

На правах рукописи



УДК 621.385

**ВАШИН СЕРГЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ  
МЕЖЭЛЕКТРОДНЫХ ПРОМЕЖУТКОВ  
МНОГОЛУЧЕВЫХ КЛИСТРОНОВ**

Специальность 2.2.1. – Вакуумная и плазменная электроника

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Фрязино – 2022

Работа выполнена в Акционерном обществе «Научно-производственное предприятие «Исток» имени А.И. Шокина»

Научный руководитель: к. т. н., начальник лаборатории  
АО «НПП «Исток» им. Шокина» **Корепин Геннадий Федосиевич**

Научный руководитель: к. т. н., главный научный сотрудник  
АО «НПП «Исток» им. Шокина» **Пугнин Виктор Иванович**

Официальные оппоненты:

**Масленников Сергей Павлович**, доктор технических наук, профессор кафедры прикладной ядерной физики ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ), г. Москва;

**Шестеркин Василий Иванович**, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник АО «Научно-производственное предприятие «Алмаз», г. Саратов.

Ведущая организация:  
Акционерное общество «Плутон», г. Москва.

Защита диссертации состоится «26» апреля 2023 года в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 74.1.008.01 по специальности 2.2.1. – Вакуумная и плазменная электроника по адресу: 141190, Московская обл., г. Фрязино, Вокзальная ул., д. 2а.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, отправлять по адресу: 141190, Московская обл., г. Фрязино, Вокзальная ул., д. 2а, на имя ученого секретаря Куликовой Ирины Владимировны (dissovet@istokmw.ru).

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке или на сайте АО "НПП "Исток" им. Шокина" [www.istokmw.ru](http://www.istokmw.ru)

Автореферат разослан «28» февраля 2023 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 74.1.008.01  
кандидат технических наук, доцент



Куликова Ирина Владимировна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** В современной радиоэлектронной аппаратуре широко применяются электровакуумные приборы сверхвысоких частот (ЭВП СВЧ) – многолучевые клистроны (МЛК), лампы бегущей волны (ЛБВ), магнетроны и др. Одним из основных требований, предъявляемых к ЭВП СВЧ, является необходимость обеспечения высокой эксплуатационной надежности, в том числе – сохранение электрической прочности в процессе их эксплуатации. Возникновение токов утечки и развитие пробоев в межэлектродных промежутках ЭВП СВЧ приводит к потере приборами своего функционального назначения. В связи с этим обеспечение высокой электрической прочности является одной из основных задач, возникающих при разработке ЭВП СВЧ, их изготовлении и эксплуатации.

Вопросы обеспечения электрической прочности межэлектродных промежутков ЭВП исследовали многие отечественные и зарубежные исследователи: Бондаренко Б.В., Гиваргизов Е.И., Горфинкель Б.И., Григорьев Ю.А., Емельянов А.А., Гуляев Ю.В., Егоров Н.В., Елинсон М.И., Елецкий А.В., Бахтизин Р.З., Махов В.И., Рахимов А.Т., Сеницын Н.И., Соминский Г.Г., Татарина Н.В., Масленников С.П., Месяц Г.А., Фурсей Г.Н., Шредник В.Н., Шешин Е.П., Шестеркин В.И., Проскуровский Д.И., Литвинов Е.А. и многие другие.

В ходе проведенных ими исследований электрической прочности было показано, что нарушения электрической прочности вакуумной электроизоляции могут быть связаны с микроразрядами, пробоями и паразитными токами между электродами ЭВП (токами утечки). При этом появление токов утечки по изоляторам электронной пушки связано с образованием проводящих пленок снаружи или внутри, а токи утечки в межэлектродном промежутке в основном обусловлены автоэлектронной эмиссией с острых выступов и неровностей на поверхностях электродов, термоэлектронной эмиссией, ионным током.

Для улучшения электрической прочности вакуумной электроизоляции предлагалось применение высоковольтной тренировки от различных источников напряжения (переменного, постоянного или импульсного). Способ высоковольтной «холодной» тренировки от источников постоянного тока с разрядным конденсатором рассматривался в качестве основного. Однако, описанные в литературе технологии (методики) одновременной тренировки (при фиксированных напряжениях процесса) и смена полярности (с минусовой на плюсовую) высоковольтного источника постоянного напряжения не всегда позволяли снизить токи утечки межэлектродных промежутков в ЭВП.

Кроме того, в связи с требованиями увеличения электрической прочности разрабатываемых современных ЭВП (помимо высоковольтной тренировки межэлектродных промежутков), а также с целью снижения количества свободных частиц в вакуумном объеме и напылений на керамические изоляторы появилась необходимость совершенствования конструкции и технологии изготовления приборов СВЧ.

Несмотря на достаточно большое количество теоретических и экспериментальных работ, связанных с исследованием электрической прочности МЛК, ряд задач на момент постановки диссертационной работы оставался малоизученным.

В МЛК с давлением остаточных газов  $10^{-6} \dots 10^{-7}$  Па проведение высоковольтной тренировки в отпаянных приборах затруднено в связи с малым числом пробоев или их отсутствием. На момент постановки работы не была также полностью решена задача определения и снижения токов утечки изоляторов с учетом целостности изоляторов при высоковольтной тренировке.

Кроме этого, отсутствовали покрытия поглотителей СВЧ-энергии с высокой прочностью сцепления, исключающие появление свободных частиц в вакуумном объеме прибора.

Производство современных МЛК с предельными характеристиками и высокой напряженностью электрического поля между электродами ставит задачи по продолжению исследований в области разработки практических технологий (методик) высоковольтной тренировки отпаянных МЛК (после откачки), а также технологических методов повышения электрической прочности.

Таким образом, работа по увеличению электрической прочности МЛК, модернизация, исследование технологии изготовления МЛК, а также разработка эффективных методик высоковольтной тренировки, является **актуальной**.

**Цель работы** - повышение электрической прочности многолучевых клистронов различного уровня выходной мощности.

**Основные задачи исследований:**

- разработка методик высоковольтной тренировки, снижающих токи утечки (токи автоэлектронной эмиссии и токи по изоляторам) и длительность процесса высоковольтной тренировки МЛК;
- исследование влияния величины давления газов в отпаянных МЛК на процесс высоковольтной тренировки;
- исследование распределения температуры на поверхности прибора в зависимости от величины рассеиваемой на нем мощности при наличии токов утечки по изолятору и токов автоэлектронной эмиссии;
- определение влияния технологических процессов изготовления приборов (сварки малогабаритных клистронов, откачки) на величины токов утечки по изоляторам;
- исследование изменения величин давлений при наличии сложных течей в дополнительных полостях (дефектах) материалов отпаянных МЛК;
- разработка технологии нанесения покрытия, стойкого к осыпанию, при изготовлении поглотителя СВЧ-энергии для МЛК.

