

Движение электрической дуги в дугогасительной решетке

АПОЛЛОНСКИЙ С.М., КУКЛЕВ Ю.В.

С целью снижения размеров дугогасительной камеры в электрических аппаратах, применяемых в автономных энергоустановках, решетки снабжаются рядом конструктивных элементов, способствующих принудительному гашению дуги. В статье обоснована возможность исследования газодинамических процессов в дугогасительных устройствах на моделях в ударной газодинамической трубе. В результате экспериментов выявлено влияние на процесс вхождения дуги в дугогасительную решетку излучения и диффузии электронов из ствола дуги. Последние при больших токах повышают проводимость газа и способствуют проникновению тока между пластинами еще до подхода дуги к решетке. Удалось установить, что время образований катодных и анодных пятен на стальных пластинах мало отличается друг от друга и возрастает с увеличением тока. Вместе с тем, наблюдается уменьшение времени образования опорных пятен с увеличением внешнего магнитного поля. Исследовано влияние излучения и диффузии электронов из ствола дуги на процесс вхождения дуги в дугогасительную решетку. При этом создается внешнее электрическое поле, влияющее на деление дуги и способствующее отбросу ее от решетки. При движении частичных дуг между пластинами решетки происходит их размежевание. Это является следствием неодинаковой скорости перемещения катодного и анодного пятен по пластинам, что приводит к повторным зажиганиям, происходящим по кратчайшему расстоянию между пластинами.

Ключевые слова: электрические аппараты, электрическая дуга, дугогасительная камера, газодинамические процессы, опорные пятна на пластинах решетки

С целью уменьшения размеров дугогасительной камеры в электрических аппаратах (ЭА), применяемых в автономных энергоустановках (на транспортных объектах, в горнорудной промышленности и др.), используемые при гашении электрической дуги дугогасительные решетки снабжаются рядом конструктивных элементов, которые способствуют принудительному гашению дуги или гашению с оказанием воздействия на ее ток. В качестве таких конструктивных элементов могут использоваться: электромагниты, создающие магнитное дутьё; многослойные решетки со смещением входных каналов и каналов выхлопа; специальные материалы для стенок, выделяющие газы, способствующие затуханию дуги и т.д.

Так, деление электрической дуги на частичные дуги сопровождается увеличением количества энергии, отдаваемой частичными дугами теплопроводностью, вынужденной конвекцией и радиацией в аксиальном направлении — дугогасительным пластинам и в радиальном — в окружающую среду, что в принудительном порядке приводит к быстрому падению тока до нулевого значения. При спаде тока индукция собственного магнитного поля уменьшается, нарушается равновесие термодинамического и электромагнитного давления внутри дуги. Зона проводимости дуги расширяется и охлаждается. При охлаждении расширяющейся зоны проводимости сильно уменьшается степень ионизации и нарушается ионизационное равновесие.

При нулевом значении тока электрическая дуга распадается и ионизированные частицы перемещаются под действием перепада давления и сил Лоренца.

Движение опорных пятен дуги по пластинам решетки. Зависимости средней скорости перемещения v по медной пластине анодного и катодного пятен от значения движущей электромагнитной силы, создаваемой взаимодействием тока I дуги с внешним магнитным полем при индукции B , приведены на рис. 1 (кривые a).

Катодное пятно движется быстрее анодного. Его скорость резко возрастает, достигает максимума при $IB=1700$ Н/м, а затем начинает снижаться. Скорость анодного пятна возрастает монотонно.

Снижение средней скорости перемещения катодного пятна при больших значениях движущей силы вызвано тем, что из-за значительной разницы в скоростях анодного (на электроде) и катодного (на пластине) пятен ствол дуги по мере движения вытягивается вдоль пластины и разность потенциалов между дугой и пластиной быстро возрастает вплоть до пробоя и образования кратчайшего дугового разряда. Катодное пятно этого разряда вновь быстро опережает анодное, и снова происходит пробой.

