



ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

На правах рукописи

Чусов А.

Чусов Александр Николаевич

**Разработка мультикамерного разрядника
с повышенной отключающей способностью**

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель:

Фролов Владимир Яковлевич

доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Шишигин Сергей Леонидович

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры управляющих и вычислительных систем Института машиностроения, энергетики и транспорта федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Вологодский государственный университет», г. Вологда

Самусенко Андрей Викторович

кандидат технических наук, доцент кафедры радиофизики Физического факультета федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», г. Санкт-Петербург

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва

Защита состоится «13» марта 2025 г. в 16.00 часов на заседании диссертационного совета У.2.4.2.13 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, главный учебный корпус, аудитория 150

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте www.spbstu.ru

Автореферат разослан «__» _____ 20__ г.

Ученый секретарь

диссертационного совета У.2.4.2.13

кандидат технических наук, доцент



Иванов Дмитрий Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Грозовые перенапряжения являются одной из основных причин отключения воздушных линий электропередачи (ВЛ) и повреждения оборудования. Поиск эффективного и одновременно экономичного метода молниезащиты остаётся одной из наиболее актуальных проблем электроэнергетики. Традиционные методы молниезащиты, такие, как установка на линию грозозащитного троса или нелинейного ограничителя напряжения (ОПН), показали свою эффективность, однако были выявлены и их слабые стороны, в связи с чем в последние годы стали появляться альтернативные решения.

Разработкой новых устройств молниезащиты в разные годы занимались Подпоркин Г.В., Сиваев А.Д., Дж.Калб, Т.Чино, Ю. Чен, З.Ли, Я.Вэнг.

Одним из наиболее перспективных устройств является мультикамерный разрядник (РМК), обладающий по сравнению с ОПН такими преимуществами, как более высокая устойчивость к прямым ударам молнии (ПУМ) и более низкая стоимость. РМК успешно и широко применяется для защиты ВЛ среднего класса напряжения (до 35 кВ включительно) в России и за рубежом, при этом их применение для защиты линий высокого класса напряжения 110 кВ и выше пока ограничено, что связано с принципом работы устройства. Подобно высоковольтному выключателю, осуществляет так называемое гашение в нуле (ГН), то есть, ток короткого замыкания (КЗ) обрывается почти сразу после перехода через нулевое значение. При этом протекание тока КЗ через РМК вызывает эрозию электродов, и при достаточно больших значениях тока КЗ может приводить к снижению отключающей способности. Однако исследования последних лет показали, что при определённых условиях может быть реализован альтернативный режим работы устройства – гашение в импульсе (ГИ), при котором время прерывания тока КЗ существенно снижено по сравнению с ГН и не превышает нескольких сотен микросекунд. В режиме ГИ эрозия оказывается незначительной и перестаёт быть принципиальным ограничивающим фактором. Позднее было обнаружено, что стабильно воспроизводимого перехода в режим ГИ можно добиться, подобрав нужным образом параметры конструкции РМК. Особенно эффективным для повышения отключающей способности оказалось применение дополнительной полости в разрядной камере – напорной камеры. К сожалению, совершенствование конструкции разрядной камеры исключительно экспериментальным методом оказалось трудоёмким, длительным и дорогостоящим процессом, в связи с чем возникла необходимость в применении численного моделирования. Данное диссертационное исследование направлено на разработку расчётной методики, применимой для оценки отключающей способности разрядников и её использования для повышения

отключающей способности РМК, работающего на принципе ГИ, за счёт расчёта параметров напорной камеры.

Степень разработанности темы исследования

Важные результаты в области молниезащиты линий электропередачи получены Э. Базеляном, Гайворонским. Разработкой новых устройств молниезащиты в разные годы занимались Дж. Калб, Т. Чино, Т. Отака, Ю. Чен, З. Ли, Я. Вэнг.

В работах Г.В. Подпоркина и А.Д. Сиваева была впервые представлена концепция мультикамерного разрядника, сформулированы основные принципы их проектирования и испытаний. Дальнейшим развитием этих идей занимались В.Е. Пильщиков, Е.С. Калакутский, Е.Ю. Енькин.

В свою очередь исследователи В.Я. Фролов, Д.В. Иванов, Ю.В. Мурашов, Д. Урландт, Р. Козаков, М.Э. Пинчук, А.В. Будин, Нордборг Х., Фюкс Р., Мюрманн М. проводили экспериментальные и теоретические исследования гашения дуги в разрядной камере мультикамерного разрядника. Несмотря на заметные в успехи в разработке математических моделей дугового разряда и полученное в ряде работ качественное согласие расчёта с опытом, а также наличие значительного количества экспериментальных данных, не было проведено систематической работы по валидации математической модели. При этом без внимания был оставлен вопрос о том, возможно ли с помощью моделирования выявлять зависимость эффективности гашения разрядной камеры от её конструктивных параметров.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования является мультикамерный разрядник, работающий в режиме гашения дуги в импульсе.

Предмет исследования – процесс гашения импульсной дуги в разрядной камере мультикамерного разрядника.

Цель работы

Разработка мультикамерного разрядника нового типа с повышенной отключающей способностью путём совершенствования конструкции разрядной камеры.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Разработать экспериментальную методику для измерения отключающей способности мультикамерных разрядников
2. Разработать экспериментальную методику для измерения характеристик разряда в разрядной камере
3. Разработать математическую модель разрядной камеры и провести её валидацию на основе экспериментальных данных, полученных с помощью разработанных ранее методик

4. Провести исследование зависимости эффективности гашения мультикамерного разрядника от параметров конструкции разрядной камеры с помощью численного и натурного экспериментов

5. Выработать технические рекомендации по улучшению конструкции разрядной камеры для повышения отключающей способности

Научная новизна

1. В рамках данной работы впервые были исследованы характеристики импульсной дуги в разрядной камере мультикамерного разрядника: проведены измерения падения напряжения, скорости истечения, распределения температуры в плазменной струе.

2. Разработанная на основе полученных данных о горении импульсной дуги математическая модель разрядной камеры позволила впервые в рамках численного моделирования рассмотреть процесс гашения импульсной дуги и воспроизвести переход из режима гашения в нуле в режим гашения в импульсе.

3. На основе полученной математической модели впервые разработана расчётная методика оценки эффективности технических решений по улучшению конструкции разрядной камеры.

Теоретическая значимость работы

1. Результаты диссертационного исследования показали, что существующие методы математического моделирования дуговых разрядов подходят для теоретического исследования импульсной дуги в мультикамерном разряднике.

2. Полученная математическая модель достаточно точно описывает динамику разряда на стадии протекания тока молнии, о чём говорит хорошее совпадение расчётного и измеренного падений напряжения.

3. Также модель позволяет описывать восстановление электрической прочности разрядной камеры, о чём говорит сопоставление теоретических и экспериментальных оценок отключающей способности.

Практическая значимость работы

1. Оценки параметров разряда, такие как скорость истечения газа и температура, улучшают понимание протекающих в мультикамерном разряднике процессов и должны учитываться при проектировании и подборе материалов для новых устройств.

2. Полученные в работе экспериментальные данные могут быть использованы для валидации новых, более точных математических моделей

3. Предложенная в работе расчётная методика оценки отключающей способности применяется при проектировании новых устройств.

Методология и методы исследования

Для выполнения поставленных задач в работе наряду с методами диагностики газовых разрядов и высоковольтных испытаний использовались методы численного моделирования.

Для измерения температуры применялся метод эмиссионной спектроскопии, измерения импульсного давления проводились с помощью пьезоэлектрического датчика. Теневая и высокоскоростная съёмка осуществлялись с помощью и высокоскоростной камеры, ПЗС-камеры и теневого прибора. Ток измерялся высокоомным шунтом, напряжение ёмкостным делителем напряжения. Моделирование процесса дугогашения было выполнено в конечноэлементном программном комплексе Comsol Multiphysics.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Математическая модель разрядной камеры мультимерного разрядника, позволяющая исследовать процесс гашения дуги и оценивать эффективность технических решений по совершенствованию конструкции устройства.

2. Методика экспериментальных исследований, позволившая провести валидацию математической модели.

3. Расчётная методика оценки отключающей способности мультикамерного разрядника.

4. Технические решения по улучшению конструкции разрядной камеры, полученные с помощью численного эксперимента.

Степень достоверности результатов работы

Все использовавшиеся в исследовании подходы к решению поставленных задач опирались на фундаментальные законы физики плазмы, газодинамики, термодинамики, электротехники и современные апробированные методики экспериментального и теоретического исследования электрофизических явлений.

Апробация результатов работы

Результаты исследования были представлены и обсуждались на следующих российских и международных конференциях:

1. Международная конференция по молниезащите ICLP2016 (Португалия, Эшторил, 2016 г.);
2. Международная конференция по молниезащите ICLP2021 (Шри-Ланка, Коломбо, 2021 г.);
3. Международная конференция по молниезащите ICLP2022 (ЮАР, Кейптаун, 2022 г.);
4. Российская конференция по молниезащите RCLP2016 (Россия, г. Санкт-Петербург, 2016 г.)
5. Российская конференция по молниезащите RCLP2018 (Россия, г. Санкт-Петербург, 2018 г.)
6. Российская конференция по молниезащите RCLP2022 (Россия, г. Санкт-Петербург, 2022 г.)

