

## раздел ФИЗИКА

УДК 533.95

DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2023.3.1

**ВЛИЯНИЕ ОБЛАСТИ ВНИЗ ПО ПОТОКУ НА ОТКЛЮЧАЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ГАЗОВЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ С СИНХРОННОЙ ГАЗОВОЙ ИНЖЕКЦИЕЙ****© Н. К. Куракина, С. А. Аверьянова, Н. В. Образцов\*,  
Е. Н. Тонконогов***Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
Россия, 195251 г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29.**\*Email: obratzovnikita@yandex.ru*

Одним из основных направлений модернизации высоковольтных газовых выключателей является увеличение номинального напряжения и номинального тока отключения на разрыв. Область вниз по потоку профилированного сопла дугогасительного устройства такого выключателя оказывает значительное влияние на отключающую способность при увеличении номинального напряжения. Рост номинальных параметров отключения требует дополнительной работы привода по расхождению дугогасительных контактов и увеличения диаметра изоляционного сопла. Как результат, наблюдается резкое падение массового расхода дугогасительной среды и снижение перепада давления, уменьшается турбулизация потока в области вниз по потоку, что снижает отключающую способность высоковольтных газовых выключателей. Синхронная (управляемая) газовая инжекция в окрестности нуля тока из канала, обеспечивающего связь камеры автокомпрессии и области горловины сопла, является одним из возможных способов решения проблемы при эффективном использовании дугогасительной среды.

В работе проводится исследование воздействия синхронной (управляемой) газовой инжекции при различных углах введения в область горловины сопла методами численного моделирования. Дугоулавливающий электрод модельного дугогасительного устройства выполнен в виде резонатора Гартмана. В качестве рабочей среды рассматривается элегаз. Показано, что синхронная (управляемая) газовая инжекция влияет на распределение полей газодинамических параметров в области вниз по потоку, обеспечивает дополнительную турбулизацию потока и повышает отключающую способность высоковольтных газовых выключателей.

**Ключевые слова:** высоковольтный газовый выключатель переменного тока, дугогашение, элегаз, синхронная газовая инжекция, принцип Гартмана, численное моделирование.

**Введение**

В дугогасительных устройствах (ДУ) высоковольтных газовых выключателей при отключении короткого замыкания имеются три зоны взаимодействия синхронной (управляемой) газовой инжекции (СГИ) с газовым потоком: конфузорная часть – «область вверх по потоку», горловина, диффузорная часть профилированного сопла – «область вниз по потоку» [1–2].

Область вверх по потоку имеет доминирующее влияние на диэлектрическую фазу восстановления электрической прочности межконтактного промежутка, так как горячий газ остается в области торможения газового потока в течении волны переходного восстанавливающегося напряжения [2]. В работах [3–6] для улучшения отключающей способности высоковольтных газовых выключателей предложено использовать синхронную импульсную инжекцию газа вверх по потоку. В исследовании [7] предложен экспериментальный стенд для исследования синхронной импульсной инжекции газа и подтверждена эффективность ее воздействия для дугогашения. Подход основан на положительных аспектах синхронной коммутации [8], представляет собой управляемый кратковременный импульс газа высокого давления в окрестности нуля тока, действие которого направлено на разрушение зон торможения газового потока, повышение турбулизации среды, а также деформацию остаточного дугового столба за счет эффективного теплообмена между дугой отключения и дугогасящим потоком. Эксплуатационные параметры СГИ должны удовлетворять следующим условиям [4–5]:

- ✓ давление импульса газа превышает номинальное давление в 3 раза;
- ✓ длительность импульса определяется из анализа наиболее эффективного воздействия в диапазоне  $\pm 0.1$  мс около нуля тока на временной базе не менее 2 мс;
- ✓ размер канала поступления газа определяется номинальным током отключения выключателя (диаметром сопла  $d_c$ ) и отвечает условию минимизации расхода газовой среды ( $d \approx 0.1d_c$ ).

Область горловины сопла исключительно эффективна благодаря аксиальной конвекции в области нуля тока. Аксиальный профиль давления в этих зонах и уровень возмущения в газовом потоке, формирующий массовый расход дугогасительной среды, определяют уровень отключающей способности в тепловой фазе пробоя [9–11] и

зависят от величины давления согласно соотношению  $dU/dt \sim p^n$ , где  $dU/dt$  – скорость роста напряжения на контактах,  $p$  – давление в горловине сопла (критическое),  $n = 1.4$  для элегаза [2; 12–13].

