

На правах рукописи



Маханько Дмитрий Сергеевич

**РАЗРАБОТКА РАЗРЯДНИКОВ-ОБОСТРИТЕЛЕЙ
С УЛУЧШЕННЫМИ ТЕХНИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ**

Специальность 2.2.1. Вакуумная и плазменная электроника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2025

Работа выполнена в Акционерном обществе «Научно-исследовательский институт газоразрядных приборов «ПЛАЗМА» г. Рязань

Научный руководитель: **Козлов Борис Алексеевич**, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Промышленная электроника» ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина», г. Рязань

Официальные оппоненты: **Ремнёв Геннадий Ефимович**, доктор технических наук, профессор, заведующий научно-производственной лабораторией «Импульсно-пучковых, электроразрядных и плазменных технологий», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск

Воробьёв Максим Сергеевич, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН), г. Томск

Ведущая организация: Акционерное общество «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова», г. Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится «24» июня 2025 г. в 11 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.2.375.02 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «РГРТУ» и на официальном сайте <http://www.rsreu.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.375.02, д.ф.-м.н., доцент



Литвинов Владимир Георгиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень разработанности. Искровые разрядники – это безнакальные двух- или трёхэлектродные газоразрядные приборы, способные под воздействием приложенного напряжения резко изменять свою проводимость и пропускать большие токи. Данные приборы широко применяются в качестве высоковольтных и сильноточных коммутаторов в сильноточной электронике, ускорительной и рентгеновской технике, генераторах ЭМИ, генераторах мощных СВЧ импульсов и т.п.

К достоинствам искровых разрядников следует отнести высокий КПД при значительных коммутируемых энергиях, большие рабочие напряжения и токи коммутации, отсутствие накала катода, мгновенную готовность к работе, устойчивость к радиации. Для искровых разрядников характерна также возможность пропускания тока как в прямом, так и в обратном направлениях.

Особую категорию искровых разрядников представляют разрядники-обострители, выполняющие функцию сокращения длительности переднего фронта импульса напряжения амплитудой в сотни киловольт до единиц и долей наносекунды. Области применения высоковольтных импульсов с нано- и субнаносекундными длительностями переднего фронта являются рентгеновская техника (импульсные рентгеновские дефектоскопы, переносные медицинские рентгеновские аппараты, досмотровые комплексы), накачка газовых лазеров сверхатмосферного давления, генерация мощных электромагнитных импульсов, техника с использованием гидравлического удара.

Основными параметрами разрядников-обострителей являются: напряжение пробоя, относительный среднеквадратичный разброс величины напряжения пробоя, время коммутации, коммутируемая энергия, частота следования импульсов и ресурс.

Время коммутации тока в искровых разрядниках зависит от целого ряда факторов: величина межэлектродного промежутка, род и давление наполняющего газа, наличие свободных носителей зарядов в межэлектродном промежутке. При этом определяющую роль в развитии искрового пробоя играют давление газа и величина межэлектродного промежутка.

Высокая электрическая прочность конструкции разрядника при соблюдении компактных размеров является важным требованием при формировании высоковольтных импульсов в генераторах с разрядниками-обострителями. При малых межэлектродных промежутках в разрядниках необходимое напряжение пробоя обеспечивается высокими (десятки атмосфер) давлениями наполняющих газов.

В промышленно выпускаемых металлокерамических отпаянных разрядниках-обострителях время коммутации $\tau = 1 \div 5$ нс обеспечивается использованием водорода, азота или смесей $SF_6 + N_2$ при давлениях до 50 атмосфер. Для увеличения рабочего напряжения и сокращения времени коммутации давление рабочего газа необходимо значительно увеличивать. Для достижения напряжения пробоя в межэлектродных промежутках $d = 3 \div 6$ мм в 400 кВ необходимо увеличивать давление наполняющего газа до 120 атмосфер.

В настоящее время промышленное производство разрядников-обострителей основывается на чисто эмпирических соотношениях между различными элементами конструкции разрядника, при этом отсутствуют инженерно-обоснованные варианты конструкции как самого корпуса разрядника, способного выдерживать избыточное давление наполняющего газа до 120 атмосфер, так и варианты конструкции керамического изолятора, исключающего пробой по внутренней поверхности изолятора. Последнее затрудняет возможность прогнозирования и создания новых, более совершенных и быстродействующих вариантов разрядников-обострителей на напряжения до 400 кВ.

К моменту постановки данной работы отечественной промышленностью освоен выпуск разрядников-обострителей на напряжения от 90 кВ до 260 кВ с наносекундными временами срабатывания при коммутируемой энергии до 2 Дж на частотах повторения импульсов до 50 Гц, относительным среднеквадратичным разбросом напряжения пробоя не более 5% и ресурсом порядка 10^6 срабатываний. Техническая информация о зарубежных образцах данного типа приборов в открытой печати отсутствует.

Также отсутствовала информация о технико-технологических основах создания малогабаритных отпаянных искровых разрядников-обострителей высокого давления в металлокерамическом исполнении с субнаносекундными временами срабатывания.

Таким образом, разработка неуправляемых разрядников-обострителей высокого давления с увеличенным рабочим напряжением, временами коммутации менее одной наносекунды, повышенной долговечностью и относительным среднеквадратичным разбросом величины напряжения пробоя менее 5% является **актуальной задачей**.

Цель диссертационной работы – разработка и исследование малогабаритных отпаянных газонаполненных разрядников-обострителей на напряжения пробоя от 100 до 400 киловольт с относительным среднеквадратичным разбросом напряжения пробоя не более 3%, субнаносекундными временами коммутации и ресурсом не менее $3 \cdot 10^6$ срабатываний.

Задачи исследования:

1. Анализ физических моделей развития искрового разряда в различных газовых средах высокого давления.

2. Проектирование серии малогабаритных отпаянных газонаполненных разрядников-обострителей в металлокерамическом исполнении на напряжения пробоя от 100 до 400 киловольт с относительным среднеквадратичным разбросом напряжения пробоя не более 3%, субнаносекундными временами коммутации и ресурсом не менее $3 \cdot 10^6$ срабатываний.

3. Разработка технологии производства малогабаритных отпаянных газонаполненных разрядников-обострителей в металлокерамическом исполнении.

4. Изготовление партии разрядников-обострителей с напряжением пробоя от 100 до 400 киловольт.

5. Теоретическое и экспериментальное определение факторов, влияющих на механическую прочность и электропрочность конструкции разрядника-обострителя.

6. Теоретическое и экспериментальное определение времен развития искрового разряда в атмосфере водорода и азота при давлениях до 140 атмосфер для типичных геометрических размеров газоразрядного промежутка в условиях статического пробоя.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Установлены соотношения размеров элементов конструкции малогабаритных отпаянных газонаполненных разрядников-обострителей, обеспечивающих электропрочность в диапазоне напряжений от 100 до 400 кВ и устойчивое формирование искрового разряда между электродами в условиях статического пробоя с относительным среднеквадратичным разбросом напряжения пробоя не более 3% и субнаносекундные времена коммутации на частотах повторения импульсов до 50 Гц.

2. Получены теоретические зависимости времён коммутации в разрядниках-обострителях с водородным и азотным наполнениями при давлении наполняющих газов до 140 атмосфер в условиях статического пробоя.

3. Применение в разрядниках-обострителях в качестве рабочей среды водорода ОСЧ при давлениях от 50 до 140 атмосфер обеспечивает срабатывание с относительным среднеквадратичным разбросом напряжения пробоя не более 3% и субнаносекундные времена коммутации в течение $3 \cdot 10^6$ импульсов.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1. Определены линейные и угловые соотношения геометрических размеров высоковольтного керамического изолятора, вывода электрода и корпуса разрядника-обострителя, обеспечивающие необходимую электрическую прочность конструкции разрядника-обострителя при напряжениях пробоя до 400 кВ.

