

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
«НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ПРИБОРОВ «ПЛАЗМА»

На правах рукописи



МАХАНЬКО ДМИТРИЙ СЕРГЕЕВИЧ

РАЗРАБОТКА РАЗРЯДНИКОВ-ОБОСТРИТЕЛЕЙ  
С УЛУЧШЕННЫМИ ТЕХНИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ

Специальность 2.2.1. «Вакуумная и плазменная электроника»

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
д-р физ.-мат. наук, профессор  
Козлов Борис Алексеевич

Рязань 2025

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ.....	13
1.1 Высоковольтные коммутаторы. Области применения и основные требования к параметрам .....	13
1.2 Коммутирующие среды .....	14
1.3 Плотные газы как коммутирующие среды .....	18
1.4 Развитие искрового разряда, коммутируемые токи и времена коммутации в плотных газах.....	20
1.5 Искровые разрядники и разрядники-обострители .....	33
1.6 Конструктивные особенности разрядников-обострителей .....	38
1.7 Параметры промышленно выпускаемых разрядников-обострителей .....	40
1.8 Современное состояние исследований, разработок и промышленного выпуска разрядников-обострителей на напряжения до 400 кВ с субнаносекундными временами срабатывания .....	43
1.9 Выводы к главе 1 и постановка задачи .....	49
ГЛАВА 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ КОНСТРУКЦИИ РАЗРЯДНИКА-ОБОСТРИТЕЛЯ НА НАПРЯЖЕНИЯ ДО 400 КВ .....	51
2.1 Экспериментальное определение условий достижения максимальной электрической прочности разрядников-обострителей .....	51
2.1.1 Основные элементы конструкции, между которыми возможны шунтирующие пробой .....	51
2.1.2 Влияние конструктивных элементов разрядника-обострителя на распределение потенциала электрического поля вдоль образующей изолятора .....	53
2.1.3 Пробой в разряднике между электродами и блокирование пробоя между экраном и внутренней поверхностью корпуса .....	61
2.2 Электрическая прочность серийно выпускаемых разрядников-обострителей .....	64
2.3 Численное моделирование распределения электрического поля и потенциала внутри разрядника-обострителя РО-49 .....	67
2.4 Выводы к главе 2.....	72
ГЛАВА 3. МЕХАНИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ РАЗРЯДНИКА-ОБОСТРИТЕЛЯ НА НАПРЯЖЕНИЕ ДО 400 КВ .....	74
3.1 Основные элементы конструкции промышленно выпускаемых разрядников-обострителей серии РО-48, РО-43, РО-49, РО-72 .....	75
3.2 Расчёт механической прочности элементов конструкции разрядника-обострителя РО-49 по аналитическим методам.....	77

3.2.1 Механическая прочность корпуса разрядника-обострителя .....	78
3.2.2 Механическая прочность керамического конусного изолятора разрядника-обострителя .....	83
3.2.3 Механическая прочность сварных швов в разряднике-обострителе .....	84
3.2.4 Введение в конструкцию разрядника-обострителя резьбового соединения анодного узла с корпусом .....	87
3.3 Расчёт механической прочности элементов конструкции разрядника- обострителя РО-49 с использованием численного моделирования в САПР SolidWorks Simulation .....	90
3.3.1 Моделирование напряженно-деформированного состояния разрядника- обострителя РО-49 без резьбы с помощью линейного анализа .....	91
3.3.2 Моделирование напряженно-деформированного состояния разрядника- обострителя РО-49 без резьбы с помощью нелинейного анализа .....	100
3.3.3 Напряженно-деформированное состояние разрядника-обострителя РО-49 с резьбой.....	105
3.4 Экспериментальная проверка механической прочности .....	108
3.5 Выводы к главе 3.....	109
<b>ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПРОМЫШЛЕННОГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ СЕРИИ НЕУПРАВЛЯЕМЫХ МАЛОГАБАРИТНЫХ РАЗРЯДНИКОВ-ОБОСТРИТЕЛЕЙ НА НАПРЯЖЕНИЯ 100-400 КВ .....</b>	<b>111</b>
4.1 Изготовление основных элементов конструкции разрядников-обострителей .....	111
4.2 Наполнение и тренировка разрядников-обострителей .....	126
4.3 Выводы к главе 4.....	132
<b>ГЛАВА 5. КОММУТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСКРОВЫХ РАЗРЯДНИКОВ-ОБОСТРИТЕЛЕЙ .....</b>	<b>133</b>
5.1 Развитие искрового разряда в газах при атмосферном и сверхатмосферном давлениях в условиях статического пробоя .....	134
5.2 Напряжения статического пробоя при сверхатмосферных давлениях .....	136
5.3 Определение значений времён коммутации в разрядниках-обострителях по известным расчётным соотношениям .....	142
5.4 Экспериментальное определение времён коммутации в разрядниках- обострителях сверхатмосферного давления.....	150
5.4 Выводы к главе 5.....	158
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>159</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>161</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ.....</b>	<b>172</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**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 смесью  $SF_6+N_2$  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  $3 \times 10^6$  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  $100 \div 400$  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%.

#### **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:

$$D_{эл} = (3 \div 5) S,$$

$$R = (1 \div 2) D_{эл},$$

$$D_{экр} = (0,25 \div 0,6) D_{корп},$$

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 журнале 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, четырех 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.

## ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

### 1.1 Высоковольтные коммутаторы. Области применения и основные требования к параметрам

Важной областью, обеспечивающей развитие науки и производства, являются высоковольтные импульсные технологии. Одним из таких направлений развития высоковольтных импульсных технологий является разработка усовершенствованных или принципиально новых генераторов высоковольтных импульсов. Генераторы высоковольтных импульсов широко применяются в промышленности, в ускорительной технике, источниках накачки газоразрядных лазеров сверхатмосферного давления, электронно-оптических преобразователях и генераторах ЭМИ. Высоковольтные генераторы импульсов очень часто используются в научных исследованиях в качестве лабораторного оборудования и в источниках питания ускорителей частиц [1-15].

Генераторы высоковольтных импульсов различаются по применяемым в них накопителям энергии. Классическим считается емкостной накопитель энергии, который с помощью коммутатора передает накопленную энергию электрического поля в нагрузку. Существует большое количество высокоскоростных коммутаторов с различными параметрами, использующихся при построении генераторов на основе емкостного накопителя энергии [1, 16]. Вторым вариантом является индуктивный накопитель энергии, накапливающий энергию в магнитном поле индуктивного контура с током.

Для использования индуктивного накопителя энергии требуются мощные высокоскоростные прерыватели тока: взрывающиеся проводники, плазменные прерыватели, прерыватели на SOS-диодах и прерыватели на основе газоразрядных коммутаторов тока и эффекте самообрыва тока [1, 17-22]. Среди известных размыкателей наиболее перспективными, в диапазоне токов до 1 кА и напряжений порядка 100 кВ, являются газоразрядные коммутаторы тока. Их использование дает возможность получать многократно повторяемые импульсы

со стабильными параметрами, обеспечивать достаточно простое изменение энергии в импульсе, генерировать высоковольтные импульсы от низковольтных источников питания. Кроме того, газоразрядные коммутаторы обеспечивают как замыкание, так и размыкание тока накопителя энергии, а также способны восстанавливать в полном объеме свои свойства после срывов в работе, возникающих в критических режимах функционирования генератора.

## 1.2 Коммутирующие среды

Основой любого коммутатора является коммутирующая среда. Под коммутирующими средами понимаются среды, в которых в нужный момент времени создаётся высокая электропроводность. Применительно к высоковольтным сильноточным коммутаторам такими средами выступают плотные газы, жидкости и твёрдые тела. Твердотельные коммутирующие среды следует подразделять на диэлектрические и полупроводниковые. Последние преимущественно используются для целей размыкания тока (SOS-диоды) в генераторах с индуктивным накоплением энергии и в дальнейшем рассматриваться не будут. Все коммутаторы, построенные на перечисленных средах, должны отвечать определённым требованиям. К ним относятся напряжение пробоя, коммутируемый ток, коммутируемая энергия, время коммутации, ресурс и частота повторения импульсов.

Одним из обязательных требований, предъявляемых к коммутаторам в области высоковольтной наносекундной техники, является обеспечение их минимальной индуктивности.

В твердотельных и в жидкостных средах в силу очень высокой концентрации молекул (до  $10^{23}$  см<sup>-3</sup>) в миллиметровых межэлектродных промежутках в момент наступления пробоя напряжения на электродах могут достигать значений до нескольких мегавольт [1, 23-36]. Коммутируемые токи в этих условиях находятся в пределах от сотен килоампер до 10 мегаампер. Коммутируемые энергии достигают десятков мегаджоулей.

Коммутаторы на основе газовых сред уступают твердотельным и жидкостным коммутаторам по значениям максимальных напряжений и токов. Достигнутые к настоящему времени значения коммутируемой энергии с использованием искровых разрядников достигают десятков килоджоулей при напряжениях и токах, соответственно,  $U_{\max} \leq 100$  кВ и  $I_{\max} \leq 100$  кА. Соответствующие параметры разрядников-обострителей имеют значения  $W_{\text{комм}} \leq 20$  Дж,  $U_{\max} \leq 400$  кВ,  $I_{\max} \leq 25 \div 40$  кА [1, 9, 12-17, 20, 37-40].

Одним из важнейших параметров, характеризующих коммутатор и в значительной степени определяющих области его применения, является время коммутации. Время коммутации при использовании твердых диэлектриков находится в диапазоне от нескольких наносекунд до долей наносекунды [1, 24-26]. Основным механизмом создания высокой проводимости является ударная ионизация электронами.

Разряд в твердом диэлектрике обычно применяют при необходимости коммутировать очень большие токи, порядка  $10^6$  А и более [1]. Благодаря высокой электрической прочности твердых диэлектриков, таких, например, как полиэтилен, тефлон, лавсан и другие, в разрядных промежутках с твердым диэлектриком развиваются пробивные напряженности поля величиной  $\sim 10^6$  В/см и возникает электрический пробой с весьма малой индуктивностью искрового канала.

Пробой жидких диэлектрических сред (трансформаторное масло, дистиллированная вода) осложняется наличием примесей, микропузырьков газа и температурных неоднородностей. Наиболее легко проводимость создаётся в полярных диэлектриках, в которых имеет место повышенная диссоциация гетерополярных молекул. Участие в создании проводимости ионной компоненты обеспечивает в жидкостях времена коммутации на уровне  $10^{-8} \div 10^{-5}$  секунды [1, 27]. В жидкостных средах восстановление исходной электропрочности занимает времена от долей секунды до нескольких секунд. Это определяется малым значением коэффициента диффузии. Кроме этого, после незначительного числа пробоев происходит изменение химического состава коммутирующей среды и

образование сложных органических соединений на поверхности электродов. Такие изменения в составе жидкого диэлектрика и изменение структуры поверхности приводят к заметным снижениям напряжения пробоя и нестабильному срабатыванию коммутатора с течением времени. Длительные процессы восстановления электропрочности ограничивают максимальную частоту срабатывания коммутаторов на жидких диэлектриках в лучшем случае на уровне в единицы герц. Организация принудительной прокачки коммутирующей жидкости через межэлектродный промежуток позволяет повысить максимальную частоту срабатываний коммутатора до десятков и сотен герц. Но в любом случае следует иметь в виду значительные габаритные размеры таких коммутаторов.

В твердотельных коммутаторах основной промежуток, через который протекает коммутируемый ток, после прохождения тока не восстанавливается, т.е. не возвращается в исходное состояние, в котором он способен выдерживать подаваемое на него рабочее напряжение. Такой «пробитый» диэлектрик (тонкая диэлектрическая пластина) должен быть заменён на новый для того, чтобы можно было реализовать следующую коммутацию тока. Другими словами – коммутаторы на основе твёрдых тел – это устройства разового включения.

Газовые коммутирующие среды свободны от присущих твердотельным и жидкостным средам недостатков. Таким образом, газовые среды обладают исключительным свойством «самовосстановления» после завершения процесса коммутации. Длительность процесса «самовосстановления» (в диффузионном режиме) происходит в течение десятков миллисекунд, что позволяет коммутаторам на сжатых газах работать на частотах повторения импульсов в десятки герц [1, 16, 38-40]. Для достижения более высоких частот повторения импульсов легко может быть осуществлено принудительное обновление газовой среды в межэлектродном промежутке и достигнуты частоты повторения до 10 кГц [1, 16].

В газовых коммутирующих средах времена создания высокой электропроводности сильно зависят от рабочего давления. Так, в диапазоне давлений от 1 до 60 атмосфер в межэлектродных промежутках  $3 \div 6$  мм времена



коммутации находятся в пределах от десятков наносекунд до долей наносекунды [1, 9, 16, 37, 38, 41].

Установленные к настоящему времени основные закономерности развития коммутирующих искровых каналов показывают, что время коммутации сокращается по мере увеличения давления. В промышленно выпускаемых разрядниках-обострителях, работающих при давлениях наполняющего газа (водорода) в диапазоне давлений  $50 \div 60$  атмосфер при величине межэлектродного промежутка 3 мм, рабочие напряжения находятся на уровне  $150 \div 220$  кВ, а времена коммутации составляют наносекунды и доли наносекунд [40-43]. Учитывая, что времена коммутации обратно пропорциональны давлению наполняющего газа, следует ожидать заметного уменьшения времени коммутации при увеличении давления до уровня в  $120 \div 140$  атмосфер.

Важным с точки зрения согласования наносекундного импульсного генератора с нагрузкой является требование минимизации геометрических размеров и индуктивности, которое легко реализуется в разрядниках-обострителях высокого давления.

Таким образом, рассмотрение основных типов коммутирующих сред указывает на явные преимущества газообразных сред перед твердотельными и жидкостными при создании компактных разрядников-обострителей, способных работать на частотах повторения импульсов до 50 Гц в отпаянных вариантах. Принудительное обновление газовой среды в промежутке обеспечивает возможность работы на частотах повторения импульсов до 10 кГц.

Очень важным отличительным свойством газовых коммутирующих сред перед другими (вакуумными, твердотельными, жидкостными) является их устойчивость к возникновению возможных «нештатных» ситуаций, к которым можно отнести такие явления, как перенапряжение, многократную смену полярности тока и напряжения в цепи, протекание чрезмерно больших величин тока.

### 1.3 Плотные газы как коммутирующие среды

Плотные газы (давления 1 атмосфера и выше), в которых формируется искровой разряд, следует отнести к непревзойдённым коммутирующим средам по целому ряду параметров. В первую очередь – обеспечение возможности работы с напряжениями в пределах  $10^3 \div 10^7$  В. Во-вторых – в силу малого электрического сопротивления искровые разряды могут пропускать (коммутировать) токи амплитудой  $10^2 \div 10^6$  А. В-третьих – для них характерно малое время коммутации  $t_k = 10^{-8} \div 10^{-10}$  с.

Величину тока, протекающего через искровой канал, качественно можно оценить исходя из энергетических соображений применительно, например, к разряднику-обострителю типа РО-49. Величина межэлектродного промежутка в этом искровом разряднике составляет  $D_{AK} = 0,6$  см. Типичные поперечные размеры искровых каналов находятся на уровне  $d = 0,1 \div 0,2$  мм. Как известно, газ в искровом канале полностью ионизирован [1, 38, 40, 44-48]. Энергетические затраты на полную ионизацию газа (азот или водород) при давлении в 120 Атм можно оценить по соотношению:

$$W_i^\Sigma = W_i^{N_2(H_2)} \cdot N_{\text{мол}} = W_i^{N_2(H_2)} \cdot V_{\text{ик}} \cdot N_L \cdot p_{N_2(H_2)}, \quad (1.1)$$

где  $W_i^{N_2(H_2)}$  – энергия ионизации молекул азота (водорода),  $N_{\text{мол}}$  – число молекул в объёме канала,  $V_{\text{ик}}$  – объём искрового канала,  $N_L$  – число Лошмидта ( $N_L = 2,68 \cdot 10^{19}$  1/см<sup>3</sup>),  $p_{N_2(H_2)}$  – давление азота (водорода) в разряднике (120 Атм).

Энергия, необходимая для полной ионизации газа в искровом канале, согласно выражению (1.1), составляет  $W_i^\Sigma = 880$  мДж  $\approx 0,9$  Дж. При коммутируемой энергии в десятки джоулей полученная величина значительно меньше энергии, передаваемой в нагрузку.

Величина тока, протекающего через такой канал, определяется как

$$I = j \cdot S = e \cdot N_e \cdot v_{\text{др}} \cdot S, \quad (1.2)$$

где  $j$  – плотность тока, А/см<sup>2</sup>;  $e$  – заряд электрона, Кл;  $N_e$  – концентрация электронов в искровом канале, см<sup>-3</sup>;  $v_{др}$  – скорость дрейфа электронов ( $\approx 10^7$  см/с),  $S$  – поперечное сечение канала, см<sup>2</sup>.

Подставив в выражение (1.2) известные значения концентрации электронов и скорости дрейфа, получаем

$$j \approx 5 \cdot 10^9 \frac{\text{А}}{\text{см}^2}, I \approx 40 \cdot 10^6 \text{А}. \quad (1.3)$$

Эти значения получены без учёта влияния внешней электрической цепи, т.е. при фиксированном значении напряжения на промежутке и отсутствии омических и индуктивных сопротивлений. При наличии внешних сопротивлений полученные в результате оценок значения тока разряда будут иметь значения на  $2 \div 3$  порядка меньшие. Но даже в этом случае коммутируемый ток будет измеряться десятками и сотнями килоампер.

Характерные времена развития искровых разрядов (времена коммутации) в промежутке до 1 см и давлении в 1 Атм находятся в пределах от единиц до десятков наносекунд [45-48]. Эти времена существенно сокращаются при увеличении давления рабочего газа и наличии перенапряжения на промежутке [48-58]. Свойства искровых разрядов не зависят от рода материала электродов, а определяются лишь родом газа и его давлением [1, 39, 40, 45, 46, 59].

Частота срабатываний искрового разряда в неподвижном газе зависит от скорости восстановления электрической прочности промежутка и определяется процессами деионизации зарядов и выравнивания тепловых неоднородностей в газе и на поверхности электродов и для типичных промежутков  $d_{ак} \approx 1$  см при давлении  $p = 1 \div 5$  Атм может достигать 50 Гц [40].

Для формирования искровых разрядов на более высоких частотах повторения импульсов применяется принудительное обновление газовой среды в промежутке, а также – секционирование разрядного промежутка. Эти меры позволяют достичь частот повторения импульсов до  $5 \div 10$  кГц [1, 40].

Таким образом, анализируя имеющиеся данные и принимая во внимание информацию из обзоров [40, 60] о современном состоянии разработок высоковольтных наносекундных коммутаторов, можно сделать

заклучение о том, что газонаполненные разрядники высокого давления на рабочие напряжения до сотен киловольт способны коммутировать токи до нескольких килоампер и обладают рядом преимуществ перед разрядниками с твёрдым телом и жидкостными разрядниками. Они отличаются сравнительно малыми временами запаздывания ( $10^{-9}$  с), хорошей временной стабильностью срабатывания (доли наносекунд), с успехом применяются в частотном режиме включений и имеют достаточный ресурс по числу срабатываний. Определённым преимуществом является также относительная простота конструкции и изготовления разрядников со сжатым газом. Быстрая смена газовой среды в межэлектродном промежутке позволяет обеспечивать работу искровых разрядников на частотах повторения импульсов до 10 кГц.

Всё это указывает на то, что искровые разряды в плотных газах являются наиболее приемлемыми коммутирующими средами в высоковольтной сильноточной наносекундной технике.

#### **1.4 Развитие искрового разряда, коммутируемые токи и времена коммутации в плотных газах**

Искрой называется нестабильный сконцентрированный в пространстве электрический разряд с большой величиной тока, который следует за его инициированием и при достаточно большом подводе энергии переходит в дугу. Искровые разряды могут формироваться только в плотных газах ( $p \geq 0,5$  Атм). При более низких давлениях разряд формируется в виде тлеющего (диффузного) разряда. Искру, распространяющуюся в открытом газе, называют открытой искрой.

Развитие искрового разряда в зависимости от напряжённости электрического поля и величины  $p \cdot d$  (произведение давления  $p$  на длину межэлектродного промежутка  $d$ ) происходит двумя существенно различными путями: или по классическому механизму Таунсенда (для малых значений  $p \cdot d$ ),

или путём формирования канала (для больших  $p \cdot d$ , в воздухе в статических условиях  $p \cdot d \geq 4000$  Торр·см) [1, 44-48, 59].

Первоначально оба процесса протекают одинаково. Электрон, выходящий из катода (например, в результате фотоэлектронной эмиссии), под влиянием электрического поля напряжённости  $E$  на пути в 1 см претерпевает  $\alpha$  ионизирующих столкновений с нейтральными молекулами газа. Далее происходит экспоненциальное возрастание (лавина) исходного числа заряженных частиц с коэффициентом  $e^{\alpha \cdot x}$ , где  $x$  – длина пробега в сантиметрах. Коэффициент ионизации  $\alpha$  зависит от плотности газа, потенциала ионизации  $U_i$ , а также от напряжённости поля и обычно задаётся как функция  $E/p$ . Благодаря возникшей лавине при развитии искры по механизму Таунсенда в результате так называемых  $\gamma$ -процессов из катода освобождаются новые электроны. Они могут освобождаться вследствие действия на материал катода, возникшего в лавине, светового излучения ( $\gamma_{св}$ ) или ионов, образовавшихся в окружающем газе ( $\gamma_{ион}$ ). К  $\gamma$ -процессам относится и ряд других вторичных процессов.

Новые свободные электроны вызывают образование новых лавин, и при выполнении условия Таунсенда [ $\gamma \cdot (e^{\alpha \cdot d} - 1) = 1$ ] происходит непрерывающаяся последовательность подобных лавин. Таким образом, разряд становится самоподдерживающимся и не требует более инициирования извне. Статический пробой, согласно Таунсенду, предусматривает большое число лавин (формирование разряда по цепному механизму), причём интервал между отдельными ступенями цепной реакции в  $\gamma_{св}$ -процессах, инициируемых излучением, приблизительно соответствует времени дрейфа электронов, а в  $\gamma_{ион}$ -процессах – времени дрейфа ионов.

При больших значениях произведения  $p \cdot d$  статический разряд уже нельзя объяснить с помощью механизма Таунсенда, т.к. известно, что в этом случае для начала искрового разряда не требуется наличия вторичных процессов.

Подробные исследования, проведённые с помощью скоростных осциллографических и электронно-оптических преобразователей, показывают, что во всех случаях, когда число заряженных частиц в лавине достигает

критической величины  $10^8 \div 10^9$ , наблюдается совершенно иной механизм формирования разряда, а именно образование канала. На фронте стремящейся к аноду лавины всегда имеется избыток электронов, т.к. ионы, вследствие их малой подвижности, практически остаются на месте (рисунок 1.1).

При этом на расстоянии от катода  $x_{кр}$  вследствие объёмного заряда лавины возникают искажения, сравнимые с исходной напряжённостью поля. На фронте и в хвостовой части лавины напряжённость поля возрастает. Следствием этого является то, что условия для ионизации на фронте лавины становятся всё более благоприятными, и лавина с повышенной скоростью ( $v \approx 1,7 \cdot 10^7$  см/с) устремляется к аноду, образуя канал, направленный в его сторону.

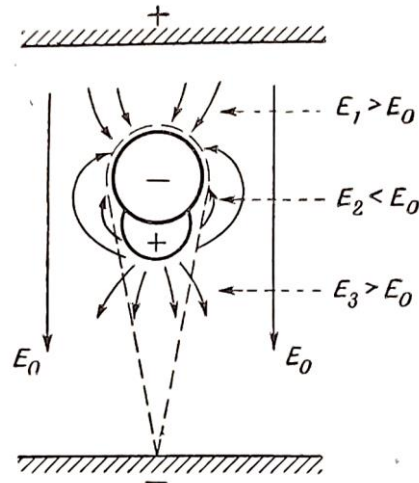


Рисунок 1.1 – Влияние объёмного заряда лавины на распределение полей в области головки лавины.  $E_1$  – поле у анода,  $E_2$  – поле в центре головки лавины,  $E_3$  – поле у катода

После формирования канала в направлении анода в хвостовой части лавины образуется канал, направленный в сторону катода. Скорость его образования ещё больше ( $v \approx 10^8$  см/с). Высокая скорость роста этого канала и частично канала в направлении анода связаны прежде всего с фотоионизацией газа вблизи головки лавины.

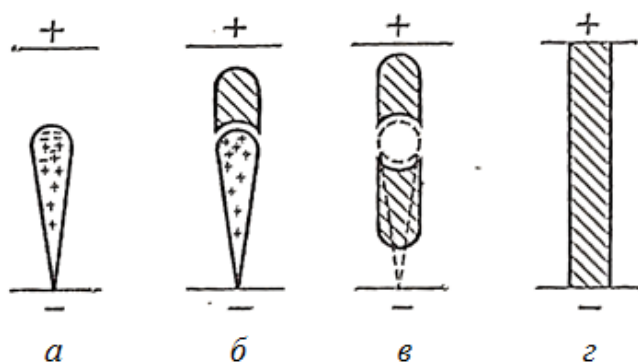


Рисунок 1.2 – Схематическое изображение перехода от лавины (а) к каналам, направленным к аноду (б) и катоду (в), образование проводящего канала между анодом и катодом (z)

Таким образом, возникает токопроводящий канал между анодом и катодом, в котором может произойти разряд с большим током (рисунок 1.2).

Согласно описанному механизму, время формирования искры при разряде в канале складывается из трёх частей [44]:

$$t_A = \frac{x_{кр}}{\mu_e \cdot E} + \frac{d - x_{кр}}{K_1 \cdot \mu_e \cdot E} + \frac{x_{кр}}{K_2 \cdot \mu_e \cdot E}. \quad (1.4)$$

Первое слагаемое описывает процесс до критического усиления, два других – время образования каналов, направленных к аноду и катоду;  $K_1 = 5 \div 6$ ,  $K_2 = 8$  – коэффициенты, характеризующие перестройку поля;  $d$  – расстояние между электродами;  $x_{кр}$  – расстояние от катода, где достигается критическое усиление;  $\mu_e$  – подвижность электронов.

Наибольшие значения времени формирования получаются, когда критическое усиление достигается непосредственно у анода ( $t_A > \frac{d}{\mu_e \cdot E}$ ). Очевидно, что это соответствует статическому пробую.

При подаче на межэлектродный промежуток напряжения, превышающего пробойное, с крутым фронтом нарастания процессы формирования искры, как при разряде по Таунсенду, так и при образовании канала существенно ускоряются.

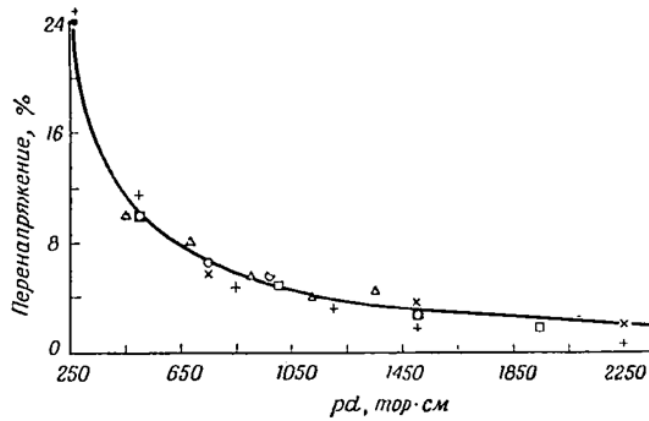


Рисунок 1.3 – Предельные значения относительного перенапряжения (%), необходимого для формирования канала, в зависимости от величины  $p \cdot d$  для воздуха: ниже кривой – разряд развивается по механизму Таунсенда

Граница между разрядом по Таунсенду и образованием канала для воздуха при постоянном давлении  $p = const$  выражается в изменении хода зависимости времени формирования от напряжения (рисунок 1.3).

При этом время формирования разряда существенно зависит от напряжения. При напряжениях  $U_p$ , значительно превышающих напряжение пробоя в статике  $U_s$ , т.е. при большом значении импульсного отношения  $f = U_p/U_s$ , можно в большей степени сократить время формирования разряда. Зависимости времени формирования от импульсного отношения для воздуха приведены на рисунке 1.4.

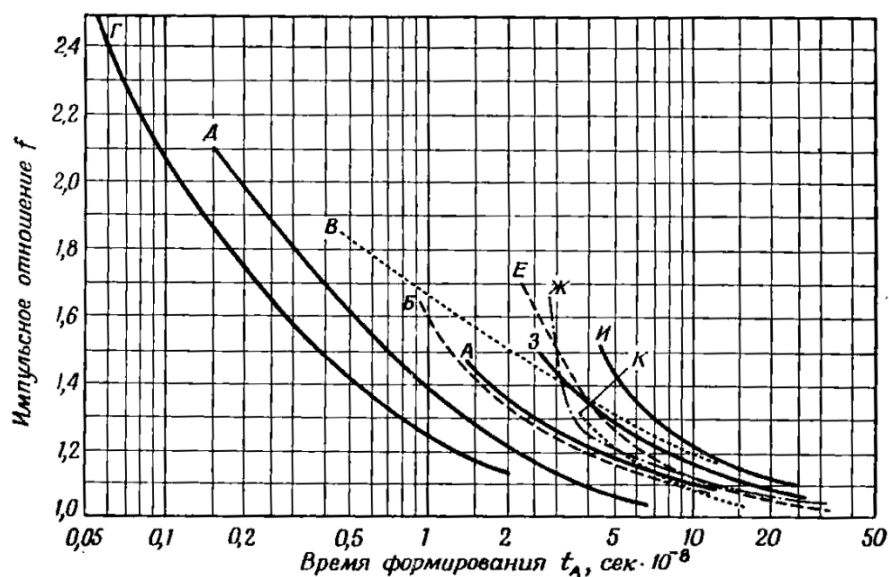




Рисунок 1.4 – Зависимости времени формирования  $t_A$  при однородном поле в воздухе от импульсного отношения  $f$  и различных межэлектродных промежутков:  $A - d_{ак} = 3$  мм;  $B - d_{ак} = 2,5$  мм;  $B - d_{ак} = 2$  мм;  $Г - d_{ак} = 1$  мм

Следует упомянуть ещё об одном важном следствии установленных Таунсендом условий значения самостоятельного разряда, а именно

$$\frac{\alpha}{p} = \varphi_1\left(\frac{E}{p}\right) \text{ и } \gamma_{\text{ион}} = \varphi_2\left(\frac{E}{p}\right), \quad (1.5)$$

что позволяет заключить, что напряжение зажигания в статических условиях для любого газа зависит лишь от величины произведения  $p \cdot d$  (закон Пашена). Это минимальное напряжение зависит также и от материала, из которого изготовлен катод.

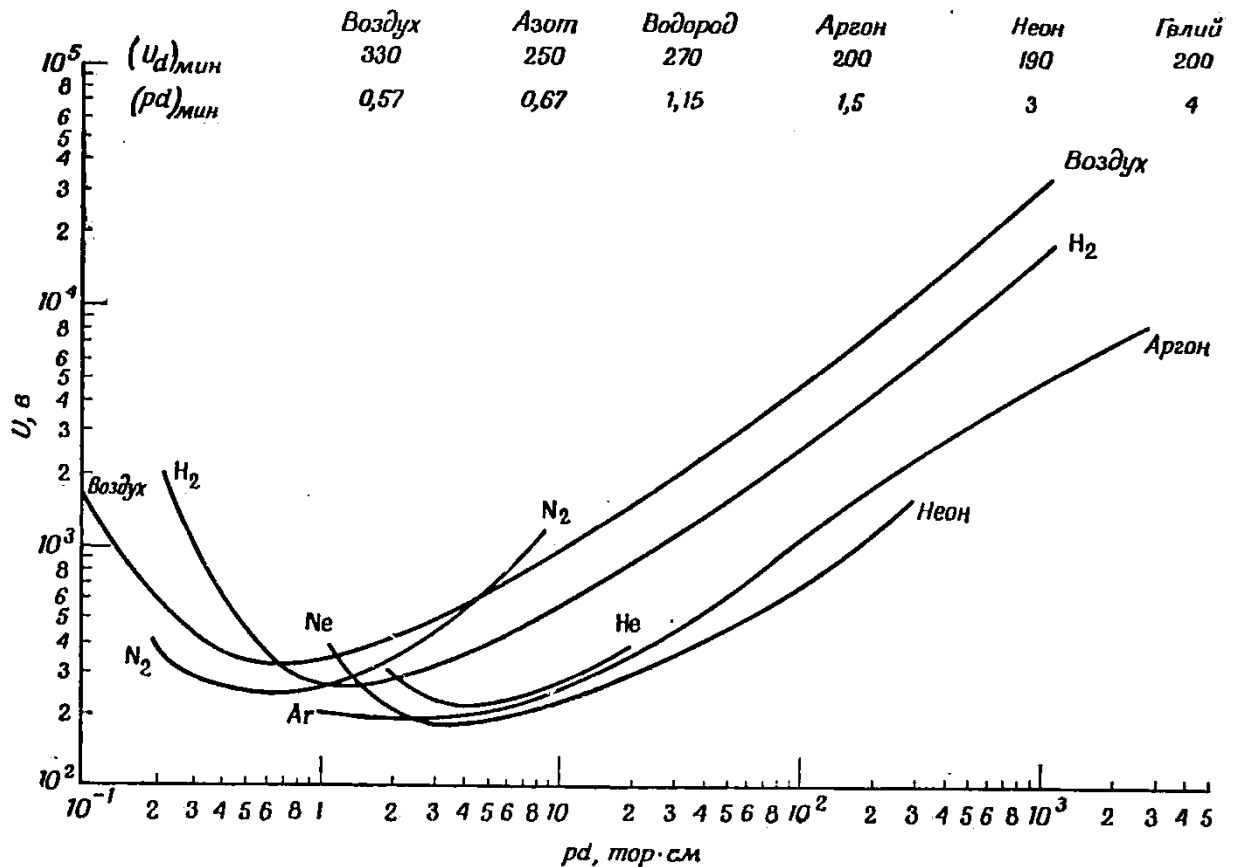


Рисунок 1.5 – Зависимости пробойного напряжения от величины  $p \cdot d$  для различных газов (кривые Пашена).

Результаты многолетних исследований стадии пробоя в плотных газах с помощью скоростных осциллографов и электронно-оптических преобразователей показали, что в развитии канала можно различить отдельные стадии [61-66].

На первой стадии очень узкий в начале канал ( $r = 0,1 \div 0,2$  мм) сильно разогревается и при больших значениях скорости нарастания тока ( $dI/dt$ ) кажется остановившемся. Затем наблюдается расширение светящегося канала и образование ударной волны. На следующей стадии ударная волна отделяется от расширяющегося канала. Ударная волна продолжает двигаться с высокой скоростью, а светящийся канал расширяется с уменьшающейся скоростью и в результате расширения охлаждается. Этот процесс длится до тех пор, пока ударная волна не пройдёт достаточно большое расстояние и вокруг горячего стержня канала не установится равновесие с окружающей атмосферой (изобарическое состояние).

На третьей, наиболее продолжительной стадии горячий стержень канала исчезает и восстанавливается исходное, невозмущённое состояние газа. Температурные характеристики и объём  $V_f$  стержня канала при установлении изобарического состояния являются начальными условиями процесса восстановления исходного состояния. На основании термодинамических соображений были получены соотношения между энергией искрового разряда  $E$  и объёмом стержня канала  $V_f$ . Однако эти соотношения справедливы лишь для малых энергий ( $E < 5$  мДж) и непригодны для больших энергий. Установление точных соотношений такого рода вызывает затруднения, т.к. границы горячего стержня канала точно определить нельзя.

Существенным прогрессом в объяснении процесса расширения канала являлось применение к искровому разряду теории ударных волн. Однако и её выводы не совсем корректно описывают процесс расширения канала искры.

Наиболее точно процесс расширения канала описывается более сложной моделью канала (модель поршня), предложенной в [67-71]. Её выводы наилучшим образом согласуются с экспериментальными данными.

Было установлено, что для начальной фазы развития искрового разряда радиус канала  $r_k \sim t^{1/2}$ . Наиболее точно экспериментально полученные данные описываются соотношением:

$$\frac{r_k(t)}{r_{max}} = \sqrt{1 - (1 + b \cdot t) \cdot e^{-b \cdot t}}. \quad (1.6)$$

Максимальная начальная скорость расширения канала  $dr_k/dt$  составляет около 10-12 км/с (в воздухе при атмосферном давлении).

Процесс протекания тока после пробоя определяется как свойствами самого разряда, так и параметрами разрядного контура. При этом на начальной стадии преобладает влияние свойств разряда, в конце же, на стадии образования дуги на разряд решающим образом влияют характеристики разрядного контура.

Для количественного описания процесса протекания тока в разрядном контуре необходимо знание закона, по которому изменяется сопротивление искрового канала с течением времени. Согласно одному из первых вариантов такого закона является закон Теплера [1, 16, 38, 39]. По этому закону сопротивление искрового канала обратно пропорционально проходящему разряду  $Q = \int_0^t i(t) dt$  и температуре окружающей среды, и прямо пропорционально длине искры. Аналитически закон Теплера записывается в виде

$$K = K_0 \cdot \frac{l}{Q} \cdot \frac{273}{T}, \quad (1.7)$$

где  $K_0$  – коэффициент пропорциональности (постоянная Теплера).

Величина этого коэффициента не зависит от давления и равняется примерно  $(1 \div 2) \cdot 10^{-4}$  Ом·Кл/см.

Закон Теплера справедлив только на начальной стадии развития искрового разряда ( $10^{-8} \div 10^{-7}$  с), пока не начнут играть роль диффузия и рекомбинация молекул газа, а также расширение канала. Окончательное сопротивление при разряде конденсатора в воздухе в случае, если пробойное напряжение определяется электрической прочностью  $E_0 = U/d$  ( $E \approx 30$  кВ/см), в соответствии с законом Теплера получается равным  $R = \frac{K_0}{C \cdot E_0}$ , т.е. при ёмкости 1000 пФ

независимо от длины промежутка величина сопротивления составляет порядка 4 Ом.

Более точное значение для коэффициента  $K_0$  получено в [68, 69] и оно находится в пределах  $(0,3 \div 0,6) \cdot 10^{-7}$  Кл·Ом/см. Несмотря на некоторые отличия в значениях коэффициента  $K_0$ , закон Теплера успешно применяется для определения условий пробоя при кратковременных искровых разрядах.

Более точное количественное описание развития искрового разряда обосновано Ромпе и Вайцелем [44, 72-78]. Выражение для сопротивления искрового канала имеет вид:

$$\frac{R}{d} = \frac{1}{2 \cdot a} \cdot \frac{1}{\sqrt{\int_0^t i^2 dt}}, \quad (1.8)$$

где  $a$  – коэффициент пропорциональности, который не зависит от температуры (для водорода  $a \approx 100 \frac{\text{Атм} \cdot \text{см}^2}{\text{с} \cdot \text{В}^2}$ ).

Этот закон получил экспериментальное подтверждение в широком диапазоне изменений параметров газовой среды и электрофизических параметров разрядного контура.

За первой стадией падения напряжения ( $10^{-8}$  с), которая хорошо описывается законом Ромпе-Вайцеля, следует вторая, определяемая индуктивностью контура и характеризующаяся минимальным сопротивлением искрового разряда  $R_{\min}$  [38, 39, 44, 47, 74, 75].

Осциллографические исследования показали, что на этой стадии напряжение на разрядном промежутке всё ещё существенно выше напряжения дуги [62, 65]. Лишь после окончания этой стадии формируется дуговой разряд.

Энергия, подводимая от внешнего электрического контура, зависит от сопротивления искрового промежутка

$$R = \frac{d}{\pi \cdot r^2 \cdot \sigma} = \frac{d}{\pi \cdot r^2 \cdot N_e \cdot \mu_e \cdot e}, \quad (1.9)$$

где  $\sigma$  – проводимость (определяется только свободными электронами),  $r$  – радиус искрового канала,  $N_e$  – концентрация электронов,  $\mu_e$  – подвижность электронов,  $e$  – заряд электрона.

Проводимость  $\sigma$  зависит от степени ионизации, а подвижность электронов  $\mu_e$  есть функция температуры и давления. Вследствие этого сопротивление в искровом разряде изменяется как в результате увеличения поперечного сечения, так и изменения температуры канала.

При подстановке в выражение (1.9) характерных значений всех параметров, величина омического сопротивления искрового канала будет составлять  $R \approx 1,5$  мОм.

Изучению развития искрового разряда и определению времени, в течение которого искровой промежуток обретает заметную проводимость, посвящено достаточно много работ [1, 16, 44, 47, 51, 57, 62-70]. В этих работах процесс коммутации рассматривался как без учёта влияния внешней электрической цепи, так и с учётом перераспределения напряжений на элементах электрической цепи в результате протекания тока разряда. В результате протекания тока напряжение на межэлектродном промежутке уменьшается. Спад напряжения на промежутке оказывает существенное влияние на развитие ионизационных процессов, которые экспоненциально зависят от напряженности электрического поля. Изменение скорости ионизации сказывается на проводимости канала и величине тока в цепи.

Одним из первых критериев стримерного пробоя газов базируется на рассмотрении процесса формирования стримера. Первоначальная электронная лавина движется в сторону анода со скоростью дрейфа электронов. После достижения «критического» усиления ( $k_{yc} \geq 10^8$ ) электронная лавина трансформируется в стример, который распространяется в межэлектродном промежутке со скоростью, которая на два порядка превышает скорость дрейфа электронов. В этих условиях время перекрытия промежутка и формирования слабопроводящего канала определяется, фактически, временем дрейфа электронной лавины до момента достижения «критического» усиления. Аналитически значение времени перекрытия промежутка (время развития искрового разряда (время коммутации)) определяется выражением вида [1, 16, 47, 51, 57-59]:

$$t_{\text{разв}}^{(1)} = \frac{\ln 10^8}{\alpha \cdot v_{\text{др}}}, \quad (1.10)$$

где  $\alpha$  – коэффициент ударной ионизации;  $v_{\text{др}}$  – скорость дрейфа электронов при заданном значении промежутка ( $E/p$ ).

Согласно выражения (1.10) время развития искрового разряда не зависит от величины межэлектродного промежутка. Применительно к промежутку в несколько миллиметров характерные времена развития искровых каналов в зависимости от ( $E/p$ ) находятся в пределах от десятков наносекунд до единиц наносекунд [1, 8, 44, 47, 57]. Эти данные получены для давления в одну атмосферу.

Обращает на себя внимание следующий факт – все приведённые в литературе данные о временах развития искровых каналов получены применительно к «импульсному» пробоя, когда прикладываемое к разрядному промежутку импульсное напряжение по амплитуде превышает напряжение статического пробоя. Разрядники-обострители, как известно, работают именно в режиме статического пробоя.

В [45] приведены графические зависимости времён развития искрового разряда в соответствии с формулой (1.10) от величины приведённой напряжённости электрического поля ( $E/p$ ) для нескольких газов, находящихся при атмосферном давлении. Увеличение параметра ( $E/p$ ) на порядок (с  $10^2$  до  $10^3$  В/см·Торр) приводит к сокращению времени развития разряда на 2 ÷ 4 порядка. Экстраполяция кривых в область ( $E/p$ ) = 10 ÷ 15 В/см·Торр, характерных для статического пробоя, даёт значения для времён развития разряда  $10^{-5}$  ÷  $10^{-3}$  с.

Для искрового разряда в воздухе при напряжённости электрического поля  $E = 50$  кВ/см время развития искрового разряда составляет порядка  $10^{-8}$  с, а для напряжённости электрического поля  $E = 80$  кВ/см время развития  $2 \cdot 10^{-9}$  с [47].

Полученное в [16, 45, 74] аналитическое выражение устанавливает связь времени развития искрового канала с давлением рабочего газа, током в цепи и напряжённостью электрического поля:

$$t_{\text{разв}}^{(2)} = 9 \cdot 10^{-9} \cdot \sqrt[3]{\frac{I_0 \cdot p}{E_0}}, \quad (1.11)$$

где  $p$  – давление газа, Атм;  $E_0$  – напряжённость электрического поля, при которой происходит пробой;  $I_0 = \frac{U_0}{R_H}$  – ток в нагрузке  $R_H$ .

Из этого выражения следует, что при коммутации больших токов невозможно добиться минимальных значений времён коммутации. Имеет место слабая зависимость от давления. Наиболее заметным является влияние напряжённости электрического поля. Оценки времён коммутации, проведённые по формуле (1.11), для давления в 1 атмосферу и токов  $I_0 = 10^2 \div 10^3$  А дают значения менее 1 нс.

В [16, 74] получено аналитическое выражение для времени коммутации с учётом спада напряжения на промежутке в процессе развития разряда с уровня  $0,9 \cdot U_0$  до уровня  $0,1 \cdot U_0$ :

$$t_{\text{разв}}^{(3)} = 2 \cdot p \cdot d^2 \cdot \frac{1}{a \cdot U_0^2}, \quad (1.12)$$

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

Коэффициент « $a$ » определяется родом газа и известен только для воздуха, азота и аргона. Коэффициент « $a$ » для этих газов имеет следующие значения: 0,8, 0,6 и 27, соответственно [16, 74].

Оценки времени развития по выражению (1.12) для водорода при давлении в 1 атмосферу дают для времени коммутации значения в пределах единиц и десятков наносекунд.

Все рассмотренные ранее выражения для определения времён коммутации не учитывают влияния индуктивности разрядного контура. Минимальные значения индуктивности – это конструктивная индуктивность разрядного контура и конструктивные индуктивности всех элементов цепи. Учёт этого параметра даёт следующее выражение для времени развития искрового канала [38]:

$$t_{\text{разв}}^{(4)} = 21 \cdot \frac{p \cdot d^2}{a \cdot U_0^2} + 2,2 \cdot \frac{L}{R_H}, \quad (1.13)$$

где  $L$  – индуктивность разрядного контура;  $R_H$  – сопротивление нагрузки.

Параметры  $p$ ,  $d$  и  $a$  имеют тот же самый смысл и численные значения, что и в выражении (1.12). Для типичных значений индуктивности разрядного контура  $L = 100$  нГн и нагрузок  $R_n = 10^2 \div 10^4$  Ом второе слагаемое в выражении (1.13) имеет значения от единиц до десятых долей наносекунды.

Очень большое число экспериментальных данных, полученных различными авторами, достаточно корректно аппроксимируются выражением вида [45]:

$$p \cdot t_{\text{разв}} = F\left(\frac{E}{p}\right), \quad (1.14)$$

где  $p$  – давление, Атм;  $F\left(\frac{E}{p}\right)$  – функция, определяемая экспериментальным путём для индивидуальных газов.

В [45, 46] представлены графические зависимости выражения (1.14) для многих газов при давлении в одну атмосферу в широком диапазоне изменений параметра  $(E/p)$ . Все представленные зависимости получены в условиях «импульсного» пробоя, т.е. пробоя при напряжениях, превышающих напряжения статического пробоя. Поэтому информацию о характерных временах развития разряда в условиях статического пробоя качественно можно получить только в результате экстраполяции известных зависимостей в область параметра  $(E/p)$ , характерного именно для статического пробоя, а именно – в область  $(E/p) \approx 10 \div 12$  В/см·Торр.

Такая экстраполяция для воздуха даёт для времени развития искрового канала значения на уровне в несколько наносекунд.

В [1, 47] была установлена роль начальной концентрации электронов в газоразрядном промежутке на время коммутации. Развивающийся лавинный разряд обеспечивает в несколько раз меньшие значения времени развития разряда, чем в случае одноэлектронного инициирования.