7. Азиатско-Тихоокеанская конференция по молниезащите APL2017 (Тайланд, Краби, 2017 г.)
8. Азиатско-Тихоокеанская конференция по молниезащите APL2019 (Китай, Гонконг, 2019 г.)
9. Конференция российских молодых исследователей в области электротехники и электроники: ElConRus-2023 (Россия, г. Санкт-Петербург, 2023 г.)
10. XXI Международная конференция Physics of Switching Arcs (Чехия, Нове-Место-на-Мораве, 2015 г.)
11. XXII Международная конференция Physics of Switching Arcs (Чехия, Нове-Место-на-Мораве, 2017 г.)
12. XXIII Международная конференция Physics of Switching Arcs (Чехия, Нове-Место-на-Мораве, 2019 г.)
13. 22-ая Международная конференция Gas Discharges and Their Applications (Сербия, Нови Сад, 2018 г.)
14. XII научная конференция “Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики” (Россия, Санкт-Петербург, 2019 г.)
15. Международная конференция Comsol Conference 2017 (Голландия, Роттердам, 2017 г.)
16. Международная конференция Comsol Conference 2018 (Швейцария, Лозанна, 2018 г.)
17. XXXI международная конференция “Уравнения состояния вещества” (Россия, Приэльбрусье, 2016 г.)

Диссертация выполнена в рамках исследований по государственному заданию Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FSEG-2023-0012).

Личный вклад автора

Постановка цели и задачи исследования, определение проблематики исследования. Выполнение анализа научно-технической и справочной литературы по теме исследования. Создание математических моделей в среде COMSOL Multiphysics, планирование и проведение экспериментальных исследований. Обработка полученных данных, формулировка выводов. Подготовка публикаций и научных докладов, а также рукописи диссертации.

Публикации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 14 научных работах, опубликованных соискателем, в том числе в 3 публикациях в научных журналах категории K1 и K2 из Перечня ВАК и приравненных к ним, и в 7 публикациях, индексируемых в международных базах данных.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы научно-исследовательской работы (диссертации), сформулирована цель, поставлены задачи, раскрыты научная новизна работы, её теоретическая и практическая значимость, представлены выносимые на защиту положения.

Первая глава посвящена обзору состояния исследований в области защиты воздушных линий электропередачи от грозových перенапряжений. Рассмотрены традиционные решения и альтернативные подходы. Проанализированы существующие экспериментальные методы исследования электрофизических процессов в устройствах молниезащиты наряду с теоретическими методами, оценены их эффективность и перспективы применения для разработки новых устройств и совершенствования существующих.

Отдельно обсуждается положение дел в исследовании мультикамерных разрядников (РМК) (см. Рис.1), разъяснены базовые принципы работы устройств данного типа, приведены актуальные представления о процессе гашения дуги, протекающем в разрядной камере (РК) устройства. Показаны основные преимущества существующей концепции разрядника, заложенные в принципы его работы: под действием грозового напряжения происходит истечения плазменных струй из разрядных камер устройства, что приводит к диссипации энергии в окружающей среде, а не в самом устройстве, как это происходит в ряде других электроаппаратов. Такая особенность работы разрядника позволяет добиться высокой стойкости к прямым ударам молнии. В совокупности с простотой конструкции и невысокой ценой устойчивость к прямым ударам делает РМК эффективным и перспективным решением проблемы молниезащиты.

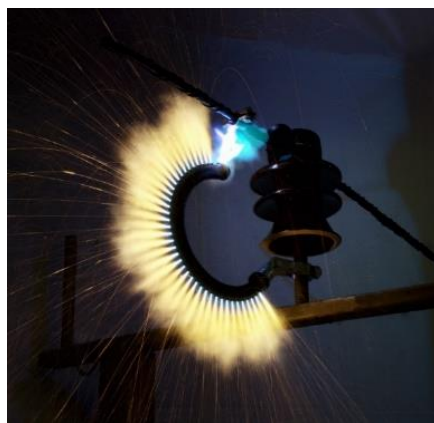


Рисунок 1. Мультикамерный разрядник: слева – для 20 кВ, справа – для 35 кВ

Основной недостаток разрядников, выделяемый разработчиками и исследователями, связан с режимом гашения дуги – гашением в нуле (ГН), в котором работают все разрядники, введенные в эксплуатацию (см. Рис.2, слева). Для такого режима характерна значительная эрозия электродов, связанная с длительным протеканием тока короткого замыкания. С ростом

сопровождающего тока эффективность гашения дуги снижается, что в итоге может привести к негашению. Величина сопровождающего тока тем больше, чем выше класс напряжения линии электропередачи (ЛЭП), в связи с чем область применения мультикамерных разрядников часто остаётся ограниченной средним классом напряжения (до 35 кВ). Однако в ходе исследований был выявлен альтернативный режим гашения – гашения в импульсе (ГИ), для которого характерно подавление сопровождающего тока в начальной стадии (см. Рис.2, справа).

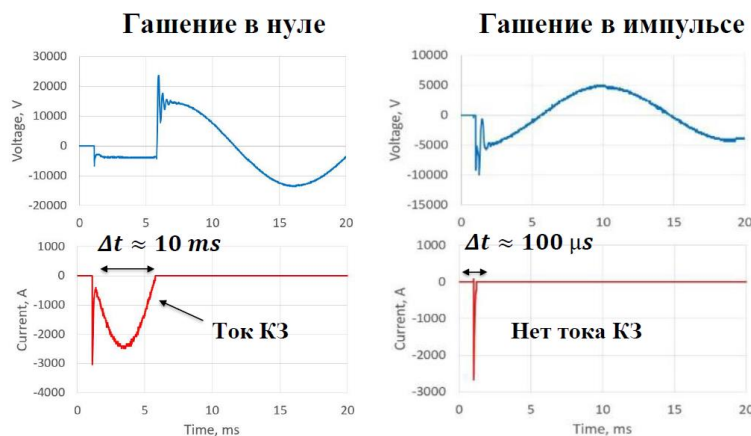


Рисунок 2. Осциллограммы напряжения и тока РМК: слева – гашение в нуле (ГН), справа – гашение в импульсе (ГИ)

Примером устройства, работающего на принципе ГИ, является полимерный изолятор-разрядник мультикамерного типа (ПИРМК). ПИРМК – это полимерный изолятор из силиконовой резины, дополненный мультикамерной системой (МКС). Отдельное ребро ПИРМК и полный образец на травере изображены на Рис.3.

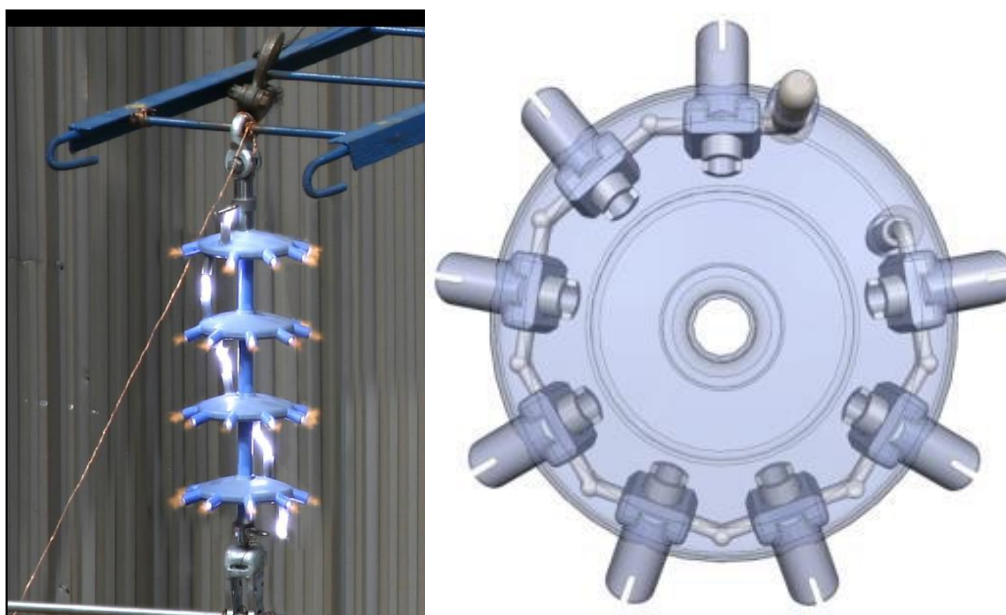


Рисунок 3. ПИРМК: полный образец – слева, отдельное ребро - справа

Последующие лабораторные исследования показали, что эффективность гашения ПИРМК находится в прямой зависимости от параметров конструкции РК (см. Рис.4, справа). Например, важную роль могут играть дополнительные воздушные полости в электродах.