2. Установлено, что использование дополнительного резьбового соединения анодного узла в разряднике-обострителе с его корпусом увеличивает механическую прочность, по сравнению с использованием только сварного соединения данных узлов, и позволяет повысить предельное рабочее давление до 160 атмосфер.

3. Разработана конструкция неуправляемых малогабаритных отпаянных газонаполненных разрядников-обострителей серии РО-43, РО-48, РО-49 и РО-72 в металлокерамическом исполнении с диаметром корпуса от 40 до 85 мм для напряжений пробоя от 100 до 400 кВ, обладающая повышенной механической прочностью на разрыв.

4. Использование режима пайки металлокерамических соединений, содержащих в конструкции охватывающие и торцевые паяные швы, высокотемпературным припоем ПСр72 с дополнительным превышением температуры пайки на 20-80°C относительно температуры плавления припоя 780 °С и временем выдержки пайки в пределах 6-8 минут позволяет получать высококачественные герметичные соединения с высоким процентом выхода годных изделий.

5. Обеспечен гарантированный ресурс работы разрядников не менее 3×10^6 срабатываний в заданном эксплуатационном режиме.

6. Научно обоснованные физико-технологические подходы позволили обеспечить промышленный выпуск разрядников-обострителей серии РО-43, РО-48, РО-49 и РО-72 на напряжения пробоя 100 ÷ 400 кВ с субнаносекундными

ми временами коммутации, токами до нескольких килоампер и коммутируемой энергией до 20 Дж на частотах повторения импульсов до 50 Гц, с относительным среднеквадратичным отклонением напряжения пробоя не более 3%.

Реализация и внедрение.

Результаты кандидатской диссертации внедрены в производство разрядников-обострителей (ТУ6343-009-07626955-96) в АО «Научно-исследовательский институт газоразрядных приборов «ПЛАЗМА» г. Рязань. Использование результатов диссертационной работы подтверждается соответствующими актами о внедрении.

Методология и методы исследования.

Электрическая прочность малогабаритных металлокерамических разрядников-обострителей определялась с помощью численного моделирования распределения электрического поля и потенциала в пределах и за пределами корпуса разрядника-обострителя в среде COMSOL Multiphysics и экспериментальной проверкой полученных расчётных результатов путём подачи на электроды импульсов напряжения анода с амплитудой до 400 кВ с временем нарастания напряжения до момента пробоя разрядника-обострителя до 10 микросекунд.

Механическая прочность разрядников-обострителей, работающих при давлениях до 120 атмосфер, определялась методами расчёта прочности, развитыми в курсах сопротивления материалов, методами проведения механических расчетов статического линейного и нелинейного анализа в САПР SolidWorks Simulation и прямыми механическими испытаниями - путём заполнения разрядников водой до давления в 200 атмосфер.

Быстродействие (время коммутации) разрядников-обострителей определялось теоретическими методами по известным закономерностям развития искрового разряда и экспериментальными методами по отработанной методике проведения измерений высоковольтных импульсов с субнаносекундным разрешением в соответствии с ОСТ 11 0538.7 - 88.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. В разрядниках-обострителях серии РО-43, РО-48, РО-49 и РО-72 относительный среднеквадратичный разброс напряжения пробоя не более 3% в течение $3 \cdot 10^6$ срабатываний достигается при соблюдении между элементами конструкции следующих геометрических соотношений:

$$\begin{aligned} D_{эл} &= (3 \div 5) S, \\ R &= (1 \div 2) D_{эл}, \\ D_{экp} &= (0,25 \div 0,6) D_{кoрп}, \end{aligned}$$

где $D_{эл}$ – диаметр электродов, мм; S – межэлектродное расстояние, мм; R – радиус сферической поверхности катода, мм; $D_{экp}$ – диаметр экрана, мм; $D_{кoрп}$ – внутренний диаметр корпуса, мм.

2. Использование в разрядниках-обострителях серии РО-43, РО-48, РО-49 и РО-72 режима пайки металлокерамических катодных узлов высокотемпературным серебряным припоем ПСр72 с дополнительным превышением температуры на 20-80°C относительно температуры плавления припоя 780 °С и временем выдержки пайки в пределах 6-8 минут обеспечивает высокий выход годных изделий на уровне 95%.

3. Использование в разрядниках-обострителях серии РО-43, РО-48, РО-49 и РО-72 в качестве коммутирующей среды водорода ОСЧ при давлениях от 50 до 120 атмосфер обеспечивает субнаносекундные времена коммутации при напряжениях пробоя от 100 до 400 киловольт с коммутируемой энергией до 20 Дж на частотах повторения импульсов до 50 Гц.

Достоверность результатов исследований обеспечивалась использованием аттестованного измерительного оборудования и методик измерения параметров разрядников-обострителей и их отдельных узлов, современных экспериментальных методов, удовлетворительным совпадением расчётных и экспериментальных зависимостей, систематическим характером исследований, непротиворечивостью полученных данных и их согласием с результатами других исследователей. Достоверность результатов исследований подтверждается также внедрением в промышленность и серийным выпуском разрядников-обострителей высокого давления с улучшенными техническими параметрами.

Апробация работы. Представление результатов проводилось на международных конференциях: 15-й Международной конференции «Газоразрядная плазма и ее применения» (15th International Conference «Gas Discharge Plasmas and Their Applications GDP 2021) 05 Сентября – 10 Сентября 2021 года в г. Екатеринбург, XV Международная конференция по импульсным лазерам и применениям лазеров – AMPL-2021 (XV International conference on pulsed lasers and laser applications – AMPL-2021) 12 – 17 сентября 2021 года в г. Томск и на VIII Международном конгрессе по энергетическим потокам и радиационному воздействию (International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects, EFRE 2022) 2 – 8 октября 2022 года, г. Томск.

Личный вклад автора.

1. Автором сформулированы цель и задачи по проведению экспериментальных и технологических исследований.

2. Разработаны конструкции неуправляемых малогабаритных отпаянных искровых разрядников-обострителей серии РО-43, РО-48, РО-49 и РО-72 в металлокерамическом исполнении на напряжения от 100 до 400 кВ с субнаносекундными временами коммутации, токами до нескольких килоампер и коммутируемой энергией до 20 Дж на частотах повторения импульсов до 50 Гц, с относительным среднеквадратичным отклонением величины напряжения пробоя не более 3%.

3. Разработаны способы пайки газонаполненного разрядника (Патент №2550350), тренировки (Патенты №2560096, 2643343, 2658320) и изготовления (Патент №2697264 и №119164).

4. Проведены экспериментальные исследования механической и электрической прочности металлокерамической конструкции разрядника-обострителя.

5. Автор принимал непосредственное участие в постановке и проведении экспериментальных исследований и обсуждении полученных результатов.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 16 печатных работ, включая статьи и тезисы докладов всероссийских и международных конференций, из них 3 статьи в журналах из перечня ВАК, в том числе 1 статья в журна-

ле по специальности 2.2.1., 2 статьи включены в реферативные базы данных Scopus, 5 патентов на изобретение и 1 патент на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав основного текста, заключения, списка опубликованных работ по теме диссертации, списка использованной литературы и приложения. Материалы диссертации изложены на 174 страницах, содержат 75 рисунков и 8 таблиц. Список использованной литературы включает 108 наименований. В приложении приведены акты о внедрении результатов работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулированы цель и основные задачи диссертационной работы, определены пути и способы их решения. Сформулированы научные положения и основные результаты, выносимые на защиту, представлены научная новизна и практическая значимость полученных в диссертации результатов.

В первой главе рассмотрено формирование искрового разряда и его электрические свойства как коммутирующей среды. Рассмотрены искровые разряды в газах, жидкостях и твёрдых телах. Описаны временные характеристики искровых разрядов.

Дан анализ параметров промышленно выпускаемых искровых разрядников. Рассмотрены особенности разрядников-обострителей, их параметры и основные области применений.

Выявлены недостатки существующих типов разрядников-обострителей, выбраны основные направления исследований, ориентированные на проведение комплекса изысканий и создание промышленных образцов разрядников-обострителей на напряжения пробоя до 400 кВ с субнаносекундным срабатыванием.

