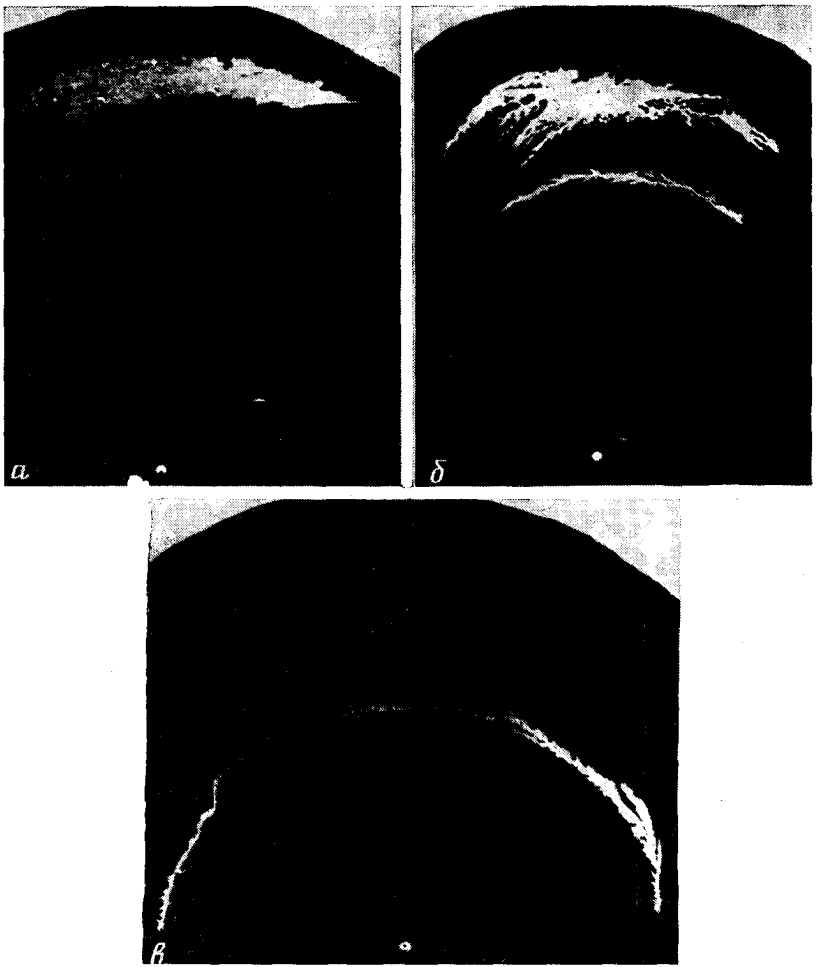


Рис. 3. Фотографии эрозионных следов на катоде: а - $I=500$ А; $B_r=$
 $=0,24$ Т; б - 300; 0,36; в - 150; 0,36

или аргон и возбуждался тлеющий разряд, после которого поверхность электрода не содержала следов предразрядных импульсов. После этого коммутировался одиночный импульс тока и визуально анализировалась катодная поверхность. Далее порядок проведения экспериментов повторялся. Средняя скорость дрейфа катодных пятен определялась по величине их перемещения за импульс, деленной на длительность импульса. Вследствие неоднородности магнитного поля по радиусу и высоте газоразрядного промежутка проводился численный расчет радиальной и осевой составляющих магнитного поля [16]

$$B_r = -\partial A / \partial z, \quad B_z = \partial A / \partial r + A / r, \quad (1)$$

где

$$A(r, z) = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_0 I y_i}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\cos \varphi d\varphi}{\sqrt{z_0^2 + x^2 + y_i^2 - 2xy_i \cos \varphi}} \quad (2)$$

векторный потенциал магнитного поля.

Здесь I , N — ток и число витков в катушке; $y_i = r_i/R$, $x = r/R$, $z_0 = z/R$; R — внешний радиус катушки; r_i — радиус i -го витка; r, z — координаты точки, где определяется магнитное поле; начало координат расположено в центре плоской катушки.

