

Экз.№

На правах рукописи

**КОРЕПИН Геннадий Федосиевич**

УДК.621.385.02

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗСОДЕРЖАНИЯ ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫХ  
ПРИБОРОВ СВЧ СРЕДНЕГО И ВЫСОКОГО УРОВНЯ МОЩНОСТИ  
С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ ГАЗОВ  
И СОХРАНЕНИЯ ВАКУУМА В ОТПАЯННЫХ ПРИБОРАХ**

**Специальность 05.27.02**

**«Вакуумная и плазменная электроника»**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

г. Фрязино 2012 г.

Диссертация выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Научно-производственное предприятие «Исток», г. Фрязино Московской области

Научный консультант: доктор технических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник ФГУП «НПП «Исток»  
Новоселец Виктор Исидорович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, генеральный директор научно-производственной фирмы «Аргонавт – Темп» при ФГУП «НИИВТ имени С.А. Векшинского»

Курбатов Олег Константинович

кандидат технических наук, старший научный сотрудник, начальник лаборатории ФГУП «НПП «Исток»

Джуринский Кива Борисович

Ведущая организация: ЗАО «Светлана Электронприбор»  
г. Санкт-Петербург

Защита состоится 19 июня 2012 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 409.001.01 при ФГУП «НПП «Исток» по адресу: 141120, г. Фрязино Московской обл., ул. Вокзальная, 2а, Большой конференцзал

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП «НПП «Исток»  
Автореферат разослан мая 2012 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

кандидат физико-математических наук

Погорелова Э.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Развитие науки и техники в настоящее время требует разработки и производства ЭВП СВЧ среднего и высокого уровня мощности, в которых применяются многолучевые потоки электронов.

Характерной особенностью конструкции современных мощных многолучевых клистронов (МЛК) является наличие большого количества узких пролетных каналов и соответствующих мощных электронных пушек. Такая конструкция ЭВП создает трудности эвакуации газа через узкие пролетные каналы и проблему обработки пушек из-за большой мощности подогревателя катода. Кроме того, повышенный уровень адсорбированных газов на поверхностях электродов приводит к росту вероятности возникновения электрических пробоев между электродами, что недопустимо в работе радиолокационных станций (РЛС) или ускорителей заряженных частиц.

Применение в производстве МЛК традиционной технологии откачки однолучевых клистронов не обеспечивает достаточного уровня обезгаживания приборов и требует разработки новых подходов к технологическому процессу откачки. Аналогичные проблемы возникают и в производстве ламп бегущей волны (ЛБВ) и атомно-лучевых трубок (АЛТ).

Одной из причин является недостаточный уровень знаний физико-химических процессов с участием поверхностных газов и газов в вакуумном объеме ЭВП.

Формирование газовой среды ЭВП не заканчивается процессом откачки, а продолжается и после нее. Состав этой среды зависит от последующих технологических операций: проверки прибора на герметичность, предварительной высоковольтной тренировки, настройки, динамической тренировки и стабилизации параметров. Газовая среда отпаянных ЭВП изменяется и определяется, прежде всего, количеством и составом адсорбированных поверхностных газов.

Важной составляющей формирования газовой среды отпаянных ЭВП является газ, оказавшийся в приборе в результате натекания. Поиск места течи

представляет собой значительную трудность. Ограничение, прежде всего, связано с недостаточной чувствительностью течеискателей. Натекшие приборы после обнаружения в них места течи могут быть герметизированы. До постановки работы не было точных критериев, удостоверяющих условия герметизации течей, отсутствовали также данные о влиянии герметизации на работу ЭВП.

Таким образом, диссертация по совершенствованию технологии получения, сохранения и контроля вакуумных условий работы ЭВП СВЧ среднего и высокого уровня мощности является **актуальной**.

**Целью диссертационной работы** является снижение давления остаточных газов и уменьшение газовыделений приборов, сохранение вакуума на основе исследования физических механизмов формирования газосодержания приборов и создание по результатам исследования научно обоснованной методики по разработке технологического процесса откачки ЭВП СВЧ среднего и высокого уровня мощностей.

**Основные задачи исследований:**

- исследование действующих технологических процессов откачки различных типов ЭВП (клизтроны, магнетроны, ЛБВ, АЛТ);
- исследование газовыделения отпаянных ЭВП в процессе высоковольтной тренировки, настройки ЭВП и при термической активации газовыделения;
- определение причин аномального повышения давления остаточного газа отпаянных ЭВП и возможности снижения этого давления;
- расчет и выбор режима течения газа в процессе откачки прибора, в том числе во время подъема температуры и выдержки при температуре обезгаживания;
- исследование процессов течеискания и герметизации течей отпаянных ЭВП и определение условия их герметизации;
- разработка конструкции встроенного в ЭВП магнитного электроразрядного насоса (МЭН), исключающего появление аргонной нестабильности.

### **Научная новизна работы:**

1. Расчетным путем обоснована максимально допустимая скорость подъема температуры обезгаживания ЭВП, где критерием выступает величина общего давления газа в области высоковакуумного преобразователя откачного поста. Установлено, что величина давления газа откачиваемого ЭВП определяется не только конструкцией откачного поста, но и геометрией откачиваемого объема ЭВП.

2. Введена оценка качества обезгаживания отпаянного ЭВП, которая заключается в определении количества десорбированных газов с поверхностью вакуумного объема в процессе нагрева отпаянного ЭВП по результатам откачки МЭН. На основе этих измерений рассчитывается количество адсорбированного газа и его поверхностная концентрация.