С увеличением движущей силы число таких пробоев растет. Поэтому несмотря на возрастание мгновенной скорости катодного пятна его средняя скорость перемещения (до конца пластины) падает.

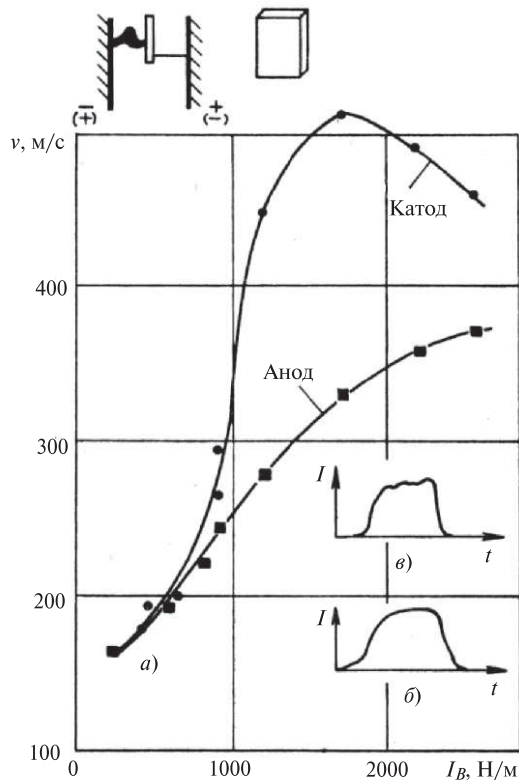


Рис. 1. Характеристики перемещения опорных пятен дуги по медной пластине: кривые *a* — зависимости скорости v перемещения анодного и катодного пятен от движущей силы IB ; график *б* — осциллограмма изменения тока в пластине при $IB = 900$ Н/м; график *в* — то же при $IB = 2500$ Н/м

Наличие или отсутствие пробоев между плазмой и пластиной хорошо регистрируется на осциллограммах по наличию или отсутствию пульсаций тока в пластине. Из сравнения графиков *б* и *в* на рис. 1 при малых значениях IB , когда скорости анодного и катодного пятен практически одинаковы, пульсации тока не наблюдаются. На рис. 1 приведены две кривые тока на каждой пластине и напряжение дуги. Колебания тока на пластине и напряжения дуги свидетельствуют об изменении её длины. При удлинении напряжение возрастает, а в момент шунтирования резко уменьшается. Средняя частота колебаний тока на пластине соответствовала приблизительно 50 кГц. В отличие от катодного пятна движение анодного пятна не вызывает заметных пульсаций напряжения дуги и тока на пластине (рис. 2). Не фиксировалось заметных колебаний при движении катодного пятна, когда на дугу действовала сила $IB = 900$ Н/м (рис. 2, *в*).

Кривые рис. 3 выражают зависимость скорости перемещения катодного и анодного пятен по стальной пластине от тока. Как видно, скорость опорных пятен резко возрастает с увеличением тока вплоть до 10 кА. Дальнейшее увеличение тока дуги вызывает сравнительно медленный рост скорости опорных пятен. Это связано с возрастанием

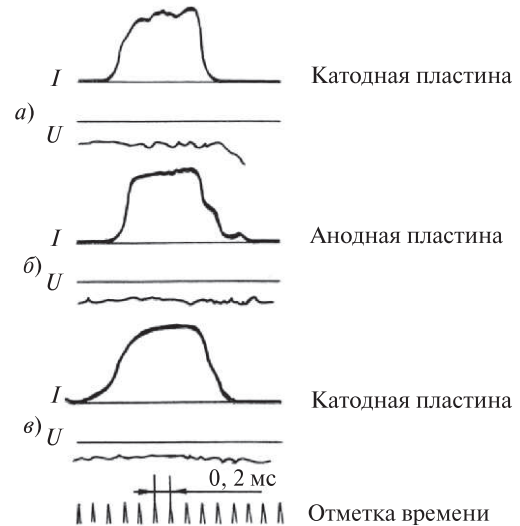


Рис. 2. Осциллограммы изменения тока I в пластинах и напряжения U на дуге: *a* и *б* — при $I = 11$ кА, $B = 0,23$ Тл, $IB = 2500$ Н/м; *в* — при $I = 11$ кА, $B = 0,08$ Тл, $IB = 900$ Н/м

сопротивления движению ствола дуги со стороны газовой среды.