Так, например, для напряжённости электрического поля  $E = 60$  кВ/см, времена развития разряда при многоэлектронном и одноэлектронном инициировании составляют, соответственно, 40 и 120 нс. При увеличении напряжённости электрического поля до 100 кВ/см, времена развития сокращаются до значений в 1 и 40 нс.



Из рассмотренных работ по изучению закономерностей развития искровых разрядов можно сделать следующие краткие выводы. Изучение искровых разрядов как коммутирующей среды проводилось преимущественно при давлении рабочих газов в одну атмосферу. Все результаты измерений времён развития искрового разряда получены в условиях «импульсного» пробоя, когда амплитуда напряжения на межэлектродном промежутке превышает напряжение статического пробоя. Информация об исследованиях коммутационных характеристик искровых разрядов при давлениях свыше 10 атмосфер отсутствует.

Минимальные значения времён развития разряда, которые достигнуты в сильноперенапряжённых промежутках миллиметровой длины и давлении в одну атмосферу, достигают десятых долей наносекунды.

Установлена общая тенденция к сокращению времени развития канала с увеличением давления рабочего газа.

Заметное влияние на время развития искрового разряда оказывает уровень начальной ионизации газов в промежутке. Многоэлектронное инициирование искрового разряда способствует заметному (по сравнению с одноэлектронным инициированием) сокращению времени коммутации.

Обращает на себя внимание полное отсутствие информации по изучению свойств искровых разрядов и их коммутационных характеристик в области давлений  $20 \div 140$  атмосфер в условиях статического пробоя, который реализуется в искровых разрядниках-обострителях.

### **1.5 Искровые разрядники и разрядники-обострители**

Искровые разрядники представляют собой самостоятельный класс газоразрядных приборов. Это безнакальные двух - или трёхэлектродные приборы, способные под воздействием приложенного напряжения резко изменять свою проводимость и пропускать большие токи. По сравнению с другими приборами аналогичного назначения (импульсными тиратронами, тиристорами и тригатронами) они имеют ряд преимуществ:

- отсутствие накала;
- практически мгновенная готовность к работе;
- высокий КПД при больших уровнях коммутируемых энергий;
- высокие рабочие напряжения и токи коммутации при минимальных габаритных размерах и массе прибора;
- способность работать в широком интервале изменения температуры окружающей среды;
- устойчивость к значительным токовым перегрузкам;
- простота конструкции и технологии производства.

Однако несмотря на эти преимущества широкое использование искровых разрядников ограничивалось нестабильностью электрических параметров, низкой долговечностью и надежностью. Например, разброс напряжения пробоя первых типов неуправляемых разрядников достигал 50% от номинального значения. Первыми управляемыми разрядниками были разрядники тригatronного типа. Они выпускались в небольших количествах, работали в узкой области напряжений и имели большую нестабильность зажигания во времени.

За последние годы благодаря достигнутым успехам в области физики газового разряда, усовершенствования конструкции и использования новых материалов созданы долговечные и надежные искровые разрядники, отвечающие современным требованиям. Стабильность напряжения пробоя современных разрядников, используемых в качестве коммутирующих элементов, достигает 5%. Значительно расширен диапазон рабочих напряжений управляемых разрядников, а стабильность их срабатывания во времени доведена до сотен наносекунд.

Благодаря улучшению параметров искровых разрядников область их применения в последнее время значительно расширилась. В настоящее время искровые разрядники применяются:

- для ограничения перенапряжений в электротехнических установках и электрических сетях;
- для коммутации цепей при автоматизации технологических процессов;
- для зажигания газотурбинных двигателей;

- в импульсной рентгеновской технике для генерации рентгеновского излучения высоковольтными импульсами, подаваемыми на рентгеновские трубки;

- в ядерной и экспериментальной физике в качестве коммутаторов в силовых цепях возбуждения плазмы и т. д.

Искровые разрядники являются необходимыми элементами радиотехнических устройств. Надёжная работа искровых разрядников зависит не только от качества самих приборов, но также и от условий их эксплуатации.

Искровые разрядники, как правило, работают в двух режимах: в режиме одиночных включений, когда частота коммутации значительно меньше одного импульса в секунду (защитные разрядники), и в режиме периодических включений, когда частота коммутации более одного импульса в секунду (коммутационные разрядники).

Защитные разрядники обычно подключаются параллельно тем элементам (или цепям), на которых могут возникать перенапряжения, приводящие к выходу их из строя. В качестве защитных разрядников могут быть использованы как неуправляемые (двухэлектродные), так и управляемые (трёхэлектродные) разрядники. Защитные разрядники, как было указано выше, работают в режиме ожидания, т. е. на электроды разрядников подано напряжение меньше потенциала зажигания. При возникновении различных перенапряжений в цепи или пробоя в элементе на электроде неуправляемого разрядника возникает напряжение, которое превышает напряжение зажигания, и разрядник пробивается. В момент пробоя сопротивление разрядного промежутка изменяется до десятых и сотых долей ома; при этом элемент (или цепь), к которому подключен разрядник, шунтируется его малым внутренним сопротивлением и тем самым предохраняется от повреждения.

При использовании в качестве защитного элемента управляемого разрядника на его поджигающий электрод подается опорное напряжение (полученное за счет деления рабочего напряжения с помощью делителя), которое меньше напряжения управляющего импульса. При пробое в элементе на

поджигающий электрод подается импульс управляющего напряжения, по величине превосходящий (в сумме с опорным напряжением) напряжение зажигания между поджигающим электродом и катодом. Зажигание вспомогательного разряда приводит к пробое основному промежутку (между анодом и катодом) и шунтированию элемента внутренним сопротивлением разрядника.

Коммутационные разрядники находят широкое применение в различных схемах релаксационных генераторов и служат ключом при разряде емкости на нагрузку. В качестве коммутационных разрядников могут быть использованы как управляемые, так и неуправляемые разрядники.

Одним из способов получения высоковольтных коротких импульсов является использование трансформирования напряжения в системе двух связанных  $LC$ -контуров с применением разрядников-обострителей. Этот способ в отличие от других дает возможность создавать малогабаритные компактные устройства. Последнее немаловажно, если учесть, что при формировании импульса в несколько единиц микросекунд амплитудой  $100 \div 250$  кВ существенную роль играют собственные индуктивность и емкость генератора, находящиеся в прямой зависимости от габаритных размеров устройства и компоновки его элементов. На основе разрядников-обострителей разработаны импульсные рентгеновские аппараты, которые широко используются в качестве переносных установок для рентгенодефектоскопии сварных деталей и конструкций в труднодоступных местах и в полевых условиях.

На рисунке 1.6 представлена электрическая схема возбуждения наносекундного источника рентгеновского излучения. В её состав входят: первичная накопительная ёмкость  $C_1$  (от 0,5 до 2 мкФ), коммутирующий разрядник  $K$  (от 7 до 16 кВ), импульсный трансформатор  $T$  (коэффициент трансформации от 20 до 40), конструктивная ёмкость вторичного контура  $C_2$ , разрядник-обостритель  $PO$  (напряжение пробоя от 80 до 400 кВ), индуктивный дроссель  $L$  и импульсную рентгеновскую трубку  $Tr$ . На основе этой схемы реализованы все отечественные импульсные рентгеновские дефектоскопы.

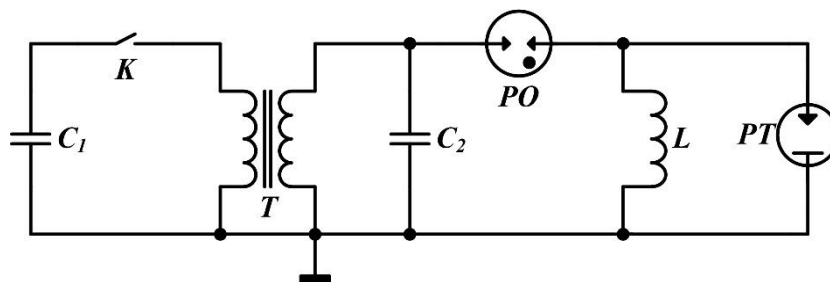


Рисунок 1.6 – Электрическая схема наносекундного источника рентгеновского излучения

При замыкании ключа  $K$  предварительно заряженный накопительный конденсатор  $C_1$  разряжается через первичную обмотку импульсного резонансного трансформатора  $T$ . При этом во вторичной его обмотке возникает импульс высокого напряжения в виде затухающей синусоиды. Время нарастания напряжения первой полуволны затухающей синусоиды составляет несколько микросекунд и определяется параметрами импульсного трансформатора и емкостью  $C_2$ , являющейся суммарной емкостью вторичного контура, включающей в себя конструктивную емкость излучателя, межэлектродную ёмкость разрядника и межвитковую емкость трансформатора. При зарядке ёмкости  $C_2$  до напряжения пробоя разрядника-обострителя  $PO$  происходит его пробой и к электродной системе трубки  $PT$  прикладывается высоковольтный импульс напряжения с передним фронтом в несколько наносекунд, определяемым временем коммутации разрядника-обострителя. Вакуумный пробой межэлектродного промежутка в импульсной рентгеновской трубке в этих условиях происходит при максимальном напряжении, что обеспечивает формирование высокоэнергетичных электронов, с последующей генерацией жёсткого рентгеновского излучения. Таким образом, назначение разрядника-обострителя заключается в преобразовании высоковольтного импульса напряжения микросекундной длительности в импульс наносекундной или субнаносекундной длительности. От режима его работы зависят выходные параметры излучателя и его ресурс.

## 1.6 Конструктивные особенности разрядников-обострителей

При создании разрядников-обострителей главной задачей является получение малого времени коммутации. Известно, что при формировании наносекундного импульса на длительность его фронта заметное влияние оказывают многие параметры, характеризующие разрядник (геометрия междуэлектродного промежутка, род наполняющего газа и его давление), а также параметры разрядного контура.

Из формулы (1.12) следует, что для уменьшения длительности переднего фронта импульса напряжения необходимо уменьшать междуэлектродное расстояние и увеличивать давление наполняющего газа. Уменьшить время развития разряда можно также, подбирая наполняющий газ с большим параметром  $a$ . Использование аргона в качестве наполняющего газа позволяет достигать времён коммутации в доли наносекунды при избыточном давлении газа в приборе в несколько атмосфер. Однако предельная частота следования импульсов не превышает нескольких герц [38].

Этому явлению можно дать следующее объяснение. Известно, что у аргона большинство атомов газа находится в метастабильном состоянии, а период жизни возбужденного состояния, т.е. время нахождения электрона на возбужденной орбите, составляет  $10^{-2}$  с (для большинства газов оно равно  $10^7$ - $10^8$  с). Поэтому в стадии спада напряжения на разрядном промежутке или в стадии его возрастания в аргоне будет намного больше возбужденных атомов, чем в азоте или других газах и, следовательно, процесс образования подводящей плазмы в аргоне будет происходить быстрее, а процесс восстановления электрической прочности, наоборот, медленнее.

Как следует из выражения (1.12), к сокращению времени коммутации приводит уменьшение межэлектродного промежутка. Однако уменьшение расстояния между электродами ограничено сложностью выдерживания

минимальных допусков и необходимостью существенного повышения давления газа для обеспечения необходимой электропрочности  $150 \div 250$  кВ.

Таким образом, при конструировании разрядников с малым временем коммутации выбор оптимального давления является определяющим. Большие значения давлений предъявляют жёсткие требования к механической прочности, как отдельных узлов, так и конструкции разрядника-обострителя в целом.

Серийно выпускаемые разрядники-обострители имеют сходную конструкцию (рисунок 1.7) [79-81].

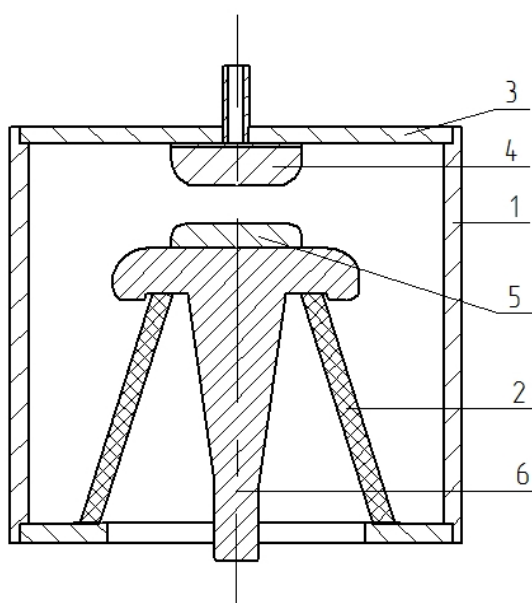


Рисунок 1.7 – Типичная конструкция разрядника-обострителя

**Катодный узел.** Избыточное давление рабочего газа (водорода) в  $40 \div 50$  Атм заставляет корпус разрядника-обострителя испытывать значительные механические нагрузки. Выбор материала изолятора, являющегося основной частью внутренней оболочки прибора, и способ его крепления имеют весьма важное значение. В качестве материала изолятора применяют алюмооксидную керамику марки 22ХС (ВК-94) или подобные аналоги. Она обладает высокими механическими, электрическими и тепловыми свойствами, чрезвычайно низкая пористость обеспечивает её газонепроницаемость.

Форма изолятора (2) имеет вид усеченного конуса, большее основание которого опирается на отбортовку корпуса, причем выпуклая сторона у изолятора направлена внутрь прибора. Такое расположение керамики позволяет использовать ее в условиях, при которых после наполнения прибора до рабочего давления, она испытывает преимущественно усилие на сжатие. Как известно, керамика, находящаяся под действием сжимающих сил, выдерживает в  $10 \div 15$  раз большую нагрузку, чем при растяжении.

Изолятор соединяется с корпусом с помощью охватывающего спая; пайка производится припоем марки ПСр-72В. Утолщение в нижней части корпуса служит для упора керамики; одновременно оно сглаживает острые кромки и тем самым уменьшает напряженность электрического поля в этих местах.

Катод (5), изготовленный из сплава ВНЖ-7-3, припаивается к верхнему основанию керамического изолятора припоем ПСр-72В через вывод (6). Анодный вывод выполняет двойную роль: во-первых, является прокладкой, снижающей благодаря пластичности выбранного материала нежелательные механические напряжения, которые возникают в процессе пайки вследствие разницы коэффициентов температурного расширения керамики и сплава ВНЖ-7-3; во-вторых, с его помощью прибор подсоединяется к разрядному контуру.

Такая конструкция катодного узла позволила создать металлокерамическую паяную оболочку разрядника-обострителя, способную выдерживать без разрушения сверхвысокие давления до 80 Атм.

**Анодный узел.** Основой узла является анодная крышка (3), сквозь центральное отверстие которой проходит вывод. С внутренней стороны крышки припаивается анод из материала ВНЖ-7-3. Вывод анодного узла для удобства крепления разрядника также имеет резьбу.

## **1.7 Параметры промышленно выпускаемых разрядников-обострителей**

Основными параметрами промышленно выпускаемых разрядников-обострителей являются: напряжение пробоя, относительный среднеквадратичный



разброс величины напряжения пробоя, время коммутации, коммутируемая энергия, частота следования импульсов и ресурс.

Из теории газового разряда известно, что пробой межэлектродного промежутка подчиняется закону Пашена. Согласно этому закону напряжение пробоя зависит от произведения давления наполняющего газа на величину расстояния между электродами, т.е.  $U_{np} = f(p \cdot d)$ . Кривые Пашена имеют две ветви – правую и левую. Левая ветвь относится к области низких давлений, правая – к области высоких. Искровые разрядники-обострители наполняются газом до высоких давлений, поэтому величины напряжений пробоя разрядников соответствуют правой ветви кривой Пашена. Напряжение пробоя межэлектродного промежутка, соответствующее кривой Пашена, называется статическим напряжением пробоя. Статическое напряжение пробоя определяют, как среднее арифметическое результатов нескольких измерений. Число измерений, интервалы времени между отдельными измерениями и наибольшую скорость повышения напряжения на электродах разрядника указывают в стандартах или ТУ на разрядники конкретных типов. Для разрядников-обострителей характерны величины напряжения пробоя от десятков до сотен киловольт.

Динамическое напряжение пробоя определяют: в режиме одиночных импульсов (с частотой менее 1 Гц) – как среднее арифметическое результатов нескольких измерений или в режиме непрерывно следующих импульсов или в режиме релаксации, как разброс единичных значений напряжения пробоя.

$$U_{\text{пб.дин}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n U_{\text{пб.}i}, \quad (1.15)$$

где  $U_{\text{пб.}i}$  – напряжение единичного пробоя,  $n$  – число измерений.

Относительный среднеквадратичный разброс величины напряжения пробоя ( $\delta U_{\text{пб}}$ ) важный показатель стабильности работы разрядников-обострителей. Относительный среднеквадратичный разброс напряжения пробоя измеряется в процентах и определяется в соответствии с [82] по формуле:

$$\delta U_{\text{пб}} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (U_{\text{пб.дин}} - U_{\text{пб.}i})^2}{n-1}}}{U_{\text{пб.дин}}} \cdot 100\%. \quad (1.16)$$

Соответственно, чем меньше величина относительного среднеквадратичного разброса напряжения пробоя, тем выше повторяемость величины напряжения пробоя с каждым срабатыванием разрядника и, как результат, меньший разброс напряжения пробоя.

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 род газа, его давление и величина межэлектродного промежутка.

В промышленно выпускаемых металлокерамических отпаянных разрядниках-обострителях время коммутации  $\tau = 1 \div 5$  нс обеспечивается наполнением внутреннего объема прибора водородом, азотом или смесью  $SF_6+N_2$  до давления в 50 атмосфер [13, 38, 40].

Для промышленно выпускаемых разрядников-обострителей коммутируемая энергия находится в пределах  $0,5 \div 10$  Дж в заданном эксплуатационном режиме.

Частота следования импульсов в разрядниках-обострителях определяется скоростью восстановления газовой среды после пробоя. Обычно этот показатель для промышленно выпускаемых разрядников с водородным наполнением составляет величину от 20 до 50 Гц.

Ресурс или гарантированная наработка разрядников определяется главным образом распылением материала электродов и, как следствие, деградацией изоляционных свойств изолятора из-за осаждения продуктов эрозии электродов на его внутреннюю поверхность, что со временем приводит к стеканию разряда по поверхности изолятора, вместо пробоя между электродами. Ресурс выпускаемых разрядников-обострителей определяется требованиями к электрическим параметрам данных приборов и в зависимости от производителя имеет величину от  $10^6$  до  $10^7$  срабатываний.

## 1.8 Современное состояние исследований, разработок и промышленного выпуска разрядников-обострителей

В таблице 1.1 приведены основные технические характеристики отечественных серийно-выпускаемых разрядников-обострителей [12, 13, 38, 40].

Таблица 1.1 – Параметры отечественных серийно-выпускаемых разрядников-обострителей

Параметры	Тип разрядника							
	P-43	P-48	P-49	РИМ200-50	PO-43	PO-48	PO-49	PO-89
Импульсное напряжение пробоя, кВ	140-170	90-110	220-260	200-240	140-190	100-140	180-250	200-300
Время нарастания напряжения на разряднике, мкс	0.5-2	0.5-2	0.5-2	нет данных	1-2	1-2	1-2	нет данных
Относительный среднеквадратичный разброс напряжения пробоя, %	≤5	≤5	≤5	нет данных	<3	<3	<3	нет данных
Время коммутации, нс	≤3	≤3	≤3	<0.5	≤1	≤1	≤1	≤2
Коммутируемая энергия, Дж	2	2	2	1	2	0.5	6	2-6
Частота следования импульсов, Гц	50	50	25	20 (4 Дж) 1000 (0.5 Дж)	50	100	25	до 50
Гарантированная долговечность, импульсов	10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup>	>10 <sup>6</sup>	>3·10 <sup>6</sup>	>3·10 <sup>6</sup>	>3·10 <sup>6</sup>	нет данных
Масса, г	160	100	350	нет данных	400	200	650	600

Начиная с 1972 года в НИИ ГРП г. Рязань проводятся научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по разработке и созданию разрядников-обострителей в широком диапазоне динамического напряжения пробоя. На их основе был освоен промышленный выпуск первых в стране разрядников-обострителей P-48, P-43 и P-49. Внешний вид и сборочный эскиз разрядников-обострителей P-48 представлен на рисунке 1.8.

Разрядники обладали следующими характеристиками: импульсное напряжение пробоя для разрядника Р-48 составляло  $90 \div 110$  кВ, для Р-43 –  $140 \div 170$  кВ, для Р-49 –  $220 \div 260$  кВ. Относительный среднеквадратичный разброс напряжения пробоя для всех трёх типов не превышал 5%, время коммутации составляло не более 3 нс, коммутируемая энергия не превышала 2 Дж, а гарантированная долговечность была порядка  $10^6$  пробоев.

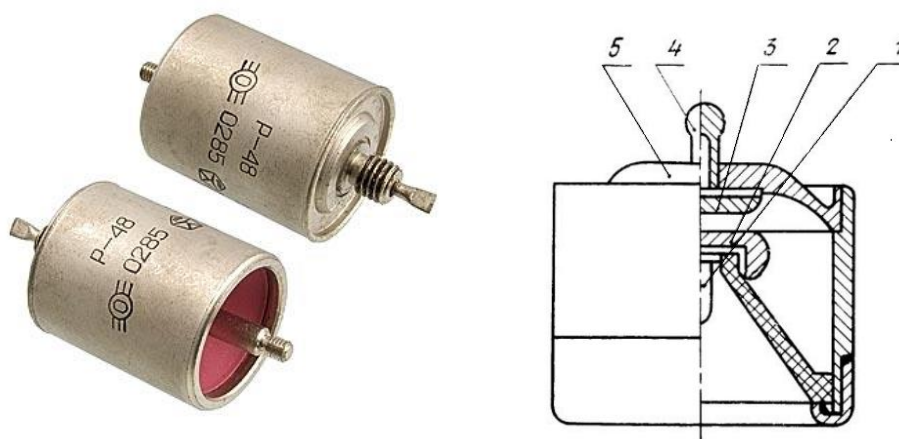


Рисунок 1.8 – Внешний вид и сборочный эскиз разрядника серии Р-48  
(1 – высоковольтный вывод катода, 2 – катод, 3 – анод, 4 – штенгель, 5 – крышка)

На основе данных разрядников-обострителей были разработаны первые импульсные рентгеновские аппараты «Квант», «РИНА-1Д», «РИНА-2Д», которые широко использовались в качестве переносных установок для рентгенодефектоскопии сварных швов и металлоконструкций в труднодоступных местах и полевых условиях. Выпуск данных разрядников был прекращён в 1990-х годах.

Для уменьшения разброса пробивных напряжений и увеличения ресурса работы разрядников-обострителей в РФЯЦ-ВНИИЭФ (г. Саров) была проведена их модернизация, заключающаяся в очистке поверхности изолятора от загрязнений с помощью химического травления и замене рабочего газа азота на водород. Это позволило избавиться от загрязнения изолятора нитридами вольфрама, образующимися в искровом разряде при оплавлении электродов, и повысить ресурс работы. Нанесение на рабочую часть поверхности катодного

электрода кольцевых, concentрически расположенных неглубоких канавок и образование при этом кольцевых выступов позволило увеличить автоэмиссию электронов, которые в предпробойной фазе дают начало электронным лавинам, стабилизирующим разряд. Такая частичная модернизация позволила несколько улучшить характеристики промышленных разрядников, однако несовершенство конструкции металлокерамического узла разрядников Р-48 и Р-49 (тонкий высоковольтный вывод, соединение изолятора с боковой стенкой корпуса) не обеспечивало равномерности распределения электрического поля вдоль поверхности изолятора. Это ограничивало его электрическую прочность. Кроме того, полусферическая форма электродов не позволяла существенно повысить стабильность пробивных напряжений разрядников.

В этой связи были разработаны более совершенные разрядники РИМ 100/35 и РИМ 200/50 (рисунок 1.9).

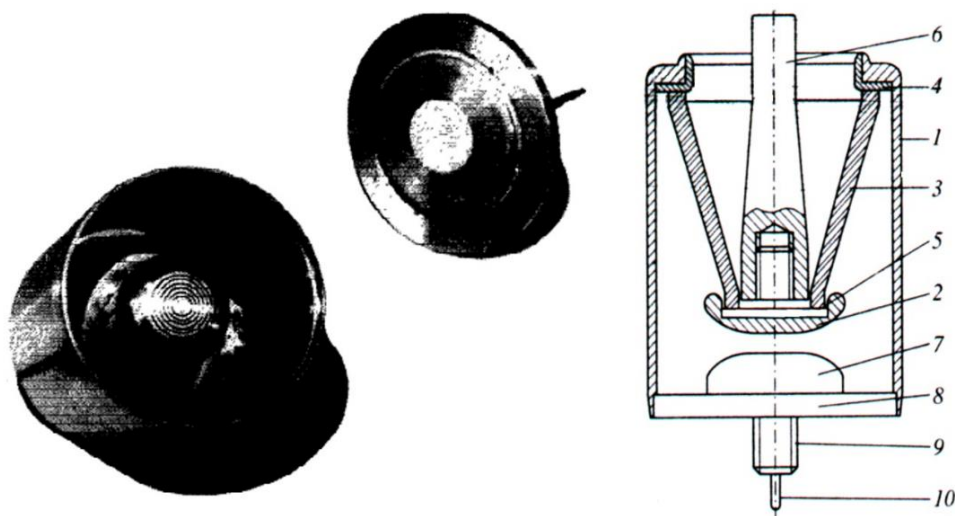


Рисунок 1.9 – Внешний вид и конструкция разрядника-обострителя РИМ200-50

(1-корпус; 2-электрод; 3- изолятор; 4 – манжета; 5 – переходник;  
6 – высоковольтный вывод; 7 – электрод; 8 – крышка; 9 – штуцер; 10 – штенгель)

Разрядник РИМ 200/50 имел электроды, выполненные по профилю Брюса, что при наличии стабилизирующих канавок на катоде существенно уменьшало разброс пробивных напряжений. При межэлектродном зазоре  $3,5 \div 4$  мм и

давлении водорода  $35 \div 40$  атмосфер разрядник РИМ 200/50 обеспечивал следующие характеристики: пробивное напряжение - 220 кВ; коммутируемый ток - 2 кА; коммутируемая энергия - 1 Дж; ресурс работы - более  $10^6$  срабатываний; время коммутации - не более 0,5 нс [20].

С использованием разрядников-обострителей РИМ 100/35 и РИМ 200/50 были разработаны переносные импульсные рентгеновские аппараты «Аргумент» [80] и «Шмель» [81].

Проведенные исследования позволили сократить массогабаритные параметры рентгеновских аппаратов на 20-25 % и увеличить ресурс работы более чем в 10 раз по сравнению с аналогами [81].

В настоящее время ООО «Импульсные технологии» г. Рязань [12] занимается разработкой и производством высокотехнологичных изделий для ускорительной техники, электрофизической аппаратуры, новейшего технологического оборудования для различных отраслей науки и техники, в числе которых: сильноточные высоковольтные коммутаторы энергии (импульсные водородные тиратроны, искровые разрядники, псевдоискровые коммутаторы), компактные металлокерамические рентгеновские трубки постоянного и импульсного тока, генераторы импульсных напряжений и токов различного назначения. На рисунке 1.10 представлен разрядник-обостритель РО89.

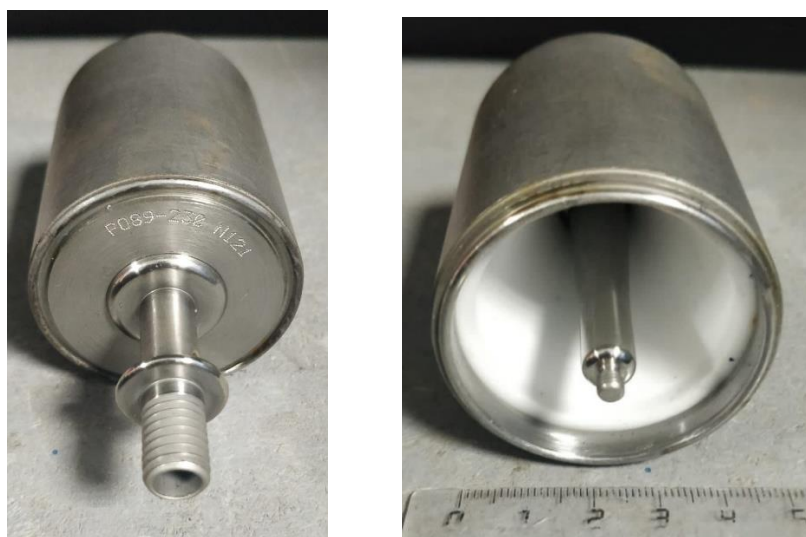


Рисунок 1.10 – Внешний вид разрядника-обострителя РО-89

Предприятием разработаны разрядники-обострители серии РО89 и РО90 с напряжением срабатывания от 100 до 300 кВ, временем коммутации - менее 2 нс, максимальным током в импульсе до 1 кА и коммутируемым зарядом в импульсе 0,1 Кл для разрядника РО89 и 0,01 Кл для разрядника РО90.

Самым крупным производителем разрядников-обострителей в настоящее время является АО «Научно-исследовательский институт газоразрядных приборов «ПЛАЗМА» [13]. Номенклатура серийно выпускаемых разрядников-обострителей содержит три типа приборов: РО-48, РО-43 и РО-49 (рисунок 1.11).



Рисунок 1.11 – Внешний вид разрядников–обострителей РО-48, РО-43, РО-49

Основные электрические параметры разрядников-обострителей представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Электрические параметры разрядников-обострителей серии РО

Тип разрядника	Напряжение пробоя, кВ	Относит. среднеквадр. разброс напряжения пробоя, %, не более	Коммутируемая энергия, Дж	Ток анода в импульсе, кА	Минимальная наработка, имп, не менее
РО-48	100 – 140	3	0.5	0,4	$3 \times 10^6$
РО-43	140 – 190	3	2	1	$3 \times 10^6$
РО-49	180 – 250	3	6	1	$3 \times 10^6$

Габаритные размеры разрядников составляют: РО-43 –  $\text{Ø}50 \times 85$  мм; РО-48 –  $\text{Ø}40 \times 69$  мм; РО-49 –  $\text{Ø}70,2 \times 95$  мм. Масса приборов: РО-43 – 400 г, РО-48 – 200 г и РО-49 – 650 г. Время коммутации – не более 2 нс.

Разрядники-обострители РО-48, РО-43 и РО-49 применяются при изготовлении импульсных рентгеновских дефектоскопов Арина-3, Арина-7, Арина-9, Памир-200, Памир-250 и Памир-300 производства ООО «Спектрофлэш» г. С.-Петербург [14]; Пион-2М и Пион-2ММ производства ООО «Эридан-сервис» г. Уфа [15]; ИРА-220 и ИРА-320 производства ООО «Русимпульс» г. Пермь.

Для решения прикладных задач в области изучения газового разряда сотрудниками ИСЭ СО РАН г. Томск и ИЭФ УрО РАН г. Екатеринбург изготавливались разрядники-обострители разборной конструкции на напряжения пробоя до 400 кВ, но в серийном производстве данные разрядники освоены не были.

Как следует из литературных данных, в настоящее время отечественной промышленностью освоен выпуск малогабаритных отпаянных разрядников-обострителей на рабочие напряжения от 90 кВ до 300 кВ с характерными временами срабатывания  $\tau \leq 3$  нс при коммутируемой энергии до 6 Дж на частотах повторения импульсов до 50 Гц, относительным среднеквадратичным разбросом напряжения пробоя не более 5% и ресурсом не менее  $10^6$  срабатываний.

В промышленно выпускаемых металлокерамических отпаянных разрядниках-обострителях время коммутации  $\tau \leq 3$  нс обеспечивается за счёт наполнения внутреннего объёма прибора такими рабочими газами, как водород  $\text{H}_2$ , азот  $\text{N}_2$ , элегазом  $\text{SF}_6$  или смесью элегаза и азота  $\text{SF}_6 + \text{N}_2$  до давлений в 50 атмосфер.

На момент изучения состояния исследований, разработок и промышленного выпуска разрядников-обострителей техническая информация о зарубежных образцах промышленно выпускаемых разрядников-обострителей в открытой печати отсутствовала.



## 1.9 Выводы к главе 1 и постановка задачи

Постоянное развитие рентгеновской техники, линейных ускорителей электронов, газоразрядных лазеров сверхатмосферного давления, мощных источников СВЧ-излучения, генераторов электромагнитных импульсов и целого ряда других направлений, нуждается в дальнейшем совершенствовании разрядников-обострителей, обладающих более высокими значениями напряжения пробоя амплитудой до 400-500 кВ и субнаносекундными временами срабатывания при условии сохранения малогабаритности изделия.

Для увеличения рабочего напряжения и сокращения времени коммутации давление рабочего газа необходимо значительно увеличивать. Как показала практика, наилучшие коммутационные параметры достигаются при использовании в качестве рабочего газа - водорода особой чистоты. Для достижения напряжения пробоя межэлектродного промежутка до 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 разрядника, способной выдерживать избыточное давление наполняющего газа до 120 атмосфер, так и варианты конструкции керамического изолятора, исключающего пробой по внутренней поверхности изолятора при напряжениях до 400 кВ. Последнее затрудняет возможность прогнозирования основных параметров, в том числе и ресурса, и создания новых, более совершенных и быстродействующих вариантов разрядников-обострителей на напряжения до 400 кВ.

Отсутствие необходимых соотношений для инженерного расчёта металлокерамических конструкций разрядников-обострителей, способных выдерживать давления рабочих газов до 100 атмосфер и более, а также для обеспечения высокой электрической прочности при создании малогабаритных

отпаянных разрядников-обострителей вынуждает к проведению соответствующих комплексных исследований спектра данных вопросов.

Наряду с разработкой конструкции разрядников-обострителей на напряжения до 400 кВ появляется необходимость в детальной проработке технологии изготовления разрядников-обострителей, в особенности способов качественной пайки герметичных металлокерамических узлов.

Кроме этого в технической литературе отсутствует информация о временах коммутации искровых разрядов при давлениях рабочих газов свыше 10 атмосфер в условиях статического пробоя. Нет понимания самого механизма быстрой коммутации (доли наносекунды) при минимальных значениях параметра  $E/p$ .

Целью данной диссертационной работы является 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.

## ГЛАВА 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ КОНСТРУКЦИИ РАЗРЯДНИКА-ОБОСТРИТЕЛЯ НА НАПРЯЖЕНИЯ ДО 400 КВ

### 2.1 Экспериментальное определение условий достижения максимальной электрической прочности разрядников-обострителей

#### 2.1.1 Основные элементы конструкции, между которыми возможны шунтирующие пробой

На рисунке 2.1 показан эскиз базовой конструкции газонаполненного разрядника-обострителя. Макет отражает общую архитектуру разрядника-обострителя в металлокерамическом исполнении и позволяет определить влияние геометрии основных деталей, входящих в конструкцию разрядника-обострителя, на распределение электрического потенциала вдоль образующей керамического изолятора. Исследования проводились с максимальным напряжением пробоя 500 киловольт.

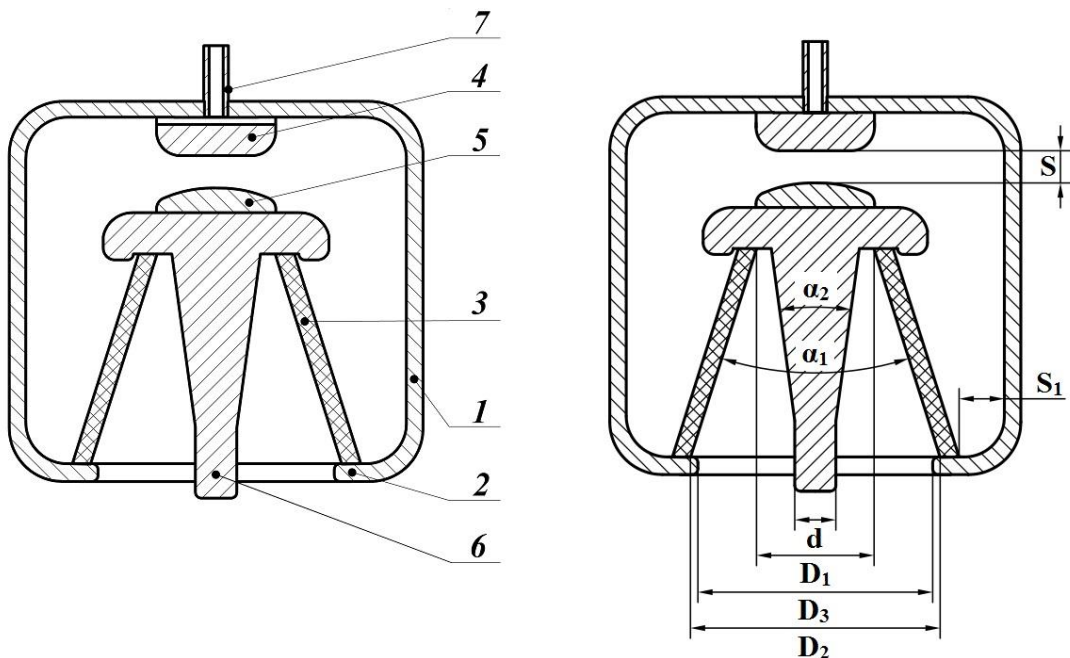


Рисунок 2.1 – Базовая конструкция разрядника-обострителя

Разрядник-обостритель содержит металлический корпус 1 в виде цилиндрического стакана с отбортовкой 2, керамический изолятор 3 в виде полого усеченного конуса, размещённого внутри корпуса 1, 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 электрода 5, часть которого, расположенная внутри изолятора, выполнена в виде усеченного конуса и штенгеля 7 для наполнения разрядника газом.

Керамический конусный изолятор 3 характеризуется диаметром меньшего основания изолятора  $D_1$ , диаметром большего основания изолятора  $D_2$  и углом конической поверхности изолятора  $\alpha_1$ . Отбортовка 2 металлического корпуса 1 определяется диаметром отбортовки корпуса  $D_3$ . Высоковольтный вывод 6 катода 5 - диаметром вывода  $d$  и углом конической поверхности вывода  $\alpha_2$ . Межэлектродное расстояние  $S$  и расстояние  $S_1$  между большим основанием керамического расстояния и внутренней стенкой корпуса 1 также влияют на распределение электрического потенциала внутри разрядника.

Разрядник работает следующим образом: при приложении высоковольтного импульсного напряжения с достаточной амплитудой к промежутку между электродами 4 и 5 происходит его пробой и импульс напряжения, обусловленный протеканием тока в разрядном контуре, формируется на нагрузке. При этом крутизна нарастания импульса напряжения на нагрузке определяется временем коммутации разрядника и индуктивностью разрядного контура. Во время воздействия импульсного напряжения на разрядник-обостритель между его электродами 4 (анод) и 5 (катод) распределение потенциала электрического поля вдоль образующей конической поверхности изолятора 3 и между выводом 6 электрода 5 и корпусом 1 зависит от взаимного расположения изолятора 3, корпуса 1 и вывода 6 электрода 5, а также от их конфигурации.

В процессе работы разрядника-обострителя возможно появление нежелательных (шунтирующих) пробоев, которые могут возникать по

поверхности конусного керамического изолятора 3 внутри прибора, между экраном электрода 5 и внутренней стенкой корпуса 1, а также между высоковольтным выводом 6 и отбортовкой корпуса 2. Сократить вероятность возникновения таких пробоев можно оптимизируя размеры и формы деталей, входящих в состав разрядника-обострителя, тем самым выравнивая распределения потенциала электрического поля вдоль образующей изолятора, таким образом увеличивая электрическую прочность конструкции разрядника-обострителя.

### **2.1.2 Влияние конструктивных элементов разрядника-обострителя на распределение потенциала электрического поля вдоль образующей изолятора**

Электрическая прочность базовой конструкции разрядника главным образом определяется поверхностной электрической прочностью керамического изолятора 3 и электрической прочностью промежутка между выводом 6 электрода 5 и отбортовкой 2 металлического корпуса 1. В условиях жёстких требований по обеспечению необходимой механической прочности и высокой электрической прочности разрядника-обострителя, а также миниатюризации конструкции, оптимальной формой керамического изолятора является форма усечённого конуса.

Вначале рассмотрим электрическую прочность промежутка между высоковольтным выводом и отбортовкой корпуса разрядника.

На рисунке 2.2 показана зависимость напряжения пробоя между выводом электрода 6 и отбортовкой корпуса 2 от отношения диаметра вывода электрода  $d$  к диаметру отбортовки корпуса  $D_3$  при фиксированном значении  $D_3 = 50$  мм. Максимальное напряжение пробоя  $U_{пр.мах}$  составляло 500 кВ [83].

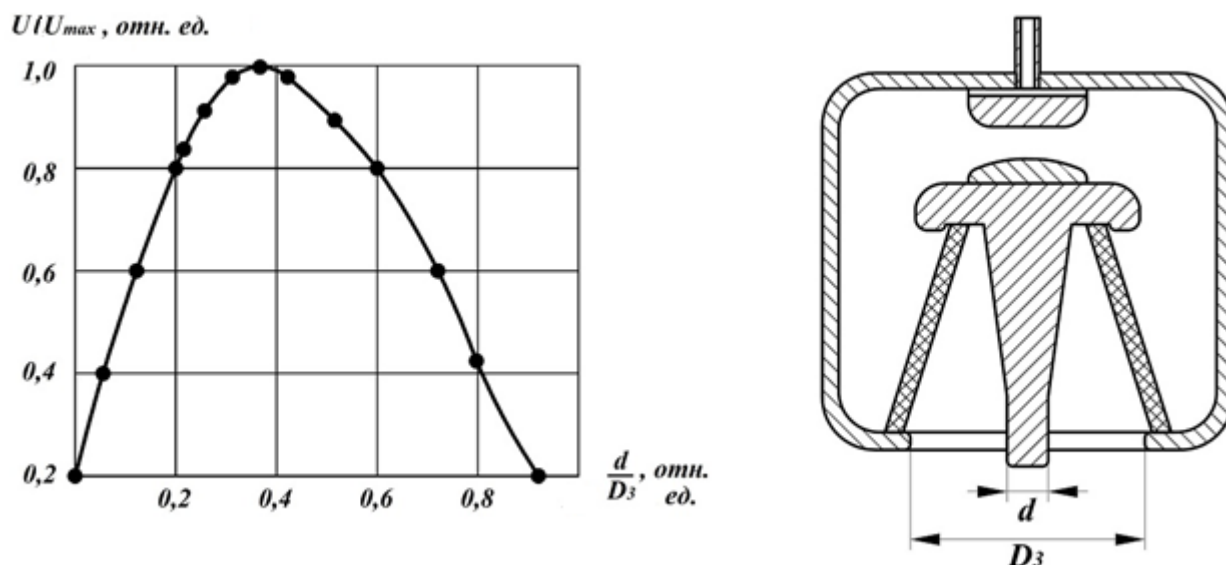


Рисунок 2.2 – Зависимость напряжения пробоя между выводом электрода и отбортовкой корпуса разрядника-обострителя от отношения диаметра вывода электрода  $d$  к диаметру отбортовки корпуса  $D_3$ :  $U$  – напряжение пробоя,  $U_{max}$  – максимальное напряжение пробоя 500 кВ,  $d$  – диаметр вывода,  $D_3$  – диаметр отбортовки корпуса

Как видно из рисунка 2.2 зависимость напряжения пробоя между выводом электрода и отбортовкой корпуса от отношения  $d/D_3$  (диаметр отбортовки равен внутреннему диаметру большего основания изолятора), при  $d/D_3 = 0,38$  имеет максимум, а при  $U/U_{max} \geq 0,9$  отношение  $d/D_3$  лежит в пределах  $0,25 \leq d/D_3 \leq 0,5$ . В этом случае промежуток между выводом электрода и отбортовкой корпуса имеет достаточно большую электрическую прочность, исключая возможность пробоя данного промежутка. При  $d/D_3 < 0,25$  и  $d/D_3 > 0,5$  зависимость напряжения пробоя указанного промежутка резко уменьшается.

При  $d/D_3 < 0,25$  ( $D_3 = \text{const}$ ) на характер изменения напряжения пробоя в большей степени влияет кривизна поверхности вывода электрода. Известно, что напряженность электрического поля вблизи цилиндрического стержня обратно пропорциональна квадрату радиуса стержня, т.е. напряженность электрического поля с уменьшением диаметра вывода увеличивается, что влечет за собой снижение напряжения пробоя промежутка.

При  $d/D_3 > 0,5$  ( $D_3 = \text{const}$ ) на характер изменения напряжения пробоя в большей степени влияет уменьшение зазора между выводом электрода и отбортовкой корпуса, чем ослабление напряженности электрического поля вблизи вывода электрода за счет увеличения его диаметра.

На основании анализа данной зависимости можно сделать вывод, что для исключения возможности нежелательного пробоя промежутка между выводом электрода 6 и отбортовкой корпуса 2 и, соответственно, увеличения электрической прочности разрядника, необходимо соблюдать следующие соотношения диаметра вывода  $d$  к диаметру отбортовки корпуса  $D_3$ :

$$0,25 \leq d/D_3 \leq 0,5.$$

Следующим этапом изучения влияния линейных и угловых соотношений геометрических размеров высоковольтного керамического изолятора является определение распределения потенциала электрического поля внутри разрядника-обострителя.

На рисунке 2.3 приведены кривые изменения потенциала электрического поля вдоль образующей конической поверхности изолятора 3 при приложении импульсного напряжения между электродами 4 и 5 с амплитудой 500 кВ для пяти значений  $\alpha_1$  и величин отношения  $D_1/D_2$ :

$$A - \alpha_1 = 35^\circ, D_1/D_2 = 0,3,$$

$$B - \alpha_1 = 30^\circ, D_1/D_2 = 0,4,$$

$$B - \alpha_1 = 20^\circ, D_1/D_2 = 0,6,$$

$$Г - \alpha_1 = 10^\circ, D_1/D_2 = 0,8,$$

$$D - \alpha_1 = 5^\circ, D_1/D_2 = 0,9,$$

при  $\alpha_2 = 20^\circ$ ,  $0,25 \leq d/D_3 \leq 0,5$ .

Кривые приведены для разрядников с межэлектродным расстоянием  $S = 7$  мм с высотой изолятора  $h = 60$  мм и внутренним диаметром большего основания изолятора  $D_3 = 50$  мм. Большее основание изолятора 3 отстоит от цилиндрической поверхности корпуса на расстоянии  $S_1 = 14$  мм). Угол  $\alpha_1$  и соответственно отношение  $D_1/D_2$  изменялось за счёт изменения внутреннего диаметра  $D_1$  меньшего основания изолятора. Для сохранения постоянного угла  $\alpha_2$

соответственно изменялся диаметр вывода  $d$ , чтобы отношение  $d/D_3$  оставалось в пределах  $0,25 \leq d/D_3 \leq 0,5$ .