3. Определено минимально необходимое время обезгаживания ЭВП в диапазоне температур 400...550°C.

4. Проведена классификация течей ЭВП. Разработаны методы оптимизации поиска течей.

5. Исследованы причины, снижающие чувствительность течеискателя отпаянных ЭВП и показаны возможности устранения этих причин. Исследована природа широкого диапазона динамической чувствительности течеискания отпаянных ЭВП.

6. Исследованы необходимые и достаточные условия герметизации течей ЭВП. Определена максимальная величина герметизируемой течи.

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

1. Максимально допустимая скорость подъема температуры обезгаживания ЭВП определяется необходимостью достижения режима молекулярного течения газа в элементах конструкции ЭВП для создания одинаковых условий термовакуумной обработки элементов на всех этапах обезгаживания.

2. Минимально необходимое время обезгаживания ( $t_{\text{обезг}}$ , ч) ЭВП СВЧ среднего и высокого уровня мощности в диапазоне температур 673...823 (Т, К) определяется по формуле:  $t_{\text{обезг}}=10^{3,117-0,00288T}$

3. Показателем эффективности обезгаживания ЭВП является количество газа, поглощенного МЭН в процессе нагрева отпаянного ЭВП при температуре  $140 \pm 20^\circ\text{C}$  в течение  $4 \pm 1$  ч.

4. Для предотвращения недопустимого газовыделения при высоковольтной тренировке отпаянного ЭВП СВЧ температура обезгаживания прибора перед обработкой катода снижается относительно  $500^\circ\text{C}$  на величину:

$$\Delta T = 700(P - 0,23),$$

где  $P$ ,  $\text{Вт}/\text{см}^2$  – удельная мощность, рассеиваемая внешними поверхностями пушки при нагреве катода.

**Достоверность научных результатов** и обоснованность научных положений подтверждается хорошим совпадением расчетов по процессам откачки ЭВП, поиска и герметизации течей с результатами их экспериментальных исследований, получением воспроизводимых результатов при использовании различной аппаратуры и методов исследования, опыта работы и применением технологических процессов при изготовлении ЭВП.

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

Разработана методика по определению оптимальных режимов откачки и обезгаживания ЭВП различных типов. Внедрена в производство новая технология откачки более 30 типов ЭВП (клистроны, ЛБВ, магнетроны, АЛТ).

Установлено, что течи ЭВП более чем  $2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{Па}\cdot\text{с}$ , не подлежат герметизации. Классификация течей и разработанные на ее основе рекомендации по поиску течей позволили ускорить процесс анализа натекающих ЭВП.

Предложены два способа реставрации мощных ЭВП. Один из них обеспечил регенерацию ЭВП, основой которой является выбор режима обезгаживания и обработки катодов по динамике газовыделения. Во втором применены губчатые оксидно-никелевые катоды, которые повысили качественные характеристики ЭВП после их реставрации, так как они имеют большой запас активного вещества и устойчивее к ионной бомбардировке.

Разработаны конструкции электроразрядных насосов диодного (ДМЭН)

и полумагнетронного типов (ПМЭН) с различной быстротой действия. ПМЭН с быстротой действия  $0,001 \text{ м}^3/\text{с}$  используется в ЭВП СВЧ. Для ДМЭН, применяемого в АЛТ, используемой в аппаратуре системы ГЛОНАСС, при неизменных габаритах и весе повышена быстрота действия в 1,6 раза.

**Апробация работы.** Практические результаты работы и основные теоретические выводы доложены и обсуждены на 7 научно технических семинарах и 6 научно технических конференциях, в том числе 1 международной, 1 международной научно-практической конференции. По теме диссертации опубликовано 9 статей в журналах, входящих в перечень ВАК, получено 4 патента на изобретения.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы. Материал изложен на 147 страницах машинописного текста, содержит 68 рисунков и 19 таблиц, а также титульный лист, оглавление на 3 страницах, список литературы на 14 страницах (148 наименований).

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** приведены результаты анализа требований, предъявляемых к ЭВП СВЧ среднего и высокого уровня мощности. На основе литературных данных дан анализ состояния проблемы газосодержания отпаянных ЭВП. Показана динамика формирования газосодержания ЭВП, которая зависит как от процесса откачки, так и от применяемых технологических процессов после откачки. Обозначены проблемы аргонной нестабильности низкой быстроты действия ДМЭН по аргону. С привлечением этого анализа обоснован выбор темы диссертации, определены цели работы, отмечены научная новизна и практическая ценность исследований, приведены научные положения, выносимые на защиту.

В **главе 1** рассмотрены основные принципы откачки. В частности показано, что в процессе откачки и обезгаживания ЭВП не всегда выполняются условия, обеспечивающие молекулярное течение газа, что приводит к неоди-

наковой степени обезгаживания различных частей ЭВП и к газовыделению отпаянного ЭВП.

Рассмотрены различные способы обезгаживания материалов ЭВП. Доказано, что температура обезгаживания ограничена необходимостью сохранения высоких изоляционных свойств керамических изоляторов ЭВП и обеспечения эмиссионной способности катода. Обсуждена сущность противоречий по длительности обезгаживания ЭВП.

Отмечено также, что ионно-плазменная очистка и электронная обработка имеют ряд ограничений: недоступность обработки всех поверхностей в силу ограниченности проникновения разряда или потока электронов в разные области объема ЭВП, напыления пленок металла на изоляторы, возникновение устойчивых полупроводниковых пленок, снижение эмиссионной способности катодов.

