

## Анализ моделей излучения сильноточной фазы дуги переменного тока

© С.А. Аверьянова, Н.В. Образцов, Н.К. Куракина, Е.Н. Тонконогов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: obraztsovnikita@yandex.ru

Поступило в Редакцию 3 мая 2024 г.

В окончательной редакции 30 октября 2024 г.

Принято к публикации 30 октября 2024 г.

В настоящее время при исследовании энергообмена между дугой и газовым потоком в дугогасительных устройствах газовых высоковольтных выключателей широко применяется численное моделирование. В сильноточной фазе основным фактором, оказывающим влияние на энергообмен, является излучение. Исследованы различные модели излучения и проведен их анализ. Представлено описание рассматриваемых моделей излучения, а также осуществлена их реализация в пакете COMSOL Multiphysics. Проведено сравнение расчетных результатов, полученных при использовании различных моделей, с экспериментальными данными. Сформулированы рекомендации по использованию моделей.

**Ключевые слова:** дуга отключения, сильноточная фаза, численное моделирование, излучение.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.24.59446.6545k

Одной из основных характеристик высоковольтного коммутационного газонаполненного оборудования является его отключающая способность, которая определяется скоростью восстановления прочности межконтактного промежутка. На процесс восстановления прочности влияет предыстория потока: характеристики дугового разряда в сильноточной фазе, когда значения тока дуги близки к амплитудным, например тепловой кризис течения, характерный для отключения больших токов; изменение геометрии сопла при коммутации номинальных токов отключения; рост температуры дугогасящего потока в сильноточной фазе при использовании автогенерирующих камер. Однако экспериментальное исследование параметров дуги в сильноточной фазе сталкивается с трудностями, связанными с высокой плотностью плазмы, поскольку оптические методы дают информацию в основном о периферийных областях разряда [1].

Моделирование дугогасительного устройства высоковольтного коммутационного газонаполненного оборудования представляет собой сложную междисциплинарную задачу. Излучение является основным механизмом энергообмена дуги и газовой среды в сильноточной фазе [1,2]. Расчет излучения представляет собой многопараметрическую задачу. Численное моделирование служит мощным инструментом, который позволяет исследовать влияние излучения на сильноточную фазу горения дуги.

Основная цель настоящей работы состоит в исследовании моделей излучения. Моделирование проводится в пакете COMSOL Multiphysics на основе системы магнитогидродинамических уравнений без учета влияния магнитного поля.

В работе используется два подхода к моделированию излучения. Первый подход основан на использовании модели лучистой теплопроводности, которая была разработана в [3]. Суть модели состоит в следующем: в

предположении изотропности излучения и локального термодинамического равновесия излучения с веществом (плазма оптически толстая, что характерно для дуг отключения [3]) в уравнение баланса энергии добавляется дополнительная величина, характеризующая поток лучистой энергии ( $\mathbf{q}_{rad}$ ), определяемая как

$$\mathbf{q}_{rad} = -\lambda_{\psi} \nabla T, \quad (1)$$

где  $\lambda_{\psi}$  — коэффициент лучистой теплопроводности, который определен в соответствии с [4] как

$$\lambda_{\psi} = k_{\psi} c_p, \quad k_{\psi} = C_{\psi} \begin{cases} 0, & \text{если } T \leq T_s, \\ \left(\frac{T_{av}}{T_s} - 1\right)^3, & \text{если } T > T_s, \end{cases} \quad (2)$$

где  $C_{\psi} = 2 \cdot 10^{-4}$  — эмпирический коэффициент,  $T_{av}$  — среднее значение температуры газа на оси,  $T_s$  — температура, ниже которой газ не излучает.