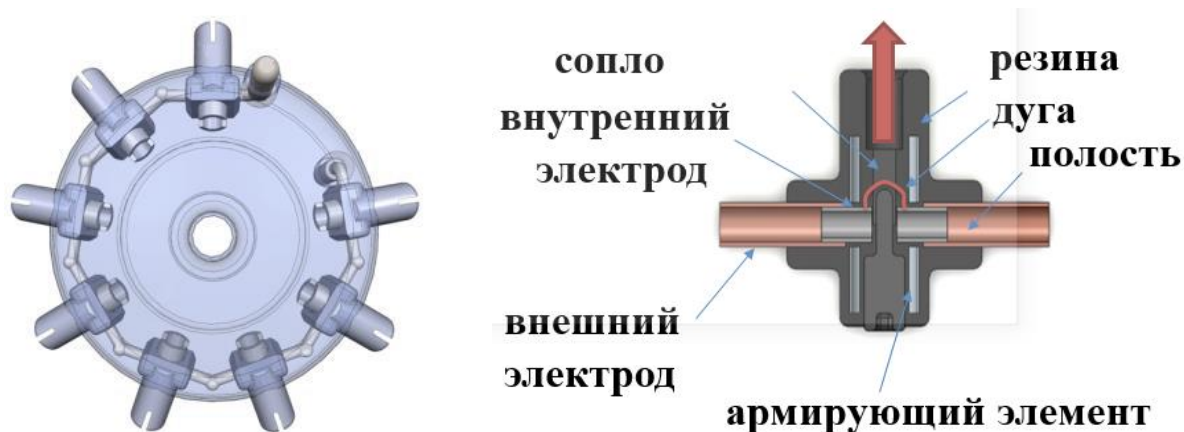


Рисунок 4. Структурный элемент ПИРМК (РК)

На Рис. 5 приведены две альтернативные конструкции РК: слева изображён более ранний вариант с цельными электродами, справа — ранее рассмотренная конструкция с полыми электродами.



Рисунок 5. Два варианта конструкции разрядной камеры

Различия конструкции продемонстрированы на Рис. 6, где изображены сечения 3D-моделей РК. Испытания прототипов разрядника на основе этих двух типов РК показали существенное отличие в эффективности. В итоге задача разработки нового устройства молниезащиты формулируется как подбор параметров конструкции РК, позволяющих достигнуть максимальной отключающей способности всего устройства.

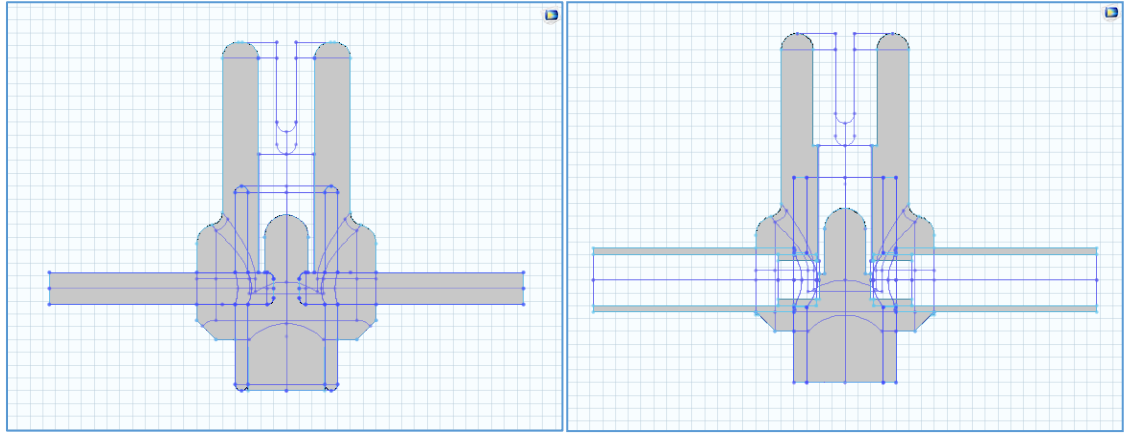


Рисунок 6. Два варианта конструкции разрядной камеры (сечение 3D-моделей)

Вторая глава содержит описание разработки математической модели гашения дуги. Сформулирован подход к моделированию гашения, основанный на приближении равновесной дуги. В таком приближении поведение разряда в РМК может быть описано с помощью системы уравнений магнитной гидродинамики (МГД), состоящей из уравнений Навье-Стокса для сжимаемого газа вместе с уравнениями Максвелла. Уравнения Навье-Стокса для сжимаемого проводящего газа состоят из уравнения неразрывности, уравнения переноса импульса и уравнения переноса энергии:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + [\mathbf{j} \times \mathbf{B}], \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} h) = \frac{\partial p}{\partial t} - \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau} \mathbf{u}) + \mathbf{j} \cdot \mathbf{E} + \nabla \cdot (\mathbf{q}_{cond} + \mathbf{q}_{rad}), \quad (3)$$

где ρ – плотность, $\mathbf{u}$ – скорость, p – давление, $\boldsymbol{\tau}$ – тензор вязких напряжений, h – энтальпия газа, $\mathbf{q}_{cond}$ и $\mathbf{q}_{rad}$ – тепловые потоки, соответствующие переносу энергии за счёт теплопроводности и излучения соответственно. Также использовалось магнитостатическое приближение, в котором уравнения Максвелла упрощаются следующим образом:

$$\nabla \cdot \mathbf{j} = 0, \quad (4)$$

$$[\nabla \times \mathbf{B}] = \mu_0 \mathbf{j}, \quad (5)$$

$$\mathbf{j} = \sigma(\mathbf{E} + [\mathbf{u} \times \mathbf{B}]). \quad (6)$$

Спецификой высокоточных дуг является важная роль лучистого теплопереноса, в связи с чем необходимо дополнительно решать уравнение переноса излучения:

$$\mathbf{s} \cdot \nabla I_\nu(\mathbf{r}, s) = \kappa_\nu [I_\nu^b(T) - I_\nu(\mathbf{r}, s)], \quad (7)$$

$$I_\nu^b(T) = \frac{2h}{c^3} \frac{v^3}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}, \quad (8)$$

где $I_\nu(\mathbf{r}, \mathbf{s})$ – интенсивность излучения с частотой ν в точке $\mathbf{r}$, переносимая в направлении $\mathbf{s}$. Для получения замкнутой системы уравнения должны быть дополнены уравнением состояния $\rho = \rho(p, T)$, а также термодинамическими свойствами (теплоёмкость C_p) и коэффициентами переноса (теплопроводность λ , вязкость μ , электропроводность σ), заданными как функции от температуры и давления. Разработанная математическая модель позволила исследовать разряд в РК РМК. На Рис. 7 приведён пример конструкции РК, с которой началось применение математической модели модели.

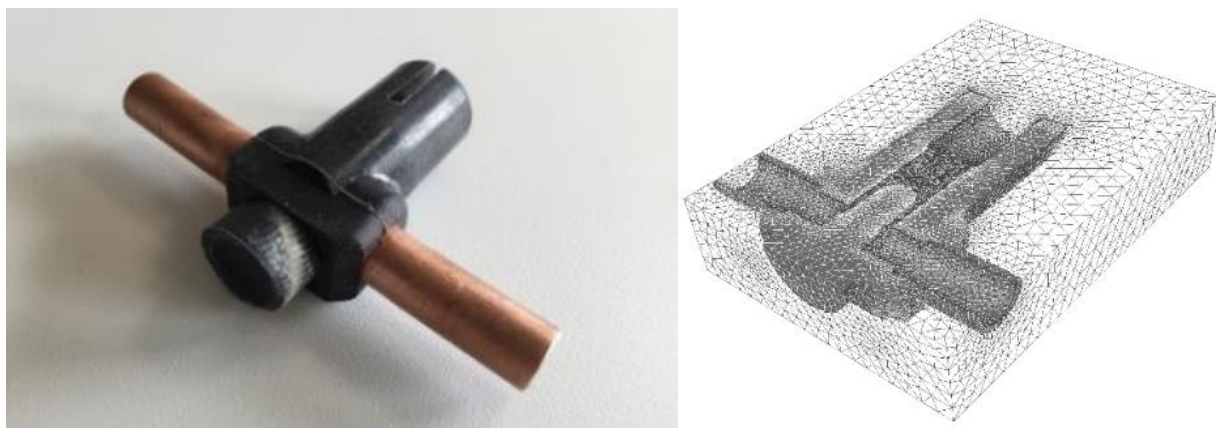


Рисунок 7. Моделируемая РК: слева – образец РК, справа – конечноэлементная модель РК

Схема, описывающая постановку задачи моделирования, представлена на Рис. 8: на один из электродов подавался импульс тока, по форме и максимальному значению соответствующий одному из испытательных режимов в высоковольтной лаборатории, второй электрод был заземлён. Полное время расчёта устанавливалась в соответствии с характерной длительностью импульса. Такой подход позволяет исследовать динамику разряда на основе рассчитанных распределений характеристик плазмы: давления, плотности, температуры и пр.

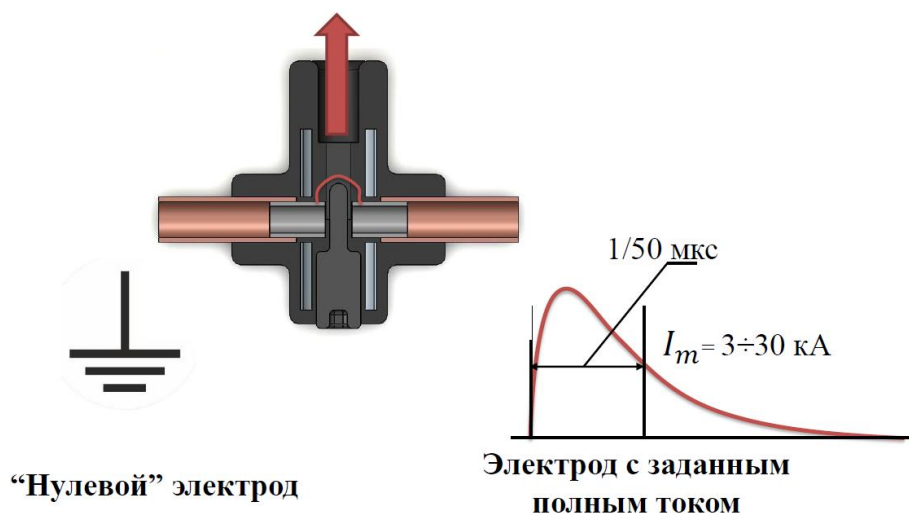


Рисунок 8. Постановка задачи моделирования разряда в РК при протекании тока молнии

Примеры распределений давления и плотности, полученных в результате расчёта для импульса тока с длительностью фронта 1 мкс, полушириной 50 мкс и максимальным значением 3 кА, представлены на Рис. 9.

