

Влияние плотности дугогасящей среды на скорость восстановления прочности межконтактного промежутка

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

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

E-mail: nkuriee@gmail.com

Поступило в Редакцию 5 мая 2025 г.

В окончательной редакции 4 сентября 2025 г.

Принято к публикации 4 сентября 2025 г.

Исследуется взаимозависимость между генерацией турбулентности и процессами восстановления прочности в тепловой фазе пробоя для газов различной плотности (N_2 , CO_2 , SF_6) в характерной конфигурации дугогасительного устройства на основе сопла Лавая.

Ключевые слова: дуга отключения, восстановление электрической прочности межконтактного промежутка, турбулентность, отключающая способность, численное моделирование.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.24.61755.8074

Одной из основных проблем при повышении номинальных параметров на один разрыв в дугогасительных устройствах высоковольтных газонаполненных выключателей переменного тока (ДУ) является увеличение отключающей способности. Основным рабочим газом в ДУ, рассчитанных на сверхвысокий класс напряжений и большие номинальные токи отключения, основной изоляционной и дугогасящей средой является элегаз (SF_6). Однако элегаз является парниковым газом с большим значением потенциала глобального потепления ($GWP = 23\,500$) [1]. Поэтому последние десятилетия ведутся активные поиски альтернативных дугогасящих сред для замены элегаза. Внимание исследователей уделяется изоляционным газовым средам с небольшой относительно SF_6 плотностью (сухой воздух, N_2 , CO_2), а также газам, обладающим плотностью, близкой или большей, чем у SF_6 (например, C_4F_7N , $C_5F_{10}O$), и их смесям с более легкими газами (сухой воздух, N_2 , CO_2) [2]. Альтернативные газовые среды, такие как сухой воздух, CO_2 , N_2 , характеризуются замедленным восстановлением электрической прочности межконтактного промежутка ДУ после нуля тока по сравнению с SF_6 . Процесс восстановления электрической прочности условно подразделяется на четыре фазы [3]. Переход от одной фазы к другой происходит непрерывно. Первая фаза связана с тепловым пробоем и длится несколько микросекунд после нуля тока. Именно тепловая фаза играет важную роль в процессе восстановления электрической прочности. Существенное влияние на скорость восстановления электрической прочности межконтактного промежутка в фазе теплового пробоя оказывает структура газового потока: распределение полей давления, наличие ударных волн, интенсификация турбулентности дугогасящего потока. При этом перед нулем тока и в режиме тепловой фазы пробоя в экспериментах наблюдается рост кинетической энергии турбулентных пульсаций [4–6].

В работе проведен анализ влияния плотности дугогасящего газа на скорость роста энергии турбулентности в нуле тока на основе уравнения баланса энергии турбулентности. Выполнен численный эксперимент для сравнения скорости восстановления электрической прочности межконтактного промежутка в следующих газах: N_2 , CO_2 , SF_6 . Ввиду того что в настоящее время менее доступны и недостаточно изучены экспериментальные данные для альтернативных газов с большей плотностью, чем у SF_6 (например, C_4F_7N , $C_5F_{10}O$), исследование данных дугогасящих сред в работе не проводилось.

В [7] показано, что кинетическая энергия турбулентности в единице объема $E_t = \overline{\rho' u'_k u'_k} / 2$ (где u'_k — проекции пульсационной составляющей скорости на соответствующие оси) растет вследствие наличия в уравнении генерационного члена, пропорционального $d\bar{u}/dt$ ($\bar{u}$ — среднее значение скорости в направлении оси x). Вблизи нуля тока можно пренебречь остальными членами в правой части уравнения турбулентной кинетической энергии. В этом случае уравнение примет вид

$$\frac{dE_t}{dt} = -\overline{\rho' u'} \frac{d\bar{u}}{dt}, \quad (1)$$

где верхняя черта — знак среднего значения, штрих — знак флуктуационного значения, ρ' — пульсация плотности газовой среды. В произвольном сечении канала справедливо приближенное равенство [8] для связи осредненных величин плотности и скорости

$$\overline{\rho_a} \bar{u}_a^2 \cong \overline{\rho_e} \bar{u}_e^2. \quad (2)$$

В уравнении (2) нижний индекс a соответствует параметрам в турбулентном ядре дуги, нижний индекс e — параметрам в потоке холодного газа. Необходимо отметить, что формула (2) будет справедлива для двух