Дан качественный анализ процессов и условий обезгаживания материалов ЭВП при наличии потока конкурирующего газа. Определены требования к конкурирующему газу и условия его применения. Приведены данные об интенсификации процессов восстановления окислов металлов атомарным водородом по сравнению с молекулярным.

Приведены способы снижения давления газов отпаянных ЭВП, которые охватывают процессы от течеискания и откачки до настройки и рассмотрены требования к средствам откачки. Использование МЭН ЭВП позволяет не только снизить давление остаточных газов в приборе, но и уменьшить вероятность возникновения электрических пробоев.

Уточнены причины возникновения пробоев, связанных с вакуумными условиями ЭВП: окисление поверхностей электродов, повышенное поверхностное газосодержание, поверхностные пленки органического происхождения, источники газовыделения или натекания объема ЭВП, повышающие давление газов.

Отпаянный ЭВП рассматривается как динамическая система формиро-



вания его газосодержания. Динамика процессов изменения газосодержания зависит от величин электрических и магнитных полей ЭВП, быстроты изменения температуры конструктивных элементов прибора. При откачке ЭВП на откачном посту происходит взаимное влияние вакуумной системы и откачиваемого ЭВП. Действие этой динамической системы ограничено периодом откачки. Сделан вывод о необходимости применения безмасляных средств откачки с целью снижения давления углеводородов. Показано, что вакуумные условия откачки могут быть лишь частично управляемыми в силу динамического характера складывающегося сорбционного равновесия неразрывной системы ЭВП и откачного поста.

В конце главы приведены выводы о необходимости расчетно-теоретического обоснования этапов технологического процесса откачки и обезгаживания ЭВП и практической их проверки.

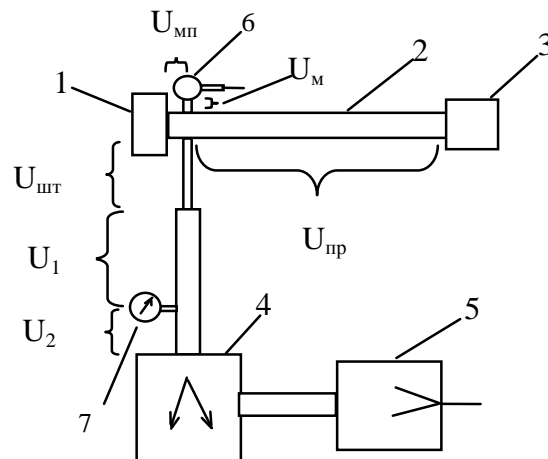
В **главе 2** рассмотрены расчет и управление процессом откачки, которые являются результатом исследований, проведенных в главе 1. Соблюдение режима молекулярного течения газа может контролироваться по преобразователю давления откачного поста с учетом возможности расчета давления в любом конструктивном элементе ЭВП (рис.1). Давление газа откачиваемого ЭВП рассчитывается по формуле:

$$P_{np} = P_{\delta} \frac{S_{\delta}}{S_{np}}, \text{ где } \frac{1}{S_{np}} = \frac{1}{S_{\delta}} + \frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_{um}}, \quad S_{\delta} = \frac{S_n U_2}{S_n + U_2},$$

где  $P_{np}$ , Па – давление в приборе у штенгеля,  $P_{\delta}$ , Па – давление в области преобразователя давления 7,  $S_{np}$  и  $S_{\delta}$ , м<sup>3</sup>/с соответственно быстрота откачки прибора в месте присоединения штенгеля и в области преобразователя 7, проводимости  $U_i$ , м<sup>3</sup>/с – показаны на рис.1.

Величины проводимостей рассчитываются по известным формулам вакуумной техники для разных конструктивных решений трубопроводов и их соединений в режиме молекулярного течения газа. Давление  $P_{кол}$ , соответствующее режиму молекулярного течения газа в коллекторе диаметром  $d$ , м, как наиболее удаленной от штенгеля части ЭВП, определяется по формуле:

$$P_{кол} = P_{\delta} \frac{S_{\delta}}{S_{кол}} \leq \frac{0,02}{d_{кол}}, \text{ где, } \frac{1}{S_{кол}} = \frac{1}{S_{\delta}} + \frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_{шт}} + \frac{1}{U_{пр}}, P_{\delta} \leq \frac{S_{кол}}{S_{\delta}} \frac{0,02}{d_{кол}},$$



**Рис.1. Упрощенная вакуумная схема откачного поста и откачиваемого прибора**

1 – пушка; 2 – замедляющая система; 3 – коллектор; 4 – высоковакуумный насос; 5 – форвакуумный насос; 6 – МЭН; 7 – преобразователь.

Проводимости:  $U_{шт}$  – штенгеля;  $U_{мп}$  – прибор - пушка;  $U_{м}$  – прибор - МЭН;  $U_{пр}$  – штенгель - коллектор;  $U_1$  – штенгель - преобразователь;  $U_2$  – преобразователь - насос откачного поста

Вычислив давление  $P_{кол}$ , находим давление  $P_{\delta}$  в области преобразователя давления 7. Давление газа, измеряемое преобразователем 7, отличается от давления газа обезгаживаемого ЭВП в силу явления температурной транспирации. Показано, что при повышении температуры давление газа ЭВП возрастает медленнее, чем длина свободного пути молекул газа, что позволяет при контроле давления газа преобразователем 7 не учитывать явление температурной транспирации.