Второй подход основан на уравнении переноса излучения, реализованном в модуле Radiation in Participating Media (rpm) в пакете COMSOL Multiphysics. Из доступных в данном модуле моделей была выбрана модель P1. Перенос излучения в этом случае описывается уравнением

$$\nabla[-D_{p1} \nabla G] = -\kappa[G - 4\pi I_b(T)],$$

$$D_{p1} = \frac{1}{3(\kappa + \sigma_s)}, \quad I_b(T) = \frac{n_r^2 \sigma T^4}{\pi}, \quad (3)$$

где  $G$  — интенсивность излучения,  $I_b$  — спектральная интенсивность излучения черного тела,  $\kappa$  — коэффициент поглощения,  $\sigma_s$  — коэффициент рассеяния,  $n_r$  — коэффициент преломления.

Источниковый член в уравнении энергии, учитывающий влияние излучения, определяется как

$$Q_r = \kappa[G - 4\pi I_b(T)]. \quad (4)$$

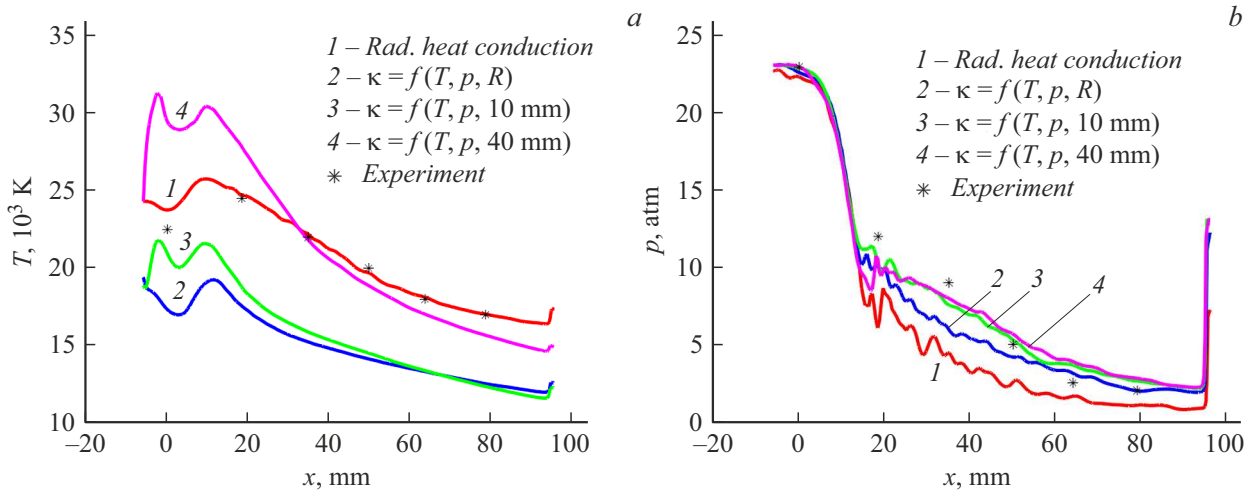


Рис. 1. Распределение температуры (a) и давления (b) вдоль оси.

