Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»
Институт Энергетики

На правах рукописи

КУРАКИНА Наталья Константиновна

СИНХРОННАЯ ГАЗОВАЯ КОММУТАЦИЯ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ДУГОГАСИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ С ИМПУЛЬСНОЙ ИНЖЕКЦИЕЙ

Направление подготовки 13.06.01 Электро- и теплотехника
Направленность 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД
об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Санкт-Петербург — 2020

Работа выполнена в Высшей школе электроэнергетических систем Института Энергетики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

Научный руководитель: **Фролов Владимир Яковлевич**
доктор технических наук, профессор, профессор
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Рецензент: **Куклев Юрий Васильевич**
кандидат технических наук, доцент, доцент
АНО ВО «Северо-Западный открытый технический университет»

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: http://elib.spbstu.ru

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Современные потребности развития электроэнергетического сектора предъявляют все более высокие требования к надежности, безопасности, ресурсу и технико-экономическим характеристикам высоковольтных аппаратов. Рост токов короткого замыкания в развивающихся энергосистемах вследствие увеличения плотности генерации и энергопотребления в перспективе потребует способности отключать токи, превышающие 100 кА для сетей высокого напряжения 110-750 кВ. Исследования процессов, происходящих в мощных выключателях переменного тока, улучшение их потенциальных возможностей, поиск новых подходов к дугогашению являются актуальными задачами в новой научно-технологической парадигме развития России по внедрению интеллектуальных энергосистем, «умных» коммутационных устройств защиты.

Значительный вклад в создание и развитие отечественного электроаппаратостроения внесли Адоньев Н.М., Афанасьев В.В., Бабкин И.В., Бортник И.М., Брон О.Б., Вишневский Ю.И., Розанов Ю.К., Чемерис В.С. Успехи в разработках ВВ были связаны с исследованиями гашения электрической дуги Буткевича Г.В., Залесского А.М., Кукекова Г.А., Таева И.С.; в области экранных и изоляционных систем – Александрова Г.Н.; синтетических методов коммутационных испытаний – Каплана В.В., Нашатыря В.М.; специальных средств дугогашения (комбинированных тиристорных, гибридных, с магнитным дутьем) – Фролова В.Я., Тонконогова Е.Н., Беляева В.Л. и др. Среди зарубежных ученых следует отметить имена Ragaller K., Moeller K., Niemeyer L., Swanson B., Frind G., Garzon R., Lowke J. и др. Сегодня мировыми лидерами в области аппаратостроения являются компании «Siemens», «Toshiba», «ABB», «Shneider Electric», «General Electric». Среди российских предприятий, специализирующихся на разработке вакуумных защитных коммутационных устройств, необходимо выделить компании: АО ВО «Электроаппарат», ЗАО «Завод электротехнического оборудования» (г. Великие Луки), АО «Уралэлектротяжмаш», «Таврида Электрик» (вакуумное оборудование).

Для существующих отработанных конструкторских и технологических решений в коммутационной аппаратуре в области модернизации требуются кардинальные изменения вследствие ряда международных решений. Страны, ратифицировавшие Киотский протокол (1997) и Парижское соглашение (2015), взяли на себя обязательство ограничить выработку и использование парниковых газов, к которым относится элегаз – одна из доминирующих рабочих сред для выключателей высокого напряжения. Эти решения привели к модификации некоторых технических стандартов (МЭК), в том числе по практическому применению синхронной (управляемой) коммутации (CIGRE) в современной идеологии интеллектуализации энергосистем (IEC-61850), что мотивировало на проведение исследовательских работ.

Существует множество концепций развития высоковольтных выключателей, но все они имеют свои недостатки. Современные подходы к повышению эффективности дугогашения связаны с созданием новых типов электрических аппаратов. Предлагаемые улучшения в вакуумных, полупроводниковых и других выключателях являются в значительной степени экспериментальными. Разумно ожидать, что газонаполненные выключатели переменного тока останутся доминирующими для эксплуатации в диапазоне высоких напряжений (от 110 кВ и выше) в обозримом будущем. Поэтому, разработка дополнительных, экономически целесообразных методов повышения дугогасительной способности, поиск новых подходов увеличения производительности высоковольтных газонаполненных выключателей переменного тока при замене элегаза являются актуальным задачами.

В настоящей работе исследуется новый подход к гашению дуги переменного тока: синхронная импульсная инжекция газа – кратковременный локализованный импульс газа высокого давления в окрестности ноля тока, а также оценивается степень влияния этого метода на отключающую способность высоковольтных газонаполненных выключателей переменного тока.

Цели и задачи исследования

Целью данной работы является повышение энергетической эффективности дугогасительных систем высокого напряжения путем синхронной импульсной инжекции газа.

Для достижения поставленной цели нужно решить следующие задачи:

1. Разработать концепцию синхронной импульсной инжекции газа на основании анализа научных работ.
2. Разработать методику расчета физических процессов при синхронной импульсной инжекции газа в условиях сверхзвуковых течений и подвижных элементов конструкций дугогасительных систем.
3. Установить параметры, обеспечивающие эффективное воздействие синхронной импульсной инжекции газа в дугогасительных системах.
4. Верифицировать методику при минимизации воздействия синхронной импульсной инжекции газа в модельной дугогасительной системе.

Научная новизна

1. Впервые предложена методика синхронной импульсной инжекции газа для повышения эффективности дугогасительных систем высоковольтных газонаполненных выключателей переменного тока.
2. Разработана нестационарная физико-математической модель для сверхзвуковых газовых течений с элементами перестроения сетки в свободно распространяемом пакете OpenFOAM для установления закономерностей физических явлений в области ноля тока в дугогасительных системах.
3. Установлены параметры эффективного воздействия синхронной импульсной инжекции газа на основе разработанной физико-математической модели и методов физического моделирования.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость заключается в исследовании синхронной импульсной инжекции газа и изучении влияния нового подхода к дугогашению на повышение отключающей способности высоковольтных газонаполненных выключателей переменного тока при использовании альтернативных элегазу газовых сред

природного происхождения, а также в разработке методики численного анализа физических явлений в окрестности ноля тока и математическом представлении результатов моделирования.

Практическая значимость исследований заключается в выработке рекомендаций по параметрам синхронной импульсной инжекции газа для разработки дугогасительных систем. Потенциальные выгоды могут проявляться в отказе от экологически чувствительных дугогасительных сред, повышении номинальных токов и напряжений на разрыв, минимизации времени дуговых процессов, снижении износа и, как следствие, повышении жизненного цикла высоковольтных выключателей.

Апробация работы

Теоретические изыскания базируются на общеизвестной теории гашения дуги. Расчеты на основе метода контрольного объема проводились в программном пакете под лицензией на свободное программное обеспечение GNU (GPL). Разработанная математическая модель в двух- и трехмерной постановке подтверждена опытными исследованиями. Математические формулы, используемые для верификации методики синхронной импульсной инжекции газа, подтверждены многочисленными экспериментами на модельном дугогасительном устройстве одностороннего продольного воздушного дутья.

Основные теоретические положения, результаты и выводы диссертационной работы докладывались и обсуждались на практических конференциях: International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE-2019) (Россия, Санкт-Петербург, 2019), XXIII Международная конференция «Physics of Switching Arcs» (Чехия, Нове-Место-на-Мораве, 2019), XII Международная научная конференция «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики» (Россия, Санкт-Петербург, 2019), International Scientific Electric Power Conference – 2019 (Россия, Санкт-Петербург, 2019), Международная Конференция "Физика.СПб" (Россия, Санкт-Петербург, 2018), International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE 2018) (Россия, Томск, 2019), XXII

Международная конференция «Physics of Switching Arcs» (Чехия, Нове-Место-на-Мораве, 2017).

Публикации

По результатам работ опубликовано 10 печатных трудов, из них 9 — статьи, опубликованые в журналах, определенных ВАК РФ; 7 статей вошли в научную базу SCOPUS и Web of Science, 10 - в РИНЦ.

Представление научного доклада: основные положения.