Расчеты показали, что отношения давлений между коллектором ЭВП СВЧ различных типов и преобразователем откачного поста составляют  $10^2 \dots 10^5$  раз. Из расчетов следует, что технологический режим откачки ЭВП зависит от быстроты действия высоковакуумного насоса, проводимостей элементов вакуумной системы откачного поста и ЭВП, места расположения преобразователя, и является индивидуальным для конкретной пары ЭВП – откачной пост.

Показано, что критерием достаточности обезгаживания ЭВП и его отдельных частей является достижение состояния неизменности потока газа.

При контроле достаточности обезгаживания КПУ мощного ЭВП на откачном посту обнаружено явление кратковременного аномального повышения давления газа при резком выключении цепи накала катода на ранних этапах обезгаживания КПУ. Явление объяснено действием двух откачивающих средств: насоса откачного поста и потока активного вещества катода. Прекращение потока активного вещества вызывает кратковременный рост давления газа за счет газовыделения медленно остывающих деталей пушки.

Установлено, что вероятность возникновения электрических пробоев возрастает при увеличении концентрации газа на поверхностях электродов. Обоснована и приведена методика измерения количества газов, адсорбированных на поверхностях вакуумного объема ЭВП. Количество термически десорбированного газа может быть определено прогревом отпаянного ЭВП и откачкой выделившегося газа встроенным МЭН согласно формуле:

$$N = \frac{k_0 S}{kT} \int_{t_1}^{t_2} I dt$$

где  $k_0$ , Па/А коэффициент пропорциональности между током МЭН и давлением;  $I$ , А – ток МЭН;  $T$ , К – температура;  $k=1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана;  $t_1$  и  $t_2$ , с – время начала и окончания обезгаживания ЭВП;  $S$ , м<sup>3</sup>/с – быстрота откачки МЭН. Так как давление газа и ток МЭН связаны прямо пропорциональной зависимостью, то на практике проводится графическое интегрирование кривой откачки МЭН и определяться количество адсорбированного газа.

Процесс обезгаживания ЭВП предложено рассматривать по упрощенной математической модели газовыделения. Она сводится к существованию ряда известных механизмов газовыделения, энергия активации которых отличаются столь заметно, что может быть заметна смена одного механизма другим по изменению давления газа, фиксируемого высоковакуумным преобразователем откачного поста.

Так как известно, что поток выделяющегося газа для каждого механизма газовыделения определяется формулой:

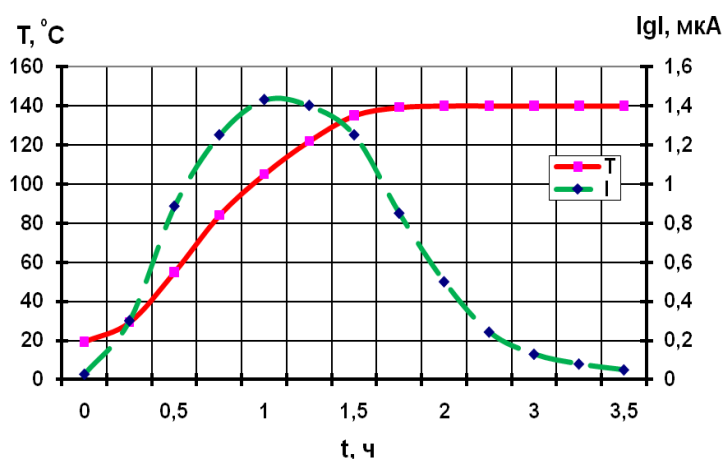
$$Q = PS = a_i t^{k_i}, \text{ то } \lg P = \lg a_i - \lg S + k_i \lg t = B + k_i \lg t,$$

где  $P$  – давление;  $S$  – быстрота откачки в месте измерения давления;  $t$  – время;  $a_i$ ,  $k_i$  и  $B$  – постоянные коэффициенты. Тогда зависимость  $\lg P = F(\lg t)$  для каждого механизма газовыделения представляет собой прямую линию, если фоновые потоки, к которым относятся газы из вакуумной системы, из мест натеканий и газы других механизмов, возникающих при нагреве ЭВП, существенно меньше основного.

Смена одного механизма газовыделения другим фиксируется в момент времени, при котором происходит изменение наклона графика  $\lg P = F(\lg t)$ . Поэтому существует смена двух таких механизмов газовыделения, которая соответствует достаточному времени обезгаживания ЭВП.

**Глава 3** посвящена исследованиям эффективности процесса откачки на разных этапах технологического процесса, проверке расчетов главы 2 и является основой для разработки технологических процессов откачки.

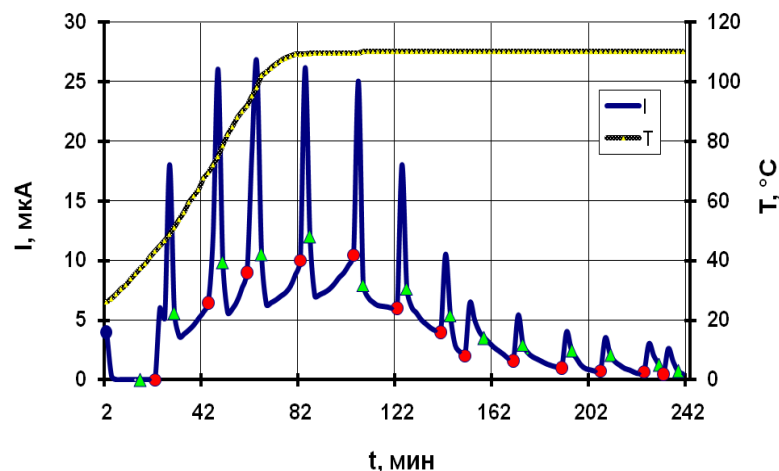
Приведены данные исследований газовыделения ЭВП в различных режимах: с непрерывным нагревом отпаянного ЭВП (рис.2); с циклическим нагревом КПУ; с циклическим нагревом КПУ и одновременным нагревом ЭВП (рис.3).