Заменяя суммирование в (2) интегрированием и подставляя (2) в (1),

получим

$$B_r(r, z) = \frac{\mu_0 I N}{2\pi R} z I_1, \quad B_z(r, z) = \frac{\mu_0 I N}{2\pi R} \left(-x I_1 + \frac{1}{x} I_2 + I_3 \right), \quad (3)$$

где

$$I_1 = \int_0^1 y dy \int_0^\pi \frac{\cos \varphi d\varphi}{(z_0^2 + x^2 + y^2 - 2xy \cos \varphi)^{3/2}},$$

$$I_2 = \int_0^1 y dy \int_0^\pi \frac{\cos \varphi d\varphi}{(z_0^2 + y^2 + x^2 - 2xy \cos \varphi)^{1/2}},$$

$$I_3 = \int_0^1 y^2 dy \int_0^\pi \frac{\cos^2 \varphi d\varphi}{(z_0^2 + x^2 + y^2 - 2xy \cos \varphi)^{3/2}}.$$

Численное решение уравнений (3) графически изображено на рис. 2. Видно, что осевая составляющая магнитного поля имеет два противоположно направленных максимума, один в центре катушки, другой на ее внешней границе. Радиальная составляющая поля такой катушки значительна и на периферии превышает осевую составляющую. Реальное значение $z_0 = z/r$ у поверхности катода равно 0,15, при уменьшенной катушке — 0,25.

При иницировании разряда в центре медного катода канал разряда медленно вращался, оставаясь в центральной части промежутка. Это объясняется высоким значением в этой части осевой и малым значением радиальной составляющих магнитного поля. Вызвать перемещение канала в область большего значения радиальной составляющей, обусловливающей его движение по определенной замкнутой круговой траектории, удастся в двух случаях: при несимметричном (боковом) иницировании разряда и при использовании центральной вставки катода из молибдена, имеющего большее катодное падение потенциала и затрудненные условия для образования катодного пятна. В обоих случаях разряд быстро перемещается в периферийную область и вращается в направлении силы Ампера по устойчивой траектории с центром, соответствующим отрицательному максимуму осевой составляющей магнитного поля, в широких пределах его изменения (0,01—0,5 Т) и разрядного тока 0,5—5 кА. Траектория канала соответствовала отрицательному максимуму осевой составляющей магнитного поля; при уменьшении диаметра катушки уменьшался и диаметр траектории. Скорость перемещения канала возрастала с ростом тока и магнитного поля и в указанных пределах изменялась от 50 до 250 м/с. Фотографии эрозионных следов на катоде показаны на рис. 3. Картина следов на рис. 3, а характеризуется наличием большого количества «автографов» с неглубоким поражением электрода. Траектории движения отдельных катодных пятен выпрямлены и трудно различимы на общем фоне зоны фиксации, которая достигала ширины 10—13 мм. Аналогичная картина наблюдалась в [5, 10], где такая форма дуги названа «диффузной».

Уменьшение тока до 300 А (рис. 3, б) изменяет картину распределения катодных пятен: кроме рассмотренной траектории появляется и вторая, расположенная на 2—2,5 см ближе к центру электрода с ретроградным движением катодного пятна. При токах до 150 А движение разрядного канала всегда происходит только по второй траектории. Эрозионные следы на этой траектории существенно отличаются. Поражение электродов здесь более глубокое, что характерно при контрагированном разряде, наблюдавшемся в [4].

На разрядный канал в целом действует сила Ампера: $F = IB_r d$, где I — разрядный ток, d — межэлектродное расстояние. Эта сила действует в основном на электроны, переносящие большую часть тока, но вслед-

ствие сильного электростатического взаимодействия в плотной плазме она передается более тяжелым ионам.

Торможение движения разрядного канала может быть вызвано атомами наполняющего газа, а также взаимодействием канала с электродами (например, отставание образования катодных пятен от движения канала). В сильноточном вакуумном разряде торможение канала существенно ослаблено из-за отсутствия наполняющего газа и превышения движущей силы F над силами взаимодействия с электродами, что проявляется в смене направления движения канала разряда от ретроградного при токах до сотен ампер к прямому при токах порядка килоампер.

