

## Восстановление электрической прочности в соплах дугогасительных устройств при синхронной газовой инжекции

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

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Институт энергетики, Высшая школа электроэнергетических систем, Санкт-Петербург, Россия*

*\*obraztsovnika@yandex.ru*

**Аннотация.** В работе проводится исследование подхода синхронной газовой инжекции на примере модельного дугогасительного устройства одностороннего продольного воздушного дутья с целью ускорения восстановления электрической прочности межконтактного промежутка. Используются методы численного моделирования газодинамических. Интенсификация охлаждения области горловины сопла, увеличение давления и массового расхода в начальной части диффузора сопла подтверждает эффективность воздействия синхронной газовой инжекции. В работе оцениваются теплофизические и транспортные свойства воздушной плазмы с примесью паров эродированного материала (медь) в диапазоне 300-20000К. Расчет состава среды подтверждает снижение концентрации электронов при синхронной газовой инжекции, что обеспечивает дополнительную деионизацию в соплах дугогасительных устройств. На основании оценки электропроводности плазмы показан рост напряженности электрического поля. Зафиксирован рост скорости восстановления электрической прочности промежутка перед нулем тока на ~11–24% в рассматриваемом диапазоне температур 2000–8000 К.

**Ключевые слова:** синхронная газовая инжекция, дугогасительное устройство, восстановление электрической прочности промежутка, расчет состава плазмы, электропроводность плазмы.

### 1. Введение

Увеличение скорости восстановления электрической прочности в дугогасительных устройствах высоковольтных газонаполненных выключателей переменного тока (ДУ) приводит к росту отключающей способности аппарата. Управляемая коммутация, или синхронизированное размыкание контактов за несколько миллисекунд до нуля тока, позволяет обеспечить эффективный энергообмен между остаточным дуговым столбом и газовым потоком за счет роста конвективной составляющей [1]. Предлагаемый подход синхронной газовой инжекции (СГИ) основан на преимуществах управляемой коммутации и опыте успешного использования газовых струй для управления потоком в металлургии и ракетно-космической технике [2, 3] и представляет собой кратковременный импульс газа повышенного давления перед нулем тока в область вверх по потоку ДУ. Для обеспечения интенсивности СГИ на уровне, как минимум, звукового воздействия необходимо соблюдение критического истечения газа через горловину сопла. Величина критического значения избыточного давления определяет диапазон наиболее эффективного значения давления СГИ, в 2–3 раза превышающего номинальное давление в рабочей области при условии максимального воздействия на скорость роста напряжения в тепловой фазе пробоя [4]. Для длительности импульса устанавливается величина 2–3 мс при превышении давления СГИ над базовым потоком газа в 3 раза и введении в рабочую область за 1 мс до нуля тока [5, 6]. Эффективность импульса газа указанных параметров для процесса дугогашения экспериментально подтверждена в [7].

В дугогасительных устройствах дуга отключения может гореть несколько десятков миллисекунд до полного погасания. Все это время она контактирует с электродами, которые имеют в своем составе медь. Эрозия электродов в процессе горения дуги приводит к тому, что пары металла, испаряясь, попадают в межконтактный промежуток. Поскольку пары меди являются поставщиками свободных электронов в межконтактный промежуток, учет их влияния на транспортные и термодинамические параметры плазмы необходим для

корректного предсказания пробоя. Особенно это важно для изучения последовательных отключений, когда пары меди накапливаются в дугогасящем объеме.

Целью данной работы является верификация подхода СГИ при оценке состава и свойств воздушной плазмы с примесью материала эрозии контактов и влияние СГИ на восстановление электрической прочности промежутка.

## 2. Геометрия расчетной области и результаты моделирования

Подробное описание модельного стенда для верификации подхода СГИ приведено в [5]. Геометрия расчетной области и сетка дугогасительного устройства одностороннего воздушного продольного дутья (ДУ) представлена на Рис. 1. Математическое моделирование выполнено в открытом программном пакете OpenFOAM при газодинамическом представлении плазмы [5]. Избыточное давление на входе в рабочий объем ДУ при расхождении контактов составляет  $\Delta p = 0.4$  МПа. Дуга инициируется при расхождении контактов, один из которых выполнен в качестве соплового. Белыми стрелками обозначено направление базового потока газа. Сопловой блок выполнен в качестве классического сопла Лаваля и служит для разгона потока газа до сверхзвуковых скоростей (при числах Маха до 1.5–2.0). Введение СГИ (желтые стрелки) обеспечивается перед горловиной сопла. Длительность СГИ соответствует 2 мс [5]: через 1 мс после инициации СГИ достигается максимум импульса при последующем снижении. Размер инжектора для СГИ выбирается из условия критического истечения газа через горловину сопла и составляет не более 10% от диаметра горловины сопла. Взаимодействие струи вдуваемого газа со сверхзвуковым потоком оценивается в начальной части диффузора сопла.