1. Концепция синхронной импульсной инжекции газа с учетом проблематики практического применения синхронной (управляемой) коммутации для высоковольтных дугогасительных систем газонаполненных выключателей.
2. Нестационарная физико-математическая модель для анализа физических процессов при синхронной импульсной инжекции газа в условиях сверхзвуковых течений и подвижных элементов конструкций дугогасительных систем.
3. Параметры синхронной импульсной инжекции газа для повышения энергоэффективности дугогасительных систем.
4. Верификация методики при минимизации воздействия синхронной импульсной инжекции газа в модельной дугогасительной системе.

Благодарности: Автор выражает благодарность коллегам и сотрудникам кафедры «Электротехника и Электроэнергетика», Высшей школы электроэнергетических систем Института Энергетики ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого», ФГБУН «Института электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук» за экспертное мнение, полезные обсуждения, ценные рекомендации.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

НКР (диссертация) состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 72 наименования, одного приложения. Полный объем НКР (диссертации) – 118 страниц, в том числе рисунков – 53, таблиц – 3.

Личный вклад автора состоит в развитии идеи синхронной импульсной инжекции газа, адаптации физико-математической модели к решению поставленной

задачи, верификации расчетной модели при экспериментальных исследованиях, обработке результатов численного моделирования, установлении параметров синхронной импульсной инжекции газа в конструкциях дугогасителей продольного газового дутья, оценке эффективности для практического внедрения синхронной импульсной инжекции газа при минимальных параметрах воздействия, подготовке публикаций к печати и апробации результатов.

Объекты, (предмет) и методы исследования

Объектом исследования являются электрофизические, газодинамические процессы в дугогасительных системах высоковольтной газонаполненной коммутационной аппаратуры. Предметом исследования являются дугогасительные устройства (ДУ) высоковольтных газовых выключателей переменного тока (ВГВ). Методы диссертационного исследования основаны на численном моделировании электрофизических, газодинамических процессов в различных конструкциях дугогасительных систем с помощью открытого программного пакета OpenFOAM при верификации разработанной физико-математической модели.

Результаты и их обсуждение

Во введение кратко обосновывается актуальность темы, сформулированы цели и задачи работы.

В первой главе проведен литературный обзор по изучению физических процессов в дугогасительных системах газового дутья (п. 1.1-1.2), рассмотрено современное состояние исследований по поиску альтернативных элегазу дугогасительных сред (п. 1.3), показаны проблемы применения синхронной (управляемой) коммутации (СК) в современных автогенерирующих и автокомпрессионных выключателях с одной ступенью давления (п. 1.4), предложен новый подход к дугогашению – синхронная импульсная инжекция газа (СГИ) (п. 1.5). В выводах (п. 1.6) проведена постановка задач исследования СГИ. Рассмотрим основные тезисы более подробно.

Используя классификацию выключателей по роду дугогасящей среды для ВГВ способом гашения дуги является интенсивное охлаждение ствола дуги в потоках газа

(сжатый воздух, элегаз). Влияние структуры поля потока, обдувающего дугу, на отключающую способность выключателя, определяется не только геометрией сопла, но также отношением давлений на входе в сопло и выходе из него. Увеличение перепада давлений при безударном «стационарном» течении газового потока в соплах, совершенных с точки зрения газодинамики, способствует сжатию дугового столба, деформации кривой тока и улучшению дугогасящей способности.

Для вычисления электрических параметров используются эмпирические соотношения, указанные ниже и полученные на основании анализа большого количества опытов в модельном ДУ одностороннего продольного воздушного дутья[1,2] при экстраполяции результатов опытов на оригинальные конструкции выключателей с применением теории подобия и физического моделирования[3,4]. Все приведенные зависимости справедливы для условий, близко совпадающих с условиями проводимых опытов как по геометрическому подобию исследуемых ДУ, так и по характеру протекающих процессов. Источником мощности лабораторной установки являлся одночастотный колебательный контур, в котором при начальном напряжении 10 кВ и частоте 50 Гц амплитуда первой полуволны составляла 1200-1400 А.

Зависимость диаметра дуги от величины перепада давления Δp и от величины тока дуги I_{arc} может быть приближенно представлена уравнением:

$$d_{arc} \approx 0{,}39 \cdot 10^{-2} \Delta p^{-0{,}2} I_{arc}^{0{,}6} [\text{см}] \qquad (1)$$

Выведены зависимости диаметра участка ствола дуги d_{arc}, расположенного в горловине сопла, от величины перепада давления Δp, где $\Delta p = p_u - p_d$ — перепад давления между областями вверх (p_u) и вниз (p_d) по потоку, где d_{arc0}=0,29 см.

---

[1] Кукеков Г.А., Каплан Г.С., Ветюкова Л.С. Сравнительные исследования ствола дуги при продольном дутье в шестифтористой сере и в воздухе. - Л.: Электротехника, 1970, № 4 с. 55-58.

[2] Врангов Й.В. Исследование процессов гашения дуги в дугогасителях выключателей переменного тока при синхронизированном размыкании контактов: дис.канд.техн.наук /Ленинградский политехнический институт им. М. И. Калинина; науч. рук. А. М. Залесский, - Ленинград, 1971. – 201 с.

[3] Кукеков Г.А., Каплан В.В., Каплан Г.С., Шраменко А.В. К вопросу физического моделирования процессов дугогашения в выключателях с газовым дутьем // Электромеханика, 1980, № 3, с. 232-236.

[4] Каплан В.В., Каплан Г.С., Кукеков Г.А., Шраменко А.В. Применение методов теории подобия для физического моделирования процессов дугогашения в выключателях с газовым дутьем // Труды ЛПИ, Ленинград. Сборник научных трудов, 1983, с. 64-69.

$$d_{arc} = d_{arc0} e^{(-0{,}068 \Delta p)} \text{ [см]} \quad (2)$$

С увеличением перепада давления и диаметра горловины сопла, то есть с повышением интенсивности дутья, градиент напряжения U_{arc} увеличивается. Выведена количественная зависимость для расчета среднего градиента напряжения на дуге в атмосфере воздуха при различных перепадах давления и различных диаметрах горловины дутьевого сопла:

$$U_{arc} \approx 30 \left[4{,}6 \left(1 - 0{,}25 \frac{d_c}{d_i} \right) + \Delta p^{0{,}5} \right] \text{[В/см]} \quad (3)$$

Зависимость средней величины dI/dt от давления воздуха p в диапазоне изменений p={3-10} атм при размыкании контактов за 2 мс до ноля тока аналитически определяется как:

$$\left(\frac{dI}{dt} \right)_{\text{ср}} = 0{,}33 + 0{,}014 \cdot p \quad (4)$$

С ростом давления p увеличивается $(dI/dt)_{ср}$, при некоторой минимальной величине средней скорости спадания тока $(dI/dt)_{ср} \leq 0{,}39$ А/мкс наступает условие негашения дуги для данной конструкции ДУ.

Изменение сопротивления ствола дуги R_{arc} при подходе тока к нолю характеризует процессы, происходящие в плазменном столбе, с учетом воздействия окружающей среды. Для момента времени $t \approx 1$ мкс до ноля тока зависимость $R_{arc}=f(p)$, представленная пунктиром на рис. 1, для исследуемого ДУ аналитически выводится как:

$$R_{arc} \approx K \cdot e^{0{,}11p} \quad (5)$$

где K – коэффициент, зависящий от интенсивности дугогашения, K=9,3 при размыкании контактов за 2 мс до ноля тока.

По осциллограммам тока и напряжения также определялась величина тепловой постоянной времени τ. На рис. 1 представлена зависимость $\tau=f(p)$ при $t \approx 1$ мкс для случая размыкания контактов за 2 мс до ноля тока. Постоянная времени позволяет учитывать различные процессы релаксации плазмы: рекомбинации молекул; деионизации; установления равнораспределения энергии между нейтральными частицами и продуктами их ионизации (ионами и электронами); турбулентном

охлаждении газовой средой ствола дуги; дуффузии, обеспечивающей, в том числе, теплообменные процессы между дугой и окружающей средой и др.