Сформулированы цель работы и решаемые задачи.

Вторая глава посвящена определению взаимосвязей между конструктивными элементами разрядника-обострителя и электрической прочностью керамического изолятора к пробоям по его поверхности, а также пробоем промежутка между высоковольтным выводом и корпусом разрядника, с целью создания базовой конструкции и, на её основе, серии малогабаритных отпаянных разрядников-обострителей на напряжения от 100 до 400 кВ.

В *первом разделе* приводится базовая конструкция газонаполненного разрядника-обострителя высокого давления (рисунок 1), показано влияние конструктивных элементов разрядника-обострителя на распределение потенциала электрического поля вдоль образующей изолятора.

Газонаполненный разрядник-обостритель содержит металлический корпус 1 в виде цилиндрического стакана с отбортовкой 2, керамический изолятор 3 в виде полого усеченного конуса, коммутирующие электроды 4 (анод) и 5 (катод), один из которых анод 4 закреплен на внутренней поверхности дна корпуса 1, а другой катод 5 – на торцевой поверхности меньшего основания изолятора 3, соединенного другим основанием с отбортовкой 2 корпуса 1, вывод 6 элек-

трода 5, часть которого, расположенная внутри изолятора, выполнена в виде усеченного конуса и штангеля 7 для наполнения разрядника газом.

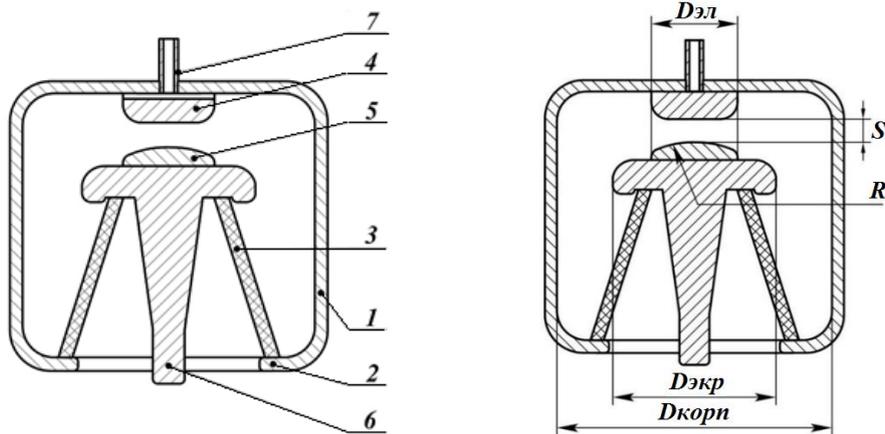


Рисунок 1 – Базовая конструкция разрядника-обострителя

Приведены результаты исследованных зависимостей напряжения пробоя между выводом электрода и отбортовкой корпуса разрядника-обострителя от отношения диаметра вывода электрода к диаметру отбортовки корпуса (рисунок 2), зависимости влияния конфигурации изолятора на распределение потенциала электрического поля вдоль образующей изолятора (рисунок 3), зависимости влияния взаимного расположения изолятора относительно корпуса разрядника на распределение потенциала электрического поля вдоль образующей изолятора (рисунок 4), и зависимости влияния величины угла α_2 конической поверхности вывода электрода на распределения потенциала электрического поля вдоль образующей изолятора (рисунок 5).

Получены соотношения, обеспечивающие максимально возможную электрическую прочность при минимизации габаритных размеров разрядника:

$$\begin{aligned} 0.4 &\leq D_1/D_2 \leq 0.8 \\ 10^\circ &\leq \alpha_1 \leq 30^\circ \\ 10^\circ &\leq \alpha_2 \leq 45^\circ \\ 0.25 &\leq d/D_3 \leq 0.5, \end{aligned} \quad (1)$$

где D_1 – внутренний диаметр меньшего основания изолятора, мм; D_2 – внутренний диаметр большего основания изолятора, мм; α_1 , α_2 – углы конической поверхности изолятора и вывода электрода соответственно; d – диаметр цилиндрической части вывода электрода, мм; D_3 – диаметр отверстия отбортовки корпуса, мм;

и соотношения, обеспечивающие стабильность срабатывания разрядника-обострителя строго между электродами, исключаяющие вероятность пробоя промежутка между экраном катода и внутренней стенкой корпуса разрядника:

$$\begin{aligned} D_{эл} &= (3 \div 5) S \\ R &= (1 \div 2) D_{эл} \\ D_{экр} &= (0,25 \div 0,6) D_{корп}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $D_{эл}$ – диаметр электродов, $D_{экр}$ – диаметр экрана, $D_{корп}$ – диаметр внутренней поверхности металлического корпуса, S – межэлектродное расстояние.

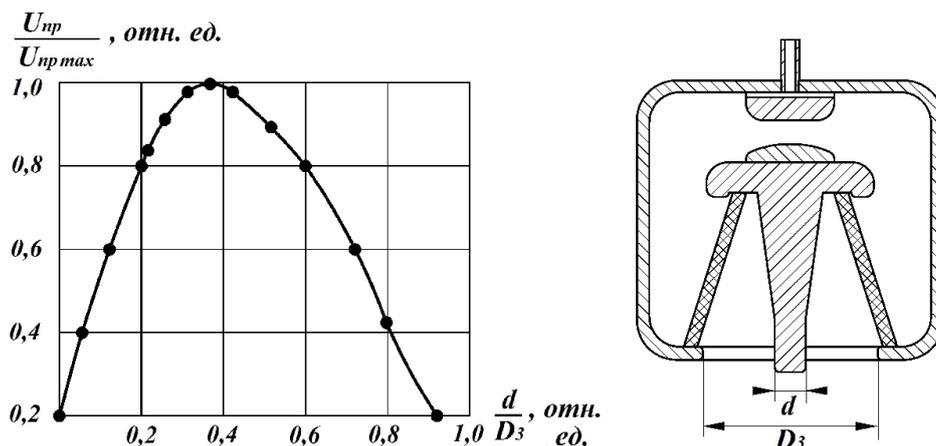


Рисунок 2 – Зависимость напряжения пробоя между выводом электрода и отбортовкой корпуса разрядника-обострителя от отношения диаметра вывода электрода d к диаметру отбортовки корпуса D_3 : U – напряжение пробоя, U_{max} – максимальное напряжение пробоя 500 кВ, d – диаметр вывода, D_3 – диаметр отбортовки корпуса

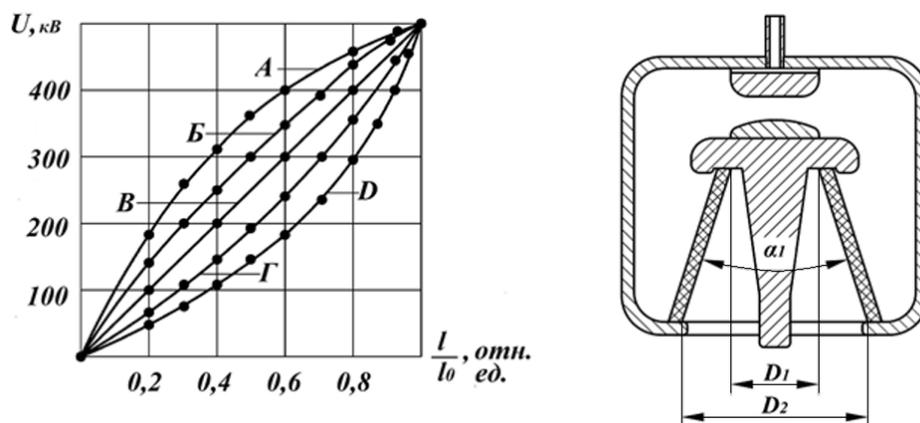


Рисунок 3 – Зависимости влияния конфигурации изолятора на распределение потенциала электрического поля вдоль образующей изолятора: l – длина образующей изолятора в точке измерения; l_0 – полная длина образующей изолятора; D_1 – диаметр меньшего основания изолятора; D_2 – диаметр большего основания изолятора; α_1 – угол конической поверхности изолятора ($A - D_1/D_2 = 0,9, \alpha_1 = 5^\circ$; $B - D_1/D_2 = 0,8, \alpha_1 = 10^\circ$; $B - D_1/D_2 = 0,6, \alpha_1 = 20^\circ$; $\Gamma - D_1/D_2 = 0,4, \alpha_1 = 30^\circ$; $D - D_1/D_2 = 0,2, \alpha_1 = 40^\circ$)