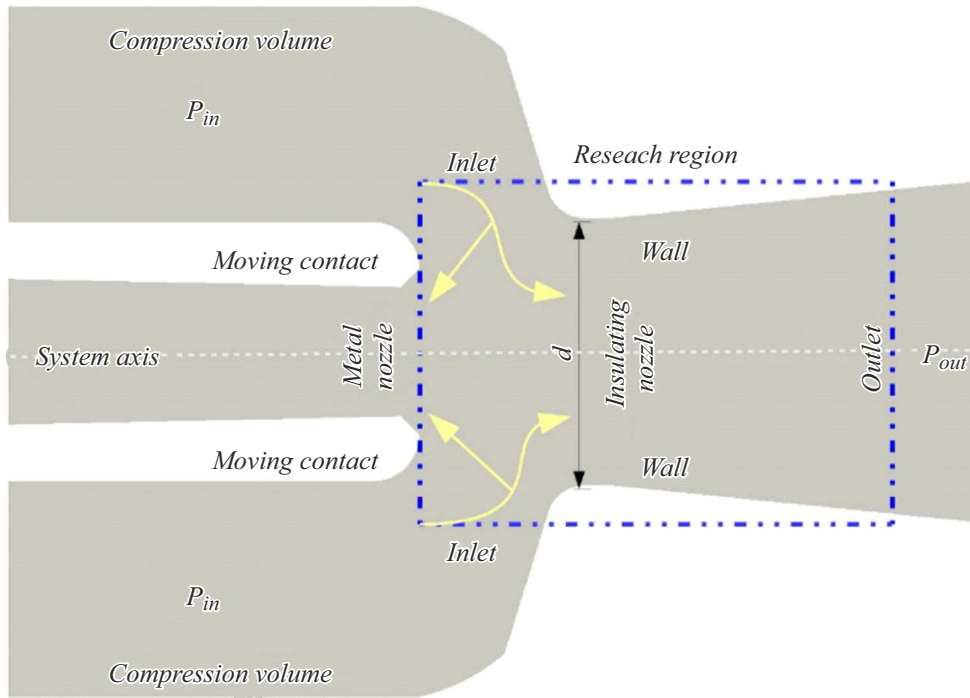


Рис. 1. Характерная конфигурация ДУ на основе сопла Лавали.

любых точек сечения. В [7] показано также, что

$$\overline{\rho' u'} = Cl^2 \frac{\partial^2 \sqrt{\rho}}{\partial r^2}, \quad (3)$$

где $C = \sqrt{\overline{\rho_e u_e}} = \text{const}$, l — путь смещения, который для дуговых задач принято определять, как радиус дуги отключения.

Используя уравнения (2), (3) и формулу для приближенного расчета второй производной, можно получить следующее выражение:

$$\begin{aligned} \frac{dE_t}{dt} &= -C\sqrt{\rho_e} \left(1 - \frac{\sqrt{\rho_{e/2}}}{\sqrt{\rho_e}} + \frac{\sqrt{\rho_a}}{\sqrt{\rho_e}} \right) \frac{d\bar{u}}{dt} \\ &= -C\sqrt{\rho_e} \left(1 - \frac{\sqrt{\rho_{e/2}}}{\sqrt{\rho_e}} + \frac{\sqrt{\rho_a}}{\sqrt{\rho_e}} \right) \frac{d}{dt} \left(\sqrt{\frac{\rho_e}{\rho_a}} \bar{u}_e \right), \end{aligned} \quad (4)$$

где нижний индекс $e/2$ характеризует параметры в слое смещения между ядром дуги и холодным газом. Скорость потока в холодном газе в течение рассматриваемых временных промежутков в выбранном сечении изменяется слабо по сравнению со скоростью изменения плотности. Ее можно считать постоянной величиной на заданном промежутке времени. Таким образом, скорость изменения кинетической энергии турбулентности в единице объема зависит от скорости изменения плотности дугогасящей среды. С ростом плотности скорость нарастания энергии турбулентности будет увеличиваться и, следовательно, теплоотвод от дуги будет протекать интенсивнее, что позволит повысить скорость восстанов-

ления электрической прочности промежутка и улучшить отключающую способность ДУ.