В таблице приведены для сравнения значения скорости перемещения анодных и катодных пятен по стальной и медной пластинам под воздействием собственного магнитного поля в системе «электрод—пластина». Видно, что скорость перемещения как анодного, так и катодного пятен по медной пластине меньше скорости перемещения опорных пятен по стальной пластине, что подтверждают ре-

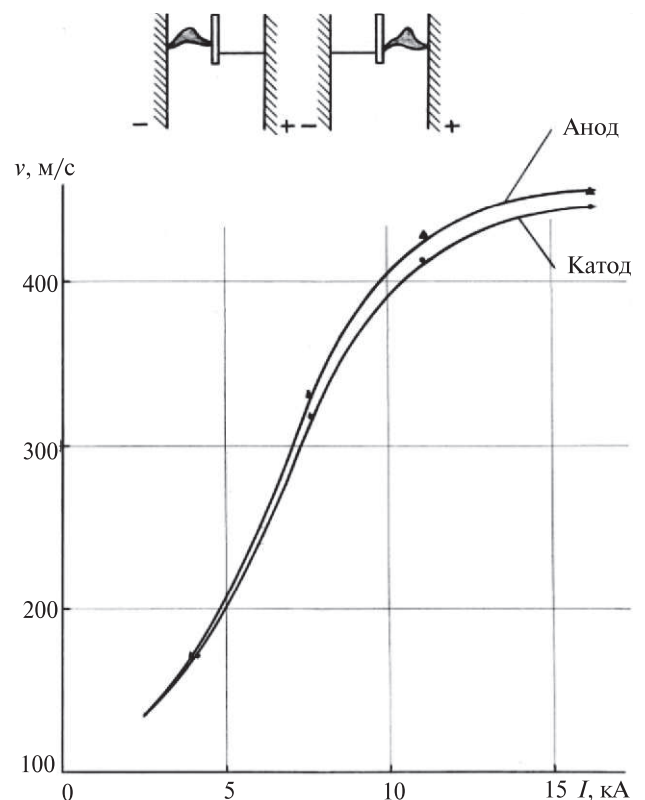


Рис. 3. Зависимость скорости движения опорных пятен дуги по стальной пластине от тока I

зультаты работы [1]. Увеличение скорости перемещения опорных пятен по стальной пластине является следствием взаимодействия тока дуги с железной массой пластины, которое приводит к возникновению силы, стремящейся удалить опорное пятно дуги от нижнего края решетки.

Материал пластин	Скорость пятна, м/с			
	На аноде		На катоде	
	$I = 4$ кА	$I = 11$ кА	$I = 4$ кА	$I = 11$ кА
Медь	130	300	150	310
Сталь	172	430	168	416

Данные таблицы свидетельствуют о том, что скорость опорных пятен на медных пластинах меньше, чем на стальных. Это подтверждает известное положение [2] о возникновении дополнительных электромагнитных сил, действующих на дугу в присутствии ферромагнитных масс.

Из-за разницы скоростей перемещения опорных пятен дуги движение частичных дуг в решетке сопровождается повторными зажиганиями по кратчайшему расстоянию между пластинами.

Движение электрической дуги переменного тока в дугогасительной решетке. Для современного низковольтного электроаппаратостроения характерно требование повышения отключающей способности в сочетании с необходимостью уменьшения габаритов и расхода материалов при разработке дугогасительных устройств, что особенно актуально для широко применяемых аппаратов переменного тока.

Задача данной работы — исследование вхождения дуги переменного тока в деионную решетку, образования опорных пятен дуги на пластинах и движения дуги по пластинам решетки с учетом изменений, производимых дугой в окружающей ее газовой среде.