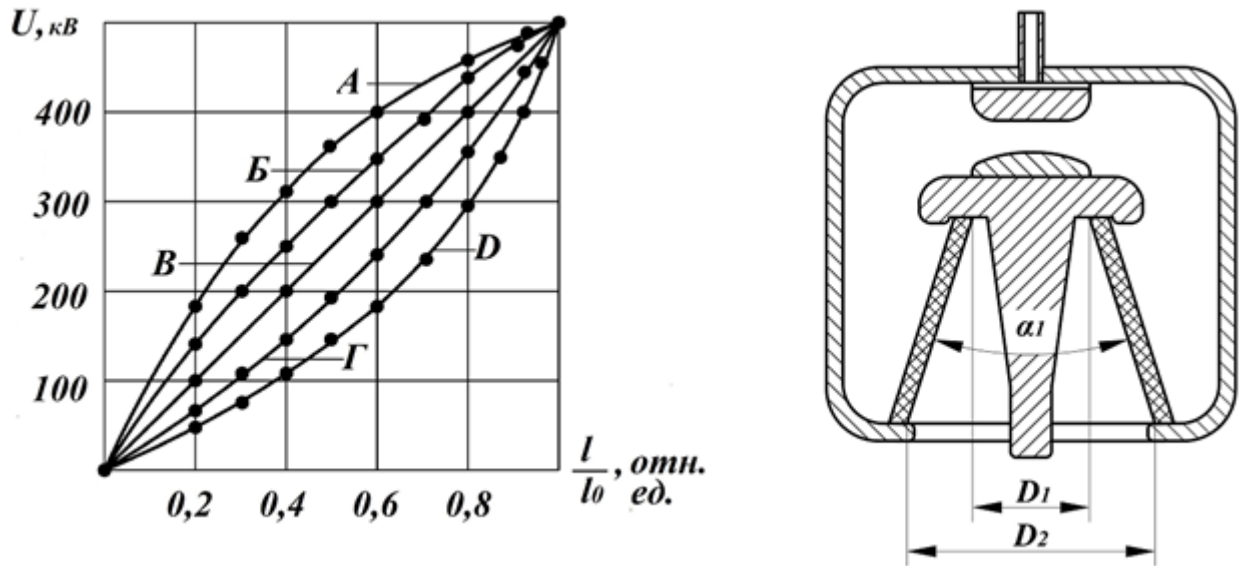


Рисунок 2.3 – Зависимости влияния конфигурации изолятора на распределение потенциала электрического поля вдоль образующей изолятора:  $l$  – длина образующей изолятора в точке измерения;  $l_0$  – полная длина образующей изолятора;  $D_1$  – диаметр меньшего основания изолятора;  $D_2$  – диаметр большего основания изолятора;  $\alpha_1$  – угол конической поверхности изолятора

На рисунке 2.3 показано, что на распределение потенциала электрического поля вдоль образующей изолятора существенно влияет конфигурация изолятора (величина отношения  $D_1/D_2$  и угол  $\alpha_1$ ).

При  $D_1/D_2 = 0,9$ ,  $\alpha_1 = 5^\circ$  (рисунок 2.3, кривая А) имеет место значительное искажение распределения потенциала электрического поля (усиление напряженности электрического поля) в верхней части изолятора ближе к месту соединения вывода электрода с меньшим основанием изолятора, что объясняется близким расположением конической поверхности вывода электрода относительно поверхности изолятора.

При уменьшении отношения  $D_1/D_2$  и соответственно при увеличении угла  $\alpha_1$ , т.е. при удалении конической поверхности изолятора относительно конической поверхности вывода электрода происходит выравнивание



распределения потенциала электрического поля вдоль образующей изолятора и при  $D_1/D_2 = 0,8$  и  $\alpha_1 = 10^\circ$  (рисунок 2.3, кривая *Б*) оно близко к равномерному.

При  $D_1/D_2 = 0,6$ ,  $\alpha_1 = 20^\circ$  (рисунок 2.3, кривая *В*) распределение потенциала электрического поля практически линейное.

При дальнейшем уменьшении отношения  $D_1/D_2$  и соответственно увеличении угла  $\alpha_1$  происходит уменьшение напряженности электрического поля в верхней части изолятора, что влечет за собой неравномерное распределение потенциала электрического поля вдоль образующей изолятора, при этом, когда  $D_1/D_2 = 0,4$ ,  $\alpha_1 = 30^\circ$  (рисунок 2.3, кривая *Г*), распределение потенциала еще остается близко к равномерному, а при дальнейшем уменьшении  $D_1/D_2$  и соответственно увеличении угла  $\alpha_1$  (рисунок 2.3, кривая *Д*) неравномерность распределения потенциала заметно увеличивается.

Из рассмотрения кривых, приведенных на рисунке 2.3, следует, что для увеличения электрической прочности разрядника необходимо соблюдать соотношения

$$0,4 \leq D_1/D_2 \leq 0,8 \text{ и } 10^\circ \leq \alpha_1 \leq 30^\circ.$$

Далее следует рассмотреть влияние месторасположения высоковольтного керамического изолятора относительно внутренних стенок корпуса разрядника-обострителя и межэлектродного расстояния на распределение на распределение потенциала электрического поля вдоль образующей изолятора.

На рисунке 2.4 приведены кривые изменения потенциала электрического поля вдоль образующей конической поверхности изолятора 3 разрядника при приложении импульсного напряжения между электродами 4 и 5 с амплитудой 500 кВ для трёх значений расстояния  $S_1$  между большим основанием изолятора 3 и внутренней цилиндрической поверхностью корпуса 1 (*А* –  $S_1 = 0$ , *Б* –  $S_1 = 7$  мм, *В* –  $S_1 = 14$  мм).

Кривые приведены для разрядников с межэлектродным расстоянием  $S = 7$  мм и геометрическими размерами изолятора 3 и вывода 6 электрода 5:  $D_1 = 30$  мм,  $D_2 = 50$  мм,  $\alpha_1 = 20^\circ$ ,  $\alpha_2 = 20^\circ$ ,  $d = 12$  мм, высота изолятора  $h = 60$  мм,  $D_3 = 50$  мм.

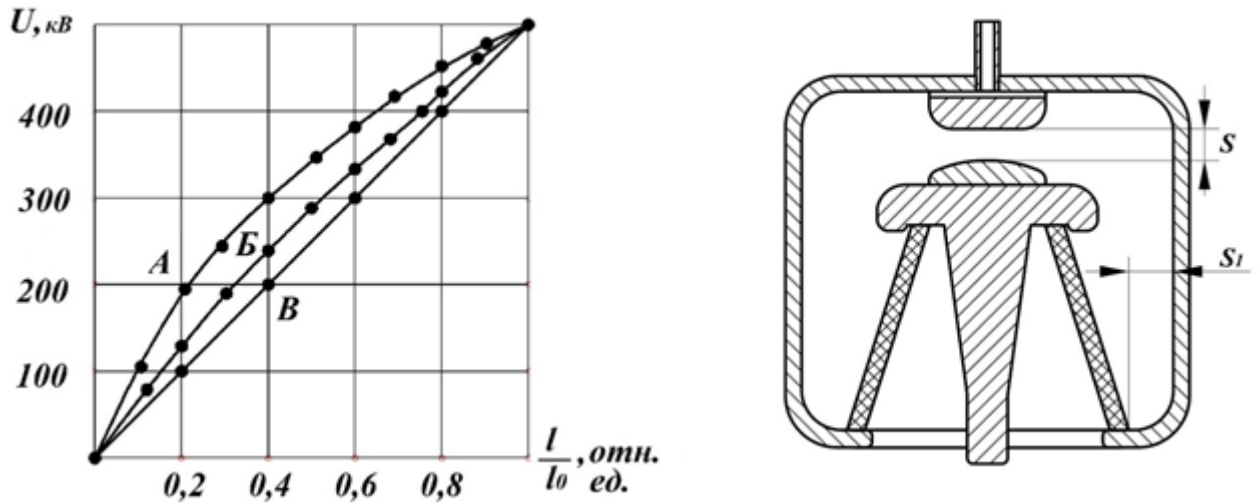


Рисунок 2.4 – Зависимости влияния взаимного расположения изолятора относительно корпуса разрядника на распределение потенциала электрического поля вдоль образующей изолятора:  $S$  – межэлектродное расстояние,  $S_1$  – расстояние между большим основанием изолятора и внутренней цилиндрической поверхностью корпуса

Как видно из рисунка 2.4 на распределение потенциала электрического поля вдоль образующей изолятора влияет расположение изолятора относительно корпуса разрядника-обострителя. При расположении корпуса в непосредственной близости от изолятора (расстояние между внутренней цилиндрической поверхностью корпуса и большим основанием изолятора  $S_1 = 0$ ) имеет место заметное искажение распределения потенциала электрического поля (ослабление напряженности электрического поля) в нижней части изолятора ближе к металлическому корпусу (рисунке 2.4, кривая А). При удалении изолятора от внутренней цилиндрической поверхности корпуса происходит выравнивание потенциала электрического поля вдоль образующей конической поверхности изолятора и при расстоянии равном межэлектродному расстоянию, оно близко к равномерному (рисунке 2.4, кривая Б).

При дальнейшем увеличении расстояния между внутренней цилиндрической поверхностью корпуса и большим основанием изолятора до расстояния, равного удвоенному расстоянию между электродами, распределение потенциала электрического поля становится линейным (рисунке 2.4, кривая В).

Дальнейшее увеличение расстояния между внутренней цилиндрической поверхностью корпуса и большим основанием изолятора приводит к неоправданному увеличению габаритов разрядника, поэтому при снятии распределения потенциала электрического поля вдоль образующей изолятора ограничиваются расстоянием, равным удвоенному расстоянию между электродами.

Таким образом, для выравнивания распределения потенциала электрического поля в нижней части изолятора и увеличения электрической прочности разрядника необходимо удалить внутреннюю цилиндрическую поверхность корпуса от большего основания изолятора на расстояние не менее расстояния между электродами.

Необходимо также отметить тот факт, что на распределение электрического поля вдоль образующей конической поверхности изолятора внутри разрядника-обострителя влияет форма высоковольтного вывода.

На рисунке 2.5 приведены кривые изменения потенциала электрического поля вдоль образующей конической поверхности изолятора 3 разрядника при приложении импульсного напряжения между электродами 4 и 5 с амплитудой 500 кВ для пяти значений угла  $\alpha_2$  конической поверхности вывода 6 электрода 5.

$$A - \alpha_2 = 50^\circ,$$

$$B - \alpha_2 = 45^\circ,$$

$$B - \alpha_2 = 25^\circ,$$

$$Г - \alpha_2 = 10^\circ,$$

$$D - \alpha_2 = 5^\circ$$

при  $D_1/D_2 = 0,6$ ,  $\alpha_1 = 20^\circ$ ,  $0,25 \leq d/D_3 \leq 0,5$ .

Кривые приведены для разрядников с межэлектродным расстоянием  $S = 7$  мм и геометрическими размерами изолятора 3:  $D_1 = 30$  мм,  $D_2 = 50$  мм, высота изолятора  $h = 60$  мм,  $D_3 = 50$  мм. Большее основание изолятора 3 отстоит от цилиндрической поверхности корпуса 1 на расстоянии, равном удвоенному расстоянию между электродами 4 и 5 ( $S_1 = 14$  мм). При изменении угла  $\alpha_2$  отношение  $d/D_3$  оставалось в пределах  $0,25 \leq d/D_3 \leq 0,5$ .

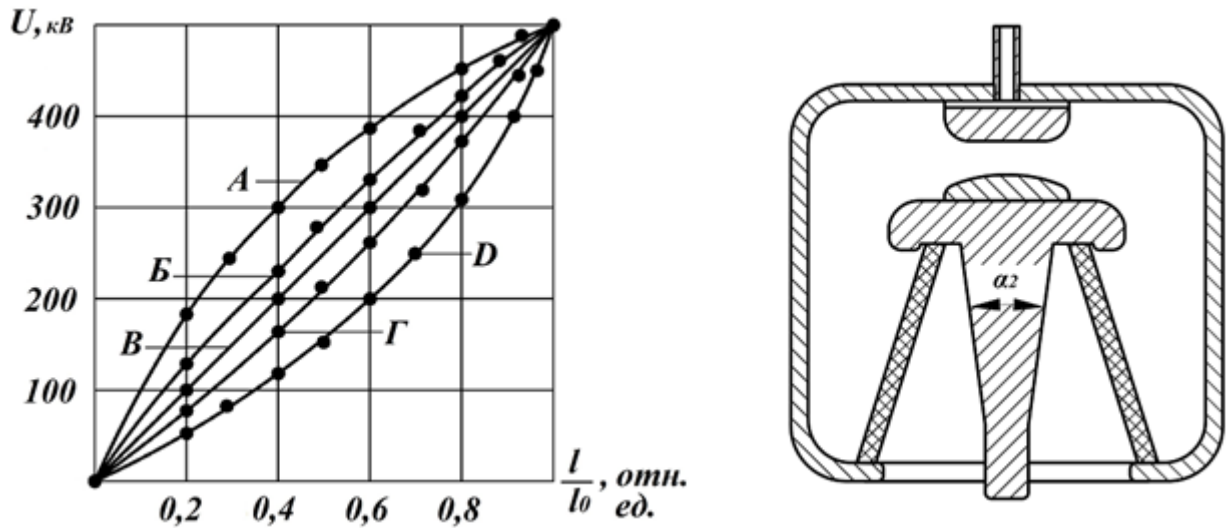


Рисунок 2.5 – Зависимости влияния изменения величины угла  $\alpha_2$  конической поверхности вывода электрода на распределения потенциала электрического поля вдоль образующей изолятора:  $l$  – длина образующей изолятора в точке измерения;  $l_0$  – полная длина образующей изолятора;  $\alpha_2$  – угол конической поверхности вывода электрода

При  $\alpha_2 = 5^\circ$  имеет место значительное искажение распределения потенциала (усиление напряженности электрического поля) в верхней части изолятора ближе к месту соединения вывода электрода с меньшим основанием изолятора. Это объясняется близким расположением конической поверхности вывода электрода относительно поверхности изолятора (рисунок 2.5, кривая  $D$ ).

При увеличении угла  $\alpha_2$  конической поверхности вывода электрода происходит выравнивание распределения потенциала вдоль образующей поверхности изолятора и при  $\alpha_2 = 10^\circ$  оно близко к равномерному (рисунок 2.5, кривая  $\Gamma$ ). При увеличении угла  $\alpha_2$  до значения, равного  $25^\circ$ , распределение потенциала электрического поля становится линейным (рисунок 2.5, кривая  $B$ ).

Дальнейшее увеличение угла  $\alpha_2$  вызывает уменьшение напряженности поля в верхней части изолятора, что влечет за собой неравномерное распределение потенциала электрического поля вдоль образующей изолятора. При этом, когда  $\alpha_2 = 45^\circ$  (рисунок 2.5, кривая  $B$ ), распределение потенциала еще остается близко к

равномерному, а при дальнейшем увеличении угла  $\alpha_2$  до  $50^\circ$  (рисунок 2.5, кривая А) неравномерность распределения потенциала заметно увеличивается.

Для выравнивания распределения потенциала электрического поля вдоль образующей изолятора и увеличения электрической прочности разрядника необходимо выбирать угол  $\alpha_2$  конической поверхности вывода электрода в пределах

$$10^\circ \leq \alpha_2 \leq 45^\circ.$$

На основании рассмотренных зависимостей можно сделать вывод, что при соблюдении следующих соотношений в разряднике-обострителе:

$$\begin{aligned} 0,25 \leq d/D_3 \leq 0,5, \\ 0,4 \leq D_1/D_2 \leq 0,8, \\ 10^\circ \leq \alpha_1 \leq 30^\circ, \\ 10^\circ \leq \alpha_2 \leq 45^\circ, \end{aligned} \quad (2.1)$$

где  $D_1$  - внутренний диаметр меньшего основания изолятора, мм;  $D_2$  - внутренний диаметр большего основания изолятора, мм;  $\alpha_1, \alpha_2$  - углы конической поверхности изолятора и вывода электрода соответственно;  $d$  - диаметр цилиндрической части вывода электрода, мм;  $D_3$  - диаметр отверстия отбортовки корпуса, мм;

и выполнении расстояния между внутренней цилиндрической поверхностью корпуса и большим основанием изолятора не менее межэлектродного позволяет значительно повысить и получить максимально возможную электрическую прочность при минимизации габаритных размеров, что повышает надежность работы разрядника в аппаратуре [79, 83].

### **2.1.3 Пробой в разряднике между электродами и блокирование пробоя между экраном и внутренней поверхностью корпуса**

В конструкции разрядника геометрические размеры выбирают таким образом, чтобы пробой между электродами происходил с равной вероятностью по всей площади рабочей поверхности электрода, которая симметрична относительно оси прибора. В процессе наработки происходит выработка

материала электродов, начиная строго по оси прибора в начале, и с увеличением рабочей поверхности в процессе работы таким образом, что вероятность пробоя в каждой из точек рабочей поверхности электрода практически одинакова. Такой характер работы разрядника ведет к симметричной выработке электродов, что значительно повышает стабильность электрических параметров.

На поверхность изолятора, расположенную со стороны разряда между электродами в местах с наименьшим межэлектродным расстоянием осаждение продуктов эрозии происходит интенсивнее, что влечет за собой изменение напряженности электрического поля на поверхности изолятора и при напряженности электрического поля более критического значения, при котором возможно развитие разряда на поверхности изолятора, происходит пробой по поверхности изолятора, ограничивающий долговечность прибора.

Для обеспечения высокой электрической прочности и стабильности срабатывания разрядника-обострителя строго между электродами, помимо выполнения соотношений (2.1), необходимо также выполнить определённое соотношение между размерами диаметров электродов, экрана катода, внутренней стенки корпуса разрядника и величиной межэлектродного промежутка, позволяющее исключить вероятность пробоя промежутка между экраном катода и внутренней стенкой корпуса разрядника.

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

$$D_{эл} = (3 \div 5) S$$

$$R = (1 \div 2) D_{эл} \quad (2.2)$$

$$D_{экр} = (0,25 \div 0,6) D_{корп},$$

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

На рисунке 2.6 отражены варьируемые размеры деталей базовой конструкции. Соотношение диаметра электрода к межэлектродному расстоянию

$D_{эл} = (3 \div 5) S$  определяет степень однородности электрического поля между электродами и обеспечивает опережающее развитие разряда между ними на более низком уровне напряжения по сравнению с разрядными процессами в промежутке между экраном и внутренней поверхностью корпуса, при этом должно выполняться соотношение  $D_{экр} = (0,25 \div 0,6) D_{корп}$ , при котором обеспечивается необходимая электрическая прочность промежутка между экраном и внутренней поверхностью металлического корпуса.

В случае если диаметр электродов  $D_{эл} > 5S$ , в разряднике увеличивается вероятность пробоя между экраном и внутренней поверхностью корпуса, снижающего электрическую прочность и стабильность срабатывания разрядника.

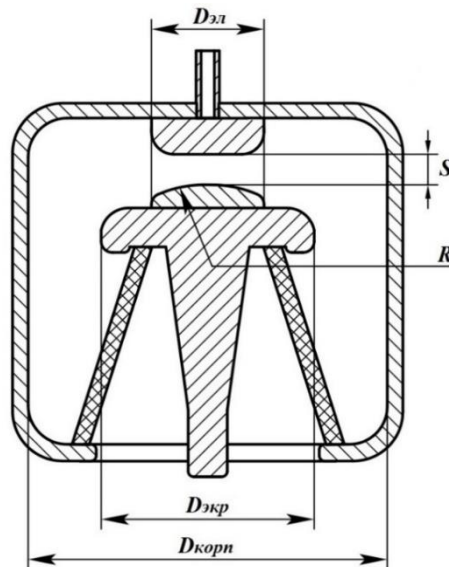


Рисунок 2.6 – Базовая конструкция разрядника-обострителя:

$D_{эл}$  – диаметр электродов,  $D_{экр}$  – диаметр экрана,  $D_{корп}$  – диаметр внутренней поверхности корпуса,  $S$  – межэлектродное расстояние,  $R$  – радиус сферической поверхности катода

Если диаметр электродов  $D_{эл} < 3S$ , то в приборе наблюдается интенсивная эрозия материала электродов из-за ограничения их рабочей поверхности, что ухудшает стабильность срабатывания и долговечность в заданном эксплуатационном режиме.

При  $R = (1 \div 2) D_{эл}$  пробой промежутка между электродами предпочтителен по оси электродов и технологическое отклонение осей электродов от оси прибора

не вызывает смещение разряда на края электродов в местах наименьшего расстояния между электродами, что способствует симметричному напылению материала электродов на внутренней поверхности изолятора.

При  $R < D_{эл}$  электрическое поле становится менее однородно, что вызывает нестабильность пробивного напряжения разрядника.

При  $R > 2 D_{эл}$  поверхность электрода близка к плоской поверхности, поэтому в случае отклонения осей электродов от осей прибора в процессе изготовления при работе возникает смещение разряда на края электродов в места с наименьшим межэлектродным расстоянием.

Если конструктивные элементы разрядника-обострителя соответствуют этим соотношениям, то пробой в разряднике происходит между электродами и, тем самым, блокируются нежелательные процессы и пробой по поверхности изолятора и в радиальном направлении между экраном и внутренней поверхностью корпуса [84, 85].

## **2.2 Электрическая прочность серийно выпускаемых разрядников-обострителей**

На основе базовой конструкции разрядника-обострителя разработана серия приборов (РО-48, РО-43, РО-49, РО-72 и др.) [13] в диапазоне напряжений пробоя от 100 до 400 кВ с улучшенными техническими характеристиками и значительно большим ресурсом работы в заданном эксплуатационном режиме по сравнению с ранее выпускаемыми разрядниками Р-43, Р-48 и Р-49.

Соотношение геометрических и угловых размеров деталей в приборах серии «РО» соответствует условиям (2.1) и (2.2). Основные технические параметры разрядников РО-48, РО-43, РО-49, РО-72 приведены в таблице 2.1.

Разрядники-обострители, разработанные на основе приведённой базовой конструкции, отличаются: малыми габаритами и весом, высокой стабильностью срабатывания, высоким динамическим напряжением пробоя, малым временем коммутации (менее 0,5 нс) и большим сроком службы.



Таблица 2.1 – Характеристики серийно-выпускаемых разрядников – обострителей АО «Плазма»

Тип разрядника	Диапазон напряжения пробоя, кВ	Относит. среднев. разброс напряжен. пробоя, %, не более	Коммутируемая энергия, Дж	Габариты, Ø x Н, мм	Масса, г	Миним. наработка, имп, не менее
РО-48	100 – 140	3	0,5	40x69	200	3x10 <sup>6</sup>
РО-43	140 – 190		2	50x85	400	
РО-49	180 – 250		6	70x95	650	
РО-72	250 – 400		20	85x115	900	

Рассмотрим пример серийного разрядника-обострителя РО-49 (рисунок 2.7). Данный разрядник рассчитан на работу в диапазоне напряжений пробоя от 180 до 250 кВ, коммутируемая энергия составляет 6 Дж, диаметр наружной оболочки цилиндрического корпуса составляет 70 мм, длина корпуса – 73 мм, полная высота прибора равняется 95 мм, масса разрядника не превышает 650 г.

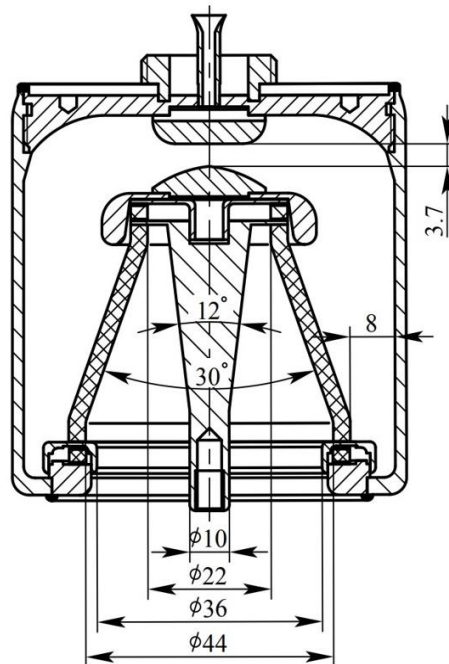


Рисунок 2.7 – Конструкция разрядника РО-49

Серийно выпускаемый разрядник-обостритель РО-49 имеет следующие геометрические размеры деталей:

- диаметр меньшего основания конусного керамического изолятора составляет  $D_1 = 22$  мм,
- диаметр большего основания изолятора  $D_2 = 44$  мм,
- угол конической поверхности изолятора  $\alpha_1 = 30^\circ$ ,
- угол конической поверхности вывода  $\alpha_2 = 12^\circ$ ,
- диаметр отбортовки корпуса  $D_3 = 36$  мм,
- диаметр цилиндрической части вывода электрода  $d = 10$  мм.

Соотношения размеров в разряднике:

$$D_1/D_2 = 0,5 \quad (0,4 \leq D_1/D_2 \leq 0,8),$$

$$\alpha_1 = 30^\circ \quad (10^\circ \leq \alpha_1 \leq 30^\circ),$$

$$\alpha_2 = 12^\circ \quad (10^\circ \leq \alpha_2 \leq 45^\circ),$$

$$d/D_3 = 0,28 \quad (0,25 \leq d/D_3 \leq 0,5).$$

Для экспериментального подтверждения правильности выбранных соотношений (2.2) изготавливались образцы со следующими величинами диаметров электродов  $D_{эл}$  и радиусов сферической поверхности катода  $R$  (диаметр экрана  $D_{экр} = 38$  мм, диаметр внутренней поверхности металлического корпуса  $D_{корп} = 66$  мм и межэлектродное расстояние  $S = 3,7$  мм для всех образцов было одинаковым):

- 1) образцы «А» -  $D_{эл} = 18$  мм и  $R = 18$  мм ( $D_{эл} = 4,86 S$ ,  $R = D_{эл}$ );
- 2) образцы «Б» -  $D_{эл} = 18$  мм и  $R = 36$  мм ( $D_{эл} = 4,86 S$ ,  $R = 2 D_{эл}$ );
- 3) образцы «В» -  $D_{эл} = 18$  мм и  $R = 45$  мм ( $D_{эл} = 4,86 S$ ,  $R = 2,5 D_{эл}$ ).

Необходимо сразу отметить тот факт, что диаметр экрана  $D_{экр} = 38$  мм выбран таким образом, чтобы закрыть максимально возможную площадь керамического изолятора от напыления продуктами эрозии электродов, при этом исключая возможность пробоя между экраном и внутренней поверхностью корпуса. Диаметр внутренней поверхности металлического корпуса  $D_{корп} = 66$  мм обусловлен требованиями необходимой механической прочности изделия с толщиной стенки 2 мм при наружном диаметре разрядника 70 мм.

Приборы наполнялись водородом до давления  $p = 70$  атмосфер, обеспечивающего напряжение пробоя  $U = 240$  кВ.

Проведенные испытания показали, что экспериментальные образцы «А» и «Б» в режиме  $U = 240$  кВ,  $J_a = 1$  кА,  $W_k = 6$  Дж имели наработку более  $3 \cdot 10^6$  пробоев и относительный среднеквадратичный разброс динамического напряжения пробоя не более 3%.

В том же режиме работы экспериментальные образцы «В» имели наработку  $1,5 \cdot 10^6$  срабатываний при относительном среднеквадратичном разбросе напряжения пробоя не более 3%. После  $1,5 \cdot 10^6$  срабатываний разброс напряжения пробоя увеличивался до 5%, что выходит за пределы предъявляемых требований к электрическим параметрам разрядника. Анализ состояния поверхности выявил смещение разряда по мере увеличения числа срабатываний на края электродов, что приводит к ограничению долговечности.

### **2.3 Численное моделирование распределения электрического поля и потенциала внутри разрядника-обострителя РО-49**

Для получения детальной информации о распределении электрического поля и потенциала внутри корпуса разрабатываемого разрядника-обострителя в качестве средства решения использовалась интегрированная среда численного моделирования COMSOL Multiphysics [86]. Эта среда позволяет получать распределения электрических полей и потенциалов по заданным геометрическим размерам проводящих и диэлектрических элементов конструкции электрофизического устройства, решая численно уравнение Лапласа, либо Пуассона, с учетом граничных условий задачи.

При проведении численного моделирования задавались различные варианты конструкции разрядника-обострителя и по ним определялись соответствующие распределения электрических полей и потенциалов. При моделировании особое внимание уделялось определению геометрических параметров основных элементов конструкции, в том числе и геометрии

керамического изолятора. Основное внимание при этом уделялось нахождению условий, которые обеспечивают минимальное значение электрического поля вдоль внутренней поверхности керамического изолятора. Реализация такого распределения затрудняет электрический пробой по поверхности керамического изолятора и, тем самым, обеспечивает его высокую электропрочность. Следует иметь в виду, что напряжение пробоя по поверхности диэлектрика в несколько раз меньше напряжения пробоя по газу.

С использованием соотношений (2.1) и (2.2) осуществлялся выбор линейных и угловых размеров конструкции разрядника серии РО-49 для проведения численного расчета электрического поля и потенциала. На рисунке 2.8 приведено полученное в ходе моделирования распределение напряжённости электрического поля внутри и с внешней части корпуса разрядника РО-49 в пределах отрезка цилиндрической передающей линии.

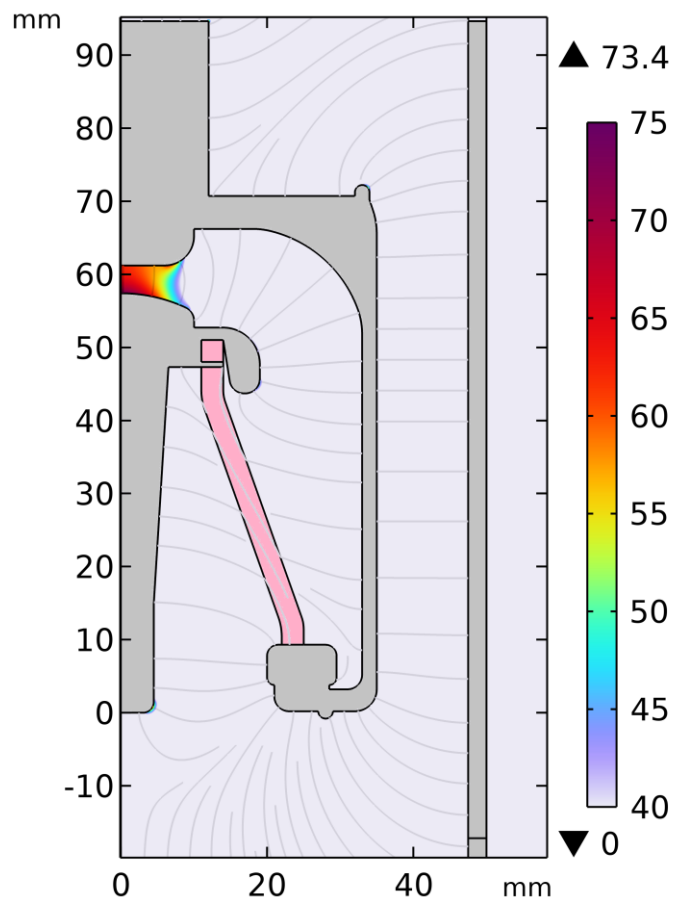


Рисунок 2.8 – Распределение электрического поля внутри и вне оболочки разрядника-обострителя

Геометрические размеры разрядника и фрагмента передающей линии отражены слева и снизу на рисунке 2.8 (шкала Н и R, мм). Шкала R на рисунке 2.8 соответствует радиальному удалению от центральной оси разрядника-обострителя РО-49. Наружный радиус корпуса РО-49  $R_k = 35$  мм, радиус передающей линии  $R_l = 50$  мм. Высота разрядника  $H = 73$  мм.

Абсолютные значения напряжённостей электрического поля отражены справа в виде цветовой гаммы с указанием абсолютных значений напряжённости электрического поля в диапазоне от 40 до 75 кВ/мм. Данные значения напряжённости соответствуют напряжению на промежутке «анод-катод»  $U = 250$  кВ.

Как видно из распределения электрического поля внутри разрядника-обострителя наибольшее значение поля имеет место в межэлектродном промежутке  $d_{ак}$  ( $H = 59 \pm 2$  мм) и составляет 73,4 кВ/мм. Минимальные значения напряжённости электрического поля характерны для промежутка «корпус разрядника – внутренняя поверхность передающей линии» и не превышают  $E \approx 40$  кВ/мм, а также между высоковольтным выводом и основанием корпуса разрядника-обострителя ( $E \leq 55$  кВ/мм). Повышенные значения напряжённости электрического поля имеют место у относительно неоднородных краёв корпуса разрядника-обострителя и внутренней стороной передающей линии ( $E \leq 50$  кВ/мм).

Наиболее важным результатом проведённого численного моделирования является тот факт, что силовые линии электрического поля пересекают поверхность керамического изолятора под углом практически  $45^\circ$ . Это означает, что компонента электрического поля, направленная вдоль поверхности керамического изолятора и ответственная за поверхностный пробой, значительно ниже полного значения электрического поля в области изолятора. Другими словами, при таком распределении силовых линий поля затрудняется пробой по поверхности керамического изолятора. При длине образующей керамического изолятора  $l = 42$  мм достигается электрическая прочность не менее 250 кВ.

Представленные результаты численного расчета аналогичны полученным ранее в ходе проведения большого числа эмпирических исследований, по результатам которых были получены соотношения (2.1) и (2.2). Таким образом следует, что найденные эмпирические соотношения для линейных и угловых размеров конструкции обеспечивают максимальную электрическую прочность разрядника-обострителя. Детальное численное моделирование даёт такой же результат и раскрывает физическую суть высокой электрической прочности малогабаритного керамического изолятора, благодаря чему и достигаются минимальные геометрические размеры самого разрядника-обострителя РО-49 с напряжением пробоя до 250 кВ.

Из рисунка 2.8 видно, что в разряднике РО-49, в котором конструктивные элементы выполнены в соответствии с соотношениями (2.1) и (2.2), пробой происходит строго между электродами.

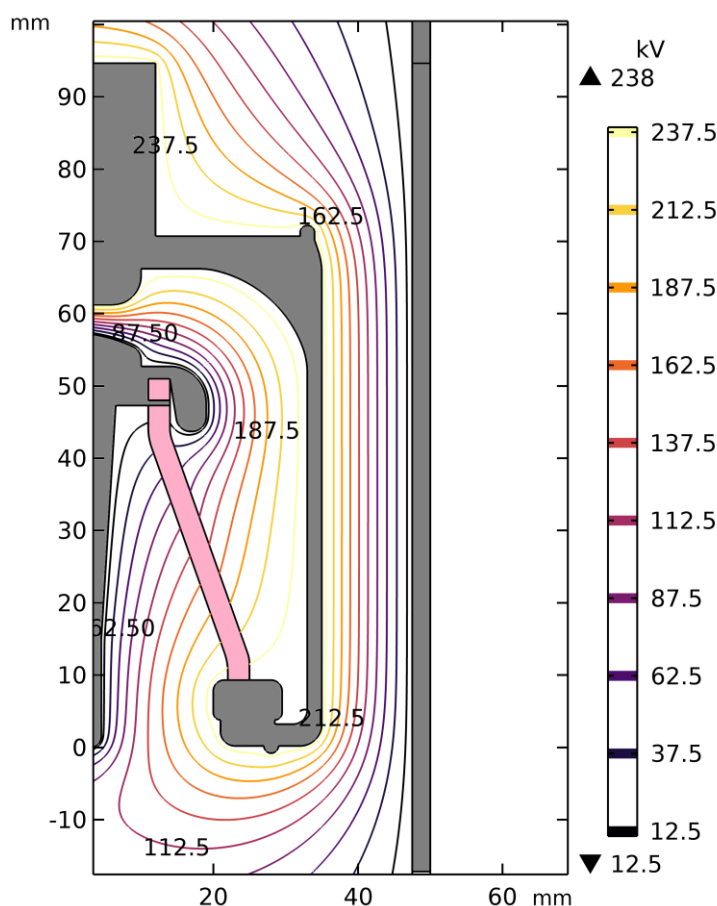


Рисунок 2.9 – Распределение электрического потенциала внутри и вне оболочки разрядника-обострителя

Пробой в радиальном направлении между экраном и внутренней поверхностью корпуса исключается благодаря тому, что электрическая прочность данного промежутка выше, чем у межэлектродного промежутка.

Пробой между высоковольтным выводом и корпусом разрядника исключён благодаря правильно выбранным размерам деталей, обеспечивающих необходимую электрическую прочность промежутка и использованию жидкого диэлектрика, в котором размещается разрядник-обостритель, с электрической прочностью не менее 55 кВ/мм.

Распределение электрического потенциала в разряднике-обострителе РО-49 и в промежутке между корпусом разрядника и фрагментом цилиндрической передающей линии отражено на рисунке 2.9 для максимального значения напряжения на электродах 250 кВ.

Распределение эквипотенциалей внутри разрядника-обострителя также подтверждает, что развитие разряда и, соответственно, токопрохождение сосредоточено в разрядном промежутке «катод-анод».

На рисунке 2.10 представлено распределение электрического потенциала вдоль образующей конической части высоковольтного изолятора разрядника-обострителя РО-49.

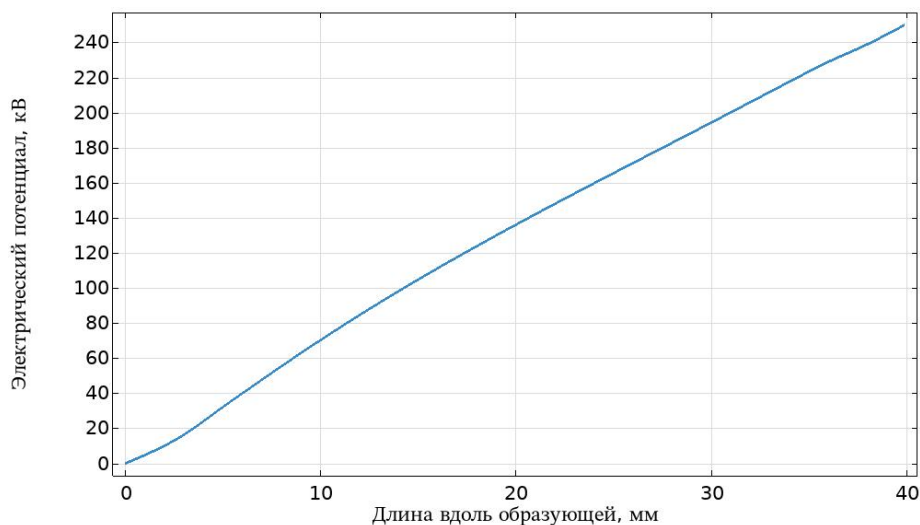


Рисунок 2.10 – Распределение потенциала вдоль образующей керамического изолятора разрядника РО-49

Представленная форма кривой потенциала совпадает с распределениями потенциала электрического поля вдоль образующей конической поверхности изолятора на рисунках 2.3-2.5.

Результаты проведённых исследований были положены в основу конструирования малогабаритного отпаянного разрядника-обострителя серии РО-49, работающего при напряжении до 250 кВ и обладающего субнаносекундными временами коммутации. Основным элементом, с помощью которого удалось реализовать минимальные габариты разрядника ( $H = 73$  мм,  $\varnothing = 70$  мм), является высоковольтный конусный изолятор. Высокая электрическая прочность керамического изолятора достигается за счёт специфического распределения электрического поля внутри разрядника в области изолятора.

## 2.4 Выводы к главе 2

1. Эмпирическим путём и методами численного моделирования в среде COMSOL Multiphysics определены оптимальные соотношения между линейными и угловыми размерами основных элементов конструкции разрядников-обострителей, которые при минимальных геометрических размерах обеспечивают электрическую прочность на уровне 140 кВ для разрядника РО-48, 190 кВ для разрядника РО-43, 250 кВ для разрядника РО-49 и 400 кВ для разрядника РО-72.

2. Высокая электрическая прочность основного высоковольтного элемента – конусного керамического изолятора – обеспечивается специфическим распределением электрического поля внутри корпуса разрядника-обострителя в области самого изолятора. Электрическое поле в области изолятора преимущественно сориентировано под углами от  $45^\circ$  до  $90^\circ$ .

3. Наибольшая электрическая прочность промежутка между высоковольтным выводом электрода и отбортовкой корпуса достигается при обеспечении соотношений между диаметром высоковольтного вывода электрода и диаметром отбортовки корпуса в пределах  $0,25 \leq d/D_3 \leq 0,5$ .



4. Наибольшая электрическая прочность керамического высоковольтного изолятора достигается при соблюдении расстояния внутренней цилиндрической поверхности корпуса от большего основания изолятора не менее расстояния между электродами, при соотношении внутреннего диаметра меньшего основания изолятора к внутреннему диаметру большего основания изолятора в пределах  $0,4 \leq D_1/D_2 \leq 0,8$  и выборе угла конической поверхности изолятора в пределах  $10^\circ \leq \alpha_1 \leq 30^\circ$ , а также выборе угла  $\alpha_2$  конической поверхности вывода электрода в пределах  $10^\circ \leq \alpha_2 \leq 45^\circ$ .

5. Нежелательные пробой по поверхности изолятора и в радиальном направлении между экраном и внутренней поверхностью корпуса блокируются, если диаметр электродов  $D$  соответствует величине равной от 3 до 5 междуэлектродных расстояний, радиус сферической поверхности катода соответствует от одного до двух размеров диаметра электрода и размер диаметра экрана соответствует  $0,25 \div 0,6$  от диаметра внутренней поверхности металлического корпуса.

6. На основе базовой конструкции разрядника-обострителя на 500 кВ разработана серия приборов (РО-48, РО-43, РО-49, РО-72) в диапазоне напряжений пробоя от 100 до 400 кВ с улучшенными техническими характеристиками и значительно большим ресурсом работы в заданном эксплуатационном режиме по сравнению с ранее выпускаемыми разрядниками Р-43, Р-48 и Р-49.

### **ГЛАВА 3. МЕХАНИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ РАЗРЯДНИКА-ОБОСТРИТЕЛЯ НА НАПРЯЖЕНИЕ ДО 400 КВ**

В данной главе рассматриваются основные факторы, определяющие механическую прочность элементов конструкции неуправляемых разрядников-обострителей, предназначенных для формирования импульсов напряжения амплитудой до 400 кВ с временами нарастания в доли наносекунды.

Разработка малогабаритных высоковольтных устройств с минимальными временами коммутации возможна только в газовых средах сверхатмосферного давления. Увеличение рабочего давления играет ключевую роль в повышении напряжения пробоя и сокращении времени развития разряда. Для работы разрядника-обострителя на напряжениях в сотни киловольт и токах в десятки килоампер давление рабочего газа достигает порядка сотен атмосфер. При таких высоких рабочих давлениях в приборе возникают значительные механические нагрузки на все элементы конструкции, поэтому при разработке таких приборов необходимо тщательно подбирать материалы, которые обеспечивают высокую механическую прочность разрядника и герметичность спаев металла с керамикой.

Очень важным элементом конструкции разрядника-обострителя является высоковольтный изолятор. С целью исключения пробоев по поверхности изолятора его протяжённость должна многократно превышать межэлектродный промежуток. Таких соотношений получается достичь при использовании изоляторов в форме усечённого конуса. В качестве материала для изготовления изоляторов применяется алюмооксидная керамика марки ВК94-1 (22ХС), обладающая высокой механической прочностью и обеспечивающая механически прочные и герметичные спаи с металлом.

Также необходимо учитывать технологический аспект производства приборов данного класса, в частности операцию по наполнению разрядника-обострителя рабочим газом. При выполнении данной технологической операции разрядники-обострители устанавливаются на пост наполнения, подключенный к

баллонам высокого давления или к компрессорной станции, обеспечивающих выходное давление на рампе (гребёнке) до 150 атмосфер. В случае ошибочных действий персонала или неисправности запорной арматуры наполняющий газ под таким давлением может попасть в разрядник-обостритель. В силу приведённых обстоятельств в нашем случае разрядники-обострители должны обладать необходимым запасом прочности для обеспечения безопасной эксплуатации в диапазоне избыточных давлений наполняющих газов вплоть до 150 атмосфер.

### 3.1 Основные элементы конструкции промышленно выпускаемых разрядников-обострителей серии РО-48, РО-43, РО-49, РО-72

Разрядники-обострители серии РО-48, РО-43, РО-49 и РО-72 работающие при напряжениях от 100 до 400 кВ, функционально имеют единую базовую конструкцию и отличаются друг от друга только геометрическими размерами элементов.

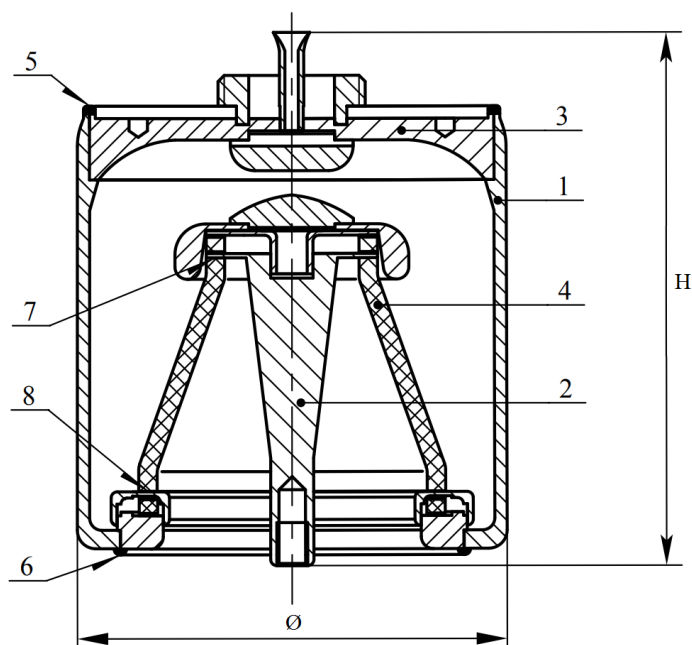


Рисунок 3.1 – Основные элементы базовой конструкции разрядника-обострителя

На рисунке 3.1 представлен схематический чертёж разрядника-обострителя РО-49. Корпус разрядника-обострителя образован металлическим цилиндром 1,

катодным 2 и анодным 3 узлами и керамическим конусным изолятором 4. Герметизация разрядника обеспечивается аргонодуговой сваркой (швы 5 и 6) и швами (7, 8), спаянными серебряным припоем ПСр72В.

Наименьшим по габаритным размерам в рассматриваемой серии разрядников-обострителей является разрядник РО-48, имеющий наружный диаметр корпуса  $\varnothing 40$  мм и высоту  $H = 69$  мм. Данный разрядник изготавливается на напряжение пробоя в диапазоне от 100 до 140 кВ.

Следующим в этой серии идёт разрядник РО-43, имеющий наружный диаметр корпуса  $\varnothing 50$  мм и высоту  $H = 85$  мм. Напряжение пробоя данного разрядника-обострителя находится в диапазоне от 140 до 190 кВ.

Самым востребованным в настоящее время является разрядник-обостритель РО-49 на рабочее напряжение до 250 кВ. Конструкция разрядника-обострителя РО-49 изображена на рисунке 3.2.

На рабочие напряжения от 250 кВ до 400 кВ разработан разрядник-обостритель РО-72 с диаметром корпуса  $\varnothing 85$  мм и высотой  $H = 115$  мм.

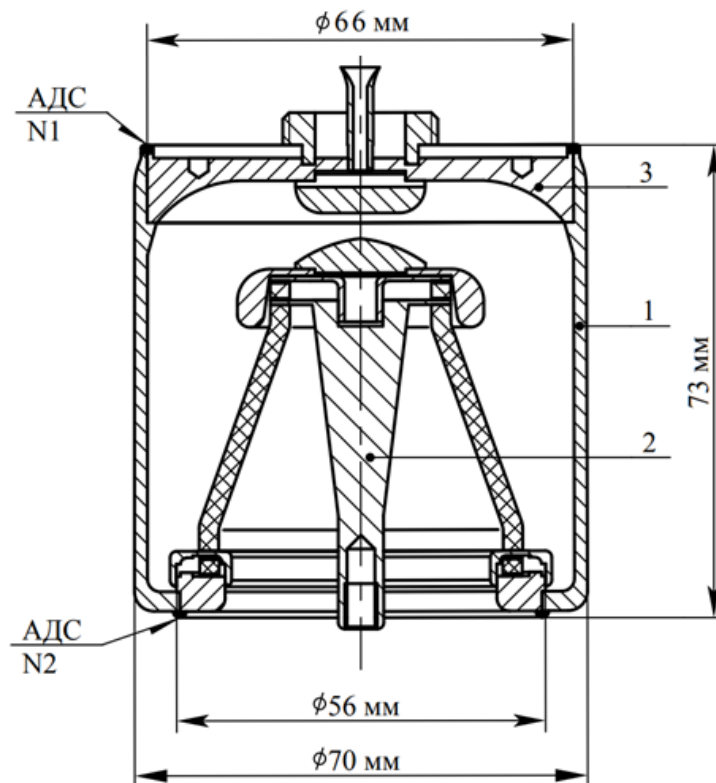


Рисунок 3.2 – Конструкция разрядника-обострителя РО-49

Корпус разрядника-обострителя РО-49 цилиндрической формы (наружный диаметр 70 мм, высота 73 мм) с толщиной стенки 2.2 мм выполнен из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т. Анодный узел 3 соединяется с корпусом 1 посредством шва N1, выполненного аргонодуговой сваркой. Катодный узел 2 соединён с корпусом 1 аргонодуговой сваркой (шов №2). В состав катодного узла входят: электрод из сплава ВНЖ-7-3; экран, переходная манжета, высоковольтный вывод и опорное кольцо из сплава 29 НК, а также конусный изолятор и два компенсатора из керамики марки ВК94-1 (22ХС). Детали катодного узла соединены посредством пайки припоем ПСр72В. Межэлектродный промежуток в разряднике устанавливается в пределах от 3,5 до 6 мм.

