

## Зависимость процессов в дугогасительной решетке от радиуса движущейся электрической дуги

АПОЛЛОНСКИЙ С.С., КУКЛЕВ Ю.В.

*В электрических аппаратах, содержащих дугогасительную решетку, дуга возникает на контактах, расположенных между относительно широко расставленными изоляционными стенками, а затем перемещается электромагнитными силами в область, занятую пластинами решетки. Электрическая дуга представляет собой сложное явление, в котором большое количество физических взаимодействий происходит за очень короткое время. Анализ и расчет дуговых процессов в дугогасительных устройствах электрических аппаратов обуславливает совместное рассмотрение термогазодинамических, кинетических, электрических (сетевых), дуговых, механических процессов. Это существенно осложняет поиск приемлемых моделей, и сейчас нет общепринятых моделей, которые удовлетворяли бы всем этим требованиям. Трудности решения уравнений, которые базируются на общих принципах термодинамики и законах механики сплошных сред, связаны, в частности, с достоверностью граничных и начальных условий, которые обычно выбираются с учетом экспериментальных данных (техника эксперимента при изучении дуги достаточно сложна и имеет высокую стоимость). На протяжении многих лет разработано множество методов моделирования электрической дуги. Следует отметить три основных типа моделей электрической дуги: физическую модель; модель «чёрного ящика»; параметрическую модель. Представленные модели не могут показать все физические процессы в электрической дуге, но могут описать изменение основных параметров. Физические процессы, сопровождающие прохождение дуги, могут замедлить её перемещение или даже остановить, что может привести к аварии. В связи с этим очень важно параметры дугогасительной решётки выбирать такими, чтобы она оказывала наименьшее сопротивление прохождению дуги. И, в первую очередь, важно оценить радиус канала электрической дуги. Статья посвящена расчёту радиуса канала электрической дуги. Приведённые в ней расчёты могут оказаться полезными при выборе параметров пластин дугогасительной решётки.*

*К л ю ч е в ы е с л о в а:* электрические аппараты, дугогасительная решетка, электрическая дуга, радиус канала, расчет

Среди предложенных в разные годы методов моделирования электрической дуги [1, 2] можно выделить: физическую модель [3], модель «чёрного ящика» [4, 5] и параметрическую модель [6–8]. Однако с помощью этих моделей нельзя представить всех физических процессов, происходящих в дуге, но можно описать изменение основных параметров. Перед дугой, движущейся в широкой части дугогасительного устройства  $\delta_1$  (рис. 1), возникает область повышенного давления  $P_1$ , которая распространяется со скоростью звука [1]. Она достигает места перехода  $AB$  в дугогасительную решетку и, частично отражаясь ( $P'_2$ ), проникает в щель между пластинами ( $P_3$ ). Волна давления  $P'_2$ , отраженная от нижнего края пластин решетки, движется навстречу дуге, складывается с падающей волной  $P_1$  и образует волну  $P_2$ . Волна  $P_2$  повышает давление перед дугой, замедляя ее движение, а затем вновь отражается, пробегая несколько раз сокращающееся расстояние между дугой и местом перехода. Отраженные волны становятся все меньше по ампли-

туде и после нескольких отражений затухают. Возникают вопросы о соотношениях, которые связывают значения величин, влияющих на описываемый процесс [9, 10]. Один из вопросов связан с определением значения радиуса электрической дуги.

Вычисления проводятся на приближённой модели – стационарное горение электрической дуги в воздухе. При этом допускается существование локального равновесия. При выводе расчетной формулы для радиуса дугового канала используется простейшая двухслойная модель:  $\sigma = \text{const}$  при  $r < R_w$ ,  $T \geq T_w$ ;  $\sigma = 0$  при  $r \geq R_0$ ,  $T \leq T_0$ , где  $T_0$  – температура, при которой электропроводимость соответствует внешней границе пограничного слоя (1) и равняется 5000 К;  $R_w$  – радиус дугового канала;  $T_w$  – температура стенки;  $\sigma$  – электропроводимость.