Исследования проводились при переменном токе с действующим значением от 1 до 10 кА на той же установке и с использованием той же методики, что и ранее [3] при изучении движения дуги постоянного тока в деионной решетке. Решетка состояла из пяти пластин, причем средняя пластина решетки (измерительная) состояла из двух металлических пластин половинной толщины, изолированных одна от другой тонкой промежуточной прокладкой и соединенных у входной кромки через малоиндуктивный измерительный шунт сопротивлением 10^{-4} Ом [4]. Все пластины решетки длиной 250 мм и шириной 20 мм и стали толщиной 2 мм имели клинообразный вырез глубиной 15 мм с углом 60° при вершине.

Время задержки дуги под решеткой t_0 измерялось по осциллограмме (рис. 4) от момента подхода дуги к решетке, зафиксированного фотодиодом

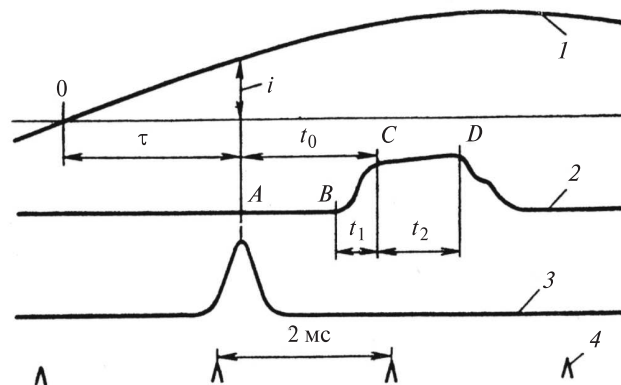


Рис. 4. Осциллограмма изменения регистрируемых параметров и определяемые интервалы времени: 1 — ток дуги; 2 — ток в измерительной пластине; 3 — напряжение фотодиода; 4 — метка времени

(точка A), до момента достижения током в измерительной пластине установившегося значения (точка C).

Время t_1 определялось продолжительностью нарастания тока в измерительной пластине до соответствующего мгновенного значения тока дуги (интервал между точками B и C), что свидетельствовало о завершении образования опорных пятен. Время t_2 соответствовало продолжительности движения дуги вдоль измерительной пластины решетки (интервал между точками C и D).

Мгновенное значение тока i и его фаза в момент подхода дуги к решетке (точка A) определялись непосредственно из осциллограмм. Характеристикой фазы тока служило отношение времени τ , отсчитываемого от момента прохождения тока через нуль (точка O) до момента подхода дуги к решетке (точка A), и продолжительности полупериода $T/2$, т.е. $2\tau/T$.

Исследования показали, что при отсутствии повторных зажигания дуги под решеткой время образования опорных пятен дуги на измерительной пластине t_1 как часть времени t_0 не зависело от мгновенного значения тока i (в исследованном диапазоне его значений) и составляло в среднем 0,4 мс. Соответственно этому скорость нарастания тока в измерительной пластине в процессе образования опорных пятен дуги по мере возрастания значения i увеличивалась. При этом время t_0 экспоненциально уменьшалось, приближаясь к значению t_1 тем ближе, чем выше было действующее значение тока I . Кривые 1 и 2 на рис. 5 показывают, что время задержки дуги t_0 под измерительной пластиной при неизменном значении I минимально при значениях параметра $2\tau/T \approx 0,5$, соответствующих максимальным значениям тока i . При всех значениях $2\tau/T$ время t_0 уменьшается с увеличением I .