В области вниз по потоку уровень турбулентности существенно влияет на увеличение сопротивления электрической дуги отключения, что особенно эффективно для отключения токов с большой аперидической составляющей. Для стандартного ДУ не наблюдается роста уровня отключающей способности в тепловой фазе пробоя с увеличением расстояния между горловиной сопла и дугогасительным контактом вниз по потоку. Однако в экспериментах [14] было показано, что использование контакта вниз по потоку в виде резонатора Гартмана позволяет получить увеличение скорости восстановления электрической прочности среды в тепловой фазе пробоя [15].

В конструкциях высоковольтных газовых выключателей, рассчитанных на высокие номинальные напряжения на разрыв и номинальные токи отключения, используется взаимное движение связанного с приводом подвижного контакта и ограниченно-подвижного дугогасительного контакта, который перемещается в противоположную сторону и связан с приводом через передаточный механизм, что обеспечивает увеличение межконтактного промежутка при отключении [16]. Ограниченно-подвижный контакт при отключении перемещается внутри полости дополнительно введенного неподвижного дугогасительного контакта. Такая система в газовой динамике «срез сопла – контакт с полостью» подобна резонатору Гартмана [17–21].

Теоретические результаты [14–15] показывают, что при изменении числа Маха от 1 до 1.5 максимальное давление у входа в полость контакта превышает давление вверх по потоку в 1.35–1.64 раза, что, как показано выше, положительно влияет на отключающую способность. В [22] рассмотрена геометрия, характерная для ДУ, и приведена формула, позволяющая определить частоты мод давления и, соответственно, скорости по параметрам веерной струи:  $f = a(2k + 1)5.6l$ , где  $a$  – скорость звука в невозмущенном холодном газе,  $l$  – длина веерной струи. Данная формула подтверждена экспериментально [22]. Частота колебания давления в струе определяет время увеличения-уменьшения величины массового расхода газа в радиальной струе. Для успешного дугогашения необходимо обеспечить максимально возможный массовый расход дугогасящего потока в нуле тока.

Исследования [14–15] выполнены для высоковольтных газовых выключателей с двумя ступенями давления. В отличие от баковых высоковольтных воздушных выключателей с двумя ступенями давления современные конструкции элегазовых высоковольтных выключателей автокомпрессионного и автогенерирующего типов с одной ступенью давления имеют минимальный объем дугогасительной среды и, следовательно, малый перепад давлений и сниженный массовый расход [2]. Для улучшения теплоотвода вниз по потоку необходимо повысить давление и интенсифицировать турбулентное взаимодействие газа и горячего следа плазмы при эффективном использовании дугогасительной среды. Одним из способов решения данной проблемы может стать совместное использование СГИ в области вниз по потоку и эффекта Гартмана. Повышение давления за счет СГИ позволяет сформировать дугогасящий поток таким образом, чтобы обеспечить максимальный расход в нуле тока, а резонатор Гартмана будет способствовать интенсификации волновых процессов.

Целью представляемых в данной работе исследований является изучение влияния области вниз по потоку на отключающую способность высоковольтного элегазового выключателя автокомпрессионного типа с одной ступенью давления при воздействии СГИ из дополнительного канала и наличии дугогасительного контакта, выполненного в качестве резонатора Гартмана. Канал формируется между камерой автокомпрессии выключателя и горловиной сопла, позволяет эффективно использовать дугогасительную среду после срабатывания клапанов безопасности в камере автокомпрессии.

В настоящей работе представлены результаты численного анализа формирования радиальной струи около дугогасительного контакта с полостью при различных углах подачи СГИ ( $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ) из канала, расположенного в горловине сопла, в область вниз по потоку автокомпрессионного элегазового выключателя с одной ступенью давления. Выбор значений углов для моделирования обусловлен предельным характером воздействия струи вниз по потоку и в полость контакта – резонатора Гартмана.

### **Исследуемое дугогасительное устройство и численная модель**

В работе рассматривается ДУ высоковольтного элегазового выключателя (номинальные параметры:  $U_{ном} = 330$  кВ,  $I_{ном} = 50$  кА,  $p_{ном} = 0.7$  МПа) с контактной системой, когда подвижный контакт (1) содержит полость для имитации эффекта Гартмана (рис. 1) и применяется для локального воздействия на электрическую дугу в области контакта вниз по потоку. На рис. 1 представлена модель исследуемого ДУ. Пунктиром ограничены зоны взаимодействия дуги с газом: АВ – область вверх по потоку, ВС – горловина, СF – область вниз по потоку, включая DF – полость контакта-резонатора Гартмана. Конфигурация выходной струи на срезе сопла (2) зависит от отношения давления на срезе сопла и низкого давления в ДУ (степени нерасчетности). На амплитуде тока отключения канал (ab) перекрыт дугой, в камере автокомпрессии (6) формируется избыточное давление. С приближением к нулю тока отключения и уменьшением диаметра дуги канал (ab) открывается, инициируется продольное двухстороннее дутье (отмечено белыми стрелками на рис. 1). При соответствующей геометрии и в условиях потока среды в процессе отключения и размыкания контактов подвижного (1) и неподвижного (3) в полости контакта (4) возникают периодические колебания, ввиду многократных отражений от стенок, и появляется радиальная струя.