На рис. 1 показана конфигурация ДУ на основе сопла Лавали, характерная для большинства конструкций высоковольтных газонаполненных выключателей переменного тока. Расчетная область выделена штрихпунктирными линиями. Стрелками показано направление потока газа. Численное моделирование проводится на основе экспериментальных данных [9]: диаметр горловины сопла $d = 12 \text{ mm}$, перепад давления $P_{in} : P_{out} = 3.4 : 1 \text{ atm}$. Изменение тока во времени соответствует синтетической схеме, где стационарное значение $I_{\max} = 1.5 \text{ kA}$, $dI/dt = -27 \text{ A}/\mu\text{s}$. В качестве рабочих сред рассматриваются N_2 , CO_2 , SF_6 . Для численного моделирования влияния дугогасящих газов на скорость восстановления прочности межконтактного промежутка используется усредненная по времени система магнитогидродинамических уравнений, дополненная законом Ома, моделью турбулентной вязкости и переноса излучения [10]. Модель турбулентности на первом этапе синтетической схемы (ток постоянен, стационарное состояние) учитывает два типа неустойчивости: сдвиговую неустойчивость в слое смещения между ядром дуги и холодным газом и неустойчивость Рэлея–Тейлора [10]. Для анализа второго этапа синтетической схемы (ток уменьшается по линейному закону, нестационарное состояние) применяется теория „замораживания“ кинематической турбулентной вязкости [10]: в период падения тока кинематическая турбулентная вязкость предполагается постоянной и равной ее стационарному значению. Для моделирования переноса излучения использовалось

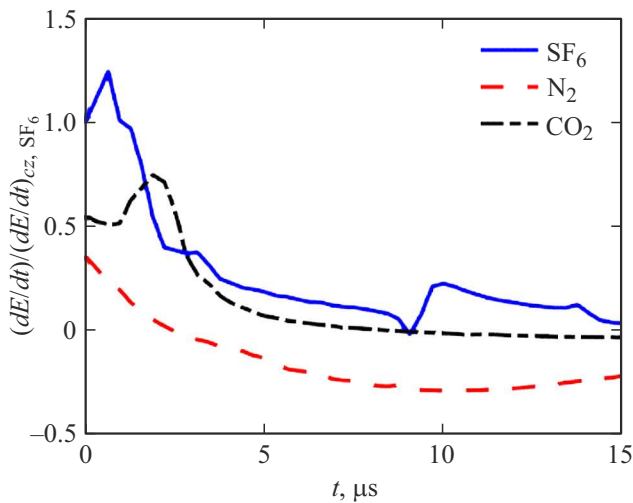


Рис. 2. Зависимость кинетической энергии турбулентности на оси в горловине изоляционного сопла от времени после нуля тока.

приближение „лучистой теплопроводности“ [10]. Перенос излучения вносит существенный вклад в перенос тепла при максимальном значении тока (но не в нуле тока) и не оказывает влияния в последующем восстановлении прочности межконтактного промежутка в тепловой фазе пробоя.

Из экспериментов [4] известно, что после нуля тока, в фазе теплового пробоя, на оси дуги существуют участки, где температура падает быстрее, чем в других областях дуги. Электрическая прочность газа начнет восстанавливаться, если температура на оси дуги хотя бы в двух точках [11] достигнет значений 3000 К для элегаза и 4000 К для N_2 и CO_2 [12,13]. Скорость восстановления прочности зависит от длины непроводящего участка и давления на этом промежутке.

Результаты численного моделирования представлены на рис. 2–4. На рис. 2 показано относительное изменение значения вычисленной по формуле (4) кинетической энергии турбулентности на оси в горло-