**Объект исследований** – многолучевые клистроны разного типа.

**Предмет исследования:**

- технологии (методики) высоковольтной тренировки;
- процессы высоковольтной тренировки при повышенных давлениях остаточных газов в отпаянных МЛК и изменениях температуры поверхностей приборов;

- определение параметров температурной обработки катода и качественной оценки состава остаточных газов в процессе откачки МЛК;
- процессы изменения давления остаточных газов при поиске и герметизации сложных течей в МЛК;
- детонационная технология нанесения поглощающих СВЧ-энергию покрытий.

#### **Направления исследования:**

- научные и методологические основы построения процесса высоковольтной тренировки с учетом вида тока утечки межэлектродного промежутка МЛК;
- качественное и количественное определение состава газов в вакуумном объеме МЛК;
- методы исследования и контроля потока десорбированных газов в отпаянных МЛК при подаче напряжения на межэлектродный промежуток;
- определение и разделение токов утечки по внешней и внутренней поверхности изоляторов вакуумной оболочки МЛК;
- исследование влияния процесса откачки на образование и устранение проводящих пленок на изоляторах МЛК;
- исследование возможности применения детонационных покрытий из оксида титана в качестве поглотителей СВЧ-энергии в МЛК с целью увеличения прочности сцепления их с подложкой.

#### **Научная новизна работы:**

1. Впервые показано, что повышение давления остаточных газов в отпаянных МЛК от  $2,1 \cdot 10^{-4}$  до  $1,6 \cdot 10^{-3}$  Па обеспечивает ускорение процесса высоковольтной тренировки приборов и снижение токов автоэлектронной эмиссии за счет возрастания частоты пробоев на межэлектродных промежутках.
2. Установлено, что в процессе проведения одновременной тренировки межэлектродных зазоров сетка-катод и сетка-анод повышение напряжения на аноде МЛК (промежуток сетка-анод) до пробивного значения позволяет получать пробой на другом промежутке (промежуток сетка-катод), за счет чего снижаются токи автоэлектронной эмиссии на межэлектродном промежутке сетка-катод.
3. На основе экспериментальных исследований процесса высоковольтной тренировки показано, что во время разогрева проводящей пленки изолятора собственным током при температуре изолятора не превышающей  $170^{\circ}\text{C}$  обеспечивается сохранность изолятора и снижение токов утечки.
4. Повышение напряжения до пробивного значения и разогрев изолятора ЭВП током автоэлектронной эмиссии до  $170^{\circ}\text{C}$  в процессе высоковольтной тренировки позволяет снизить значительные (от 1 до 10 мА) токи автоэлектронной эмиссии межэлектродного промежутка сетка-анод.
5. Температура нагрева поверхностей МЛК в процессе высоковольтной тренировки линейно зависит от выделяемой мощности на тренируемом вакуумном промежутке.
6. Применение новой технологии детонационного напыления, а также разработанных способов подготовки поверхности подложки позволяет получать

покрытие поглотителя СВЧ-энергии из  $\text{TiO}_2$  с прочностью сцепления  $\sim 40$  МПа.

#### **Научные положения, выносимые на защиту:**

1. Создание в отпаянном изделии повышенного давления на уровне от  $2,1 \cdot 10^{-4}$  до  $1,6 \cdot 10^{-3}$  Па при высоковольтной тренировке МЛК обеспечивает ускорение процесса тренировки в 2...3 раза и снижение токов утечки до 5...20 раз (Пат. № 2656147 РФ).

2. Применение одновременной высоковольтной тренировки двух промежутков сетка-катод и сетка-анод с организацией маломощных пробоев энергией  $(0,4...2,6) \cdot 10^{-2}$  Дж в промежутке сетка – анод позволяет инициировать пробой в другом промежутке сетка-катод типовых МЛК среднего и высокого уровня мощности, что обеспечивает эффективное снижение токов утечки вакуумного промежутка сетка-катод в 5...20 раз.

3. Увеличение электрической прочности клистронов за счет повышения прочности сцепления с подложкой стойкого к осыпанию покрытия поглотителя СВЧ-энергии и снижение количества свободных частиц в вакуумном объеме обеспечивается за счет применения в резонаторах МЛК поглотителей из оксида титана в виде рутила, нанесенного детонационным способом (Пат. № 2712326 РФ, Пат. № 2545883 РФ, Пат. № 2545880 РФ).

#### **Практическая ценность работы.**

1. Разработанная и внедренная в производство МЛК методика высоковольтной тренировки при повышенном давлении остаточных газов снижает время высоковольтной тренировки в 2...3 раза и токи утечки межэлектродных промежутков в 5...20 раз (Пат. РФ № 2656147).

2. Разработаны и внедрены в производство приборов три методики высоковольтной тренировки (методика одновременной тренировки двух межэлектродных промежутков, методика тренировки при значительных токах автоэлектронной эмиссии и методика испарения проводящей пленки изоляторов), применение которых снизило токи утечки межэлектродных промежутков в 5...20 раз.

3. Разработана и внедрена методика, позволяющая определять методом высоковольтной тренировки внешнюю и внутреннюю проводимости изоляторов ЭВП.

4. Разработан и внедрен комплекс алгоритмов (технологий) высоковольтной тренировки по повышению электрической прочности, за счет снижения и определения токов утечки межэлектродных промежутков отпаянных МЛК.

5. Разработана технология изготовления поглотителя СВЧ-энергии с помощью детонационного напыления из материала  $\text{TiO}_2$  с существенно более высокой прочностью сцепления с подложкой (40 МПа) по сравнению с применяемыми способами нанесения (Пат. № 2712326 РФ), а также разработаны способы повышения прочности сцепления получаемого покрытия (Пат. № 2545883 РФ, Пат. № 2545880 РФ).

**Достоверность научных результатов** подтверждена использованием поверенного и аттестованного современного оборудования, применением

статистических методов обработки результатов обширного массива полученных в ходе выполнения диссертационной работы экспериментальных данных, сопоставлением с полученными выводами других авторов.

**Обоснованность научных положений** доказана лабораторными исследованиями и опытно-промышленным испытанием разработанных технологий. Основные выводы работы соответствуют известным концепциям и фундаментальным положениям теории по повышению электрической прочности ЭВП СВЧ.

**Личный вклад автора** заключался в формулировке целей и постановке задач исследований, выполнении большей части экспериментов, анализе и интерпретации результатов, подготовке научных публикаций и докладов по результатам проведенных исследований. Кроме этого, разработан и внедрен в производство МЛК комплекс алгоритмов (технологий) высоковольтной тренировки. При непосредственном участии автора проведены исследования влияния распределения температуры на поверхности прибора на величину рассеиваемой на нем мощности. Совместно с соавторами исследовано влияние технологических процессов изготовления приборов (сварки малогабаритных клистронов, откачки, течеискания приборов) на величины токов утечки по изоляторам. Автором разработаны технологии и способы детонационного напыления покрытия поглотителя СВЧ-энергии из оксида титана, а совместно с соавторами исследованы возможности применения его в МЛК.

**Апробация результатов работы.** Основные положения диссертации были доложены и опубликованы в материалах 7-ми международных и всероссийских научно-технических конференций.