Для упрощения задачи пренебрегаем переходным слоем, где  $\sigma$  изменяется от  $\sigma = \text{const}$  до  $\sigma = 0$ . Считается, что это изменение происходит скачком.

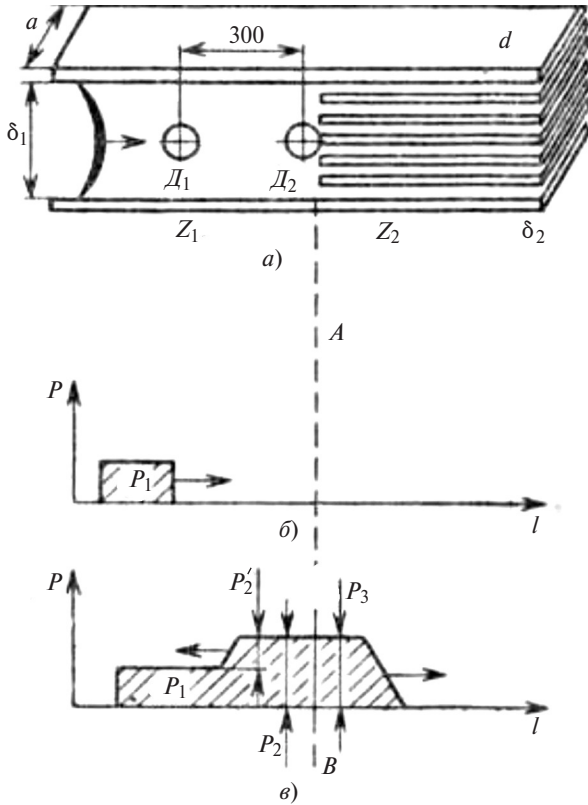


Рис. 1. Движение дуги: а – общая схема; б – волна давления  $P$  перед дугой; в – волны давления в месте перехода  $AB$

Определим зависимость максимальной температуры дуги от радиуса. Предположим, что горение дуги стационарно. Для оценки максимальной температуры или радиуса ствола дуги используется простейшая модель. Считается, что по всему сечению канала ствола дуги значения электропроводности  $\sigma$  и теплопроводности  $\alpha_1$  постоянны. Тепловой баланс для канала дуги выражается уравнением

$$\frac{\alpha_1}{T} \frac{d}{dz} \left( r \frac{dT}{dr} \right) = -q, \tag{1}$$

где  $q = \frac{I^2}{\pi^2 R_0^4 \sigma}$  – плотность Джоулева тепла;  $R_0$  – радиус канала.

Это уравнение решается при граничных условиях, указанных выше, и имеет вид:

$$T = T_0 + \frac{qR_0^2}{4\alpha_1 \left[ 1 - \left( \frac{r}{R_0} \right)^2 \right]}. \tag{2}$$

Максимальное значение температуры соответствует выражению

$$T_w = T_0 \frac{qR_0^2}{4\alpha_1} \tag{3}$$

или

$$T_w = T_0 + \frac{I^2}{4\pi^2 R_0 \alpha_1 \sigma}.$$

Отсюда определяется радиус ствола дуги:

$$R_0 = \frac{I}{2\pi} \sqrt{\frac{I}{\alpha_1 \sigma (T_m - T_0)}}, \tag{4}$$

где  $T_m$  – максимальная температура на оси дуги.

Для оценки  $R_0$  используем экспериментальное значение  $T_w = 12000$  К при  $I = 200$  А [2]. Для этой температуры согласно (1) имеем  $\sigma = 60$  Ом<sup>-1</sup>·см<sup>-1</sup>;  $\alpha_1 = 0,8 \cdot 10^{-2}$  АВ/см<sup>2</sup>·С при  $T_0 = 5000$  К; значение  $T_0$  соответствует верхней границе пограничного слоя. Подставляя данные в (4), получаем:

$$R_0 = \frac{200}{2 \cdot 3,14} \sqrt{\frac{1}{0,8 \cdot 10^{-2} \cdot 60(12000 - 5000)}} = 0,55 \text{ см.}$$