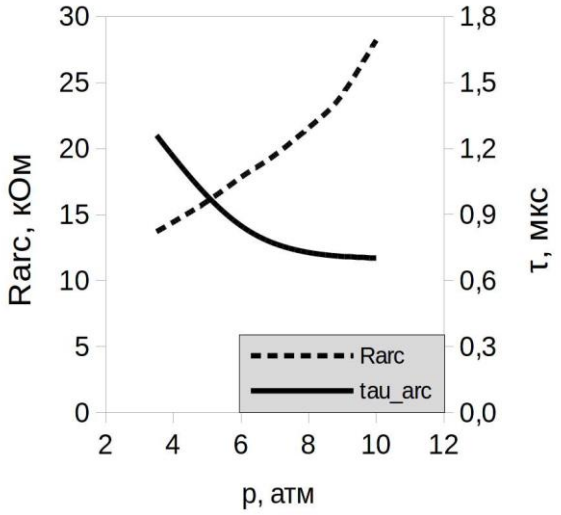

Рис. 1 Сопротивление остаточного ствола дуги (Rarc, пунктир) и тепловая постоянная времени (τ, сплошная линия) в зависимости от давления за время t≈1 мкс до ноля тока.

Важное значение приобретает возможность экстраполяции опытных данных, полученных на уменьшенных моделях ДУ выключателей с газовым дутьем, для прогнозирования параметров соответствующих оригиналов. Принятые допущения позволяют правильно воспроизвести только тепловой пробой, поскольку критерии подобия выводятся из энергетической картины распада ствола дуги. При этом установлено, что при малой величине α диэлектрический пробой может присутствовать в модельном ДУ при отсутствии в оригинале. Масштабные коэффициенты для некоторых электрических параметров приводятся в Таблице 1:

Таблица 1- Масштабные коэффициенты для электрических параметров [3-4].

	Масштабный коэффициент	Значение при α=0,2
dU/dt	$\alpha^{-1/2}$	2,236
dI/dt	$\alpha^{1/2}$	0,4472

Все приведенные примеры в п.1.2 НКР доказывают, что предельная скорость роста переходного восстанавливающего напряжения (ПВН), как характеристика отключающей способности выключателя, зависит от нескольких основных параметров: тока отключения, величины скорости подхода тока к нолю *dI/dt*; значения давления газа; используемой дугогасительной среды; структуры поля обдувающего потока, определяемой геометрией ДУ и относительным расстоянием между контактами; перепада давлений между областями вверх и вниз по потоку. Необходимо отметить приоритетное влияние давления вводимого газа во временном периоде ±100 мкс в окрестности ноля тока на процесс дугогашения в воздушных ВГВ.

В работе[5] представлена связь показателя адиабаты $k=c_p/c_V$ и изменения давления Δp для идеального газа при изохорном процессе (Q – вводимая в систему энергия, V – объем системы):

$$\Delta p = (k - 1)\frac{Q}{V} \quad (6)$$

В окрестности нуля тока среднемассовая температура области между дугогасительными контактами определяется тепловым пограничным слоем плазмы и составляет ~2000 К. В интервале температур меньше 2000 К кривые показателей адиабаты при давлении 10 атм для разных газов показывают более низкие значения для SF_6 (~1,07) по сравнению с воздухом (~1,2) и CO_2 (~1,35) (рис. 1.11). Это означает, что при одинаковом вкладе энергии изменение давления элегаза в рабочем объеме будет отставать от воздуха и CO_2, и использование газов природного происхождения в окрестности нуля тока может оказаться более эффективным по сравнению с элегазом.

Применение СК в современных конструкциях ВГВ осложняется высокой аварийностью приводов, составляющей до 52-72% от общего числа аварий, «размытостью» временных характеристик при установлении наиболее благоприятного «окна отключения». Недостаточное количество дугогасительной

[5] Stoller P.C., Seeger M., Iordanidis A.A., and Naidis G.V. CO2 as an Arc Interruption Medium in Gas Circuit Breakers // IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 41, No. 8, 2013

среды в конце «окна отключения» может стать причиной возникновения аварийной ситуации.

Суть предлагаемого метода СГИ состоит в том, что импульс холодного газа повышенного давления подается в определенную зону ДУ около ноля тока при работе выключателя в предельном режиме. Дополнительный впрыск дугогасительной среды и интенсификация массового расхода газа перед нолем тока будет способствовать усиленному взаимодействию и турбулентному смешиванию газовых потоков разной температуры в пограничном слое остаточного следа плазмы, увеличивая отвод энергии от плазменного столба и вызывая деформацию кривой тока (подобно емкостному шунтированию). Данный подход позволит избежать повторного пробоя после ноля тока, устранить неблагоприятные явления (тепловую закупорку сопла, образование высокотемпературных зон застоя и др.), что минимизируют время горения дуги и повысит дугогасительную способность ВГВ в целом.

Во второй главе детально описывается разработанная физико-математическая модель для потока сжимаемого газа в отсутствии массовых сил, молекулярная структура которого не учитывается, что аналогично исследованиям сплошных сред в аэродинамике. Предложенная модель основана на совместном решении дифференциальных уравнений сохранения массы (7), импульса (8), энергии (9), дополненные уравнением состояния (10), методом контрольного объема в сплошносредном приближении.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho \vec{U}\right) = 0 \tag{7}$$

$$\frac{\partial (\rho \vec{U})}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho \vec{U} \vec{U}\right) = -\nabla p + \nabla \cdot (\beta) \tag{8}$$

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho \vec{U} E\right) = \nabla \cdot \left(\vec{U} \tau\right) - \nabla \cdot \left(p \vec{U}\right) \tag{9}$$

$$\rho = \frac{pM}{RT} \tag{10}$$

где t – время, ρ – плотность, $\vec{U}$ – вектор скорости, p – давление, E – полная энергия, β – тензор вязких напряжений, M – молярная масса, R – универсальная газовая постоянная, T – температура.

При построении зависимостей проводится анализ а) физических процессов в рабочем объеме дугогасительного устройства, в том числе при возникновении ударных волн; б) устанавливаются значения газодинамических параметров в любой точке расчетной области при наличие остаточного дугового столба в окрестности ноля тока; в) оценивается время, необходимое для стабилизации потока; г) выявляются высокотемпературные участки торможения потока газа.

При разработке численной модели используются алгоритмы свободно распространяемого пакета OpenFoam версии 4.1. Работа в пакете, состоящем из набора написанных на языке программирования C++ библиотек, подразумевает редактирование управляющих файлов. В качестве вспомогательных могут быть использованы различные сторонние программные продукты. Задача моделируется с учетом взаимодействия газа и подвижных элементов конструкции, что требует использования в расчетах перестроений сетки. Топологические изменения сетки вокруг заданного набора границ при малом порядке смещения ячейки (малом шаге по времени) сглаживаются решением уравнения Лапласа для скорости:

$$\nabla \cdot \left(\gamma \nabla \overrightarrow{U_m}\right) = 0 \qquad (11)$$

где U_m — вектор скорости, γ — коэффициент «диффузии».

Для расширения возможностей OF и с целью исключить прямое редактирование кода решателя rhoCentralDyMFoam подключается дополнительная библиотека swak4foam, позволяющая создавать собственные граничные условия. Движение поршня заданной массы моделируется как результат воздействия газодинамической силы с учетом торможения, определяемой через интегрирование функции давления движущегося потока по площади поверхности стенки, что отражается в соответствующих файлах. Примеры заполнения управляющих файлов приводятся в Приложении 1. Все расчеты проводились в параллельном режиме с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра Санкт-Петербургского Политехнического Университета Петра Великого.

Верификация разработанной физико-математической модели осуществлялась на экспериментальном стенде ФГБУН «ИЭЭ РАН» (г. Санкт-Петербург) при поперечном и продольном одностороннем газовом дутье. Используемая среда – азот.

Для верификации математической модели на начальном этапе применяется «холодное» моделирование, то есть энергетический вклад дуги на данном этапе не учитывается, сравнение теоретических и экспериментальных результатов проводится до момента зажигания дугового разряда, что существенно уменьшает ресурсоемкость задачи. Однако, на следующем этапе область распространения дуги проектируется высокоэнергетическим сплошным потоком, ограниченным межконтактным промежутком.

Рис. 2 демонстрирует экспериментальную кривую нарастания давления (1), полученную с импульсного датчика давления при поперечном газовом дутье, и расчетное значение давления газа в разрядной камере. Экспериментальная кривая соответствует расчетным данным при введении сжатого газа давления 60 атм (рис. 2), что подтверждает адекватность используемой численной модели. Расчетные зависимости скорости движения поршня при давлении наддува 60 атм и поперечном дутье, а также значения скорости разгона поршня для шести экспериментальных пусков в зависимости от времени протекания процесса представлены на рис. 3.

