

УДК 538.5+621.3.03

ПОТОКИ ПЛАЗМЫ, ИСХОДЯЩИЕ ИЗ ОПОРНЫХ ТОЧЕК ДУГИ

О. Б. Брон, Л. К. Сушков

1. ЗАДАЧИ РАБОТЫ

В сильнотоковых дугах электрических аппаратов наблюдаются потоки частиц, исходящие из контактов. Их можно обнаружить путем скоростной съемки. Они отклоняют дугу от кратчайшего расстояния между электродами, придают ей причудливую форму, оказывают давление на электроды, уносят с их поверхности частицы расплавленного металла и производят ряд других действий.

Основная причина появления указанных потоков заключается [1] в разности давлений, возникающих в разных точках дуги, под действием ее собственного магнитного поля. Величина этих давлений p на оси дуги определяется уравнением

$$p = j I 10^{-8} \frac{\kappa^2}{\text{см}^2}, \quad (1)$$

где j — плотность тока $\left[\frac{a}{\text{см}^2} \right]$,

I — величина тока [а].

Таким образом, при неизменном значении тока I сжимающая сила пропорциональна плотности тока j . Вблизи электродов имеет место сужение столба дуги. Поэтому здесь в местах с высокой плотностью тока возникают давления, превосходящие те, которые существуют в средней части дугового столба. Появляется перепад давлений, он то и приводит к возникновению продольных потоков плазмы, направленных перпендикулярно к электродам.

Электромагнитные давления в столбе дуги у ее опорных точек при токах, определяемых сотнями ампер, обычно не велики по абсолютному значению. Так, в угольной дуге при токе 200 а они равны у катода $p_1 = 7 \text{ мм Hg}$, а в средней части дуги $p_2 = 0,6 \text{ мм Hg}$. Однако подвижность частиц плазмы приводит к тому, что скорость потоков в указанном случае очень велика.

Продольные потоки плазмы оказывают существенное влияние на процесс горения и гашения электрической дуги в аппаратах, а также на износ контактов при отключении [4], [5].

Задача настоящей работы — исследование указанных потоков в кратковременно горящей дуге на электродах различной формы из разных материалов.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Исследование проводилось при постоянном токе, величина которого менялась от 30 до 180 а. Расстояние между электродами лежало в пределах 30 — 100 мм. Зажигание дуги осуществлялось перегоранием тонкой плавкой вставки, натянутой между электродами. Последовательно с исследуемым межэлектродным промежутком включалась еще одна

более толстая плавкая вставка, сгоравшая после первой и обрывавшая ток в цепи. Подбором сечения плавких вставок регулировалась продолжительность горения дуги в исследуемом промежутке. Электрическая дуга возбуждалась на угольных, медных, латунных и стальных электродах, которые имели различную форму и взаимное расположение. Продольные потоки плазмы обладают большой подвижностью. Во время горения дуги их конфигурация быстро меняется. Поэтому для обнаружения этих потоков путем фотографирования приходится применять ускоренную киносъемку. В наших опытах ускоренная съемка дуги сочеталась с осциллографированием тока и напряжения. Продолжительность горения дуги лежала в пределах от 0,02 до 0,10 сек, что соответствует условиям, имеющим место в низковольтных аппаратах.

Для ускоренной киносъемки применялся аппарат, описание которого дано в [2]. Скорость киносъемки составляла от 200 до 1200 кадров в секунду. Время экспозиции можно было регулировать, и оно лежало в пределах от $5 \cdot 10^{-3}$ до $8 \cdot 10^{-4}$ сек. Благодаря малому времени экспозиции удавалось четко фиксировать положение изучаемых потоков плазмы.