Радиальная струя газа взаимодействует с дуговым разрядом (5). Благодаря поступлению газа из камеры автокомпрессии (6) уровень турбулентности возрастает. Волновой процесс в полости (4) обеспечивает поступление энергии от струи к колеблющемуся газу и повышает сопротивление дугового столба.

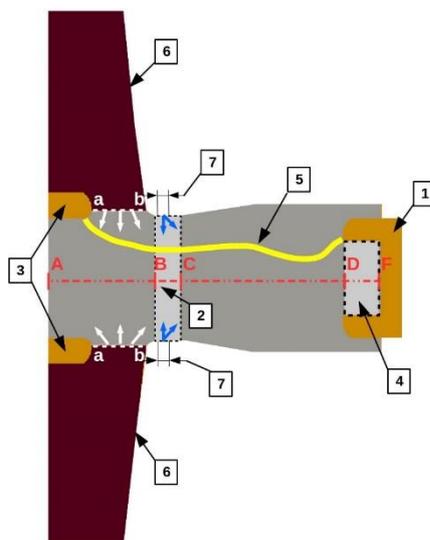


Рис. 1. Модель дугогасительного устройства.

Однако ввиду ограниченного запаса дугогасительной среды в камере автокомпрессии (6), эффективность работы элегаза может оказаться недостаточной для успешного дугогашения (особенно при отключении неудаленных коротких замыканий). Течение газа вниз по потоку в ДУ с одной ступенью давления отличается небольшими значениями числа Маха, что обусловлено возможностями выключателя по созданию перепада давления, генерирующему течение газа. Из-за малого перепада давления, недостаточного уровня турбулентных возмущений в области вниз по потоку, сниженного энергообмена между остаточным дуговым столбом и поступаемым газом скорость восстановления электрической прочности межконтактного промежутка может отставать от роста переходного восстанавливающего напряжения, что станет причиной повторного пробоя межконтактного промежутка после нуля тока. Увеличение времени горения дуги может стать причиной повреждения оборудования. СГИ в окрестности нуля тока из канала в области горловины сопла (7) совместно с волновыми процессами, формируемыми резонатором Гартмана, позволит предотвратить повторный пробой.

В работе исследуется два угла воздействия СГИ  $45^\circ$  и  $90^\circ$ , что обозначено синими стрелками на рис. 1. Условно-подвижный контакт вынесен за границы расчетной области.

Для моделирования физических процессов в ДУ необходимо решать систему взаимосвязанных дифференциальных уравнений, включающих в себя уравнения газодинамики, теплопередачи, электромагнетизма и плазмохимии. Ввиду нелинейности задачи из-за зависимости переменных от плотности, температуры, давления, скорости и др., учитывая изменения параметров во времени и в пространстве, задача представляется трудноразрешимой без введения каких-либо допущений. Во-первых, принимается, что все взаимодействия между частицами учтены при расчете свойств среды. Во-вторых, во временном интервале перехода тока через нуль газодинамические процессы остаются определяющими [1–2], что позволяет исключить из численной модели электромагнитную задачу, включающую систему уравнений Максвелла. Указанные допущения показали свою правомерность с учетом близкого соответствия расчетных и экспериментальных данных в [23–24].

Таким образом, в текущей постановке задачи для оценки воздействия СГИ и формирования волновых процессов за счет эффекта Гартмана основной упор делается на анализе полей давления, массового расхода и скоростных характеристик потока. Рассматривается трансзвуковой поток сжимаемого газа в отсутствие массовых сил, молекулярная структура которого не учитывается, что аналогично исследованию сплошных сред в аэродинамике [25].

Основой численного метода являются законы сохранения массы, импульса, энергии, дополненные уравнением состояния идеального газа. Численная модель сформирована на основе алгоритмов свободно распространяемого пакета OpenFOAM версии 7.0 [26], решатель rhoCentralFoam с использованием центральной-разностной схемы Курганова-Тадмора [27]. Система дифференциальных уравнений решается методом контрольного объема, одним из важных свойств которого является сохранение массы, импульса, энергии на любой группе контрольных объемов и на всей расчетной области.