**Соответствие паспорту научной специальности.** Область исследования соответствует № пп. 3, 5-8 паспорта специальности 2.2.1. – «Вакуумная и плазменная электроника».

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 30 печатных работ, 8 - в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК, 18 - в прочих научных журналах и изданиях, получено 4 патента РФ на изобретения.

**Внедрение результатов исследований.**

Результаты исследований внедрены в технологический процесс изготовления приборов СВЧ и подтверждены актами внедрения (см. Приложение).

**Структура работы.** Работа состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 161 страницы, включая список литературы из 123 наименований, 9 таблиц и 75 рисунков.

**Во введении** проведен анализ существующих технологий процесса и схем высоковольтной тренировки, обоснован выбор направления исследований, показана актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследований.

**В первой главе** рассмотрены физические процессы, определяющие основные причины возникновения и развития электрических пробоев в ЭВП, а также меры по повышению электрической прочности приборов, связанные с

устранением пробоев, токов утечки межэлектродных промежутков и микроразрядов. Рассмотрены способы высоковольтной тренировки ЭВП, параметры и схемы процесса. В результате анализа существующих методов, схем оборудования, критериев высоковольтной тренировки и проблем повышения электрической прочности межэлектродных промежутков в отпаянных ЭВП, сформулированы основные задачи исследования.

**Во второй главе** рассмотрено влияние величины давления адсорбированных и остаточных газов внутривакуумного объема отпаянных МЛК в процессе высоковольтной тренировки на электрическую прочность. Все расчеты величин давления и потоков остаточных газов в отпаянных приборах осуществлялись с использованием величины тока электроразрядного насоса (НЭМ). Проведены исследования десорбции газов с поверхностями МЛК, как одного из факторов нарушения электрической прочности.

Экспериментальные исследования МЛК и отработка методик высоковольтной тренировки проводилась на стенде (схема рис.1), содержащем балластный и ограничительный резисторы и конденсатор, подключенный параллельно к тренируемому прибору. Балластный резистор ( $R_6$ ) использовался с целью «гашения» дугового разряда на межэлектродном промежутке во время прохождения пробоев. Использование ограничительного резистора ( $R_{огр}$ ) позволило ограничить максимальный ток пробоя. Наличие конденсатора небольшой общей емкости в стенде дало возможность проводить высоковольтную тренировку межэлектродных промежутков МЛК маломощными пробоями.

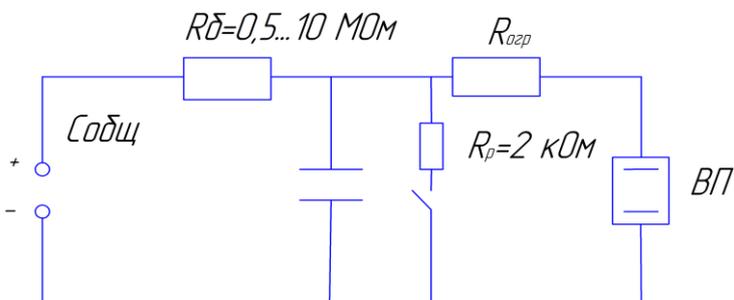


Рисунок 1. Схема стенда высоковольтной тренировки ЭВП:  $R_6$  –балластный резистор;  $R_{огр}$  – ограничительный резистор;  $R_p$  - разрядный резистор;  $C_{общ}$  –общая емкость конденсаторов; ВП – межэлектродный промежуток ЭВП.

Установлено, что после выключения НЭМ давление газов в отпаянном МЛК может повышаться относительно начального значения  $10^{-6}$  Па за счет десорбции газов с поверхности электродов в процессе высоковольтной тренировки. После нескольких включений НЭМ с откачкой прибора до давления  $10^{-6}$  Па и выдержкой с интервалом времени 5 минут (НЭМ выключен) количество десорбированных газов на поверхности электрода может быть снижено (рис.2), за счет постепенного обезгаживания поверхности в процессе высоковольтной тренировки.

Другой способ повышения давления остаточных газов в мощных МЛК связан с организацией пробоев межэлектродного промежутка и происходящими процессами перехода материала острия, находящегося на электроде, в газовую фазу с его последующей ионизацией.

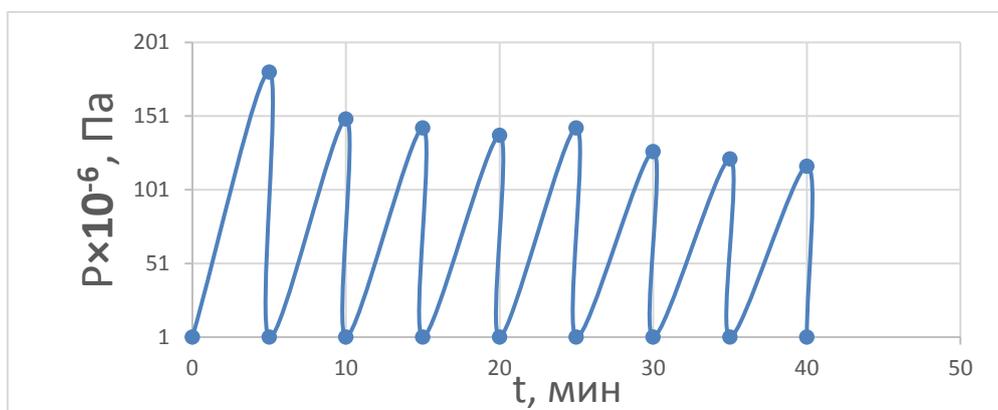


Рисунок 2. Изменение давления остаточных газов от времени в мощном МЛК после выдержки межэлектродного промежутка сетка-анод при напряжении  $U=36$  кВ (интервал включения НЭМ 5 мин).

В результате проведенных исследования установлено, что частота пробоев на межэлектродном промежутке типовых МЛК в процессе высоковольтной тренировки возрастала при увеличении давления газов выше  $2,1 \cdot 10^{-4}$  Па (рис.3).

Результаты исследований были использованы в дальнейшем для разработки методик высоковольтной тренировки МЛК.

Показано, что появление значительных ионных токов утечки (выше 1 мА при тренировочных напряжениях) межэлектродных промежутков в герметичных отпаянных МЛК при выдержке прибора в выключенном состоянии связано с повышением давления остаточных газов выше  $10^{-5}$  Па. После дополнительного обезгаживания МЛК при снижении давления остаточных газов в приборе ниже  $10^{-6}$  Па токи утечки могут быть уменьшены.