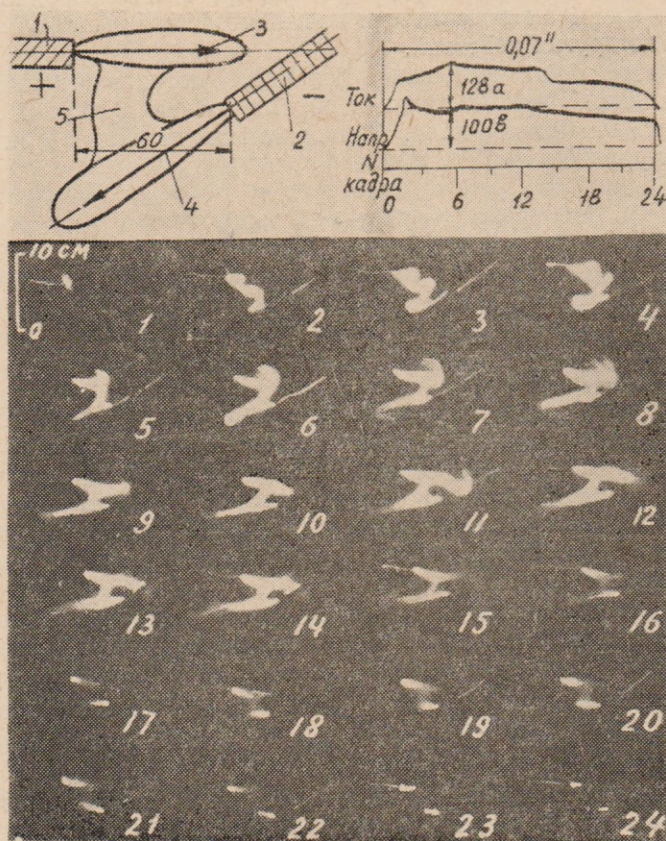


Рис. 1. Кадры ускоренной киносъемки при возникновении потоков плазмы между электродами. Максимальный ток $i=128a$. Напряжение $U=220в$. Число снимков в секунду 343.

Результаты одного из таких опытов приведены на рис. 1. Здесь получены последовательные стадии горения дуги между стержневыми угольными электродами, расположенными под углом друг к другу. На приведенных кадрах можно видеть, как из электродов исходят, развиваются и гаснут яркие факелы, между которыми горит дуга, имеющая значительно меньшую яркость. Осциллографирование позволяло установить величины тока и напряжения для каждого кадра киносъемки.

В дальнейшем описании мы приводим не весь процесс, полученный киносъемкой, а только наиболее характерные кадры.

На рис. 2 приведены отдельные кадры, полученные при киносъемке дуги между соосными электродами. На этом же рисунке приведены и соответствующие этим кадрам схемы расположения электродов и плазменных потоков.

Кадр 2 а. Дуга горит между угольными электродами — широким анодом (30 x 30 мм) и узким катодом $\varnothing$ 8 мм. Поток плазмы, исходящий из катода, оказывается более мощным. Он оттесняет более слабый поток из широкого анода, достигает поверхности анода и растекается по ней.

Кадр 2 б. Дуга горит между стержневыми угольными электродами $\varnothing$ 8 мм. Потоки плазмы теперь исходят из обоих электродов. Они сталкиваются между собой и образуют светящийся плазменный диск. Диаметр обоих потоков плазмы, входящих в светящийся диск, примерно одинаков и равен 11 мм. В плазменном диске можно различить ярко светящееся ядро и периферийную зону с меньшей интенсивностью свечения. Диаметр светящегося диска около 87 мм.

Кадр 2 в. Дуга горит между узким угольным анодом и широким угольным катодом. По сравнению с кадром 2 а изменена только полярность. Потоки плазмы здесь исходят из обоих электродов и сталкиваются между собою, образуя светящийся диск.

Сопоставление кадров 2 а и 2 в позволяет видеть, что катодный поток плазмы легко возникает как на широких, так и на узких угольных электродах, тогда как анодный поток на широких электродах значительно слабее, чем на узких.

Однако потоки плазмы, исходящие из электродов, не всегда сталкиваются между собой. Они могут смещаться относительно оси электродов, и тогда светящегося диска между ними не получается. Такой именно случай отмечен на кадре 2 г. Здесь дуга горит между тонким анодом $\varnothing$ 8 мм и широким катодом. Потоки плазмы существуют раздельно и обтекают друг друга, а дуга горит между ними.