Уменьшение t_0 с возрастанием i обусловлено увеличением электромагнитных сил, вталкивающих дугу в решетку из стальных пластин с клиновым вырезом, и усилением термического воздействия дуги на состояние газовой среды под решеткой [5]. Как следствие роста излучения дуги повышаются температура и степень ионизации газа между пластинами решетки, усиливается эмиссия электронов с поверхности ствола дуги, возникает фотоэлектрическая эмиссия электронов с поверхности самих пластин решетки. Все эти явления способствуют ускорению начала образования опорных пятен на пластинах решетки. Уменьшение t_0 при повышении значения I , характерное для всего диапазона изменения тока i , можно объяснить усилением термического воздействия и обусловленных им явлений еще при подходе дуги к решетке, а также присущей термическим процессам инерционностью.

Увеличением электромагнитных сил притяжения дуги с большим током к пластинам решетки и повышением при этом температурного градиента на границе «дуга – пластина» объясняются более высокие скорости нарастания тока в измерительной пластине, наблюдаемые в процессе образования на ней опорных пятен дуги. Минимальные значения времени t_2 движения дуги вдоль пластины решетки также наблюдаются при значениях параметра $2\tau/T \approx 0,5$, т.е. при наибольших мгновенных значениях тока (кривая 3 на рис. 5). С увеличением I значения t_2 уменьшаются во всем диапазоне изменения $2\tau/T$.

Уменьшение t_2 с ростом I также связано с увеличением движущего дугу электромагнитного усилия, так как соответственно увеличивается ток i для каждого значения параметра $2\tau/T$. Вследствие

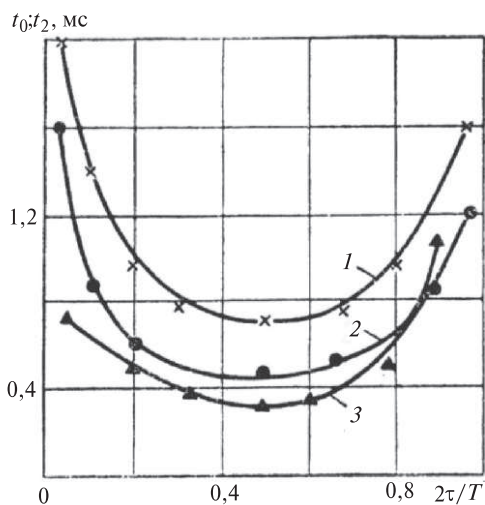


Рис. 5. Зависимость времени t_0 задержки дуги под измерительной пластиной (кривые 1, 2) и времени t_2 движения дуги вдоль пластины (кривая 3) от параметра $2\tau/T$: 1 – $I = 6$ кА; 2, 3 – $I = 10$ кА

более интенсивного термического воздействия дуги при большем значении I снижается плотность газовой среды и, соответственно, газодинамическое сопротивление движению частичных дуг между пластинами решетки.

Приведенные результаты относятся к случаям, когда дуга однократно входила в решетку. При повторных зажиганиях дуги под решеткой (что обусловлено наличием остаточной проводимости газа в этой области к моменту восстановления напряжения на электродах) для второго и последующих вхождений наблюдалось значительное, иногда в несколько раз, уменьшение значений t_0, t_1, t_2 . Это подтверждает важную роль предшествующих термических процессов для ускорения вхождения дуги в решетку и движения в ней. Вместе с тем повторные зажигания увеличивали общее время нахождения дуги в решетке и термические нагрузки на ее пластины, особенно у входа в решетку. Вероятность повторных зажиганий возрастала с увеличением i и соответствующим уменьшением t_0 .

Таким образом, время вхождения дуги переменного тока в деионную решетку и время движения вдоль пластин зависят от действующего значения тока и его фазы в момент подхода дуги к решетке и снижаются при прочих равных условиях с увеличением мгновенного значения тока.

Образованию опорных пятен дуги на пластине решетки способствуют излучение и диффузия электронов из ствола дуги, возрастающие с увеличением мощности дуги. Увеличение времени гашения дуги переменного тока в деионной решетке при повышении тока связано с повторными зажиганиями дуги под решеткой, вероятность которых возрастает.