Расчёт механической прочности элементов конструкции разрядника-обострителя, на примере разрядника РО-49, производился методами расчёта прочности развитыми в курсах сопротивления материалов [87-90], а также методами проведения механических расчетов статического линейного и нелинейного анализа в САПР SolidWorks Simulation [93]. Экспериментальная проверка механической прочности элементов конструкции производилась методом гидравлического испытания.

### **3.2 Расчёт механической прочности элементов конструкции разрядника-обострителя РО-49 по аналитическим методам**

Оболочка разрядника, выполненная из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т, испытывает усилия на разрыв. Усилия на основания разрядника направлены на их отрыв от оболочки. Конусный керамический изолятор испытывает усилия на сжатие. Такие экстремальные усилия должны быть гарантированы прочностью конструкции.

Для расчёта механической прочности конструкции разрядника-обострителя первоначально были определены наиболее уязвимые места с точки зрения

возможного разрушения. Предельные значения механических усилий, приводящие к разрушениям цилиндрической оболочки, керамического изолятора и паянных швов, определялись по методикам расчёта, развитым в соответствующих курсах сопротивления материалов [87-92].

### 3.2.1 Механическая прочность корпуса разрядника-обострителя

Корпус разрядника представляет собой цилиндрическую тонкостенную оболочку постоянной толщины, находящуюся под действием осесимметричных нагрузок из-за наполнения внутреннего объёма прибора газом высокого давления. Кроме того, данную оболочку следует рассматривать как длинную, пренебрегая взаимным влиянием торцевых закреплений. Тонкостенные оболочки, у которых толщина стенок значительно меньше радиуса поверхности, как правило относят к длинным. Критерием выбора служит параметр оболочки  $k$  [91]:

$$k = \beta \cdot l = \frac{\sqrt[4]{3 \cdot (1 - \nu^2)}}{\sqrt{a \cdot h}} \cdot l \geq 3 \quad (3.1)$$

где  $\beta$  – коэффициент деформации срединной поверхности оболочки,  $\text{мм}^{-1}$ ;  $l$  – длина оболочки, мм;  $\nu$  – коэффициент Пуассона материала;  $a$  – радиус срединной поверхности (делит толщину стенки пополам), мм;  $h$  – толщина оболочки, мм.

Для оцениваемой оболочки корпуса, выполненной из стали 12Х18Н10Т коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$ , длина оболочки  $l = 50$  мм, радиус срединной поверхности  $a = 34$  мм и толщина оболочки  $h = 2,2$  мм.

$$k = \frac{\sqrt[4]{3 \cdot (1 - 0,3^2)}}{\sqrt{34 \cdot 2,2}} \cdot 50 = \frac{1,285}{8,25} \cdot 50 \approx 7,4 \geq 3$$

Т.к. коэффициент параметра оболочки  $k > 3$ , оболочку можно рассматривать как длинную тонкостенную.

На рисунке 3.3 представлена расчётная схема оболочки корпуса разрядника-обострителя. Рассмотрим бесконечно малый элемент  $ABCD$  поверхности корпуса, выделенный двумя меридиональными плоскостями  $M_1BAM$  и  $M_1CDM$  с углом  $d\varphi$  между ними и двумя плоскостями, перпендикулярными оси симметрии  $MM_1$ , одна

из которых пересекает поверхность оболочки по линии  $BC$ , а другая – по линии  $AD$ . Радиус кривизны поверхности элемента  $ABCD$  в меридиональной плоскости  $\rho_m = \infty$ , радиус её кривизны в плоскости, перпендикулярной меридиану, равен радиусу оболочки  $a = \rho_\theta$ .

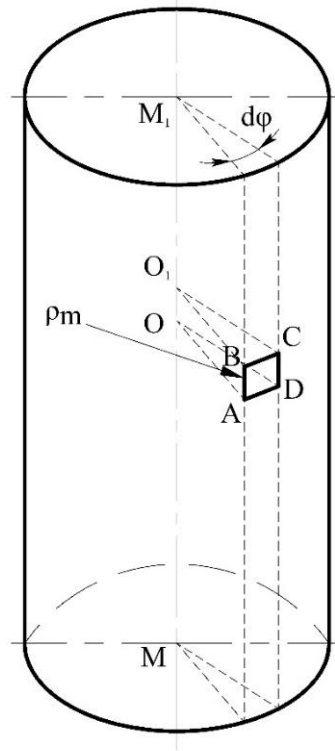


Рисунок 3.3 – Расчётная схема оболочки корпуса

Учитывая малую толщину и осевую симметрию оболочки можно пренебречь изгибом её поверхности и считать напряжения в её стенке равномерно распределёнными.

По боковым граням элемента  $AB$  и  $CD$ , совпадающим с меридиональными плоскостями, в силу симметрии оболочки и нагрузки касательные напряжения равны нулю, по этим граням действуют лишь нормальные напряжения  $\sigma_\theta$  (окружные напряжения).

Из закона парности касательных напряжений [88] следует, что касательные напряжения по боковым граням  $BC$  и  $AD$  также равны нулю, по этим граням действуют лишь нормальные напряжения  $\sigma_m$  (меридиональные напряжения).

Кроме напряжений  $\sigma_\theta$  и  $\sigma_m$  на элемент оболочки действует нагрузка в виде давления  $p$ , перпендикулярного поверхности  $ABCD$ .

Запишем условие равновесия элемента  $ABCD$  в виде суммы проекций, приложенных к нему сил на ось  $V$ , совпадающую с нормалью к его поверхности:

$$\sum V = p \cdot ds_1 \cdot ds_2 - 2(\sigma_\theta \cdot h \cdot ds_2) \cdot \sin\left(\frac{d\varphi_1}{2}\right) - 2(\sigma_m \cdot h \cdot ds_1) \cdot \sin\left(\frac{d\varphi_2}{2}\right) = 0, \quad (3.2)$$

где  $h$  – толщина оболочки.

В этом уравнении величина  $\sigma_\theta \cdot h \cdot ds_2$  представляет собой силу, действующую на каждую из боковых граней  $AB$  и  $CD$  элемента оболочки, а  $\sigma_m \cdot h \cdot ds_1$  – на каждую из боковых граней  $BC$  и  $AD$ . Величина  $2(\sigma_\theta \cdot h \cdot ds_2) \cdot \sin\left(\frac{d\varphi_1}{2}\right)$  равна проекции обеих сил  $\sigma_\theta \cdot h \cdot ds_2$ , а  $2(\sigma_m \cdot h \cdot ds_1) \cdot \sin\left(\frac{d\varphi_2}{2}\right)$  – проекции обеих сил  $\sigma_m \cdot h \cdot ds_1$  на ось  $V$ .

Вследствие малости углов  $\sin\left(\frac{d\varphi_1}{2}\right) = \frac{d\varphi_1}{2} = \frac{ds_1}{2\rho_\theta}$ , аналогично  $\sin\left(\frac{d\varphi_2}{2}\right) = \frac{d\varphi_2}{2} = \frac{ds_2}{2\rho_m}$ .

Тогда уравнение равновесия элемента  $ABCD$  преобразуется к виду:

$$\frac{\sigma_\theta}{\rho_\theta} + \frac{\sigma_m}{\rho_m} = \frac{p}{h}, \quad (3.3)$$

где  $p$  – давление, кгс/см<sup>2</sup>.

В общем случае для нахождения неизвестных  $\sigma_\theta$  и  $\sigma_m$  требуется дополнительное уравнение. Однако для оболочки, имеющей форму цилиндра или конуса, из данного уравнения можно определить  $\sigma_\theta$ , так как в этих случаях  $\rho_m = \infty$  (образующая оболочки вращения представляет собой прямую линию), а соответственно,

$$\frac{\sigma_m}{\rho_m} = 0, \quad \sigma_\theta = \frac{p \cdot \rho_\theta}{h}. \quad (3.4)$$

Таким образом, выражение для определения напряжения  $\sigma_\theta$ , возникающего в корпусе разрядника-обострителя, можно представить в виде

$$\sigma_\theta = p \cdot \left(\frac{R}{h}\right). \quad (3.5)$$

где  $p$  – рабочее давление, кгс/см<sup>2</sup>;  $R$  – средний радиус корпуса, мм;  $h$  – толщина стенки, мм.





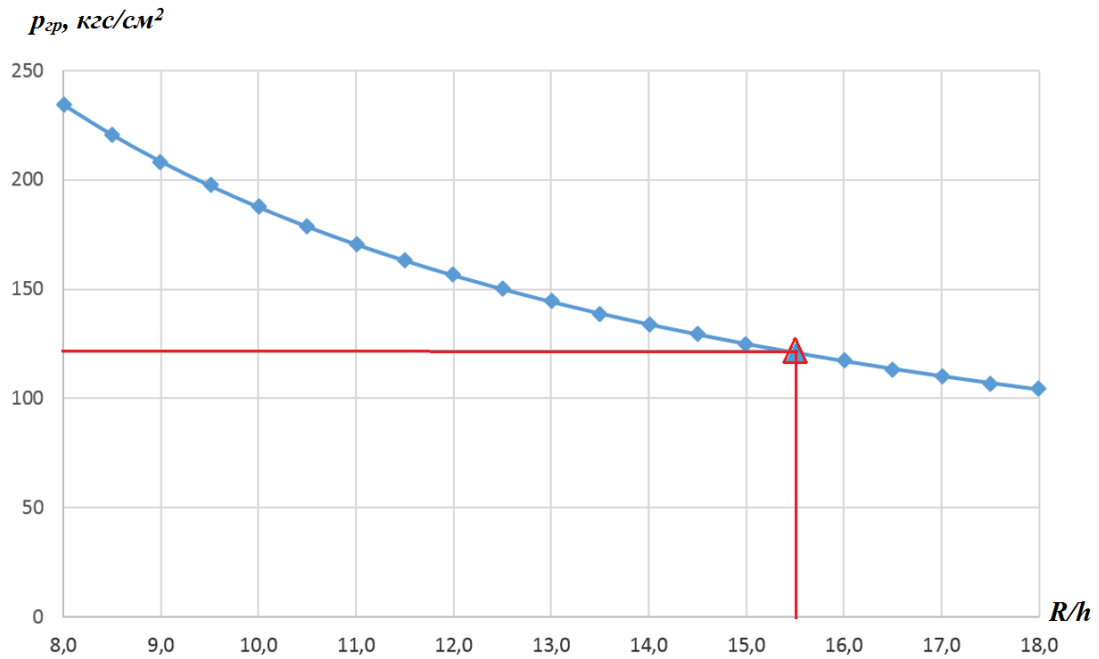


Рисунок 3.4 – Расчётный график зависимости предельного давления  $p_{гр}$  на корпусе от отношения среднего радиуса корпуса  $R$  к толщине стенки  $h$

Таким образом можно сделать вывод, что в разряднике РО-49 при среднем радиусе корпуса  $R = 34$  мм минимальная толщина стенки должна быть 2,2 мм, чтобы выдерживать внутренние рабочие давления в 120 атмосфер. Для эксплуатации разрядника-обострителя с давлением наполняющего газа от 120 атмосфер и выше необходимо увеличивать толщину стенки или уменьшать средний радиус корпуса.

Данный расчёт согласуется с расчётной толщиной стенки  $S_p$  цилиндрической обечайки, нагруженной внутренним избыточным давлением 120 атмосфер, определённой по п.п. 5.3.1.1 ГОСТ 34233.2-2017

$$S_p = \frac{p \cdot D}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi - p} = \frac{120 \cdot 66}{2 \cdot 1876 \cdot 1 - 120} = 2,18 \text{ мм}, \quad (3.10)$$

где  $D$  – внутренний диаметр (для разрядника РО-49 составляет 66 мм),  $\varphi$  – коэффициент прочности сварных швов (в нашем случае равен 1, т.к. сварной шов отсутствует).

### 3.2.2 Механическая прочность керамического конусного изолятора разрядника-обострителя

Что касается прочности керамического конусного изолятора, входящего в состав катодного узла и образующего внутреннюю поверхность оболочки разрядника, то он работает на сжатие. Его можно также рассматривать как длинную оболочку и оценить прочность по аналогичной методике, развитой для определения прочности цилиндрической оболочки.

Для алюмооксидной керамики марки ВК94-1 (22ХС) предел прочности при статическом изгибе  $[\sigma_B]$  составляет 3200 кгс/см<sup>2</sup> [92].

Расчёты прочности изолятора производятся в соответствии с выражением

$$p \leq p_{из} = \frac{[\sigma_B]}{(R_{из}/h_{из})}, \quad (3.11)$$

где  $p$  – рабочее давление, кгс/см<sup>2</sup>;

$p_{из}$  – предельно допустимое давление для изолятора, кгс/см<sup>2</sup>;

$R_{из}$  – радиус основания изолятора, мм;

$h_{из}$  – толщина стенки изолятора, мм.

График зависимости  $p_{из} = \frac{[\sigma_B]}{(R_{из}/h_{из})}$  в интервале  $5 \leq \frac{R_{из}}{h_{из}} \leq 15$  показан на рисунке 3.5.

Значения предельного давления для изолятора  $p_{из}$  от отношения  $\frac{R_{из}}{h_{из}}$  представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Значения предельного давления для изолятора  $p_{из}$  от отношения  $\frac{R_{из}}{h_{из}}$

$R_{из}/h_{из}$	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$p_{из}, \text{кгс/см}^2$	640	533,3	457,1	400	355,6	320	290,9	266,7	246,2	228,6	213,3

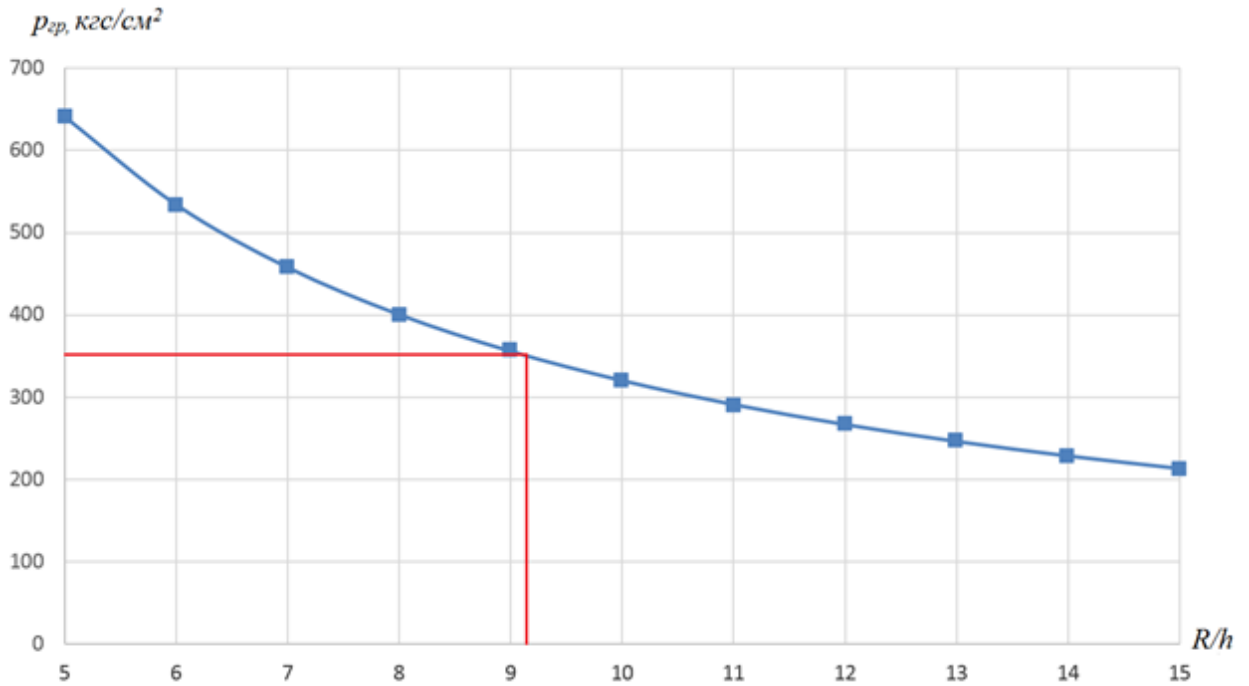


Рисунок 3.5 – Расчётный график зависимости предельно допустимого давления  $p_{из}$  для изолятора от отношения радиусу основания изолятора  $R_{из}$  к толщине стенки  $h_{из}$

Радиус основания изолятора в разряднике-обострителе РО-49  $R_{из} = 23$  мм, толщина стенки изолятора  $h_{из} = 2,5$  мм, таким образом  $\frac{R_{из}}{h_{из}} = \frac{23}{2,5} = 9,2$ . Как можно увидеть из графика, керамический изолятор обладает достаточным запасом механической прочности и способен выдерживать внутреннее давление в разряднике более 350 атмосфер.

### 3.2.3 Механическая прочность сварных швов в разряднике-обострителе

Герметичность корпуса и его механическая прочность обеспечивается двумя швами, выполненными аргонодуговой сваркой. В сварном шве возникают усилия среза. В предположении их равномерного распределения можно записать [87]

$$\tau = \frac{Q}{F} \leq [\sigma] \cdot \varphi, \quad (3.12)$$

где  $\tau$  – расчётное касательное напряжение среза, кгс/см<sup>2</sup>;

$Q$  – усилие среза, кгс;

$F$  – площадь поперечного сечения шва, см<sup>2</sup>;

$[\sigma]$  – допускаемое напряжение стали 12Х18Н10Т (184 МПа = 1876 кгс/см<sup>2</sup>);

$\varphi$  – коэффициент прочности  $\varphi$  стыковых сварных швов.

Усилие среза  $Q$ , возникающее под действием внутреннего давления:

$$Q = p \cdot \pi \cdot R_{ш}^2, \quad (3.13)$$

где  $p$  – давление внутри разрядника, кгс/см<sup>2</sup>,

$R_{ш}$  – радиус сечения шва АДС, см.

Площадь  $F$  поперечного сечения шва АДС:

$$F = 2 \cdot t \cdot \pi \cdot R_{ш}, \quad (3.14)$$

где  $t$  – глубина сварочного шва, см.

Таким образом выражение (3.12) для расчётного касательного напряжения среза  $\tau$  преобразуем к виду

$$\frac{p \cdot R_{ш}}{2 \cdot t} \leq [\sigma] \cdot \varphi, \quad (3.15)$$

откуда

$$p \leq \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi}{\left(\frac{R_{ш}}{t}\right)}. \quad (3.16)$$

Тогда условие прочности сварочных швов приобретает вид

$$p \leq p_{ш} = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi}{\left(\frac{R_{ш}}{t}\right)}. \quad (3.17)$$

В разряднике РО-49 радиус сечения верхнего шва АДС  $R_{шв} = 3,3$  см, нижнего шва АДС  $R_{шн} = 2,8$  см, глубина сварочных швов  $t = 0,1$  см. В соответствии с таблицей Д1 приложения Д ГОСТ34233.1-2017 (стр.27) коэффициент прочности  $\varphi$  стыковых сварных швов, выполняемых автоматической и полуавтоматической сваркой с одной стороны, для сосудов и аппаратов из стали и сплавов на железоникелевой основе соответствует  $0,9 \cdot [\sigma]$ .

Тогда для верхнего шва АДС отношение  $\frac{R_{шв}}{t} = 33$ , для нижнего шва АДС  $\frac{R_{шн}}{t} = 28$ .

Графики зависимости допустимого давления от отношения  $\frac{R}{t}$  в диапазоне  $25 \leq \frac{R_{ш}}{t} \leq 35$  приведены на рисунке 3.6. Значения допустимого давления сварочных швов  $P_{ш}$  от отношения  $\frac{R}{t}$  представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Значения допустимого давления сварочных швов  $P_{ш}$  от отношения  $\frac{R}{t}$

$R_{ш}/t$	25	25,5	26	26,5	27	27,5	28	28,5	29	29,5
$P_{ш}, \text{кгс/см}^2$	135,04	132,39	129,85	127,4	125,04	122,76	120,57	118,46	116,41	114,44
30	30,5	31	31,5	32	32,5	33	33,5	34	34,5	35
112,53	110,69	108,9	107,17	105,5	103,88	102,3	100,78	99,29	97,86	96,46

Из графика на рисунке 3.6 видно, что при глубине сварочных швов  $t = 0,1$  см предельно допустимое давление для нижнего шва АДС  $R_{шн} = 2,8$  см (зелёный цвет) соответствует 120 атмосферам, а для радиуса сечения верхнего шва АДС  $R_{шв} = 3,3$  см (красный цвет) – только 102 атмосферы.

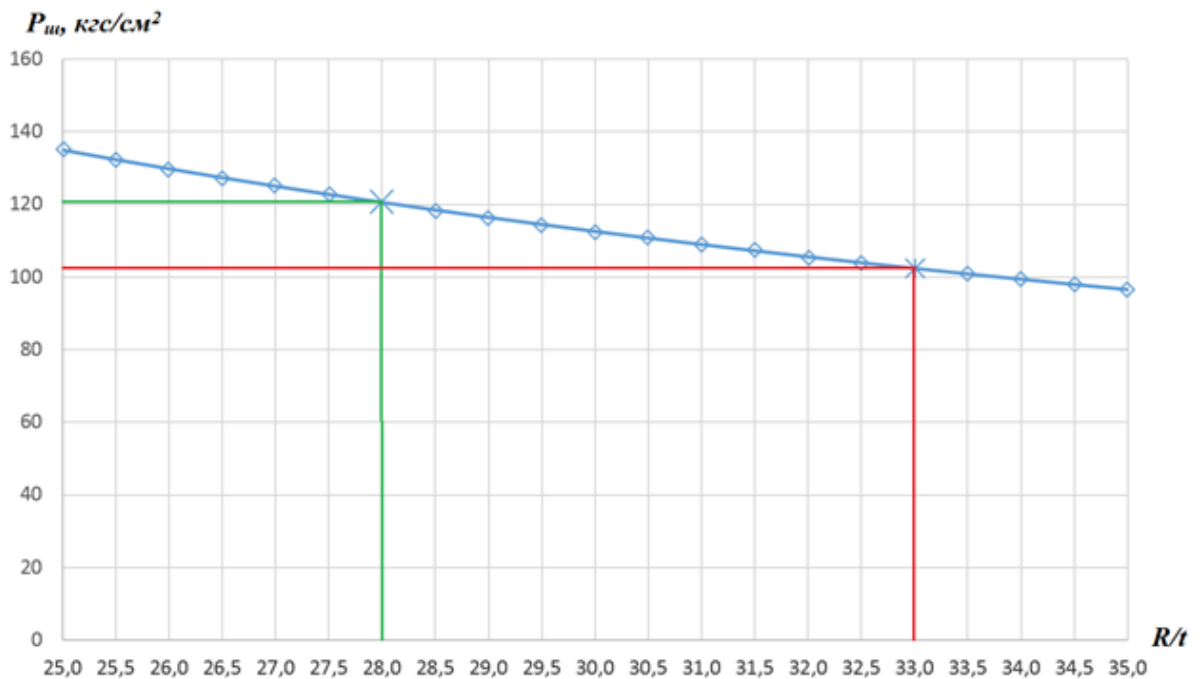


Рисунок 3.6 – Расчётный график зависимости предельно допустимого давления  $p_{ш}$  на аргонодуговой шов от отношения радиуса сечения шва  $R_{ш}$  к глубине сварочного шва  $t$

Соответственно конструкция разрядника-обострителя не может эксплуатироваться при внутренних рабочих давлениях до 120 атмосфер, т.к. верхний сварной шов не обладает необходимой механической прочностью.

### 3.2.4 Введение в конструкцию разрядника-обострителя резьбового соединения анодного узла с корпусом

Для увеличения прочности верхнего шва АДС №1 в разряднике-обострителе РО-49 было предложено ввести дополнительное резьбовое соединение М65х1,5 анодной ножки с корпусом (рисунок 3.7).

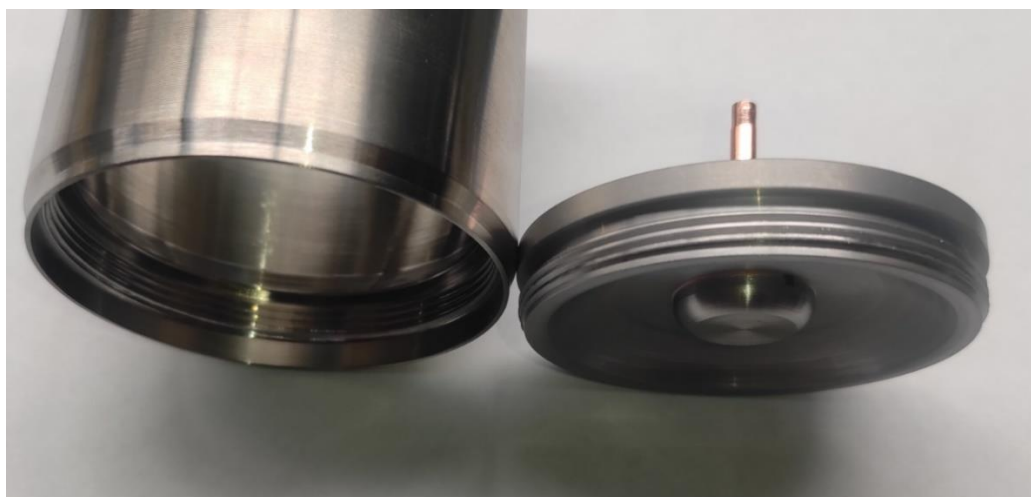


Рисунок 3.7 – Резьбовое соединение анодной ножки (крышки) с корпусом

Оценим прочность резьбового соединения ножки анода 1 с корпусом 2, служащего дополнительным фактором обеспечения прочности шва АДС. Рассмотрим условие разрушения резьбы – среза её витков.

Усилие, вызывающее срез витков  $Q_p$  [87]

$$Q_p = 2 \cdot \pi \cdot R_p \cdot k \cdot k_m \cdot l \cdot [\sigma], \quad (3.18)$$

где  $R_p$  – радиус резьбы, см;

$k$  – коэффициент полноты резьбы (для метрической резьбы 0,87);

$k_m$  – коэффициент, учитывающий неравномерность деформаций витков по длине свинчивания (принимается 0,6);

$l$  – длина свинчивания, см (в случае разрядника РО-49  $l = 0,5$  см);

$[\sigma]$  – допускаемое напряжение, кгс/см<sup>2</sup> (для стали 12Х18Н10Т соответствует 184 МПа или 1876 кгс/см<sup>2</sup>).

Под действием внутреннего давления  $p$  возникает усилие среза (фактическое):

$$Q'_p = \pi \cdot R_p^2 \cdot p. \quad (3.19)$$

Условие прочности резьбового соединения анодного узла на срез витков имеет вид

$$\frac{Q_p}{Q'_p} \geq 1. \quad (3.20)$$

$$\frac{Q_p}{Q'_p} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R \cdot k \cdot l \cdot k_m \cdot [\sigma]}{\pi \cdot R_p^2 \cdot p} = \frac{2 \cdot k \cdot k_m \cdot [\sigma]}{p \cdot \left(\frac{R_p}{l}\right)} \geq 1.$$

Выражение для определения предельного давления на резьбу  $p_p$

$$p_p \leq \frac{2 \cdot k \cdot k_m \cdot [\sigma]}{\left(\frac{R_p}{l}\right)}. \quad (3.21)$$

При радиусе резьбы  $R_p = 3,25$  см и длине свинчивания  $l = 0,5$  см получаем отношение радиуса резьбы к длине свинчивания  $\frac{R_p}{l} = 6,5$ .

График зависимости предельно допустимого давления  $p_p$  на резьбовое соединение от отношения радиуса резьбы  $R_p$  к длине свинчивания  $l$  в интервале  $3 \leq \frac{R_p}{l} \leq 8$  показан на рисунке 3.8. Значения предельного давления на резьбу  $p_p$  от отношения радиуса резьбы  $R_p$  к длине свинчивания  $l$  представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Значения предельного давления на резьбу  $p_p$  от отношения радиуса резьбы  $R_p$  к длине свинчивания  $l$

$R_p/l$	3	4	5	6	7	8
$p_p$ , кгс/см <sup>2</sup>	653	489,8	391,8	326,5	279,9	244,9



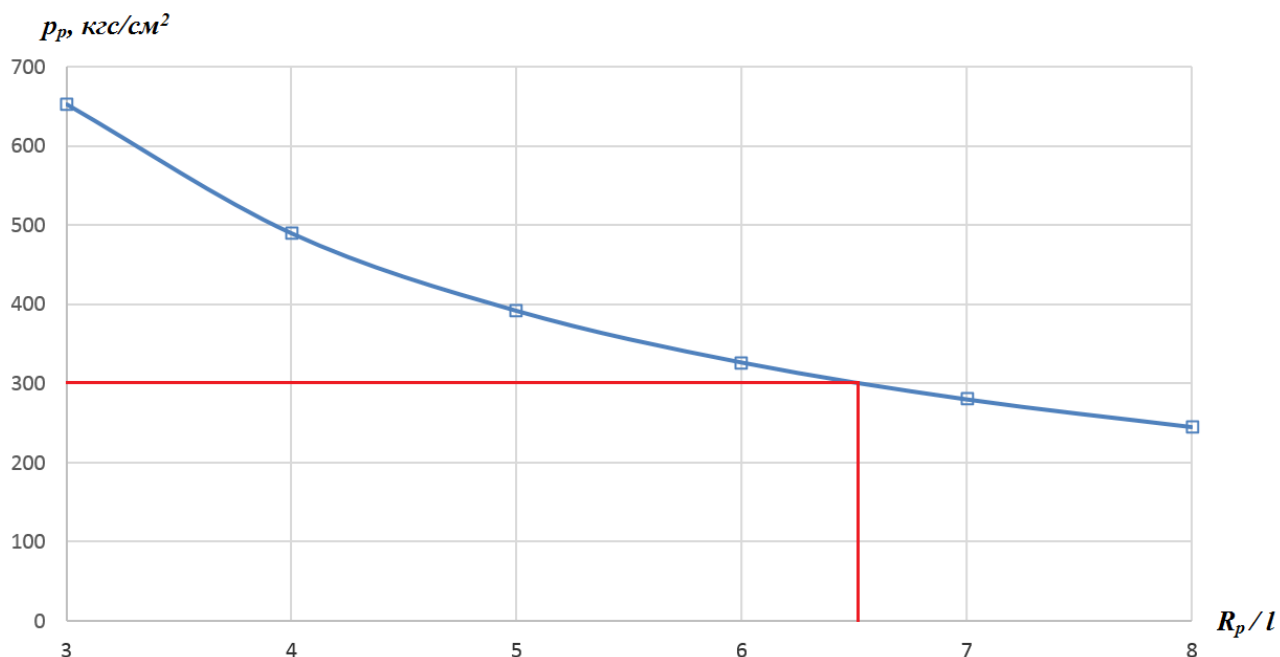


Рисунок 3.8 – Расчётный график зависимости предельно допустимого давления  $p_p$  на резьбовое соединение от отношения радиуса резьбы  $R_p$  к длине свинчивания  $l$

Из графика на рисунке 3.8 видно, что резьбовое соединение М65х1,5 анодной ножки с корпусом в разряднике РО-49 способно выдерживать внутреннее давления до 300 атмосфер.

Таким образом можно сделать вывод, что использование дополнительного резьбового соединения анодного узла с корпусом в разряднике-обострителе увеличивает механическую прочность изделия по сравнению с использованием только сварного соединения данных узлов и позволяет эксплуатировать разрядник-обостритель при внутренних рабочих давлениях до 120 атмосфер.

Дополнительным фактором прочности конструкции разрядника в месте соединения катодного узла с корпусом разрядника служит упор катодного узла за счёт превышения диаметра его основания по отношению к диаметру торцевого отверстия корпуса-оболочки (рисунок 3.9).

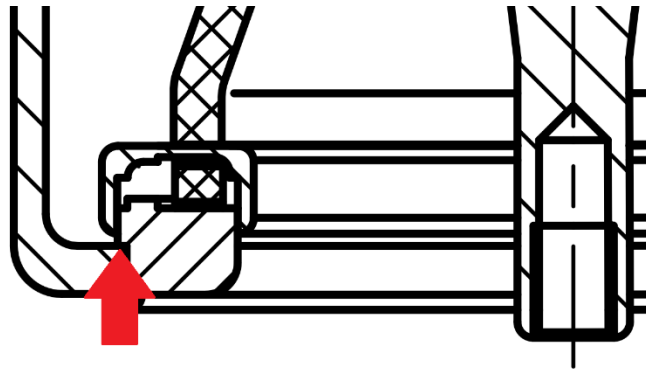


Рисунок 3.9 – Дополнительный упор катодного узла

Наиболее полная информация о механических напряжениях в конструкции разрядника-обострителя была получена в результате проведения механических расчетов с использованием численного моделирования в САПР SolidWorks Simulation [93].

### **3.3 Расчёт механической прочности элементов конструкции разрядника-обострителя РО-49 с использованием численного моделирования в САПР SolidWorks Simulation**

Для расчета напряженно-деформированного состояния основных узлов разрядника-обострителя удобно применять численные методы, успешно реализованные в специализированных CAD/CAE системах. Для решения задач расчета механической прочности элементов конструкции приборов использовалась программа SolidWorks Simulation [93], которая позволяет осуществить анализ методом конечных элементов (МКЭ) для виртуального тестирования CAD-моделей, провести линейный статический, нелинейный статический и динамический анализ, спрогнозировать поведение изделий в условиях реальной эксплуатации.

Исходными данными для проведения анализа являются: CAD модель рассматриваемой конструкции; материалы элементов конструкции; действующие механические или термические нагрузки; условия взаимодействия между отдельными элементами в конструкции; ограничения движения всей модели.

По условиям задачи необходимо оценить механическое воздействие внутреннего давления в разряднике на оболочку прибора. Исходя из данного условия моделируемой нагрузкой является давление, заданное по всей внутренней поверхности прибора.

Основными моментами, на которые стоит обратить внимание при построении численной модели действия механической нагрузки внутри разрядника, являются сетка конечных элементов и условия взаимодействия между составляющими частями прибора.

По условиям взаимодействия между отдельными элементами в конструкции наибольший интерес представляют места соединений катодного и анодного узлов с корпусом разрядника, т.е. сварные швы.

Основными результатами, получаемыми при численном моделировании, являются механические напряжения, перемещения и деформации, рассчитанные и отображаемые в узлах сетки конечных элементов, накладываемой на 3D модель. Точность получаемых результатов главным образом определяется параметрами сетки конечных элементов, к которым относятся размеры сетки, коэффициент масштабирования и уровень разрешения мелких элементов модели.

Посредством нескольких итераций необходимо прийти к варианту сетки конечных элементов обеспечивающему высокую сходимость.

### **3.3.1 Моделирование напряженно-деформированного состояния разрядника-обострителя РО-49 без резьбы с помощью линейного анализа**

Рассмотрим конструкцию разрядника обострителя РО-49 в которой нет дополнительного усиления, образованного резьбовым соединением анодной крышки с корпусом прибора. 3D модель этой конструкции представлена на рисунке 3.10.

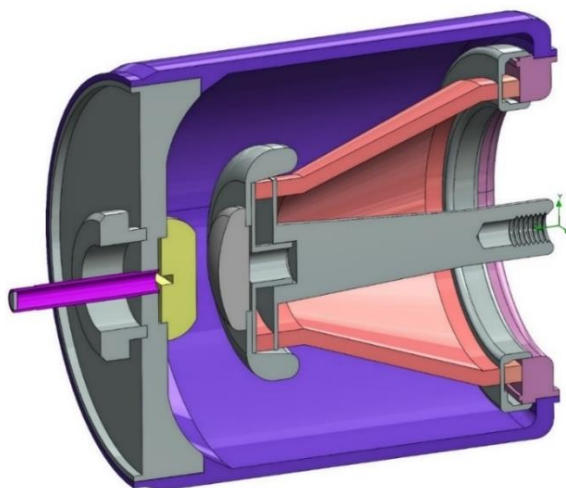


Рисунок 3.10 – 3D модель разрядника-обострителя РО-49 без резьбы

Для рассматриваемого случая нагрузкой являлось давление рабочего газа внутри объема разрядника. Большая часть площади внутренней поверхности относилась к поверхности керамического изолятора и корпуса разрядника.

В первом приближении расчета напряженно-деформированного состояния задавалась нагрузка давлением на указанные поверхности, величина которого составляла 120 атмосфер. Также в первом приближении условно принималось, что все детали по сопрягаемым поверхностям имели жесткую связь, т.е. конструкция прибора рассматривалась как единое целое.

Для построения сетки конечных элементов использовалось предопределенное разбиение на основе кривизны элементов модели. Максимальный и минимальный размер элементов принимались 5 и 0,1 мм, а для коэффициента Якобиана использовали 16 точек внутри каждого элемента [94].

Для выбранного типа сетки конечных элементов, с учетом их максимальных и минимальных размеров, около 95% процентов ее элементов имели соотношение сторон не более 5. Сетка конечных элементов для численного расчета напряженно-деформированного состояния в первом приближении представлена на рисунке 3.11.

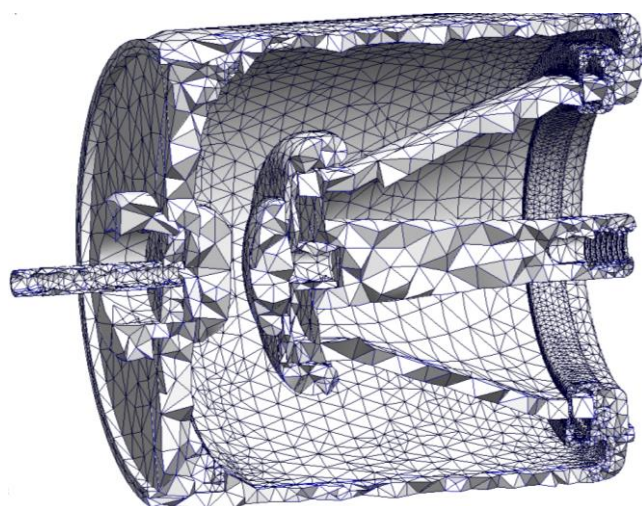


Рисунок 3.11 – Сетка конечных элементов для расчета в 1-ом приближении

Для более наглядного представления модуль Simulation позволяет строить эюру качества сетки и проводить ее диагностику. Качество сетки является ключевым элементом, который напрямую определяет точность получаемых результатов.

На рисунке 3.12 показана эюра качества сетки на основе пропорции кромок элементов, где в качестве граничного условия принималось значение 5.

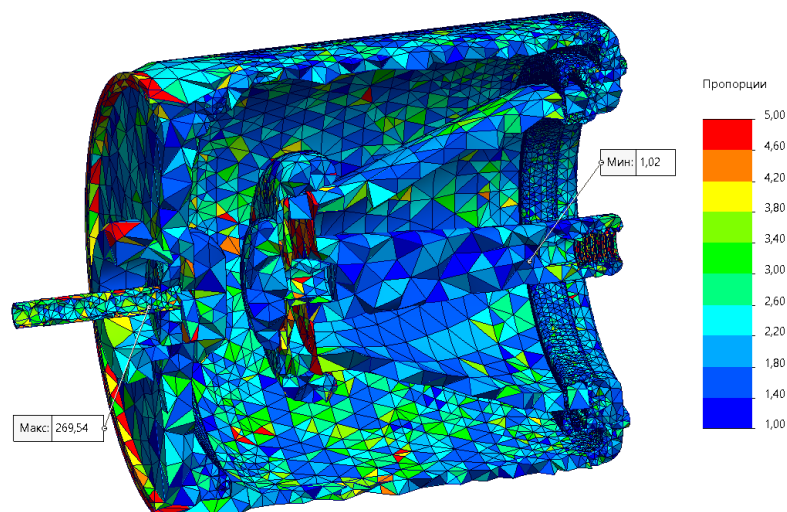


Рисунок 3.12 – Эюра качества сетки в режиме отображений пропорции сторон элементов

На рисунке 3.13 представлена эюра качества сетки построенная на основе коэффициента Якобиана для каждого сеточного элемента.

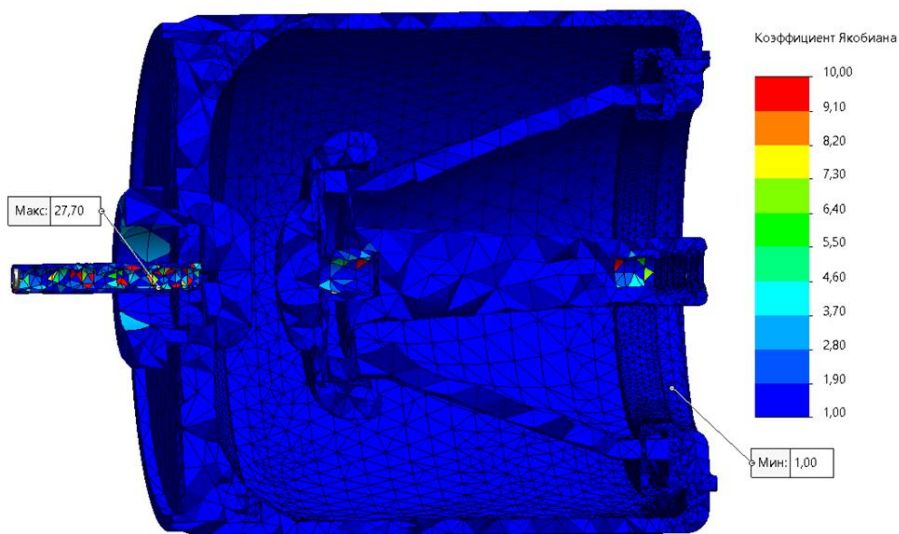


Рисунок 3.13 – Эпюра качества сетки на основе коэффициента Якобиана

Представленные на рисунке 3.12 и рисунке 3.13 эпюры указывают на хорошее качество сетки, а зоны конечно-элементной модели, в которой коэффициент или пропорция выходят за пределы допустимых, не относятся к ответственным узлам разрядника.

Для более детального рассмотрения участков конечно-элементной модели с искаженными сеточными элементами инструменты Simulation позволяют выполнить диагностику качества сетки и визуализировать элементы сеток, для которых коэффициент Якобиана или пропорция соотношения сторон выходят за установленные пределы. На рисунке 3.14 представлены результаты диагностики качества сетки, выполненные в режиме отображения по пропорции и по коэффициенту Якобиана.

Анализируя представленные на рисунках 3.12 - 3.14 эпюры качества и диагностики сетки можно прийти к выводу, что основная часть искаженных элементов с соотношением больше 5 была расположена в зоне сварного соединения анодного узла и корпуса разрядника, а также в катодном узле на манжете и выводе.

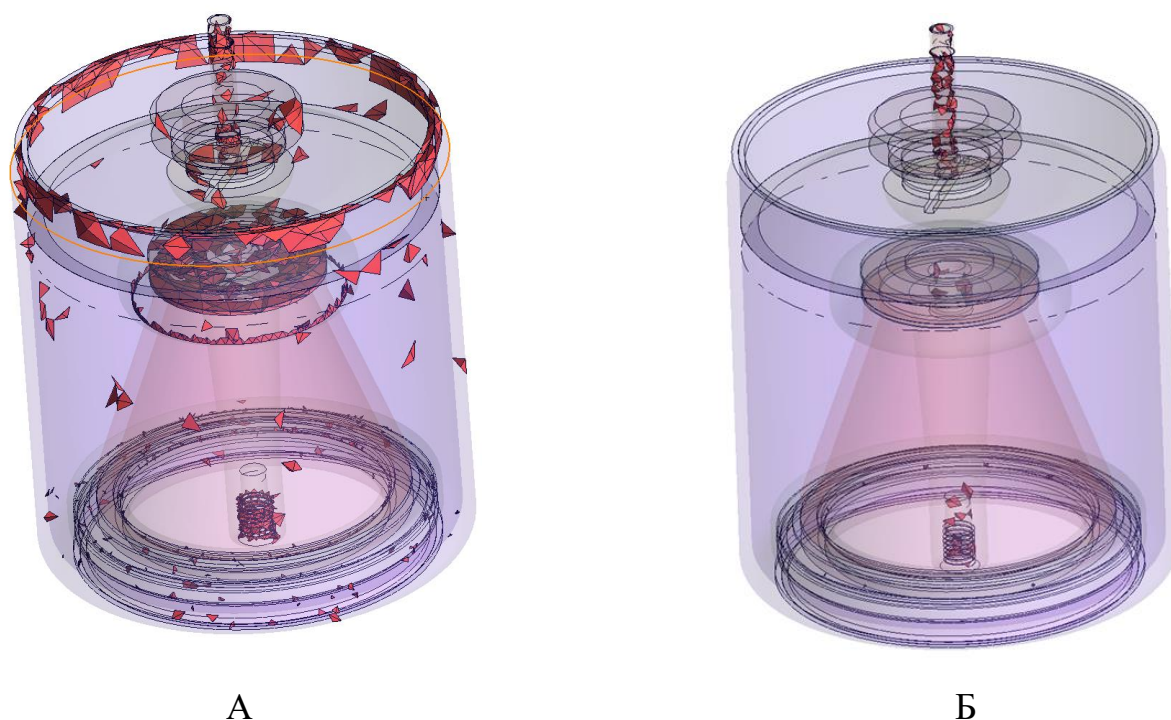


Рисунок 3.14 – Эпюра расположения искаженных сеточных элементов по пропорции соотношения сторон (А) и по коэффициенту Якобиана (Б)

Из всех перечисленных участков прибора наиболее опасным являлась зона сварного шва, поэтому для повышения точности расчетов в последующих итерациях необходимо уменьшить размер элементов сетки для этой области разрядника.

Для второй итерации расчета механических напряжений были изменены параметры сетки конечных элементов с целью их сгущения в критических областях, а именно в области сварного шва со стороны анодного узла.

На рисунке 3.15 представлены изображения сетки конечных элементов и эпюра диагностики качества сетки, построенная на основе пропорции.

Вторая итерация и сгущение сетки в области сварного шва со стороны анода позволили полностью исключить искаженные элементы в этой области разрядника-обострителя.