Для выяснения влияния материала электродов на характер продольных потоков плазмы описанные опыты были повторены при наличии медных электродов. Характерные кадры приведены на рис. 3.

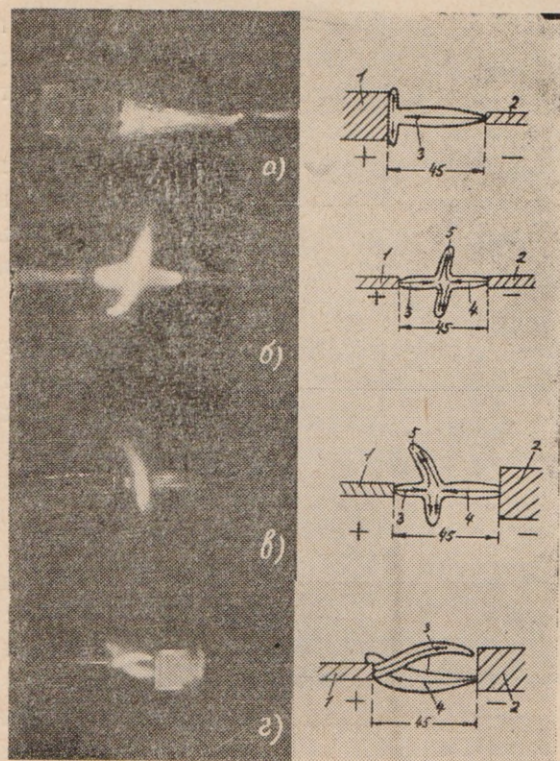


Рис. 2. Потоки плазмы в дуге между соосными угольными электродами. 1 и 2 — электроды; 3 и 4 — потоки плазмы; 5 — светящийся диск в месте встречи потоков плазмы; t — экспозиция: а) $i=147$ а; $u=92,5$ в; $t=2,6 \cdot 10^{-3}$ сек; б) $i=147$ а; $u=164$ в; $t=2,5 \cdot 10^{-3}$ сек; в) $i=147$ а; $u=81$ в; $t=2,4 \cdot 10^{-3}$ сек; г) $i=79$ а; $u=147$ в; $t=2,5 \cdot 10^{-3}$ сек.

Кадр 3 а. Дуга горит между широким анодом и узким катодом. Потoki плазмы образуются у обоих электродов. При их столкновении возникает широкая светящаяся область.

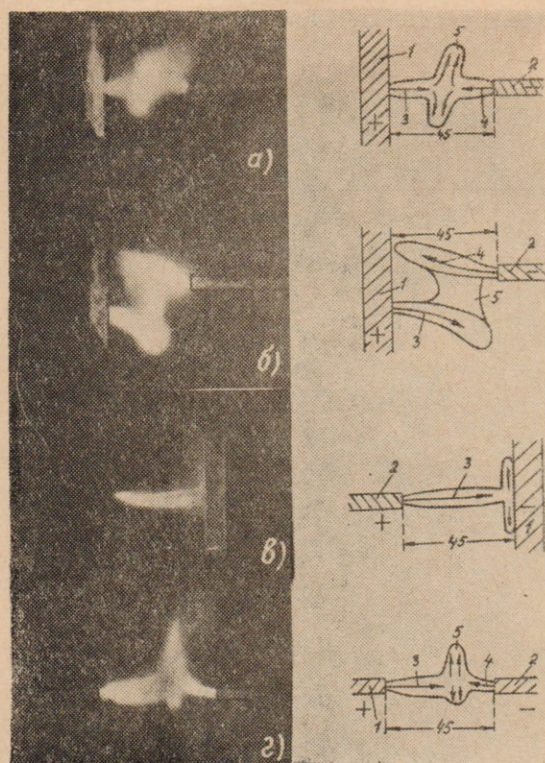


Рис. 3. Потoki плазмы в дуге между соосными медными электродами: 1 и 2—электроды; 3 и 4—потoki плазмы; 5—светящиеся области; t —экспозиция: а) $i=147$ а; $u=81$ в; $t=3,2 \cdot 10^{-3}$ сек; б) $i=113$ а; $u=104$ в; $t=3,4 \cdot 10^{-3}$ сек; в) $i=124$ а; $u=81$ в; $t=3,4 \cdot 10^{-3}$ сек; г) $i=124$ а; $u=81$ в; $t=3,6 \cdot 10^{-3}$ сек.