Задача решается в двумерной постановке при построении блочно-структурированной сетки с шестигранными ячейками при использовании внутренних утилит OpenFOAM [26]. Расчетная область разбита на несколько

топологических блоков с 8 вершинами, при этом грани таких блоков соприкасаются. Методы расчета нестационарных газовых потоков с встречными ударными волнами требуют использования качественной адаптивной сетки, малого шага по времени в диапазоне  $10^{-8}$ – $10^{-14}$  с для улучшения сходимости. В расчете используется адаптивная сетка с разной степенью сгущения, составленная из  $\sim 100$  тыс. ячеек. Расчеты проводились с использованием технологии параллельных вычислений.

На *рис. 2* представлена построенная расчетная геометрия с указанием границ. Условно принято, что в начальный момент времени контакты (1) и (3) разведены, работа привода находится в завершающей стадии, в камере автокомпрессии (6) формируется избыточное давление ( $P_c$ ), в 3 раза превышающее номинальное ( $P_0$ ). Среднемассовая температура в расчетной области составляет 1000 К. Для оценки среднемассовой температуры, по которой в дальнейшем определялись теплофизические свойства дугогасительной среды (плотность, теплоемкость, вязкость, энтальпия, показатель адиабаты, число Прандтля) [28] для целей моделирования, применялся предварительный расчет. Предварительный расчет включал в себя модель с использованием уравнения Лапласа для скорости, учитывающую деформацию сетки камеры автокомпрессии (6) при работе привода, при газодинамическом представлении плазмы [4–5].

В указанной постановке задачи рассматриваются околонулевые процессы: канал (ab) полностью открыт. С помощью специальной утилиты OpenFOAM setFields [26] в камере автокомпрессии (6) задается избыточное давление  $P_c$ . Канал, связывающий камеру автокомпрессии (6) и область горловины сопла (7), вынесен за границы расчетной области и заполнен дугогасительной средой избыточным давлением  $P_c$ . Размеры канала формируют необходимую форму СГИ, представленную на *рис. 2*.

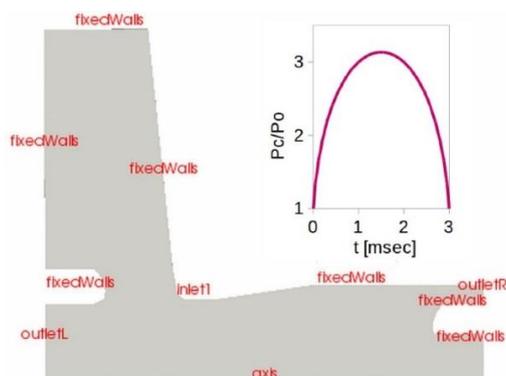


Рис. 2. Расчетная геометрия с указанием границ и форма СГИ.

Граничные и начальные условия представлены в *табл. 1*. В качестве начальных условий принимается, что параметры газа внутри расчетной области равны параметрам невозмущенной среды со среднемассовой температурой 1 000 К, давлением 0.7 МПа (кроме камеры автокомпрессии, где начальное давление составляет 2.1 МПа) и нулевой скоростью.

Таблица 1

Граничные условия

Границы/ Boundaries	Давление/pressure internalField: 7 МПа	Температура/temperature internalField: 1 000К	Скорость/velocity internalField: 0 m/sec
inletI	totalPressure	totalTemperature	pressureInletOutletVelocity
outlet	waveTransmissive	zeroGradient	waveTransmissive
outlet	waveTransmissive	zeroGradient	waveTransmissive
fixedWalls	zeroGradient	zeroGradient	noSlip
Axis	symmetryPlane	symmetryPlane	symmetryPlane
frontAndBack	Empty	Empty	Empty

### Результаты и обсуждения

На *рис. 3* построена зависимость от времени давления на входе в полость контакта (4) (см. *рис. 1*) с момента начала расчета и поступления газа из камеры автокомпрессии (6) и канала (7) до  $t = 3$  мс – времени окончания действия СГИ, нормированного по отношению к давлению базового потока (без воздействия СГИ), для двух углов подачи СГИ  $45^\circ$  и СГИ  $90^\circ$ . *Рис. 4* показывает изменение нормированного значения числа Маха во времени при воздействии СГИ  $45^\circ$  и СГИ  $90^\circ$  в этой же области по отношению к базовым параметрам.

На *рис. 3–4* устанавливается квазипериодическая зависимость давления и числа Маха от времени. Пульсации возникают вследствие неравномерности распределения течения в струе и сопровождаются ударно-волновыми процессами в полости (4), колебанием скачков в струе, излучением волн в окружающее пространство.