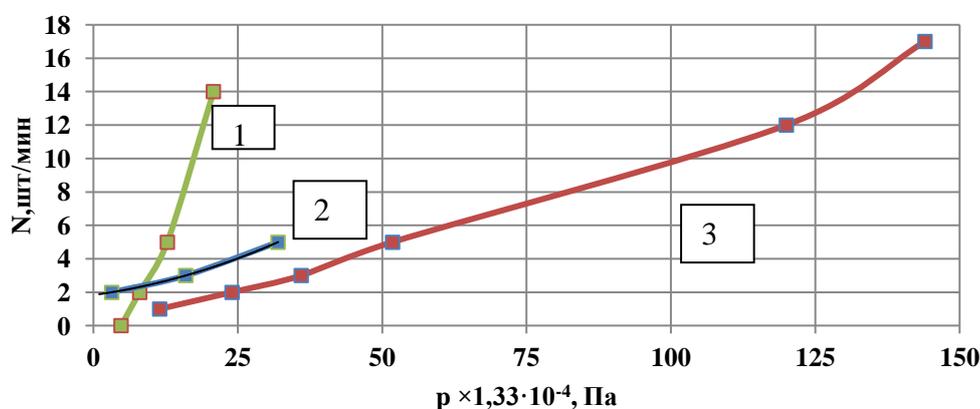


Рисунок 3. Зависимость частоты пробоев на промежутке сетка-катод от давления остаточных газов в вакуумном объеме разных экземпляров МЛК одного вида: 1- прибор №1; 2 – прибор №2; 3 – прибор №3.

**В третьей главе** исследованы различные алгоритмы и методики высоковольтной тренировки, позволившие снизить токи утечки межэлектродных промежутков в отпаянных МЛК, а также предложена методика определения токов утечки по изоляторам приборов.

Проведенный анализ литературных данных и оценочные расчеты показали, что для испарения одного эмитирующего выступа (острия в виде конуса) из молибдена, достаточно пробоя с энергией  $1,75 \cdot 10^{-8} \dots 3,5 \cdot 10^{-3}$  Дж.

Проведены исследования влияния параметров пробоя на процесс высоковольтной тренировки мощного МЛК. Показано, что выделившаяся в межэлектродном промежутке энергия во время высоковольтной тренировки в процессе пробоя отпаянного прибора составила  $(0,4 \dots 2,6) \cdot 10^{-2}$  Дж, что достаточно для разрушения большинства острий (следует отметить, что в этом случае энергия маломощного пробоя незначительно влияла на состояние поверхности катода в процессе проведения высоковольтной тренировки).

Разработанная методика уменьшения времени высоковольтной тренировки отпаянных мощных МЛК, основанная на выборе оптимального давления в приборе при высоковольтной тренировке, позволяющего создать достаточное количество тренирующих пробоев при минимальном отравляющем влиянии на катод клистрона, защищена патентом (Пат. № 2656147 РФ).

В соответствии с разработанной методикой для повышения величины давления остаточных газов в приборе на начальном этапе тренировки необходимо проводить высоковольтную тренировку промежутка сетка-анод с выключенным НЭМ. Процесс повышения давления в МЛК на этом этапе происходит за счет явлений, связанных с десорбцией газов с поверхности электрода, и, вследствие этого, возникающих пробоев на межэлектродном промежутке сетка-анод в начале высоковольтной тренировки. С помощью кратковременного включения НЭМ в течение 1...2 секунд давление остаточных газов снижают до  $(2,1 \cdot 10^{-4} \dots 1,6 \cdot 10^{-3})$  Па.

Плазма, возникающая в межэлектродном пространстве (электроны; десорбированные газы; пары металлов, включая ионы и нейтральные атомы металлов) [1], создает благоприятные условия для дальнейших пробоев межэлектродного промежутка сетка-катод. В результате пробоев разрушаются центры (острия) автоэлектронной эмиссии, при этом токи утечки межэлектродных промежутков снижаются. В конце высоковольтной тренировки остаточные газы в МЛК откачиваются с помощью НЭМ до давления  $10^{-7}$  Па.

Проведенные исследования показали, что оптимальным давлением для процесса высоковольтной тренировки, при котором термоэлектронная эмиссия катода мощных МЛК после проведения высоковольтной тренировки не менялась, являлось давление  $(2,1 \cdot 10^{-4} \dots 1,6 \cdot 10^{-3})$  Па.

При разработке методики высоковольтной тренировки межэлектродного промежутка МЛК необходимо установление вида тока утечки и точное местоположение области его протекания. Чаще всего выделяют два вида токов утечки между электродами ЭВП – это токи утечки по изоляторам и утечки, связанные с автоэлектронной эмиссией с поверхностей электродов. Особенно

сложным является определение местоположения области утечки по изоляторам приборов, так как в этом случае могут быть проводимости по поверхности изоляторов как снаружи, так и внутри прибора. Проведенные исследования показали, что, если вольт-амперные характеристики (ВАХ) межэлектродного промежутка в обеих полярностях в координатах ток-напряжение совпадают, то ток утечки является проводимостью по керамическому изолятору прибора. При этом определение проводимости внешней поверхности керамических изоляторов может быть получено за счет использования искусственно внесенного проводника, например, отрезка проволоки. С этой целью проволока устанавливалась в центре изолятора между электродами исследуемого межэлектродного промежутка, а электроды изолятора соединялись между собой. Наличие тока в цепи после подачи напряжения на проволоку и электроды изолятора свидетельствовало о том, что ток утечки происходил по наружной поверхности изолятора.

Для снижения токов утечки по изоляторам ЭВП необходимо обеспечить испарение проводящей пленки за счет омического разогрева собственным током без пробоев межэлектродного промежутка. Снижение токов утечки при сохранности целостности изолятора обеспечивалось ограничением мощности разогрева.

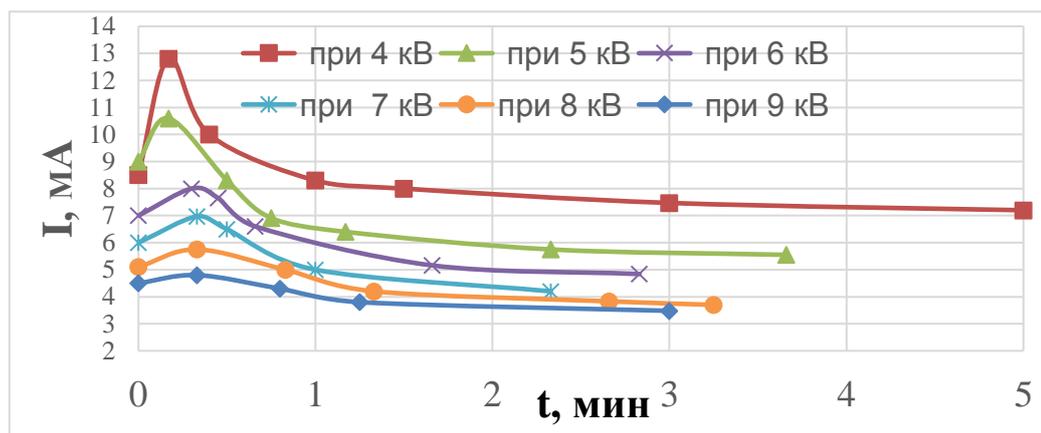


Рисунок 4. Зависимость внутреннего тока утечки от времени при различных напряжениях.