Учет воздушного амортизатора в процесс торможения оценивался введением в математическую модель дополнительного слагаемого, учитывающего изменение плотности и сжатие расположенного с противоположной стороны поршня амортизируемого объема. Вклад воздушного амортизатора становится заметен после 2,5 мс от начала поступления газа в рабочий объем и приводит к уменьшению скорости разгона на ~4 % к моменту времени 4 мс. Рис. 3 показывает, что расчетная скорость движения поршня получается завышенной по сравнению с данными экспериментов на ~0,8-1 мс. Прежде всего, это отклонение обусловлено тем, что процесс экспериментальной диагностики для оценки скорости разгона поршня заключался в фотосъемке при использовании оптопары на временной базе 1 мс, время отклика системы не учитывалось.

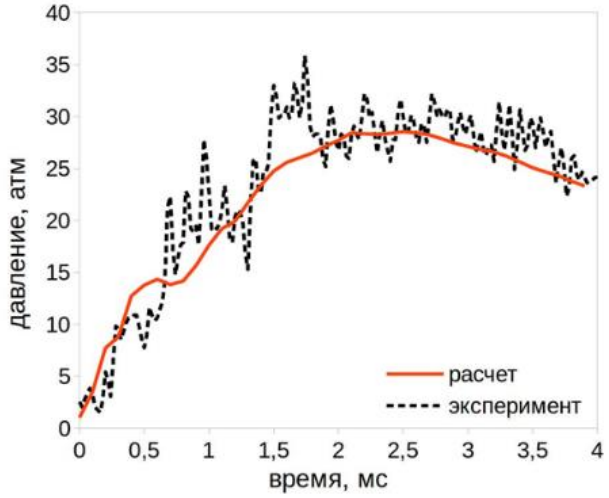

Рис. 2 Экспериментальное и расчетное давление газа в разрядной камере при поперечном дутье, давление наддува 60 атм.

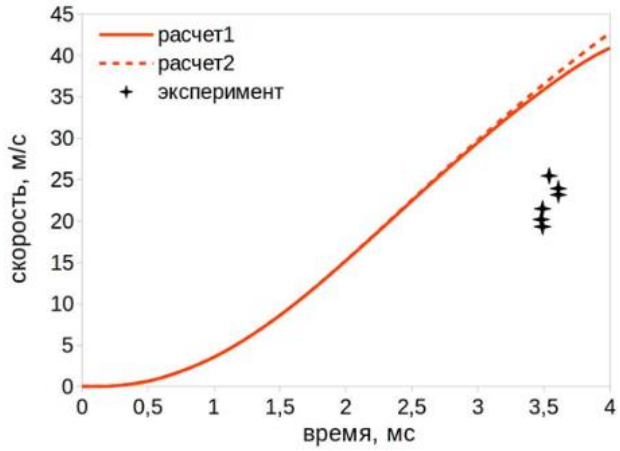

Рис. 3 Скорость поршня с учетом (расчет1) и без учета (расчет2) вклада воздушного амортизатора в различных экспериментах (эксперимент) при поперечном дутье, давление наддува 60 атм.

Сравнительный анализ результатов вычислений и экспериментально полученных данных при продольном одностороннем дутье представлен на рис. 4.

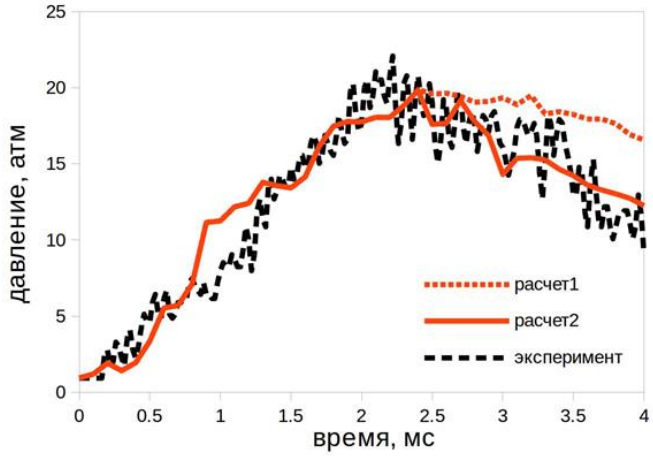

Рис. 4 Теоретические и экспериментальное значения давления при продольном дутье, давление наддува 40 атм.

Черная пунктирная кривая соответствует опытным данным. Красные кривые получены в результате численного моделирования для замкнутого объема разрядной камеры (расчет1) и с разрывом диафрагмы (расчет2) при открытии выходного канала. По результатам моделирования можно предсказать разрыв диафрагмы в эксперименте и определить время открытия выходного отверстия. Совпадение теоретической кривой (расчет1) и экспериментальной зависимости (эксперимент)

подтверждает адекватность численной модели. В данном опыте разрыв диафрагмы фиксируется в момент времени 2,5 мс после начала поступления газа (рис. 4).

Расчетные данные «холодной» модели используются для дальнейшего расчета в «горячей» модели. Для температуры движущегося потока в области между контактами принимается усредненное значение среднемассовой температуры от 5000 до 10000 К в зависимости от фазы тока. Начало расчета соответствует выходу стержневого контакта из соплового катода и инициации дугового разряда между ними. Рис. 5 демонстрирует цветовое распределение температуры в расчетной области для различных моментов времени от начала расчета t_0: t_0+0,1 мс (а), t_0+0,43 мс (б) и t_0+0,65 мс (в).

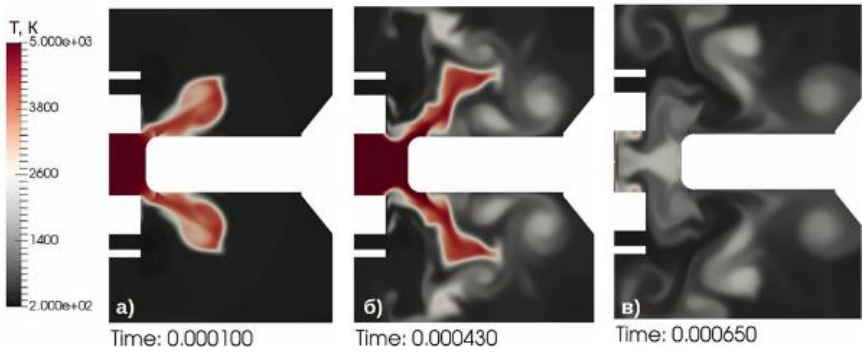

Рис.5 Расчетное распределение температуры в разные моменты времени при продольном дутье, давление наддува 40 атм: а) t_0+0,1 мс, б) t_0+0,43 мс в) t_0+0,65 мс.

Адекватность расчетной модели подтверждается поведением реальной системы. Результаты опытных и расчетных данных по распределению газовых потоков разной яркости (опыт) и температуры (расчет) близко соотносятся в рассматриваемых временных диапазонах: рис. 5 (а) соответствует рис. 6 (а), рис. 5 (в) – рис. 6 (b), если принять время инициации дуги как t_0=4,8 мс в численном моделировании.

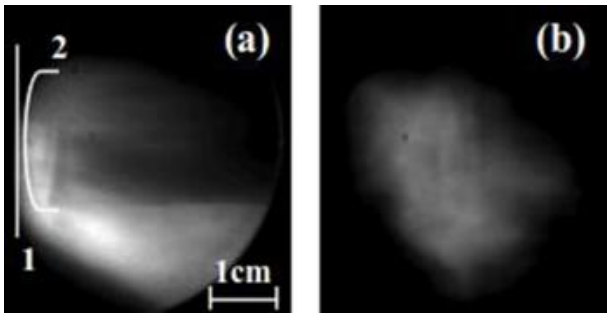

Рис. 6 Высокоскоростная съемка дуги при 4,85 мс (а) и 5,4 мс (b) при давлении наддува 40атм: (1) - кольцевой контакт, (2) - подвижный контакт.

В третьей главе определяются параметры эффективного воздействия СГИ (форма, длительность, время и место подачи импульса) при формировании области вверх по потоку и разрушении зон застоя.