Обработка графиков давления без СГИ позволяет получить значение частоты колебания давления равное в среднем 1 кГц, что показывает близкое соответствие с результатами расчетов для веерной струи по вышеуказанной формуле  $f = a(2k + 1)5.6l$ , дающими значение 1.019 кГц. Согласование частоты, полученной в расчете при моделировании, с частотой, полученной по формуле, подтверждает корректность проведенных расчетов.

Рис. 3 показывает средние значения изменения нормированного давления в 1.17 и 1.25 раз, рис. 4 – изменение числа Маха в 5.85 и 4.74 раз по отношению к базовому потоку (без СГИ) для СГИ 45° и СГИ 90° соответственно и подтверждает, что использование СГИ позволяет интенсифицировать волновой процесс в области вниз по потоку. Интенсификация волнового процесса позволит повысить уровень турбулентности в этой области и, как следствие, скорости восстановления электрической прочности в тепловой фазе пробоя.

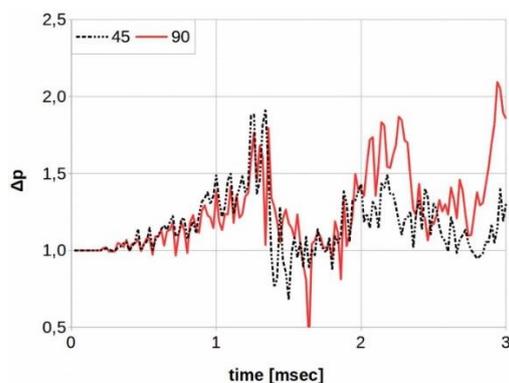


Рис. 3. Нормированное давление на входе в полость контакта (4) от времени при воздействии: СГИ 45° – черная пунктир, СГИ 90° – красная сплошная линия.

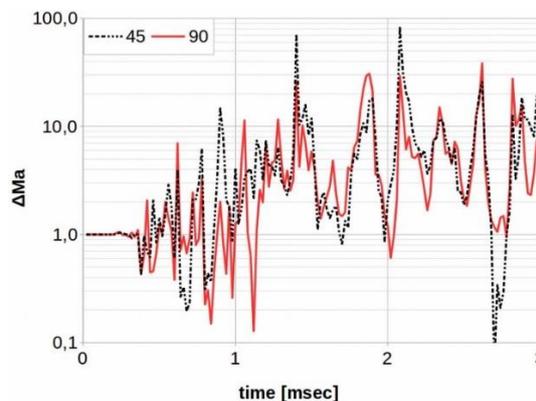


Рис. 4. Нормированное значение числа Маха на входе в полость контакта (4) от времени при воздействии: СГИ 45° – черная пунктир, СГИ 90° – красная сплошная линия.

Данный вывод подтверждается сопоставлением колебательных процессов в разные моменты времени: 1.3 мс (а, с), 1.7 мс (b, d) – при амплитудных значениях СГИ на рис. 5 для СГИ 45° (а, b) и СГИ 90° (с, d). Контурами обозначены значения числа Маха в расчетной области в указанные моменты времени:  $Ma = 1$  – синий,  $Ma = 1.3$  – зеленый,  $Ma = 1.5$  – красный. При вертикальном поступлении СГИ 90° формируются четко очерченные зоны торможения вниз по потоку, возникающие при встречном движении струй и характеризующиеся максимальным значением давления, а также области, обладающие высокими скоростными параметрами, где число Маха превышает 1.5. Их перемещение вдоль оси подтверждает волновую природу распределения газодинамических параметров в области вниз по потоку при воздействии СГИ и, как следствие, приведет к увеличению турбулентного энергообмена газового потока с дугой при отключении.

На дне полости контакта (4), обозначенным буквой F на рис. 1, течения практически нет в исследуемых случаях, фиксируется циркуляционная зона малой интенсивности с повышенным давлением и сниженным значением числа Маха относительно базового потока без СГИ. Перед входом в полость присутствует скачок, и под действием градиента давления начинаются процессы истечения газа, направленного встречно основному потоку, возникает волна сжатия и ударная волна. Отклонения направления воздействия СГИ подтверждаются на рис. 5 (b, d) для момента времени 1.7 мс, когда за счет встречного потока из полости контакта (4) направление действия СГИ смещается в область вверх по потоку.

Анализ распределения нормированных к базовым параметрам (без СГИ) полей давления (рис. 6) и массового расхода (рис. 7) в зависимости от относительной длины расчетной области вдоль оси системы по отношению к диаметру среза сопла при разных углах подачи СГИ (СГИ 45° – черный пунктир, СГИ 90° – красная сплошная линия) в фиксированные моменты времени амплитудного значения СГИ 1.3 мс (а) и 1.7 мс (b) позволяет сделать вывод о большей эффективности СГИ 45° в области вниз по потоку.