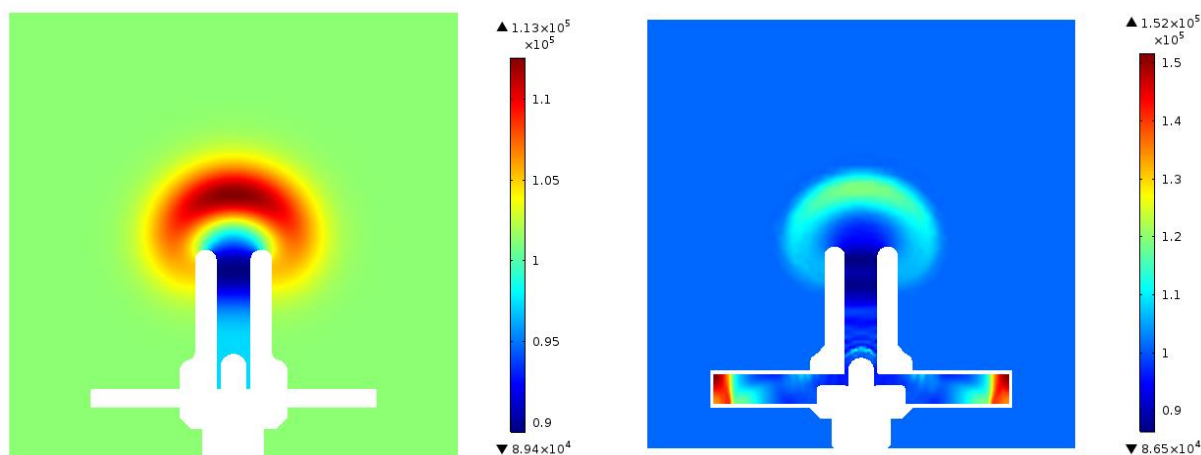


Рисунок 9. Результаты расчёта моделирования разряда в РК для двух разных вариантов конструкции

Помимо термодинамических характеристик разряда на выходе каждого расчёта могут быть получены осциллограммы напряжения, тока и сопротивления (см.Рис. 10). Данные по сопротивлению были положены в основу сравнительного анализа нескольких перспективных вариантов конструкций РК: предполагается, что чем быстрее нарастает сопротивление, тем более высокой отключающей способности РМК стоит ожидать.

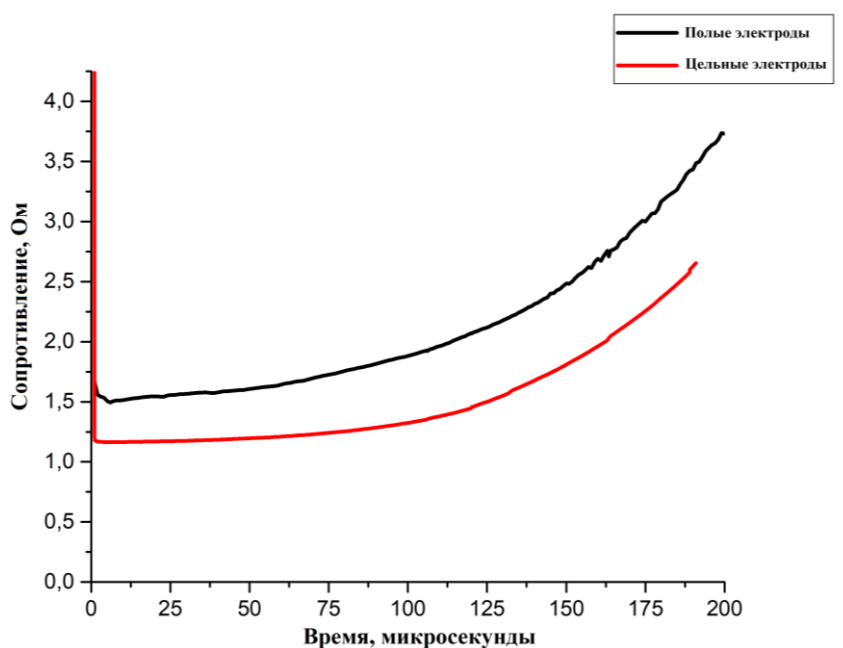


Рисунок 10. Результаты расчёта сопротивления для двух типов РК: красный РК с цельными электродами, чёрный – РК с полыми электродами

Моделирование гашения дуги подразумевает рассмотрение переходного процесса в электрической цепи, аналогичной используемой в лаборатории. Постановка задачи изображена на Рис. 11.

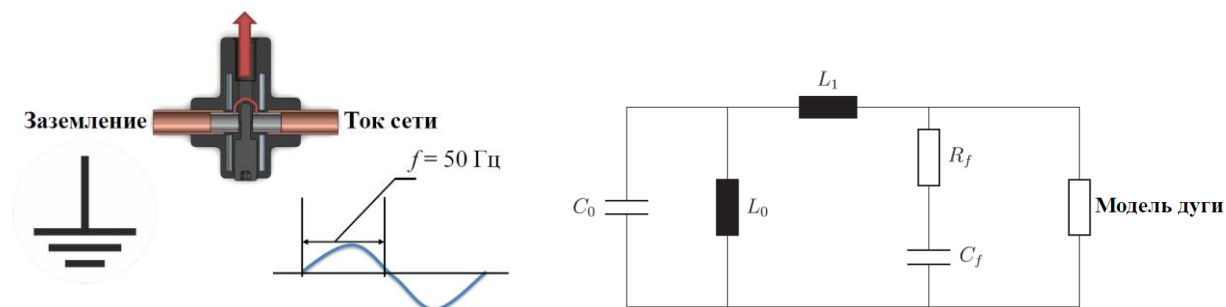


Рисунок 11. Постановка задачи моделирования гашения дуги в РК

Для упрощения задачи моделирования генератор импульсов тока был исключён из рассмотрения – воздействие тока молнии моделировалось источником тепла с эквивалентным энерговкладом. В качестве начального условия задавалось зарядное напряжение конденсатора колебательного контура $U_{зар}$, значение которого определяло величину сопровождающего тока. Применение такого подхода показало, что, изменяя значение $U_{зар}$, можно в рамках моделирования воспроизвести гашение в нуле и гашение в импульсе. На Рис. 12 приведены результаты расчёта тока через разрядную камеру, полученные для зарядных напряжений 3 кВ и 1 кВ. Хорошо видно, что в первом случае через разрядную камеру протекает полуволна тока сети с амплитудой порядка 300 А, в то время, как во втором случае наблюдается лишь небольшой всплеск тока не более 10 А. Полученный результат даёт основание для применения разработанной математической модели к оценке отключающей способности прототипов новых разрядников.

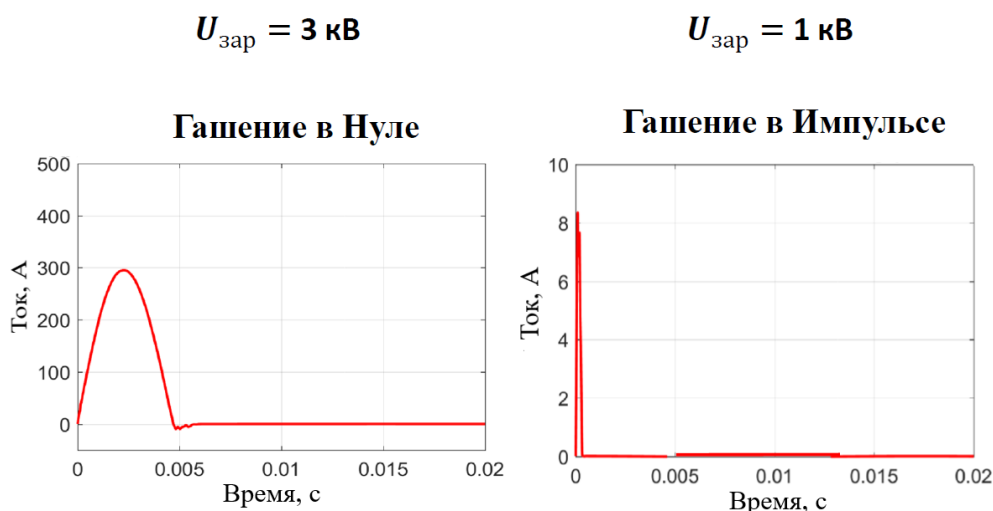


Рисунок 12. Результаты моделирования гашения дуги в РК: слева – ГН ($U_{зар}=3 \text{ кВ}$), справа – ГИ ($U_{зар}=1 \text{ кВ}$)

То обстоятельство, что результаты были получены для одной разрядной камеры, не представляет из себя непреодолимой трудности: так как разрядник состоит из набора одинаковых разрядных камер, достаточно провести моделирование гашения лишь одной из них, а при расчёте переходного процесса задавать сопротивление разрядника как сопротивление одной камеры, умноженное на полное число камер в устройстве.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию импульсной дуги в РК РМК, целью которого является измерение основных параметров дугового разряда, выявление закономерностей процесса гашения и валидация математической модели разрядной камеры. В главе последовательно описаны результаты и методика высоковольтных измерений, скоростной съёмки, измерения скорости истечения плазменной струи, её температуры.