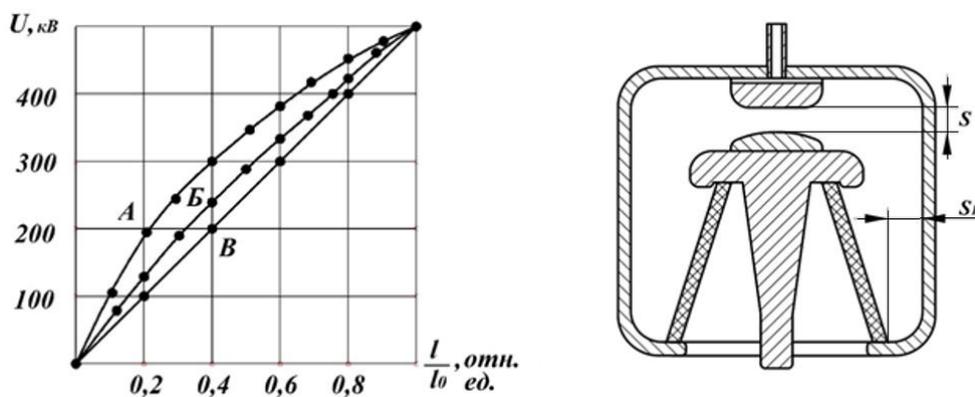


Рисунок 4 – Зависимости влияния взаимного расположения изолятора относительно корпуса разрядника на распределение потенциала электрического поля вдоль образующей изолятора: S – межэлектродное расстояние, S_1 – расстояние между большим основанием изолятора и внутренней цилиндрической поверхностью корпуса ($A - S_1 = 0$; $B - S_1 = S$; $B - S_1 = 2S$)

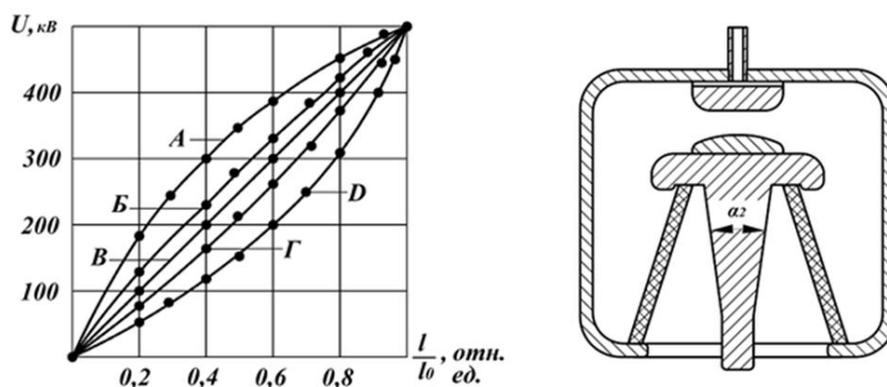


Рисунок 5 – Зависимости влияния изменения величины угла α_2 конической поверхности вывода электрода на распределения потенциала электрического поля вдоль образующей изолятора: l – длина образующей изолятора в точке измерения; l_0 – полная длина образующей изолятора; α_2 – угол конической поверхности вывода электрода ($A - \alpha_2 = 5^\circ$; $B - \alpha_2 = 10^\circ$; $B - \alpha_2 = 25^\circ$; $\Gamma - \alpha_2 = 45^\circ$; $D - \alpha_2 = 40^\circ$)

Во *втором разделе* рассматривается электрическая прочность серийно выпускаемых разрядников-обострителей, разработанных на основе базовой конструкции (рисунок 6, таблица 1).



Рисунок 6 – Разрядники-обострители серии «РО»

Таблица 1 – Серийно выпускаемые разрядники-обострители АО «Плазма»

Тип разрядника	Напряжение пробоя, кВ	Относит. средне-квдр. разброс напряжения пробоя, %, не более	Коммутируемая энергия, Дж	Габариты, $\text{Ø} \times \text{H}$, мм	Минимальная наработка, имп, не менее
РО-48	100 – 140	3	0.5	40x69	3×10^6
РО-43	140 – 190	3	2	50x85	3×10^6
РО-49	180 – 250	3	6	70x95	3×10^6
РО-72	250 – 400	3	до 20	85x115	3×10^6

В *третьем разделе* произведено численное моделирование распределения электрического поля и потенциала внутри разрядника-обострителя (на примере разрядника РО-49), подтверждающее правильность соотношений (1) и (2), полученных ранее эмпирическим путём.

Результаты проведённых исследований были положены в основу конструирования малогабаритных отпаянных разрядников-обострителей серии РО-43, РО-48, РО-49 и РО-72. В разрядниках-обострителях данной серии относительный среднеквадратичный разброс напряжения пробоя не более 3% в течение $3 \cdot 10^6$ срабатываний достигается при соблюдении между элементами конструкции геометрических соотношений (2).

В **третьей главе** рассматриваются основные факторы, определяющие механическую прочность элементов конструкции неуправляемых разрядников-обострителей. Целью является определение расчётным путём и методом прямых испытаний прочности конструкции разрядника-обострителя с рабочим давлением до 120 атмосфер.

В *первом разделе* рассмотрены основные элементы конструкции промышленно выпускаемых разрядников-обострителей серии РО-48, РО-43, РО-49, РО-72.

Во *втором разделе* представлен расчёт прочности конструкции разрядника-обострителя на примере разрядника РО-49 по методикам, развитым в соответствующих курсах сопротивления материалов. Рассчитывается запас прочности по усилию среза для сварных швов разрядника, приводятся расчетные оценки прочности оболочки разрядника и прочности керамического конусного изолятора. По результатам расчётов предельно допустимого давления на сварные швы выявлено, что сварочный шов крышки анода с корпусом разрядника не обладает необходимой механической прочностью при внутренних рабочих давлениях до 120 атмосфер.

Для увеличения прочности конструкции разрядника-обострителя было предложено ввести дополнительное резьбовое соединение анодной ножки с корпусом (рисунок 7).

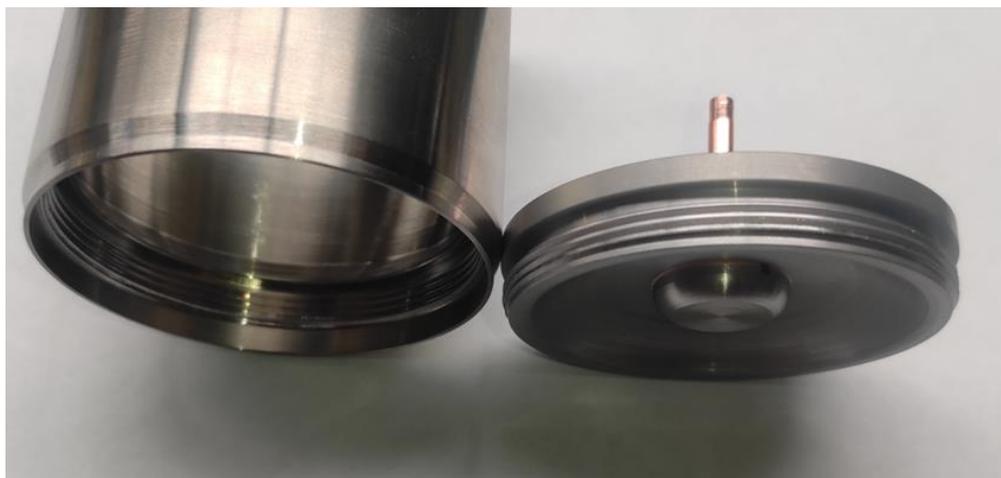


Рисунок 7 – Резьбовое соединение анодной ножки (крышки) с корпусом

В *третьем разделе* произведён расчёт механической прочности элементов конструкции разрядника-обострителя на примере разрядника РО-49 с использованием численного моделирования в САПР SolidWorks Simulation, позволяющее осуществить анализ методом конечных элементов (МКЭ) для виртуального тестирования САД-моделей, провести линейный статический, нелинейный статический и динамический анализ, спрогнозировать поведение изделия в условиях реальной эксплуатации.

Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния в рамках нелинейного анализа механических напряжений показали, что разрушения конструкции разрядника-обострителя без дополнительного резьбового соединения будут начинаться со сварного соединения анодной крышки и корпуса при внутреннем давлении 110 атмосфер (рисунок 8).

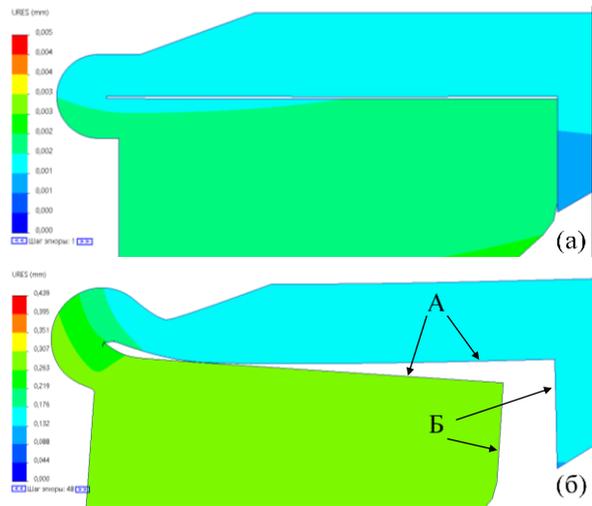


Рисунок 8 – Эпюра перемещений в области сварного шва до деформации и после при нагрузках в 2 атм (а) и 110 атм (б)

Результаты моделирования конструкции разрядника-обострителя с дополнительным резьбовым соединением анодной крышки и корпуса разрядника позволяет снизить механическую нагрузку в анодном сварном шве и повысить предельное рабочее давление до 160 атмосфер (рисунок 9).

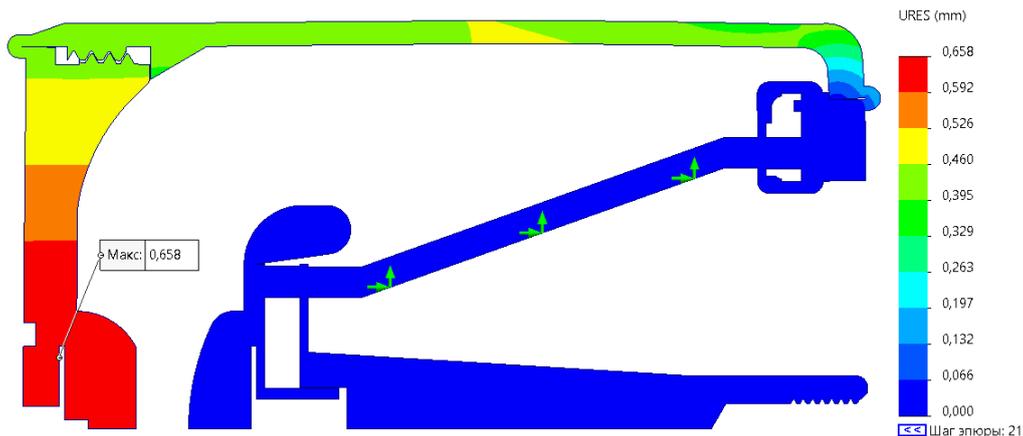


Рисунок 9 – Эпюра механических перемещений в модели разрядника с резьбой при достижении давления 160 атмосфер

В *четвёртом разделе* представлена структурная схема установки для определения механической прочности оболочек разрядников-обострителей. Механическая прочность оболочек разрядников-обострителей определялась путём их заполнения водой под давлением до 200 кгс/см².

Результаты исследований показали, что использование дополнительного резьбового соединения анодного узла с корпусом разрядника позволяет эксплуатировать разрядник-обостритель при внутренних рабочих давлениях до 160 атмосфер.

В **четвертой главе** описывается технология изготовления неуправляемых газонаполненных отпаянных разрядников-обострителей в металлокерамическом исполнении.

В *первом разделе* рассматривается технология изготовления основных элементов конструкции разрядников: подробно описывается процесс сборки и

пайки катодного металлокерамического узла с использованием серебряного припоя ПСр72 (патент на изобретение №2550350), процесс изготовления анодного узла с использованием метода двухступенчатой пайки, способы наполнения и тренировки разрядников-обострителей (патенты на изобретение №2560096, №2643343, 2658320, №2697264), механическое соединение катодного и анодного узлов с корпусом разрядника-обострителя с помощью аргоновой сварки (АДС).

Использование в разрядниках-обострителях серии РО-43, РО-48, РО-49 и РО-72 режима пайки металлокерамических катодных узлов высокотемпературным серебряным припоем ПСр72 с дополнительным превышением температуры на 20-80°C относительно температуры плавления припоя 780 °С и временем выдержки пайки в пределах 6-8 минут обеспечивает высокий выход годных изделий на уровне 95%.

Во *втором разделе* описывается процесс наполнения рабочим газом и тренировки разрядников-обострителей. Обосновано использование дополнительной тренировки прибора в смеси элегаза SF_6 с азотом N_2 , позволяющей повысить электрическую прочность высоковольтного керамического изолятора, препятствуя образованию скользящих пробоев по поверхности керамики и увеличивающей срок наработки разрядника с относительным среднеквадратичным разбросом напряжения пробоя не более 3% свыше $3 \cdot 10^6$ срабатываний.

Описанная технология изготовления позволила обеспечить возможность серийного выпуска неуправляемых малогабаритных отпаянных газонаполненных разрядников-обострителей серии РО-43, РО-48, РО-49 и РО-72 в металлокерамическом исполнении с диаметром корпуса от 40 до 85 мм, напряжением пробоя от 100 до 400 кВ, относительным среднеквадратичным разбросом напряжения пробоя не более 3% и ресурсом свыше $3 \cdot 10^6$ срабатываний.

В **пятой главе** рассматриваются вопросы определения коммутационных характеристик искровых разрядников-обострителей, приведены результаты расчётных зависимостей времён развития искрового разряда и времён коммутации от давления наполняющих газов в пределах от 20 до 140 атмосфер и экспериментального метода измерения времени коммутации в разрядниках-обострителях.

В *первом разделе* описывается процесс развития искрового разряда в газах при атмосферном и сверхатмосферном давлениях в условиях статического пробоя.

Во *втором разделе* приводятся результаты расчётов напряжений пробоя по «Таунсендовскому» и «стримерному» механизмам (рисунок 10).

В *третьем разделе* приведены результаты расчётов зависимостей времён развития искрового разряда при статическом пробое от давления рабочего газа в пределах от 20 до 140 атмосфер при различных значениях параметра (α/p) для азота и водорода (рисунок 11).

Зависимости, приведенные на этом рисунке, рассчитывались по соотношению

$$t_{pp} = \frac{\ln 10^8}{\alpha \cdot \vartheta_{др}}, \quad (3)$$

где α – коэффициент ударной ионизации; $v_{др}$ – скорость дрейфа электронов при заданном значении параметра (E/p).