На основе проведенных исследований разработана технология снижения внутренних токов утечки по керамическому изолятору электронной пушки. При использовании разработанной технологии осуществлялась подача определенной величины высокого напряжения на тренируемый межэлектродный промежуток, которое с учетом тока утечки изолятора, а также возникающей электронной эмиссии между проводящими его участками приводило к выделению мощности, позволяющей нагревать проводящую пленку. Уменьшение тока утечки происходило за счет испарения пленки при ее нагреве. В рамках разработанной технологии высоковольтной тренировки подбиралось такое напряжение высоковольтной тренировки, при котором ток утечки вначале увеличивался до максимального значения, а затем снижался до исходного в течение 1...3 минут. Обычно процесс выдержки происходил без пробоев с незначительным

уменьшением тока утечки. Повышение напряжения производилось пошагово (рис.4), а высоковольтная тренировка продолжалась до тех пор, пока ток утечки изолятора не снижался до допустимого значения ( $I_{don}$ ).

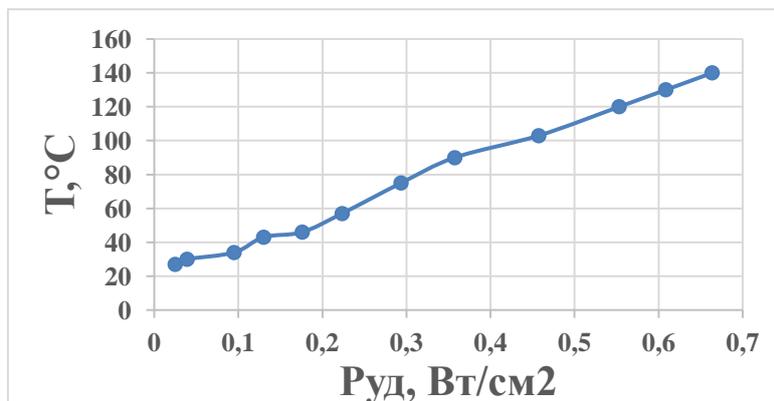


Рисунок 5. Зависимость температуры от удельной рассеиваемой мощности на изоляторе МЛК в процессе высоковольтной тренировки.

В работе [2] было определено, что для исключения растрескивания изолятора в процессе высоковольтной тренировки его температура не должна превышать  $170^{\circ}\text{C}$ . При проведении экспериментальных исследований в ходе выполнения диссертационной работы было установлено, что при увеличении мощности, подаваемой на изолятор пушки ЭВП с внутренним током утечки, установившаяся температура узлов, в том числе изолятора электронной пушки прибора, изменялась линейно (рис.5).

Проведенный анализ результатов исследований показал, что для снижения значительных токов утечки (от 1 до 10 мА) межэлектродного промежутка сетка-анод в МЛК, связанных с автоэлектронной эмиссией, необходимо организовывать маломощные пробои таким образом, чтобы обеспечивалась сохранность керамического изолятора прибора в процессе нагрева.

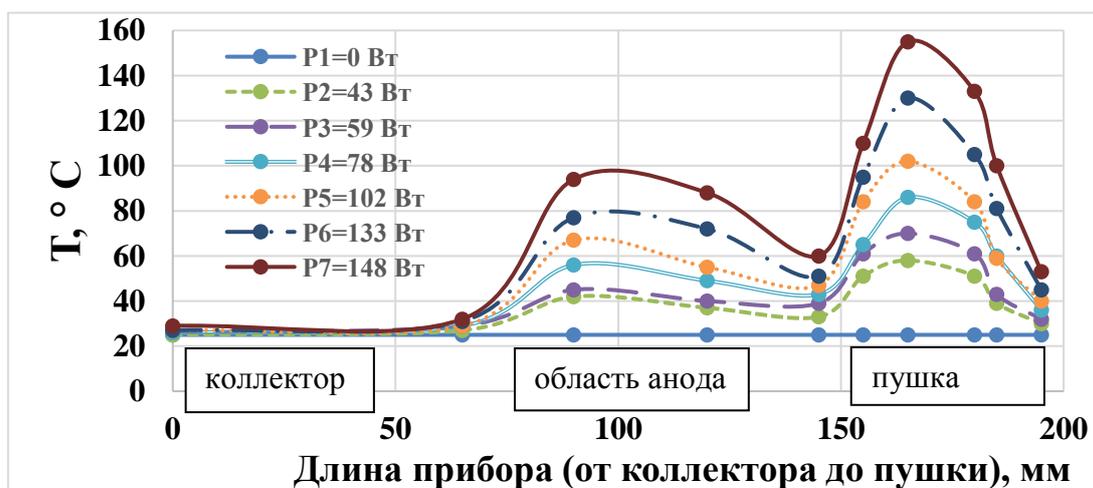


Рисунок 6. Зависимость распределения температуры на приборе от рассеиваемой мощности на межэлектродном промежутке сетка-анод.

На основе исследований приборов со значительными токами утечки межэлектродных промежутков сетка-анод была разработана методика высоковольтной тренировки, в соответствии с которой осуществлялся ступенчатый подъем высокого напряжения на межэлектродном промежутке сетка-анод (сетка и катод закорочены), приводящий к нагреву прибора. Повышение напряжения осуществлялось после выдержки на каждой ступени интервала времени  $\sim 5$  минут. За счет тока автоэлектронной эмиссии межэлектродного промежутка происходил значительный нагрев поверхностей прибора до температуры  $100 \dots 170^\circ\text{C}$  (рис.6). После этого напряжение скачкообразно повышалось до пробивного значения, при этом температура керамического изолятора не превышала  $170^\circ\text{C}$ . В процессе пробоев автоэмиссионные центры на сетке разрушались или оплавлялись, что приводило к снижению тока утечки до допустимого уровня.

Следует отметить, что разработанная методика одновременной тренировки двух зазоров отпаянных приборов (схема подключения МЛК - рис. 7) позволила снизить токи утечки межэлектродного промежутка сетка-катод в МЛК мощного и среднего уровня мощности и применялась для тренировки промежутка сетка-катод при невозможности организации пробоев за счет подъема напряжения на этом промежутке.

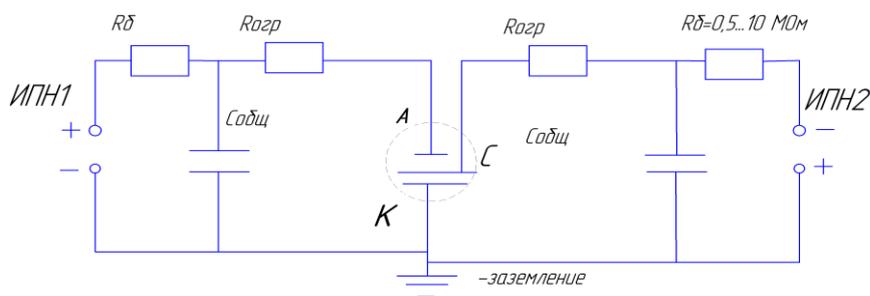


Рисунок 7. Схема одновременной высоковольтной тренировки мощного МЛК:

К - катод МЛК; А –анод (корпус) МЛК; С – сетка МЛК; ИПН1 - источник постоянного напряжения плюсовой полярности; ИПН2 - источник постоянного напряжения минусовой полярности;  $R_b$  – балластный резистор;

$R_{огр}$  – ограничительный резистор;  $C_{общ}$  – общая емкость конденсаторов.