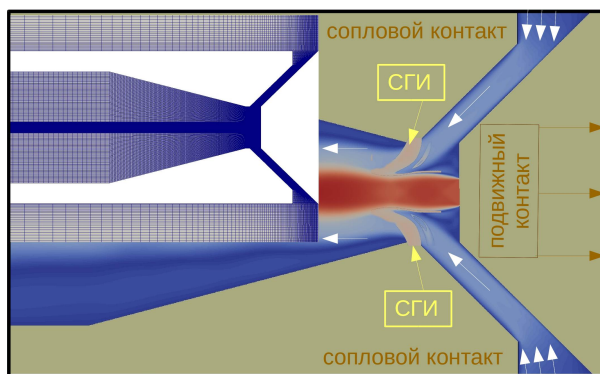


Рис. 1. Геометрия и сетка расчетной области ДУ одностороннего продольного дутья.

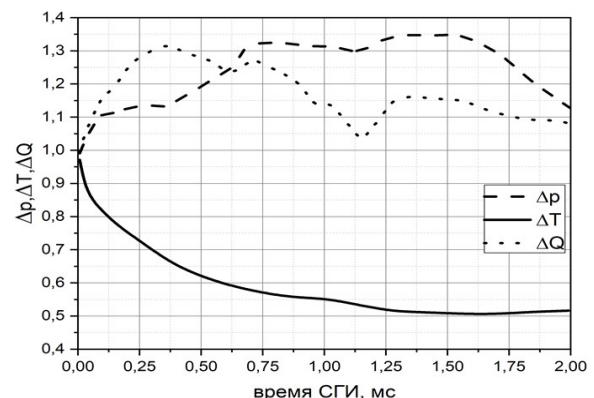


Рис. 2. Относительное изменение газодинамических параметров при воздействии СГИ.

Рис. 2 подтверждает эффективность использования струй указанных параметров в окрестности нуля тока. СГИ обеспечивает охлаждение области горловины сопла (~40%), рост давления (~25%) и массового расхода (~18%) [8]. Нормировка давления ( $\Delta p$ ), температуры ( $\Delta T$ ), массового расхода ( $\Delta Q$ ) проведена относительно соответствующих параметров базового потока.

## 3. Состав и свойства плазмы воздух-медь при воздействии СГИ

### 3.1. Расчет состава плазмы

Для расчёта состава плазмы использовался подход, предполагающий локальное термодинамическое равновесие [9, 10]. В каждой точке пространства химический состав определяется полным химическим равновесием между входящими компонентами. Равновесное состояние характеризуется равномерным распределением термодинамических

параметров по объему системы и химическому составу. Система замкнута, внешним воздействием пренебрегается. Химический состав является функцией набора химических элементов и любой пары термодинамических параметров: «давление – температура», «объем – температура», «энтальпия – объем», «внутренняя энергия – объем». Реализуется общий принцип максимума энтропии для расчета химического и фазового состава при максимальной вероятности распределения энергетических уровней. В столбе дуг высокого давления (~0.1 МПа и выше) с достаточно хорошим приближением предполагается наличие термического равновесия, когда температуры плазменных частиц выравниваются, и наблюдается соответствие между значениями концентраций отрицательных электронов и положительно заряженных ионов  $n_e = n_i$  [9, 10].

Рассматривается две среды с различными массовыми соотношениями: базовый поток, базовый поток с СГИ (Таблица 1).

Таблица 1. Массовые соотношения компонентов среды.

	Давление, МПа	Состав, %		
		Сu, %	N <sub>2</sub> , %	O <sub>2</sub> , %
Базовый поток	0.28	5.00	75.00	20.00
Базовый поток с СГИ	0.34	3.99	75.80	20.21