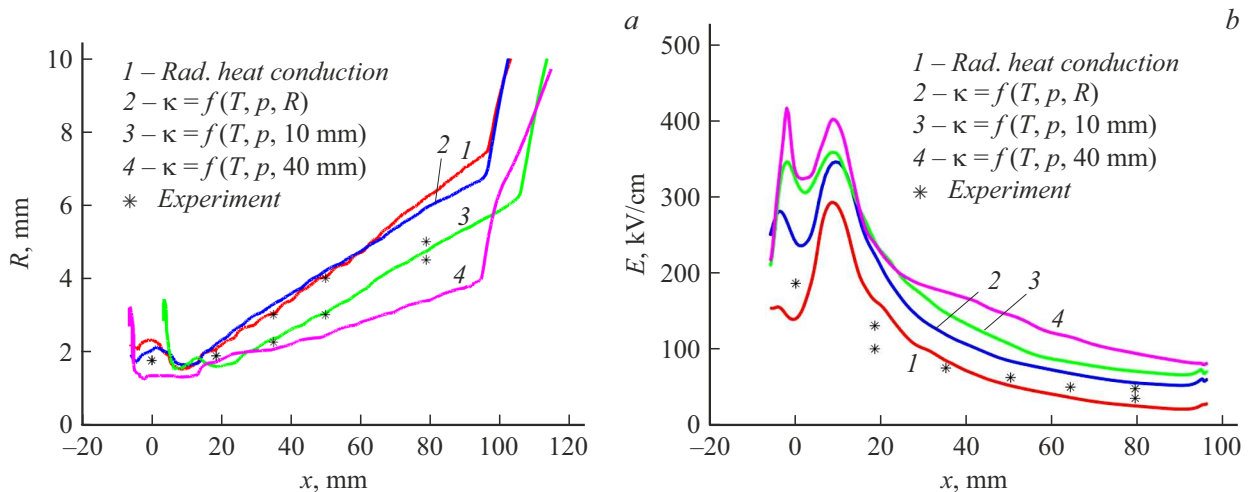


Рис. 2. Распределение радиуса дуги (a) и напряженности электрического поля (b) вдоль оси.

В настоящей работе для коэффициентов, входящих в модель, приняты следующие значения. Коэффициент  $n_r$  принят равным единице. Величина коэффициента поглощения зависит от значений температуры, давления и радиуса дуги. Расчет коэффициента поглощения для азота осуществлялся в пакете Fluid Workbench v3.1 в диапазоне температур от 300 до 30 000 K и давлений от 1 до 30 atm. Термодинамический расчет проводился для следующих компонентов:  $e$ ,  $N$ ,  $N_2$ ,  $N_3$ ,  $N^{2+}$ ,  $N^{3+}$ ,  $N^{4+}$ ,  $N^{5+}$ ,  $N^{6+}$ ,  $N_2^+$ . Коэффициент поглощения рассчитан для радиусов дуги, равных 1, 5, 10, 20 и 40 mm.

Расчеты были проведены для дугогасительного устройства одностороннего дутья с двумя ступенями давления. Геометрия канала типа сопла Лавала построена по данным, приведенным в [4,5]. Сопло Лавала является осесимметричным, радиус горловины канала составляет 6 mm, угол полураствора диффузора  $4^\circ$ , полная длина сопла 110 mm, длина конфузурной части 10 mm. Рабочий газ — азот ( $T_s = 8000$  K в соответствии

с [6]), перепад давления  $p_1 : p_2 = 23 : 1$  обеспечивает работу сопла в расчетном режиме. В работе рассматривалась стационарная дуга с током  $I = 2$  kA, результаты расчетов сравнивались с опытными данными [5].

Поскольку зависимость коэффициента поглощения многопараметрическая, были проведены расчеты для различных комбинаций параметров:  $\kappa = f(T, p, R)$  — коэффициент поглощения зависит от трех параметров,  $\kappa = f(T, p, 10 \text{ mm})$  — коэффициент поглощения зависит от двух параметров при фиксированном радиусе дуги 10 mm,  $\kappa = f(T, p, 40 \text{ mm})$  — коэффициент поглощения зависит от двух параметров при фиксированном радиусе 40 mm. Радиус дуги в расчете определяется по изотерме 4000 K и вычисляется как среднее значение радиуса по длине канала.

Распределение термодинамических параметров по оси канала для различных моделей в сопоставлении с экспериментальными данными приведено на рис. 1. Анализ данных, представленных на рис. 1, a, показывает, что рас-

чет по модели лучистой теплопроводности с выбранным полуэмпирическим коэффициентом позволяет получить согласие расчетных и экспериментальных данных. В то же время ни одна из кривых, рассчитанных на основании модуля излучения грт, не показала согласия с экспериментальными данными.