Принципиальная схема разработанного экспериментального стенда для проведения высоковольтных измерений представлена на Рис. 13: установка состоит из двух основных блоков: генератора импульсных напряжений (ГИН), предназначенного для имитации удара молнии, и колебательного контура (КК) частоты 50 Гц, предназначенного для имитации напряжения ЛЭП. При этом испытуемый объект соединяется параллельно ГИН и КК.

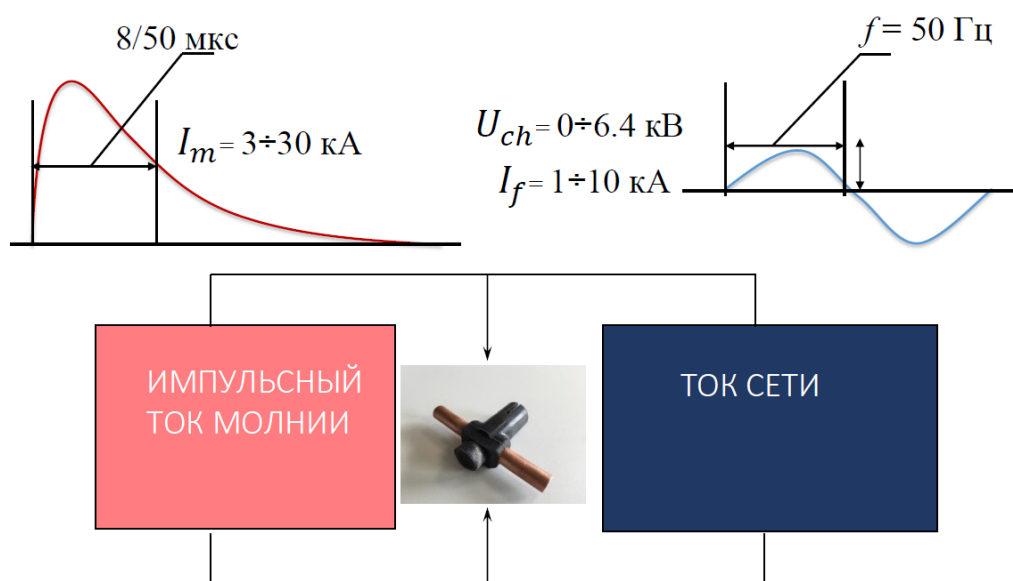


Рисунок 13. Принципиальная схема экспериментальной установки

Внешний вид экспериментального стенда представлен на Рис. 14, слева. Параметры установки позволяют проводить испытания отдельной РК и измерять её отключающую способность.



Рисунок 14. Общий вид экспериментальной установки: 1 – катушка индуктивности L_{KK} , 2 – катушка индуктивности связи L_{KG} , 3 – модуль сопротивлений ГИТ $R_{ГИТ}$, 4 – токовый шунт, 5 – подводящие кабели, 6 – токовый коллектор накопителя, 7 – пояс Роговского, 8 – делитель напряжения, 9 – токовый коллектор ГИТ, 10 – токовый коллектор КК

При запуске ГИН под действием высоко напряжения происходит пробой РК, начинается разрядка ГИН на РК и КК, формируется аperiodический импульс тока с амплитудой до 30 кА, длительностью фронта до 8 мкс и полушириной до 50 мкс. По мере спада напряжения на ГИН через РК начинает разряжаться конденсаторная батарея КК 50 Гц, имитируя тем самым ток короткого замыкания ЛЭП. Пример осциллограммы, полученной на установке, представлен на Рис. 15. В данном случае для испытания РК использовался импульс тока 8/50 мкс, 3кА.

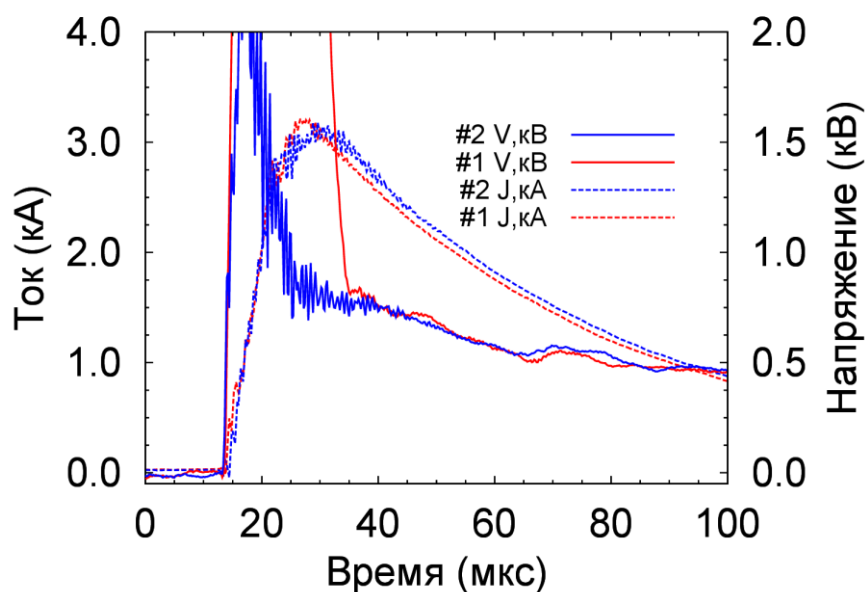


Рисунок 15. Пример осциллограммы тока и напряжения

В дополнение к высоковольтным измерениям описывается методика скоростной съёмки, целью которой являлось исследование характера истечения разряда. Высокоскоростная камера специально была расположена в плоскости перпендикулярной плоскости струи, чтобы покадрово фиксировать положение струи. Полученная картина истечения плазмы представлена на Рис. 16.

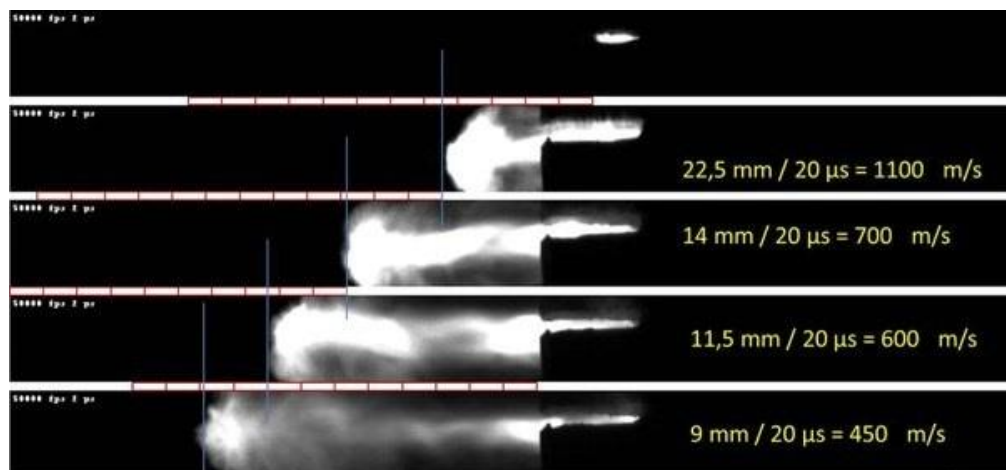


Рисунок 16. Кадры скоростной съёмки истечения плазменной струи из сопла РК

Временной интервал между кадрами составлял 20 мкс. На основе сопоставления положения переднего края струи, заснятого на разных кадрах, была получена оценка скорости истечения: 1100 м/с, 700 м/с, 600 м/с, 450 м/с.

Далее следует описание методики и основных результатов измерения температуры разряда. Приведено изложение основ метода спектрометрии. Схема проведения опыта и результаты измерения температурных профилей на основе линий железа для разных точек обзора представлены на Рис. 17. Согласно результатам, температура плазменной струи лежит в интервале от 7000 К до 10000 К.

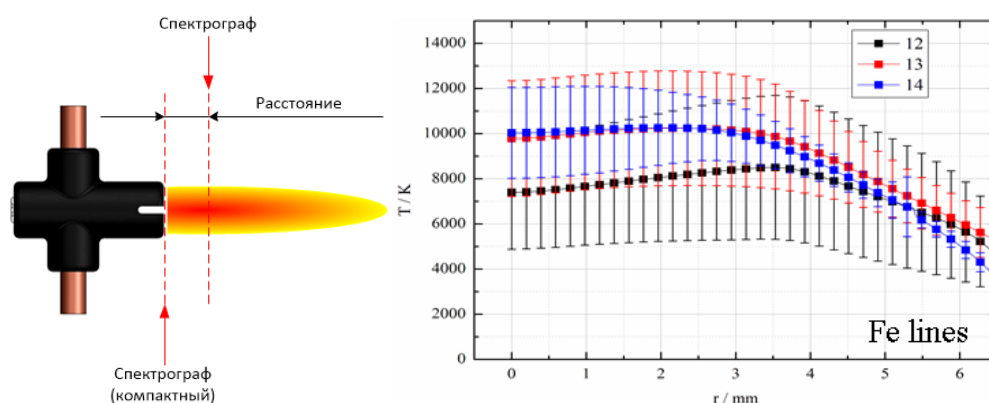


Рисунок 17. Спектрометрия плазменной струи РМК: слева – схема опыта, справа – измеренные на основе линий Fe профили температуры для 3-х разных положений спектрометра

Четвёртая глава посвящена валидации разработанной расчётной методики и результатам её применения к проектированию новых устройств. Приведено последовательное сопоставление результатов расчётов с результатами измерений, обсуждается степень совпадения и возможные причины отклонений теории от эксперимента.