Этот результат близок к экспериментальным данным Ридера для электрической дуги в воздухе, согласно которым  $R_0 = 0,4$  см [2]. Завышенное значение  $R_0$  можно объяснить неучетом теплоотдачи с поверхности дуги. В этом случае тепловой баланс для канала электрической дуги выражается уравнением

$$\alpha_1 \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dT}{dr} \right) = -q + L, \tag{5}$$

где  $L$  – потери энергии, обусловленные конвекцией и соответствующие отношению теплового потока, проходящего через поверхность, к объему, ограниченному этой поверхностью:

$$L = 2 \frac{\alpha_r (T_w - T_0)}{R_w^2}, \tag{6}$$

где  $T_w = 12000$  К – максимальная температура дуги;  $T_0 = 5000$  К – предельная температура, соответствующая значению  $\sigma = 0$ ;  $R_w$  – начальный радиус слоя  $\sigma = 0$ ;  $\alpha_r$  – теплопроводность нагретого газа до 5000 К.

В нашем предположении  $R_w = R_0$ . Подставляя (6) в (5) и интегрируя, с учетом граничных условий (при  $r = 0$  значение  $T = T_w$  и при  $r = R_0$  значение  $T = T_0$ ) получаем уравнение распределения температуры по сечению канала дуги (5):

$$T = \frac{q}{4\alpha_1} R_0^2 \left[ 1 - \left( \frac{r}{R_0} \right)^2 \right] - \frac{\alpha_r (T_w - T_0)}{2\alpha_1} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R_0} \right)^2 \right] + T_0. \tag{7}$$

Температура на оси дуги, а следовательно в ее стволе, из уравнения (7) равняется

$$T_w = \frac{q}{4\alpha_1} R_0^2 - \frac{\alpha_r (T_w - T_0)}{2\alpha_1} + T_0. \quad (8)$$

Разрешая уравнение (8) относительно  $R_0$ , получаем (7):

$$R_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2}{(T_w - T_0)(2\alpha_1 + \alpha_r)\delta}}.$$

Используя вышеуказанные данные при  $I = 200$  А и  $T_w = 12000$  К и учитывая, что  $\alpha_1 = 0,8 \cdot 10^{-2}$  АВ/см<sup>2</sup>·С, при  $T_0 = 12000$  К получаем

$$R_0 = \frac{200}{2 \cdot 3,14} \sqrt{\frac{1}{(2 \cdot 0,8 + 1) \cdot 10^{-2} \cdot 60(12000 - 5000)}} = 0,43 \text{ см.}$$

Для определения радиуса канала дуги у электрода рассмотрим следующую задачу. Дуга, горящая стационарно, проходит через отверстие радиусом  $R_c$  медной пластины, которая охлаждается. Предположим, что температура у края отверстия пластины благодаря охлаждению постоянна и равна  $T_c$ .

Решение этой задачи представляет интерес, когда радиус отверстия меньше радиуса канала дуги, горящей в воздухе. В этом случае рассматривается трехслойная модель:  $\sigma = \text{const}$  при  $r = R_w$ ,  $T > T_w$ ;  $\sigma = 0$  при  $r = R_0$ ,  $T < T_0$ , где  $T_0 = 5000$  К – температура, при которой электропроводимость терпит разрыв;  $R_w$  – радиус канала дуги.

Для первой зоны будет справедливо уравнение теплового баланса (1) при граничных условиях: при  $r = 0$  значение  $T = T_w$ , а при  $r = R_w$  значение  $T = T_w$ . Решение этого уравнения имеет вид:

$$T_1 = \frac{q}{4\alpha_1} R_w^2 \left[ 1 - \left( \frac{r}{R_w} \right)^2 \right] + T_w. \quad (9)$$

