

## Ресурс разрядников-обострителей серии РО-43 и РО-49

Б.А. Козлов<sup>1,\*</sup>, Д.С. Маханько<sup>2</sup>, Н.В. Вишняков<sup>1</sup>, Н.Б. Рыбин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Рязанский государственный радиотехнический университет, Рязань, Россия

<sup>2</sup>АО «НИИГРП «ПЛАЗМА», Рязань, Россия

\*mahdim@rambler.ru

**Аннотация.** Изучена динамика запыления внутренней поверхности керамического изолятора разрядников-обострителей серии РО-43 и РО-49 продуктами эрозии электродов при наличии защитного экрана. Впервые методами сканирующей электронной микроскопии и рентгеновского микроанализа исследована микроструктура рабочих поверхностей электродов и керамических изоляторов разрядников-обострителей, а также химический состав напыляемых на внутреннюю поверхность изоляторов материалов в процессе длительных испытаний. Установлено, что химический состав образующегося на поверхности керамического изолятора проводящего слоя полностью соответствует химическому составу материала электродов. Образование на поверхности керамического изолятора проводящих слоёв и эрозия самой поверхности изолятора приводят к утрате электропрочности и ограничивают ресурс разрядников-обострителей на уровне  $3 \cdot 10^6$  включений.

**Ключевые слова:** разрядник-обостритель, ресурс, распыление материала электродов, керамический изолятор, структура поверхности, проводящий слой.

### 1. Введение

Разрядники-обострители серии РО-43 и РО-49 представляют собой малогабаритные отпаянные неуправляемые коммутаторы на напряжения  $140 \div 190$  и  $180 \div 250$  кВ с субнаносекундными временами срабатывания. Они являются ключевыми элементами высоковольтных импульсных генераторов [1, 2], которые применяются в ускорительной и рентгеновской технике, газовых лазерах сверхатмосферного давления, ряде медицинских установок, источниках СВЧ-излучения с гигаваттными уровнями излучаемых мощностей [3]. Одним из основных параметров, характеризующих работоспособность разрядников-обострителей, является их ресурс. В качестве физических процессов, которые ограничивают ресурс разрядников-обострителей, предполагалось, что имеет место локальное испарение материала электродов в сильноточных искровых разрядах с последующим осаждением паров металлов и продуктов химических реакций на стенках внутренней оболочки разрядника и на поверхности высоковольтного керамического изолятора. Пары металлов и продукты химических реакций при осаждении на поверхности конусного изолятора образуют проводящий слой и, тем самым, могут инициировать поверхностный пробой по внутренней поверхности изолятора, отличающийся по величине и характеру от разряда между электродами. В результате этого снижается поверхностное сопротивление керамического изолятора, изменяется напряжение пробоя и существенно увеличивается относительный среднеквадратичный разброс напряжения пробоя, который характеризует стабильность работы разрядника-обострителя [4, 5].

Настоящая работа посвящена детальному изучению динамики изменения состояния рабочих поверхностей электродов и поверхности керамического изолятора с одновременным количественным определением элементного состава материалов на этих поверхностях при наличии защитного экрана с целью определения физических процессов, ограничивающих ресурс работы разрядников-обострителей серии РО-43 и РО-49 на уровне  $3 \cdot 10^6$  включений.

### 2. Конструкции разрядников-обострителей и их параметры

Внешний вид промышленно выпускаемых предприятием АО «НИИГРП «Плазма» (г. Рязань) малогабаритных разрядников-обострителей серии РО-43, РО-48 и РО-49 с субнаносекундным срабатыванием на напряжения от 100 до 250 кВ приведен на Рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид разрядников-обострителей серии РО (слева-направо РО-48, РО-49 и РО-43).