Результаты валидации математической модели РК на основе данных по скорости истечения газа представлены на Рис. 18.

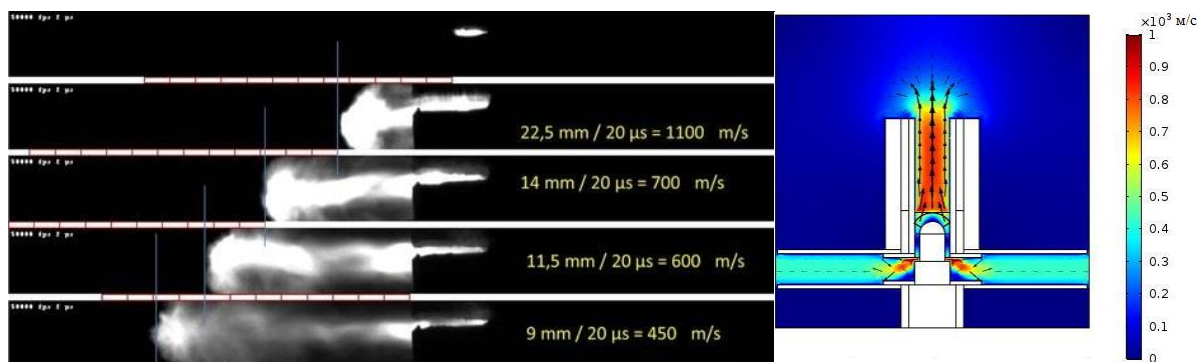


Рисунок 18. Скорость истечения струи: слева – кадры скоростной съёмки, справа – результаты расчёта

Полученное в опыте значение скорости при выходе струи из сопла составляет 1100 м/с, в то время как рассчитанное значение составило 1000 м/с. Совпадение численных и экспериментальных результатов в данном случае признано достаточно хорошим.

Для валидации модели на основе высоковольтных измерений использовались данные, полученные при исследовании разряда в искровом промежутке. Изображение искрового промежутка и постановка задачи моделирования разряда приведены на Рис. 19.

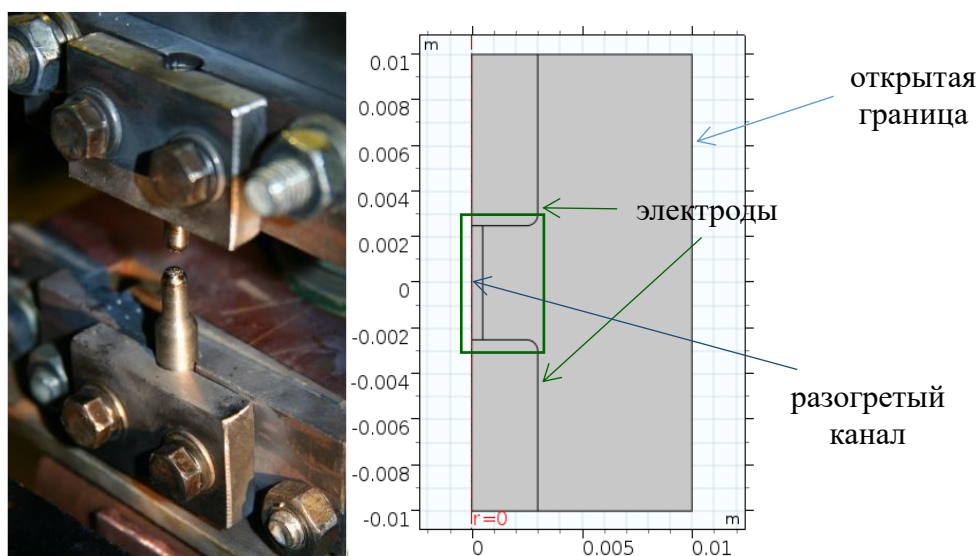


Рисунок 19. Валидация математической модели разряда: слева – искровой промежуток, справа – постановка задачи моделирования разряда

Результаты валидации приведены на Рис. 20. Здесь слева приведена экспериментальная кривая тока, справа – рассчитанное и измеренное падение напряжения на дуге (расчёты были проведены для ламинарной и турбулентной моделей).

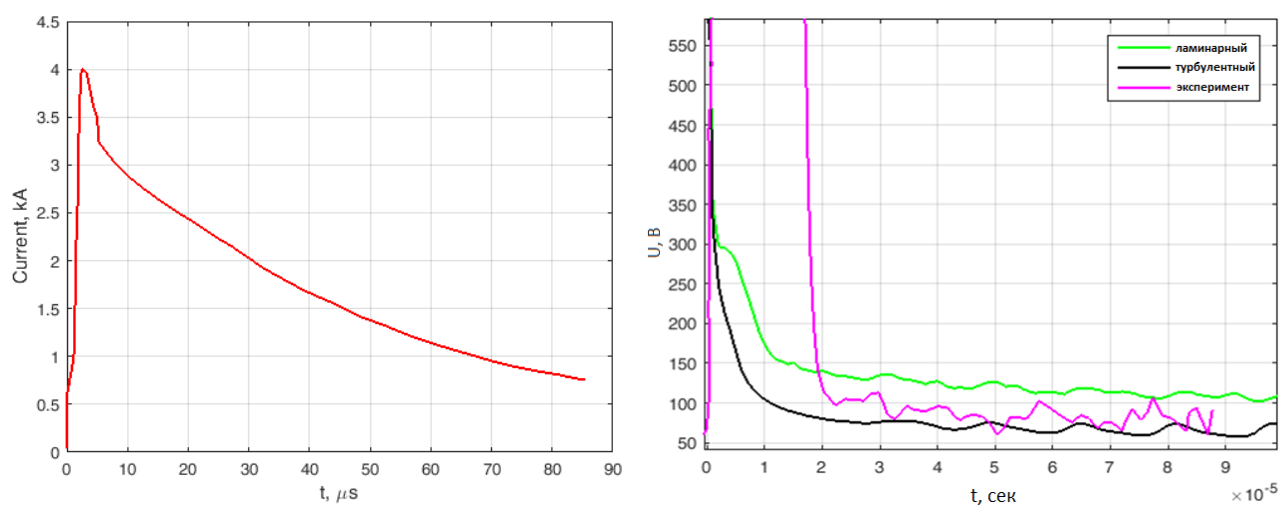


Рисунок 20. Падение напряжения на искровом промежутке: слева – импульс тока 3 кА (входные данные), справа – сравнение рассчитанного и измеренного падения напряжения

На основании результатов валидации был сделан вывод о применимости разработанной математической модели к исследованию процесса горения импульсной дуги в РК.

Прошедшая валидацию расчётная методика была применена для оценки отключающей способности прототипа нового разрядника для защиты ВЛ 10 кВ. Изображение устройства и его разрядной камеры приведены на Рис. 21.

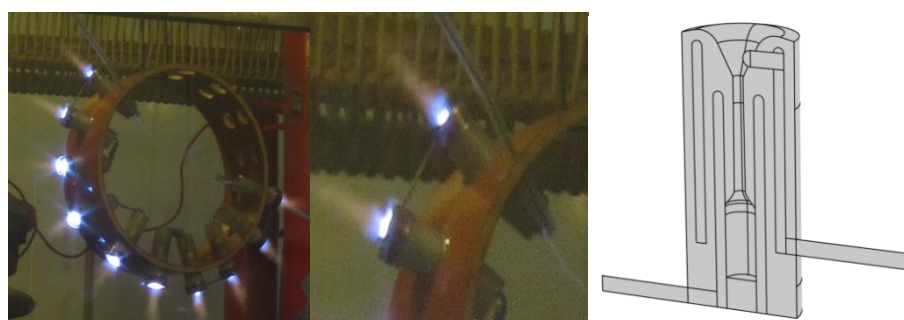


Рисунок 21. Прототип РМК нового типа: слева – испытания РМК (полное устройство и две отдельные РК), справа – 3D-модель РК

В данном случае для моделирования дугогашения использовалась полноценная электрическая схема, состоящая из генератора импульсов, колебательного контура и присоединённого к ним параллельно разрядника. Схема изображена на Рис. 22.