**Рис.2.** Изменение температуры ЭВП и тока МЭН в процессе нагрева

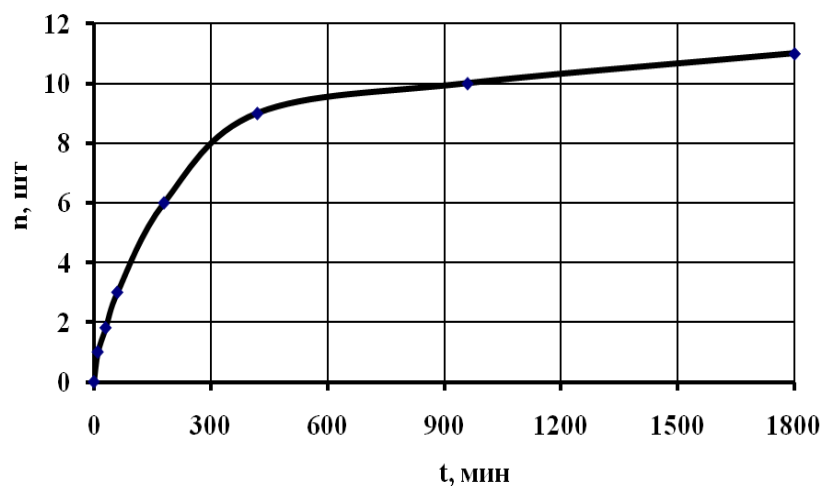
Из этих исследований сделаны практические выводы. Отключение МЭН должно проводиться после остывания электронной пушки во избежание по-

вышенной сорбции газа горячим КПУ. Периодическое включение накала катода при работающем МЭН приводит к улучшению вакуума ЭВП вследствие переноса газов на КПУ при выключенном накале катода, и к ускорению сорбции этого газа в МЭН при включенном накале катода.



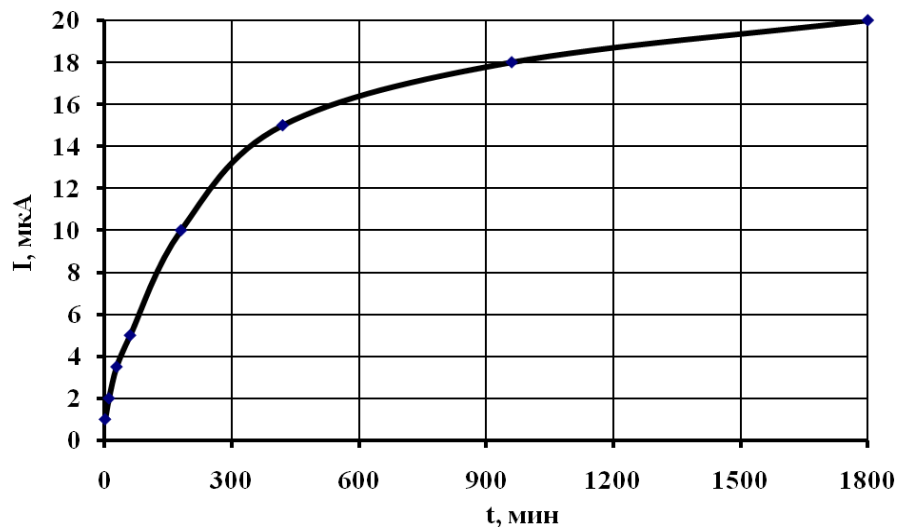
**Рис.3. Изменение температуры ЭВП и тока МЭН при циклическом включении накала катода**

Исследована эффективность процесса обезгаживания ЭВП во время проведения высоковольтной тренировки. Показано, что вероятность возникновения пробоев зависит от концентрации поверхностных газов на электродах ЭВП, что следует из совместного рассмотрения рис.4 и 5.



**Рис.4. Изменение количества пробоев при подаче максимального напряжения тренировки промежутка сетка - анод от времени выдержки прибора без напряжения**

Экспериментально подтвержден вывод о том, что обезгаживание поверхности сетки или другого электрода в процессе откачки ЭВП приводит



**Рис.5. Изменение тока МЭН в процессе тренировки ЭВП при подаче максимального напряжения тренировки промежутка сетка - анод от времени выдержки прибора без напряжения**

лишь к временному снижению вероятности возникновения пробоев из-за действия миграции газа ЭВП, так как поверхность отдельно обезгаживаемого электрода много меньше поверхности всего прибора.

Исследована зависимость частоты пробоев от давления газов отпаянного ЭВП. Показано, что с ростом давления газа частота пробоев увеличивается.