исходит между узким катодом и широким анодом. Однако потоки плазмы направлены так, что они не встречаются между собой, а отклоняются один вверх, а другой вниз от оси симметрии контактов. В этом случае дуга 5 горит не между электродами, а между потоками плазмы, которые теперь являются своеобразным продолжением электродов.

При изменении полярности электродов потоки плазмы принимали форму, изображенную на кадре 3 в. По сравнению с тем, что имело место при аналогичных условиях на угольных электродах (кадр 2 в), отметим, что здесь весьма слабо выражено действие катодного потока.

Кадр 3 г. Дуга горит между стержневыми медными электродами. Потoki плазмы встречаются и образуют светящийся диск подобно тому, как это было и на угольных электродах (кадр 2 б). Однако здесь длина плазменных потоков меньше. Нет ясного разграничения ядра потока и его периферийной зоны, что наблюдается при угольных электродах.

Потоки плазмы, исходящие из латунных и стальных электродов, имеют такую же форму, как и приведенные на рис. 2.

В рассмотренных выше случаях электроды были расположены соосно и потоки плазмы, направленные навстречу друг другу, могли встретиться. Иначе обстоит дело тогда, когда оси электродов расходятся и потоки плазмы не встречаются между собою. Во всех таких случаях дуга

В отличие от аналогичного явления при угольных электродах (кадр 2 а) здесь поток с широкого анода не подавляется потоком с узкого катода.

Отметим, что картина плазменных потоков изменяется с изменением тока как на угольных, так и на металлических электродах.

Преобладание одного потока над другим наблюдается только при некоторых определенных значениях тока, расстояния между электродами и, видимо, температур последних. В описываемом случае при уменьшении тока происходил спад интенсивности потока плазмы, исходящего с узкого электрода, и тогда можно было наблюдать продольный поток, исходящий с поверхности широкого угольного электрода.

Кадр 3 б. Как и в предыдущем случае, явление про-

горит не между электродами, а между исходящими из них потоками плазмы. Кадры, соответствующие этим случаям, приведены на рис. 4.

Кадр 4 а. Дуга горит между параллельными медными пластинами. Здесь зарегистрирована своеобразная картина. Обнаружено два одновременно существующих факела 3, исходящих из анода 2. Дуга 5 замыкается между этими факелами и потоком плазмы 4, исходящим из катода. Такое положение весьма неустойчиво и может существовать только в течение небольших промежутков времени. С этим явлением связано описанное в литературе [3] скачкообразное перемещение опорных точек при движении дуги. Один из параллельных факелов в таком случае пропадает, и весь ток переходит во второй факел.

Кадр 4 б. Дуга горит между двумя несоосными медными стержнями. Она сильно отклонена от кратчайшего расстояния между своими опорными точками, имеет причудливую форму и замыкается между потоками плазмы. Поток плазмы 3, исходящий из анода, выбрасывается значительно дальше того места А, где на него опирается дуга. Значит, вся область В этого потока не обтекается током. Потоки плазмы здесь имеют резко очерченные границы, что, видимо, связано с хорошей их электропроводностью.