Рис. 6 демонстрирует суммарный прирост давления при амплитудных значениях СГИ для рассматриваемых углов подачи по сравнению с базовым потоком. При подаче СГИ 45° увеличение давления более заметно для рассматриваемых моментов времени как для 1.3 мс, так и 1.7 мс. Например, в момент времени 1.7 мс средний рост давления в расчетной области составит 25% для СГИ 45° и 18% для СГИ 90°. По-видимому, это обусловлено возникновением зон торможения при столкновении встречно направленных струй при подаче СГИ 90° и перенаправлению волны в область вверх по потоку.

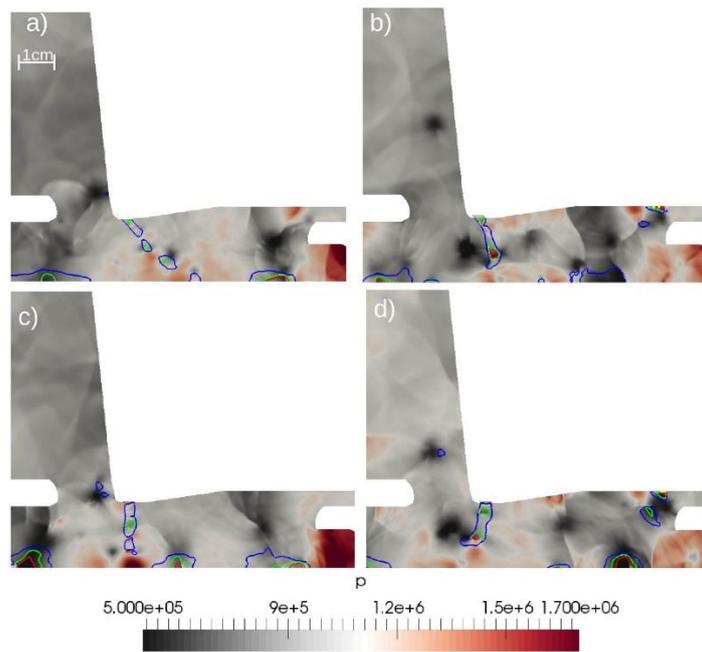


Рис. 5. Распределение полей давления [Па] в разные моменты времени при амплитудных значениях СГИ  $45^\circ$  (a, b) и СГИ  $90^\circ$  (c, d): 1.3 мс (a, c), 1.7 мс (b, d). Контурами ограничены области числа Маха: Ма = 1 – синий, Ма = 1.3 – зеленый, Ма = 1.5 – красный.

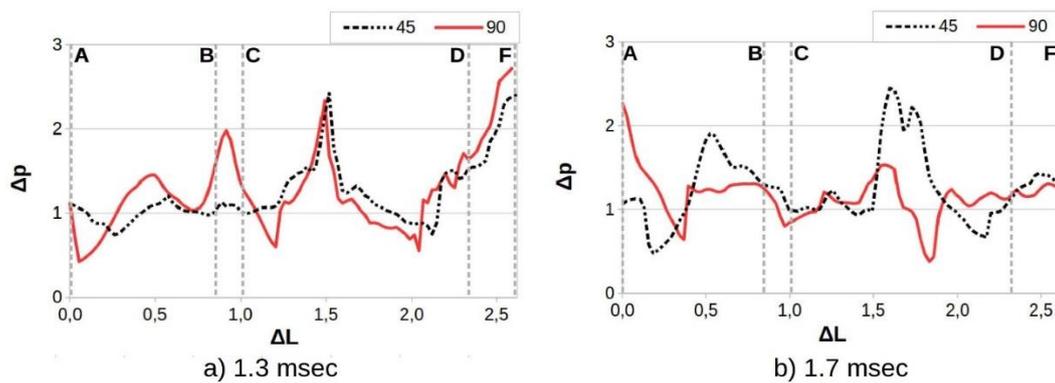


Рис. 6. Нормированные значения давления при амплитудных значениях СГИ по отношению к базовому потоку вдоль оси расчетной области и углах подачи СГИ  $45^\circ$  (черный пунктир) и  $90^\circ$  (красная сплошная линия) в разные моменты времени: а) 1.3 мс, б) 1.7 мс.