На рис. 7 представлены обобщенные экспериментальные кривые для приведенных значений предельной отключающей способности $RV^*=(dU/dt)/(p^*d_c)$, где p – давление, d_c – диаметр горловины сопла, к скорости подхода тока отключения к нолю dI/dt в тепловой фазе пробоя для ДУ одностороннего и двустороннего дутья воздушных ВГВ, полученных в экспериментах разных авторов.

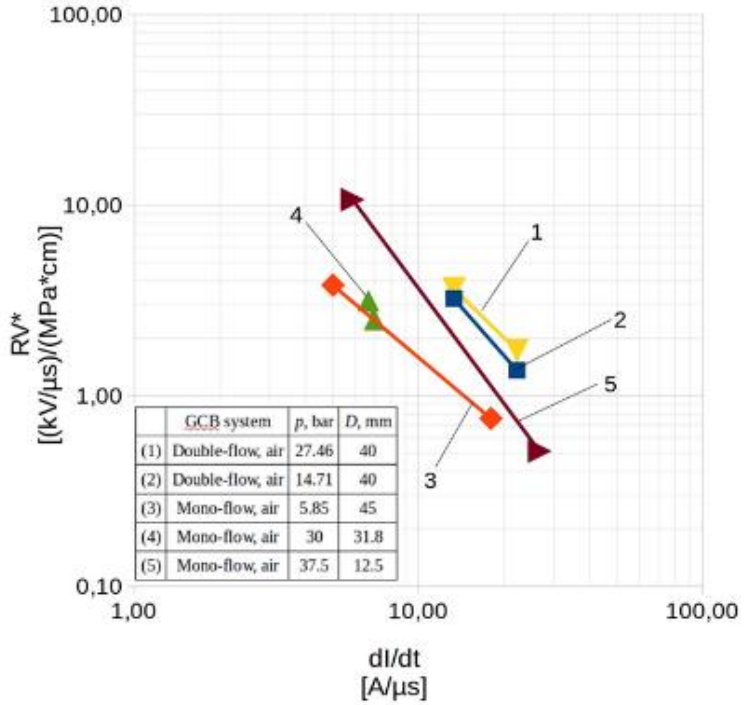

Рис. 7 Приведенная предельная отключающая способность в тепловой фазе пробоя для воздушных выключателей продольного дутья. Обозначения: (1)-(2)[6] - ДУ двустороннего дутья с синхронной коммутацией, (3)[7], (4)[8], (5)[9] — ДУ одностороннего дутья.

[6] T. Morita, M. Iwashita, and Y. Nitta. 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):940–949, May 1978.
[7] A. Briggs and L. King. Factors affecting thermal breakdown in gas blast interrupters. IEE Conf. Dev in Design and Performance, London, pages 52–55, Nov 1979.
[8] A. Briggs. The contribution of axial a 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, UK, London, pages 28–31, 1982.
[9] 8. G. Frind and J. Rich. 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):1675–1684, Sep 1974.

Систематизируя экспериментальные данные по кривой (3), ограничивающей область значений предельной отключающей способности воздушных ДУ, получена следующая зависимость *dU/dt* от давления и скорости подхода тока к нолю

$$\frac{dU}{dt} \sim p^{1,05} \left(\frac{dI}{dt}\right)^{-1,2} \quad (12)$$

Желтая (1) и синяя (2) линии графика построены для систем двухстороннего дутья с синхронной коммутацией. Анализ полученных кривых на рис. 7 позволяет сделать вывод, что управляемая коммутация в классическом варианте дает более высокие результаты. Однако, на эффективность СК влияет конструкция ДУ, поскольку, необходимое условие успешного дугогашения включает в себя динамику смещения дуги в стабильном потоке дугогасительной среды при открытии сопел в конструкции ДУ, оптимальной с точки зрения газодинамики.

Одним из методов повышения дугогасительной способности является обеспечение стационарности потока газа вокруг дугового столба. На расчетной модели, построенной с учетом требований газодинамики, оценивается время «релаксации» газового потока для определения нижней границы инициации СГИ перед нолем тока в идеальном случае без учета подготовительного этапа отклика системы. Признаки стационарного течения газового потока (без значительных флуктуаций газодинамических параметров) в межконтактном промежутке наблюдаются в интервале после 0,8-0,9 мс для разных конструкций сопел, что является нижним временным пределом эффективного взаимодействия газового потока с остаточным следом плазмы перед нолем тока.

Поэтому, чтобы обеспечить максимальный энергообмен газ-плазма в окрестности ноля тока, инициация процесса СГИ с учетом собственного времени по стабилизации газового потока должна стартовать не позднее 0,9 мс до ноля тока. Восстановление электрической прочности в течение первых 0,1 мс после ноля тока обусловлено давлением вводимого воздуха. Тогда, длительность СГИ должна составлять не менее 0,1+0,9=1,0 мс для воздушных ВГВ.

Принимая во внимание работы T.Morita, A.Briggs, опыты по успешной коммутации в диапазоне 1,5-2 мс и критическое значение относительного давления p_u/p_d=3 (ссылки[6,8], стр. 18), где p_u, p_d – давление в области вверх и вниз по потоку соответственно, устанавливается величина длительности импульса СГИ 1,5-2 мс при превышении давления СГИ над базовым потоком газа в 2-3 раза. Тогда методика СГИ будет гарантировать успешное перекрытия волны ПВН при номинальном токе отключения и возможном отключении токов перегрузки. Характерная форма кривой импульса СГИ с учетом указанных особенностей представлена на рис. 8.

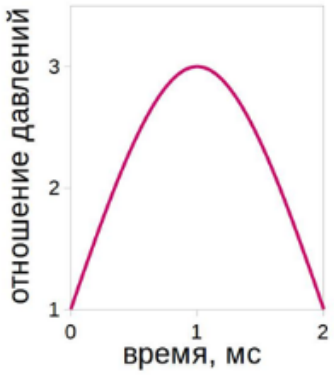

Рис.8 Параметры импульса СГИ.

Для проверки эффективности воздействия СГИ в зоне торможения газового потока используется модель классического ДУ двустороннего продольного воздушного дутья следующей геометрии: d_1/d_2=0,5, x/d_2=0,6, где d_1 — диаметр металлического сопла (nozzle1), d_2 — диаметр изолирующего сопла (nozzle2), x — расстояние между критическими сечениями сопел (рис. 9).

Анализ воздействия СГИ на точки «застоя» проводится для различных диаметров инжектора d ($k=d/d_c$). На рис. 10 продемонстрировано распределение газодинамических параметров: без СГИ (a), в присутствии СГИ k=0,2 (b), k=0,33 (c). Величина массового расхода СГИ ограничена пропускной способностью диаметра инжектора соответствующего размера. Значение давления определяется по цветовой шкале. Цветные контуры обозначают границы области, характеризующиеся указанным числом Маха.

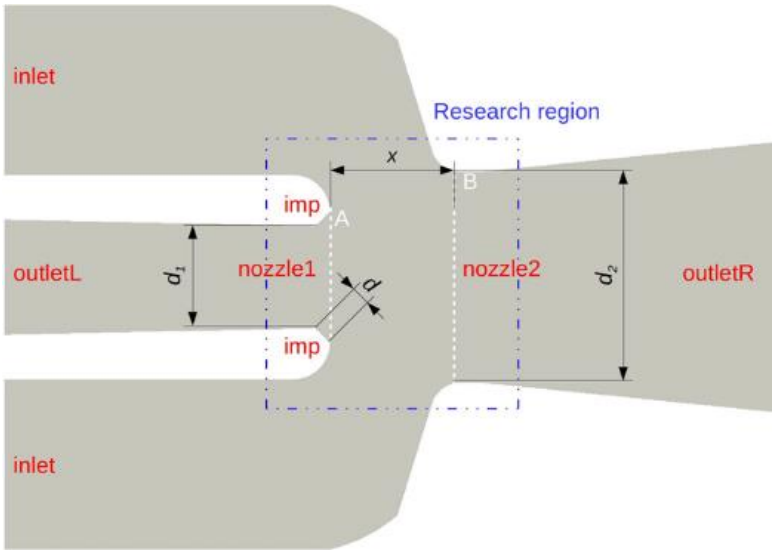

Рис. 9 Расчетная модель классического ДУ двустороннего дутья.