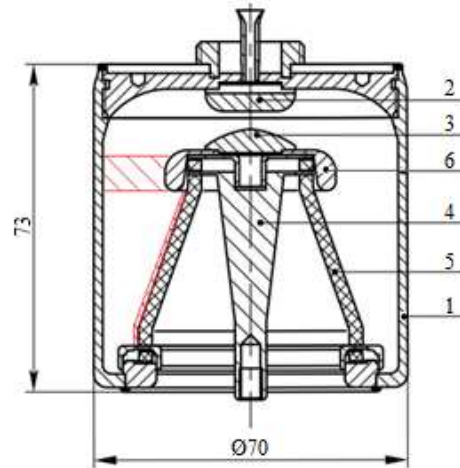


Рис. 2. Конструкция разрядника-обострителя РО-49: 1 – корпус; 2 – анод; 3 – катод; 4 – катодный узел; 5 – конусный керамический изолятор, 6 – защитный экран. Высота разрядника  $H = 73$  мм, диаметр  $D = 70$  мм.

На Рис. 2 представлена конструкция разрядника-обострителя РО-49 с указанием геометрических размеров. Величина межэлектродного промежутка  $d_{AK} = 4 \div 6$  мм. Для обеспечения высокой электрической прочности при малых габаритах и реализации нано- и субнаносекундных времен коммутации давления рабочих газов увеличены до значений  $60 \div 120$  атмосфер.

Красными штриховыми линиями на чертеже отражены области нежелательных пробоев: пробой между экраном катодного узла и корпусом, и пробой по внутренней поверхности изолятора.

Уширение высоковольтного вывода катодного узла в верхней части способствует выравниванию потенциалов внутри корпуса разрядника и выполняет функцию защитного экрана для керамического изолятора от его запыления продуктами эрозии материала электродов при воздействии на них сильнотоочных искровых каналов. В качестве материала электродов применяется сплав ВНЖ-7-3 (вольфрам-никель-железо, 90% W, 7% Ni, 3% Fe). Материалом керамического изолятора является алюмооксидная керамика 22ХС (ВК94-1). Материалом оболочки корпуса разрядника служит нержавеющая сталь 12Х18Н10Т.

В Таблице 1 приведены основные электрофизические параметры разрядников серии РО-43, РО-48 и РО-49.

**Таблица 1.** Основные электрофизические параметры разрядников серии РО-43, РО-48 и РО-49.

Тип разрядника	РО-48	РО-43	РО-49
Напряжение пробоя, кВ	100÷140	140÷190	180÷250
Коммутируемая энергия, Дж	0.5	2	6
Время коммутации, нс	<1	<1	<1
Частота следования импульсов, Гц	100	50	25
Гарантированная долговечность, имп	$3 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^6$
Относительный среднеквадратичный разброс напряжения пробоя, %, не более	3	3	3
Масса, г	200	400	650

Изменением величины давления рабочего газа (водород, азот) можно варьировать значение напряжения пробоя как в указанных в таблице пределах, так и за этими пределами. Таким образом, в разряднике-обострителе РО-49 максимальная величина напряжения пробоя может достигать 400 кВ.

### 3. Экспериментальная установка и методы исследования

На Рис. 3 приведена электрическая схема испытательного стенда. В его состав входят: регулируемый источник высокого напряжения (ИВН), импульсный трансформатор (ИТ), накопительный и вторичный конденсаторы ( $C_H$  и  $C_{BK}$ ), коммутатор ( $K$ ), разрядник-обостритель ( $PO$ ), нагрузочный резистор ( $R_H$ ), емкостные делители напряжения ( $D_1$  и  $D_2$ ) и генератор управляющих импульсов (ГУИ). Высокое напряжение на первичной обмотке импульсного трансформатора может плавно регулироваться в пределах от нуля до 20 кВ.

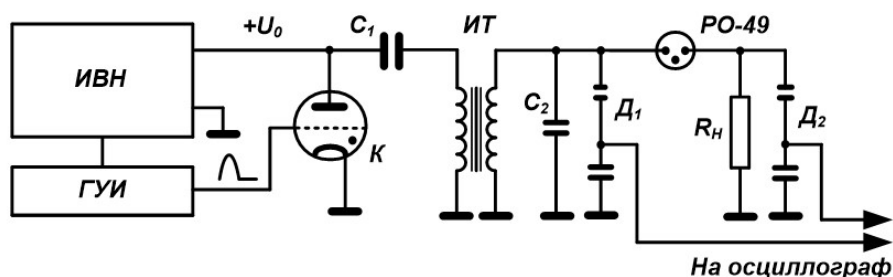


Рис. 3. Электрическая схема испытательного стенда.