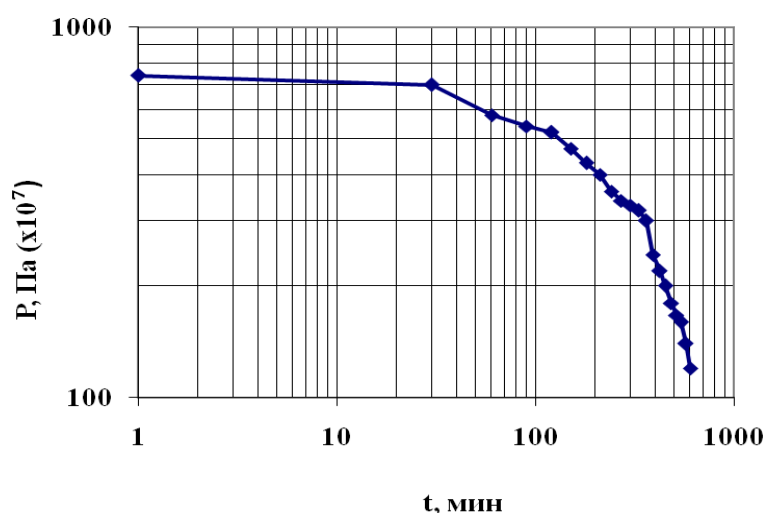
Исследование влияния температуры обезгаживания ЭВП на качество обезгаживания пушки показало, что количество выделяющегося газа в процессе высоковольтной тренировки зависит от удельной мощности нагрева пушки, потребляемой от источника накала катода. По результатам исследования сделан практический вывод. Любое увеличение в номинальном режиме температуры пушки свыше  $110^{\circ}\text{C}$ , что соответствует удельной мощности, рассеиваемой внешними поверхностями пушки  $0,23 \text{ Вт/см}^2$ , должно быть скомпенсировано снижением температуры прибора во время обработки катода относительно температуры обезгаживаемого ЭВП, равной  $500^{\circ}\text{C}$ .

Исследование газовыделения пушки и коллектора МЛК в динамическом режиме показало, что интенсивность газовыделения этих элементов зависит от изменения режима питания и, как следствие, от динамики изменения места оседания электронного потока. Практический вывод данного исследования со-

стоит в том, что уменьшение времени тренировки прибора обеспечивается снижением поверхностной концентрации газа, а снижение вероятности пробоев медленным вводом ЭВП в рабочий режим.

Исследовано влияние водородной среды, применяемой в процессе откачки ЭВП, на величину давления остаточных газов. Сделано два практических вывода: для уменьшения давления газа отпаянного ЭВП давление водорода в процессе его длительного обезгаживания должно быть не более  $1,33 \cdot 10^{-3}$  Па; выбором режима потока водорода в процессе откачки можно управлять парциальным давлением водорода отпаянного ЭВП в пределах одного порядка.

Смена нескольких механизмов газовыделения в процессе обезгаживания ЭВП подтверждена практически (рис.6). Установлено, что необходимое время обезгаживания ЭВП зависит от температуры: при  $400^{\circ}\text{C}$  – 15 часов, при  $450^{\circ}\text{C}$  – 11 часов, при  $500^{\circ}\text{C}$  – 8 часов, при  $550^{\circ}\text{C}$  – 6 часов. По этим данным выведена формула необходимого времени обезгаживания ЭВП для любой другой температуры:  $t_{\text{обезг}} = 10^{3,117 - 0,00288T}$ , где  $t_{\text{обезг}}$ , ч.;  $T$ , К диапазона температур от 673 до 823 градусов.



**Рис.6. Изменение давления в вакуумной системе откачного поста при температуре обезгаживания ЭВП  $450^{\circ}\text{C}$**

В главе 4 рассмотрены вопросы практического применения проведенных исследований. Определены основные характеристики технологического

процесса откачки:

- время подъема температуры и обезгаживания ЭВП и его КПУ в режиме молекулярного течения газа, которое обеспечивается предварительно вычисленным предельно допустимым давлением газа, фиксируемым преобразователем;

- ступенчатый режим подъема температуры обезгаживания, с выдержками при температурах  $140\pm 10^{\circ}\text{C}$ ,  $280\pm 10^{\circ}\text{C}$ ,  $350\pm 10^{\circ}\text{C}$ ;

- время обезгаживания ЭВП, которое определяется в зависимости от выбранной температуры обезгаживания;

- температура ЭВП при нагреве катода определяется в зависимости от удельной мощности, рассеиваемой внешними поверхностями пушки. Если она превышает  $0,25 \text{ Вт/см}^2$ , соответственно должна быть снижена температура обезгаживания;

- время нагрева катода, которое должно быть таким, чтобы были завершены физико-химические процессы, ответственные за основное газовыделение катода и его эмиссионные способности, и обеспечено эффективное удаление газа с поверхностей пушки и объема ЭВП (до 12 часов для мощных ЭВП и до 4...8 часов для ЭВП среднего уровня мощности);

- снижение температуры обезгаживания следует проводить с нагревом катода до температуры  $220...250^{\circ}\text{C}$ ;

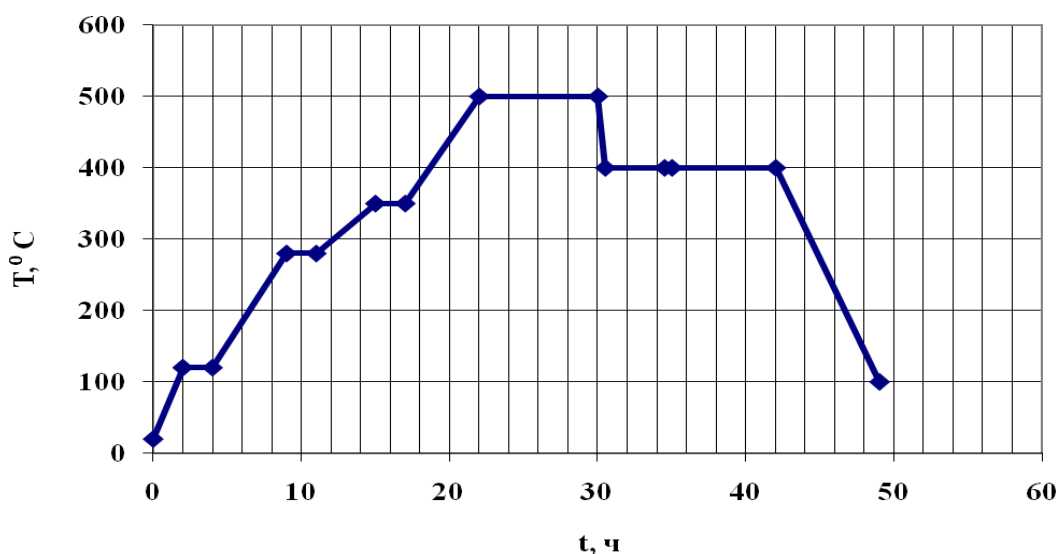
- после снижения температуры ЭВП проводится активирование катода в режиме отбора тока, затем отпайка и при необходимости течеискание отпаянного ЭВП, где в качестве преобразователя давления применяется МЭН.