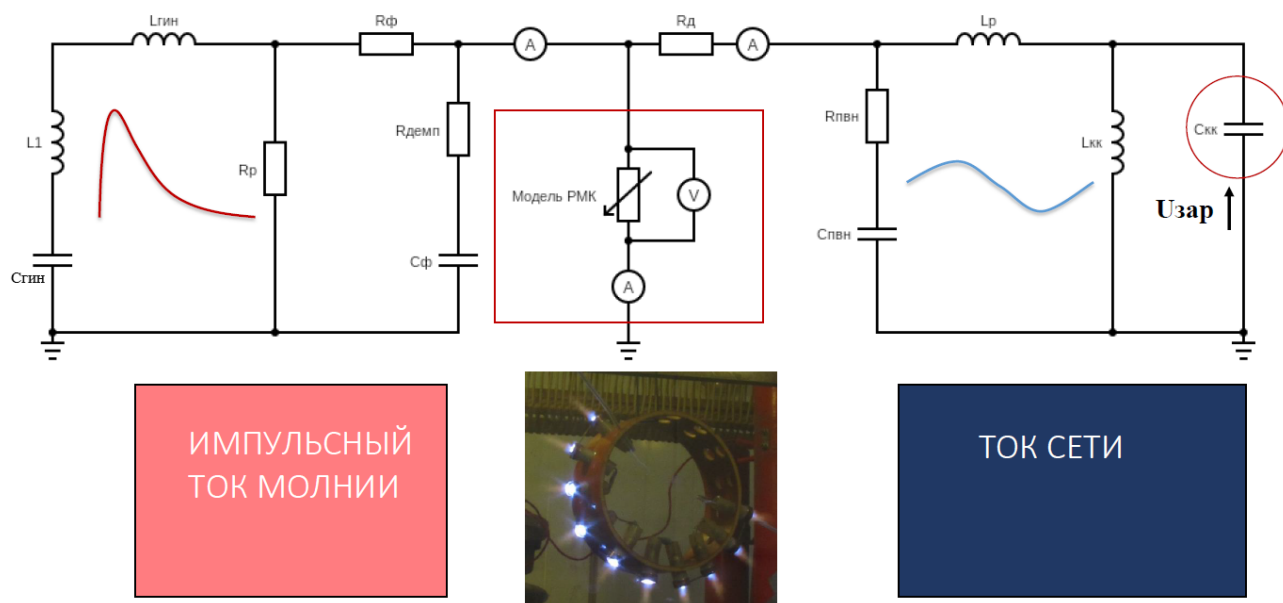


Рисунок 22. Электрическая схема для моделирования гашения дуги в РМК

Результаты моделирования приведены на Рис. 23: слева представлена 3D-модель РК, справа приведено изображение рассчитанного распределения температуры разряда.

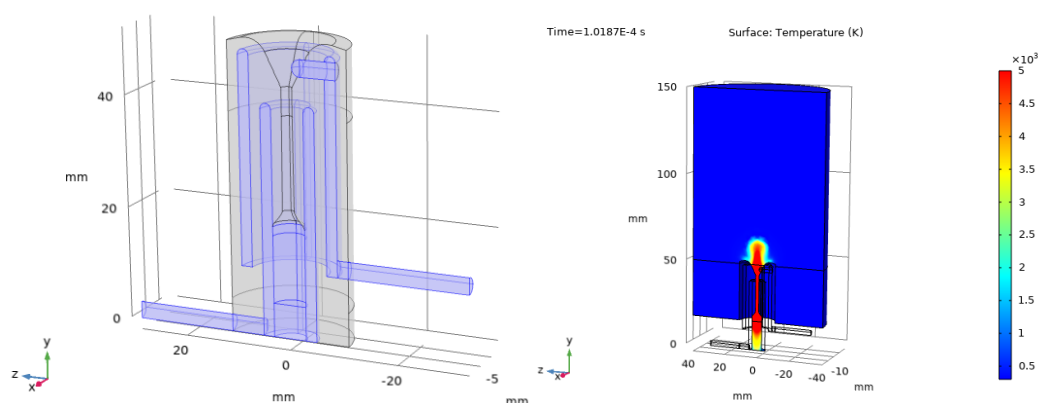


Рисунок 23. Моделирование дуги в разрядной камере: слева – расчётная область (фиолетовым цветом выделены проводящие части), справа – рассчитанное распределение температуры

Применение расчётной методики для оценки отключающей способности было выполнено для устройства, состоящего из 8 разрядных камер. Для определения отключающей способности $U_{зар}$ увеличивалось до тех пор, пока не начинало наблюдаться протекание заметного тока короткого замыкания, то есть, вплоть до перехода из режима гашения в импульсе в режим гашения в нуле. Такой переход был обнаружен при увеличении $U_{зар}$ от 7.5 кВ до 8 кВ (см. Рис. 24). Таким образом численная оценка отключающей способности составила 7.5 кВ. Проведённые позднее испытания показали значение 8 кВ. Таким образом можно утверждать, что расчётная

методика позволяет оценивать эффективность прототипов устройств с достаточно высокой точностью.

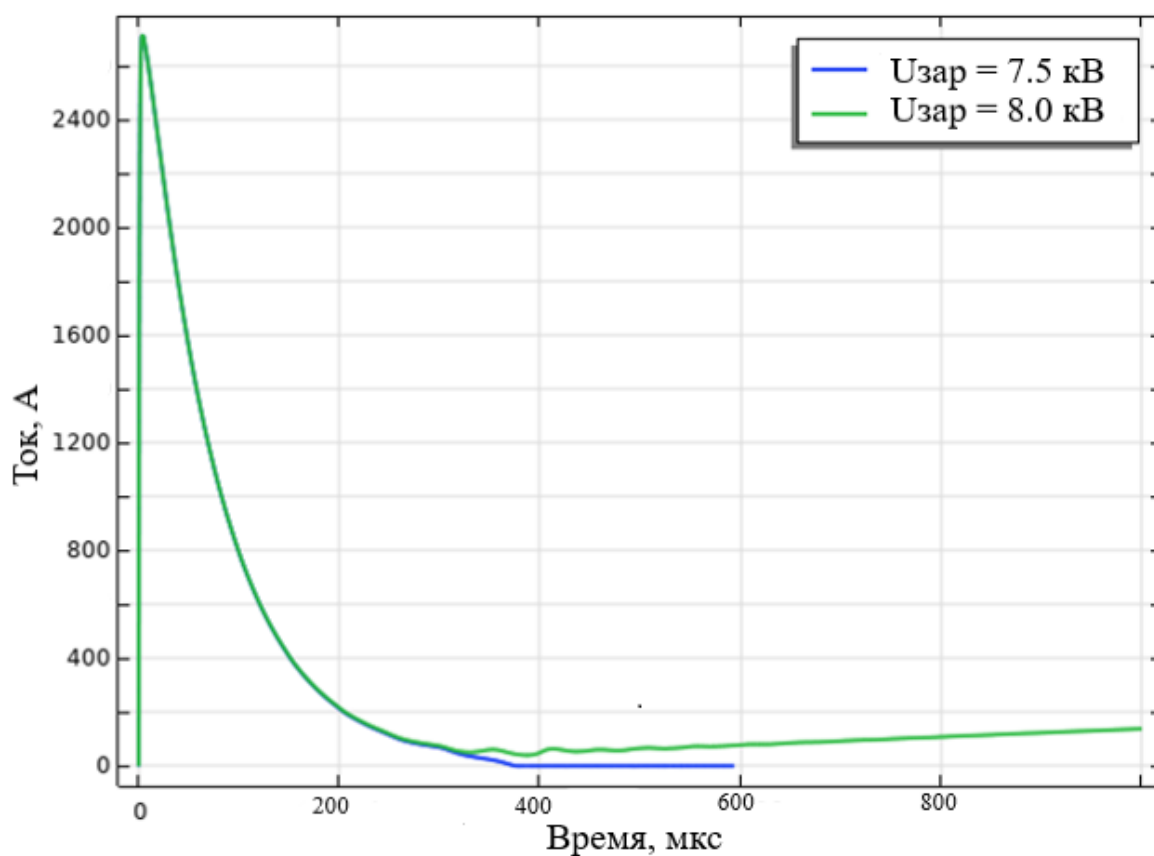


Рисунок 24. Результаты расчёта тока через РК для двух $U_{зар}$: синий – 7.5 кВ, зелёный – 8 кВ

Заключительный этап исследования – применение разработанной расчётной методики для проведения исследования зависимости отключающей способности разрядника от конструктивных параметров РК. В рамках данной работы анализировалась влияние на эффективность дугогашения размера напорной камеры. На Рис. 25 приведены изображения двух вариантов РК с разными объёмами напорных камер. Синим цветом выделены проводящие части конструкции, красным выделена заглушка, определяющая объём напорной камеры.

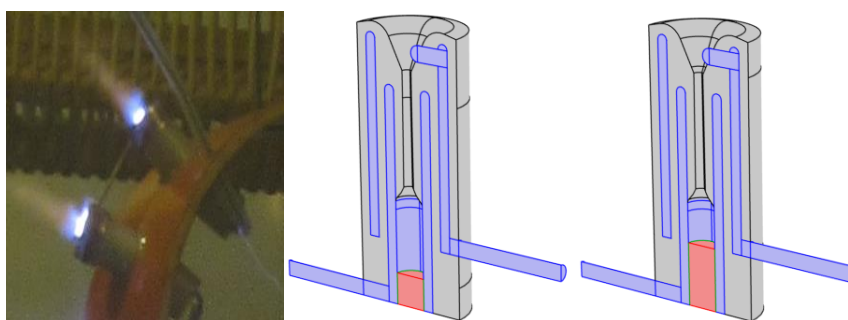


Рисунок 25. Две конструкции РК с разными объёмами напорных камер

Результаты параметрического исследования представлены Рис. 26 в виде кривой зависимости нормированной на максимальное расчётное значение отключающей способности РМК от высоты напорной камеры. Крайние точки на кривой соответствуют двум предельным случаям – отсутствию напорной камеры (исходный вариант) и бесконечному объёму напорной камеры (открытая конструкция). Максимальное значение отключающей способности достигается при высоте напорной камеры 13 миллиметров, наибольшее возможное повышение отключающей способности составляет 16%.