Импульсный трансформатор с разомкнутым магнитопроводом обеспечивает формирование импульсов напряжения амплитудой до 500 кВ и временем нарастания до 4 мкс. Емкость накопительного конденсатора  $C_1$  составляет 0.2 мкФ. В качестве коммутатора применяется импульсный водородный тиратрон ТГИ1-1000/25. Емкость вторичного конденсатора  $C_2$  составляет 2 нФ. Нагрузкой служит набор низкоиндуктивных резисторов марки ТВО-60 с общим сопротивлением  $R = 120$  Ом. Для регистрации формы импульсов на разряднике-обострителе и на нагрузке применяются емкостные делители напряжения  $D_1$  и  $D_2$  с коэффициентами деления  $k = 10^4$ . Импульсный трансформатор, разрядник-обостритель, накопительный и вторичный конденсаторы, нагрузочный резистор и делители напряжения монтировались в металлическом баке заполненном трансформаторным маслом. Испытания разрядников-обострителей проводились на частотах повторения импульсов  $25 \div 50$  Гц.

После наработки определенного числа разрядных импульсов изучаемый разрядник-обостритель извлекался из стенда, вскрывался и производился анализ состояния рабочих поверхностей электродов и химического состава приповерхностных слоев керамического изолятора. Структура поверхностей и их химический состав изучались на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-6610LV и рентгеновском микроанализаторе INCA X-MAX производства Oxford Instruments. Микроструктура и химический состав рабочих поверхностей электродов и поверхностей высоковольтных керамических изоляторов анализировались до воздействия на них искрового разряда и после воздействия определенного числа ( $0, 10^5, 5 \cdot 10^5, 10^6, 2 \cdot 10^6, 3 \cdot 10^6$ ) разрядных импульсов.

### 4. Результаты исследований

Запыление керамического изолятора продуктами эрозии электродов начинается с верхней части изолятора, которая находится в «тени» экрана. По мере увеличения числа разрядных импульсов площадь покрытия увеличивается, опускаясь вниз. После  $3 \cdot 10^6$  разрядных импульсов вся внутренняя поверхность керамического изолятора полностью покрывается продуктами эрозии электродов.

На Рис. 4 приведены фотографии поверхностей электродов до воздействия на них сильноточных искровых разрядов (а) и после воздействия  $10^6$  разрядных импульсов (б).

Как видно из фотографий, микроструктура рабочих поверхностей электродов по мере воздействия на неё искровых разрядов изменяется и становится более «однородной».