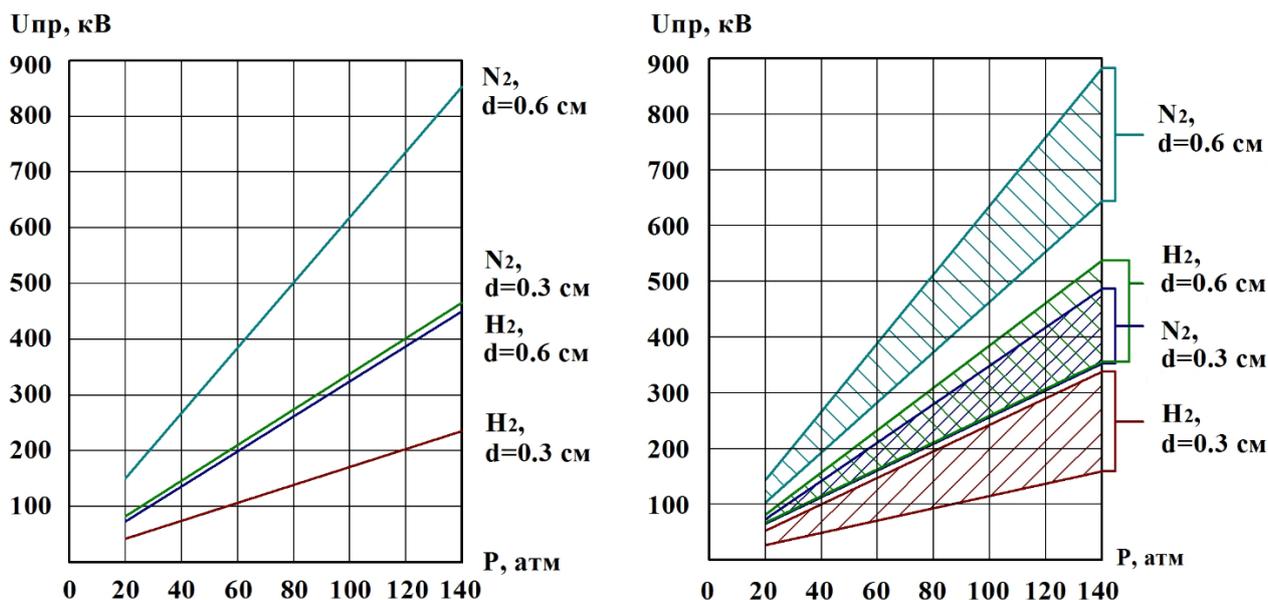


Рисунок 10 – Расчётные зависимости напряжений статического пробоя от давления в водороде и азоте, рассчитанные по «Таунсендовскому» (слева) и «стримерному» (справа) механизмам развития, для межэлектродных расстояний 0.3 и 0.6 см

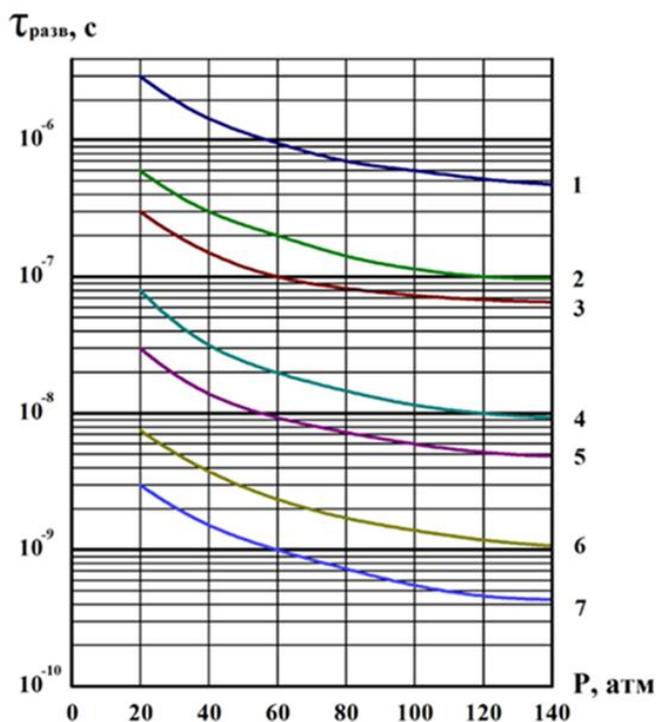


Рисунок 11 – Расчётные зависимости времён развития искрового разряда при статическом пробое от давления водорода при различных значениях параметра (α/p), рассчитанные по формуле (3)

$$\begin{aligned}
 1 - \alpha/p &= 10^{-4} \frac{1}{\text{см} \cdot \text{торр}}, \\
 2 - \alpha/p &= 5 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{см} \cdot \text{торр}}, \\
 3 - \alpha/p &= 10^{-3} \frac{1}{\text{см} \cdot \text{торр}}, \\
 4 - \alpha/p &= 5 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{см} \cdot \text{торр}}, \\
 5 - \alpha/p &= 10^{-2} \frac{1}{\text{см} \cdot \text{торр}}, \\
 6 - \alpha/p &= 4 \cdot 10^{-2} \frac{1}{\text{см} \cdot \text{торр}}, \\
 7 - \alpha/p &= 10^{-1} \frac{1}{\text{см} \cdot \text{торр}}, \\
 E/p &= 12 \div 15 \frac{\text{В}}{\text{см} \cdot \text{торр}}.
 \end{aligned}$$

Результаты расчётов времени коммутации по соотношению (4), учитывающему значение тока разряда в электрической цепи показаны на рисунке 12:

$$t_{разв} = 9 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{\sqrt[3]{I_0 \cdot p}}{E_0}, \quad (4)$$

где p – давление газа; E_0 – напряжённость электрического поля, при которой происходит пробой; $I_0 = U_0/R_n$ – ток в нагрузке R_n , соединённой последовательно с газоразрядным промежутком, при напряжении пробоя U_0 .

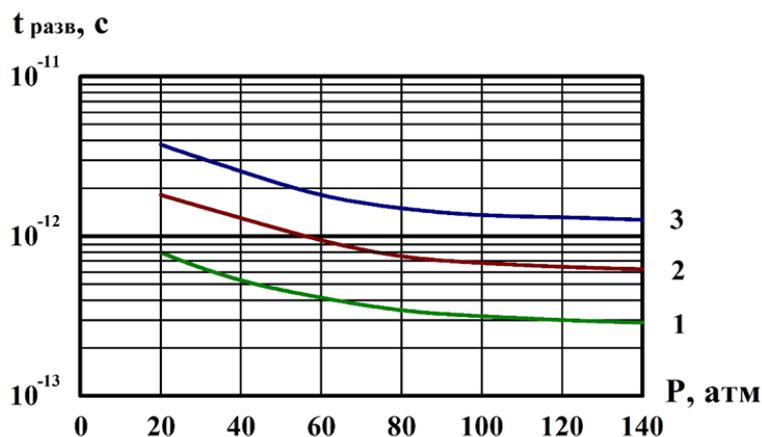


Рисунок 12 – Зависимости времени развития разряда в водороде от давления, рассчитанные по формуле (4) для трёх значений тока разряда I_0 : 1 – 100 А, 2 – 1000 А, 3 – 10000 А. Межэлектродный промежуток $d_{ак} = 0.6$ см

Результаты расчётов по соотношению (5), связывающему время коммутации с параметром газоразрядного промежутка приведены на рисунке 13:

$$t_{разв} = 2 \cdot p \cdot d^2 \cdot \frac{1}{a \cdot U_0^2}, \quad (5)$$

где p – давление газа; d – межэлектродный промежуток; a – коэффициент пропорциональности, имеющий размерность $\frac{\text{Атм} \cdot \text{см}^2}{\text{В}^2 \cdot \text{с}}$; U_0 – напряжение пробоя.