Выход электрической дуги за пределы дугогасительной решетки. Ранее проведенные исследования в основном затрагивали вопросы, связанные с влиянием материала пластин на выход дуги за пределы решетки и не учитывали наличия внешнего электрического поля и взаимодействия между собой частичных дуг. Экспериментальные кривые на рис. 6 показывают, что время схода со стальной пластины как анодного, так и катодного следов увеличивается с ростом тока дуги. Это подтверждает известное положение, согласно которому на дугу, приближающуюся к концу пластины, действует дополнительная удерживающая сила, в которую входит электрическая сила; она препятствует сходу дуги. Кроме того, на дугу действует электромагнитная сила, под действием которой положительный ствол дуги удлиняется при малой подвижности опорного пятна. В результате происходит

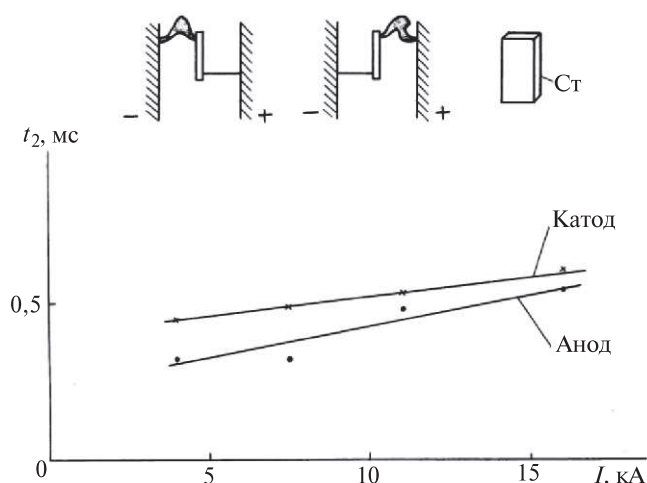


Рис. 6. Зависимость времени t_2 схода катодного и анодного следов со стальной пластины от тока I

пробой между электродом, с которым соединена пластина, и плазмой.

Влияние внешнего магнитного поля на время схода опорного следа с медной пластины отображено на рис. 7. В данном случае исключается сила, препятствующая сходу дуги, а движущая сила, созданная внешним магнитным полем и протекающим током 11 кА, действует в основном на положительный ствол. Значение t_2 катодного (анодного) опорного пятна увеличивается с ростом внешнего магнитного поля.

Однако характер изменения времени выхода дуги за пределы стальной решетки иной (кривая 1, рис. 8), т.е. с увеличением тока время задержки дуги в решетке уменьшается. Это объясняется тем, что скорость частичных дуг в решетке неодинакова. В одних промежутках между пластинами дуга уходит вперед, в других — отстает. Возникают электродинамические силы, одни из которых стремятся задержать отставшие дуги, а другие ускоряют движение частичных дуг, ушедших вперед. Известно, что при подходе передних частичных дуг к концу стальной решетки возникает сила, задерживающая

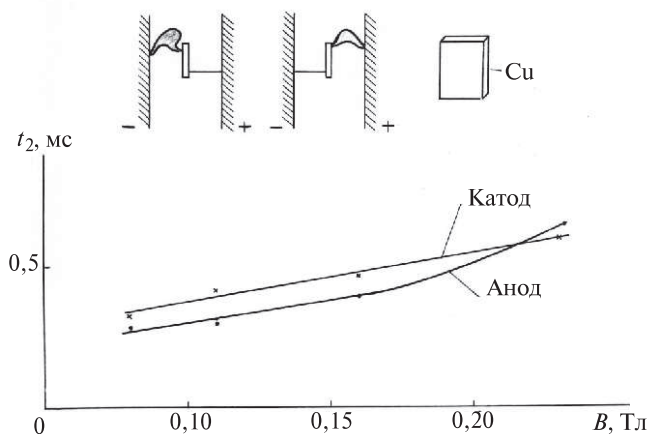


Рис. 7. Зависимость времени исчезновения опорных пятен на медной пластине от индукции внешнего магнитного поля