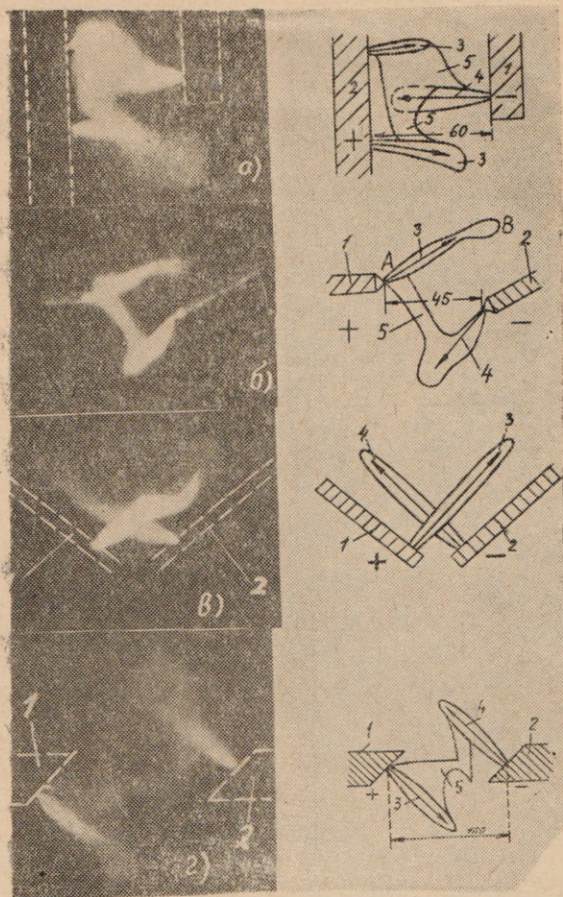


Рис. 4. Потоки плазмы между электродами с несовпадающими осями: 1 и 2—электроды; 3 и 4—потоки плазмы; 5—светящаяся область—дуга; t —экспозиция: а) $i=67$ а; $u=150$ в; $t=2,7 \cdot 10^{-3}$ сек; б) $i=90$ а; $u=115$ в; $t=1,5 \cdot 10^{-3}$ сек; в) $i=124$ а; $u=80$ в; $t=2,7 \cdot 10^{-3}$ сек; г) $i=122$ а; $u=180$ в; $t=2,4 \cdot 10^{-3}$ сек.

Кадр 4 в. Дуга горит между рогообразными медными электродами. Потоки плазмы исходят из электродов и перпендикулярны к ним. Они скрещиваются между собой.

Следует отметить важную особенность описываемого устройства. Когда дугу возбуждают в самом узком месте между рогами, то потоки плазмы направлены навстречу друг другу и сильно ионизируют дуговой промежуток. Это, как известно, часто приводит к повторным зажиганиям. При возбуждении же дуги на скошенных частях рогов потоки плазмы выносят ионизированные частицы в стороны и повторных зажигания не наблюдается.

Кадр 4 г. Дуга горит между скошенными угольными электродами. Потоки плазмы исходят из этих электродов и перпендикулярны к ним.

Если на кадре 4 в потоки скрещивались, то теперь они направлены в разные стороны, не пересекаются между собой, а сильно растянутая дуга горит между ними.

В результате дальнейших исследований получены фотографии, приведенные на рис. 5. Здесь дуга зажигалась между угольными электродами с пересекающимися и параллельными осями.