Базовый поток состоит из сухого воздуха с примесью 5% эродированной меди. Первым шагом исследования состава плазмы является задание компонентов рассматриваемой смеси в базовом потоке. Рассматривались следующие компоненты и их взаимодействие:  $e^-$ , Cu, Cu<sup>+</sup>, Cu<sub>2</sub>, Cu<sup>+2</sup>, Cu<sup>+3</sup>, Cu<sup>+4</sup>, Cu<sup>+5</sup>, Cu<sup>+6</sup>, O, O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, O<sup>-</sup>, O<sub>2</sub><sup>-</sup>, O<sup>+</sup>, O<sup>+2</sup>, O<sup>+3</sup>, O<sup>+4</sup>, O<sup>+5</sup>, O<sup>+6</sup>, O<sub>2</sub><sup>+</sup>, N, N<sup>+</sup>, N<sup>+2</sup>, N<sup>+3</sup>, N<sup>+4</sup>, N<sup>+5</sup>, N<sup>+6</sup>, N<sub>2</sub>, N<sub>3</sub>, N<sub>2</sub><sup>+</sup>, CuO, NO, N<sub>2</sub>O, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, NO<sup>+</sup>, N<sub>2</sub>O<sup>+</sup>, NO<sub>2</sub><sup>+</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Расчет состава плазмы, состоящей из смеси воздуха с продуктами эрозии электродов (медь), выполнен при фиксированном давлении для диапазона температур 300–20000 К (термодинамические параметры «давление-температура»). При введении дополнительной массы воздуха посредством СГИ давление в начальной части диффузора сопла возрастает, концентрации компонентов базового потока изменяются, как показано в п.2. Параметры давления и начальных массовых соотношений плазмы воздух-медь приведены в Таблице 1. Полученные концентрации компонентов плазмы воздух-медь при введении СГИ для исследуемого диапазона температур 2000–8000 К представлен на Рис. 3. На Рис. 3 не отображены химические соединения, концентрация которых составила менее 0.01%.

На Рис. 4 представлена изменение концентрации электронов при воздействии СГИ по отношению к базовому потоку в зависимости от температуры плазмы воздух-медь. Концентрация электронов при воздействии СГИ снижается по отношению к базовому потоку, что подтверждает деионизацию межконтактного промежутка в температурном диапазоне вплоть до 8000 К.

### 3.2. Расчет электропроводности и напряженности электрического поля для оценки воздействия СГИ

Концентрация заряженных частиц определяет электропроводность дугового столба. В настоящей работе для расчетов транспортных свойств используется база KintechDB [11]. Расчет удельное электропроводности основан на решении интегрально-дифференциального уравнения Больцмана с использованием метода Чепмана-Энскога на основе функции распределения электронов по энергиям [12, 13].

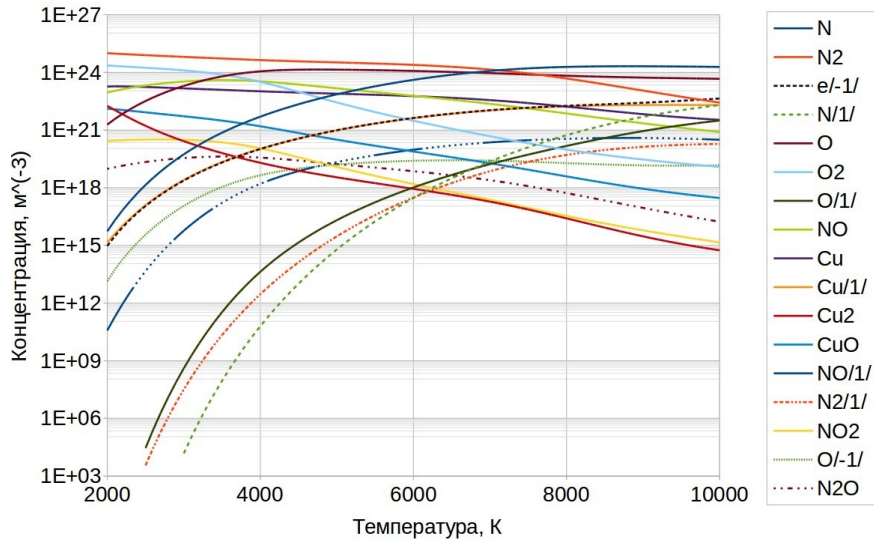


Рис. 3. Зависимость концентраций от температуры, базовый поток с СГИ.

В соответствии с методом Чепмана-Энскога транспортные коэффициенты зависят от интегралов столкновений при взаимодействии каждой пары частиц. Сечения столкновений усредняются по максвелловскому распределению по скоростям через интерполяционные коэффициенты. Интегралы столкновений представляют собой сечения столкновений каждой пары частиц плазмы воздух-медь и рассчитываются по Гиршфельду [14]. Для описания взаимодействия между разнообразными типами частиц применялись потенциальные функции Ленарда-Джонса, Пирани и Колумба.