При *k*=0,2 (рис. 10(b)) наблюдается снижение давления и рост скорости потока в рассматриваемой зоне «застоя». Зона торможения газового потока уменьшается и смещается к металлическом соплу при *k*=0,33 (рис. 10(c)). Градиент давления сопровождается изменением полей скоростей. Направление и амплитуда скорости газового потока изменяются для всех рассматриваемых случаев СГИ, что подтверждается обозначенным цветными контурами значением числа Маха (рис. 10), и свидетельствует о дополнительной турбулизации исследуемой области.

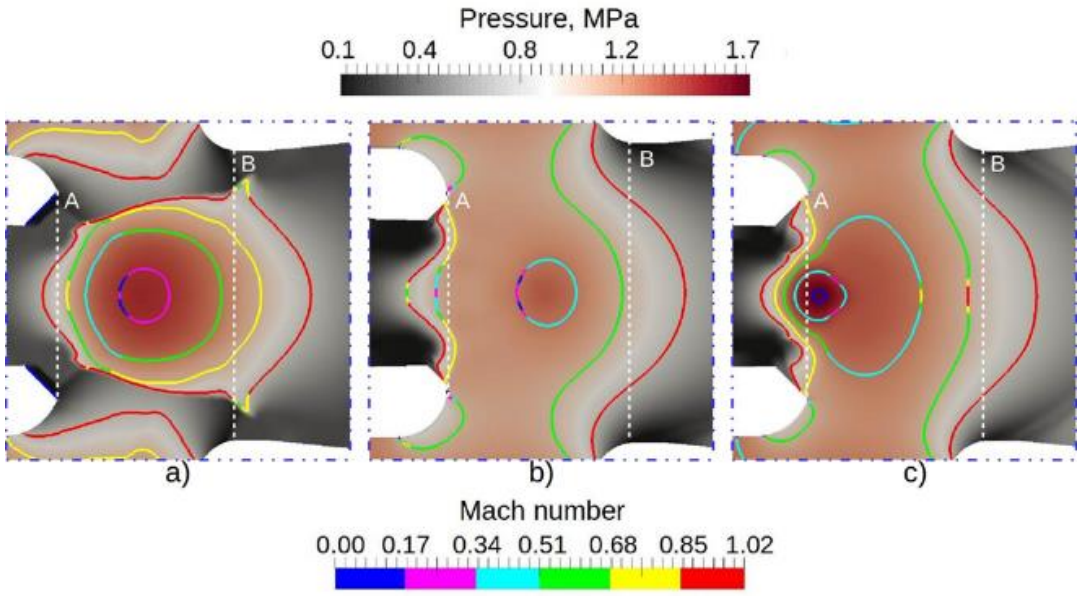

Рис. 10 Анализ влияния СГИ на зоны торможения в базовом потоке газа: без СГИ (a), в присутствии СГИ *k*=0,2 (b), *k*=0,33 (c)

Рост массового расхода способствует теплообмену газ-плазма и, как следствие, повышает отключающую способность ДУ, а увеличение давления в горловинах сопел при эффективном массовом расходе играют важную роль в повышении отключающей способности ВГВ в соответствии с известной зависимостью $dU/dt \sim p^n$. На рис. 11 показаны значения нормированного массового расхода $(\rho\upsilon)/(\rho_0 w)$ и на рис. 12 – отношение значений давления при СГИ к давлению базового потока (p/p_0) вдоль оси системы в зависимости от нормированного расстояния $X=a/d_c$ (t=1 мс – при амплитудном значении импульса – пунктир; t=2 мс – после окончания импульса — сплошные линии; k=0,2 – синие, k=0,33 – красные, базовый поток — зеленая кривые соответственно; ρ – расчетное значение плотности потока при СГИ; υ – расчетная скорости потока при СГИ; ρ_0 – плотность базового потока; w – скорость звука при нормальных условиях; a – расстояние между горловиной металлического сопла (nozzle1) и рассматриваемой точкой на оси расчетной области). Показана эффективность воздействия СГИ для разрушения зоны «застоя» в центральной части исследуемой области между горловинами сопел.

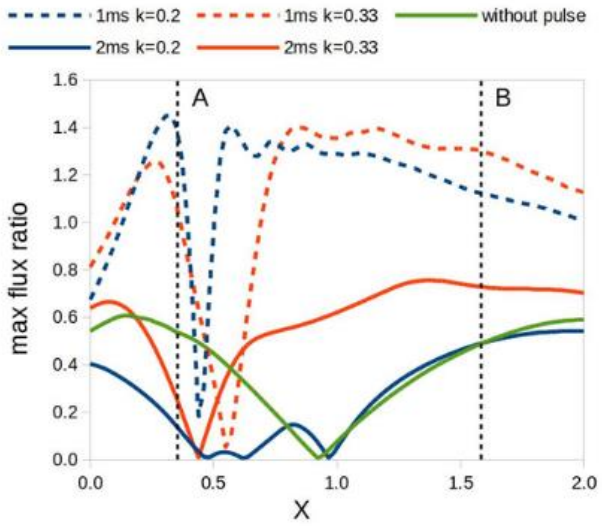

Рис. 11 Нормированный массовый расход $(\rho\upsilon)/(\rho_0 w)$ вдоль оси системы в зависимости от нормированного расстояния X, t=1 мс – пунктир, t=2 мс – сплошные линии, k=0,2 – синие кривые, k=0,33 – красные кривые.

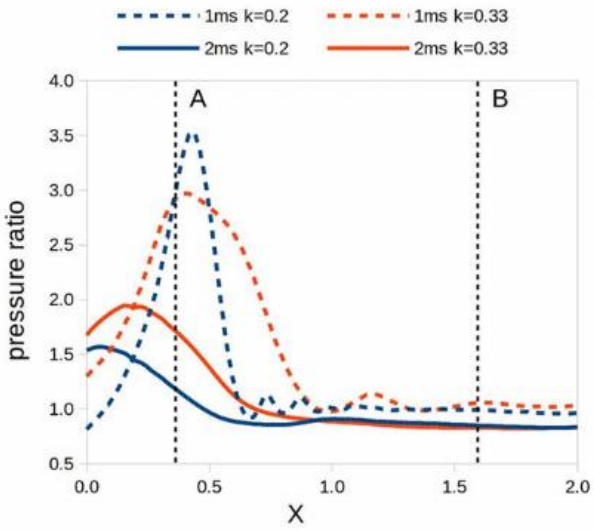

Рис. 12 Отношение давлений p/p_0 вдоль оси системы в зависимости от нормированного расстояния X, t=1 мс – пунктир, t=2 мс – сплошные линии, k=0,2 – синие кривые, k=0,33 – красные кривые.

Деформация области «застоя» является эффективным средством повышения отключающей способности ВГВ. СГИ не только увеличивает массовый расход через горловины сопел и способствует дополнительному отводу энергии, но и повышает давление в области вверх по потоку, в целом. Цветовая дифференциация для контуров числа Маха подтверждает изменение скоростных характеристик (величину и направление), что указывает на турбулизацию потока и, в условиях горения дуги, приводит к росту мощности потерь и повышению скорости восстановления электрической прочности при распаде дугового столба.

На примере классического ДУ продольного одностороннего дутья рассмотрим формирование области вверх по потоку при воздействии СГИ (рис. 13).

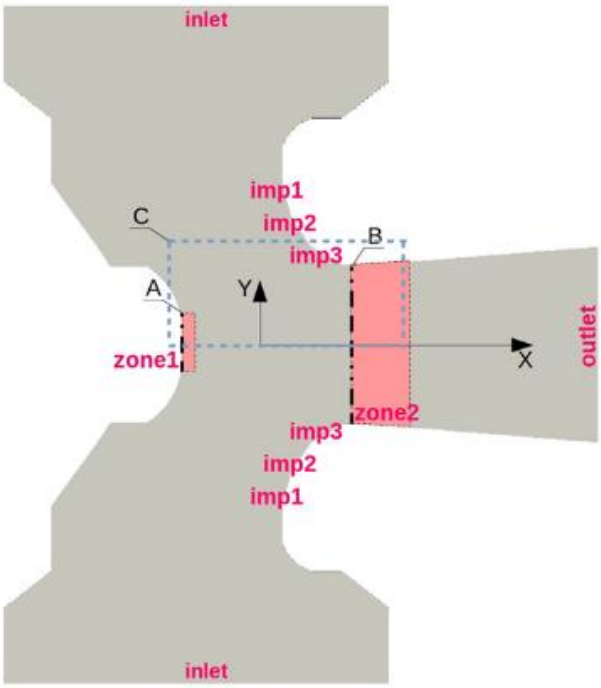

Рис. 13 Расчетная область модельного ДУ одностороннего дутья.