Снижение токов утечки межэлектродного промежутка сетка-катод в этом случае достигалось за счет высоковольтной тренировки промежутка сетка-катод и сетка-анод с организацией пробоев на аноде путем повышения на нем напряжения до пробивного. Подача напряжения на межэлектродный промежуток сетка-катод производилась в минусовой полярности источника питания относительно катода. Повышение напряжения на аноде (корпус МЛК) до пробивного значения производилось в плюсовой полярности источника относительно катода. В ходе разработки этой технологии было установлено, что при таком подключении при увеличении напряжения на источнике катод-анод, условия для пробоев создавались на межэлектродном промежутке сетка-анод

МЛК, что позволило одновременно получать пробои на межэлектродном промежутке сетка-катод за счет перезарядки конденсатора (промежутка сетка-катод) с минусовой полярности в плюсовую и обратно (рис.8).

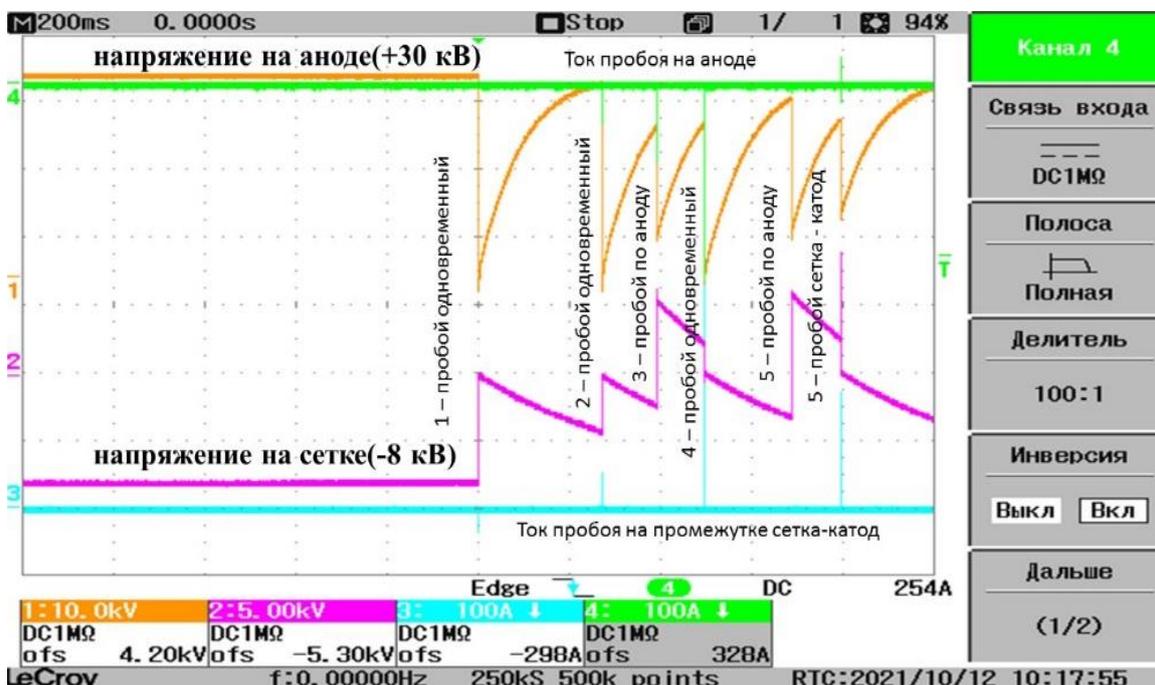


Рисунок 8. Осциллограмма напряжений на конденсаторах в процессе высоковольтной тренировки двух промежутков одновременно во время пробоев.

Таблица 1

Комплекс алгоритмов для высоковольтной тренировки отпаянных ЭВП

Название методики	Межэлектродный промежуток	Вид тока утечки	Виды приборов
1. Методика высоковольтной тренировки при повышенных давлениях остаточных газов.	сетка-катод, сетка-анод	Автоэлектронная эмиссия	клистроны
2. Методика определения места проводимости (снаружи или внутри) изолятора ЭВП.	все промежутки	Ток утечки по изолятору	клистроны, ЛБВ и др.
3. Методика испарения проводящей пленки.	все промежутки	Ток утечки по изолятору	клистроны, ЛБВ и др.
4. Методика одновременной тренировки клистронов.	сетка-катод	Автоэлектронная эмиссия	клистроны
5. Методика снижения значительных токов (от 1 до 10 мА) автоэлектронной эмиссии.	сетка-анод	Автоэлектронная эмиссия	клистроны, ЛБВ и др.

Анализ проведенных исследований показал, что с помощью такого способа высоковольтной тренировки автоэмиссионные центры на электродах МЛК также разрушались или оплавлялись, что приводило к снижению тока утечки до допустимого уровня. Положительным свойством разработанной технологии являлось то, что термоэлектронная эмиссия катода клистронов в МЛК после такой тренировки не менялась.

На основе выполненных исследований был разработан комплекс алгоритмов по повышению электрической прочности отпаянных ЭВП (табл. 1).

**В четвертой главе** исследованы технологические процессы изготовления приборов, влияющие на электрическую прочность МЛК.

Определена температура обработки катода пушки в вакууме во время откачки МЛК, при которой на изоляторе прибора не образуются напыленные слои металла:

$$T_{об} \leq T_{исп} - \Delta T, \quad (1)$$

где  $T_{об}$ , °С – температура нагрева корпуса прибора во время откачки;  $T_{исп}$ , °С – безопасная температура испарения материалов электронной пушки;  $\Delta T$ , °С – изменение температуры пушки относительно минимальной температуры испарения используемых в электронной пушке материалов. Проведенные исследования технологического процесса откачки показали, что при обработке катода в МЛК среднего уровня мощности температуру откачки необходимо снижать на  $(50 \dots 150)^\circ \text{C}$  относительно того материала электронной пушки, который имеет минимальную температуру испарения.

Представлены результаты исследований, связанные с изменением сопротивления изолятора из-за разрушения за счет окисления в процессе откачки неметаллической пленки изолятора при напуске атмосферы в МЛК. При этом, из-за того, что сопротивление изолятора может увеличиваться, после повышения сопротивления изолятора необходимо проводить повторную откачку прибора. Проведенные в ходе выполнения диссертационной работы исследования показали, что несмотря на изменение сопротивления изолятора от времени напуска атмосферы по нелинейному закону, на начальном участке это изменение носило линейный характер (рис.9).