вине изоляционного сопла $\frac{dE_t}{dt} / \left(\frac{dE_t}{dt}\right)_{cz, SF_6}$ как функция времени после нуля тока (cz) для различных дугогасящих газов. В качестве масштабного значения выбрана величина изменения энергии турбулентности в нуле тока в элегазе. Анализ кривых показывает, что генерация кинетической энергии турбулентности в элегазе имеет наибольшее значение в течение первых нескольких микросекунд. SF_6 имеет наибольшее значение плотности из трех рассматриваемых газов и наименьшее значение осевой температуры (рис. 3, а) в нуле тока в горловине и первой трети диффузора, где начинается восстановление прочности межконтактного промежутка. При этом легкие газы, N_2 и CO_2 , имеют схожее значение температуры в горловине и плато вблизи горловины сопла и в диффузоре. Сходное значение температурных кривых можно объяснить малым значением угла полураствора диффузора и близкими значениями показателя адиабаты для N_2 и CO_2 . Необходимо отметить, что генерация турбулентности в азоте (рис. 2) падает до отрицательных значений через 2 μs после нуля тока. Таким образом, интенсивность турбулентности не увеличивается после нуля тока, а падает, энергоотвод от дуги отключения снижается. Данный вывод подтверждается распределением средней по оси температуры $T_{axis mid}$ в нуле тока и в тепловой фазе пробоя, приведенным на рис. 3, б. Процесс восстановления прочности в тепловой фазе пробоя в N_2 начинается позже, чем в двух других исследуемых газах. Скорость роста предельного напряжения пробоя U определяет скорость восстановления электрической прочности межконтактного промежутка. Рис. 4 показывает характер изменения U в зависимости от времени после нуля тока и подтверждает ослабление теплоотвода за счет уменьшения генерации турбулентности в N_2 . Временной промежуток от перехода тока через нуль до момента, когда газ стал непроводящим по крайней мере в двух расчетных точках, определяет время задержки восстановления электрической прочности промежутка. Кривая, соответствующая N_2 , имеет максимальное значение времени задержки и наименьшее значение напряжения пробоя U на всем исследуемом промежутке времени. В то же время CO_2 и SF_6 , имеющие близкий уровень

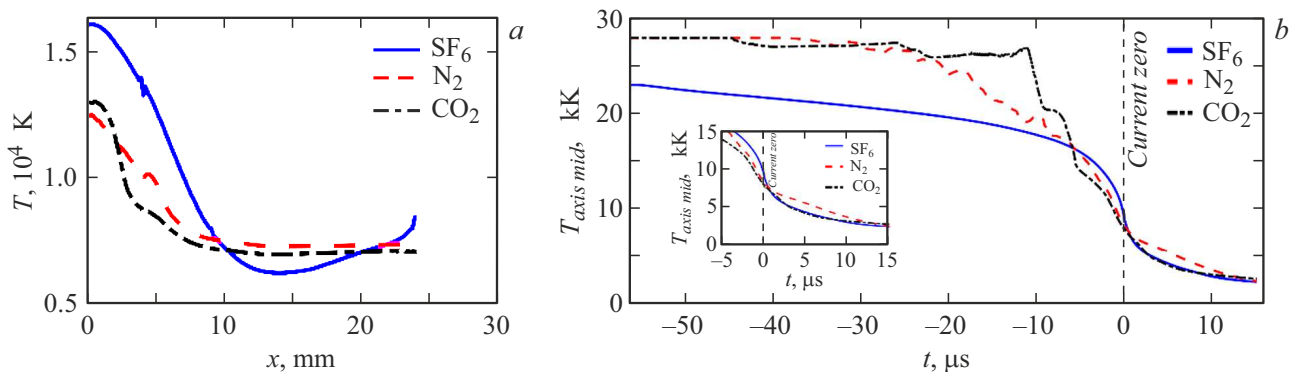


Рис. 3. Температура вдоль оси системы для различных дугогасящих газов: в нуле тока (а) и в окрестности нуля тока (б).

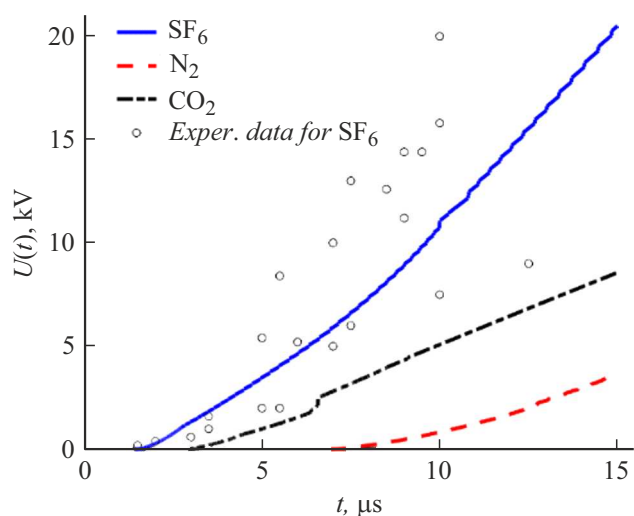


Рис. 4. Скорость роста предельного напряжения пробоя как функция времени после нуля тока для различных дугогасящих газов.