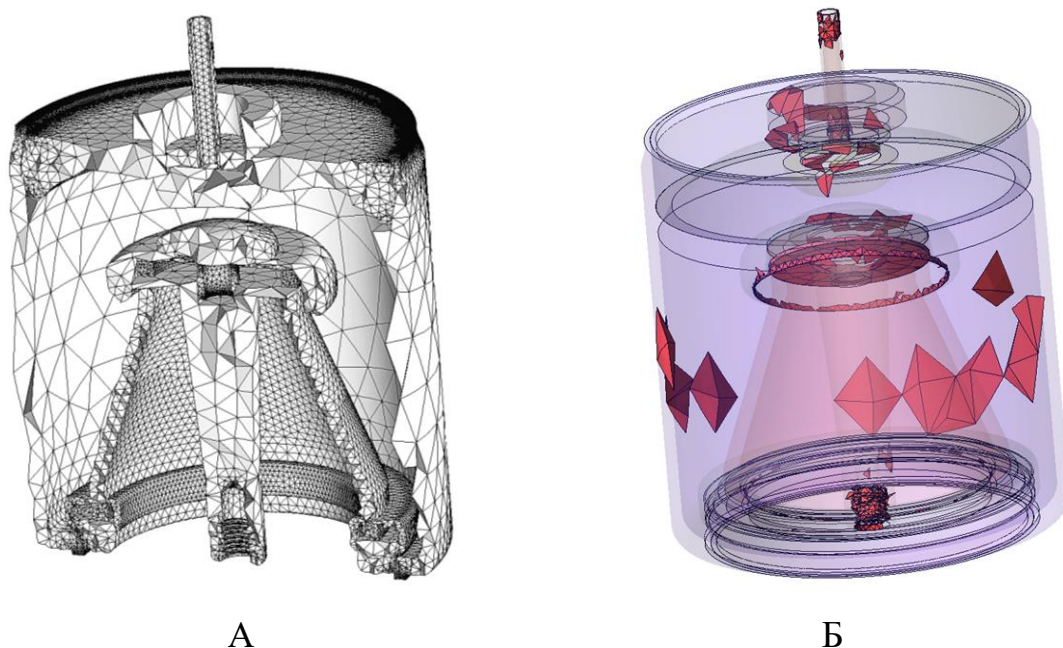


Рисунок 3.15 – Сетка конечных элементов для 2-й итерации расчета (А) и эпюра расположения искаженных сеточных элементов по пропорции соотношения сторон на 2-й итерации (Б)

Для третьей итерации расчета механических напряжений в разряднике было вновь выполнено изменение настроек сетки с целью исключения искаженных элементов сетки в корпусе и области катодного узла. Для этого были уменьшены максимальные размеры элемента с 5 мм до 2 мм. На рисунке 3.16 приведена эпюра диагностики качества сетки по пропорции соотношения сторон.

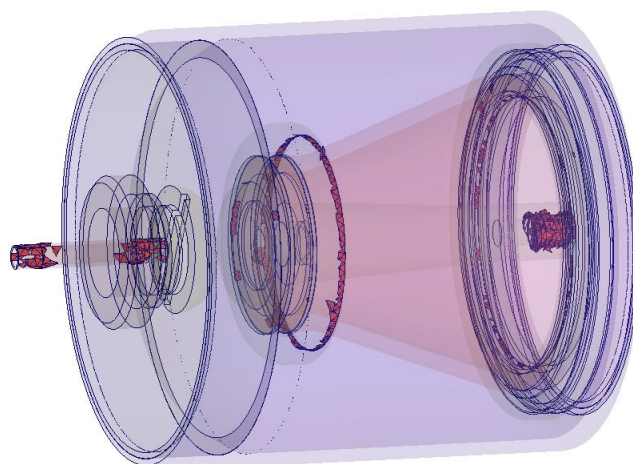


Рисунок 3.16 – Эпюра расположения искаженных сеточных элементов по пропорции соотношения сторон на 3-й итерации



Результаты указывают на практически полное отсутствие искаженных элементов в корпусе разрядника, в области сварных швов анодного и катодного узлов. Таким образом можно сделать утверждение, что сетка на 3-й итерации расчета была максимально приближена к идеальной и способна обеспечить высокую точность вычисления механических напряжений во всех узлах модели разрядника.

Результаты моделирования нагрузки избыточным давлением 120 атмосфер в виде эпюры напряжений представлены на рисунке 3.17.

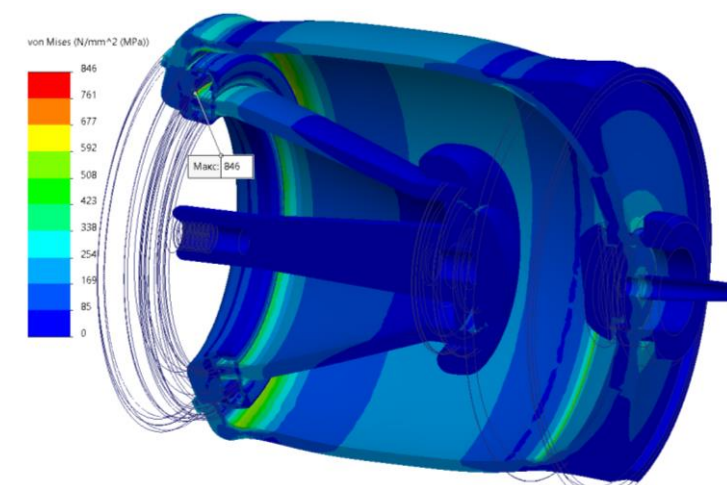


Рисунок 3.17 – Эпюра напряжений в разряднике на 3-й итерации расчета

Максимальные напряжения в конструкции имели величину порядка 846 МПа (8627 кгс/см<sup>2</sup>). Анализируя представленную эпюру можно сделать вывод, что в некоторых частях разрядника напряжения превышали значения предела текучести материала. Так, для стали 12Х18Н10Т, из которой выполнен корпус разрядника, предел текучести варьируется в пределах 196÷235 МПа (1999÷2396 кгс/см<sup>2</sup>), а для сплава 29НК, из которого выполнены анодный и катодный узлы, предел текучести составляет 490÷610 МПа (4997÷6220 кгс/см<sup>2</sup>) [91, 92].

На рисунках 3.18 и 3.19 приведены эпюры напряжений в основных узлах конструкции разрядника выполненных из указанных материалов. На эпюрах

красным цветом отражены области в которых напряжения превышали пределы текучести для стали 12Х18Н10Т и для сплава 29НК.

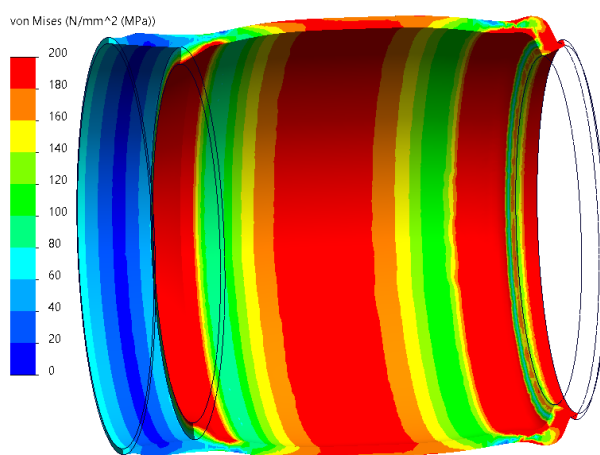


Рисунок 3.18 – Эпюра напряжений в корпусе разрядника (12Х18Н10Т)

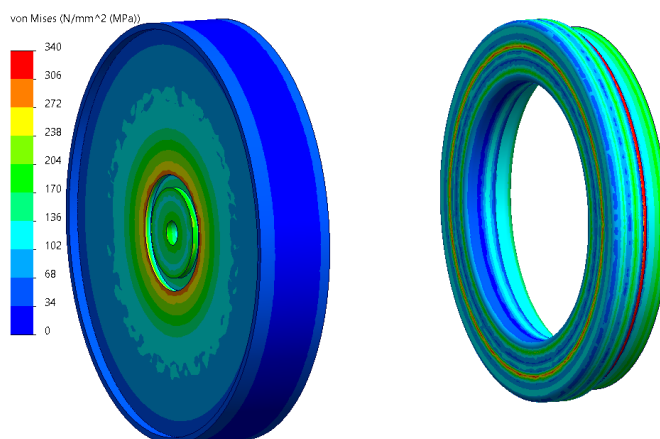


Рисунок 3.19 – Эпюра напряжений в анодном узле и катодном кольце (29НК)

Указанные значения напряжений соответствуют границам, в пределах которых деформации считаются упругими – выполняется линейный закон Гука. В случае превышения предела текучести материала деформации переходят в пластические и применение статического анализа для оценки напряженно-деформированного состояния при моделировании является некорректной постановкой задачи. В этом случае при моделировании необходимо было применять метод нелинейного анализа, который позволял оценить напряжения и деформации с учетом пластичности материала, с последующим достижением

предела его прочности и как следствие разрушения. В зависимости от требований по надежности изделия превышение предела текучести может являться недопустимым и будет трактоваться как несоответствие требованиям установленного стандарта, что эквивалентно его разрушению. Для визуализации критических областей к разрушению на рисунке 3.20 приведена эпюра распределения коэффициента запаса прочности.

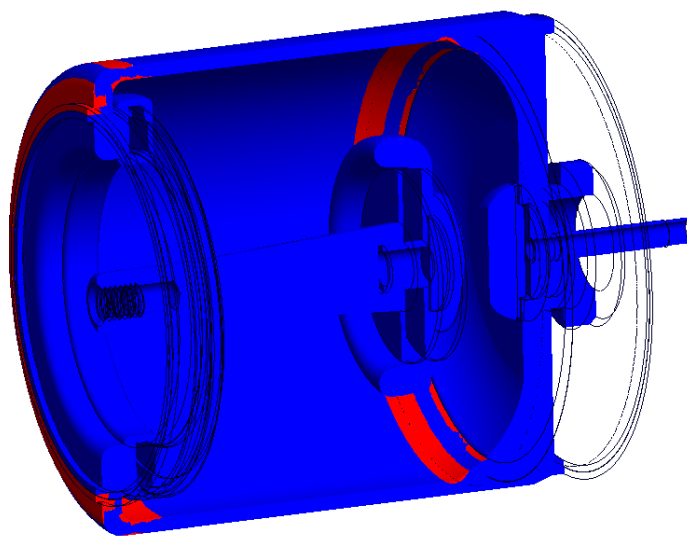


Рисунок 3.20 – Эпюра распределения коэффициента запаса прочности, полученная на основе рассчитанных напряжений

Коэффициент запаса прочности показывает во сколько раз допустимые для разрядника напряжения меньше разрушающих, определённой расчётным или экспериментальным путём. На эпюре красным выделены области с коэффициентом запаса меньше 1, а синим – больше 1. Такой вариант представления эпюры эквивалентен условию, когда возникающие напряжения в красных областях больше предела текучести материалов, а именно, стали 12Х18Н10Т и сплава 29НК, что равнозначно началу развития их разрушения.

Таким образом, по итогам предварительного моделирования можно сделать вывод, что данная конструкция разрядника РО-49 неспособна выдержать требуемую нагрузку в 120 атмосфер. Также из результатов следует, что для корректной оценки напряженно-деформированного состояния необходимо переходить от статического к нелинейному анализу для учета пластических

свойств материалов при достижении предела текучести. Помимо этого, выполнено уточнение параметров сетки конечных элементов, для обеспечения разрешения мелких особенностей модели и высокой сходимости результатов (точность расчетов), определены условия задания нагрузки.

### 3.3.2 Моделирование напряженно-деформированного состояния разрядника-обострителя РО-49 без резьбы с помощью нелинейного анализа

Для перехода к следующему этапу моделирования, в соответствии со сделанными ранее выводами, был внесён ряд изменений в расчетную модель разрядника. Во-первых, необходимо было определить кривые напряженно-деформированного состояния материалов за пределами их упругих свойств для проведения нелинейного анализа. Во-вторых, требовалось детализировать условия взаимодействия между компонентами в области сварных швов со стороны анодных и катодных узлов, поскольку данные области являлись критическими в оценке прочности конструкции разрядника.

Для определения сварных швов в области катодного и анодного узлов в сборку был добавлен элемент, который имитировал сварное соединение между соответствующими деталями. На рисунке 3.21 представлены изображения областей, имитирующие соединения катодного и анодного сварных швов, с сеткой конечных элементов.

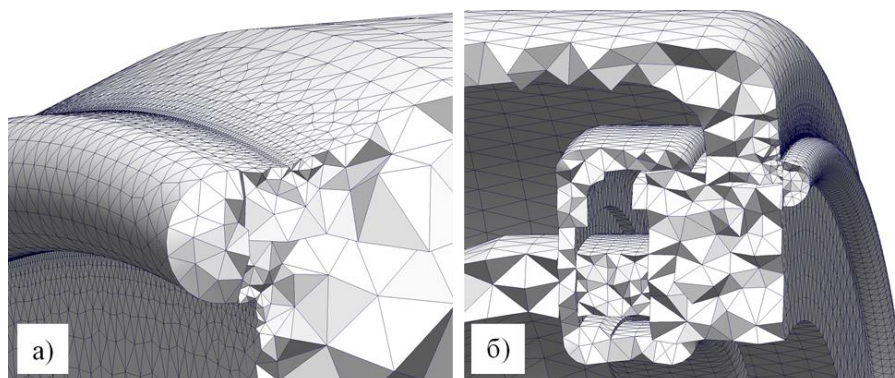


Рисунок 3.21 – Детализация сетки конечных элементов в области анодного (а) и катодного (б) сварных швов

Для определения кривых напряженно-деформированного состояния за пределами границ упругости материалов разрядника использовалась библиотека материалов, встроенная в программу. Значение давления было принято равным 200 атмосферам. Все прочие условия моделирования были оставлены без изменений.

Так как конструкция разрядника обладала осевой симметрией, это позволило при проведении нелинейного анализа перейти от 3D модели к осесимметричной 2D модели. Геометрия расчетной 2D-осесимметричной модели разрядника для нелинейного анализа приведена на рисунке 3.22.

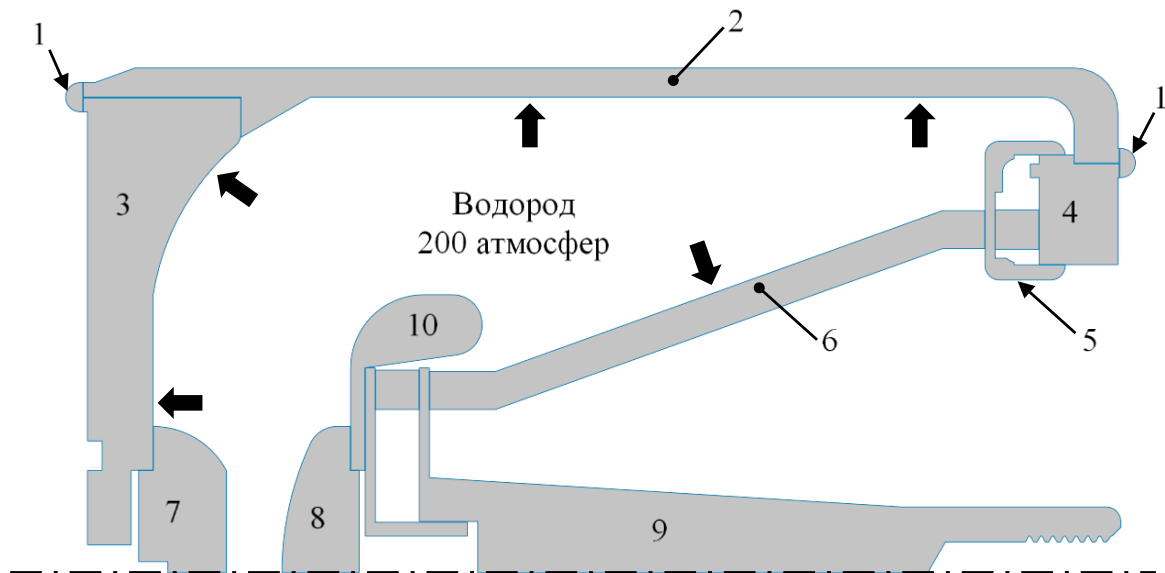


Рисунок 3.22 – Геометрия расчетной модели разрядника: 1 – сварные швы; 2 – корпус; 3 – анодная крышка; 4 – кольцо; 5 – манжета; 6 – изолятор; 7 – электрод анодный; 8 – электрод катодный; 9 – катодный вывод; 10 – экран

На рисунке 3.23 показана сетка конечных элементов в 2D-осесимметричном представлении модели разрядника-обострителя, с минимальным и максимальным размерами 0,01 мм и 1 мм, соответственно.

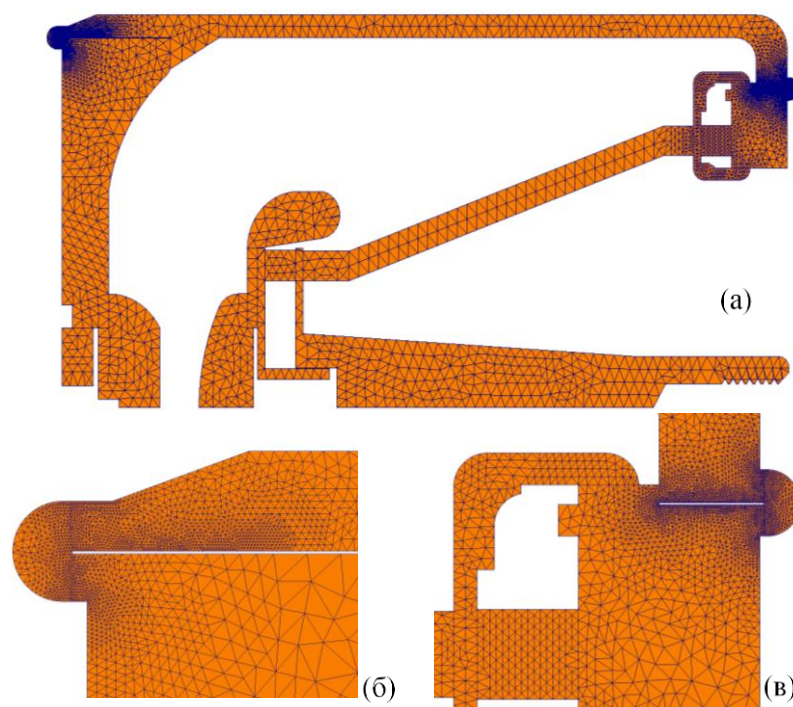


Рисунок 3.23 – Сетка конечных элементов для нелинейного 2D-осесимметричного анализа: а) все геометрия; б) область анодного сварного шва; в) область катодного сварного шва

Было проведено моделирование напряженно-деформированного состояния в рамках нелинейного анализа механических напряжений. Цель анализа – установить предельную механическую нагрузку, обусловленную давлением водорода в объеме разрядника, с учетом пластичности материалов, при которой происходит разрушение материалов конструкции. В качестве критериев разрушения конструкции прибора принимались достижение предела текучести и прочности материалов разрядника.

На рисунке 3.24 представлена полученная при нелинейном анализе эпюра механических напряжений. Картина наблюдаемых напряжений соответствует величине давления 110 атм. При этом давлении был достигнут предел прочности для материалов в области сварного шва. Область наибольших напряжений была локализована в сварном шве со стороны анода и максимальное значение составляло 666 МПа ( $6791 \text{ кгс/см}^2$ ), что превышало предела прочности используемых материалов.

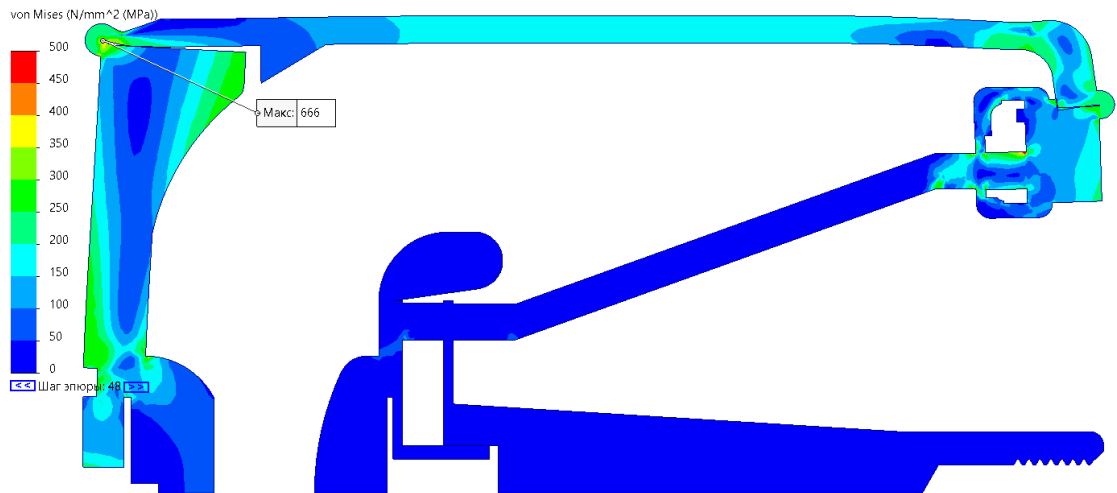


Рисунок 3.24 – Эпюра напряжений при нагрузке 110 атм

Эпюра указывает на то, что разрушения конструкции будут начинаться со сварного соединения анодной крышки и корпуса. Также, можно сделать вывод, что в крышке и корпусе за пределами сварного шва напряжения не превышали 300 МПа (3060 кгс/см<sup>2</sup>). Таким образом, чтобы повысить предельную нагрузку – давление в объеме разрядника, необходимо усиливать область анодного сварного шва.

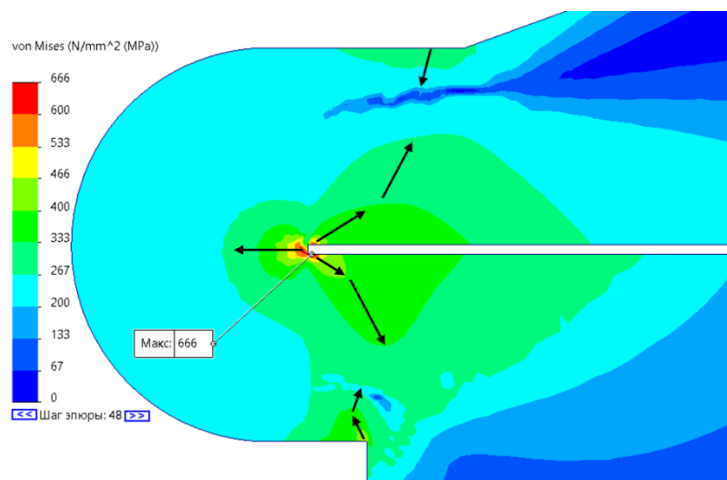


Рисунок 3.25 – Эпюра напряжений в области сварного шва при давлении 110 атм

На рисунке 3.25 показаны эпюра напряжений в увеличенной области сварного шва для предельной нагрузки 110 атм. По границам зон напряжений можно оценить направления развития трещин, показанные на рисунке черными

стрелками. Стоит отметить, что пути развития трещин носят случайный характер, так как моделирование не учитывает наличие в материале примесей, газовых включений, пор и остаточных деформаций после формовки и механической обработки.

На эпюре напряжений отчетливо видно, что область концентрации напряжений наблюдается на стыке сварного шва, корпуса и крышки. Для выявления путей решения поставленной задачи была проанализирована эпюра механических перемещений в области сварного шва на стыке корпуса и крышки анода до деформации (при нагрузке 2 атм) и при достижении 110 атм (см. рисунок 3.26). Для визуального удобства при отображении перемещений после деформации эпюры строились с масштабным коэффициентом 10.

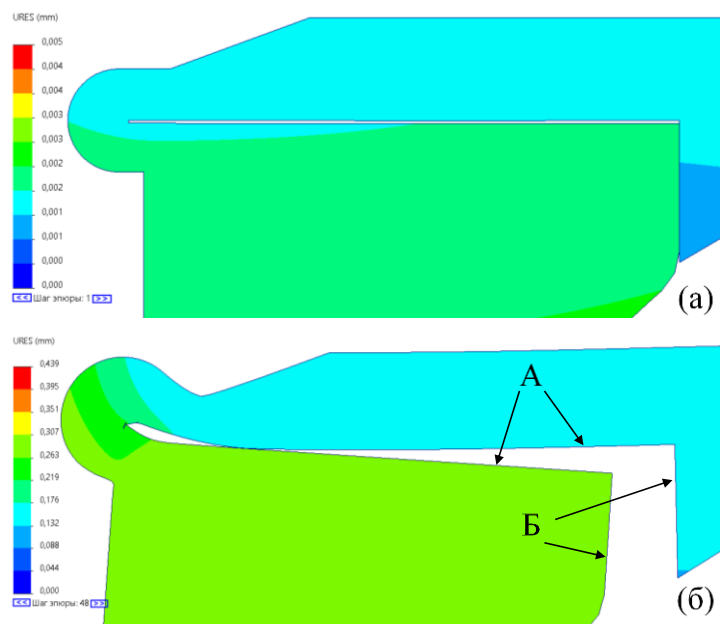


Рисунок 3.26 – Эпюра перемещений в области сварного шва до деформации и после при нагрузках в 2 атм (а) и 110 атм (б)

Сопрягаемые поверхности А и Б в корпусе и анодной крышке не подлежали механическому соединению. Очевидно, что под действием нагрузки сдвиг крышки относительно корпуса разрядника на величину порядка 100 мкм способствовал образованию концентраций напряжений. Отсюда следует вывод, что при механической связи сопрягаемых поверхностей А и (или) Б смещение



крышки будет ограничено и, как следствие, снизится нагрузка на сварной шов. Возникающие напряжения уменьшаются, что эквивалентно повышению прочности, а значит и повышению предельной нагрузки, обусловленной давлением в объеме разрядника.

### 3.3.3 Напряженно-деформированное состояние разрядника-обострителя РО-49 с резьбой

На рисунке 3.27 представлена расчетная модель в 2D-осесимметричной постановке разрядника с резьбовым соединением сопрягаемых поверхностей анодного узла и корпуса.

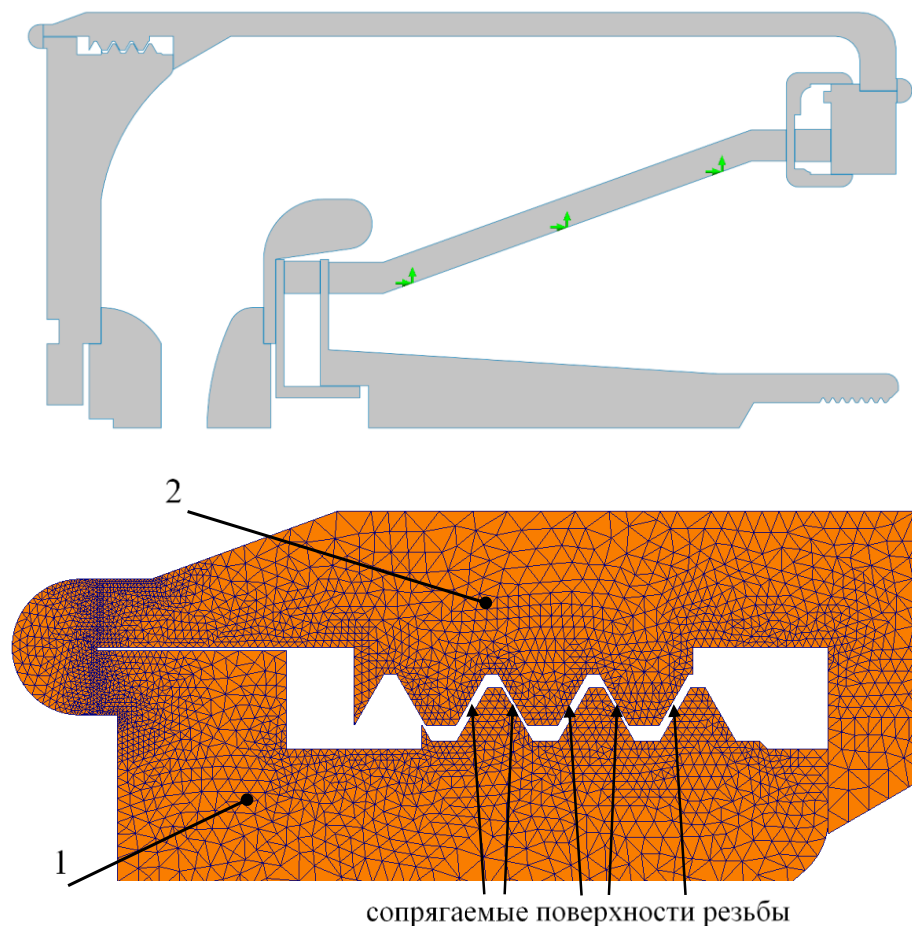


Рисунок 3.27 – Расчетная модель разрядника с резьбой и сетка конечных элементов в области резьбового соединения анодной крышки 1 и корпуса 2

Для моделирования были использованы идентичные настройки решателя и модели. Отличие состояло лишь в дополнительном сгущении сетки в области резьбы, как на корпусе, так и на анодной крышке.

В результате моделирования было установлено, что развитие нарушений сплошности материалов за счет достижения и превышения предела прочности в узлах конечно-элементной сетки начинается с давления более 160 атмосфер. На рисунке 3.28 представлена эпюра напряжений в модели разрядника при достижении давления в 161 атмосферу. Анализ представленной эпюры напряжений отчетливо показывает, что в области сварного шва со стороны анода напряжения не превышают 235 МПа ( $2396 \text{ кгс/см}^2$ ), что соответствует пределу текучести материала.

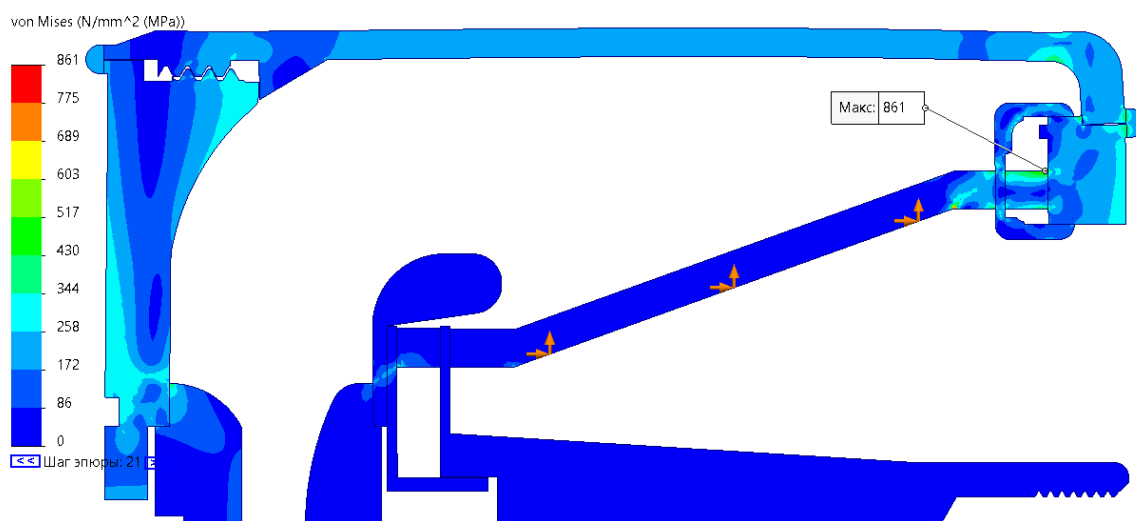


Рисунок 3.28 – Эпюра напряжений в модели разрядника с резьбой при достижении давления 160 атмосфер

Разрушения конструкции происходят в области сварного шва со стороны катода и соответствуют деформациям растяжения. На рисунке 3.29 представлена эпюра напряжений в области сварного шва со стороны катода. На эпюре отчетливо выделяются участки с превышением предела прочности материала корпуса разрядника.

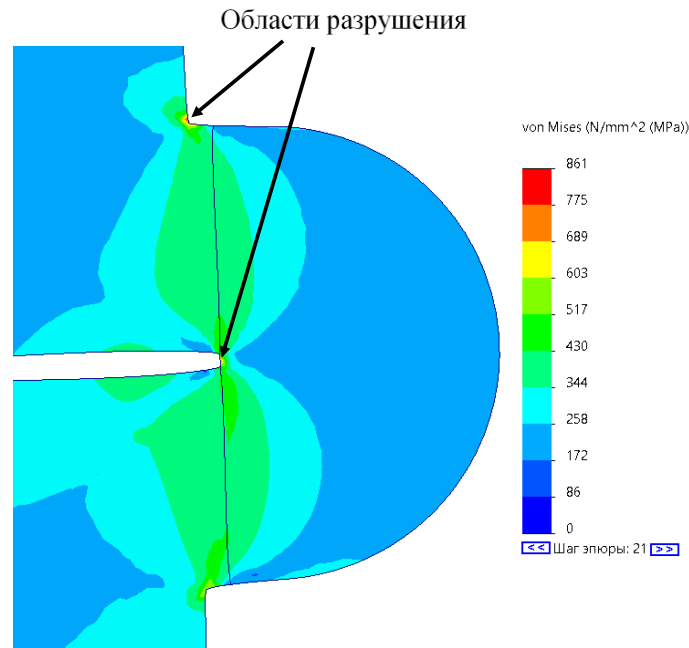


Рисунок 3.29 – Эпюра напряжений в области сварного шва со стороны катода

Также было установлено, что под действием давления происходит «вздутие» корпуса разрядника, максимальное значение которого составляет 0,7 мм и наблюдается в области анодной крышки. Эпюра механических перемещений по оси Z в конструкции разрядника при давлении 160 атмосфер приведена на рисунке 3.30. Увеличение расстояния между катодом и анодом на 0,7 мм может повлиять на развитие разряда и электрические характеристики разрядника.

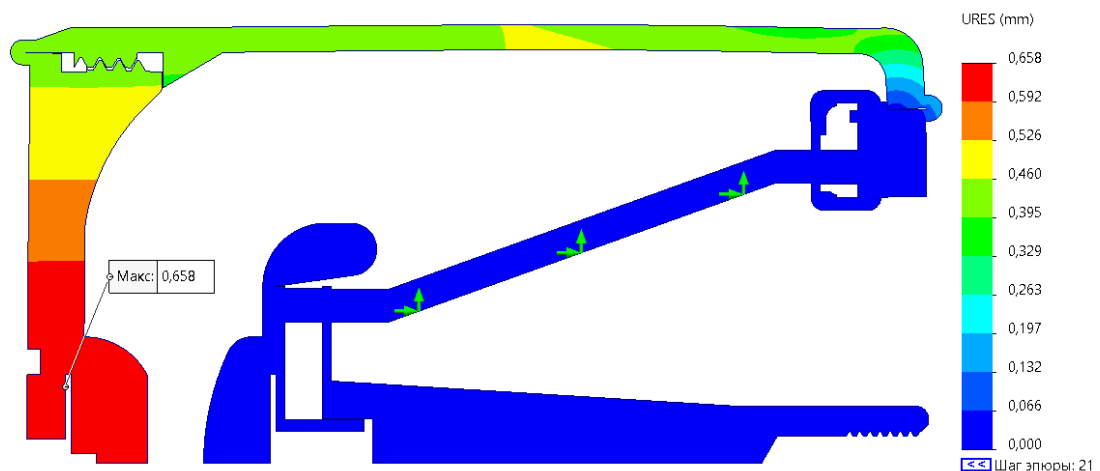


Рисунок 3.30 – Эпюра механических перемещений в модели разрядника с резьбой при достижении давления 160 атмосфер

По результатам моделирования можно сделать вывод о том, что использование резьбового соединения между крышкой и корпусом позволяет снизить механическую нагрузку в аномальном сварном шве и повысить предельное рабочее давление со 110 до 160 атмосфер.

### 3.4 Экспериментальная проверка механической прочности

Механическая прочность оболочек разрядников-обострителей определялась по результатам гидравлических испытаний. С этой целью разрядник-обостритель наполнялся водой под давлением до 200 атмосфер. Испытания проводились на 5 разрядниках-обострителях РО-49. Для проведения испытаний оболочек разрядников-обострителей на механическую прочность была изготовлена экспериментальная установка, структурная схема которой представлена на рисунке 3.31.

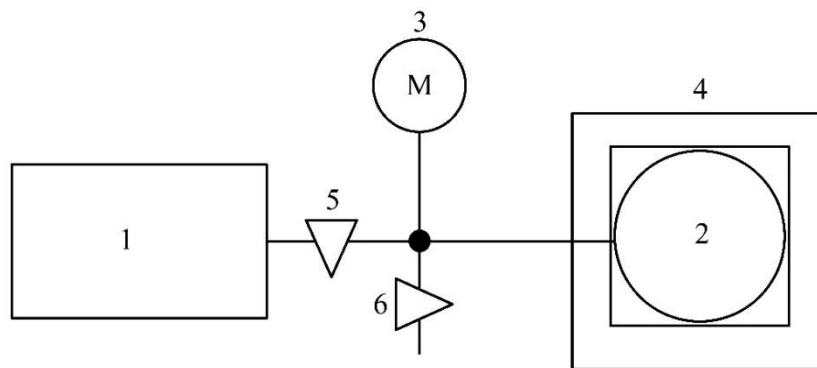


Рисунок 3.31 – Структурная схема установки для определения механической прочности оболочек разрядников-обострителей

В состав установки входили:

- 1 - высоконапорная поршневая насосная установка ЕНА 15-200,
- 2 - испытываемый разрядник-обостритель РО-49,
- 3 - жидкостный манометр М типа ДМ 8008 ВУФ 0-250,

4 - защитная камера из толстостенного оргстекла, в которую устанавливался разрядник РО-49,

5, 6 - шаровые краны высокого давления.

Разрядник-обостритель соединялся с помощью резьбового вывода анодного узла с металлической трубкой высоконапорной насосной установки. При закрытом кране 6 и открытом кране 5 внутрь разрядника подавалась вода. Выбор воды вместо газовой среды обусловлен тем, что вода не подвержена сжатию и при возможном разрушении оболочки разрядника-обострителя не произойдёт разлёт осколков.

Механическая прочность оболочек разрядников-обострителей проверялась в защитной камере визуально по изменениям формы цилиндрического корпуса и по образованию течи воды, вызванных нарушениями герметичности сварных швов или нарушением спаев металла с керамикой.

Опытные данные показали, что конструкции разрядников-обострителей, рассчитанные на работу при давлении до  $120 \text{ кгс/см}^2$ , реально выдерживают давление до  $200 \text{ кгс/см}^2$ .

### **3.5 Выводы к главе 3**

В результате определения расчетными методами механической прочности корпуса металлокерамического разрядника-обострителя РО-49 были получены следующие результаты:

1) цилиндрический корпус диаметром 70 мм и высотой 73 мм из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т с толщиной стенки в 2.2 мм соединённый с анодным узлом резьбовым соединением и аргонодуговой сваркой в верхней части и с катодным узлом посредством аргонодуговой сварки в нижней части, позволяют выдерживать механические напряжения, создаваемые внутренним давлением в 120 атмосфер;

2) конусный керамический изолятор из алюмооксидной керамики ВК94-1 (22ХС) с толщиной стенки в 3 мм при использовании компенсированных спаев

обеспечивает возможность работы разрядника-обострителя с рабочим давлением до 120 атмосфер.

Экспериментальная проверка механической прочности разрядника-обострителя показала, что конструкция разрядника РО-49 в состоянии выдерживать давление до 200 атмосфер.

## **ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПРОМЫШЛЕННОГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ СЕРИИ НЕУПРАВЛЯЕМЫХ МАЛОГАБАРИТНЫХ РАЗРЯДНИКОВ-ОБОСТРИТЕЛЕЙ НА НАПРЯЖЕНИЯ 100-400 КВ**

К технологии изготовления разрядников-обострителей относятся такие операции, как изготовление металлических деталей корпуса, катодного и анодного узлов, механически прочное и вакуумноплотное соединение керамического высоковольтного изолятора с металлическими деталями катодного узла с помощью пайки высокотемпературным серебряным припоем, механическое соединение металлических деталей анодного узла с помощью пайки медным припоем, механическое соединение катодного и анодного узлов с корпусом разрядника-обострителя с помощью аргонодуговой сварки, наполнение и тренировка собранного разрядника в среде электроотрицательных газов, а также последующее наполнение рабочими газами до давлений в диапазоне от 50 до 120 атмосфер.

В данной главе подробно описываются все этапы изготовления малогабаритных отпаянных разрядников-обострителей в металлокерамическом исполнении на напряжения пробоя от 100 до 400 кВ. Отработанные технологические операции на каждом этапе изготовления обеспечили процент выхода годных изделий при серийном производстве на уровне 95% с относительным среднеквадратичным разбросом напряжения пробоя не более 3% в течение  $3 \cdot 10^6$  разрядных импульсов в заданном эксплуатационном режиме.

### **4.1 Изготовление основных элементов конструкции разрядников-обострителей**

На рисунке 4.1 представлена конструкция серийного газонаполненного металлокерамического разрядника – обострителя высокого давления РО-49 на напряжение  $180 \div 250$  кВ.

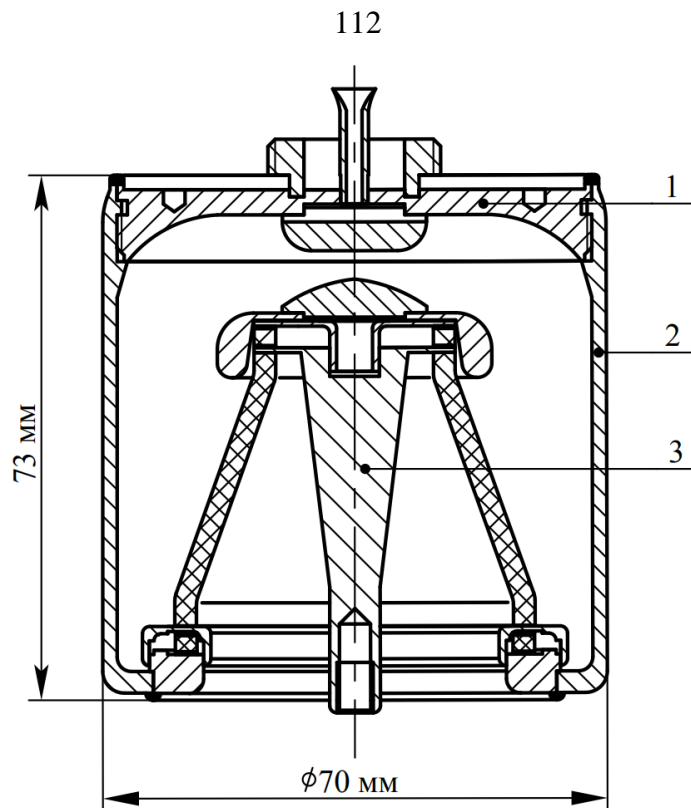


Рисунок 4.1 – Конструкция разрядника – обострителя РО-49

Разрядник-обостритель состоит из анодного узла 1, металлического корпуса 2 в виде цилиндра с отбортовкой и металлокерамического катодного узла 3, расположенного внутри корпуса.

Разрядник работает следующим образом: при приложении высоковольтного импульсного напряжения с достаточной амплитудой к промежутку между электродами катодного и анодного узлов происходит его пробой и импульс напряжения, обусловленный протеканием тока в разрядном контуре, формируется на нагрузке.

При изготовлении разрядника-обострителя вначале производят сборку анодного узла 1 (рисунке 4.2).

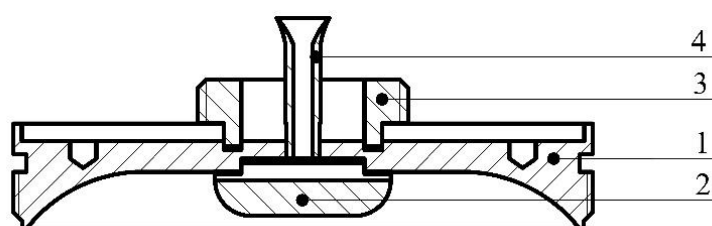


Рисунок 4.2 – Конструкция анодного узла разрядника – обострителя РО-49



На рисунке 4.2 показано, что анодный узел состоит из крышки (1), изготовленной из прецизионного сплава 29НК (ковар), анода (2), выполненного из сплава ВНЖ-7-3, и резьбового вывода М24х1 (3), выполненного также из сплава 29 НК.

Материал анода ВНЖ-7-3 относится к числу тяжелых сплавов на основе самого известного тугоплавкого металла в природе - вольфрама (в сплаве его около 90%), с добавлением никеля (6,8% - 7,4%) и железа (2,8% - 3,4%). Данное соединение позволяет существенно увеличить пластичность, обрабатываемость и электропроводность вольфрама. Сплав практически не подвержен коррозии. Как показала многолетняя практика использования сплава ВНЖ-7-3 в качестве материала электродов в разрядниках-обострителях позволяет обеспечить необходимую стабильность электрических параметров и долговечность не менее  $3 \cdot 10^6$  срабатываний. Так же необходимо отметить тот факт, что сплав ВНЖ-7-3 хорошо смачивается медными и серебряными припоями, что позволяет получать механически прочные и герметичные соединения с прецизионными сплавами, такими как ковар (29НК) или 42НАВИ, которые широко применяются в приборостроении.

Сплав 29НК или ковар - прецизионный сплав с заданным коэффициентом линейного теплового расширения, обычно состоящий из 29 % никеля (Ni), 17 % кобальта (Co) и 54 % железа (Fe) с примесями кремния, углерода, марганца. Имеет коэффициент теплового расширения близкий в широком диапазоне температур к коэффициенту теплового расширения боросиликатного стекла и алюмооксидной керамики типа ВК-94-1 (22ХС), широко используемых для изготовления электровакуумных приборов, металлостеклянных изоляторов и металлокерамических корпусов [92].

Применение данного прецизионного сплава в качестве материала крышки анода обусловлено однородной структурой материала в широком диапазоне температур (до 1100 °С), отсутствием микротрещин и неоднородностей при прокате материала, что обеспечивает герметичность при наполнении внутреннего

объёма приборов водородом, а также обладает хорошей смачиваемостью медными и серебряными припоями

Пайка анодного узла происходит в колпаковых водородных печах типа ПГВВК-М1300 (рисунке 4.3) в два этапа: сперва крышку 1, анод 2 и резьбовой вывод 3 собирают с использованием медного припоя и паяют в печи при температуре плавления меди в 1100 °С с выдержкой 3 минуты.

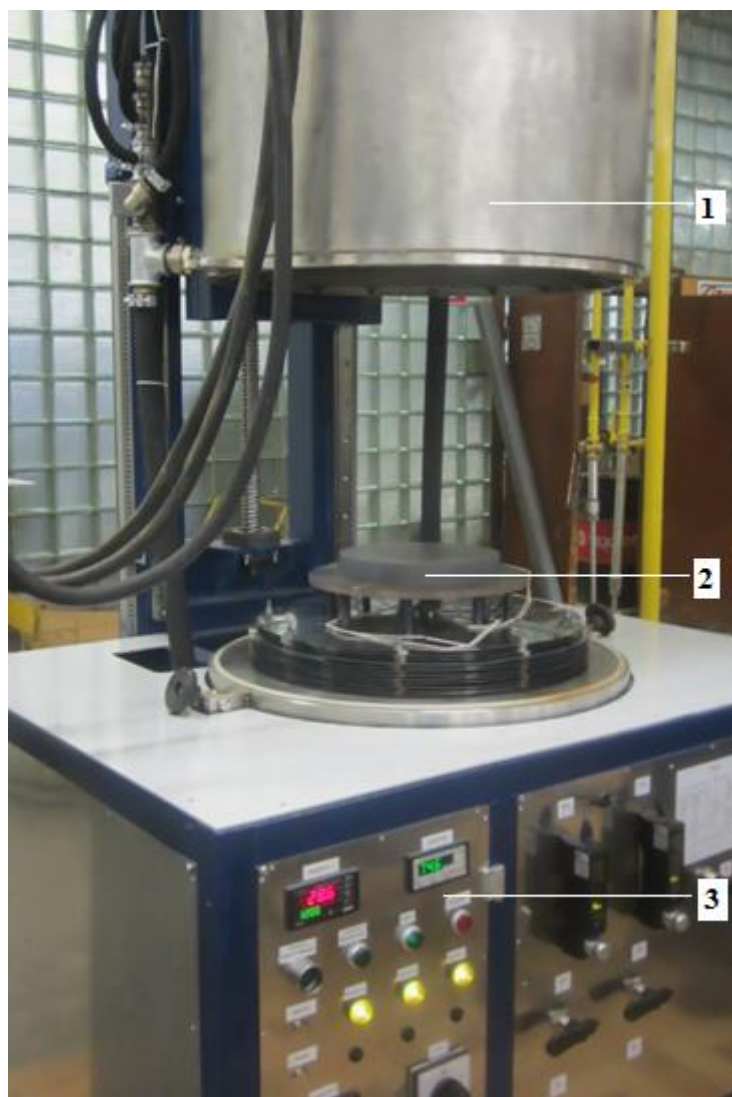


Рисунок 4.3 – Печь водородная колпаковая типа ПГВВК-М1300

1 – подъёмный колпак с нагревателями, 2 – установочный столик, 3 – пульт управления с контрольными приборами

Следующим этапом в анодный узел впаивается высокотемпературным серебряным припоем ПСр72 медный штенгель (4), который служит для

наполнения разрядника рабочими газами, а также с помощью данного штангеля происходит холодный отпай прибора на заключительном этапе производства.