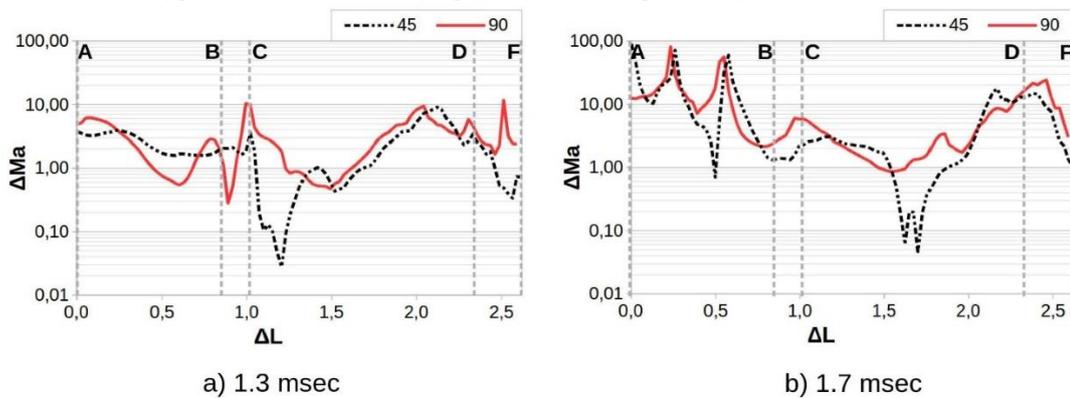


Рис. 7. Нормированные значения числа Маха при амплитудных значениях СГИ по отношению к базовому потоку вдоль оси расчетной области и углах подачи СГИ  $45^\circ$  (черный пунктир) и  $90^\circ$  (красная сплошная линия) в разные моменты времени: а) 1.3 мс, б) 1.7 мс.

Данное предположение нашло свое подтверждение при рассмотрении зависимости нормированного числа Маха вдоль оси расчетной области (рис. 7). При подаче СГИ 90° наблюдаются значительные возмущения в области вверх по потоку, ограниченной пунктирными линиями АВ.

Суммарный рост давления затрагивает в том числе область вверх по потоку (см. рис. 6), что при эффективном массовом расходе за счет увеличения скорости потока (см. рис. 7) способствует росту предельной отключающей способности в тепловой фазе пробоя, согласно известной зависимости  $dU/dt \sim p^{1.4}$  для элегаза.

### Выводы

В работе методами численного моделирования исследовано влияние области вниз по потоку на отключающую способность дугогасительного устройства высоковольтного элегазового выключателя автокомпрессионного типа с учетом воздействия синхронной газовой инжекции при различных углах введения СГИ 45° и СГИ 90° и использования контакта с полостью в качестве резонатора Гартмана.