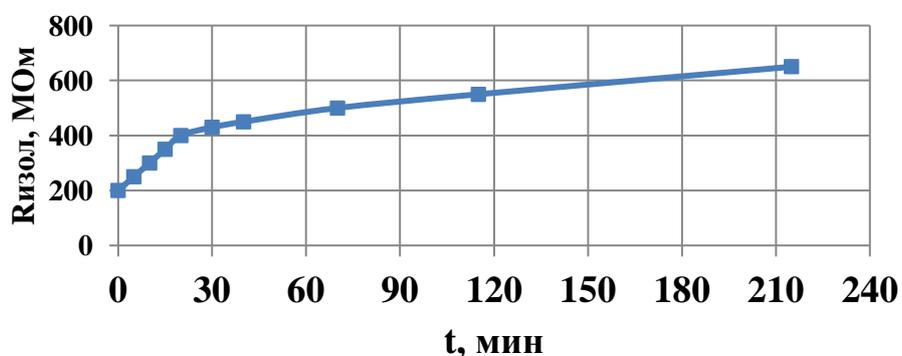


Рисунок 9. Изменение сопротивления изолятора МЛК на откачном посту после напуска атмосферы в прибор (сопротивление изолятора на откачном посту до напуска атмосферы 50 МОм).

Кроме того, проведенные исследования показали, что за счет уменьшения проникновения паров металла из сварочного шва внутрь приборов применение электронно-лучевой сварки снижало образование проводящей пленки на изоляторах электронных пушек малогабаритных МЛК по сравнению с аргонодуговой сваркой.

В рамках выполнения диссертационной работы были проведены исследования сложных течей в отпаянных приборах с использованием работающего встроенного НЭМ по изменению его тока.

Наличие сложных течей в приборах зачастую приводит к потере электрической прочности вакуумных промежутков за счет повышения величины давления газов в ЭВП. Такие течи образуются за счет дополнительных объемных полостей сложной конфигурации в дефектах материалов.

В ходе проведенных исследований установлено, что определение и герметизация в ЭВП после откачки места сложной течи возможно при величине скорости натекания ( $5 \cdot 10^{-7} \dots 10^{-11}$ ) м<sup>3</sup>Па/с, при этом приборы со сложными течами при скорости натекания меньше, чем  $10^{-11}$  м<sup>3</sup>Па/с браковались из-за невозможности их определения методами обдува и опрессовки гелием.

Кроме того, при проведении исследований процесса натекания в МЛК с использованием материала МН19 (мельхиор) обнаружено, что повторный процесс откачки таких приборах, натекавших со скоростью натекания не более  $4 \cdot 10^{-12}$  м<sup>3</sup>·Па/с позволил уменьшить размеры малых течей или полностью закрыть их. Уменьшение или полное закрытие малых течей наилучшим образом происходило в интервале температур выше температур рекристаллизации МН19 от 450 °С до 550 °С и при длительности цикла обезгаживания прибора не менее 40 часов.

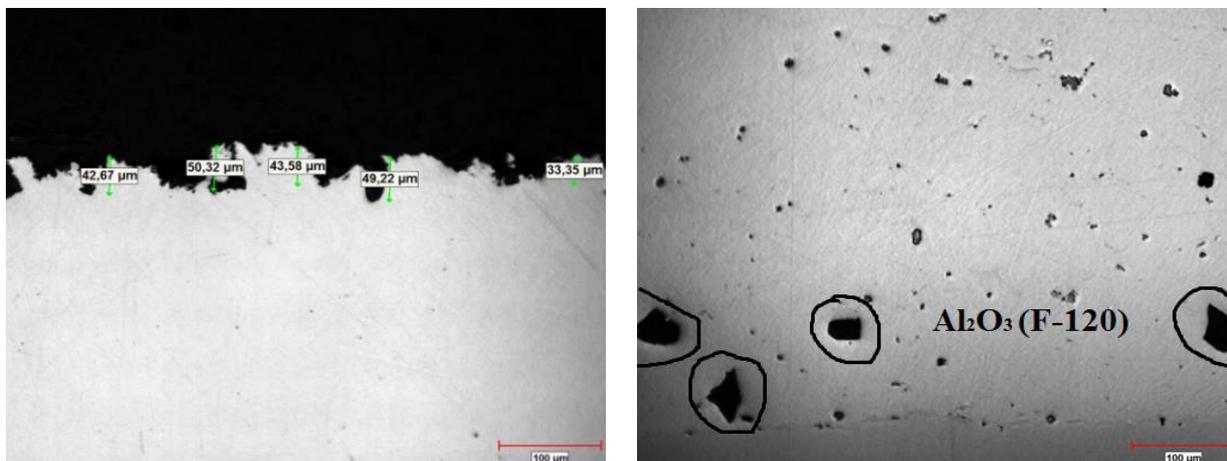
С целью уменьшения возможности образования посторонних частиц в вакуумном объеме МЛК (например, вследствие осыпания материала покрытий) предложено использовать нанесенное детонационным методом напыления покрытие поглотителей СВЧ-энергии из TiO<sub>2</sub>, защищенное патентом Пат. № 2712326 РФ. С помощью метода рентгеновского фазового анализа установлено, что поглощающей фазой в покрытиях является TiO<sub>2</sub> в виде модификации рутила.

Для увеличения прочности сцепления покрытий путем повышения степени активации поверхности подложки перед нанесением детонационного покрытия, была разработана технология обработки поверхности подложки потоком абразивных частиц установкой детонационного напыления, защищенная патентом Пат. № 2545883 РФ. Применение данной технологии привело к существенному росту прочности сцепления покрытия с подложкой за счет шероховатости поверхности подложки величиной (20...40) Rz (рис.10, а).

Кроме того, была разработана технология нанесения детонационного покрытия на поверхность изделия, защищенная патентом Пат. № 2545880 РФ, включающая совместное воздействие на поверхность потока абразивных и напыляемых частиц, остающихся в структуре покрытия (рис.10, б).

Поглощающая способность разработанного детонационного покрытия из TiO<sub>2</sub> оценивалась, исходя из обеспечения требуемого уровня значений

нагруженных добротностей резонаторов МЛК, в интервале 50...500 единиц в S-диапазоне частот 3...4 ГГц при различной толщине его слоя. По результатам испытаний установлено, что детонационное покрытие из  $\text{TiO}_2$  обладает достаточными поглощающими свойствами, что дает возможность в дальнейшем испытать его на реальных образцах МЛК.



а)

б)

Рисунок 10. Микрошлиф поверхности подложки после абразивной обработки частицами шлифпорошка F-120 (а) и структура напыляемого слоя покрытия с одновременной подготовкой напыленной поверхности с помощью детонационной установки (б).

Нанесенное методом детонационного напыления покрытие позволило получить прочность сцепления  $\sim 40$  МПа, что значительно ( $\sim 5$  раз) превысило прочность сцепления материалов покрытий с использованием органических связующих веществ.

### Основные результаты и выводы

1. Разработана новая методика высоковольтной тренировки при повышенном давлении остаточных газов в приборе от  $2,1 \cdot 10^{-4}$  до  $1,6 \cdot 10^{-3}$  Па (Патент №2656147 РФ), позволившая снизить время тренировки в 2...3 раза, а также снизить токи утечки межэлектродных промежутков отпаянных МЛК мощного и среднего уровня мощности в 5...20 раз.