Характер изменения в третьем слое  $\sigma = 0$  определяется при интегрировании уравнения теплового баланса:

$$\frac{d}{dr} \left( r \frac{dT}{dr} \right) = 0. \quad (10)$$

При граничных условиях:  $r = R_0$  значение  $T = T_0$ , а при  $r = R_c$  значение  $T = T_c$  решением (10) будет:

$$T_3 = (T_0 - T_c) \ln(r / R_0) + T_c. \quad (11)$$

Распределение температуры с индексом в переходном слое, т.е. между  $\sigma = \text{const}$  и  $\sigma = 0$ , определяется интегрированием (10) при граничных условиях: при  $r = R_w$  значение  $T = T_w$ , а при  $r = R_0$  значение  $T = T_0$ . Решение будет иметь вид:

$$T_2 = (T_w - T_0) \ln(r / R_w) + T_0. \quad (12)$$

Присутствие холодной пластины, безусловно, влияет на значения, характеризующие состояние дуги. Это влияние можно учесть наложением граничного условия стенки отверстия. Уравнение теплового баланса можно представить в виде:

$$\alpha_c \frac{dT_2}{dr} - \alpha(T_2 - T_0) = 0, \quad (13)$$

где  $\alpha_c$  – теплопроводность материала пластины;  $\alpha$  – коэффициент теплообмена пластины и горячей среды.

Если подставить (11) в (13), то получим уравнение с одним неизвестным  $R_0$ :

$$\alpha_c \frac{(T_0 - T_c)}{\ln R_0} - \alpha(T_c - T_0) = 0.$$

После простых алгебраических преобразований

$$R_0 = R_c \ln(-\alpha_c / \alpha). \quad (14)$$

Радиус  $R_w$  и температуру  $T_w$  можно определить, приняв дополнительные условия на границах между вторым и третьим слоями:

$$\left. \frac{dT_2}{dr} \right|_{r=R_0} = \left. \frac{dT_3}{dr} \right|_{r=R_0}$$

и между первым и вторым слоями:

$$\left. \frac{dT_1}{dr} \right|_{r=R_w} = \left. \frac{dT_2}{dr} \right|_{r=R_w}.$$

Используя эти граничные условия, получаем систему двух уравнений с двумя неизвестными  $T_w$  и  $R_w$ :

$$\begin{aligned} \frac{T_w - T_0}{\ln(R_w / R_0)} &= \frac{T_0 - T_c}{\ln(R_0 / R_c)}; \\ -\frac{q}{2\alpha_1} R_w &= \frac{T_w - T_0}{\ln(R_w / R_0)} \frac{1}{R_w}. \end{aligned} \quad (16)$$

Значения  $R_w$  определяются в виде:

$$-\frac{q}{\alpha_1} R_w^2 = \frac{(T_0 - T_c) R_c}{\ln R_0} = -\frac{\alpha R_c}{\alpha_c (T_0 - T_c)};$$

$$\frac{I^2}{2\pi^2 R_w^2 \alpha_1 \sigma} = \frac{\alpha R_c}{\alpha_c} (T_0 - T_c).$$

Окончательно получаем:

$$R_w = \frac{I}{2\pi} \sqrt{\frac{2\alpha_1}{\alpha \alpha_1^2 \alpha (T_0 - T_c) R_c}}. \quad (17)$$

А из первого уравнения находим:

$$T_w = T_0 - \frac{\alpha R_c}{\alpha_c} (T_0 - T_c) \ln R_w. \quad (18)$$

Максимальная температура на оси дуги

$$T_m = \frac{q}{4\alpha_1} R_w^2 + T_w. \quad (19)$$

После подстановки значений  $R_w$  и  $T_w$  уравнение (19) преобразуется к виду:

$$T_w = \frac{\alpha R_c (T_0 - T_c)}{2\alpha_c} \left( 1 - \frac{2 \ln R_w}{R_0} \right) + T_0 - \frac{\alpha R_c (T_0 - T_c) \ln R_w}{\alpha_c R_0}$$

или

$$T_w = \frac{\alpha R_c (T_0 - T_c)}{2\alpha_c} \left( 1 - \frac{2 \ln R_w}{R_0} \right) + T_0, \quad (20)$$

где  $R_w$  определяется по (17), а  $R_0$  — по (14).