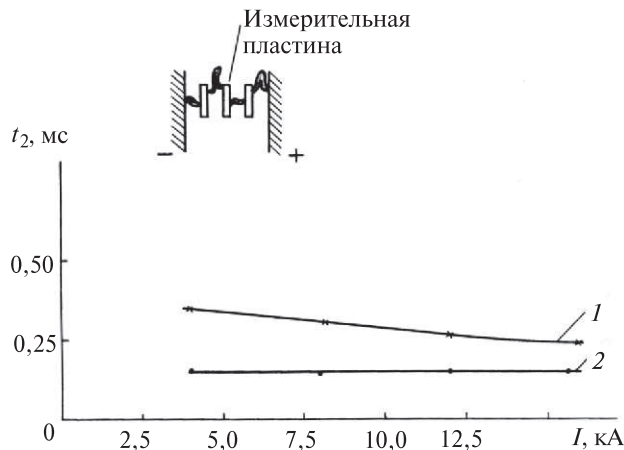


Рис. 8. Зависимость времени выхода дуги за пределы решетки от тока: 1 — стальная решетка, $\alpha = 0,82$; 2 — медная решетка, $\alpha = 0,82$

выход дуги за пределы решетки. С другой стороны, на эти дуги действуют электродинамические силы, стремящиеся ускорить их выход из решетки. Возникает результирующая сила, ускоряющая выход дуги из стальной решетки; рассмотрим подробнее причины увеличения этой силы.

Частичные дуги образуют на пластине два опорных пятна, смещенных относительно друг друга. Между ними протекает ток, протяженность которого постоянно меняется из-за изменения скоростей перемещения опорных пятен. Возникает переменное собственное магнитное поле, вызывающее образование вихревых токов в стальной пластине. Дополнительная индукция собственного магнитного поля, созданная вихревыми токами, накладывается на индукцию основного магнитного поля и усиливает его. В результате t_2 уменьшается с увеличением тока. Для сравнения на рис. 8 приведена кривая 2 выхода частичных дуг из медной решетки. На частичные дуги в медной решетке действуют только электромагнитные силы, что приводит к слабой зависимости t_2 от тока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Таев И.С. Электрические контакты и дугогасительные устройства аппаратов низкого напряжения. — М.: Энергия, 1973, 424 с.
2. Брон О.Б., Сушков Л.К. Потoki плазмы в электрической дуге включающих аппаратов. — Л.: Энергия, 1975, 216 с.
3. Брон О.Б., Куклев Ю.В., Лярский Б.А. Электрическая дуга в изоляционных щелях переменного тока. — Электричество, 1974, № 10, с. 24-29.
4. Дракин И.И. Аэродинамический и лучистый нагрев в полете. — М.: Оборонгиз, 1961, 96 с.
5. Брон О.Б., Куклев Ю.В., Лярский Б.А. Взаимодействие движущейся электрической дуги с окружающей ее газовой средой. — Электротехника, 1978, № 2, с. 10-13.
6. Куклев Ю.В. Газодинамические процессы в дугогасительных устройствах низковольтных электрических аппаратов: Автореф. дис... канд. техн. наук. — Л.: Ленинградский политехнический институт, 1982, 31 с.

7. Брон О.Б., Жигалко Е.Ф., Куклев Ю.В., Лярский Б.А. Газодинамические характеристики дугогасительных устройств. — Электротехническая промышленность. Аппараты низкого напряжения, 1980, вып. 2, с. 1—4.

8. Аполлонский С.М., Беляев В.Л., Куклев Ю.В. Физика гашения дуги в электрических аппаратах. — СПб.: Троицкий мост, 2015, 408 с.

[05.09.2016]

А в т о р ы: Аполлонский Станислав Михайлович окончил Высшее военно-морское инженерное училище по специальности инженер-электрик в 1959 г. Докторскую диссертацию «Комплексная задача расчета и снижения электромагнитных полей для обеспечения

безопасности элементов электроэнергетики» защитил в 1988 г. Научный консультант ООО «Центр электромеханотроники».