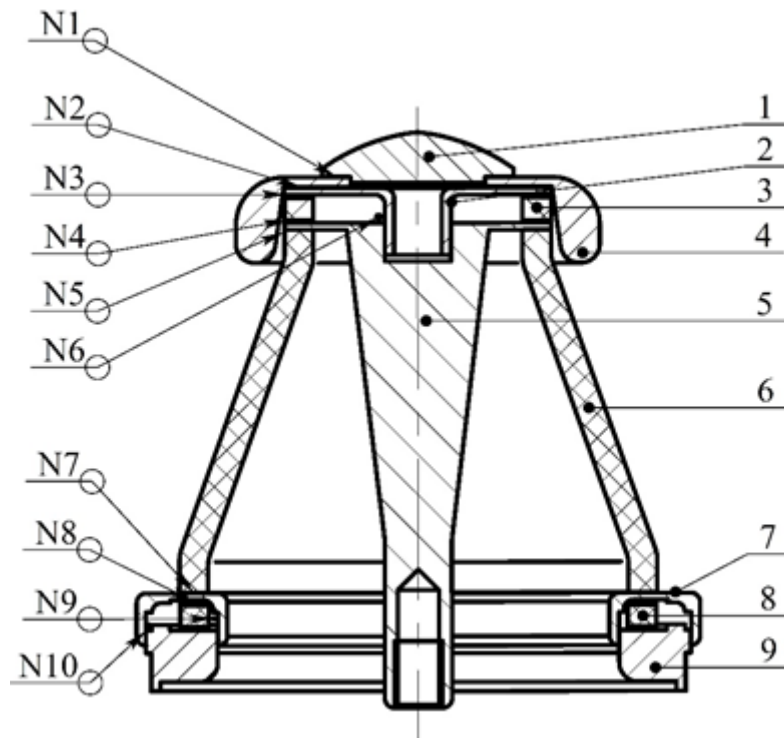


Рисунок 4.4 – Конструкция катодного узла разрядника-обострителя РО-49

На рисунке 4.4 представлена конструкция металлокерамического катодного узла серийно выпускаемого разрядника-обострителя РО-49. Катодный узел состоит из катода 1, выполненного из сплава ВНЖ-7-3, переходной манжеты 2 (29НК), компенсатора 3 (алюмооксидная керамика марки ВК94-1) с двухсторонней металлизацией, экрана 4 (29НК), вывода 5 (29НК), керамического изолятора 6 (ВК94-1) в виде полого усечённого конуса, манжеты 7 (29НК), компенсаторного кольца 8 (ВК94-1) с односторонней металлизацией и переходного кольца 9 (29НК).

В качестве материала изолятора 6 и колец-компенсаторов 3 и 8 используется алюмооксидная керамика марки ВК94-1 (22ХС). Этот материал непроницаем для газов, пропускает с малым поглощением электромагнитные колебания, обладает большой механической прочностью, может работать в условиях высокого вакуума в широком интервале температур. Важная

особенность алюмооксидной керамики – способность образовывать вакуум-плотные высокотемпературные соединения с металлами. Важное преимущество данной керамики состоит в том, что газовыделение при ее нагреве не выше, чем у металлов, применяемых в производстве электронных вакуумных приборов. Стабильность свойств и геометрических размеров промышленно выпускаемых керамических деталей позволяет проводить не только их кратковременную высокотемпературную обработку при изготовлении приборов, но и обеспечивает длительную работоспособность при 1400-1700 °С.

Выбор ковара (29НК) в качестве основного материала деталей катодного узла обусловлен наличием у ковара заданного коэффициента линейного теплового расширения, что позволяет получать согласованные вакуумноплотные соединения с керамикой используя пайку в водородных и вакуумных печах.

Как видно из рисунка 4.4 катодный узел состоит из девяти деталей и десяти паянных швов. Такая сложная конструкция необходима для обеспечения компенсированных и герметичных спаев, способных в дальнейшем выдерживать большие механические нагрузки, связанные с избыточным давлением рабочих газов внутри разрядника-обострителя до 120 атмосфер.

Сборку металлокерамического катодного узла проводят в соответствии с конструкцией разрядника с использованием специальной цеховой оправки со стягивающими молибденовыми стойками (рисунке 4.5), необходимыми для выравнивания в процессе пайки неплоскостности поверхностей деталей узла, образующих торцевые спаи (N1÷N5, N7 и N8), и обеспечения высокого качества и герметичности соединения. Для формирования охватывающих спаев N6 переходной манжеты 2 и вывода 5, а также спаев N9 и N10 манжеты 7 и переходного кольца 9 внутри замкнутого объёма переходного узла, образованного манжетой 7, компенсирующим кольцом 8 и переходным кольцом 9 размещают проволочный припой ПСр-72. Для спаев N1÷N5, N7 и N8 в месте их образования размещают припой ПСр-72 из тонкой фольги в виде колец. Затем выполняют пайку металлокерамического узла в водородной печи.

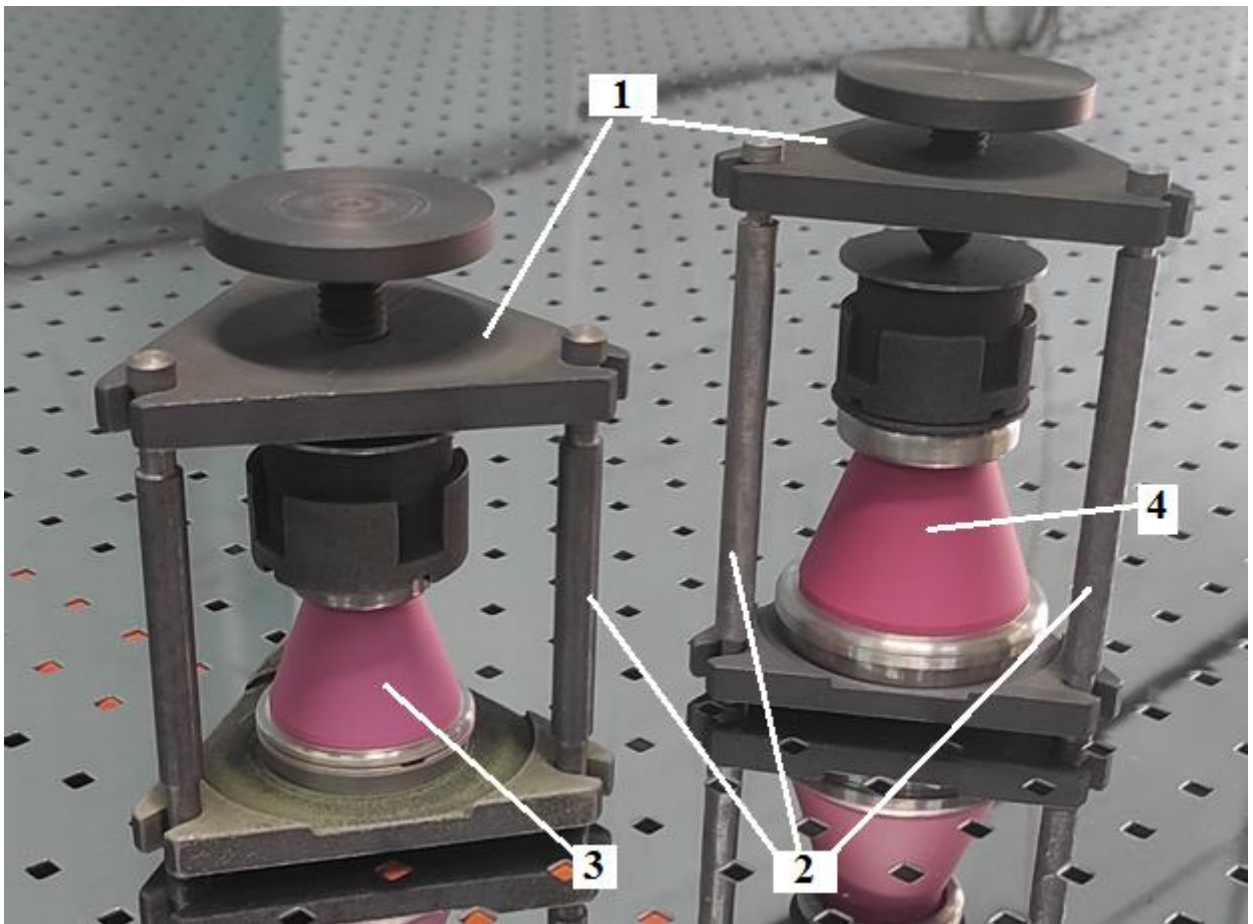


Рисунок 4.5 – Собранные в оправках катодные узлы разрядников-обострителей  
 1 – сборочные оправки, 2 – молибденовые стойки, 3 – собранный катодный узел  
 РО-43, 4 – собранный катодный узел РО-49

При проведении пайки следует учитывать, что в металлокерамических приборах, качество и герметичность спаев зависят от многих факторов, к которым относятся: масса и габариты, теплоёмкость материалов приборов, сложность конструкции, объём загрузки при пайке, состояние спаиваемых поверхностей (наличие окисных плёнок), скорость подъёма температуры, температура и время выдержки пайки, скорость охлаждения. Необходимо учитывать и то, что для обеспечения высокого качества металлизированную керамику необходимо паять при минимально возможных температурах и выдержках. Практически принято вести процесс пайки при температурах, превышающих температуру плавления припоя не более, чем на 20°C. Время выдержки после расплавления, самого распространённого при производстве газоразрядных и вакуумных приборов,

припоя ПСр-72 составляет от 30 до 150 секунд [95]. Однако, несмотря на вышеуказанные факторы, влияющие на режим пайки, параметры режима пайки в каждом конкретном случае следует корректировать так, чтобы обеспечить высокое качество пайки как металлокерамических, так и металлических спаев при минимально возможной температуре и выдержке.

В газонаполненном разряднике параметры режима пайки – температура и время выдержки пайки определяются качеством охватывающего спая манжеты с переходным кольцом, так как физико-химические явления, протекающие в твёрдой, жидкой и газовой фазе в охватывающем спае наиболее продолжительны по сравнению с временем протекания процессов в торцевых спаях и зависят от конструкции узла и внутреннего размещения припоя в виде проволоки в металлокерамическом узле. Температура в месте расположения припоя из-за его экранировки от нагревателей несколько ниже температуры в месте расположения термопары или контрольного припоя, поэтому контролируемая температура должна быть завышена. Другой причиной завышения температуры пайки относительно температуры плавления припоя являются сами физико-химические процессы, происходящие в охватывающем спае. В охватывающем спае процесс соединения спаиваемых поверхностей манжеты и переходного кольца включает в себя следующие операции: очистку поверхностей деталей от окисных плёнок за счёт пайки в восстановительной среде, расплавление припоя, смачивание расплавленным припоем сопряжённых поверхностей спаиваемых деталей, растекание расплавленного припоя по поверхности деталей (в нашем случае манжеты и переходного кольца), заполнение расплавленным припоем зазора между манжетой и переходным кольцом под действием капиллярных сил, физико-химическое взаимодействие материалов деталей с расплавленным припоем и кристаллизацию с образованием паяного шва при его остывании.

Время формирования паяного шва охватывающего спая манжеты с переходным кольцом значительно превышает время формирования паяного шва торцевого спая металла с керамикой, поэтому для обеспечения высокого качества всех спаев металлокерамического узла и надёжной герметичности необходимо

выбрать минимально возможную температуру и время выдержки пайки, обеспечивающих высокое качество охватывающего сая манжеты с переходным металлическим кольцом и торцевых металлокерамических спаев.

Минимизация параметров режима пайки с целью получения высокого качества спаев металлокерамических узлов возможна за счёт превышения температуры пайки относительно температуры плавления припоя и правильного выбора скорости увеличения температуры, что и достигается в данном способе изготовления газонаполненного разрядника.

Пайка металлокерамического узла припоем, например, ПСр-72, включает следующие операции:

- подъём температуры до 700-750°C со скоростью не более 15°C в минуту, выдержка при данной температуре в течение 30-40 минут, что необходимо для выравнивания температуры в зоне пайки печи;

- подъём температуры до температуры плавления припоя (для ПСр-72 температура плавления составляет 780°C) со скоростью не более 15°C в минуту;

- после достижения температуры плавления припоя производят дополнительное увеличение температуры пайки на 20-80°C со скоростью 15-45°C в минуту с выдержкой при достигнутой температуре, причём дополнительный подъём температуры и выдержку проводят в течение 5-12 минут;

- снижение температуры до нормальной со скоростью, не превышающей 7°C в минуту, чтобы не превысить предельное значение внутреннего напряжения керамики из-за разных температурных коэффициентов линейного расширения спаиваемых материалов по отношению к температурному коэффициенту линейного расширения керамики [96].

Предельная скорость подъёма температуры 15°C в минуту в процессе пайки при подъёме от нормальной температуры до температуры плавления припоя определяется прочностными характеристиками керамики ВК94-1. При скорости подъёма температуры свыше 15°C в минуту в процессе длительного его воздействия внутри керамики могут возникнуть напряжения, превышающие критическое напряжение, приводящее к образованию микротрещин и снижению

механической прочности керамики. При кратковременном воздействии изменения температуры при температуре близкой к температуре плавления припоя керамика выдерживает и более высокие градиенты температуры, т.е. изменении температуры после расплавления припоя до температуры пайки.

Превышение температуры пайки относительно температуры плавления припоя влияет на коэффициент смачивания расплавленного припоя, механизм его растекания, который связан с взаимодействием расплава припоя и его парообразной фазы со спаиваемым металлом, с поверхностной диффузией расплавленного припоя, с капиллярным течением последнего и, тем самым, определяет время выдержки пайки, которую необходимо минимизировать. Пайка при повышенной температуре согласно предложенному режиму способствует лучшему смачиванию спаиваемых поверхностей припоем и более быстрому его растеканию и заполнению охватывающего шва манжеты с переходным кольцом, а также обеспечивает капиллярное заполнение торцевого шва, так как припой при резком изменении температуры начинает плавиться и постепенно фронт плавления припоя проходит с внешней стороны к внутренней стороне шва (в случае пайки в печах с наружным расположением нагревательных элементов по отношению к шву). Такой характер процесса пайки, вызванный перемещением расплавленного припоя с внешней стороны к внутренней стороне шва, существенно улучшает структуру шва и, как следствие, механические и термические характеристики соединения керамики с металлом. Превышение скорости дополнительного изменения температуры относительно скорости подъёма температуры в процессе пайки, составляющей не более  $15^{\circ}\text{C}$  в минуту, обеспечивает капиллярное заполнение расплавленным припоем торцевых спаев с керамикой и высокое их качество. Максимальная скорость изменения температуры  $45^{\circ}\text{C}$  в минуту определяется предельной прочностью керамики ВК94-1 и зависит от геометрических размеров керамических деталей. Как показала практика работ по пайке металлокерамических узлов, серийно выпускаемых приборов (РО-48, РО-43, РО-49), предлагаемый диапазон изменения скорости нарастания температуры до температуры пайки от момента



расплавления припоя не вызывает предельных внутренних напряжений в керамике ВК94-1, которые приводят к её разрушению.

Диапазон превышения температуры относительно температуры плавления припоя определяется качеством охватывающего спая манжеты с переходным кольцом и зависит от геометрических размеров металлокерамического узла и для серийных приборов РО-48, РО-43, РО-49 находится в пределах 20-80°C (температура пайки припоем ПСр-72 соответственно в пределах 800-860°C) при этом оптимальное время выдержки пайки, начиная с момента расплавления припоя и до окончания пайки, находится в пределах 5-12 минут. Такая длительность выдержки обеспечивает высокое качество торцевых и охватывающих спаев металлокерамических узлов в заданном диапазоне превышения температуры пайки над температурой плавления припоя. Минимальное значение превышения температуры пайки 20°C относительно температуры плавления припоя необходимо для металлокерамических узлов с малыми габаритами (с диаметром нижнего основания изолятора менее 30 мм), а время выдержки пайки для таких узлов лежит в пределах 5-6 минут. При больших габаритах металлокерамических узлов с диаметром нижнего основания изолятора более 45 мм величина превышения температуры пайки относительно температуры плавления припоя составляет 80°C, а суммарное время выдержки пайки лежит в пределах 10-12 минут.

В процессе производства разрядников-обострителей РО-43 и РО-49 были проведены исследования по определению зависимости прочности соединения (торцевого спая) керамики ВК94-1 с манжетой из сплава 29НК от температуры пайки припоем ПСр-72В с учётом времени выдержки и скорости подъёма температуры после расплавления припоя для двух типов приборов – РО-43 и РО-49. Предел прочности определялся экспериментально разрушающим методом на испытательном оборудовании ИС 6018-100-4.

На рисунке 4.6 приведены зависимости прочности соединения керамики ВК94-1 со сплавом 42 НА-ВИ от температуры пайки припоем ПСр-72В при постоянном времени выдержки для металлокерамических узлов серийно

выпускаемых приборов РО-43 и РО-49 равном 5-12 минут с учётом времени на подъём температуры от момента расплавления припоя до температуры пайки при скорости подъёма 15-45°C. Время выдержки выбрано исходя из минимального времени необходимого для полного заполнения расплавленным припоем охватывающего сая манжеты с переходным кольцом и обеспечения вакуумноплотного соединения. Для сая керамики с металлом - это время значительно превышает рекомендуемое, но оно обосновано качеством пайки всего металлокерамического узла в целом.

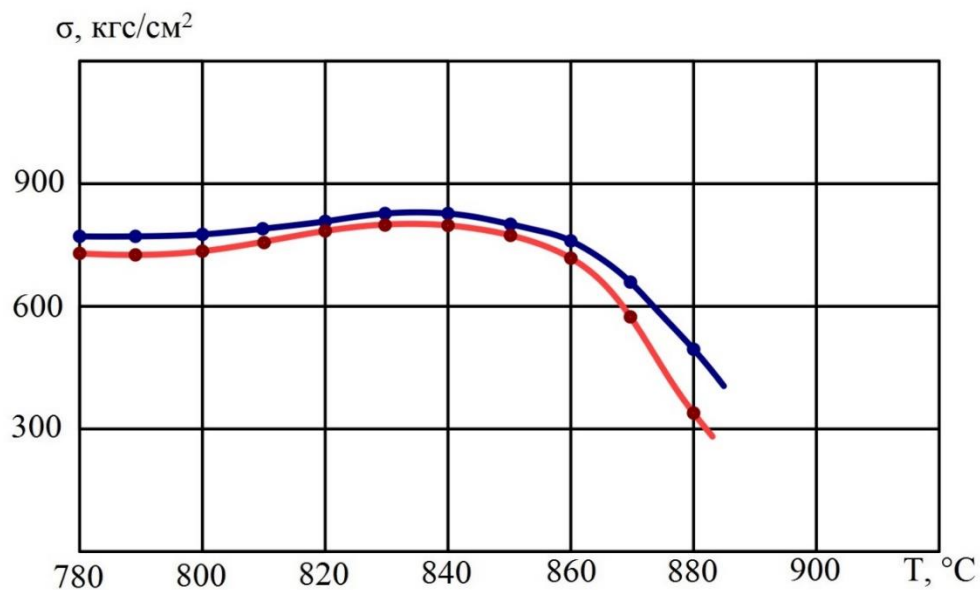


Рисунок 4.6 – Зависимость прочности торцевых металлокерамических спаев (красный - разрядник РО-43, синий – разрядник РО-49)

Как видно из рисунка 4.6 с повышением температуры пайки припоем ПСр-72В прочность торцевых спаев почти не меняется в диапазоне температур от 780°C до 860°C, а при дальнейшем повышении температуры она снижается, что можно объяснить сложной природой металлизационного покрытия, которое состоит из спечённого тугоплавкого (в большинстве случаев молибденомарганцевого) каркаса, заполненного межзерновым неметаллическим веществом (стекло и продукты взаимодействия активных добавок с окислами керамики).

При повышении температуры межзерновое вещество размягчается и приобретает всё более значительную подвижность, что при достаточно длительной выдержке пайки и высокой температуре больше  $860^{\circ}\text{C}$  способствует его вытеснению расплавленным припоем и выходу на поверхность паяного шва в виде отдельных стеклообразных капель, что приводит к снижению термомеханических свойств металлокерамических соединений. Этим объясняется оптимальный выбор температуры пайки металлокерамических узлов разрядников-обострителей базовой конструкции, которая превышает температуру расплавления припоя на  $20-80^{\circ}\text{C}$  и составляет для припоя ПСр-72В  $800-860^{\circ}\text{C}$ . Минимальный предел температуры пайки металлокерамических узлов выбирается из условия обеспечения полного заполнения охватывающего шва манжеты с переходным кольцом расплавленным припоем ПСр-72В для приборов с меньшими габаритами изолятора (диаметр большего основания изолятора меньше 30 мм) таких как РО-48 и достаточного запаса механической прочности торцевых спаев керамики с металлом. Из рисунка 4.6 видно, что в интервале температур  $780-860^{\circ}\text{C}$  прочность металлокерамических спаев максимальна, а ограничение температуры пайки снизу ( $800^{\circ}\text{C}$ ) вызвано обеспечением качества охватывающего спая манжеты с переходным кольцом и вакуумноплотного соединения для металлокерамических узлов малых размеров. Верхняя граница диапазона пайки ( $860^{\circ}\text{C}$ ) определяется резким снижением прочности соединения металла с керамикой при увеличении температуры пайки более  $860^{\circ}\text{C}$ .

На рисунке 4.7 приведены рентгеновские снимки торцевых соединений керамики с манжетами, выполненных различными припоями: 1 - ПСр-72В (фольга, пайка классическим способом), 2 - ПСр-72В (проволока, пайка классическим способом) и 3 - ПСр-72В (фольга, пайка по приведённому способу). Рентгеновские снимки были получены на малогабаритном термоэмиссионном дефектоскопе МАРТ-200.

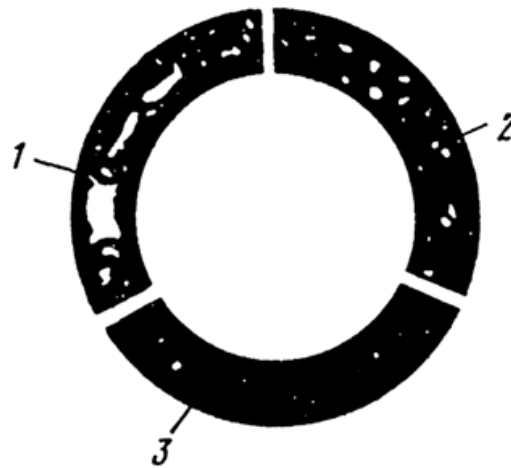


Рисунок 4.7 – Рентгеновские снимки торцевых металлокерамических спаев

Из рисунка 4.7 видно, что структура шва разных вариантов паяк неоднородна и имеет меньшее количество «непропаев» (пор) при пайке по приведённому способу, что способствует повышению механических и термических характеристик спаев керамики с металлами.

После пайки катодного узла производят проверку вакуумной плотности спаев на гелиевом течеискателе типа ТИ1-50. Затем происходит сборка корпуса разрядника с катодным узлом. Механическое соединение катодного узла с корпусом разрядника-обострителя происходит с помощью аргонодуговой сварки (АДС) бесприсадочным методом, оплавливая технологические отбортовки деталей корпуса и кольца катодного узла в колпаковой установке АДС карусельного типа (рисунок 4.8).

Данная полуавтоматическая установка состоит из подъёмного колпака 1, располагающейся под колпаком карусели с вращающимися позициями 2 в количестве 6 штук (для установки свариваемых сборочных единиц или приборов), контрольных ламп, вакуумметров и панели управления 3, а также баллонов с аргоном и гелием. После установки свариваемых деталей на позиции карусели происходит опускание колпака, откачка его внутреннего объёма до  $10^{-2}$  степени, а затем наполнение защитным газом аргоном или гелием (газ выбирается в зависимости от типа свариваемых материалов: для сталей и прецизионных сплавов используется азот 1 сорта, сварка деталей из меди выполняется в среде

гелия высокой чистоты). Каждая позиция вращается вокруг стационарного токоввода с вольфрамовым электродом. Помимо вращения вокруг своей оси каждой позиции на карусели, также предусмотрена смена позиций относительно вольфрамового электрода.

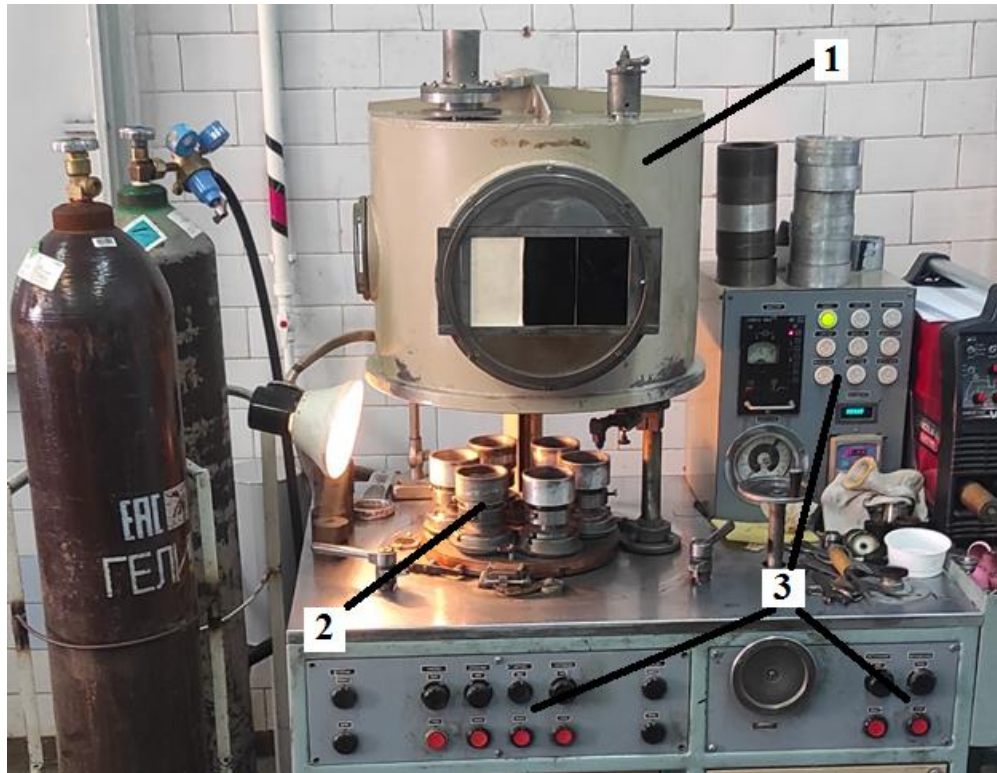


Рисунок 4.8 – Установка аргодуговой сварки карусельного типа  
1 – подъёмный колпак, 2 – вращающиеся позиции, 3 – контрольные лампы, вакуумметры и панель управления АДС

После проведения сварки происходит проверка шва на натекание с помощью гелиевого течеискателя.

Следующим этапом производства идёт замер межэлектродного расстояния в разряднике-обострителе и его корректировка в случае необходимости. Для каждого типа разрядников-обострителей чётко определён диапазон межэлектродных расстояний и давлений наполняемого газа для получения необходимых значений напряжения пробоя. В случае необходимости происходит корректировка межэлектродного расстояния методом уменьшения высоты крышки или проточкой анодного электрода на токарном станке.

После этой процедуры в сборочную единицу корпуса с катодным узлом разрядника вкручивают анодный узел и производят заварку верхнего шва на аргонодуговой установке, с последующей проверкой прибора на натекание с помощью гелиевого течеискателя.

#### **4.2 Наполнение и тренировка разрядников-обострителей**

Для лучшего понимания материала в данном разделе необходимо дать определение такому технологическому процессу, как тренировка изделия.

В составе отбраковочных испытаний изделий или элементов компонентной базы (газонаполненные и вакуумные приборы, полупроводниковые изделия) во всех странах обязательно существует технологическая операция - тренировка.

Тренировка - это метод отбраковки, при котором изделие работает определённое время с подачей или без подачи электрической нагрузки, рассчитанной таким образом, чтобы в процессе тренировки вызвать отказ потенциально ненадёжных экземпляров, не повреждая хорошие. Тренировка предназначается для выявления ранних отказов, то есть отбраковки потенциально ненадёжных приборов и повышения надёжности оставшихся в партии изделий. Следовательно, изделия, выдержавшие тренировку, будут иметь более низкую и постоянную частоту отказов, что значительно повышает надёжность радиоэлектронной аппаратуры, в которой они используются. Разумеется, тренировка ИЭТ даёт положительные результаты только в том случае, когда до и после неё проводится контроль электрических параметров.

Разрядники-обострители обладают наилучшими коммутационными характеристиками при использовании водорода в качестве рабочей среды [38].

Одним из основных факторов, влияющих на долговечность разрядников-обострителей, является тот фактор, что в процессе работы разрядника с водородным наполнением на внутренней изоляционной поверхности его оболочки вследствие неравномерного осаждения токопроводящих продуктов эрозии материалов электродов, образующихся в восстанавливающей среде

водорода, происходит перераспределение потенциала электрического поля вдоль образующей поверхности изолятора и создаются условия для возникновения скользящих пробоев по поверхности изолятора, что значительно ограничивает ресурс безотказной работы, увеличивает время коммутации и разброс динамического напряжения пробоя. Наличие же предварительно осаждённого материала, содержащего низшие фториды серы или вещества содержащего элементы галогенной группы, тормозит развитие разряда по внутренней поверхности изолятора и способствует экранированию неоднородностей металлических поверхностей оболочки разрядника, образующихся при изготовлении в процессе механической обработки и, тем самым, повышает электрическую прочность разрядника.

После сборки разрядника его наполняют газом, включающим галогенид, в качестве которого для тренировки высоковольтных искровых разрядников с водородным наполнением наиболее применим элегаз - шестифтористая сера ( $SF_6$ ). Тренировка может проводиться как в элегазе, так и в его смесях с инертным газом и/или азотом, при этом предпочтительная концентрация элегаза в смесях составляет 10-20%, что обеспечивает устойчивость газовой среды к воздействию электрических разрядов.

Тренировка высоковольтных искровых разрядников в элегазе приводит к разложению шестифтористой серы в результате окислительно-восстановительной реакции с металлическими парами материала электродов, образующимися в разряде. Продуктами разложения являются  $SF_4$ ,  $S_2F_2$ ,  $SF_2$ , окислы материала электродов и сера, которые осаждаются на внутренней поверхности разрядника. Продукты напыления на внутреннюю поверхность изолятора не являются токопроводящими и поэтому не влияют на распределение потенциала электрического поля вдоль образующей изолятора и не снижают его электрическую прочность, а при работе в водородной среде тормозят развитие скользящего пробоя по изолятору за счёт присутствия на его поверхности вещества с элементами галогенной группы [97].

Тренировка проводится в течение  $10^5$  пробоев, что достаточно для установления равномерной микроструктуры рабочей части поверхности электродов и образования достаточного количества напыления низших фторидов серы, тормозящих пробой по поверхности изоляционной оболочки.

Использование предлагаемого способа при изготовлении высоковольтного искрового разрядника с водородным наполнением повышает электропрочность высоковольтного керамического изолятора, препятствуя образованию скользящих пробоев по поверхности керамики и увеличивает срок гарантийной наработки разрядника с относительным среднеквадратичным разбросом напряжения пробоя не более 3% свыше  $3 \cdot 10^6$  срабатываний.

Пример конкретного выполнения: при изготовлении серийно выпускаемого разрядника-обострителя с водородным наполнением РО-43 после сборки элементов конструкции и наполнения газом  $\text{SF}_6$  проводилась тренировка, в процессе которой на электроды подавалось динамическое напряжение 220 кВ, превышающее на 15% предельное значение динамического напряжения пробоя разрядника. Тренировка осуществлялась в течение  $10^5$  пробоев. После тренировки отработанная смесь выпускалась в атмосферу и прибор промывался водородом. Затем разрядник наполняли водородом до давления, обеспечивающего динамическое напряжения пробоя 190 кВ. Изготовленный разрядник РО-43 в режиме работы при  $U_{np} = 190$  кВ,  $J_a = 1$  кА,  $W_k = 2$  Дж имел долговечность более  $3 \cdot 10^6$  пробоев при относительном среднеквадратичном разбросе напряжения пробоя не более 3%.

Разрядник РО-43, изготовленный без тренировки в газовой среде, в состав которой входит галогенид, в режиме работы  $U_{np} = 185$  кВ,  $J_a = 1$  кА,  $W_k = 2$  Дж имел долговечность  $10^6$  пробоев с относительным среднеквадратичным разбросом динамического напряжения пробоя не более 3%.

Таким образом, использование предлагаемого способа изготовления позволяет увеличить электрическую прочность и долговечность высоковольтного искрового разрядника с водородным наполнением.



После тренировки разрядника в смеси элегаза с инертным газом происходит удаление смеси из внутренней оболочки прибора.

Следующим этапом изготовления идёт промывка внутреннего объёма разрядника-обострителя водородом особой чистоты. Прибор устанавливается на гребёнку поста наполнения, происходит напуск газа до давления 20 атмосфер по показанию образцового манометра с последующей выдержкой 1-2 минуты, затем происходит удаление газа в атмосферу до достижения остаточного давления в разряднике 1-1,5 атмосферы. Процедура повторяется 3 раза, после чего происходит наполнение водородом ОСЧ до давления 50-120 атмосфер, обеспечивающего необходимое напряжение пробоя разрядника.

Давление газа выбирают исходя из условия получения напряжения пробоя разрядника, превышающего необходимое рабочее напряжение на 10-15%. Это необходимо для отбраковки приборов по причине возможного наличия газовых включений в массе изолятора, которые не могут контролироваться визуально без специальных методов неразрушающего контроля.

В процессе тренировки с повышенным напряжением пробоя происходит ионизация газовых включений в массе изолятора, приводящая к его сквозному пробоя и разгерметизации прибора (рисунок 4.9).

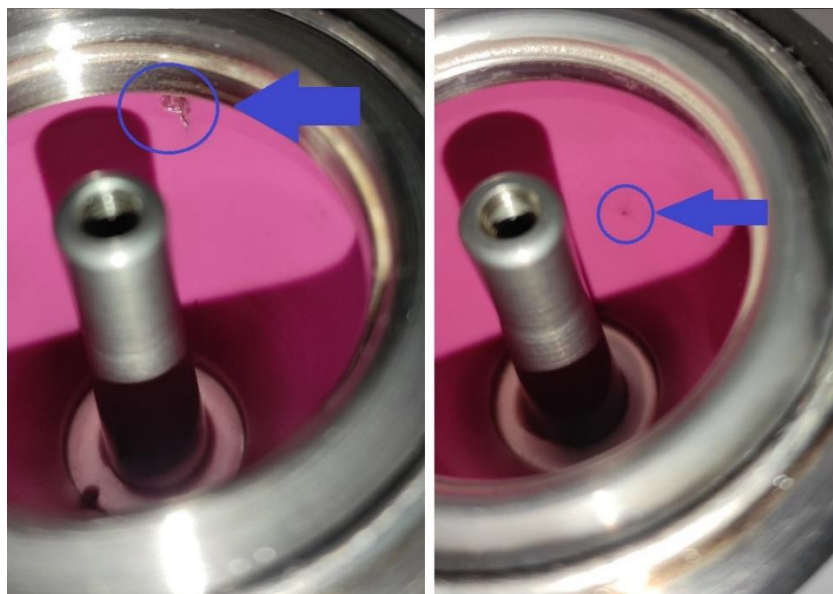


Рисунок 4.9 – Сквозной пробой керамического изолятора на примере разрядника

Согласно собранной статистике такой вид брака встречается у одного-двух разрядников на каждую сотню изготовленных приборов.

Для ускорения процесса тренировки в рабочем режиме разрядника с водородным наполнением необходимо подавать импульсы напряжения на электроды в виде затухающей синусоиды с малым декрементом затухания (импульс формируется резонансным трансформатором при коммутации в его первичной цепи) со срабатыванием разрядника на переднем фронте первой полувольты с амплитудой практически в два раза меньшей второй полувольты противоположной полярности [98].

Описанный в данной работе способ изготовления газонаполненного металлокерамического разрядника-обострителя позволил обеспечить высокую надёжность и герметичность прибора. При серийном производстве разрядников-обострителей процент выхода годных изделий достигает уровня в 95%.

Серийно выпускаемые разрядники-обострители РО-43 и РО-49 производства АО «Плазма» г. Рязань используются для изготовления импульсных рентгеновских дефектоскопов типа «АРИНА-3», «АРИНА-7», «АРИНА-9», «ПАМИР-200», «ПАМИР-250», «ПАМИР-300» (производства ООО «Спектрофлэш» г. Санкт-Петербург), «ПИОН-2М», «ПИОН-2ММ» (производства ООО «Эридан-сервис» г. Уфа, «ИРА-220» и «ИРА-320» (производства ООО «Русимпульс» г. Пермь).

Разрядник-обостритель РО-43 применяется в аппаратах «Арина-3», «ПИОН-2М» и «ИРА-220». В аппаратах «Арина-3» и «ПИОН-2М» разрядник РО-43 с напряжением пробоя от 160 до 170 кВ работает на импульсную рентгеновскую трубку прострельного типа ИМА2-150Д (изготовитель АО «Светлана-рентген» г. Санкт-Петербург). При напряжении пробоя разрядника более 170 кВ происходит прожог выходного окна рентгеновской трубки и её разгерметизация, при напряжении пробоя менее 160 кВ доза генерируемого рентгеновского излучения резко снижается. В аппаратах «ИРА-220» используется разрядник-обостритель РО-43 с напряжением пробоя 200-205 кВ, работающий на панорамную

импульсную рентгеновскую трубку ИРТПЗ-150Д (изготовитель АО «Плазма» г. Рязань). При напряжениях пробоя разрядника РО-43 свыше 210 кВ резко снижается ресурс безотказной работы прибора из-за предельных значений напряжённости электрического поля вдоль образующей керамического изолятора вследствие ограниченных геометрических размеров изолятора.

Разрядник-обостритель РО-49 применяется в аппаратах «АРИНА-7», «АРИНА-9», «ПАМИР-200», «ПАМИР-250», «ПАМИР-300», «ПИОН-2ММ» и «ИРА-320». Во всех аппаратах данных серий разрядник РО-49 с напряжением пробоя от 190 до 250 кВ работает на импульсные рентгеновские трубки панорамного типа ИМА5-320Д (изготовитель АО «Светлана-рентген» г. Санкт-Петербург), ИРТП-240Д и ИРТП4-240Д (изготовитель АО «Плазма» г. Рязань). При напряжении пробоя разрядника менее 190 кВ доза генерируемого рентгеновского излучения резко снижается из-за конструктивных особенностей рентгеновских трубок. При напряжениях пробоя разрядника РО-49 свыше 260 кВ резко снижается ресурс безотказной работы из-за сильной эрозии электродной системы рентгеновских трубок.

Опытным путём были получены оптимальные значения межэлектродных расстояний  $d$  и величины давлений  $p$  наполняемого газа (водорода) для напряжения пробоя  $U_{np}$  разрядника РО-43 в диапазоне от 140 до 210 кВ и разрядника РО-49 в диапазоне от 190 до 250 кВ. В таблице 4.1 приведены основные значения величин  $d$ ,  $p$  и  $U_{np}$ .

Таблица 4.1 – Основные значения величин межэлектродных расстояний  $d$ , давления водорода  $p$  и напряжения пробоя  $U_{np}$  использующихся при производстве разрядников-обострителей РО-43 и РО-49

Тип разрядника	$d$ , мм	$p$ , кгс/см <sup>2</sup>	$U_{np}$ , кВ
РО-43	2,8	66±0,5	155÷165
РО-43	3	70±0,5	165÷175
РО-43	3,2	69±0,5	190÷200
РО-43	3,4	68±0,5	200÷210

PO-49	3,2	70±0,5	205÷215
PO-49	3,4	69±0,5	210÷215
PO-49	3,6	68±0,5	220÷230
PO-49	3,8	67±1	235÷250

Эти данные получены на основании анализа более 500 изготовленных разрядников-обострителей PO-43 и PO-49 и могут быть полезны при разработке и изготовлении неуправляемых искровых разрядников с водородным наполнением.

### 4.3 Выводы к главе 4

1. Отработана промышленная технология серийного выпуска малогабаритных отпаянных разрядников-обострителей на рабочие напряжения 100 ÷ 400 кВ с относительным среднеквадратичным разбросом напряжения пробоя не более 3% и ресурсом свыше  $3 \cdot 10^6$  срабатываний.

2. Разработан новый технологический режим 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 (не менее 95%).

3. Тренировка разрядников - обострителей в среде электроотрицательных газов (элегаз SF<sub>6</sub> и его смеси с инертным газом и/или азотом) повышает электропрочность высоковольтного керамического изолятора, препятствуя образованию скользящих пробоев по поверхности керамики и увеличивает срок гарантийной наработки разрядника с относительным среднеквадратичным разбросом напряжения пробоя не более 3% свыше  $3 \cdot 10^6$  срабатываний.

## ГЛАВА 5. КОММУТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСКРОВЫХ РАЗРЯДНИКОВ-ОБОСТРИТЕЛЕЙ

Время коммутации – это время, в течение которого газоразрядный промежуток из непроводящего состояния переходит в проводящее. Величина этого временного интервала является одним из определяющих параметров разрядников-обострителей. Значение этого параметра позволяет судить о потенциальных возможностях импульсных генераторов, предназначенных для формирования импульсов напряжения амплитудой в десятки и сотни киловольт с нано- и субнаносекундными временами нарастания.

Время коммутации определяется двумя путями – расчётным и экспериментальным. Для проведения таких расчётов требуются значения напряжений пробоя, значения которых зависят от величины межэлектродного промежутка, рода газа и его давления. Поскольку разрядники-обострители работают при давлениях  $50 \div 120$  атмосфер, целесообразно определить значения статического напряжения пробоя в этих, ранее неизучавшихся, условиях.

Расчёты напряжений статического пробоя проводились в соответствии с двумя механизмами развития искрового разряда – Таунсендовскому и стримерному. На основании полученных данных вычислялось время коммутации в азоте и водороде для типичных межэлектродных промежутков 3 мм и 6 мм в диапазоне давлений  $P = 20 \div 140$  атмосфер в соответствии с известными закономерностями развития искрового разряда.

Заключительная часть главы 5 посвящена экспериментальному определению времени коммутации разрядников-обострителей типа РО-48 с межэлектродным промежутком  $d = 3$  мм и работающих при давлении рабочего газа (водорода)  $55 \div 58$  атмосфер.

## 5.1 Развитие искрового разряда в газах при атмосферном и сверхатмосферном давлениях в условиях статического пробоя

Развитие разряда в разрядниках-обострителях происходит фактически в условиях, характерных для статического пробоя. Это связано с тем, что при импульсной подаче на газоразрядный промежуток напряжения пробоя  $U_{имп}$  определяется из соотношения [49-52]:

$$U_{имп} = U_{стат} + \frac{dU}{dt} \cdot \tau_{разв}, \quad (5.1)$$

где  $U_{стат}$  – напряжение статического пробоя, В;  $\frac{dU}{dt}$  – скорость нарастания напряжения на промежутке, В/с;  $\tau_{разв}$  – характерное время развития разряда, с.

Напряжения, подаваемые на разрядник-обостритель, имеют характерные времена нарастания 5-10 мкс [40, 43]. Для амплитуды напряжения (200 ÷ 400) кВ это даёт скорость нарастания в следующих максимальных значениях  $dU/dt = 5 \cdot 10^{10} \div 10^{11}$  В/с. Для времён развития разряда в разрядниках-обострителях  $\tau_{разв} \approx 10^{-9}$  с приращение напряжения  $\frac{dU}{dt} \cdot \tau_{разв} \approx 50 \div 100$  В. Эти значения на уровне 200-400 кВ не играют существенной роли. Поэтому напряжение импульсного пробоя  $U_{имп}$  будет достаточно точно соответствовать статическому напряжению пробоя  $U_{стат}$ . При более высоких скоростях подачи напряжения на газоразрядных промежутках напряжение импульсного пробоя может существенно превышать значение напряжения статического пробоя.

Формирование искрового разряда в условиях статического пробоя может протекать в соответствии с двумя различными по сути механизмами [1, 45-47]. Первый из них – относительно медленный – получил название «Таунсендовского». Его суть заключается в развитии электронных лавин, быстро перемещающихся к аноду, и медленном дрейфе ионов в сторону катода, на котором в результате ион-электронной эмиссии ( $\gamma$ -процесс) образуются вторичные электроны и при выполнении условия

$$\gamma(e^{\alpha \cdot d} - 1) = 1, \quad (5.2)$$

где  $\alpha$  – коэффициент ударной ионизации электронами;  $\gamma$  – коэффициент вторичной ион-электронной эмиссии, который зависит от рода материала катода и энергии ионов;

формируется самостоятельный (самоподдерживающийся) разряд. Наличие в цепочке событий в промежутке медленно перемещающихся ионов не может обеспечить быструю коммутацию тока в цепи. При высоких давлениях (1 атмосфера и выше) собственное ультрафиолетовое излучение из электронных лавин в состоянии обеспечивать воспроизводство электронов на катоде за счёт фотоэлектронной эмиссии. Поскольку скорость света намного порядков превышает скорость дрейфа ионов, время установления стационарного состояния может измеряться одним или несколькими значениями времени дрейфа электронов через промежуток.

Второй механизм, получивший название «стримерного», имеет несколько другую природу [1, 45, 46, 52, 61, 62, 64]. Электронные лавины в плотных газах обладают очень большим усилением и создают высокие плотности локальных зарядов, которые в свою очередь порождают очень высокие напряженности электрического поля в области головки электронной лавины и в промежутке «анод – головка электронной лавины». При достижении усиления в индивидуальной электронной лавине в  $10^8$  раз ( $e^{\alpha \cdot d} \approx e^{20}$ ) в области головки электронной лавины локальные значения напряженности электрического поля достигают значений, соизмеримых с напряжённостью электрического поля в межэлектродном промежутке.