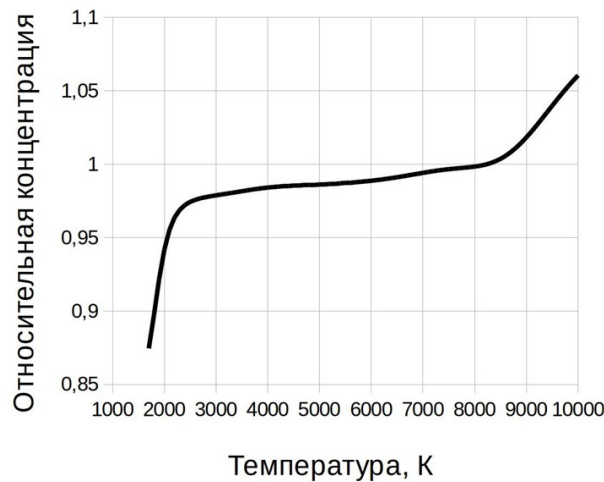


Рис. 4. Относительная концентрация электронов плазмы воздух-медь при воздействии СГИ.

Удельная электропроводность  $\sigma(\xi)$  рассчитывается во втором приближении ( $\xi = 2$ ) по формуле:

$$\sigma(\xi) = \frac{e^2}{mkT} \sum_{\substack{i=1 \\ (i \neq e)}}^N n_i m_i Z_i D_{ei}(\xi), \quad (1)$$

где  $e$  – заряд электрона,  $m$  – масса газа,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура,  $n_i$  – концентрация  $i$ -ой частицы,  $m_i$  – масса  $i$ -ой частицы,  $Z_i$  – заряд  $i$ -ой частицы,  $D_{ei}(\xi)$  –

многокомпонентные коэффициенты диффузии для пар (электрон,  $i$ -ый ион). Подробное описание расчета приводится в [15].

Относительное изменение удельной электропроводности плазмы воздух-медь при воздействии СГИ по отношению к базовому потоку в зависимости от температуры представлено на Рис. 5. При воздействии СГИ в исследуемом диапазоне температур 2000–8000К падение электропроводности плазмы составит ~ 10–19%.

Значение напряженности электрического поля растет с падением величины удельной электропроводности плазмы. На Рис. 6 представлено нормированное изменение напряженности электрического поля при воздействии СГИ по отношению к базовому потоку газа. При неизменном значении плотности тока СГИ будет способствовать росту напряженности электрического поля на 11–24% в интервале температур 2000–8000К, характерных для плазмы в нуле тока. По мере уменьшения температуры в дуге по мере падения тока, рост напряжённости поля при СГИ будет обеспечивать лучшие условия для гашения дуги.

Типичная осциллограмма падения напряжения на продольно обдуваемой дуге отключения при подходе тока к нулю показывает резкое увеличение до достижения пика гашения, затем уменьшение и переход через ноль. Пик гашения определяет прочность дугового промежутка в момент перехода тока через ноль. Воздействие СГИ, как показано выше, подтверждает рост напряженности электрического поля в окрестности нуля тока. Следовательно, увеличение напряженности приведет к росту скорости восстановления электрической прочности промежутка перед нулем тока на ~ 11–24% в рассматриваемом диапазоне температур.

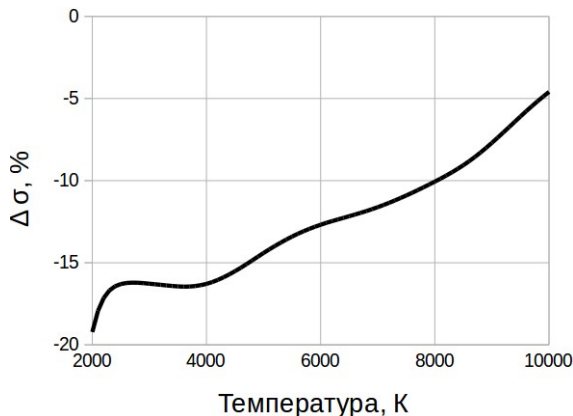


Рис. 5. Относительное изменение электропроводности плазмы воздух-медь при воздействии СГИ.