генерации турбулентности, имеют и близкие по величине времена задержки восстановления электрической прочности, что подтверждается рис. 4. Сравнительный анализ результатов расчета и экспериментальных данных [9] на рис. 4 подтверждает близость выводов работы с общими представлениями о процессе восстановления прочности межконтактного промежутка в различных дугогасящих газах.

В настоящей работе на основании аналитического анализа показано влияние плотности дугогасящего газа на скорость роста энергии турбулентности в нуле тока. Получено, что с увеличением плотности скорость роста кинетической энергии турбулентности возрастает, что приводит к интенсификации теплоотвода от дуги в нуле тока и фазе теплового пробоя. Численное исследование скорости роста предельного напряжения пробоя (восстановления электрической прочности межконтактного промежутка) в атмосфере газов N_2 , CO_2 , SF_6 подтверждает данный вывод. Для альтернативных газов с большей, чем у SF_6 , плотностью исследованные эффекты должны быть более выражены, что будет исследовано в дальнейшем. Таким образом, при проектировании новых ДУ на большие значения номинальных параметров необходимо уделить внимание исследованиям альтернативных газов с большей или сравнимой по величине плотностью, чем у элегаза.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] C.M. Franck, A. Chachereau, J. Pachin, IEEE Electr. Insul. Mag., **37** (1), 7 (2021). DOI: 10.1109/MEI.2021.9290463
- [2] L. Zhong, J. Wang, J. Xu, X. Wang, M. Rong, Plasma Chem. Plasma Process., **39**, 1379 (2019). DOI: 10.1007/s11090-019-10015-8
- [3] H. Ikeda, T. Ueda, A. Kobayashi, M. Yamamoto, S. Yanabu, IEEE Trans. Power Appar. Syst., **PAS-103** (10), 3038 (1984). DOI: 10.1109/TPAS.1984.318308
- [4] К. Рагаллер, *Отключение токов в сетях высокого напряжения* (Энергоиздат, М., 1981), с. 301 [K. Ragaller, *Current interruption in high voltage networks* (Plenum Press, N.Y., 1978).]
- [5] R. Bini, N.T. Basse, M. Seeger, J. Phys. D, **44**, 025203 (2011). DOI: 10.1088/0022-3727/44/2/025203
- [6] Е.П. Бельков, ЖТФ, **44** (9), 1946 (1974).
- [7] S. Averianova, N. Akatnov, E. Tonkonogov, in *XVI Symp. on physics of switching arc* (Brno, Czech Republic, 2005), vol. 1, p. 13–17.
- [8] J.D. Yan, K.I. Nuttall, M.T.C. Fang, J. Phys. D, **32**, 1401 (1999). DOI: 10.1088/0022-3727/32/12/317
- [9] H.-R. Moll, *Untersuchungen über die dielektrische Verfestigung bei SF-6-Leistungsschaltern*, Diss. Arb. (ETH, Zürich, 1983).
- [10] S. Averianova, N. Akatnov, E. Tonkonogov, in *VII Int. Conf. „Plasma physics and plasma technology“* (Minsk, Belarus, 2012), p. 655–658.
- [11] С.А. Аверьянова, *Теория гашения дуги в электрических аппаратах. Взаимодействие дуги отключения с газовым потоком* (2024) [Электронный ресурс]. <http://elibr.spbstu.ru/dl/2/5480.pdf>
- [12] B. Chervy, A. Gleizez, M. Razafinimanana, J. Phys. D, **27**, 1193 (1994). DOI: 10.1088/0022-3727/27/6/017
- [13] В.С. Энгельшт, А.Б. Урюков, *Низкотемпературная плазма* (Наука, Новосибирск, 1990), т. 1.