При расчете с использованием значений  $\kappa = f(T, p, 40 \text{ mm})$  величина коэффициента  $\kappa$  уменьшается по сравнению со значением для  $\kappa = f(T, p, 10 \text{ mm})$ . Так, при температуре 10 000 К и радиусе 10 mm он равен  $866 \text{ m}^{-1}$ , при радиусе 40 mm —  $217 \text{ m}^{-1}$ , при температуре 30 000 К и радиусе 10 mm он равен  $470 \text{ m}^{-1}$ , при радиусе 40 mm —  $117 \text{ m}^{-1}$ . Четырехкратное уменьшение значения коэффициента  $\kappa$  приводит к недооценке величины излучения в конфузоре. При использовании величины  $\kappa$  для большего радиуса кривая температуры оказывается выше экспериментальных значений.

Расчеты для величин  $\kappa = f(T, p, R)$  и  $\kappa = f(T, p, 10 \text{ mm})$  близки в диффузоре. Причина этого состоит в том, что в стационарном режиме среднее по длине канала значение радиуса дуги в диффузоре близко к зафиксированному радиусу в 10 mm. Однако радиус дуги переменен по длине канала (рис. 2, *a*), что необходимо учитывать в расчете, поскольку коэффициент поглощения существенно зависит от радиуса.

Кривые давления, полученные при использовании модуля грт, показывают лучшее согласие расчета с экспериментом, чем модель лучистой теплопроводности, которая дает заниженный результат (рис. 1, *b*).

Распределение величины напряженности поля (рис. 2, *b*) при использовании модуля грт оказывается завышенным по сравнению с экспериментальными данными. Величину напряженности в сечении можно оценить как отношение тока к средней по сечению проводимости [4]. Тогда при постоянном значении тока для  $\kappa = f(T, p, R)$  и  $\kappa = f(T, p, 10 \text{ mm})$  причиной несогласованности расчетных и экспериментальных данных является заниженная расчетная температура. Снижение температуры приводит к уменьшению величины проводимости в дуге. Для  $\kappa = f(T, p, 40 \text{ mm})$  занижение радиуса дуги (рис. 2, *a*) влечет за собой уменьшение интегрального значения проводимости в сечении.

Таким образом, в работе показано, что использование модели лучистой теплопроводности позволяет получить согласие расчетных и экспериментальных данных, не приводит к увеличению времени расчета и усложнению используемой модели дуги. Применение модуля грт для решения дополнительного уравнения переноса излучения приводит к усложнению модели, поскольку требует решения дополнительного дифференциального уравнения в частных производных с коэффициентами, зависящими от параметров дуги (температуры, давления, радиуса дуги).

## Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке (финансовом обеспечении) в рамках темы исследований по госзаданию FSEG-2023-0012.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] А.А. Богомаз, А.В. Будин, В.В. Забродский, И.В. Кузнецова, С.Ю. Лосев, М.В. Петренко, М.Э. Пинчук, Ф.Г. Рутберг, ПТЭ, № 5, 114 (2008). [A.A. Bogomaz, A.V. Budin, V.V. Zabrodskii, I.V. Kuznetsova, S.Yu. Losev, M.V. Petrenko, M.E. Pinchuk, Ph.G. Rutberg, Instrum. Exp. Tech., **51** (5), 744 (2008). DOI: 10.1134/S0020441208050163].
- [2] M.I. Boulos, P.L. Fauchais, E. Pfender, *Handbook of thermal plasmas* (Springer, Cham, 2023).
- [3] M. Seeger, Plasma Chem. Plasma Process., **35** (3), 527 (2015). DOI: 10.1007/s11090-014-9595-4
- [4] С.А. Аверьянова, *Численное моделирование потока газа в дугогасительном устройстве высоковольтного выключателя*, автореф. канд. дис. (СПбГПУ, СПб., 2005).
- [5] W. Hermann, U. Kogelschatz, L. Niemeyer, K. Ragaller, E. Schade, J. Phys. D: Appl. Phys., **7** (12), 1703 (1974). DOI: 10.1088/0022-3727/7/12/317
- [6] В.С. Энгельшт, Б.А. Урюков, *Низкотемпературная плазма* (Наука, Новосибирск, 1990), т. 1.