Геометрические размеры и форма сопла подбирались с учетом соотношения s/d_c~1, где s – расстояние между контактом (A) и горловиной сопла (B), d_c – диаметр горловины сопла. Через входное отверстие (inlet) подается газ (воздух) давлением p_0. Импульс газа давлением p осуществляется через инжекторы диаметром d (imp1, imp2, imp3), расположенными на различном расстоянии от горловины сопла диаметром d_c (d/d_c≈0,2). Розовым выделены области, представляющие особый интерес: «zone1» —

область торможения газового потока, «zone2» — наиболее вероятное место для гашения дуги. Импульс газа подается в расчетную область через один из инжекторов при достижении стационарности базового потока через 1 мс после начала расчета. Взаимодействие базового потока и импульса газа формируют область вверх по потоку.На рис. 14 представлен сравнительный анализ изменения нормированного массового расхода во времени при СГИ через разные инжекторы по отношению к базовому потоку в зоне застоя (zone1). Место для СГИ выбирается при усреднении величины массового расхода во времени, максимальное значение которого соответствует инжектору «imp3».

Рис. 15 демонстрирует распределение относительного давления (p/p_0) при СГИ через выбранный инжектор (imp3) вдоль оси системы для различных моментов времени от начала СГИ. Нормированное расстояние X от контакта (A) определяется как $X=x/d_c$, где x — расстояние вдоль оси OX соплового канала. За начало инжекции условно принимается t_0=0 мс.

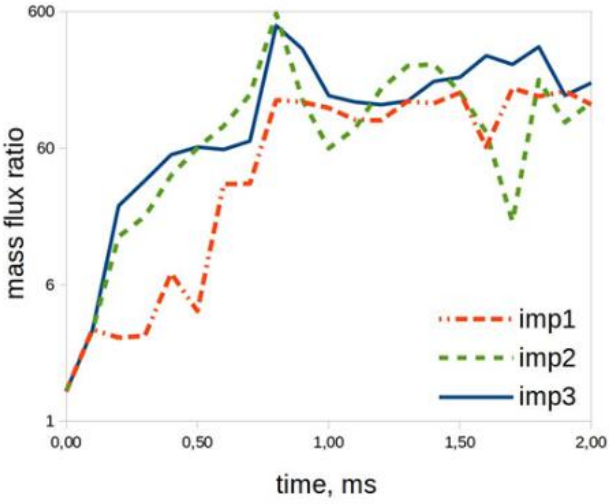

Рис. 14 Нормированный массовый расход в точках застоя для различных инжекторов (imp1, imp2, imp3)

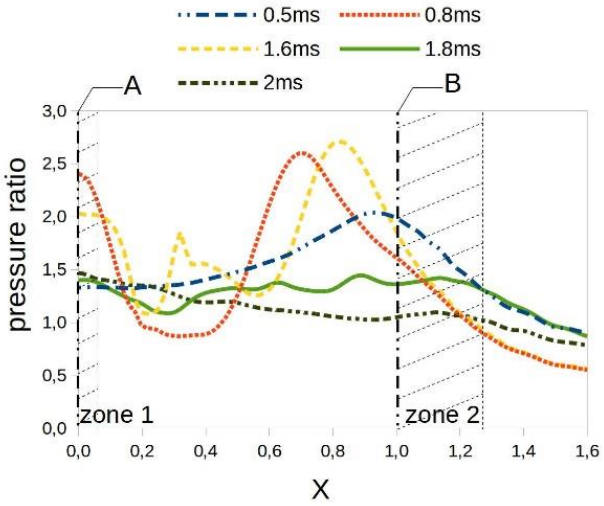

Рис. 15 Относительное давление вдоль оси системы для различных моментов времени от начала СГИ через инжектор (imp3).

В интервале 0,5-0,8 мс (синяя, красная кривые) наблюдается резкий рост давления по отношению к базовому значению перед горловиной сопла. Далее, сформированная ударная волна начинает распространяться к контакту (A) и отражается от него, интенсивно воздействуя на зону торможения газового потока

(zone1). Изменение газодинамических параметров в области вверх по потоку во временном диапазоне 0,8-1,6 мс определяется взаимодействием волн между собой и их последовательным отражением от неподвижных элементов конструкции (красная, желтая кривые). С приближением к t=2 мс нестационарные процессы затухают (зеленая, черная кривые).

При рассмотрении «горячей» модели в зоне расположения дугового столба моделировалась область высокой температуры и малой плотности в стационарном базовом потоке, характеризующемся соответствующим распределением давления и скорости. Для сравнительного анализа на рис. 16 тепловой пограничный слой дуги температурой 2000 К выделяется цветными контурными линиями, соответствующими разным моментам времени от начала процесса, t_0=0 мс – начало СГИ желтая кривая), t_1=0,35 мс — начальное время активных взаимодействия между фронтом импульса газа и пограничным слоем дуги (синяя кривая), t_2=t_1+0,1 мс (красная кривая), t_3= t_2+0,05 мс (черная кривая).

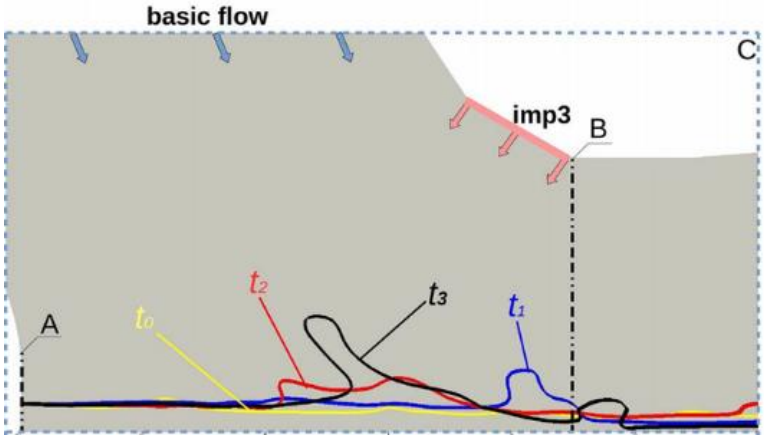

Рис. 16 Деформация теплового пограничного слоя дуги при воздействии СГИ в разные моменты времени: t_0=0 мс, t_1=0,35 мс, t_2= t_1+0,1 мс, t_3= t_2+0,05 мс.

Рис. 16 подтверждает, что СГИ оказывает деформирующий эффект на тепловой пограничный слой плазменного столба при моделировании с учетом энерговклада дуги. Деформация определяется введенной массой газа при СГИ. Смещение пограничного слоя и повышение площади взаимодействия охлаждающего газа и дуги обеспечивает турбулентное перемешивание потоков разной температуры в области

вверх по потоку. Это способствует ускоренному восстановлению электрической прочности промежутка и повышает эффективность дугогашения.

В четвертой главе проводится верификация СГИ на основании эмпирически выведенных соотношений (1.1-1.5) при анализе опытных данных на модельном ДУ одностороннего продольного воздушного дутья в совокупности с методами компьютерного моделирования. Эксперименты проводились с коническим дутьевым соплом с диаметром горловины сопла 6 мм, углом сужения конфузора 45^0 и углом расширения диффузора 14^0. Серия опытов выполнялась при частоте основного контура 50 Гц, напряжении 10 кВ и амплитуде первой полуволны тока 1200 А.

Обобщенные результаты эффективности воздействия СГИ для различных параметров при относительных давлениях базового потока 4, 6, 8, 10 атм, усредненные по площади сечения рассматриваемой области (начальной части диффузора на выходе из горловины сопла) при минимизации массового расхода за счет уменьшения диаметра ближайшего к горловине сопла в области вверх по потоку инжектора (d=0,1d_c), показаны в таблице 2.