При малых значениях  $R_c$  и больших значениях тока можно пренебречь переходной зоной, тогда расчет сильно упрощается и радиус канала ствола дуги будет равен

$$R_w = R_0 = R_c e^{-\frac{\alpha_c}{\alpha R_c}}. \quad (21)$$

Максимальная температура на оси дуги

$$T_m = \frac{I^2 e^{-\frac{2\alpha_c}{\alpha R_c}}}{4\pi^2 R_c^2 \alpha_1 \sigma} + T_0. \quad (22)$$

Таким образом, при выборе параметров пластин дугогасительной решетки можно ориентироваться в

первом приближении на результаты расчёта радиуса электрической дуги, полученные в данной работе.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики, т. 2, кн. 2. Теория электрофизических эффектов и задач. Харьков: Точка, 2010, 407 с.
2. Miller H.C. Anode Phenomena, in Handbook of Vacuum Science and Technology. Fundamentals and Applications/Ed. by R.L. Vohman, Noyes Publications, 1995, pp. 308–366.
3. Энгельшт В.С., Гурович В.Ц., Десятков Г.А. и др. Теория столба электрической дуги. Т.1. Низкотемпературная плазма. Новосибирск: Наука СО, 1990, 376 с.
4. Slade P.G. The Vacuum Interrupter. Theory, Design and Application. NY: CRC Press. 2008, ch. 2, 510 p.
5. Аверьянова С.А. Теория гашения дуги в электрических аппаратах. Взаимодействие дуги отключения с газовым потоком в выключателях высокого напряжения: Учебное пос. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015, 68 с.
6. Nitu C., Mihalache C., Anghelita P., Pavelescu D. Comparison between model and experiment in studying the electric arc. —Journal of Optoelectronics and ADvanced materials, 2008, vol. 10, No. 5, pp. 1192–1196.
7. Шахтарин Б.И., Ковригин В.А. Методы спектрального оценивания случайных сигналов. М.: Гелиос, 2005, 248 с.
8. Ильин А.С., Шишицын В.В. Влияние геометрии и материала элементов дугогасительной камеры на процессы гашения дуги в высоковольтной аппаратуре. — Научные труды II Отчетной конф. молодых ученых УГТУ-УПИ, Екатеринбург, 2002, с. 411–412.
9. Брон О.Б., Куклев Ю.В., Лярский Б.А. Газодинамические процессы в камерах электрических аппаратов с дугогасительной решёткой. — Электротехническая промышленность. Аппараты низкого напряжения, 1976, № 4 (53).
10. Брон О.Б., Жигайло Е.Ф., Куклев Ю.В., Лярский Б.А., Шевцов В.Д. Газодинамические характеристики дугогасительных устройств. — Электротехническая промышленность. Аппараты низкого напряжения, 1980, № 2(87).

[30.09.2019]

*А в т о р ы: Аполлонский Станислав Михайлович — доктор техн. наук, научный консультант ООО «Центр электромехатроники», диссертацию защитил в 1988 г.*

*Куклев Юрий Васильевич — кандидат техн. наук, доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, диссертацию защитил в 1982 г.*

## The Dependence of Processes in an Arc Chute on the Moving Electric Arc Radius

APOLLONSKY Stanislav M. (LLC «Centre of Electromechatronics», St. Petersburg, Russia) — Scientific Consiltant, Dr. Sci. (Eng.)

KUKLEV Yurry V. (Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia) — Associate Professor, Cand. Sci (Eng.)