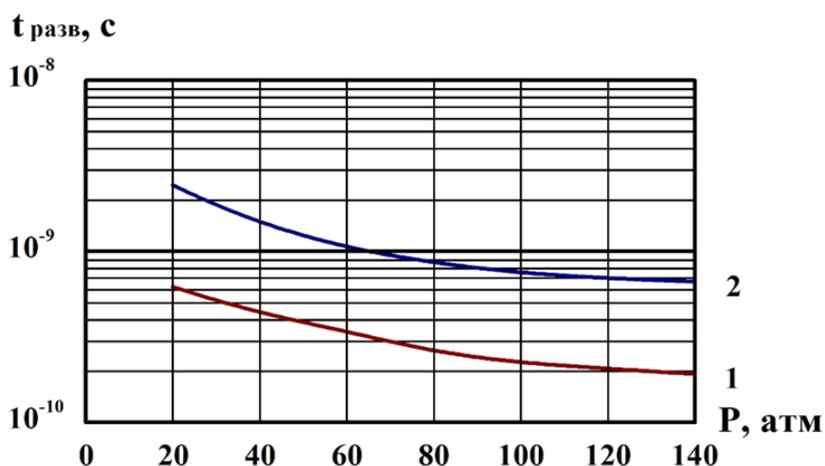


Рисунок 13 – Зависимости времени коммутации в азоте (кривая 1) и в водороде (кривая 2) от давления, рассчитанные по формуле (5)

Приведены результаты расчётов по соотношению (6), учитывающему электрофизические параметры разрядного промежутка и электрической цепи (рисунок 14):

$$t_{разв} = 21 \cdot \frac{p \cdot d^2}{a \cdot U_0^2} + 2.2 \cdot \frac{L}{R}, \quad (6)$$

где L – индуктивность разрядного контура; R – сопротивление нагрузки.

Приведённые в данном разделе расчётные значения времён развития разряда различными методами в диапазоне давлений $p = 20 \div 120$ атмосфер отражают общую тенденцию к сокращению времени коммутации с увеличением давления. Имеет место «разброс» в значениях времён коммутации на порядки – от микросекундной области до пикосекундной области.

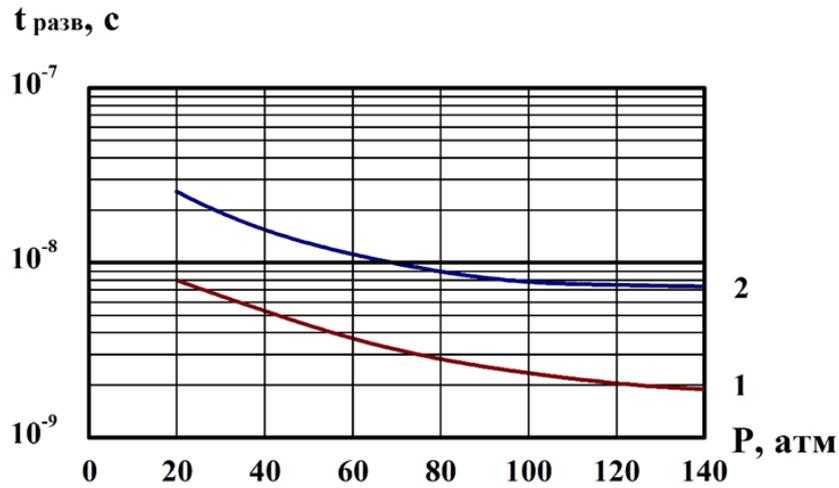


Рисунок 14 – Зависимости времени коммутации, рассчитанные по соотношению (6), от давления для водорода (кривая 1) и азота (кривая 2)

В *четвёртом разделе* приведены результаты экспериментальных измерений времени коммутации разрядников-обострителей серии РО-48 (рисунок 15).

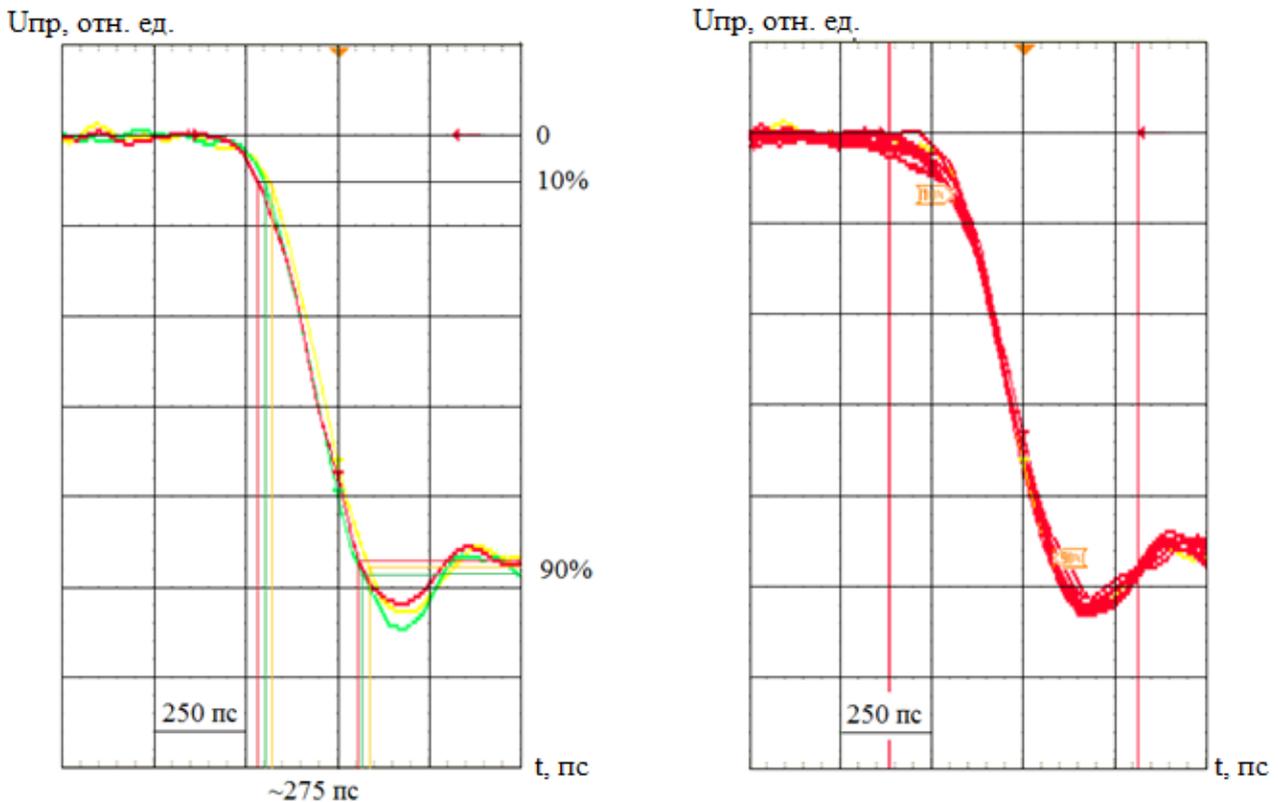


Рисунок 15 – Осциллограммы выходного напряжения импульсного генератора, полученные с использованием трёх разрядников серии РО-48 (слева) и реализованные в режиме накопления 10 импульсов (справа)

Данные разрядники имели межэлектродное расстояние 0.3 см, в качестве рабочего газа использовался водород при давлениях 55 - 58 атмосфер, напряжение пробоя разрядников составляло 150 ± 2 кВ.

Разрядники-обострители типа РО-48 обеспечивают времена коммутации на уровне $\sim 230 \dots 280$ пс. Относительный среднеквадратичный разброс напряжения пробоя $\delta U_{нб}$, определённый по ГОСТ21107.7-75, не превышает 2%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с целью и задачами исследования в диссертационной работе получены научные и практические результаты, связанные с разработкой и промышленным выпуском малогабаритных отпаянных разрядников-обострителей серии РО-43, РО-48, РО-49 и РО-72 с улучшенными техническими параметрами.

1) Разработана конструкция и отработана промышленная технология серийного выпуска малогабаритных отпаянных разрядников-обострителей (РО-48, РО-43, РО-49, РО-72) на рабочие напряжения $100 \div 400$ кВ с относительным среднеквадратичным разбросом напряжения пробоя не более 3% и ресурсом свыше $3 \cdot 10^6$ срабатываний.