Типичный температурный режим обезгаживания ЭВП высокого уровня мощности приведен на рис.7, который характерен для мощных клистронов типа КФ-3-1К, «Атлант» и других приборов.

Приведено обоснование каждого этапа процесса откачки и сравнение результатов предварительной высоковольтной тренировки ЭВП, откачанных по разным режимам. Установлено, что внедрение в производство разработанного режима откачки снизило время высоковольтной тренировки в 3...4 раза,



а газовыделение – более чем на порядок.



**Рис.7. Изменение температуры ЭВП в процессе его обезгаживания (откачка до t=35 часов проводится с потоком водорода при  $P=1,33 \cdot 10^{-3}$  Па)**

Измерения парциальных давлений показали, что при использовании безмасляных средств откачки количество парциальных составляющих снижается (в спектре газов отсутствуют углеводороды на уровне выше  $10^{-12}$  Па).

Рассмотрены проблемы течеискания отпаянных ЭВП. Установлены причины, ограничивающие чувствительность течеискателя, которые в основном связаны с режимом питания, возможностями измерения малых токов, особенностями конструкции ЭВП и недостатками МЭН. На основе полученных данных сформулированы требования к течеискателю, который был спроектирован и изготовлен (рис8).

Проведен анализ герметизации течей. Показаны необходимые и достаточные условия герметизации, сформулированы требования к герметику и герметизируемым материалам, определена величина течи, герметизация которой может быть опасной из-за возможности проникновения герметика в объем ЭВП.

Разработанный ПМЭН (рис.9) представляет собой комбинацию двух насосов: диодного и магнетронного типов. Определено, что оптимальное значение индукции магнитного поля ПМЭН превышает индукцию ДМЭН



**Рис.8.Течеискатель отпаянных ЭВП**

почти в два раза. Быстрота откачки ПМЭН больше чем ДМЭН при одинаковых размерах разрядных ячеек. ПМЭН свободен от такого недостатка ДМЭН, как аргонная нестабильность и низкая быстрота откачки аргона, что обеспечено магнетронной частью насоса и усилено частичным применением тантала в катодах.



**Рис.9. Насос полуманетронного типа с быстротой откачки  $0,001 \text{ м}^3/\text{с}$  (без магнитной системы)**

В **Заключении** подведены итоги диссертационной работы. Основные научные и практические результаты заключаются в следующем.

1. Разработана методика построения оптимального технологического процесса откачки и обезгаживания ЭВП высокого и среднего уровня мощности, что позволило снизить поверхностное газосодержание в 20...50 раз.

2. Установлено что быстрота подъема температуры обезгаживания ЭВП ограничивается необходимостью создания одинаковых условий обезгаживания всех конструктивных элементов ЭВП и определяется необходимостью обеспечения режима молекулярного течения газа во всех элементах конструкции ЭВП на всех этапах обезгаживания.

3. Доказано упрощенным расчетом и подтверждено практическими ис-

следованиями, что в процессе обезгаживания ЭВП по динамике изменения давления газа может быть установлена последовательная смена известных механизмов газовыделения. На основании исследования смены механизмов определено минимально необходимое время обезгаживания в диапазоне температур 400...550°C. Доказано, что время смены механизмов газовыделения зависит от свойств материалов и качества подготовки прибора к процессу откачки, что требует увеличения необходимого времени обезгаживания ЭВП в 1,5 раза относительно средней величины критического времени, соответствующего времени перехода механизмов газовыделения.

4. Доказано экспериментально, что удельная мощность величиной не более 0.23 Вт/см<sup>2</sup>, рассеиваемая внешними поверхностями пушки от накаливающей цепи подогревателя при термовакуумной обработке катода в процессе высокотемпературного обезгаживания прибора, которая соответствует температуре внешних поверхностей пушки не выше 110°C, не приводит к повышенному газовыделению в процессе тренировки прибора, если максимальная температура обезгаживания ЭВП не превышает 500°C.

5. Установлено, что при использовании активных конкурирующих газов, облегчающих процесс откачки ЭВП, в частности водорода, необходимо учитывать физико-химические процессы, происходящие не только в приборе, но и в средствах откачки и вакуумной системы откачного поста. Определена максимальная величина давления водорода при обезгаживании прибора ( $1,33 \cdot 10^{-3}$  Па), при котором не происходит повышение давления остаточных газов отпаянного ЭВП.

6. Обоснована расчетом и доказана практическая целесообразность оценки поверхностного содержания газов вакуумного объема ЭВП нагревом отпаянного ЭВП при температуре  $140 \pm 20^\circ\text{C}$  в течение  $4 \pm 1$  часов измерениями количества этих газов с помощью встроенного МЭН. Результаты измерений определяют эффективность процесса откачки и качество обезгаживания ЭВП.