Сравнительный анализ воздействия углов подачи СГИ показал большую эффективность СГИ 45° в области вниз по потоку, СГИ 90° – вверх по потоку. Показано, что в исследуемых случаях СГИ способствует интенсификации волнового процесса, формируемого резонатором Гартмана, с целью повышения уровня турбулентности в области вниз по потоку и обеспечивает суммарный прирост давления при амплитудных значениях СГИ по сравнению с базовым потоком, что в совокупности повысит предельную отключающую способность выключателя в тепловой фазе пробоя.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке (финансовом обеспечении) в рамках темы исследований по госзаданию FSEG-2023-0012. Результаты расчета получены с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Garzon R. D. High voltage circuit breakers: design and applications, New York: Marcel Dekker Inc. 2002.
2. Тонконогов Е. Н. Выключатели переменного тока высокого напряжения. СПб.: изд-во Политехн. ун-та. 2015. 263 с.
3. Briggs A. Liquid SF6 injection: a possible solution for the S.L.F. limiting phenomena of the gas blast circuit breaker // Proceedings of the 8th International Conference on Gas Discharges and their Applications. Oxford. 1985. Pp. 43–46.
4. Kurakina N., Frolov V., Tonkonogov E. Study of the stagnation region in HV gas-blast interrupters with synchronous gas injection // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 643(1), 012044(2019). DOI: 10.1088/1757-899X/643/1/012044.
5. Kurakina N., Frolov V., Tonkonogov E. Formation of the Upstream Region in HV Gas Blast Interrupters with Synchronous Gas Injection // Plasma Physics and Technology. 6(1). 2019. Pp. 43–46. DOI: 10.14311/ppt.2019.1.43.
6. Kurakina N., Tonkonogov E., et al. Controlled pulsed injection for HV gas blast circuit breakers // Proceedings of 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects. Tomsk: TPU Publishing House. 2022. Pp. 463–469. DOI:10.56761/EFRE2022.S4-P-045001.
7. Budin A. V., Bogomaz A. A. & Pinchuk M. E. An Experimental Stand for Studying the Effect of Synchronous Gas Injection on High-Current Arc Quenching. Instrum Exp Tech 65. 2022. Pp. 255–261. DOI: 10.1134/S0020441222020117.
8. Morita T., Iwashita M., and Nitta Y. A theoretical analysis of dynamic arcs and test results of model synchronous air blast circuit breakers // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. PAS-97(3). 1978. Pp. 940–949. DOI: 10.1109/TPAS.1978.354567.
9. Henry J. C., Passaquin J., Thuries E. Improved performance of gas-blast circuit-breakers // CIGRE, 13-09. Paris. 1972.
10. Briggs A., and King L. Factors affecting thermal breakdown in gas blast interrupters // IEE Conf. Dev in Design and Performance. London. 1979. Pp. 52–55.
11. Briggs A. The contribution of axial and radial components of gas velocity to the thermal interruption capability of a gas blast circuit breaker // Proceedings of the 7th International Conference on Gas Discharges and their Applications. London. 1982. Pp. 28–31.
12. Frind G. and Rich J. Recovery speed of axial flow gas blast interrupter: dependence on pressure and di/dt for air and SF6 // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. PAS 93(5). 1974. Pp. 1675–1684. DOI: 10.1109/TPAS.1974.293900.
13. Garzon R. D. Rate of Change of Voltage and Current as Functions of Pressure and Nozzle Area in Breakers Using SF6 in the Gas and Liquid Phases // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. PAS 95(5). 1976. Pp. 1681–1688.
14. Ugryumov E., Tonkonogov E. Gas dynamic behaviour in the HV gas-blast interrupters // 12th symposium on physics of switching arc. Vol. 2. 1996. Pp. 33–37.
15. Averianova S., Frolov V., Tonkonogov E. Arcing behaviors in the HV gas-blast interrupters near the downstream contact with cavity // 27th international conference on electrical contacts. 2014. Pp. 603–606.
16. Patent De 19702822 C1 (Siemens AG). Hochspannungs-Leistungsschalter mit Feldelektrode, M. Heiner et al. Munchen. 1998. Pp. 6.
17. Chang S.-M., Lee S. On the jet regurgitant mode of a resonant tube // Journal of sound and Vibration. 246(4). 2001. Pp. 567–581. DOI: 10.1006/jsvi.2000.3646.
18. Глазнев В. Н., Коробейников Ю. Г. Эффект Гартмана. Область существования и частоты колебаний // Прикладная механика и теоретическая физика. 42(4). 2001. С. 62–67.
19. Бочарова О. В., Лебедев М. Г. Аэроакустический эффект Гартмана: Сто лет исследований и текущее состояние вопроса // Инженерный журнал: наука и инновации. №9. 2018. С. 1–25. DOI: 10.18698/2308-6033-2018-9-1803.
20. Murugappan S., Gutmark E. Parametric study of the Hartmann–Sprenger tube. Exp Fluids. No. 38. 2005. Pp. 813–823. DOI: 10.1007/s00348-005-0977-5.
21. Vinoth B. R., Throvaugunta P., Rathakrishnan E. Effect of tube lip-thickness on the performance of Hartmann-Sprenger tubes. Proc IMechE, Part G: J of Aerospace Engineering. No. 226. 2012. Pp. 74–87. DOI: 10.1177/0954410011406.
22. Демин В. С., Кожин А. В. Колебания веерной струи при натекании сверхзвуковой струи на преграду с выемкой // Прикладная механика и теоретическая физика. №40(4). 1999. С. 118–124.
23. Kurakina N., Pinchuk M., Budin A., Smirnovsky A. Analysis of the gas dynamics in the discharge chamber with a movable electrode // Journal of Physics: Conference Series. No. 1135(1), 012094. 2018. DOI:10.1088/1742-6596/1135/1/012094.
24. Pinchuk M., Budin A., Kurakina N., Leks A. Axial Blast Type Discharge Chamber with Moving Electrode // Plasma Physics and Technology. No. 6(3). 2019. Pp. 227–230. DOI:10.14311/ppt.2019.3.227.
25. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика. М.: изд-во Наука. 1991. 600 с.

26. OpenFOAM. The OpenFOAM Foundation. URL: <https://openfoam.org/>
27. Kurganov A., Tadmor E. New High-Resolution Central Schemes for Nonlinear Conservation Laws and Convection-Diffusion Equations // Journal of Computational Physics. No. 160(1). 2000. Pp. 241–282. DOI:10.1006/jcph.2000.6459.
28. Chervy B., Gleizes A., Razafinimanana M., Thermodynamic properties and transport coefficients in SF<sub>6</sub>-Cu mixtures at temperatures of 300-30000 K and pressures of 0.1-1 MPa // J. Phys. D: Appl. Phys. No. 27. 1994. P. 1193. DOI:10.1088/0022-3727/27/6/017.

*Поступила в редакцию 17.09.2023 г.*