2) Методами компьютерного моделирования и прямых испытаний получены соотношения (1), позволяющие обеспечить максимально возможную электрическую прочность при минимизации габаритных размеров разрядника, и соотношения (2), обеспечивающие стабильность срабатывания разрядника-обострителя строго между электродами, исключающие возможность пробоя промежутка между экраном катода и внутренней стенкой корпуса разрядника.

3) Численным моделированием и экспериментальными методами установлено, что использование дополнительного резьбового соединения анодного узла с корпусом разрядника увеличивает механическую прочность и позволяет эксплуатировать разрядник при внутренних давлениях до 160 атмосфер.

4) Установлено, что использование режима пайки металлокерамических соединений, высокотемпературным припоем ПСр72 с дополнительным превышением температуры пайки на $20-80^\circ\text{C}$ относительно температуры плавления припоя 780°C и временем выдержки пайки в пределах 6-8 минут позволяет получать высококачественные герметичные соединения с более высоким процентом выхода годных изделий (не менее 95%).

5) Экспериментальным методом определено, что характерные времена развития искрового разряда в разрядниках-обострителях с водородным наполнением при давлении 60 атмосфер и напряжением пробоя 150 кВ находятся в пределах $230 \div 280$ пикосекунд.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, входящих в международную реферативную базу данных и систему цитирования SCOPUS

1. Kozlov, B.A. Formation of the voltage pulses up to 400 kilovolts with front pulse less than 10 nanoseconds / B. A. Kozlov, D. S. Makhanko // Journal of Physics: Conference Series : 15, Ekaterinburg, 05–10 сентября 2021 года. – Ekaterinburg, 2021. – P. 012126. – DOI 10.1088/1742-6596/2064/1/012126.

2. Kozlov, B.A. Pulse-periodical CO₂ laser operating at pressures up to 12 atmospheres / B. A. Kozlov, D. S. Makhanko, A. Y. Payurov // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, Tomsk, 12–17 сентября 2021 года. Vol. 12086. – Washington: SPIE, 2021. – P. 1208607. – DOI 10.1117/12.2613557.

Статьи в изданиях по специальности 2.2.1., рекомендованных ВАК РФ

3. Козлов, Б. А. Времена срабатывания искровых разрядников-обострителей при давлениях до 140 атмосфер / Б. А. Козлов, Д. С. Маханько // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2023. – № 84. – С. 234-245. – DOI 10.21667/1995-4565-2023-84-234-245.

Патенты на изобретение и полезную модель

4. Патент на полезную модель № 119164 U1 Российская Федерация, МПК H01J 17/02. Газонаполненный разрядник: № 2012108693/07 : заявл. 06.03.2012 : опубл. 10.08.2012 / Б. П. Меркулов, Д. С. Маханько, Д. Б. Меркулов; заявитель Открытое акционерное общество "Научно-исследовательский институт газоразрядных приборов "Плазма". – 14 с.

5. Патент № 2550350 С2 Российская Федерация, МПК H01J 17/02. Способ изготовления газонаполненного разрядника: № 2013136721/07 : заявл. 06.08.2013 : опубл. 10.05.2015 / Б. П. Меркулов, Д. С. Маханько, Н. И. Черепенникова, Т. Г. Новикова; заявитель Открытое акционерное общество "Научно-исследовательский институт газоразрядных приборов "Плазма". – 15 с.

6. Патент № 2560096 С1 Российская Федерация, МПК H01J 17/02. Способ изготовления разрядника с водородным наполнением: № 2014115145/07 : заявл. 15.04.2014 : опубл. 20.08.2015 / Б. П. Меркулов, Д. С. Маханько, В. М. Фокин, В. Г. Самородов ; заявитель Открытое акционерное общество "Научно-исследовательский институт газоразрядных приборов "Плазма". – 8 с.

7. Патент № 2643343 С1 Российская Федерация, МПК H01T 21/00, H01J 9/00. Способ изготовления разрядника с водородным наполнением: № 2016139460 : заявл. 07.10.2016 : опубл. 01.02.2018 / Б. П. Меркулов, Д. С. Маханько, Д. Е. Тетерин [и др.] ; заявитель Акционерное общество "Научно-исследовательский институт газоразрядных приборов "Плазма". – 15 с.

8. Патент № 2658320 С1 Российская Федерация, МПК H01J 17/02, H01J 9/44, H01T 1/00. Способ изготовления разрядника с водородным наполнением: № 2017114444 : заявл. 25.04.2017 : опубл. 20.06.2018 / Б. П. Меркулов, Д. С. Маханько, В. Б. Наседкин [и др.] ; заявитель Акционерное общество "Научно-исследовательский институт газоразрядных приборов "Плазма". – 15 с.

9. Патент № 2697264 С1 Российская Федерация, МПК H01J 17/20, H01J 9/38. способ изготовления разрядника с водородным наполнением: № 2018137097 : заявл. 22.10.2018 : опубл. 13.08.2019 / Б. П. Меркулов, Д. С. Маханько, Н. И. Черепенникова ; заявитель Акционерное общество "Научно-исследовательский институт газоразрядных приборов "Плазма". – 14 с.

Статьи в сборниках трудов конференций

10. Kozlov, B.A. Formation of the voltage pulses up to 400 kilovolts with front pulse less THAN 10 nanoseconds / B. A. Kozlov, D. S. Makhanko // 15th International Conference "Gas Discharge Plasmas and Their Applications" GDP 2021 : Abstracts, Ekaterinburg, 05–10 сентября 2021 года / Edited by Nikolay Zubarev. – Ekaterinburg: IEP UB RAS, 2021. – P. 238.

11. Kozlov, B.A. Pulse periodical CO₂ laser operating at pressures up to 12 atmospheres / B. A. Kozlov, D. S. Makhanko, A. Ya. Payurov // Pulsed Lasers and Laser Applications (AMPL-2021) : Abstracts of XV International Conference, Tomsk, 12–17 сентября 2021 года. – Tomsk: "СТТ", 2021. – P. 45-46.

12. Makhanko, D.S. Technological aspects of the production of spark gap-sharpeners for voltage up to 500 KV / D.S. Makhanko // 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects: Abstracts. – Tomsk: TPU Publishing House, 2022. – 582 p.

Прочие публикации

13. Маханько, Д.С. Механическая прочность конструкции неуправляемого разрядника-обострителя высокого давления / Д. С. Маханько, А. Я. Паюров // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2021. – № 78. – С. 181-187. – DOI 10.21667/1995-4565-2021-78-181-187.

14. Маханько, Д.С. Электрическая прочность конструкции неуправляемого разрядника-обострителя на напряжение до 500 кВ / Д. С. Маханько // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2021. – № 78. – С. 188-197. – DOI 10.21667/1995-4565-2021-78-188-197.

15. Маханько, Д.С. Технология изготовления отпаянных разрядников-обострителей высокого давления с рабочими напряжениями до 500 кВ / Д. С. Маханько // Научные технологии. – 2022. – Т. 23, № 1. – С. 5-13. – DOI 10.18127/j19998465-202201-01.

16. Маханько, Д.С. Технологические аспекты производства разрядников-обострителей на напряжение до 500 кВ / Д. С. Маханько // Поток энергии и радиационные эффекты (EFRE-2022): Congress Proceedings, Tomsk, 02-08 октября 2022 года / Edited by Dr. Dmitry Sorokin and Anton Grishkov. – Tomsk: TPU Publishing House, 2022. – С. 334-339. – DOI 10.56761/EFRE2022.S4-O-008301.

Маханько Дмитрий Сергеевич

РАЗРАБОТКА РАЗРЯДНИКОВ-ОБОСТРИТЕЛЕЙ С УЛУЧШЕННЫМИ ТЕХНИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать __.__.25. Формат бумаги 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.

Тираж 100 экз. Заказ _____