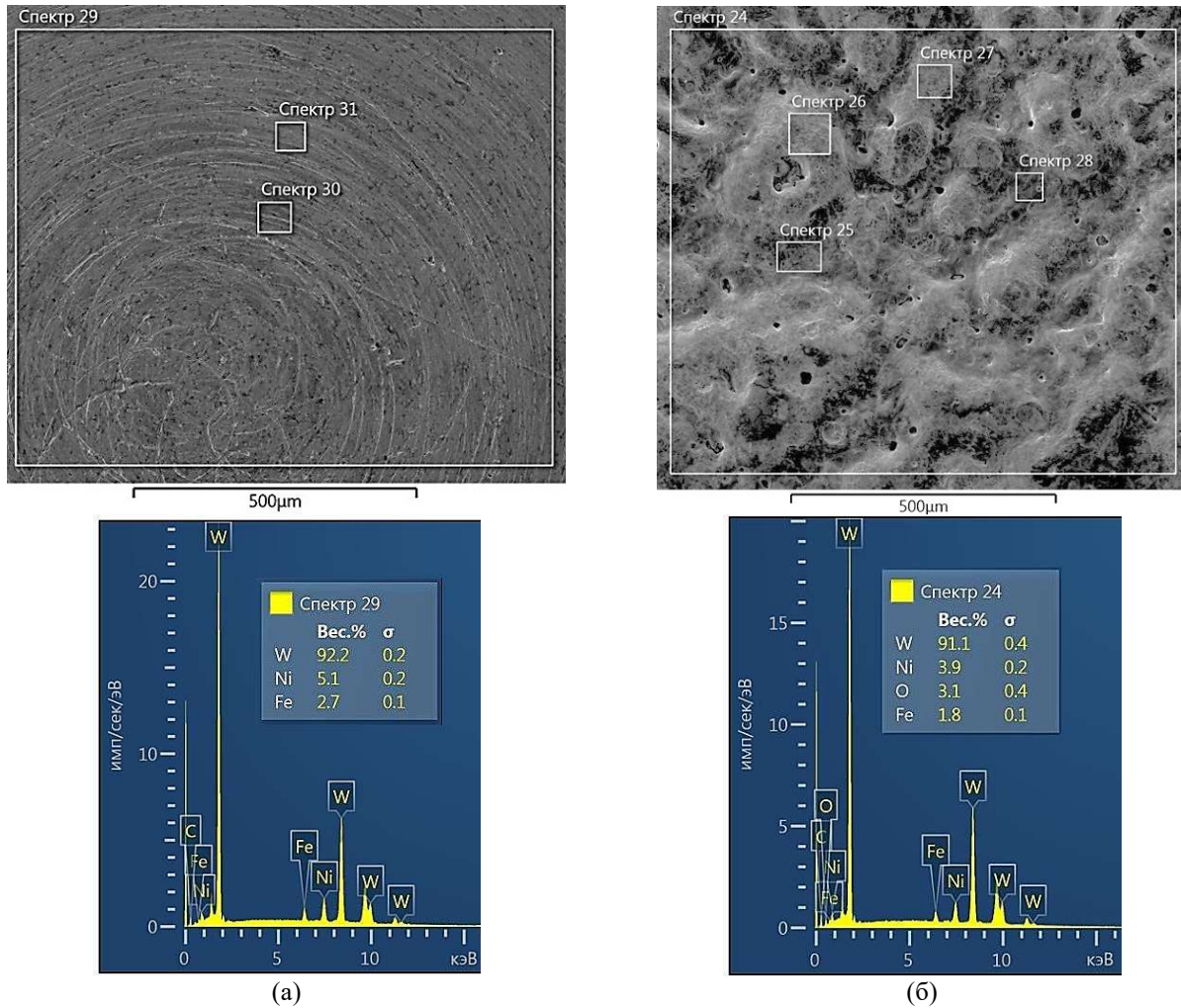


Рис. 4. Микроструктура рабочих поверхностей электродов разрядника-обострителя РО-49, не подвергавшихся воздействию искрового разряда (а), и после воздействия  $3 \cdot 10^6$  разрядных импульсов (б).

Первоначальные микровыступы на поверхности электродов имели размеры в единицы и десятки микрометров, а после  $3 \cdot 10^6$  срабатываний микровыступы на поверхности превратились в оплавленные плоские образования с размерами в единицы и доли микрометра. «Исходные» микровыступы на поверхности электродов являются следствием механической обработки при их изготовлении. Высота неоднородностей «исходных» микровыступов заметно выше, чем у электродов, подвергшихся длительному воздействию искровых разрядов. Это указывает на «эффект выравнивания» поверхности сильноточными искровыми разрядами, которые при высоких давлениях инициируются автоэлектронными токами с микронеоднородностей. Протекание больших токов приводит к оплавлениям на месте выступов и, тем самым, к снижению высоты неоднородностей. Поверхность электродов становится более ровной и локальные значения напряженностей электрического поля, ответственного за автоэлектронные эффекты, заметно снижаются.