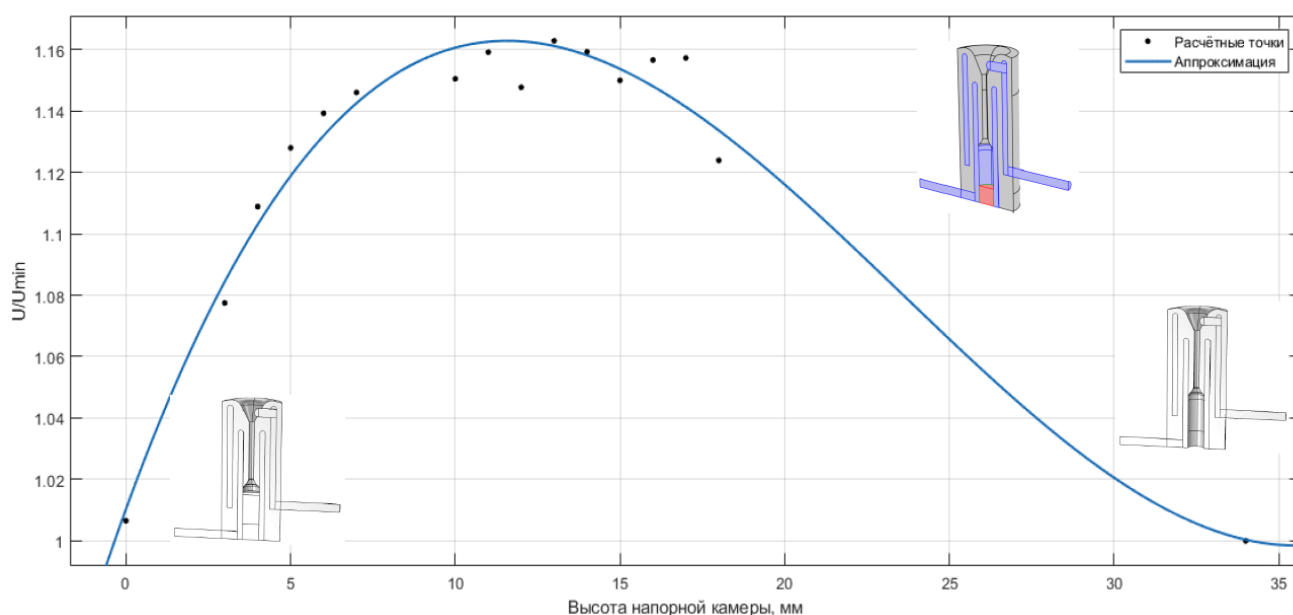


Рисунок 26. Расчитанная зависимость отключающей способности РМК от высоты напорной камеры

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе решения исследовательской задачи по повышению отключающей способности мультикамерного разрядника получены следующие результаты:

1. Разработана математическая модель разрядной камеры мультикамерного разрядника. Результаты моделирования показали, что модель качественно отражает поведение реальной разрядной камеры, что делает возможным проведение сравнительного анализа разных конструкций разрядных камер. При проведении предварительной валидации модели на основе данных из публикаций и результатов испытаний прошлых лет было установлено, что модель может давать достаточно точные оценки падения напряжения при протекании как импульсного тока молнии, так и тока короткого замыкания.

2. Была продемонстрирована возможность моделирования гашения дуги в разрядной камере. При проведении численного эксперимента удалось получить все режимы гашения – гашение в нуле, гашение в импульсе и негашение. Также в рамках моделирования получилось воспроизвести переход из режима гашения в импульсе в режим гашения в нуле и из режима гашения в нуле в режим негашения, то есть, в режим короткого замыкания.

3. Для проведения экспериментальных исследований разрядных процессов в отдельной разрядной камере была разработана методика проведения высоковольтных измерений и собран специальный экспериментальный стенд. Были проведены измерения для нескольких токов молнии – 3 кА, 10 кА, 20 кА и 30 кА. В качестве опорных использовались результаты измерений, полученные при исследовании разряда в искровом промежутке. Было выявлено, что характерное значение падения напряжения на искровом промежутке составляет 100 В, в то время, как на камере падение напряжения порядка 500 В и может достигать 1 кВ.

4. Разработана методика измерения скорости истечения плазменной струи из сопла разрядной камеры, основанная на методе высокоскоростной съёмки. Результаты измерений показали, что скорость истечения может достигать 1100 м/с.

5. Разработана методика измерения температуры, базирующаяся на методе эмиссионной спектроскопии. С помощью спектрографа, настроенного на линии железа, было измерено радиальное распределение температуры в истекающей из сопла разрядной камеры плазменной струе. Характерная температура струи была оценена в 10000 К. Измерений температуры непосредственно внутри камеры проведено не было, решению этой задачи будут посвящены дальнейшие исследования.

6. Полученные данные о разряде позволили провести валидацию разработанной ранее математической модели разрядной камеры. Получено хорошее согласие между расчётными и экспериментальными данными для скорости течения газа и падения напряжения на дуге.

7. На основе математической модели разрядной камеры разработана расчётная методика оценки отключающей способности прототипов новых устройств. Было показано, что для разрядников, рассчитанных на класс напряжения 10 кВ, точность методики составляет около 0.5 кВ. При этом важно заметить, что применение методики не требует значительных вычислительных ресурсов и позволяет получать результат за разумное время.

8. С помощью расчётной методики было проведено исследование зависимости отключающей способности разрядника от объёма напорной камеры. В результате было определено оптимальное значение объёма, соответствующее максимальной эффективности дугогашения. Применение такой напорной камеры должно повысить отключающую способность на 16% по сравнению с исходной конструкцией.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ, В КОТОРЫХ ПРЕДСТАВЛЕНЫ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Работы, опубликованные в научных журналах категории K1 и K2 из Перечня ВАК и приравненных к ним:

1. М.Е. Pinchuk, A.V. Budin, I.I. Kumkova, A.N. Chusov Studying energy evolution in the discharge chamber of a multichamber lightning protection system // Technical Physics Letters, vol. 42, 2016, pp. 395-398.
2. M. Muermann, A. Chusov, R. Fuchs, A. Nefedov, H. Nordborg Modeling and simulation of the current quenching behavior of a line lightning protection device // Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 50, Number 10, February 2017, 12 pp.
3. В.Я. Фролов, Д.В. Иванов, А.Д. Сиваев, А.Н. Чусов, А.С. Чистяков, А.А. Рогожина Математическая модель дугогашения в соседних камерах молниезащитного мультикамерного разрядника РМКЭ-10 // Электричество №7(2022), №7, С. 40-51.

Другие опубликованные работы:

1. М.Э. Пинчук, А.В. Будин, Н.К. Куракина, И.И. Кумкова, А.Н. Чусов. Температура приэлектродной плазмы в разрядной камере мультикамерной системы молниезащиты // В сборнике: V Российская конференция по молниезащите. Сборник докладов. 2016. С. 247-248.
2. Chusov, A.A., Podporkin G.V., Pinchuk M.E., Ivanov D.V., Murashov I.V., Frolov V.Ya. Development of a physical 2-D model for arc quenching chamber of lightning protection multichamber systems // 33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP) 2016, pp. 1-9.
3. М.Е. Pinchuk, A.V. Budin, I.I. Kumkova, A.A. Bogomaz, A.D. Sivaev, A.N. Chusov, R.I. Zaynalov Energy deposition in discharge chamber of lightning protection multichamber system // Journal of Physics: Conference Series, Volume 774, XXXI International Conference on Equation of State for Matter (ELBRUS2016) 1-6 March 2016, Elbrus, Russia.
4. Chusov A., Rodikova E., Muermann M., Nordborg H., Fuchs R., A review of progress towards simulation of arc quenching in line lightning protection device / Plasma Physics and Technology, 2017, vol.4, pp. 273-276.
5. V. Frolov, D. Ivanov, A. Sivaev, A. Chusov Development of a two-temperature mathematical model of plasma processes in a discharge chamber of a multi-chamber arrester operating in conditions of mountain areas/ Plasma Physics and Technology, 2019, vol.6(2), pp. 135-139.
6. A.N. Chusov, M.E. Pinchuk, A.V. Budin Investigation of altitude dependence of multi-chamber arrester quenching efficiency// 2019 11th Asia-Pacific International Conference on Lightning Protection (APL), Hong Kong, China, 2019, pp. 1-3.
7. А.С. Чистяков, А.Н. Чусов, И.С. Савельева, С.Ю. Грачев. Разработка математической модели дугового разряда с учетом деформации в мультикамерном разряднике // В сборнике:

Неделя науки СПбПУ. Материалы научной конференции с международным участием. Институт энергетики. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. 2020. С. 91-94.

8. А.А. Рогожина, А.Н. Чусов, И.С. Савельева, С.Ю. Грачев. Разработка и валидация математической модели дугового разряда в мультикамерном разряднике // В сборнике: Неделя науки СПбПУ. Материалы научной конференции с международным участием. Институт энергетики. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. 2020. С. 113-116.

9. A. Chusov, M. Pinchuk, V. Frolov, D. Ivanov Effects of high altitude on multi-chamber arrester performance // 2021 35th International Conference on Lightning Protection (ICLP) and XVI International Symposium on Lightning Protection (SIPDA). Colombo, Sri Lanka, 2021, pp. 01-04

10. M. Muermann, A. Chusov, R. Fuchs, H. Nordborg. Simulation-based development of a line lightning protection device // 30th International Conference on Electrical Contacts, ICEC 2020 – Proceedings, 2021, pp. 500-507.

11. A. Chusov, A. Chystiakov, M. Apolinskiy Application of numerical simulations for improvement of line lightning protection device efficiency// 2022 36th International Conference on Lightning Protection (ICLP), Cape Town, South Africa, 2022, pp. 468-472.