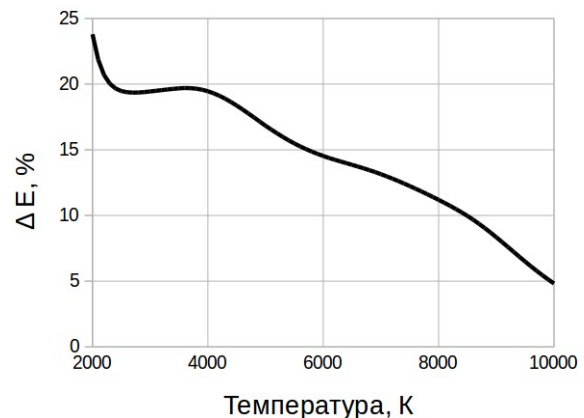


Рис. 6. Относительное изменение напряженности электрического поля плазмы воздух-медь при воздействии СГИ.

#### 4. Выводы

Проведен анализ воздействия импульсной струи газа на параметры восстановления электрической прочности промежутка при оценке состава воздушной плазмы с примесью эродированных материалов контакта (медь) и расчете изменения электропроводности среды. Зафиксирован рост скорости восстановления электрической прочности промежутка перед нулем тока на ~ 11–24% в диапазоне температур 2000–8000 К, характерных для воздушной плазмы перед нулем тока.

#### Благодарности

Работа выполнена в рамках темы исследований по госзаданию, проект № FSEG-2023-0012.

## 5. Список литературы

- [1] D. Goldsworthy, T. Roseburg, D. Tziouvaras and J. Pope, Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers: Application Examples and Benefits, *61st Annual Conference for Protective Relay Engineers*, TX, USA, 2008, 520–535, doi: 10.1109/CPRE.2008.4515078.
- [2] А.М. Sizov, *Gas dynamics and heat exchange of gas jets in metallurgical processes [in Russian]*, Moscow: Metallurgiya, 1987.
- [3] K.N. Volkov, V N. Emelyanov, I.V. Teterina, M.S. Yakovchuk, *Gas flows in the nozzles of power generation system [in Russian]*. Moscow: Fizmatlit, 2017.
- [4] A. Briggs, The contribution of axial and radial components of gas velocity to the thermal interruption capability of a gas blast circuit breaker, *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Gas Discharges and their Applications*, UK, London, 28–31, 1982.
- [5] N.K. Kurakina, E.N. Tonkonogov, Iu. Murashov, R.I. Zhiligitov, and N.V. Obratsov, Controlled pulsed injection for HV gas blast circuit breakers, *8<sup>th</sup> International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects*, Tomsk, Russia, 463, 2022, doi: 10.56761/EFRE2022.S4-P-045001
- [6] N.K. Kurakina, V.Ya. Frolov, and E.N. Tonkonogov, Formation of the Upstream Region in HV Gas Blast Interrupters with Synchronous Gas Injection, *Plasma Phys. Technol.*, vol. **6**, 43, 2019, doi: 10.14311/ppt.2019.1.43
- [7] A.V. Budin, A.A. Bogomaz, and M.E. Pinchuk, An Experimental Stand for Studying the Effect of Synchronous Gas Injection on High-Current Arc Quenching, *Instrum Exp Tech.*, **65**, 255, 2022, doi: 10.1134/S0020441222020117
- [8] N. Kurakina, N. Obratsov, S. Averyanova, and E. Tonkonogov, The influence of pulsed jets on the breaking capacity of high-voltage AC switches under conditions of trans-, supersonic gas flows [in Russian]. *XIII Congress on Theoretical and Applied Mechanics*, St. Petersburg, August 21–25, 2023.
- [9] Maher I. Boulos, Pierre L. Fauchais, Emil Pfender, *Handbook of Thermal Plasmas*, Springer International Publishing, 2023, doi: 10.1007/978-3-030-84936-8
- [10] S.V. Dresvin, *Plasma physics [in Russian]*. St. Petersburg, 2013.
- [11] *Fluid WorkBench* (FWB) [online]; <https://www.kintechlab.com/ru/produkty/fluid-workbench/>
- [12] M. Capitelli, G. Colonna, C. Gorse, et al. Transport properties of high temperature air in local thermodynamic equilibrium, *Eur. Phys. J. D*, vol. **11**, 279, 2000, doi: 10.1007/s100530070094
- [13] R.S. Devoto, Simplified Expressions for the transport properties of ionized monatomic gases, *Phys. Fluids*, vol. **10**, 2105, 1967, doi: 10.1063/1.1762005
- [14] J.O. Hirschfelder, C.F. Curtiss, R.B. Bird, *Molecular theory of gases and liquids (2<sup>nd</sup> edition)*. New York: Wiley, 1964.
- [15] R.S. Devoto, Transport properties of ionized monatomic gases, *The physics of fluids*, vol. **9**, 1230, 1966.