В этих условиях электрическое поле в пространстве между анодом и головкой электронной лавины увеличивается (практически вдвое), что очень сильно интенсифицирует ионизационные процессы (экспоненциальная связь коэффициента ударной ионизации с электрическим полем), а также приводит к увеличению скорости дрейфа электронов. Значительно увеличивается также напряжённость электрического поля в области между остовом электрической лавины и катодом. В этой области также увеличивается напряжённость электрического поля и интенсифицируются ионизационные процессы. Вторичные

электроны лавины, инициируемые УФ-излучением первичной лавины, развиваясь в областях с повышенной напряжённостью поля, втягиваются в положительно заряженный остов. В результате этих процессов первичная электронная лавина, достигшая «критического» усиления, начинает распространяться в пространстве со скоростью, на два порядка превышающей скорость дрейфа электронов. Такая «трансформированная» электронная лавина получила название «стример», а пробой, развивающийся по такому механизму, назвали «стримерным» пробоем.

Образование на месте прохождения первичной электронной лавины высоких концентраций электронов и ионов приводит к образованию сильнопроводящего локального канала. Формирование такого канала происходит за время, не превышающее время дрейфа электронов через промежуток. Пробой по стримерному механизму иногда называют «однолавиным пробоем».

Критическое усиление в электронной лавине может быть достигнуто и на небольшом удалении от катода в течение промежутка времени, равного частному от деления протяжённости этого участка на скорость дрейфа электронов. Оставшаяся часть промежутка будет «перемкнута» стримером, который обладает стопроцентным превышением в скорости распространения. В итоге время пробоя газоразрядного промежутка будет определяться как

$$t_{\text{пр}} = \frac{x}{v_{\text{др}}}, \quad (5.3)$$

где  $x$  – расстояние, на котором электронная лавина достигает критического усиления в  $10^8$  раз;  $v_{\text{др}}$  – скорость дрейфа электронов.

Наибольшее время на развитие разряда будет иметь место при  $x = d_{\text{ак}}$ .

## 5.2 Напряжения статического пробоя при сверхатмосферных давлениях

Напряжения статического пробоя по Таунсендовскому механизму определяют из условия воспроизводства электронов на катоде (5.2). Исходя из этого условия, с учётом функциональной связи коэффициента  $\alpha$  с



напряжённостью электрического поля, выражение для напряжения пробоя имеет вид [59, 99-101]:

$$U_{\text{пр}} = \frac{B \cdot p \cdot d}{\ln A \cdot p \cdot d - \ln \ln(1 + \frac{1}{\gamma})}, \quad (5.4)$$

где  $A$  и  $B$  – константы, определяемые родом газа и величиной напряжённости электрического поля;  $p$  – давление рабочего газа, Торр;  $d$  – величина межэлектродного промежутка, см.

Коэффициенты  $A$  и  $B$  имеют размерность  $\frac{1}{\text{см} \cdot \text{Торр}}$  и  $\frac{\text{В}}{\text{см} \cdot \text{Торр}}$ , соответственно.

Коэффициенты  $A$  и  $B$  хорошо известны для большинства газов, но для диапазонов приведённой напряжённости электрического поля  $E/p$  в пределах от  $100 \div 150 \frac{\text{В}}{\text{см} \cdot \text{Торр}}$  и выше. Эти значения получены в результате измерений для условий «импульсного» пробоя, когда напряжения пробоя превышают напряжение статического пробоя, для которых параметр  $E/p$  находится в пределах  $10 \div 15 \frac{\text{В}}{\text{см} \cdot \text{Торр}}$ . Для этих условий сведения о коэффициентах  $A$  и  $B$  отсутствуют.

Типичные значения коэффициентов  $A$  и  $B$  для водорода и азота (наиболее часто применяемые газы в разрядниках-обострителях) для условий «импульсного» пробоя имеют следующие значения:  $A_{\text{H}_2} = 5 \frac{1}{\text{см} \cdot \text{Торр}}$ ,  $B_{\text{H}_2} = 130 \frac{\text{В}}{\text{см} \cdot \text{Торр}}$ ,  $A_{\text{N}_2} = 12 \frac{1}{\text{см} \cdot \text{Торр}}$ ,  $B_{\text{N}_2} = 342 \frac{\text{В}}{\text{см} \cdot \text{Торр}}$ .

Для получения корректных результатов вычислений напряжения пробоя проводился подбор значений коэффициентов  $A$  и  $B$ , которые обеспечивают совпадение расчётных значений известным значениям напряжения пробоя в разрядниках-обострителях при известных давлениях и межэлектродных расстояниях. Было найдено, что хорошее совпадение с экспериментальными данными обеспечивается при следующих значениях параметров  $A$  и  $B$ :  $A_{\text{H}_2} = 5 \frac{1}{\text{см} \cdot \text{Торр}}$ ,  $B_{\text{H}_2} = 76 \frac{\text{В}}{\text{см} \cdot \text{Торр}}$ ,  $A_{\text{N}_2} = 12 \frac{1}{\text{см} \cdot \text{Торр}}$ ,  $B_{\text{N}_2} = 164 \frac{\text{В}}{\text{см} \cdot \text{Торр}}$ . Значение коэффициента  $\gamma$  принималось равным  $10^{-2}$ .

На рисунке 5.1 приведены расчётные зависимости напряжений статического пробоя для водорода и азота в диапазоне давлений от 20 до 140 атмосфер.

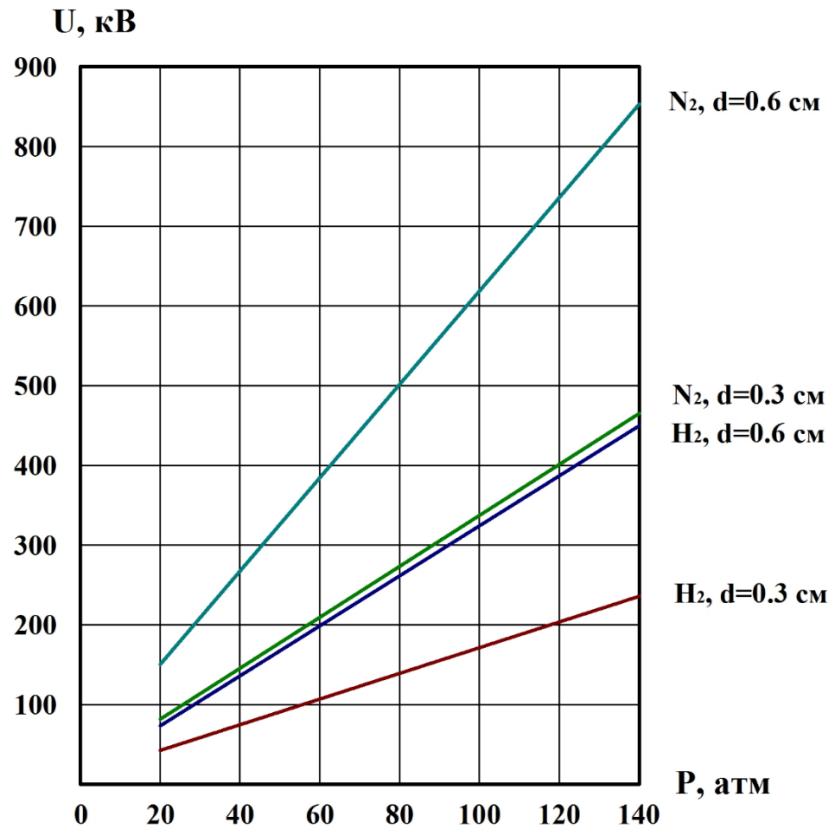


Рисунок 5.1 – Расчетные зависимости напряжений от давления статического пробоя по Таунсендовскому механизму в водороде и азоте

Межэлектродные промежутки имели значения 0.3 и 0.6 см (типичные значения для разрядников-обострителей).

Графические зависимости показывают, что при увеличении давления наблюдается «почти» линейное нарастание напряжений пробоя (выражение 5.4). При этом при увеличении межэлектродного промежутка в 2 раза напряжение увеличивается в 2 раза.

Максимальные значения напряжений пробоя имеют место при давлении в 140 атмосфер. Для водорода максимальное значение напряжения для промежутка в 0.6 см составляет 460 кВ, для промежутка 0.3 см – 240 кВ.

При использовании в качестве коммутирующей среды азота максимальные значения напряжений пробоя достигают значений  $U_{np}(d = 0.6 \text{ см}) = 860 \text{ кВ}$  и  $U_{np}(d = 0.3 \text{ см}) = 460 \text{ кВ}$ . Видно, что зависимости напряжений пробоя от давления для

водорода с промежутком  $d = 0.3$  см и для азота с промежутком  $d = 0.6$  см имеют очень близкие значения.

Полученные зависимости являются основой для вычисления значений напряжённостей электрического поля при расчётах времён развития искрового разряда.

Более корректным и менее противоречивым следует признать метод определения напряжения пробоя исходя из равенства напряжённости электрического поля в головке электронной лавины значению поля в межэлектродном промежутке (критерий стримерного пробоя). Также условие равенства реализуется в лавинах с «критическим» усилением. В этом случае напряжение пробоя будет определяться из соотношения [45-47, 52]:

$$E_{\text{лок}} = E_0 = \frac{U_{\text{пр}}}{d_{\text{ак}}}, \quad (5.5)$$

где  $E_0$  – средняя напряжённость электрического поля в межэлектродном промежутке, В/см;  $U_{\text{пр}}$  – напряжение, при котором происходит пробой промежутка, В;  $d_{\text{ак}}$  – межэлектродное расстояние, см.

Величина локальной напряжённости электрического поля  $E_{\text{лок}}$  определяется как:

$$E_{\text{лок}} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{q_{\Sigma}}{r_{\text{лав}}^2}, \quad (5.6)$$

где  $\varepsilon_0$  – диэлектрические постоянная ( $8.85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м);  $q_{\Sigma}$  – суммарный заряд электронов в головке лавины, Кл;  $r_{\text{лав}}$  – радиус головки электронной лавины (в предположении её сферичности).

В свою очередь, радиус головки электронной лавины определяется следующим «диффузионным» соотношением [45, 46, 59]

$$r_{\text{лав}} = \sqrt{4 \cdot D_e \cdot \tau_{\text{др}}}, \quad (5.7)$$

где  $D_e$  – коэффициент диффузии электронов в газе;  $\tau_{\text{др}}$  – время дрейфа электронной лавины.

Численные значения коэффициента диффузии электронов в конкретном газе для какого-то фиксированного давления ( $p = 1$  Торр или  $p = 1$  Атм) находились из

справочной литературы или вычислялись исходя из известного соотношения [48, 102-104]:

$$D_e = \frac{1}{3} \cdot \lambda_e \cdot \vartheta_x, \quad (5.8)$$

где  $\lambda_e$  – длина свободного пробега электронов в газе при заданном давлении,  $\vartheta_x$  – хаотическая скорость электронов в данном газе.

Величина суммарного заряда электронов в головке электронной лавины  $q_\Sigma$  при достижении «критического» усиления будет иметь следующее значение:

$$q_\Sigma = e \cdot N_e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 10^8 = 1.6 \cdot 10^{-11} \text{ Кл}, \quad (5.9)$$

где  $e$  – заряд электрона.

Поскольку длина свободного пробега электронов обратно пропорциональна давлению, значение напряжённости электрического поля будет пропорционально давлению.

Для оценок значения  $E_{\text{лок}}$  можно воспользоваться соотношением Мика и Крэгса [45, 52]:

$$E_{\text{лок}} = \frac{4 \cdot e \cdot \alpha \cdot e^{\alpha k}}{3 \sqrt{\left(\frac{2 \cdot D_e}{\mu_e}\right) \cdot \left(\frac{x}{E}\right)}}, \quad (5.10)$$

где  $\alpha$  – коэффициент ударной ионизации,  $D_e$  – коэффициент диффузии электронов,  $\mu_e$  – подвижность электронов,  $x$  – расстояние, пройденное головкой электронной лавины в межэлектродном промежутке,  $E$  – напряжённость внешнего электрического поля.

Для лавин, развивающихся в воздухе, выражение (5.10) преобразуется к виду:

$$E_{\text{лок}} = 5.27 \cdot 10^{-7} \frac{\alpha \cdot e^{\alpha x}}{\left(\frac{x}{E}\right)^{1/2}}, \text{ В/см} \quad (5.11)$$

Применяя в качестве условия возникновения стримера соотношение [45, 46, 52]

$$E_{\text{лок}} = k \cdot E, \quad (5.12)$$

где  $k \approx 1$  на основании соотношений (5.10) и (5.11) можно рассчитать минимальные значения напряжения пробоя в воздухе для заданных значений межэлектродного промежутка и давления газовой среды.

На рисунке 5.2 приведены значения напряжений пробоя по стримерному механизму в водороде и в азоте для двух значений межэлектродного промежутка  $d_1 = 0.6$  см и  $d_2 = 0.3$  см в диапазоне давлений  $p = 20 \div 140$  атмосфер.

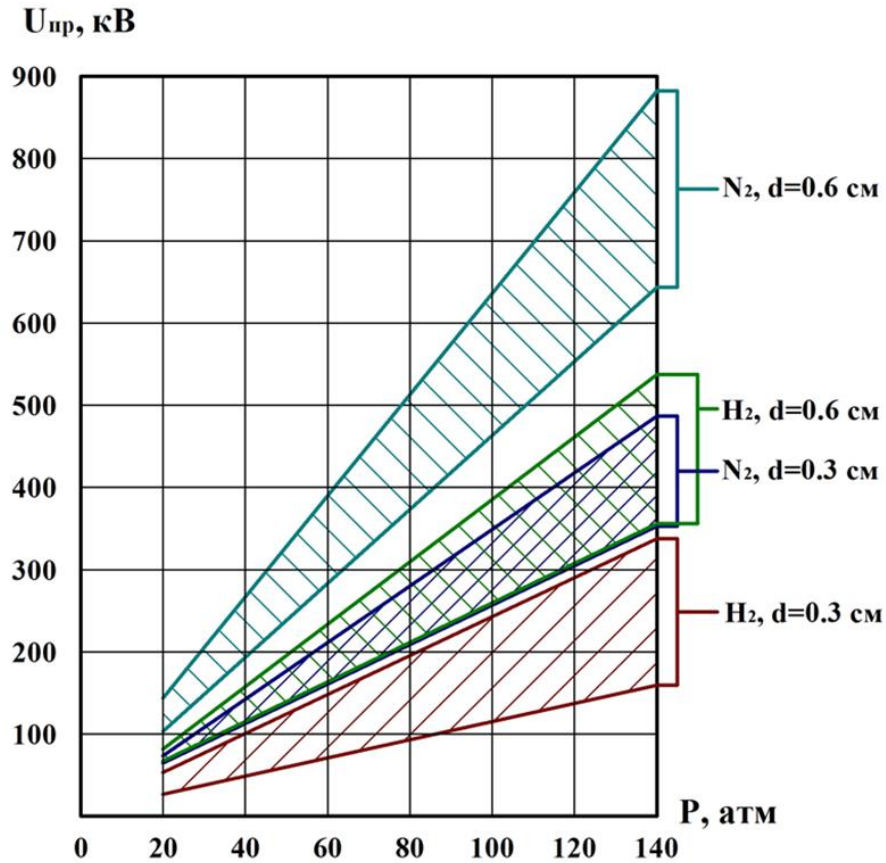


Рисунок 5.2 – Расчётные зависимости напряжений пробоя от давления, рассчитанные по стримерному механизму для водорода и азота

Расчёты проводились по формуле (5.6). Значения напряжений пробоя находятся в пределах, ограниченных двумя кривыми. Наличие таких областей («шлейфов») обусловлено главным образом неопределённостями в значениях коэффициентов ударной ионизации  $\alpha$  в условиях статического пробоя. Значения коэффициентов  $\alpha_{H_2}$  и  $\alpha_{N_2}$  в области малых значений  $(E/p)$  находились из экстраполяции известных зависимостей, полученных при измерениях в режиме импульсного пробоя [45, 46, 59, 99, 100, 105-107].

Расчёты напряжений пробоя по соотношению (5.10) дали значения, попадающие в «шлейф» соответствующих зависимостей на рисунке 5.2.

### 5.3 Определение значений времён коммутации в разрядниках-обострителях по известным расчётным соотношениям

Для искровых разрядников-обострителей время коммутации является одним из важнейших электрофизических параметров, определяющих их область применения.

Определению этого важнейшего параметра посвящено большое число исследовательских работ [1, 45-47, 52, 61, 62, 64]. Однако, все эти исследования проводились в условиях «импульсного» пробоя и ограничивались давлениями в области одной атмосферы с единичными упоминаниями давления в 10 атмосфер. Поведение времён коммутации в области давлений 20-140 атмосфер, характерных для современных разрядников-обострителей, до настоящего времени не изучено.

Существует несколько определений времени коммутации. Среди них присутствуют «время развития разряда» и «время коммутации».

Одно из первых определений времени развития разряда базируется на том, что за это время электронная лавина достигает «критического» усиления ( $N = 10^8$ ) и далее трансформируется в «скоростной» стример. Согласно этому определению, время развития разряда определяется из условия достижения и «критического» усиления и имеет вид [45, 47, 52, 59]:

$$t_{pp} = \frac{\ln 10^8}{\alpha \cdot v_{др}}, \quad (5.13)$$

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

Для характерных для статического пробоя значениях  $E/p = 10 \div 15 \frac{\text{В}}{\text{см} \cdot \text{Торр}}$  значения ( $\alpha/p$ ) в водороде и в азоте находятся в пределах от  $10^{-4}$  до  $10^{-1} \frac{1}{\text{см} \cdot \text{Торр}}$ , а скорости дрейфа для  $E/p = 10 \div 15 \frac{\text{В}}{\text{см} \cdot \text{Торр}}$  для водорода и азота находятся в пределах  $(0.4 \div 0.5) \cdot 10^7$  см/с [45, 46, 48, 59, 99].

Малые времена развития разряда, согласно выражению (5.13), могут быть достигнуты только при наличии больших значений коэффициента ударной ионизации  $\alpha$  и скорости дрейфа электронов. Скорость дрейфа электронов не зависит от давления и полностью определяется приведённой напряжённостью электрического поля ( $E/p$ ). Коэффициент ударной ионизации зависит от давления линейно (для фиксированного значения ( $E/p$ )) [46-48, 59, 105]. Таким образом, для существенного сокращения времени коммутации необходимо заметным образом увеличивать давление коммутирующей среды.

На рисунке 5.3 приведены зависимости времён развития искрового разряда в среде водорода от давления в пределах  $20 \div 140$  атмосфер при варьировании значения параметра ( $\alpha/p$ ) в пределах от  $10^{-4}$  до  $10^{-1} \frac{1}{\text{см}\cdot\text{Торр}}$ . Исходные значения параметра ( $\alpha/p$ ) соответствуют условиям статического пробоя.

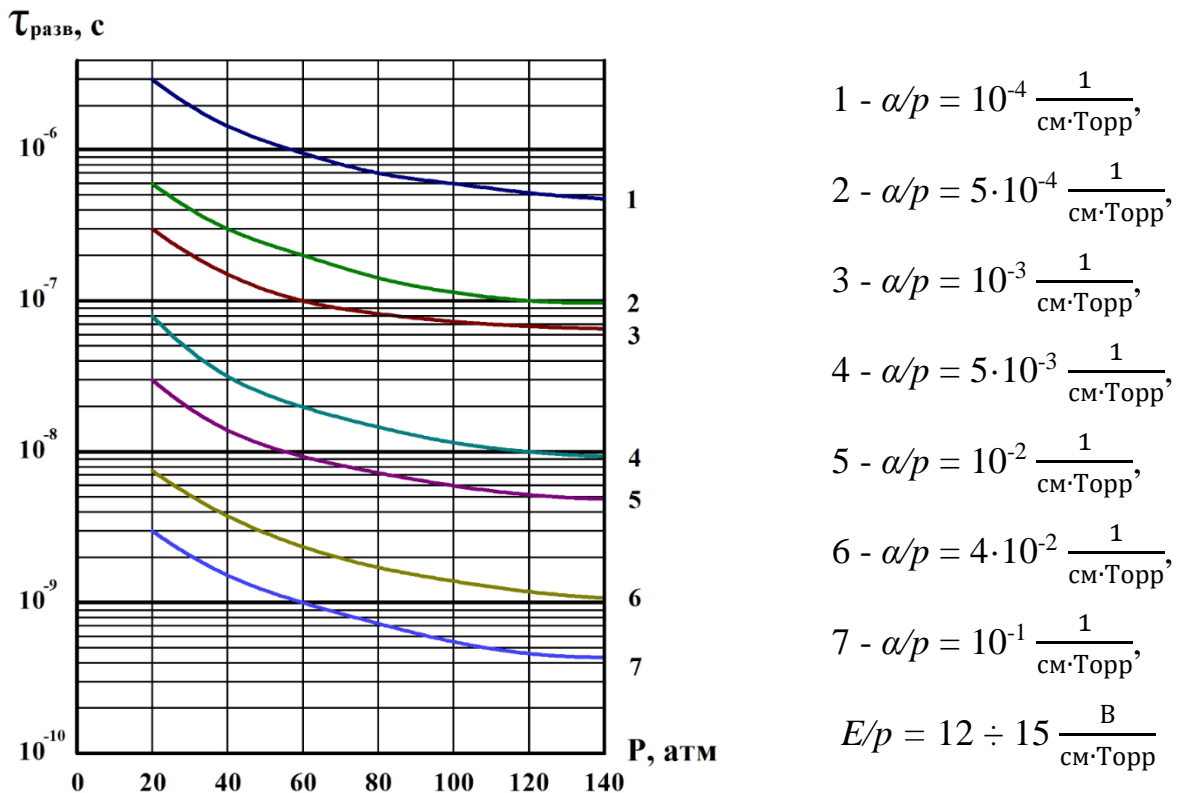


Рисунок 5.3 – Расчётные зависимости времён развития искрового разряда при статическом пробое от давления водорода при различных значениях параметра

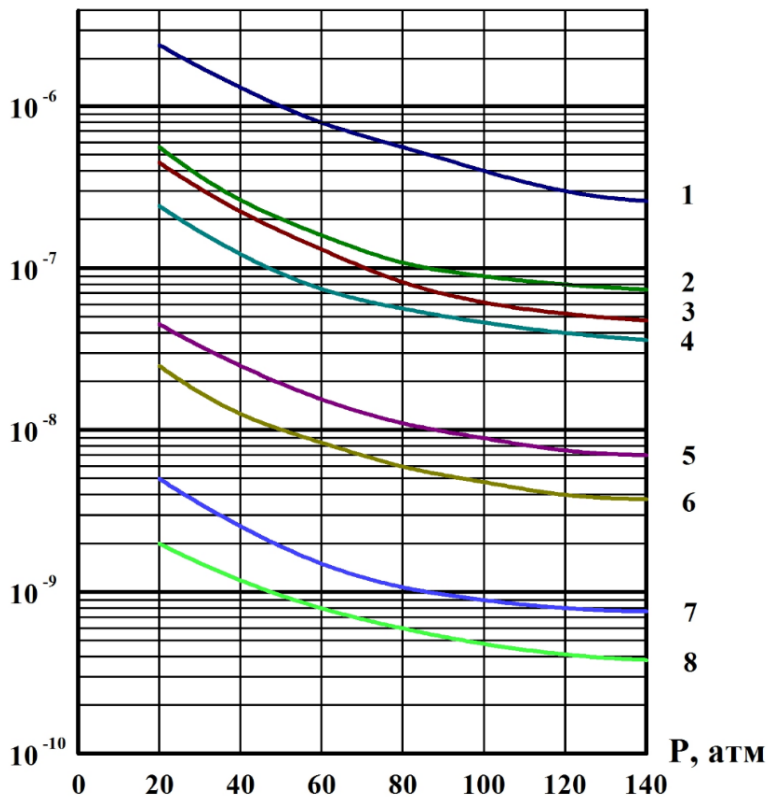
( $\alpha/p$ )

Видно, что при малых значениях параметра ( $\alpha/p$ ) ( $10^{-4} \div 10^{-3}$ ) характерные времена развития разряда исчисляются интервалами от единиц микросекунд до сотен наносекунд (кривые 1÷3,  $p = 20 \div 60$  Атм). По мере увеличения значения параметра ( $\alpha/p$ ) и давления – времена развития разряда имеют значения  $3 \div 1$  нс. При достижении давления 140 Атм время развития разряда сокращается до 0,4 нс.

Анализ графических зависимостей показывает, что времена развития разряда связаны с давлением обратно пропорциональной зависимостью. Так, при увеличении давления с уровня в 20 атмосфер до 140 атмосфер, характерные времена развития разряда сокращаются с 3 нс до 0,4 нс, т.е. практически в 7 раз (кривая 7). Такие же соотношения между временами развития разряда и увеличения давления наблюдаются у всех остальных зависимостей.

На рисунке 5.4. приведены аналогичные зависимости времён развития искрового разряда в азоте в диапазоне изменения давлений 20 ÷ 140 атмосфер.

$\tau_{\text{разв}}, \text{с}$



$$1 - \alpha/p = 10^{-4} \frac{1}{\text{см} \cdot \text{Торр}},$$

$$2 - \alpha/p = 5 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{см} \cdot \text{Торр}},$$

$$3 - \alpha/p = 7.5 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{см} \cdot \text{Торр}},$$

$$4 - \alpha/p = 10^{-3} \frac{1}{\text{см} \cdot \text{Торр}},$$

$$5 - \alpha/p = 5 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{см} \cdot \text{Торр}},$$

$$6 - \alpha/p = 10^{-2} \frac{1}{\text{см} \cdot \text{Торр}},$$

$$7 - \alpha/p = 5 \cdot 10^{-2} \frac{1}{\text{см} \cdot \text{Торр}},$$

$$8 - \alpha/p = 10^{-1} \frac{1}{\text{см} \cdot \text{Торр}},$$

$$E/p = 12 \div 15 \frac{\text{В}}{\text{см} \cdot \text{Торр}}$$



Рисунок 5.4 – Расчётные зависимости времён развития искрового разряда при статическом пробое в азоте от давления при различных значениях параметра ( $a/p$ )

Зависимости имеют идентичное поведение и демонстрируют достаточно близкие значения времён развития искрового разряда.

Рассмотренный метод расчёта времени развития искрового разряда не учитывает значения тока разряда в электрической цепи и влияние на величину времени развития электрофизических параметров разрядного контура.

На рисунке 5.5 приведены зависимости времён развития разряда в соответствии с формулой [1, 16]:

$$t_{\text{разв}} = 9 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{\sqrt[3]{I_0 \cdot p}}{E_0}, \quad (5.14)$$

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  $U_0$ .

Выражение (5.14), учитывающее ток в разрядном контуре, показывает, что при коммутации больших токов невозможно добиться минимальных значений времён коммутации.

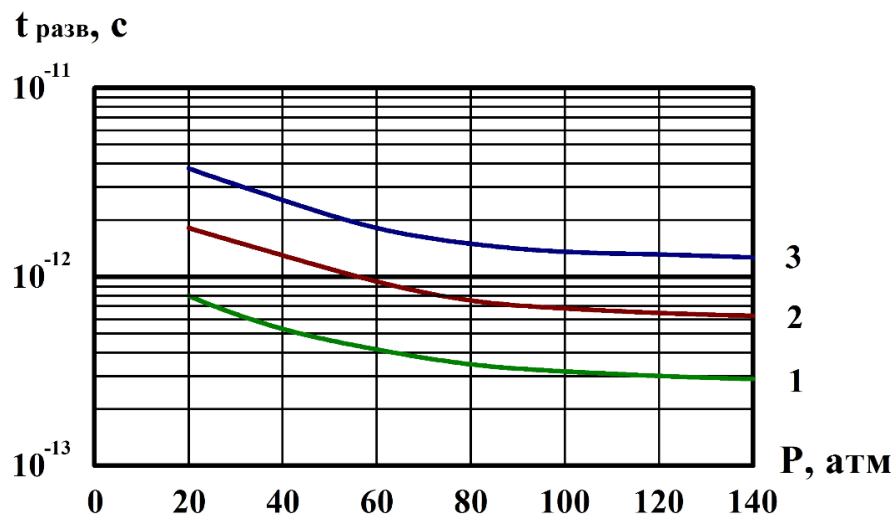


Рисунок 5.5 – Зависимости времени развития разряда в водороде от давления, рассчитанные по формуле (5.14) для трёх значений тока разряда  $I_0$ : 1 – 100 А, 2 – 1000 А, 3 – 10000 А. Межэлектродный промежуток  $d_{\text{ак}} = 0.6$  см

При проведении расчётов времён коммутации по формуле (5.14) принимались следующие значения коммутируемых токов – 100 А, 1000 А и 10000 А. Величина напряжённости электрического поля  $E_0$  определялась из значений напряжений пробоя  $U_0$  и величины межэлектродного промежутка.

Времена коммутации, как и ожидалось, увеличиваются с увеличением тока разряда. Однако обращает на себя внимание тот факт, что характерные времена коммутации находятся в пикосекундной области. Такие малые времена коммутации в указанном диапазоне токов и  $E_0$  практически недостижимы.

Имеет место ещё одна закономерность, описывающая время коммутации с учётом спада напряжения на промежутке с уровня  $0,9U_0$  до уровня  $0,1U_0$ .

Аналитическое выражение, связывающее время коммутации с параметром газоразрядного промежутка в этих условиях, имеет вид [1, 16, 47]:

$$t_{\text{разв}} = 2 \cdot p \cdot d^2 \cdot \frac{1}{a \cdot U_0^2}, \quad (5.15)$$

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.

Коэффициент « $a$ » определяется родом газа и известен для трёх видов газа – воздуха, азота и аргона. Коэффициент « $a$ » для этих газов имеет следующие значения:  $a_1 = 0.8$ ,  $a_2 = 0.6$  и  $a_3 = 27$  [16, 40]. Для расчётов времени развития разряда в водороде постулировалось, что  $a_{H_2} = 10 \frac{\text{Атм} \cdot \text{см}^2}{\text{В}^2 \cdot \text{с}}$ .

На рисунке 5.6 отражены расчётные зависимости времени развития разряда в азоте (кривая 1) и в водороде (кривая 2) от давления.

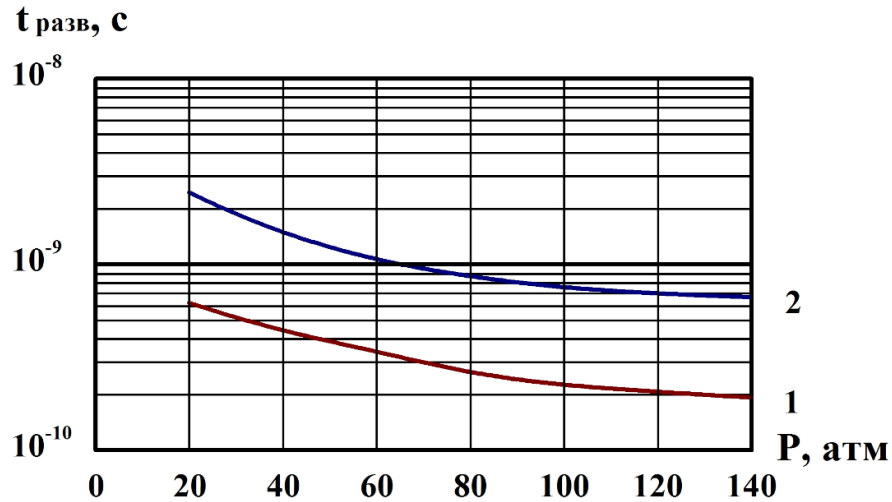


Рисунок 5.6 – Зависимости времени коммутации в азоте (кривая 1) и в водороде (кривая 2) от давления

Каждая кривая имеет одинаковые значения времён развития разряда как в промежутке  $d_{ак} = 0.6$  см, так и в промежутке  $d_{ак} = 0.3$  см.

Независимость от величины межэлектродного промежутка вытекает из самого выражения для времени развития (5.15). Напряжение на промежутке пропорционально величине самого промежутка. Поэтому частное от деления величины межэлектродного промежутка на значение напряжения является константой. В [40] было учтено влияние индуктивности разрядного контура  $L$  и омического сопротивления  $R$  на время развития искрового разряда.

Эта закономерность отражается формулой:

$$t_{разв} = 21 \cdot \frac{p \cdot d^2}{a \cdot U_0^2} + 2.2 \cdot \frac{L}{R}, \quad (5.16)$$

где  $L$  – индуктивность разрядного контура,  $R$  – сопротивление нагрузки.

Параметры  $p$ ,  $d$  и  $a$  имеют тот же самый смысл и численные значения, что и в выражении (5.15). Для типичных значений индуктивности в разрядном контуре  $L = 100$  нГ для нагрузок в 100 – 10000 Ом второе слагаемое в выражении (5.16) имеет значение 1 – 0.1 нс. Значение первого слагаемого в этом выражении всегда будет превышать вклад второго слагаемого.

Типичные зависимости времени развития разряда в соответствии с выражением (5.16) приведены на рисунке 5.7. для водорода и азота.

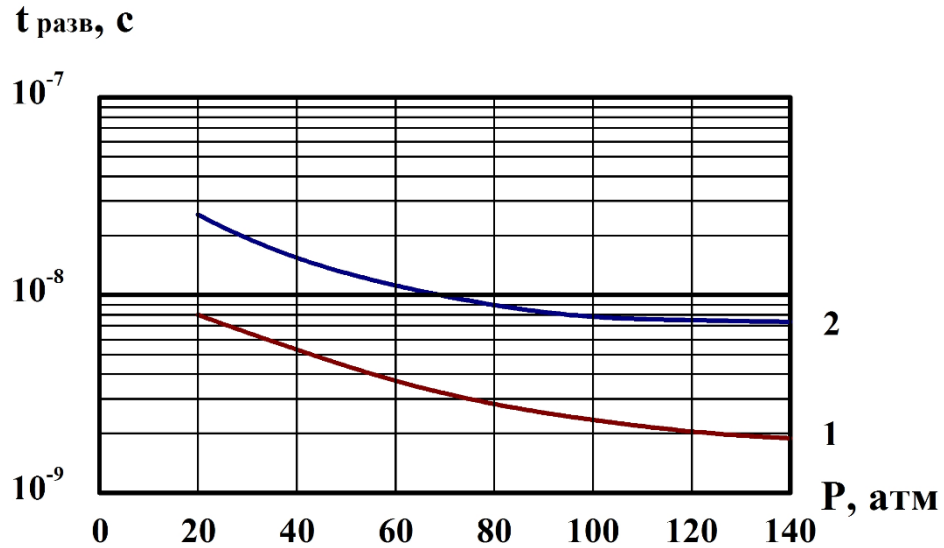


Рисунок 5.7 – Зависимости времени коммутации, рассчитанные по соотношению (5.16), от давления для водорода (кривая 1) и азота (кривая 2)

На рисунке 5.8 отражены зависимости времени коммутации, рассчитанные с использованием исходных данных фундаментальных соотношений, полученных экспериментальным путём [16, 45, 46, 52]:

$$p \cdot t_{\text{разв}} = F\left(\frac{E}{p}\right), \quad (5.17)$$

где  $p$  – давление,  $F\left(\frac{E}{p}\right)$  – фундаментальная функция, определяемая родом газа и параметром  $(E/p)$ .

Функции  $F\left(\frac{E}{p}\right)$  в выражении (5.17) отражены графически (экспериментальные зависимости) в работах [45, 46, 52] для множества газов, за исключением водорода. Поэтому при расчётах использовались необходимые данные, которые также находились путём экстраполяции графиков в область значений  $(E/p)$ , характерных для статического пробоя. В качестве газов были использованы воздух и аргон.

Типичные зависимости времени развития разряда от давления для воздуха и аргона отражены на рисунке 5.8.

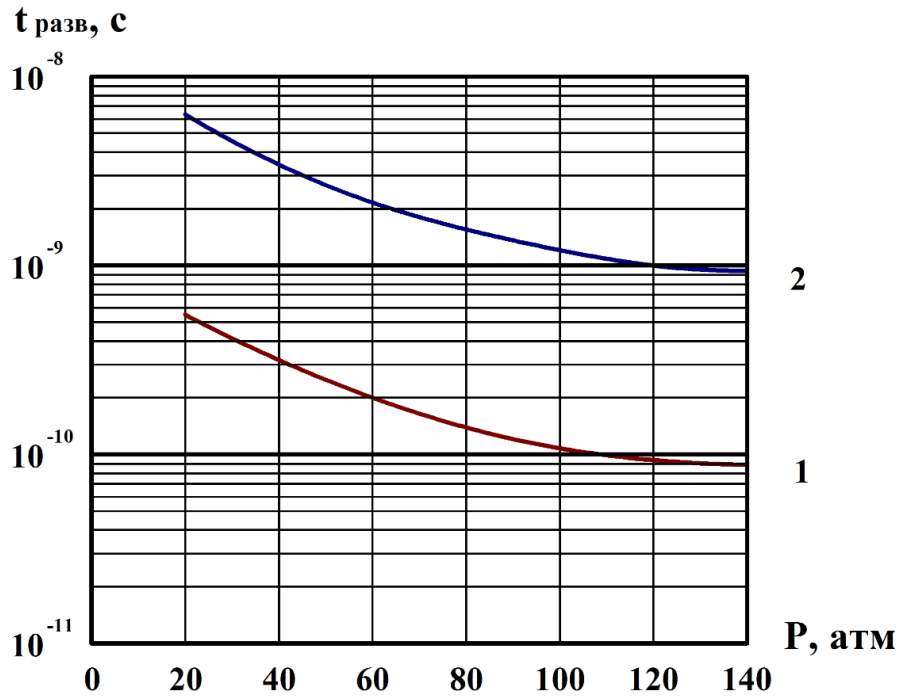


Рисунок 5.8 – Зависимости времени развития разряда от давления для воздуха (кривая 2) и аргона (кривая 1), полученные из графических зависимостей функции (5.17)

Для аргона (атомарный газ) время развития разряда находится в субнаносекундной области, тогда как в воздухе – в наносекундной области.

Приведённые в данном разделе расчётные значения времён развития разряда различными методами в диапазоне давлений  $p = 20 \div 120$  Атм отражают общую тенденцию к сокращению времени коммутации с увеличением давления. В первом приближении можно считать, что время развития разряда обратно пропорционально давлению. Имеет место «разброс» в значениях времён коммутации на порядки – от микросекундной области до пикосекундной области.

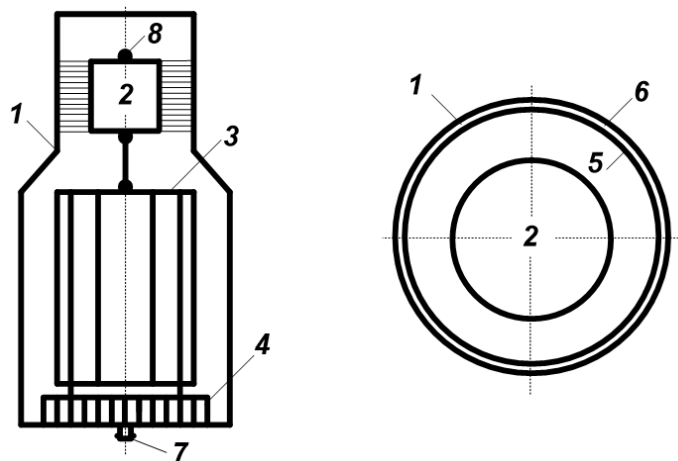
Проведённые расчёты характерных времён развития искрового разряда по всем известным закономерностям выявили две основные закономерности. Первое – времена развития искровых разрядов изменяются обратно пропорционально давлению рабочего газа в разряднике. Второе – расчётные значения времён развития искрового разряда, вычисленные по различным моделям, отличаются друг от друга по абсолютному значению на порядки.

Однозначный ответ о временах развития искрового разряда сверхатмосферного давления может быть получен только экспериментальными методами.

#### 5.4 Экспериментальное определение времён коммутации в разрядниках-обострителях сверхатмосферного давления

Общая схема экспериментальной установки приведена на рисунке 5.9. В её состав входят цилиндрический корпус (1) из нержавеющей стали (внешняя оболочка коаксиальной линии), разрядник-обостритель (2), резистивная нагрузка в виде набора низкоиндуктивных резисторов (3) типа ТВО-60, резистивный шунт (4) ( $R = 0.01$  Ом) и конструктивный делитель напряжения (5). В верхнюю часть цилиндрического корпуса (1), где располагается разрядник-обостритель (2), встроен дополнительный цилиндрический электрод (5). Он изолирован от цилиндрического корпуса (1) очень тонким слоем конденсаторной бумаги (6).

Формирующая линия вместе с импульсным трансформатором, зарядившим промежуток «разрядник-обостритель – внешняя оболочка» линии до напряжений  $150 \div 500$  кВ, монтировались в баке с трансформаторным маслом.



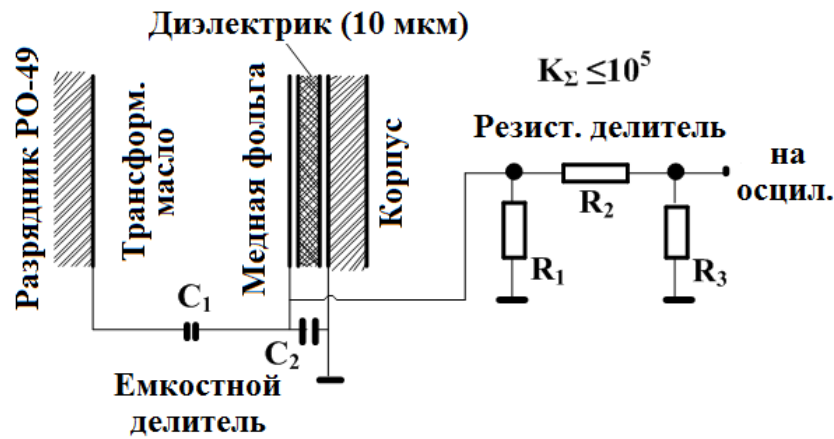


Рисунок 5.9 – Структурная схема измерительного модуля

(1 – цилиндрический корпус, 2 – разрядник-обостритель, 3 – резистивная нагрузка (ТВО-60), 4 – резистивный шунт (0.01 Ом), 5 – дополнительный электрод, 6 – конденсаторная бумага, 7 – вывод на осциллограф, 8 – высоковольтный вывод разрядника-обострителя)

Штриховкой между разрядником-обострителем 2 и внешней оболочкой линии 1 отражена область высоковольтного конструктивного конденсатора. Ёмкость такого конденсатора находится в пределах  $40 \div 70$  пФ.

Высоковольтный конструктивный делитель напряжения представляет собой пластину из медной фольги, зафиксированную через тонкий слой конденсаторной бумаги на внутренней поверхности цилиндрической оболочки. Сигнал с пластины через отверстие в оболочке подавался на внешние коаксиальные аттенюаторы и далее на осциллограф. Варианты конструкций и их принцип действия отражены в работах [16, 37].

Высоковольтный импульс необходимой амплитуды с временем нарастания  $2 \div 6$  мкс от высоковольтного импульсного трансформатора подавался на внешний вывод (8) разрядника-обострителя. Конструктивная ёмкость, образованная разрядником-обострителем и цилиндрическим корпусом, заряжалась до необходимого для пробоя разрядника напряжением. После срабатывания разрядника конструктивная ёмкость разряжалась по контуру с минимальной индуктивностью на блок низкоомных резисторов (3). Ток, протекавший по этому контуру, регистрировался резистивным шунтом. По

измеренным длительностям переднего фронта напряжения и тока можно судить о характерных временах разряда в разряднике-обострителе (на уровне  $0.1 \div 0.9$  от амплитудного значения).

Применявшиеся в работе осциллографы типа АКПП-4115/3А и С1-75 не позволяли провести адекватные измерения. Характерные времена нарастания тока или спада напряжения при этих измерениях составляли  $2 \div 10$  нс.

Корректные измерения времён коммутации разрядников-обострителей типа РО-48 в составе действующего оборудования были проведены в лаборатории электронных ускорителей Института Электрофизики УрО РАН г. Екатеринбург старшим научным сотрудником, к. т. н., Шунайловым Сергеем Афанасьевичем.

Измерение времени коммутации производилось на разрядниках – обострителях типа РО-48, интегрированных в генератор «Радан Эксперт». Данные разрядники имели межэлектродное расстояние 0.3 см, в качестве рабочего газа использовался водород при давлениях  $55 \div 58$  атмосфер, обеспечивающий напряжение пробоя разрядника на уровне  $150 \pm 2$  кВ. Наружный диаметр корпуса разрядника равнялся 40 мм.

Электрическая схема генератора «Радан Эксперт» представлена на рисунке 5.10.

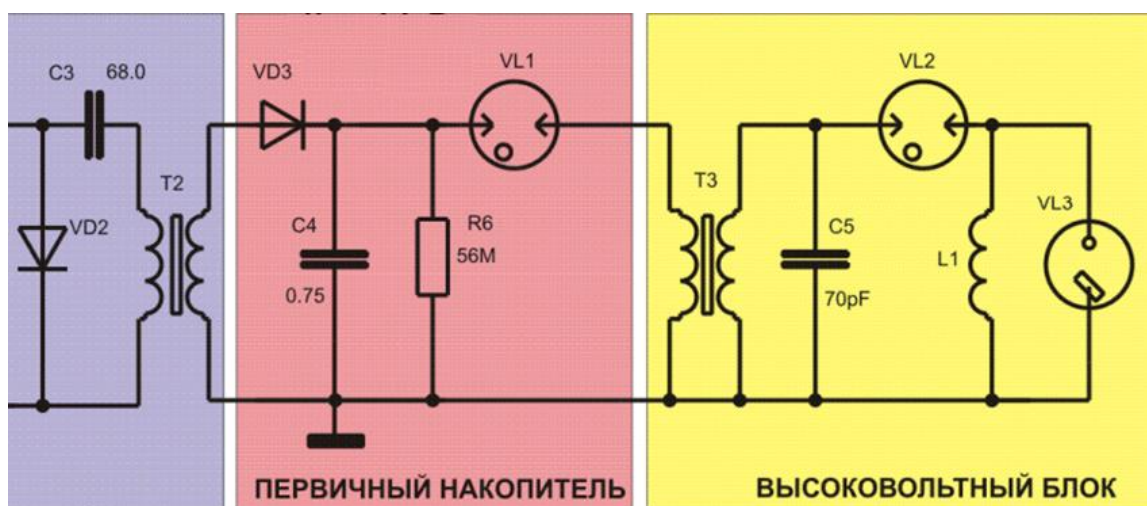


Рисунок 5.10 – Электрическая схема генератора «Радан Эксперт»



Разрядник РК-162 используется в качестве коммутатора  $VL_1$  (первичный накопитель) емкости  $C_4$  на первичную обмотку импульсного трансформатора  $T_3$  высоковольтного блока. Формирующая линия  $C_5$  коммутируется на нагрузку  $VL_3$  (импульсная электронная трубка ИМА3-150Э) с помощью разрядника  $VL_2$ . Именно коммутационные характеристики этого разрядника определяют практически все характеристики высоковольтного импульсного генератора (амплитуда, фронт, стабильность). В одной из модификаций генератора применялся разрядник Р-43. Интегрировать разрядник РО-48 в такой генератор не представляет никакого труда, т.к. диаметры разрядников совпадают (40 мм). Увеличение линейного размера разрядника (на 10 мм) не существенно увеличивает длину 20 - омной формирующей линии ( $C_5$ , разрядник встроен в линию). Размеры линии: внешний электрод – диаметр 70 мм, внутренний – 40 мм.

На выход генератора устанавливается 45 - омная коаксиальная линия с встроенным емкостным делителем напряжения (рисунок 5.11).



Рисунок 5.11 – Внешний вид генератора с измерительной линией

Переходная характеристика делителя  $\sim 80$  пс. Сигнал с делителя поступал на осциллограф с полосой 6 ГГц (переходная характеристика  $\sim 60$  пс). Таким образом, измерительный тракт позволял корректно оценивать временные процессы более 100 пс. Электрическая длина линии до резистивной нагрузки - 1 нс, определяет верхнюю границу диапазона корректных временных измерений (без отражений фронта высоковольтного импульса от нагрузки).