Рентгеновский микроанализ химического состава материала электродов в приповерхностных слоях показал, что компонентами материала электродов являются вольфрам W (91÷92%), никель Ni (4÷5%), железо Fe (1.8÷2.7%). Значения парциальных масс компонентов сплава, из которого изготовлены электроды (ВНЖ-7-3) имеют отличающиеся друг от друга значения в зависимости от области анализа. После  $3 \cdot 10^6$  разрядных импульсов значения массовых долей в материале электродов имеют очень близкие значения.



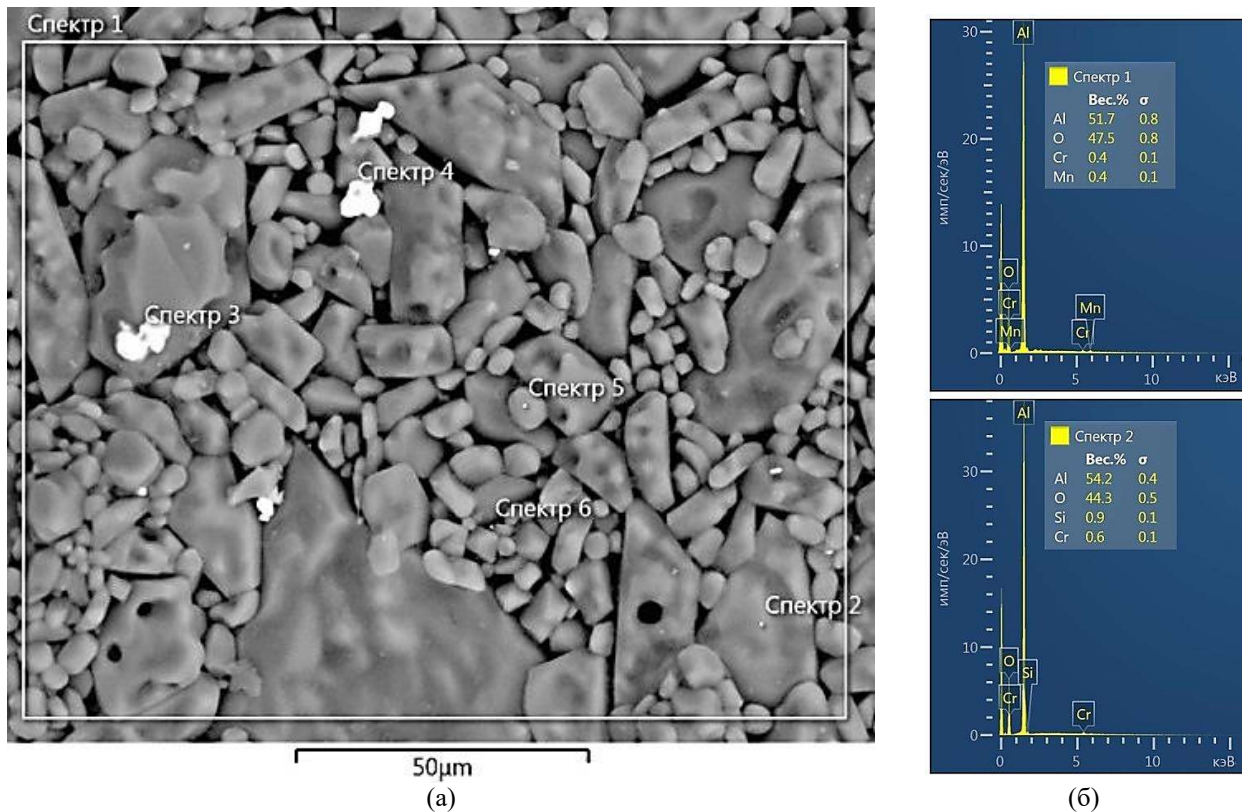


Рис. 5. Микроструктура поверхностей керамического изолятора (а) и спектрограммы элементного состава (б) керамического изолятора до включения разрядника-обострителя.