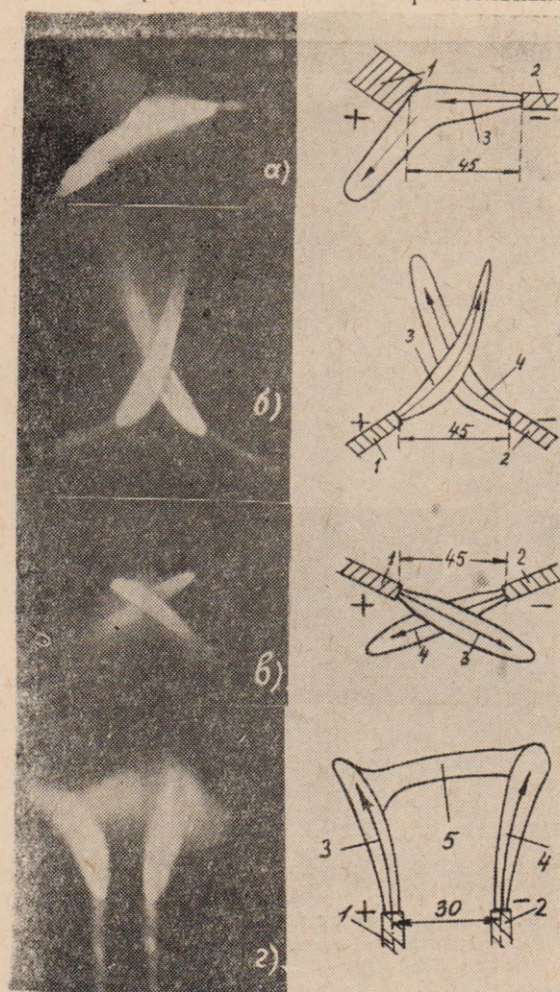


Рис. 5 Потоки плазмы между электродами с пересекающимися и параллельными осями: 1 и 2—электроды; 3 и 4—потоки плазмы; 5—светящаяся область; t —экспозиция: а) $i=147$ а; $u=92,5$ в; $t=3,2 \cdot 10^{-3}$ сек; б) $i=147$ а; $u=104$ в; $t=3,2 \cdot 10^{-3}$ сек; в) $i=158$ а; $u=104$ в; $t=3,3 \cdot 10^{-3}$ сек; г) $i=113$ а; $u=81$ в; $t=3,6 \cdot 10^{-3}$ сек.

Из электродов исходят в вертикальном направлении потоки плазмы. Между ними горит дуга. Электродинамические силы отталкивают потоки плазмы друг от друга, отклоняя их в стороны от вертикальных осей.

ВЫВОДЫ

1. Во всех наблюдаемых случаях обнаружены продольные потоки плазмы, исходящие из электродов. Эти потоки зарегистрированы на угольных, медных, латунных и стальных электродах.

2. Продольные потоки плазмы во всех наблюдаемых случаях были перпендикулярны к поверхности электродов и сохраняли прямолинейное

Кадр 5 а. Процесс происходит между широким скошенным угольным анодом и узким стержневым катодом. Из катода исходит мощный поток плазмы. Он ударяется о скошенную поверхность широкого анода, скользит по ней, отклоняет анодный поток и вместе с ним уходит в сторону, двигаясь по касательной к поверхности анода. Получается картина, напоминающая удар струи жидкости или газа о скошенную поверхность.

Кадры 5 б и 5 в. Процесс происходит между тонкими угольными электродами с пересекающимися осями. На кадре 5 б потоки плазмы вначале совпадают по направлению с осями электродов, а потом отклоняются вверх, но существуют раздельно. В верхней части этих потоков нет тока. Дуга замыкается между потоками плазмы в том месте, где они сближаются между собой или перекрещиваются.

На кадре 5 в электроды повернуты вниз и потоки плазмы распространяются по продолжению осей электродов, преодолевая силы конвекции.

Кадр 5 г. Процесс происходит между двумя стержневыми электродами с парал-

направление, если их не отклоняла внешняя причина. Этот вывод, согласующийся с наблюдениями других исследователей [1], видимо, может быть объяснен следующими соображениями. Основной причиной возникновения продольных потоков плазмы является градиент давлений, создаваемый электромагнитными силами. Он имеет наибольшее значение в местах резкого изменения сечения столба дуги. Такое резкое изменение происходит в непосредственной близости от опорных точек дуги. Поэтому именно тут частицы, образующие поток плазмы, получают наибольший импульс. Но его направление здесь перпендикулярно к поверхности электрода.

3. При соосном расположении электродов наблюдалось столкновение плазменных потоков, в результате чего возникали радиально расходящиеся потоки, либо более мощный поток прижимал к электроду поток противоположного знака.

4. При встрече со скошенной преградой плазменный поток отклоняется ею подобно струе жидкости или газа.

5. Зарегистрированы случаи одновременного существования двух плазменных потоков, исходящих из одного электрода.

6. Продольные потоки плазмы обладают высокой проводимостью, и в тех случаях, когда они не встречаются между собой, дуга горит не между электродами, а между исходящими из них потоками плазмы.