На рисунке 5.12 представлены в сравнении две характерные осциллограммы выходного напряжения генератора для разных разрядников-обострителей (P-43 и PO-48).

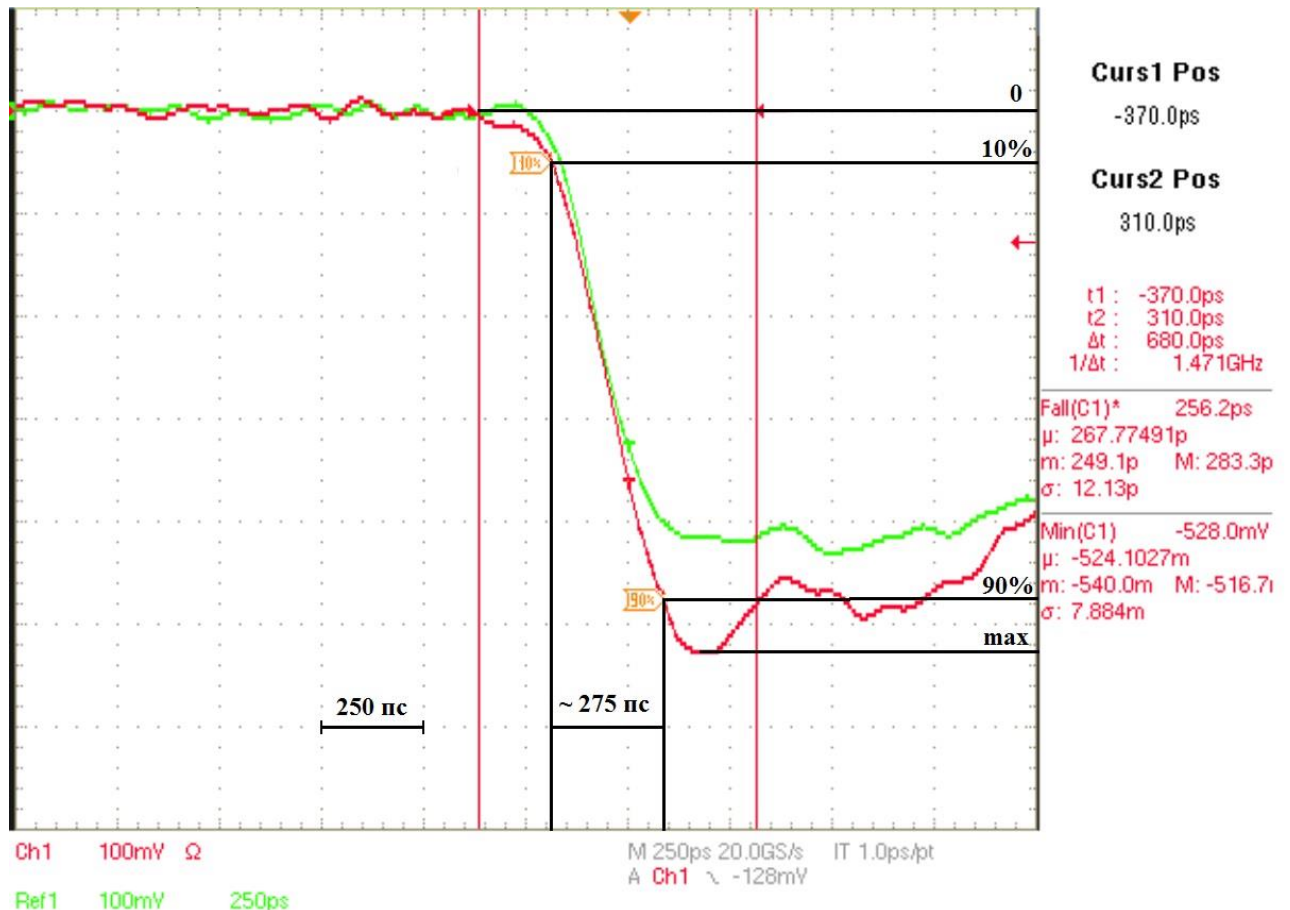


Рисунок 5.12 – Осциллограмма выходного напряжения генератора  
 Зеленый цвет (Ref 1) – для разрядника P-43, красный цвет (Ch 1) – PO-48

Времена коммутации этих приборов можно считать идентичными  $\sim 230...250$  пс. Сигналы получены в одних условиях (генератор - делитель - тракт). Время нарастания напряжения на зазоре разрядников  $\sim 1$  мкс. В режиме

отсутствия пробоя разрядника трансформатор заряжает формирующую линию до 180-190 кВ (зависит от напряжения пробоя разрядника РК-162 в первичной цепи). Таким образом можно оценить величину перенапряжения на зазоре, что также определяет коммутационные характеристики и стабильность разрядника. Следует отметить, что установленный изначально разрядник-обостритель Р-43 имеет амплитуду пробоя  $\sim 140$  кВ. Этим определяется разница амплитуд двух треков.

Характерный выброс напряжения на фронте выходного импульса для случая с РО-48 определяется увеличением длины разрядника. Внутренний электрод разрядника вместе с его цилиндрическим корпусом уже представляет собой линию. Длина этой линии  $\sim 40$  мм или 0.2 нс, что соизмеримо с временами коммутации разрядника. Более подробно с установкой можно ознакомиться в работе [41].

Представленные для испытаний образцы приборов серии РО-48 в количестве 3 штук показали отличную повторяемость результатов (рисунок 5.13).

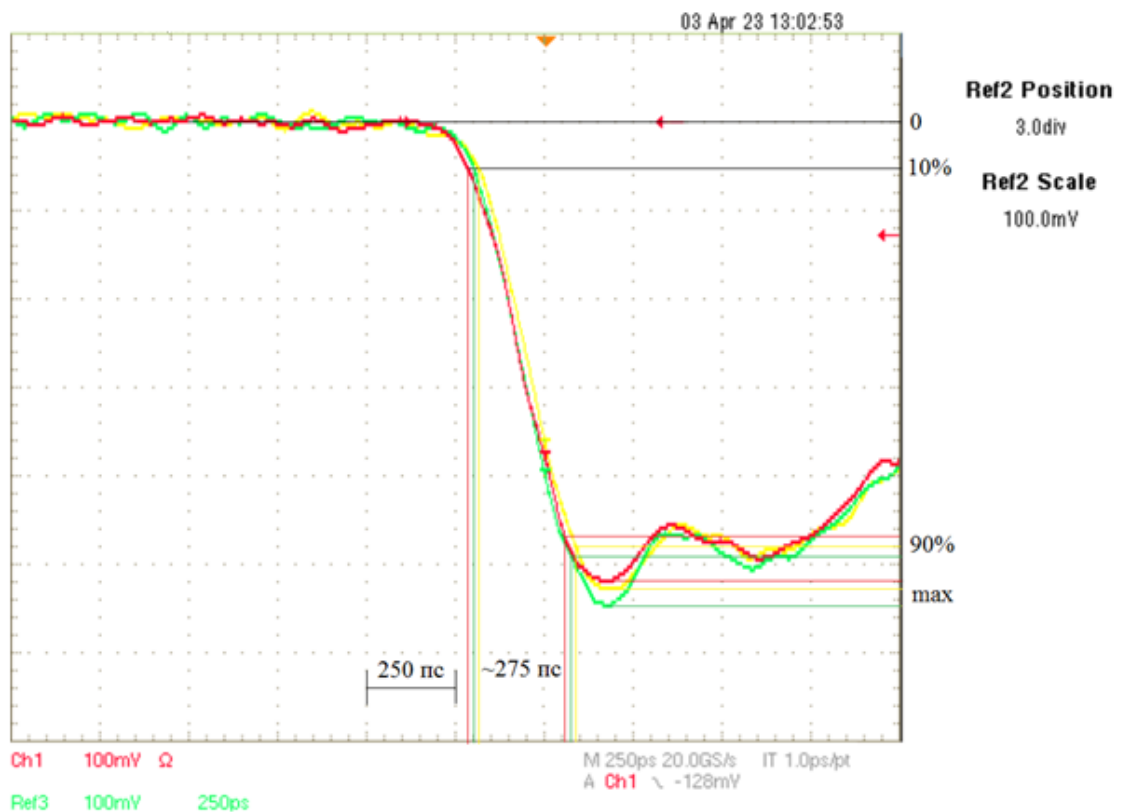


Рисунок 5.13 – Осциллограмма выходного напряжения генератора для трех разрядников РО-48

Методика измерений для всех трех разрядников была идентичной. После установки разрядника (сборки генератора) и заполнения системы трансформаторным маслом, выполнялась тренировка электродов разрядника 1000 импульсами. Далее проводилась фиксация осциллограмм. На рисунке 5.14 показан режим накопления 10 выходных импульсов генератора.

Численно оценить стабильность работы разрядника РО-48 в этой схеме затруднительно. Всё очень сильно зависит от сочетания (комбинации) разрядников в контурах резонансного трансформатора. Другими словами, необходимо стабилизировать напряжение пробоя первичного коммутатора  $V_{L1}$ . Стоит отметить, что для выбранной схемы разрядники РО-48 имеют относительный среднеквадратичный разброс напряжения пробоя  $\delta U_{пб}$ , определённый по ГОСТ21107.7-75 «Приборы газоразрядные. Методы измерения электрических параметров искровых разрядников», не превышающий 2%.

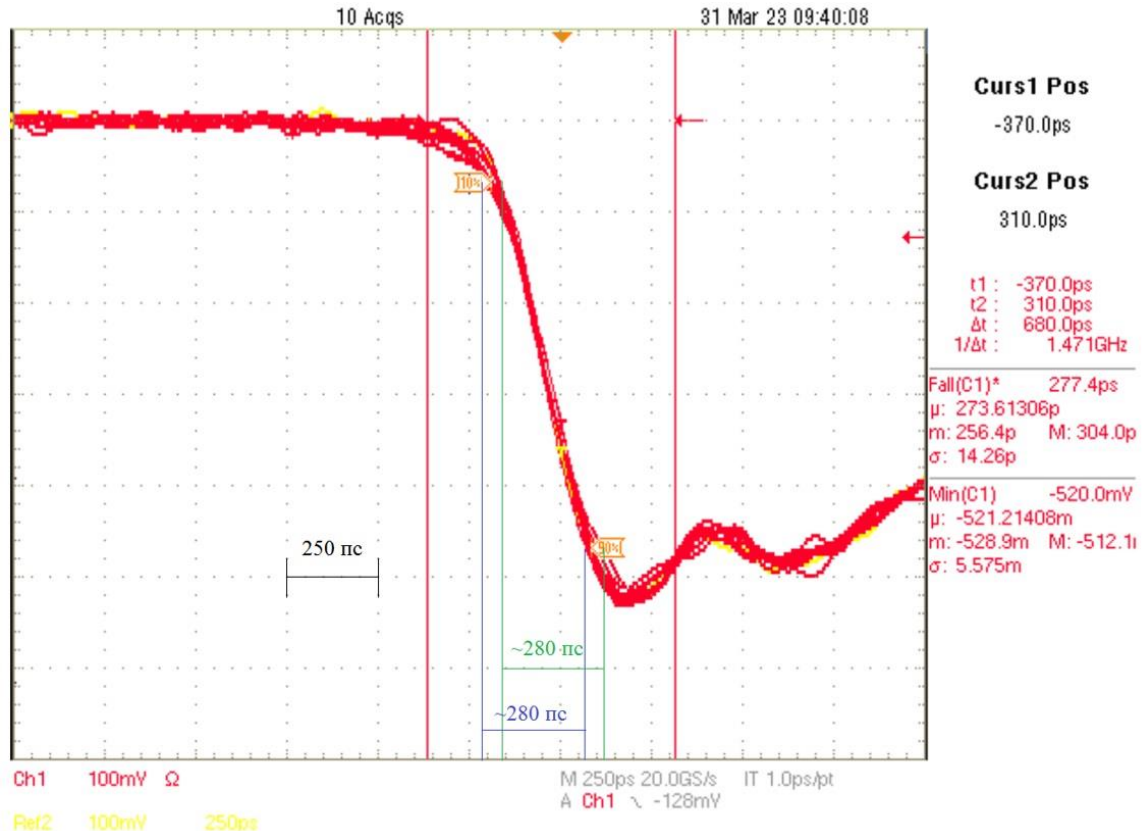


Рисунок 5.14 – Осциллограмма выходного напряжения генератора. Режим накопления 10 импульсов.

Резюмируя вышеизложенное можно сделать вывод, что разрядники-обострители типа РО-48, при проведении измерений времени коммутации в генераторе «Радан Эксперт», способны обеспечивать времена коммутации на уровне  $\sim 230 \dots 280$  пс.

Прямые измерения времён развития разряда в разрядниках-обострителях типа Р-43 и РО-48 (напряжения пробоя 140 и 150 кВ, соответственно) дают значения в  $230 \div 280$  пикосекунд. В разрядниках-обострителях более поздних моделей типа РО-49 рабочие давления увеличены до 120 атмосфер, а рабочие напряжения при этом увеличены до 400 кВ.

Из всех расчётных результатов, а также из множества экспериментальных данных следует, что время развития искрового разряда обратно пропорционально давлению. Это означает, что в разрядниках-обострителях типа РО-49 времена коммутации будут иметь меньшие значения, чем у разрядников-обострителей типа Р-43 и РО-48, т.е.  $\tau_{\text{разв}}^{\text{РО-49}} < \tau_{\text{разв}}^{\text{РО-48}}$ .

Другое важное обстоятельство связано с проявлением автоэлектронных эффектов на катоде разрядников-обострителей во время подъёма напряжения на межэлектродном промежутке до значений (150  $\div$  400) кВ. С учётом усиления поля на микронеоднородностях поверхности катода значения локальных напряжённостей электрического поля могут быть в 10  $\div$  100 раз выше, т.е. находиться на уровне  $E_{\text{лок}} = 5,3 \cdot 10^6 \div 6,7 \cdot 10^7$  В/см. Такие значения локальной напряжённости электрического поля в состоянии вызывать заметные автоэлектронные токи [1, 37, 47, 57, 108]. Этот факт является прямым указанием на наличие свободных электронов в промежутке до момента пробоя. В этих условиях реализуется режим пробоя с «многоэлектронным» инициированием, который, как известно, имеет в разы меньшее значение времени развития разряда по сравнению с одноэлектронным инициированием [1, 57].

Таким образом, при переходе к высоким давлениям и, соответственно, к высоким напряжениям автоматически обеспечивается дополнительное

сокращение времени коммутации из-за появления в газоразрядном промежутке перед пробоем свободных электронов.

#### 5.4 Выводы к главе 5

1. Впервые расчётным путём определены зависимости времён развития искрового разряда в условиях статического пробоя по основным известным закономерностям в диапазоне давлений  $20 \div 140$  атмосфер, характерных для промышленно выпускаемых разрядников-обострителей, наполняемых водородом или азотом. Установлена общая тенденция сокращения времён развития искрового разряда с увеличением давления.

2. Положенные в основу моделей развития искрового канала различные физические процессы и соотношения между ними в диапазоне давлений  $20 \div 140$  атм дают значительный разброс в абсолютных значениях времён развития разряда (от долей микросекунды до единиц и десятков пикосекунд). Наиболее близкие к экспериментальным значениям времён коммутации дают расчёты по модели с учётом параметров газоразрядного промежутка.

3. Экспериментально измеренные значения времён развития искрового разряда в разрядниках-обострителях типа РО-48 с рабочими давлениями водорода  $55 \div 58$  атм и величиной межэлектродного промежутка 0,3 см, обеспечивающих напряжение пробоя разрядника  $150 \pm 2$  кВ, находятся в пределах  $\sim 230 \dots 250$  пс по уровню  $(0,1 \div 0,9)$  напряжения пробоя. Эти значения существенно меньше тех, которые приводятся производителями разрядников-обострителей на напряжение пробоя 150 кВ. Относительный среднеквадратичный разброс напряжения пробоя  $\delta U_{пб}$  разрядников-обострителей типа РО-48 при работе на частоте до 15 Гц, определённый по ГОСТ 21107.7-75, 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 с повышенной механической прочностью на напряжения до 400 киловольт, субнаносекундными временами коммутации и ресурсом не менее  $3 \cdot 10^6$  срабатываний.

1) Численным моделированием и экспериментальными методами определено, что использование дополнительного резьбового соединения анодного узла с корпусом в разряднике-обострителе увеличивает механическую прочность изделия в 1,5 раза по сравнению с использованием только сварного соединения данных узлов и позволяет эксплуатировать разрядник-обостритель при внутренних рабочих давлениях до 160 атмосфер.

2) Методами компьютерного моделирования и прямых испытаний установлено, что наибольшая электрическая прочность промежутка между высоковольтным выводом электрода и отбортовкой корпуса достигается при обеспечении соотношений между диаметром высоковольтного вывода электрода и диаметром отбортовки корпуса в пределах  $0,25 \leq d/D_3 \leq 0,5$ . Наибольшая электрическая прочность керамического высоковольтного изолятора достигается при соблюдении расстояния внутренней цилиндрической поверхности корпуса от большего основания изолятора не менее расстояния между электродами, при соотношении внутреннего диаметра меньшего основания изолятора к внутреннему диаметру большего основания изолятора в пределах  $0,4 \leq D_1/D_2 \leq 0,8$  и выборе угла конической поверхности изолятора в пределах  $10^\circ \leq \alpha_1 \leq 30^\circ$ , а также выборе угла  $\alpha_2$  конической поверхности вывода электрода в пределах  $10^\circ \leq \alpha_2 \leq 45^\circ$ . Нежелательные пробой по поверхности изолятора и в радиальном направлении между экраном и внутренней поверхностью корпуса блокируются, если диаметр электродов  $D$  соответствует величине равной от 3 до 5 междуэлектродных расстояний, радиус сферической поверхности катода

соответствует от одного до двух размеров диаметра электрода и размер диаметра экрана соответствует  $0,25 \div 0,6$  от диаметра внутренней поверхности металлического корпуса.

3) Использование режима пайки металлокерамических соединений, содержащих в конструкции охватывающие и торцевые паяные швы, высокотемпературным припоем ПСр72 с дополнительным превышением температуры пайки на  $20-80^{\circ}\text{C}$  относительно температуры плавления припоя  $780^{\circ}\text{C}$  и временем выдержки пайки в пределах 6-8 минут позволяет получать высококачественные герметичные соединения с высоким процентом выхода годных изделий.

4) Установлено, что тренировка разрядников-обострителей в среде электроотрицательных газов (элегаз  $\text{SF}_6$  и его смеси с инертным газом и/или азотом) повышает электропрочность высоковольтного керамического изолятора, препятствуя образованию скользящих пробоев по поверхности керамики и увеличивает срок гарантийной наработки разрядника с относительным среднеквадратичным разбросом напряжения пробоя не более 3% свыше  $3 \cdot 10^6$  срабатываний.

5) 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. В условиях серийного производства обеспечен 95-процентный выход годных изделий.

6) Впервые получены расчётные значения времён коммутации в среде водорода и азота в диапазоне давлений от 20 до 140 атмосфер. 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 ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Месяц, Г. А. Импульсная энергетика и электроника / Г. А. Месяц. – М.: Наука. – 2004. – 704 с.
2. Рыбин, Ю. В. Генератор высоковольтных импульсов с фронтом субнаносекундной длительности, формируемым гиромангнитной передающей линией / Ю. В. Рыбин, В. В. Еремкин, А. С. Марабян // Приборы и техника эксперимента. – 2021. – №1. – С. 88-92. DOI 10.31857/S0032816220060166.
3. Лосев, В. Ф. Мощные импульсные лазеры на плотных газах с накачкой разрядом и пучком электронов / В. Ф. Лосев, В. Ф. Тарасенко // Оптика атмосферы и океана. – 2009. – Т. 22, №10. – С. 993-998.
4. Ремнев, Г. Е. Источник импульсных электронных и ионных пучков на основе наносекундного генератора напряжения с согласующим трансформатором / Г. Е. Ремнев, А. И. Пушкарев, Э. Г. Фурман и др. // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т.309, №2. – С. 88-93.
5. Бурцев, В. А. Наносекундный генератор высоковольтных импульсов на основе искусственных двойных формирующих линий / В. А. Бурцев, А. А. Бурцев, Д. Б. Бельский и др. // Приборы и техника эксперимента. – 2020. – №4. – С. 23-28. DOI 10.31857/S0032816220040114.
6. Андреев, С. В. Источник рентгеновского излучения среднего диапазона энергий на основе электронно-оптического преобразователя / С. В. Андреев, Н. С. Воробьев, Ю. М. Михальков и др. // Приборы и техника эксперимента. – 2021. – №2. – С. 93-99. DOI: 10.31857/S0032816221010237.
7. Ефремов, А. М. Мощный источник сверхширокополосных импульсов синтезированного излучения / А. М. Ефремов, В. И. Кошелев, В. В. Плиско, Е. А. Севостьянов // Приборы и техника эксперимента. – 2019. – №1. – С. 36-45. DOI: 10.1134/S003281621806006X.
8. Ланцов, В. Н. Мощные высоковольтные источники питания. Часть 3 / В. Н. Ланцов, Е. Н. Владимиров // Силовая электроника. – 2011. – Т.2, №30. – С. 49-56.

9. Месяц, Г. А. Введение в наносекундную импульсную энергетику и электронику: курс лекций для физиков и инженеров / Г. А. Месяц, И. В. Пегель. – М.: ФИАН. – 2009. – 192 с.
10. Морговский, Л. Я. Импульсная рентгенография. Аппараты серии "АРИНА" / Л. Я. Морговский, Е. А. Пеликс // ООО "Спектрофлэш". – С.-Петербург: Синус П. – 1999. – 75 с.
11. Коваль, Н. Н. Источники электронов с сеточным плазменным эмиттером: прогресс и перспективы / Н. Н. Коваль, В. Н. Девятков, М. С. Воробьев // Известия вузов. Физика. – 2020. – Т.63, №10(754). – С. 7-16. – DOI 10.17223/00213411/63/10/7.
12. ООО «Импульсные технологии» г. Рязань [Официальный сайт]. URL: <https://www.pulsetech.ru> (дата обращения: 01.09.2021 г).
13. АО «Научно-исследовательский институт газоразрядных приборов «ПЛАЗМА» г. Рязань [Официальный сайт]. URL: <https://www.plasmalabs.ru/> (дата обращения: 01.09.2021 г).
14. ООО «Спектрофлэш» г. С.-Петербург. [Официальный сайт]. URL: <https://spectroflash.ru> (дата обращения: 01.09.2021 г).
15. ООО «Эридан-сервис» г. Уфа [Официальный сайт]. URL: <https://www.blagovestnk.ru> (дата обращения: 01.09.2021 г).
16. Месяц, Г. А. Генерирование мощных наносекундных импульсов / Г. А. Месяц. – М.: Советское радио. – 1974. – 256 с.
17. Верещагин, Н. М. Исследования генератора высоковольтных импульсов с индуктивным накопителем энергии и газоразрядным прерывателем тока / Н. М. Верещагин, С. А. Круглов, А. А. Сережин [и др.] // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2017. – № 60. – С. 148-153. – DOI 10.21667/1995-4565-2017-60-2-148-153.
18. Круглов, С. А. Газоразрядные коммутаторы тока в схеме с индуктивным накопителем энергии: специальность 05.27.02 "Вакуумная и плазменная электроника": диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Круглов Сергей Александрович, 2021. – 297 с.

19. Пономарев, А. В. Мегавольтный генератор наносекундных импульсов с полупроводниковым прерывателем тока: специальность 01.04.13 "Электрофизика, электрофизические установки": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Пономарев Андрей Викторович. – Екатеринбург, 2005. – 90 с.
20. Пичугина, М. Т. Высоковольтная электротехника: учебное пособие. [Электронный ресурс] / М. Т. Пичугина. – Томск: Изд-во ТПУ. – 2011. – 136 с. URL:[https://portal.tpu.ru/SHARED/d/DV\\_DIMA/Uchebnaya/DPER1/uchposobie\\_VET.pdf](https://portal.tpu.ru/SHARED/d/DV_DIMA/Uchebnaya/DPER1/uchposobie_VET.pdf) (контент)
21. Бочков, В. Д. Индуктивные накопители энергии, использующие газоразрядные приборы с полным управлением, и их применение / В. Д. Бочков, Н. М. Верещагин, Ф. Г. Горюнов и др. // Оптика атмосферы и океана. – 1996. – Т.9, №2. – С. 231-237.
22. Бурцев, В. А. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках / В. А. Бурцев, Н. В. Калинин, А. В. Лучинский. – М.: Энергоатомиздат, – 1990. – 288 с.
23. Martin, J. C. Nanosecond pulse techniques / J. C. Martin // Proceedings of the IEEE. – Vol. 80. – Issue: 6. – June 1992. – P. 934-945.
24. Воробьев, А. А. Электрический пробой и разрушение твёрдых диэлектриков / А. А. Воробьев, Г. А. Воробьев. – М.: Высшая школа. – 1966. – 440 с.
25. Воробьев, Г. А. Электрический пробой твёрдых диэлектриков / Г. А. Воробьев, Н. С. Несмелов // Известия вузов. Физика. – 1979. – №1. – С. 90-104.
26. Бурцев, В.А. К вопросу об управляемом пробое разрядника с твёрдым диэлектриком / В.А. Бурцев // ЖТФ. – 1981. – Т.51, №8. – С. 1760-1761.
27. Ушаков, В. Я. Импульсный электрический пробой жидкостей / В. Я. Ушаков. – Томск: Издательство: Томск: ТГУ. – 1975. – 256 с.
28. Mason, J. H., "Discharges", Electrical Insulations / J. H. Mason // IEEE Trans. – Vol. 13. – 1978. – P. 211-238.

29. Капишников, Н. К. Высоковольтные разрядники, наполненные трансформаторным маслом / Н. К. Капишников, В. М. Муратов, В. Я. Ушаков // ПТЭ. – 1978. – №4. – С. 124-128.
30. Воробьев, А. А. О направлениях развития экспериментальных исследований по физике импульсного электрического пробоя жидкостей / А. А. Воробьев, В. Я. Ушаков. – В кн.: Электрофизическая аппаратура и электрическая изоляция. – М.: Энергия. – 1970. – С. 298-306.
31. Багин, В. В. Распределения времён запаздывания при наносекундном пробое жидких диэлектриков / В. В. Багин, В. В. Воробьев, В. В. Лопайн, В. Я. Ушаков. – В кн.: Электрофизическая изоляция. – М.: Энергия. – 1970. – С. 343-349.
32. Ковальчук, Б. М. Коммутаторы генераторов релятивистских электронных пучков / Б. М. Ковальчук, Ю. Ф. Поталицын. – В кн.: Разработка и применение источников интенсивных электронных пучков. – Новосибирск: Наука. – 1976. – С. 6-35.
33. Руденко, Н. С. Исследование электрической прочности некоторых жидких диэлектриков при воздействии импульсов напряжения наносекундной длительности / Н. С. Руденко, В. И. Цветков // ЖТФ. – 1965. – Т.35, Вып.10. – С. 1126-1129.
34. Капишников, Н. К. Высоковольтные разрядники, наполненные трансформаторным маслом / Н. К. Капишников, В. М. Муратов, В. Я. Ушаков // ПТЭ. – 1978. – №4. – С. 124-128.
35. Дашук, П. Н. Техника больших импульсных токов и магнитных полей / П. Н. Дашук, С. Л. Заенц, В. С. Комельков, В. С. Кучинский и др. – М.: Атомиздат. – 1970. – 472 с.
36. Логачев, Е. И. Разработка и исследование коммутирующих устройств для сильноточных ускорителей / Е. И. Логачев, Г. Е. Ремнев, А. М. Толопа, Ю. П. Усов. – Томск. – 1979. – №8. – 12 с. (Препринт/НИИ ядер. физ. при Томск. политехн. ин-те: Н-9987).

37. Сорокин, Д. А. Высоковольтный наносекундный разряд в неоднородном электрическом поле и его свойства / Д. А. Сорокин, Д. В. Белоплов, А. А. Гришков и др. – Томск: СТТ. – 2020. – 288 с.
38. Киселев, Ю. В. Искровые разрядники / Ю. В. Киселев, В. П. Черепанов. – М.: «Сов. радио». – 1976. – 70 с.
39. Фрюнгель, Ф. Импульсная техника. Генерирование и применение разрядов конденсаторов. Перевод с немецкого / Ф. Фрюнгель. – М.; Л.: Энергия. – 1965. – 488 с.
40. Киселев, Ю. В. Искровые разрядники: учебное пособие / Ю. В. Киселев. – Рязань: РРТИ, – 1989.
41. Shpak, V. G. Subnanosecond Front, High Voltage Generator based on a Combined Pulsed Forming Line / V. G. Shpak, S. A. Shunailov, M. R. Oulmascoulov, M. I. Yalandin // Proc.of the 11th IEEE International Pulsed Power Conference. – Baltimore, ML, USA. – V.2. – 1997, – P.1581-1585.
42. Иванов, С. Н. Генерация убегающих электронов вблизи микронеоднородностей на поверхности катода в субнаносекундных самостоятельных разрядах в широком диапазоне высоких давлений / С. Н. Иванов, В. В. Лисенков // Физика плазмы. – 2023. – Т. 49, № 11. – С. 1222-1236. – DOI 10.31857/S0367292123600796.
43. 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.
44. Фольрат, К. Искровые источники света и высокочастотная искровая кинематография / К. Фольрат, Г. Томер. – В кн.: Физика быстропротекающих процессов, пер. с нем., англ., Т.3 – М.: Мир. – 1971. – 358 с.
45. Мик, Дж. М. Электрический пробой в газах. Пер. с англ. / Под ред. д-ра техн. наук В. С. Комелькова. – М.: Изд-во иностр. лит. – 1960. – 605 с.
46. Ретер, Г. Электронные лавины и пробой в газах. Пер. с нем. / Под ред. д-ра техн. наук В. С. Комелькова. – М.: Мир. – 1968. – 390 с.

47. Королев, Ю. Д. Физика импульсного пробоя газов / Ю. Д. Королев, Г. А. Месяц. – М.: Наука. – 1991, – 224 с.
48. Райзер, Ю. П. Физика газового разряда. 3-е изд., перераб. и доп. / Ю. П. Райзер. – Долгопрудный: Интеллект. – 2009. – 734 с.
49. Актон, Д. Р. Газоразрядные лампы с холодным катодом / Д. Р. Актон, Д. Д. Свифт. – М.: Энергия. – 1965. – 480 с.
50. Окресс, Е. К. Незавершённые электрические разряды в газах / Е. К. Окресс, И. Винсент, Та-Гуань Цзян // ТИИЭР. – 1967. – №12, – С. 113-114.
51. Месяц, Г. А. Импульсный наносекундный электрический разряд в газе / Г. А. Месяц, Ю. И. Бычков, В. В. Кремнев // УФН. – 1972. – Т.107. – Вып.2. – С. 201-228.
52. Meek, J. M. Electrical Breakdown of Gases / Ed. J. M. Meek, J. D. Craggs. – NY, Brisbane, Toronto: John Wiley. – 1975. – 869 pages.
53. Месяц, Г. А. Получение и применение мощных наносекундных импульсов / Г. А. Месяц // Вестник АН СССР. – 1979. – №2. – С. 6-35.
54. Месяц, Г. А. Время формирования разряда в коротких воздушных промежутках в наносекундном диапазоне времени / Г. А. Месяц, Ю. И. Бычков, А. М. Искольдский // ЖТФ. – 1968. – Т.38, №8. – С. 1281-1289.
55. Dickey, F. R. Contribution to the Theory of Impulse Breakdown / F. R. Dickey // J. Appl. Phys. – 1952. – V.23. – N12. – P. 1336-1339.
56. Нестерихин, Ю. Е. Импульсный пробой малых промежутков в наносекундной области времени / Ю. Е. Нестерихин, В. С. Комельков, Е. З. Мелихов // ЖТФ. – 1964. – Т.34, Вып.1. – С. 40-50.
57. Королев, Ю. Д. Автоэмиссионные и взрывные процессы в газовом разряде / Ю. Д. Королев, Г. А. Месяц. – Новосибирск: Наука. – 1982. – 255 с.
58. Ковальчук, Б. М. Лавинный разряд в газе и генерирование наносекундных импульсов большого тока / Б. М. Ковальчук, В. В. Кремнев, Г. А. Месяц // Доклады АН СССР. – 1970. – Т.191, №1. – С. 76-78.
59. Лозанский, Э. Д. Теория искры / Э. Д. Лозанский, О. Б. Фирсов. – М.: Атомиздат. – 1975. – 272 с.

60. Бердичевский, А. М. Искровые разрядники за рубежом / А. М. Бердичевский, Л. С. Головина, Ю. В. Киселев, В. В. Никитин и др. – М.: Институт "Электроника". – 1972. – 50 с.
61. Allen, K. R. Mechanism of Spark Breakdown / K. R. Allen, L. Phillips // *Electrical Rev.* – 1963. – Vol.173, №3. – P. 779-783.
62. Doran, A. A. Photographic and Oscillographic Investigations of Spark Discharges in Hydrogen / A. A. Doran, J. Meyer // *Brit. J. Appl. Phys.* – 1967. – Vol.18. – P. 793-799.
63. Cavenor, M.C. The Development of Spark Discharge in Hydrogen / M.C. Cavenor, J. Meyer // *Aust. J. Phys.* – 1969, – Vol.22. – P. 155-167.
64. Meyer, J. The Development of the Discharge Plasma in a Hydrogen Spark at Small PD Values / J. Meyer // *Brit. J. Appl. Phys.* – 1969. – Vol. 20, №2. – P. 221-227.
65. Meyer, J. Investigation of the Glow Phase in Spark Discharges / J. Meyer, C. S. Lee // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 1971. – Vol. 4, N1. – P.168. DOI 10.1088/0022-3727/4/1/423.
66. Иванов, С. Н. Электронно-оптические исследования начальной фазы субнаносекундного импульсного электрического пробоя газовых промежутков / С. Н. Иванов, В. В. Лисенков, В. Г. Шпак // *ЖТФ.* – 2008. – Т.78, №9. – С. 62-68.
67. Драбкина, С. И. К теории развития канала искрового разряда / С. И. Драбкина // *ЖЭТФ.* – 1951. – Т.21, Вып.4. – С. 473-483.
68. Брагинский, С. И. К теории развития канала искры / С. И. Брагинский // – *ЖЭТФ.* – 1958. – Т.34, Вып.6. – С. 1548-1556.
69. Андреев, С. И. К теории развития искрового канала / С. И. Андреев, Б. И. Орлов // *ЖТФ.* – 1965. – Т.35, Вып.8. – С. 1411-1418.
70. Андреев, С. И. Исследование электрических процессов в искровом разряде наносекундной длительности / С. И. Андреев, М. П. Ванюков // *ЖТФ.* – 1961. – Т.31, №8. – С.961-964.
71. Гегечкори, Н. М. Экспериментальное исследование канала искрового разряда / Н. М. Гегечкори // *ЖЭТФ.* – 1951. – Т.21, Вып.4. – С. 493-506.
72. Rompe, R. Uber das Toeplersche Funkengesets / R. Rompe, W. Weizel // *Zs.Physik.* – 1944. – В.122. – Н. 9-12.

73. Бычков, Ю. И. Формирование разряда и образование высокопроводящего канала при электрическом разряде в наносекундном диапазоне / Ю. И. Бычков, Ю. Д. Королев, П. А. Гаврилюк // ЖТФ. – 1972. – Т.42, Вып.8. – С. 1674-1679.
74. Месяц, Г. А. Формирование наносекундных импульсов высокого напряжения / Г. А. Месяц, А. С. Насибов, В. В. Кремнев. – М.: Энергия. – 1970. – 153 с.
75. Früngel, F. B. A. High Speed Pulse Technology. Vol.1 / F. B. A. Früngel. – New York: Academic Press. – 1965. – 498 p.
76. Клайн, Л. Э. Самостоятельные разряды с предыонизацией, используемые для накачки лазерных сред / Л. Э. Клайн, Л. Ж. Дэн. В кн.: Газовые лазеры: Пер. с англ. / Под ред. П. П. Пашинина. – М.: Мир. – 1986. – Гл.13. – С. 461-502.
77. Antonios, E. Vlastos. The Resistance of Sparks / E. Vlastos Antonios // IEEE Xplore. – Journal of Applied Physics. – May 1972. – 43(4). – P. 1987-1989.
78. Hess, H. On the Calculation of Low-Inductance Spark Discharges / H. Hess, R. Radtke // J. Phys. D: Appl. Phys. – 1975. – N8. – P. 681-684.
79. Меркулов, Б. П. Базовая конструкция газонаполненного металлокерамического разрядника высокого давления для импульсных источников рентгеновского излучения / Б. П. Меркулов, Г. В. Мельничук, Д. С. Маханько, Д. П. Меркулов // Оборонный комплекс - научно-техническому прогрессу России. – 2013. – № 1(117). – С. 44-51.
80. Герасимов, С. И. Переносные импульсные рентгеновские аппараты серий "САРМА" и " АРГУМЕНТ" для регистрации быстропротекающих процессов / С. И. Герасимов, Г. А. Полиенко, Е. С. Хорошайло. – Саров: СарФТИ НИЯУ МИФИ. – 2013. – 65 с.
81. Буклей, А. А. Разработка новых технологий и конструкций мобильных рентгеновских интроскопов : специальность 05.11.13 "Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий" : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Буклей Александр Александрович. – Москва, 2009. – 202 с.



82. ГОСТ 21107.7-75. Приборы газоразрядные. Методы измерения электрических параметров искровых разрядников. – Взамен ГОСТ 11167-65; введ. 01-01-1977. – М.: Издательство стандартов. – 1983. – 15 с.
83. Авторское свидетельство № 1431588 А1 СССР, МПК H01J 17/00. Газонаполненный разрядник : № 4181957 : заявл. 16.01.1987 : опубл. 30.08.1991 / Э. А. Авилов, Н. В. Белкин, Б. П. Меркулов ; заявитель ПРЕДПРИЯТИЕ П/Я В-8769.
84. Патент № 2320048 С1 Российская Федерация, МПК H01J 17/04. газонаполненный разрядник : № 2006128526/28 : заявл. 04.08.2006 : опубл. 20.03.2008 / В. А. Богданов, Б. П. Меркулов, В. Г. Самородов ; заявитель Открытое акционерное общество "Научно-исследовательский институт газоразрядных приборов "Плазма" (ОАО "Плазма").
85. 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" (ОАО "Плазма").
86. Продукт COMSOL MULTIPHYSICS [Официальный сайт]. URL: <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics/> (дата обращения: 04.06.2022 г).
87. Биргер, И. А. Расчёт на прочность деталей машин / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Р. М. Шнейдерович. – М.: Машиностроение. – 1993. – 640 с.
88. Дарков, А. В. Сопротивление материалов: Учеб. для техн. вузов. – 5-е изд., перераб. и доп. / А. В. Дарков, Г. С. Шпиро. – М.: Высш. шк. – 1989. – 624 с.
89. Горшков, А. Г. Сопротивление материалов: Учеб. пос. – 2-е изд., испр. / А. Г. Горшков, В. Н. Трошин, В. И. Шалашилин. – М.: ФИЗМАТЛИТ. – 2005. – 544 с.
90. Костенко, Н. А. Сопротивление материалов: учеб. пособие. – 2-е изд., испр. / Н. А. Костенко, С. В. Балясникова, Ю. Э. Волошановская и др.; под ред. Н. А. Костенко. – М.: Высш. Шк. – 2004. – 430 с.

91. Скороходов, Е. А. Общетехнический справочник, – 3-е изд. / Е. А. Скороходов, В. П. Законников, А. Б. Пакнис и др. – М.: Машиностроение. – 1989. – 512 с.
92. Серебсеницкий, П. П. Общетехнический справочник / П. П. Серебсеницкий. – Санкт-Петербург: Политехника. – 2004. – 446 с.
93. Продукт SOLIDWORKS SIMULATION [Официальный сайт]. URL: <https://www.solidworks.com/ru/product/solidworks-simulation> / (дата обращения: 20.10.2023 г).
94. Проверка качества сетки [Электронный ресурс]. URL: [https://help.solidworks.com/2014/RUSSIAN/SolidWorks/cworks/c\\_Mesh\\_Quality\\_Checks.htm](https://help.solidworks.com/2014/RUSSIAN/SolidWorks/cworks/c_Mesh_Quality_Checks.htm) / (дата обращения: 02.11.2023 г).
95. Лоцманов, С. Н. Справочник по пайке / С. Н. Лоцманов, Н. Е. Петрунин, В. П. Фролов. – М.: Машиностроение. – 1975. – С. 292-293.
96. 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" (ОАО "Плазма").
97. Патент № 2313849 С1 Российская Федерация, МПК H01J 17/20. способ изготовления разрядника : № 2006123627/09 : заявл. 03.07.2006 : опубл. 27.12.2007 / Б. П. Меркулов, В. Г. Самородов ; заявитель Открытое акционерное общество "Научно-исследовательский институт газоразрядных приборов "Плазма" (ОАО "Плазма").
98. 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" (АО "Плазма").

99. Грановский, В. Л. Электрический ток в газе. Том I. Общие вопросы электродинамики газов / В. Л. Грановский. – М.-Л.: Гос. изд. технико-теоретической литературы. – 1952. – 432 с.
100. Френсис, Г. Ионизационные явления в газах / Г. Френсис. – М.: Атомиздат. – 1964. – 304 с.
101. Соболев, В. Д. Физические основы электронной техники / В. Д. Соболев. – М.: Высшая школа. – 1979. – 448 с.
102. Шимони, К. Физическая электроника / К. Шимони. – М.: Энергия. – 1977. – 608 с.
103. Хаксли, П. Диффузия и дрейф электронов в газах / П. Хаксли, Р. Кромитон. – М.: Мир. – 1977. – 672 с.
104. Физические величины. Справочник / Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Михайлова. – М.: Энергоатомиздат. – 1991. – 1232 с.
105. Грановский, В. Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток / В. Л. Грановский. – М.: Наука. – 1971. – 544 с.
106. Левитский, С. М. Сборник задач и расчетов по физической электронике: учеб. пособие для вузов / С. М. Левитский. – Киев: Киев. ун-т. – 1964. – 211 с.
107. Браун, С. С. Элементарные процессы в плазме газового разряда / С. С. Браун. – М.: Госатомиздат. – 1961. – 321 с.
108. Ненакаливаемые катоды / Под ред. М. И. Елинсона. – М.: Сов. Радио. – 1974. – 336 с.

## ПРИЛОЖЕНИЯ



Акционерное общество «Научно-исследовательский  
институт газоразрядных приборов «Плазма»



ул. Циолковского, д. 24  
г. Рязань, Россия, 390023  
тел.: (4912) 24-90-02  
факс: (4912) 44-06-81  
e-mail: plasma@plasmalabs.ru  
www.plasmalabs.ru

исх. № \_\_\_\_\_

от « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.

Утверждаю  
Генеральный директор АО «Плазма»  
Максимов С.В.  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 г.



## АКТ

## внедрения результатов диссертационного исследования

Маханько Дмитрия Сергеевича

по теме

«Разработка разрядников-обострителей с улучшенными техническими параметрами»  
в АО «Научно-исследовательский институт газоразрядных приборов «Плазма»

Настоящим актом удостоверяется, что результаты диссертационного исследования Маханько Дмитрия Сергеевича, в котором заложены физические основы создания малогабаритных отпаянных разрядников-обострителей на напряжения пробоя до 400 кВ с субнаносекундными временами срабатывания, представляют значительный интерес для нашего предприятия и внедрены в производство разрядников-обострителей серии РО-48, РО-43 и РО-49, в частности:

1) Разработанные в диссертации Маханько Дмитрия Сергеевича теоретические подходы отвечают направлению проводимых на предприятии разработок и используются для количественных оценок электрической прочности, механической прочности и времён коммутации выпускаемой продукции.

2) Способ пайки газонаполненного разрядника и патент на изобретение №2550350 в условиях серийного производства разрядников-обострителей обеспечил 95-процентный выход годных изделий.

3) Способы изготовления и тренировки (патенты на изобретения №2560096, 2643343, 2658320, №2697264, полезная модель №119164) позволили повысить электропрочность высоковольтного керамического изолятора, что увеличило срок гарантийной наработки разрядников-обострителей.

Использование новых научных результатов позволило повысить надежность и улучшить эксплуатационные характеристики выпускаемой продукции.

Директор по научно-техническому  
развитию АО «Плазма»

Лазунин Александр Евгеньевич



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ

# СПЕКТРОФЛЭШ

Юридический адрес:  
194223, г. Санкт-Петербург  
ул. Курчатова, дом 10, лит. Ч, пом. 2Н  
Почтовый адрес:  
194223, г. Санкт-Петербург, а/я 82

телефон (812) 602-12-60  
E-mail: [info@spectroflash.ru](mailto:info@spectroflash.ru)  
[www.spectroflash.ru](http://www.spectroflash.ru)

ИНН 7813030406  
КПП 780201001



Генеральный директор ООО «Спектрофлэш»

Коцишин Р.А.

Дмитриев Ю.Л.

«13» января 2025 г.

## АКТ

*о практическом использовании результатов диссертационной работы*


Маханько Дмитрия Сергеевича

Настоящий акт подтверждает, что результаты диссертационной работы Маханько Дмитрия Сергеевича на соискание учёной степени кандидата технических наук внедрены и используются ООО «Спектрофлэш» при производстве импульсных рентгеновских дефектоскопов, в частности:

- разрядники-обострители РО-48 применяются для изготовления командного аппарата в кроулере «Сирена»;
- разрядники-обострители РО-43 используются в серийных дефектоскопах «Арина-1», «Арина-3», «Памир-200»;
- разрядники-обострители РО-49 устанавливаются в импульсные рентгеновские аппараты «Арина-7», «Арина-9», «Памир-250» и «Памир-300».

Общее количество изготовленных рентгеновских дефектоскопов с использованием разрядников-обострителей РО-48, РО-43, РО-49 составляет более 1000 шт.

Начальник участка монтажа, сборки  
и настройки импульсных рентгеновских  
аппаратов ООО «Спектрофлэш»

 /Смирнов Д.Е./

# ЭРИДАН СЕРВИС

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ

450057, г. Уфа, ул. Октябрьской Революции 72, ИНН 0274062457,  
Р/с 40702810606440000355 в Отделение № 8598 ПАО Сбербанк г.Уфа,  
к/с 30101810300000000601, БИК 048073601, КПП 027401001  
Тел./факс (347) 291-29-45, 291-29-46, (347) 272-46-31, 273-42-24  
E-mail: pion800@yandex.ru



«УТВЕРЖДАЮ»  
Директор ООО «Эридан-сервис»  
Академик МИА  
В области импульсных  
Рентгеновских технологий  
Амииров Р.М.

«13 Января 2025 г.

## АКТ О ВНЕДРЕНИИ

результатов диссертационной работы

Маханько Дмитрия Сергеевича

на соискание учёной степени кандидата технических наук

Настоящий акт подтверждает, что результаты научных исследований и опытно-конструкторских работ, проводимых Маханько Дмитрием Сергеевичем в рамках подготовки диссертационной работы на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.2.1. «Вакуумная и плазменная электроника», используются обществом с ограниченной ответственностью «Эридан-сервис»:

1) Разрядники-обострители серии РО-43 отлично зарекомендовали себя при производстве рентгеновских аппаратов «ПИОН-2М» (на данный момент произведено более 500 экземпляров);

2) Разрядники-обострители серии РО-49 применяются в аппаратах «ПИОН-2ММ» (на данный момент произведено более 150 экземпляров).

Использование разрядников-обострителей серии РО-43 и РО-49 позволило увеличить долговечность и улучшить рентгенотехнические параметры выпускаемых аппаратов.

Исполнительный Директор  /Амирова А.Р.