Максимально возможная скорость дрейфа канала определяется как чисто инерционное движение ионов за время их жизни $t_{ж}$, т. е. за время их ухода на электроды

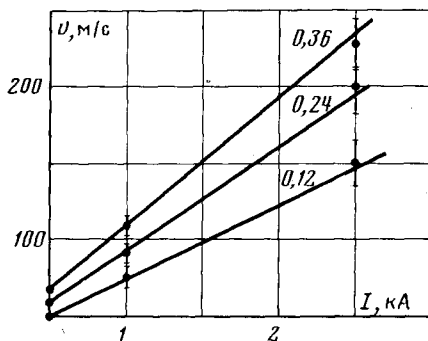


Рис. 4. Экспериментальные (точки) и расчетные (кривые) зависимости скорости дрейфа разрядного канала в магнитном поле от величины тока. Цифры у кривых — величина B_r в Т

жизни пропорционально только d , и, учитывая, что концентрация ионов примерно пропорциональна току, скорость дрейфа практически от тока не зависит. В промежуточном случае скорость дрейфа пропорциональна I^α , где $0 \leq \alpha \leq 1$. Магнитное поле также может влиять как на время жизни ионов, так и на сечение разряда S . Учитывая это, в общем случае можно положить

$$v \approx I^\alpha B_r^\beta d / M. \quad (6)$$

Зависимости (4) и (5) для скорости дрейфа дают хорошее качественное совпадение с результатами известных экспериментальных работ. Так, в [11] установлено, что скорость дрейфа в сильноточных разрядах пропорциональна амплитуде тока и возрастает с увеличением длины межэлектродного промежутка. В [15] при $I=0,1-3$ кА, $B_r=1-2$ Т, $d=3,5$ см скорость дрейфа достигала $4,2 \cdot 10^4$ м/с; в [12] при $B_r=0,02-0,1$ Т, $d=0,5$ см и разделении полного тока 4–15 кА на несколько параллельных каналов $v \approx 5-35$ м/с. Результаты данного эксперимента для скорости дрейфа аппроксимированы следующей зависимостью:

$$v = a + b I^\alpha B_r^\beta. \quad (7)$$

Коэффициенты определялись с помощью регрессионного анализа [17] экспериментальных данных и оказались равны: $a=25$ м/с, $\alpha \approx 1$, $\beta \approx 0,5$, $b=0,14$; B — в Т, I — в А.

На рис. 4 приведены экспериментальные и расчетные значения скорости дрейфа при токах более 500 А. Отклонение расчетных значений от экспериментальных не превышает 10%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брон О. Б. Электрические дуги в аппаратах управления. М.: Госэнергоиздат, 1954.
2. Lee T., Greenwood A. et al. Pow. Appl. Syst., 1963, № 64, p. 629.
3. Попов Н. А., Потокин В. С., Раховский В. И. Электроника, 1966, № 7, с. 35.
4. Алферов В. И. и др. ТВТ, 1971, т. 9, № 2, с. 395.
5. Алферов В. И. ТВТ, 1973, т. 11, № 6, с. 1142.
6. Кесаев И. Г. ДАН СССР, 1957, т. 112, № 4, с. 619.
7. Кесаев И. Г., Пашкова В. В. ЖТФ, 1959, т. 29, в. 3, с. 287.
8. Саблев Л. Г. ПТЭ, 1979, № 4, с. 268.
9. Аксенов И. И., Андреев А. А. Письма в ЖТФ, 1977, т. 3, в. 23, с. 1272.
10. Зинченко А. Г., Щербаков Г. И. Изв. СО АН СССР, 1977, № 3, вып. 1, с. 87.
11. Бугаев С. П. и др. ПТЭ, 1977, № 4, с. 162.
12. Vozman R., Gerby E., Goldsmith. QEEE Trans. on Plasma Sci., 1980, v. PS-9, № 4, p. 308.
13. Перцев А. А. и др. ЖТФ, 1977, т. 47, в. 10, с. 2112.
14. Словецкий Д. И. ТВТ, 1967, т. 5, № 3, с. 401.
15. Воробьев Р. Н. и др. Физика плазмы, 1981, вып. 3, с. 516.
16. Справочник по теоретическим основам радиоэлектроники. Т. 1. М.: Энергия, 1977, с. 189.
17. Зажигалов Л. С., Кишьян А. А., Романиков Ю. И. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента. М.: Атомиздат, 1978.