На Рис. 5 представлены фотографии микроструктуры поверхности керамического изолятора (а) и спектрограмма (б) элементного состава приповерхностного слоя до включения разрядника-обострителя.

Видно, что поверхность керамического изолятора до включения разрядника представляет собой структуру из плотно упакованных зерен с размерами от нескольких микрометров до десятков микрометров. Элементный состав соответствует исходному химическому составу алюмооксидной керамики ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Поверхность керамических изоляторов непосредственно после их изготовления имеет крупнозернистую структуру с характерными размерами микрокристаллов от единиц до десятков микрометров. Элементный состав керамики до включения разрядников определяется в основном двумя основными компонентами — алюминием (50÷54%) и кислородом (до 47%) с десятками долями процента таких включений как хром и марганец. Это соответствует составу алюмооксидной керамики на основе  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (22ХС).

По мере увеличения числа разрядных импульсов на внутренней поверхности керамического изолятора образуется металлический налет, достаточно прочно связанный с керамикой. Элементный состав этого налета полностью соответствует элементному составу материала, из которого изготовлены электроды. Характерные размеры микро неоднородностей металлического налета находятся в пределах одного микрометра.

После  $10^5$  включений искрового разряда в составе металлического налета на поверхности керамики содержится до 8 ÷ 10 % вольфрама и по несколько процентов никеля и железа. После  $10^6$  включений разрядника-обострителя структура поверхности керамического изолятора представляет собой более однородную структуру и в составе приповерхностного слоя появляется заметное содержание вольфрама, железа и никеля, т.е. тех компонентов, которые соответствуют химическому составу материала, из которого изготовлены электроды.

Содержание вольфрама в слое достигает 20%, содержание никеля и железа увеличивается до 4% и 1.5%, соответственно. Доли алюминия и кислорода понизились с 52 и 48% до 38 и 27%.