7. На основании сопоставления результатов ускоренной киносъемки с соответствующими осциллограммами тока представлялось возможным построить зависимость от времени тока I и длины плазменных потоков. Одна из полученных таким образом диаграмм приведена на рис. 6. Там же показано соответствующее расположение электродов.

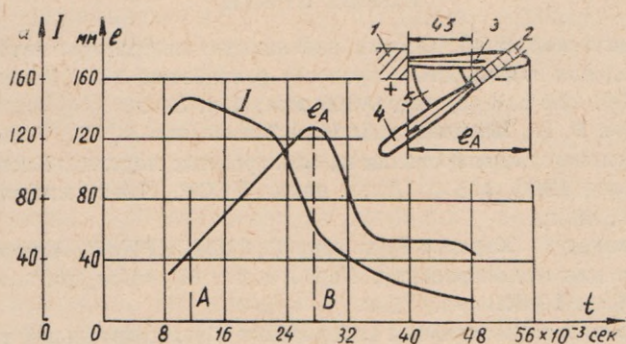


Рис. 6. Зависимость величины тока I и длины l_A плазменного потока от времени t .

Как можно видеть, на отрезке времени между точками A и B ток падает, а длина l_A плазменного потока увеличивается. Значит, между изменениями тока и соответствующими изменениями плазменных потоков существует определенное отставание, что, видимо, может быть отнесено на счет тепловой инерции происходящих процессов.

8. В условиях описанных опытов появление потоков плазмы зарегистрировано уже при токе 30 а. Максимальная длина потоков плазмы была получена на угольных электродах. При токе 180 а она равнялась 170 мм. Скорость распространения светящегося плазменного фронта при этом достигала 10 м/сек. На медных электродах она была во много раз большей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Malcker H. „Plasmastromungen in Lichtbogen infolge eigenmagnetischen Kompression“. Zeitschrift für Physik. Bd 141, 1955, s 198-216.
2. Брон О. Б. „Электрическая дуга в аппаратах управления“, Госэнергоиздат, 1954
3. Брон О. Б. „Движение дуги в магнитном поле“, Госэнергоиздат, 1964.
4. Burkhard G. „Untersuchungen über das Lichtbogen verhalten in Löschblechkammern“. Elektil. H. 12, 1960, s. 424-428. Berlin.
5. Burkhard G., Wedell H., Hilbig H. „Zur Kontaktmaterialwanderung unter dem Einfluss des Lichtbogens und deren Messung mittels radioaktiver Isotope“. Wissenschaftliche Zeitschrift der Elektrotechnik H. 2/2 1963, s 92-130, Leipzig.

Рукопись поступила

11. VI. 1966 г.

НОВЫЕ КНИГИ

Бердический В. Е. Оценка надежности аппаратуры автоматики. Методы оценки надежности в процессе разработки. М. «Машиностроение», 1966, 276 с.; 2 л. илл. 9.000 экз., 1 р. 34 к.

Васильев В. В., Клепикова А. Н. и Тимошенко А. Г. Решение задач оптимального планирования на электронных моделях. Киев, «Наукова думка», 1966, 165 с. (Акад. наук УССР, Ин-т кибернетики). 4.800 экз., 49 к.

Маркович Г., Хауснер Б. и Карр Г. СИМСКРИПТ. Алгоритмический язык для моделирования. Пер. с англ. М., «Сов. радио», 1966, 152 с., с илл. 10.800 экз., 75 к.

Математические вопросы кибернетики и вычислительной техники. Автоматизация программирования. Ереван. Изд-во Акад. наук Арм. ССР, 1966, 131 с. с илл., 1 л. илл. (Акад. наук Арм. ССР, Ереванский гос. ун-т, вычислит. центр. Труды, вып. 4), 2.200 экз., 67 к.

Катковник В. Я. и Полуэктов Р. А. Многомерные дискретные системы управления. М., «Наука», 1966, 416 с. с илл. (Теорет. основы техн. кибернетики). 7.500 экз., 1 р. 43 к.

Кулик Ю. А. Электрические машины. М., «Высш. школа», 1966, 327 с. с илл. 25.000 экз. 63 к.

Учебное пособие для вузов.