2. Разработаны методики определения и снижения внутренних токов утечки изоляторов, при этом для снижения токов утечки необходимо подавать высокое напряжение тренировки без инициирования пробоев таким образом, чтобы температура изолятора МЛК не превышала  $170^\circ\text{C}$ .

3. Разработана методика одновременной высоковольтной тренировки двух межэлектродных промежутков для отпаянных МЛК среднего и высокого уровня мощности, позволившая снизить токи утечки межэлектродного промежутка сетка-катод в 5...20 раз за счет инициирования маломощных пробоев на аноде с энергией  $(0,4...2,6) \cdot 10^{-2}$  Дж.

4. Разработана методика высоковольтной тренировки МЛК среднего и высокого уровня мощности по снижению автоэмиссионных токов утечки в 5...20 раз на межэлектродном промежутке сетка-анод, осуществляемая повышением пробивного напряжения при условии разогрева керамического изолятора не выше 170° С.

5. Разработано детонационное покрытие поглотителя СВЧ-энергии в МЛК из материала TiO<sub>2</sub> и способы его нанесения, обладающее существенно более высокой прочностью сцепления с подложкой (~ 40 МПа) и прочностью материала самого покрытия, что позволило надежно исключить его осыпание и появление свободных частиц в приборе (Патент № 2712326 РФ, Патент № 2545880 РФ, Патент № 2545883 РФ).

6. Исследование технологических способов повышения электрической прочности МЛК, показало, что:

- электронно-лучевая сварка обеспечивала отсутствие проводящей пленки на изоляторах малогабаритных МЛК в отличие от аргонодуговой сварки;
- напуск атмосферы в процессе откачки позволил повысить сопротивление изолятора (от неметаллических окисляемых пленок) в 8 ...12 раз;
- снижение температуры обезгаживания МЛК в процессе обработки катода на 50...150°С позволило устранить напыление на изолятор электронной пушки;
- повторная откачка МЛК с длительностью цикла более 40 часов уменьшала или полностью устраняла течи по материалу величиной не выше  $4 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$ .

7. Разработан и внедрен комплекс технологий высоковольтной тренировки в процесс изготовления 16 типов МЛК, что существенно повысило количество годных приборов.

### **Используемая литература**

1. Сливков, И.Н. Процессы при высоком напряжении в вакууме /И.Н. Сливков// – М.: Энергоатомиздат, 1986. - 256 с.
2. Коваленко, В.Ф. Теплофизические процессы и электровакуумные приборы/ В.Ф. Коваленко. – М.: Советское радио – 1975. - 216 с.

### **Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

#### **Основные публикации по теме диссертации в журналах из перечня ВАК РФ:**

1. Вашин, С.А. О динамике сорбционного равновесия газов отпаянного высоковольтного ЭВП / С.А. Вашин, Г.Ф. Корепин// Электронная техника. Сер.1. СВЧ – техника. Выпуск 3(522). – 2014. – С. 48 – 54.
2. Вашин, С.А. Метод снижения токов утечки изоляторов отпаянных ЭВП / С.А. Вашин, Г.Ф. Корепин, Н.Н. Климова // Электронная техника. Сер.1. СВЧ – техника. Выпуск 1(528). – 2016. – С. 23 – 30.
3. Вашин, С.А. Выбор способа сварки малогабаритных клистронов / С.А. Вашин, Г.Ф. Корепин, И.И. Ваганов // Электронная техника. Сер.1. СВЧ – техника. Выпуск 1(530). – 2016. – С. 103 – 107.

4. Вашин, С.А. Проблемы поиска сложных течей отпаянных ЭВП/ С.А. Вашин, Г.Ф. Корепин, Н.Н. Климова // Электронная техника. Сер.1. СВЧ – техника. Выпуск 2(529). – 2016. – С. 13 – 21.
5. Вашин, С.А. Компрессия по водороду в отпаянных ЭВП/ С.А. Вашин, Г.Ф. Корепин // Электронная техника. Сер.1. СВЧ – техника. Выпуск 2 (533). – 2017.–С. 22–28.
6. Вашин, С.А. Полевая десорбция поверхностных газов и электрическая прочность ЭВП / С.А. Вашин, Г.Ф. Корепин // Электронная техника. Сер.1. СВЧ – техника. Выпуск 3(534). – 2017. – С. 56-63.
7. Вашин, С.А. Методики снижения токов утечки в отпаянных ЭВП // Электронная техника. Сер.1. СВЧ – техника. Выпуск 2(541). – 2019. – С. 16 – 26.
8. Вашин, С.А. Исследование детонационных покрытий в качестве поглотителей СВЧ-энергии/ С.А. Вашин, Г.Ф. Корепин, С.В. Евсеев, Б.Г. Хамицев // Электронная техника. Сер.1. СВЧ – техника. Выпуск 3(542). – 2019. – С.36-43.

### **Патентные документы**

1. Патент № 2656147. РФ. МПК G01R 31/25. Способ высоковольтной тренировки отпаянного электровакуумного прибора с металлопористыми катодами / С.А. Вашин, Г.Ф. Корепин, Т.В. Морокова/ – Приоритет от 6.03.2017.
2. Патент № 2712326. РФ. Способ получения поглощающего СВЧ-энергию покрытия/ С.А. Вашин, С.В. Евсеев, Г.Ф. Корепин. – Приоритет 06. 03.2019.
3. Патент № 2545883. РФ. МПКС23С 24/04. Способ подготовки поверхности изделия перед нанесением детонационного покрытия / С.А. Вашин, В.В. Гераськин, С.С. Мухаметова, Б.Г. Хамицев. – Приоритет 30. 04.2013.
4. Патент № 2545880. РФ. МПКС23С 24/04. Способ нанесения газотермического покрытия на поверхность изделия/ С.А. Вашин, Л.Х. Балдаев, Б.Г. Хамицев. – Приоритет 19.07.2013.

### **Другие публикации по теме диссертации**

1. Vashin, S.A. On the possibility of using detonation ceramic as microwave energy absorbers/ S A Vashin, S V Evseev, G A Zhabin, G F Korepin and A N Pashkov // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1313 (2019) 012057 IOP Publishing.
2. Вашин, С.А. Способ повышения электрической прочности отпаянных ЭВП / С.А. Вашин, Г.Ф. Корепин, В.А. Смирнов // 23 –я Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Вакуумная техника и технология – 2016». - С.36–38.
3. Вашин, С.А. Снижение токов изоляторов отпаянных ЭВП/ С.А. Вашин, Г.Ф. Корепин, Д.Н. Петрашева, В.Г. Карпенко, Н.Р. Чуйкин // 25-я Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Вакуумная техника и технология – 2018». - С.16-19.
4. Вашин, С.А. Методика высоковольтной тренировки отпаянных ЭВП СВЧ/С.А. Вашин, В.А. Смирнов, Д.А. Оселков, И.Ю. Шишов// Труды 28-ой научно-технической конференции с международным участием «Вакуумная техника и технологии-2021» - С.11-15.