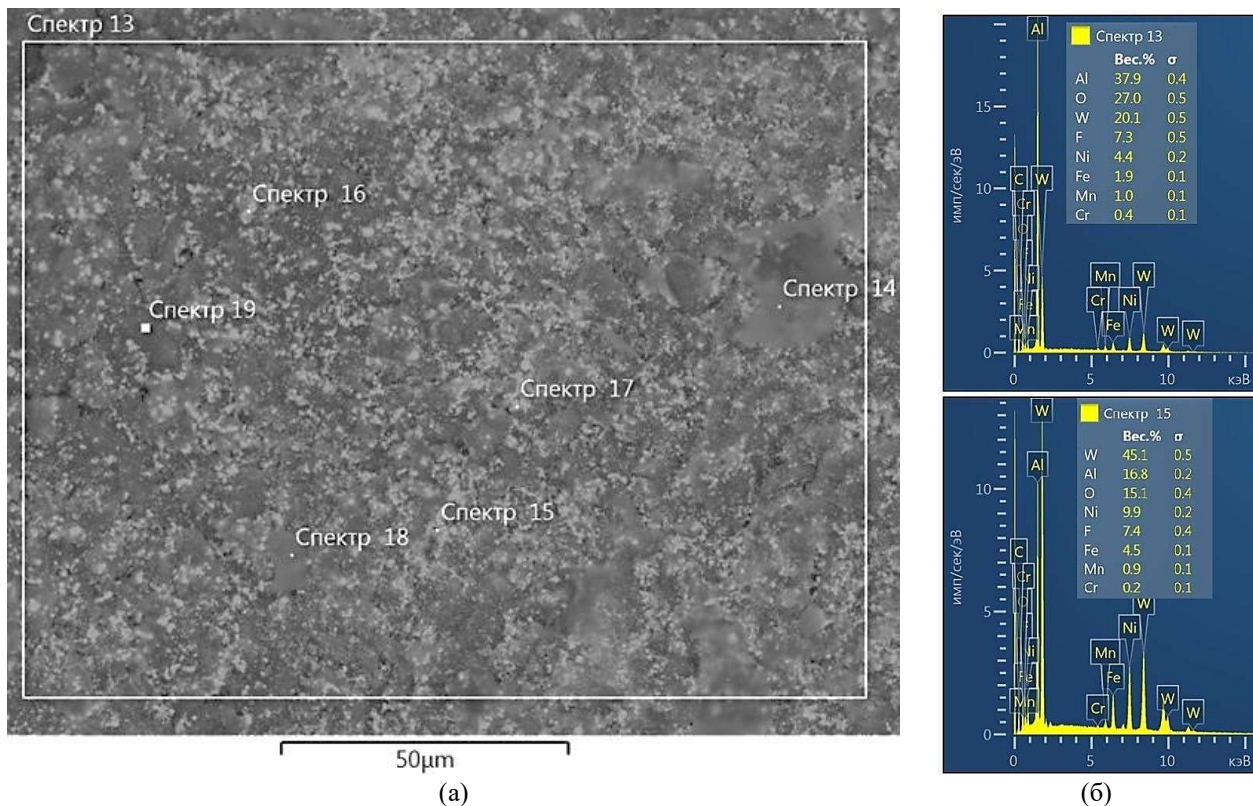


Рис. 6. Микроструктура поверхностей керамического изолятора (а) и спектрограммы компонентного состава (б) керамического изолятора после  $3 \cdot 10^6$  включений разрядника-обострителя.

При достижении ресурсных показателей  $3 \cdot 10^6$  импульсов (Рис. 6) содержание вольфрама в поверхностном слое керамического изолятора увеличивается до 25%, а в некоторых местах до 45%. Доля никеля и железа в этих условиях увеличивается на доли процента. Вскрытие разрядников-обострителей показало, что на внутренней поверхности керамического изолятора имеют место характерные «следы» от сильноточных поверхностных разрядов.

## 5. Заключение

Введение в электродную систему разрядников-обострителей защитного экрана снижает скорость осаждения продуктов эрозии электродов на поверхности керамического изолятора и позволяет достичь ресурса  $3 \cdot 10^6$  срабатываний.

Установлено, что запыление керамического изолятора продуктами разрушения электродов начинается с зоны, находящейся в «тени» защитного экрана, и по мере увеличения числа срабатываний разрядника эта область увеличивается в размерах. После достижения  $3 \cdot 10^6$  срабатываний вся внутренняя поверхность керамического изолятора оказывается полностью покрытой продуктами эрозии электродов.

Впервые методами сканирующей электронной микроскопии и рентгеновского микроанализа исследована микроструктура рабочих поверхностей электродов и керамических изоляторов разрядников-обострителей, а также химический состав напыляемых на внутреннюю поверхность изоляторов материалов в процессе длительных испытаний. Установлено, что химический состав образующегося на поверхности керамического

изолятора проводящего слоя полностью соответствует химическому составу материала электродов.

Полученные экспериментальные результаты однозначно указывают на первопричину ограничения ресурса искровых разрядников-обострителей, а именно - образование проводящего слоя на поверхности керамического изолятора из продуктов распыления материалов электродов с последующим иницированием пробоя по поверхности керамики и формированием сильноточного поверхностного разряда.

## 6. Список литературы

- [1] V.G. Shpak, S.A. Shunailov and M.I. Yalandin, 40 year anniversary of the RADAN systems – compact pulsed power sources for various investigations, *Journal of Physics: Conference Series*, vol. **2064**, 012002, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/2064/1/012002
- [2] К.В. Горбачев, Ю.И. Исаенков, А.В. Ключник и др., Частотный генератор высоковольтных импульсов наносекундной длительности, *Приборы и техника эксперимента*, № **3**, 41, 2019.
- [3] А.В. Харлов, Многокулонные газовые разрядники и их применение в импульсной технике (обзор), *Приборы и техника эксперимента*, № **1**, 5, 2021.
- [4] Ю.В. Киселев, В.П. Черепанов, *Искровые разрядники*. М.: Сов. Радио, 1976.
- [5] М.Т. Пичугина, *Высоковольтная электротехника*. Томск: Изд-во ТПУ, 2011.