Таблица 2 – Обобщенные результаты оценки эффективности воздействия СГИ.

Параметр	Δp=4 атм	Δp=6 атм	Δp=8 атм	Δp=10 атм
Давление, в %	+25	+25	+25	+26
Температура, в %	-41	-41	-42	-42
Массовый расход, в %	+18	+18	+19	+19
Деформация диаметра дуги без учета фазы тока, в %	-4,7	-6,3	-8	-9,7
Напряжение на дуге без учета фазы тока, в %	+21	+24	+28	+31
Сопротивление дуги, в %	+12	+18	+25	+33
Тепловая постоянная времени, в %	-11	-9	-7	0
$(dI/dt)_{ср}$, в %	+3,7	+5	+6,3	+7,6
$(dU/dt)_{ср}$, в %	+21	+28,5	+34	+40

Применение методики СГИ в рассматриваемом ДУ одностороннего продольного воздушного дутья приведет к увеличению предельной отключающей способности в тепловой фазе пробоя в диапазоне {21-40}% в зависимости от начального давления сжатого газа, обеспечивающего основной поток. Значения dU/dt получены с учетом увеличения величины давления основного потока в 1, 1,5, 2 и 2,5 раза для 4, 6, 8, 10 атм соответственно.

Экстраполируя опытные данные, полученные на уменьшенной модели ДУ одностороннего продольного воздушного дутья, на соответствующие оригиналы (α=0,2) с использованием масштабных коэффициентов (табл. 1.1) можно численно оценить изменения значений электрических параметров оригинального ВГВ (Δp=10 атм) с применением методики СГИ при условии минимизации размера инжектора, определяющего расход вводимого газа при СГИ. Полученные результаты занесены в таблицу 3.

Таблица 3 - Прогнозирование электрических параметров методом теории подобия для физического моделирования оригиналов ВГВ (Δp=10 атм) при воздействии СГИ (d=0,1d_c, $p_{сги}/\Delta p$=3).

Параметр	Масштабный коэффициент	Значение при α=0,2	Модель	Оригинал
dI/dt, в %	$\alpha^{-1/2}$	2,236	+7,6	+17
dU/dt, в %	$\alpha^{1/2}$	0,4472	+40	+18

Заключение

В заключении подводятся итоги диссертационного исследования, излагаются его основные результаты:

1. Предложен новый подход «синхронная импульсная инжекция газа» (СГИ) для повышения эффективности дугогашения в дугогасительных системах высоковольтных газонаполненных выключателей.

2. Показано, что использование газов природного происхождения для синхронной импульсной инжекции газа обладает высоким потенциалом.

3. Разработана нестационарная математическая модель, учитывающая взаимодействие потока газа с пограничным слоем плазмы и подвижными элементами конструкции дугогасительной системы. В модели предусмотрены возможности программирования собственных граничных условий.

4. Доказана адекватность разработанной расчетной модели экспериментом.

5. Получена обобщенная формула для усредненной предельной отключающей способности воздушных дугогасительных устройств: dU/dt пропорциональна давлению при $p^{1,05}$ и скорости подхода тока к нолю $(dI/dt)^{-1,2}$.

6. Определены параметры эффективного воздействия синхронной газовой инжекции: а) критическое значение давления СГИ в 2-3 раза больше давления базового потока; б) длительность СГИ не менее 1 мс для воздушных дугогасительных устройств; в) направленное воздействие СГИ в зоны горловины сопла и зоны торможения газового потока в области вверх по потоку); г) место введения СГИ через инжектор, ближайший к горловине сопла в области вверх по потоку.

7. Оценены значения электрических параметров и доказана эффективность применения СГИ для высоковольтных газовых выключателей переменного тока при совместном использовании эмпирически выведенных формул и компьютерного моделирования. Верификация методики СГИ на модельном ДУ одностороннего продольного дутья приводит к улучшению отключающей способности соответствующего оригинала, как минимум, на 18% при росте скорости подхода тока к нолю на 17%, что, в целом, говорит о перспективах предлагаемого подхода.

Результаты работы, базирующиеся на теоретической основе, верифицированные численными методами и эмпирически полученным математическим аппаратом на основе обширной экспериментальной базы, могут быть применены для улучшения отключающей способности высоковольтных газонаполненных выключателей переменного тока. Тема НКР (диссертации) актуальна и перспективна для высоковольтной техники защиты при переходе к экологически чистой и ресурсосберегающей электроэнергетике, «умной»

коммутационной аппаратуре при интеллектуализации энергосистем с постоянно растущими требованиями к их надежности и ресурсоемкости.

Список работ, опубликованных по теме научно-квалификационной работы (диссертации)
Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК

1. Kurakina N. Study of the stagnation region in HV gas-blast interrupters with synchronous gas injection / Frolov V., Tonkonogov E. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2019. Vol 643 (1), p. 012044. (рекомендовано ВАК, индексируется в базе SCOPUS)
2. Kurakina N. Formation of the Upstream Region in HV Gas Blast Interrupters with Synchronous Gas Injection / Frolov V., Tonkonogov E. // Plasma Physics and Technology. - 2019. Vol. 6, No. 1 - pp. 43-46 (рекомендовано ВАК, индексируется в базе SCOPUS)
3. Kurakina N. Gas flow–switching arc interaction in HV synchronous gas blast interrupters / Frolov V., Tonkonogov E. // E3S Web of Conferences. - 2019. 140, p. 04016. (рекомендовано ВАК, индексируется в базе SCOPUS)
4. Pinchuk M. Axial Blast Type Discharge Chamber with Moving Electrode / Budin A., Kurakina N., Leks A. // Plasma Physics and Technology. - 2019. Vol. 6, No. 3 - pp. 227-230 (рекомендовано ВАК, индексируется в базе SCOPUS)
5. Kurakina N. Analysis of the gas dynamics in the discharge chamber with a movable electrode / Pinchuk M., Budin A., Smirnovsky A. // Journal of Physics: Conference Series. — 2018. 1135 (1), p. 012094 (рекомендовано ВАК, индексируется в базе SCOPUS)
6. Куракина Н.К. Численное исследование в программном пакете OpenFOAM газодинамических процессов в разрядной камере с подвижным электродом / Пинчук М.Э., Будин А.В., Смирновский А.А., Фролов В.Я. // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. - 2018. Т. 24 № 2, С. 69-81. (рекомендовано ВАК)

7. Куракина Н.К. Моделирование течения газа в разрядной камере при размыкании контактной системы / Пинчук М.Э., Будин А.В., Смирновский А.А., Кузнецов В.Е., Киселев А.А. // Известия высших учебных заведений. Физика. - 2018. Т. 61. № 9-2 (729). С. 176-179 (рекомендовано ВАК)
8. Budin A. Experimental stand for investigations of insulator degradation and electrode erosion in high-current breaker / Pinchuk M., Leontev V., Leks A., Kurakina N., Kiselev A., Simakova Y., Frolov V. // Plasma Physics and Technology. - 2017. Vol. 4, No. 2 - pp. 120-123 (рекомендовано ВАК, индексируется в базе SCOPUS)
9. Будин А.В. Экспериментальный стенд для исследования дуговых и эрозионных процессов в высоковольтных сильноточных выключателях / Пинчук М.Э., Кузнецов В.Е., Леонтьев В.В., Куракина Н.К. // Приборы и техника эксперимента. - 2017. № 6. С. 61-66 (рекомендовано ВАК, индексируется в базе SCOPUS, Web of Science)

   Версии: Budin A.V. An experimental setup for investigation of arc and erosion processes in high-voltage high-current breakers / Pinchuk M.E., Kuznetsov V.E., Leontev V.V., Kurakina N.K. // Instruments and Experimental Techniques. - 2017. Т. 60. № 6. С. 837-842 (рекомендовано ВАК, индексируется в базе SCOPUS, Web of Science)

Публикации в других изданиях

10. Куракина Н.К. Экспериментальные и теоретические исследования сильноточной дуги в разрядной камере с продольным продувом газа / Пинчук М.Э., Будин А.В., Смирновский А.А. // XII Международная научная конференция «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики». - 2019. С. 80-83. (РИНЦ)

Аспирант _____ Н.К. Куракина
(подпись)