*In electrical apparatuses containing an arc chute, arc occurs initially on the contacts arranged between the insulating walls spaced at a relatively wide distance from each other, after which the electromagnetic forces drive the arc into the area occupied by the chute plates. Electric arc is a complex phenomenon, in which a large number of physical interactions occur within a very short period of time. An analysis and calculation of arc processes in the arc quenching devices of electrical apparatuses imply simultaneous consideration of thermal gas dynamic, kinetic, electrical (network), arc, and mechanical processes. This adds much difficulty to a search of acceptable models that would satisfy all these requirements. The difficulties of solving the equations that are based on the general principles of thermodynamics and the laws of continuum mechanics are connected, in particular, with the validity of boundary and initial conditions, which are usually selected with due regard for experimental data (it should be noted that the experimental techniques in studying an arc are quite sophisticated and costly). In the course of many years, many electric arc modeling methods have been developed. The following three basic types of electric arc models should be pointed out: a physical model, a black box model, and a parametric model. These models cannot show all physical processes in an electric arc, but they can describe the variations of the main parameters. The physical processes accompanying the arc motion can slow down or even stop its displacement, which may lead to an emergency. Therefore, it is very important to select the arch chute parameters in such a way that it would offer the lowest resistance to the arc motion. In this regard, it is of primary importance to estimate the electric arc channel radius. The article is devoted to calculating the electric arc channel radius. The calculations presented in the article can be useful in selecting the parameters of arc chute plates.*

**Key words:** *electric apparatuses, arc chute, electric arc, channel radius, calculation*

#### REFERENCES

1. **Baranov M.I.** *Izbrannyye voprosy elektrofiziki, t. 2, kn. 2. Teoriya elektrofizicheskikh effektov i zadach* (Selected Questions of Electrophysics, vol. 2, vol. 2. The theory of electrophysical effects and tasks). Khar'kov: Tochka, 2010, 407 p.
2. **Miller H.C.** Anode Phenomena, in Handbook of Vacuum Science and Technology. Fundamentals and Applications/Ed. by R.L. Boxman, Noyes Publications, 1995, pp. 308–366.
3. **Engel'sht V.S., Gurovich V.TS., Desyatkov G.A. et al.** *Teoriya stolba elektricheskoy dugi. T.1. Nizkotemperaturnaya plazma* (The theory of an electric arc column. T.1. Low temperature plasma). Novosibirsk: Nauka, SO, 1990, 376 p.
4. **Slade P.G.** The Vacuum Interrupter. Theory, Design and Application. NY: CRC Press. 2008, ch. 2, 510 p.
5. **Aver'yanova S.A.** *Teoriya gasheniya dugi v elektricheskikh apparatakh. Vzaimodeystviye dugi otklyucheniya s gazovym potokom v vyklyuchatelyakh vysokogo napryazheniya: Uchebnoye pos.* (Theory of arc quenching in electrical apparatus. The interaction of a tripping arc with a gas stream in high voltage circuit breakers: Educational pos.). SPb., Publ. of Polytechnic. University, 2015, 68 p.
6. **Nitu C., Mihalache C., Anghelita P., Pavelescu D.** Comparison between model and experiment in studying the electric arc. – Journal of Optoelectronics and ADvanced materials, 2008, vol. 10, No. 5, pp. 1192–1196.
7. **Shakhtarin B.I., Kovrigin V.A.** *Metody spektral'nogo otsenivaniya sluchaynykh signalov* (Methods for spectral estimation of random signals). M.: Gelios, 2005, 248 p.
8. **Il'in A.C., Shipitsyn V.V.** *Vliyaniye geometrii i materiala elementov dugogasitel'noy kamery na protsessy gasheniya dugi v vysokovol'tnoy apparature. – Nauchnyye trudy II Otchetnoy konf. molodykh uchenykh UGTU-UPI* (Influence of the geometry and material of the elements of the arcing chamber on the processes of arc quenching in high-voltage equipment. – Scientific works of the II Reporting Conf. young scientists USTU-UPI, Yekaterinburg, 2002, pp. 411–412.
9. **Bron O.B., Kuklev YU.V., Lyarskiy B.A.** *Elektrotekhnicheskaya promyshlennost'. Apparaty nizkogo napryazheniya. – Russ. (Electrical industry. Low voltage devices), 1976, No. 4 (53).*
10. **Bron O.B., Zhigaylo Ye.F., Kuklev YU.V., Lyarskiy B.A., Shevtsov V.D.** – *Elektrotekhnicheskaya promyshlennost'. Apparaty nizkogo napryazheniya – in Russ. (Gas-dynamic characteristics of arcing devices. – Electrical industry. Low voltage devices), 1980, No. 2(87).*

[30.09.2019]