Куклев Юрий Васильевич окончил математико-механический факультет Ленинградского государственного университета в 1964 г. В 1982 г. защитил кандидатскую диссертацию «Газодинамические процессы в дугогасительных устройствах низковольтных электрических аппаратов». Доцент кафедры «Электротехника и электроэнергетика» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

Elektrichestvo (Electricity), 2017, No. 2, pp. 33–38.

Electric Arc Motion in the Arc Chute

APOLLONSKII Stanislav Mikhailovich (Limited Liability Company «Centre electromechatronics», St. Petersburg, Russia) — Scientific consultant, Dr. Sci. (Eng.)

KUKLEV Yurii Vasil'yevich (St. Petersburg Polytechnic University named Peter the Great, St. Petersburg, Russia) — Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

In order to decrease the sizes of an arc quenching chamber in the electrical apparatuses used in self-contained electrical installations, the arc chutes are fitted with a number of structural elements facilitating forced arc quenching. The article substantiates the possibility of studying gas dynamic processes in arc quenching devices by means of models in a shock gas-dynamics tunnel. Experiments were carried out, which made it possible to determine the effect the radiation and diffusion of electrons from the arc body have on the process through which the arc enters into the arc chute. With high current values, the diffused electrons increase the gas conductivity and facilitate penetration of current in between the plates even before the arc approaches the chute. It was found that the periods of time taken for cathode and anode spots to appear on the steel plates differ from each other only slightly and increase with the growth of current. At the same time, it is observed that the root spot formation time increases with increasing the external magnetic field intensity. The effect the radiation and diffusion of electrons from the arc body has on the entering of arc into the chute was investigated. As this takes place, an external magnetic field is generated, which has an effect on the arc separation process and facilitates its being thrown away from the chute. Partial arcs separate from each other as they move between the chute plates. This phenomenon results from different velocities with which the cathode and anode spots move over the plates, due to which repeated arcs strike through the shortest distance between the plates.

Key words: electric apparatuses, electric arc, arc quenching chamber, gas dynamic processes, root spots on chute plates

REFERENCES

1. Tayev I.S. *Elektricheskiye kontakty i dugogasitel'nye ustroystva apparatov nizkogo napryazheniya* (Electric contacts and arc-control devices low-voltage devices). Moscow, Publ. «Energiya», 1973, 424 p.

2. Bron O.B., Sushkov L.K. *Potoki plazmy v elektricheskoi duge vkluchayushchikh apparatov* (Plasma flows in an electric arc apparatus comprising). Leningrad, Publ. «Energiya», 1975, 216 p.

3. Bron O.B., Kuklev Yu.V., Lyarskii B.A. *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 1974, No. 10, pp. 24—29.

4. Drakin I.I. *Aerodinamicheskii i luchisty nagrev v polete* (The aerodynamic and radiant heating in flight). Moscow, Oborongiz, 1961, 96 p.

5. Bron O.B. *Elektrotehnika — in Russ. (Power Engineering)*, 1978, No. 2, pp. 10—13.

6. Kuklev Yu.V. *Gazodinamicheskiye protsessy v dugogasitel'nykh ustroystvakh nizkovol'tnykh elektricheskikh apparatov: Avtoref. dis... cand. tekhn. nauk* (Gas dynamic processes in the arc-control devices of low-voltage electrical apparatus. Authors abstract of Cand. Sci. (Eng.)). Leningrad Polytechnical Institute, 1982, 31 p.

7. Bron O.B., Zhigalko E.F., Kuklev Yu.V., Lyarskii B.A. *Elektrotekhnicheskaya promyshlennost'. Apparaty nizkogo napryazheniya — in Russ. (Electrical industry. Low-voltage devices)*, 1980, iss. 2, pp. 1—4.

8. Apollonskii S.M., Belyayev V.L., Kuklev Yu.V. *Fizika gasheniya dugi v elektricheskikh apparatakh* (Physics of arc extinction in electric devices). St. Petersburg, Publ. «Troitskii most», 2015, 408 p.