7. Разработана классификация течей отпаянных ЭВП и методика их поиска, что позволило снизить в 1,5...2 раза время течеискания.

8. Исследованы и показаны условия и пути повышения чувствительности течеискателей отпаянных ЭВП на основе встроенных МЭН. Спроектирован и изготовлен течеискатель отпаянных ЭВП на современной элементной базе, имеющий чувствительность  $3 \cdot 10^{-12}$  м<sup>3</sup>Па/с в режиме поиска течи методом обдува пробным газом.

9. Впервые разработан и внедрен в производство отечественный магнитный электроразрядный насос полумагнетронного типа с быстротой действия 0,001 м<sup>3</sup>/с. В 1,6 раза увеличена быстрота действия МЭН АЛТ при неизменных габаритах и массе.

10. Доказано расчетом и показано практически, что герметизация течей, больших  $2 \cdot 10^{-7}$  м<sup>3</sup>Па/с, не гарантирует отсутствие проникновения герметика в вакуумный объем ЭВП через канал течи. Сформулированы требования к разработке новых герметиков в зависимости от областей их применения.

11. На основе результатов исследования разработаны эффективные технологические процессы совмещенного обезгаживания КПУ и оболочки ЭВП, как в атмосфере водорода, так и без него. К таким ЭВП относятся, как приборы серийно изготавливаемые, так и на стадии их проектирования (более 30 типов).

#### **Публикации по теме диссертации**

1. Корепин Г.Ф. Простой способ отбраковки натекающих и “газных” ЭВП // Электронная техника. Сер.1. СВЧ - техника.– 1999. – № 2. – С. 42 – 43.
2. Корепин Г.Ф., Полевич А.И. Динамика коэффициента компрессии форвакуумного насоса по водороду // Вакуумная техника и технология. – 2004. – Т. 14, № 3. – С. 139 – 147.
3. Корепин Г.Ф., Пугнин В.И., Юнаков А.Н. Определение источника газовой выделения в процессе высоковольтной тренировки ЭВП // Научно-технические проблемы – 2005. – Т.6, № 5. – С. 47 – 50.
4. Корепин Г.Ф. Критическое время обезгаживания ЭВП СВЧ // Вакуумная техника и технология. – 2007. – Т.17, № 3. – С. 167 – 175.

5. Корепин Г.Ф. Термовакuumная обработка электронной пушки и вероятность электрических пробоев высоковольтных ЭВП // Вакуумная техника и технология. – 2007. – Т.17, № 2. – С. 123 – 130.
6. Корепин Г.Ф. Поверхностное газосодержание отпаянных ЭВП // Вакуумная техника и технология. – 2007. – Т.17, № 4. – С. 285 – 292.
7. Корепин Г.Ф. Возможность масс-спектрометрии поверхностных газов высоковольтных ЭВП без масс-спектрометра // Вакуумная техника и технология. – 2008. – Т.18, №2. – С. 141 – 148.
8. Корепин Г.Ф. Проблемы откачки металлокерамических ЭВП СВЧ // Электронная техника. Сер.1. СВЧ - техника.– 2008. – № 4. – С. 23 – 46.
9. Корепин Г.Ф, Юнаков А.Н. Стоки и истоки поверхностных газов отпаянных ЭВП // Вакуумная техника и технология. – 2010. – Т.20, №2. – С. 71 – 76.
10. Корепин Г.Ф., Котюргин Е.А., Полевич А.И. Повышение чувствительности поиска течей отпаянных ЭВП СВЧ // тезисы докладов научно-технического семинара “Контроль герметичности-2001” – Санкт-Петербург. – 2001. – С. 10 – 11.
11. Корепин Г.Ф. Способ повышения вакуума и исследование процессов сорбции и десорбции газов в отпаянных ЭВП СВЧ // тезисы докладов 10<sup>ой</sup> международной научно-технической конференции “Состояние и перспективы развития вакуумной техники”. – Казань. – 2001. С. 63 – 64.
12. Водяницкий В.И., Корепин Г.Ф., Климова Н.Н., Суходолова Н.И., Стефаненко А.А. Предварительная высоковольтная тренировка ЭВП СВЧ среднего уровня выходной мощности // тезисы докладов Всероссийского семинара “Вакуумная техника и технология-2002” – Санкт-Петербург. – 2002. – С. 14 – 15.
13. Корепин Г.Ф. Особенности контроля герметичности отпаянных ЭВП // тезисы докладов Всероссийского семинара “Вакуумная техника и технология-2002” – Санкт-Петербург. – 2002. – С. 16-17.
14. Корепин Г.Ф., Стефаненко А.А. Классификация течей ЭВП СВЧ // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. Материалы юбилейной научно-технической конференции. – Фрязино. – 2003. – № 1. – часть 1. – С. 45 – 51.

15. Корепин Г.Ф., Н.Н Климова Н.Н. Сытник А.Я. Критическое время обезгаживания ЭВП СВЧ // Вакуумная техника и технология – тезисы докладов Всероссийского семинара “Вакуумная техника и технология-2003” – Санкт-Петербург. 2003. С. 117.
16. Корепин Г.Ф., Котюргин Е.А., Стефаненко А.А. Миниаютюрные магнитные электроразрядные насосы полумагнетронного типа // Вакуумная техника и технология – тезисы докладов Всероссийского семинара “Вакуумная техника и технология-2003” – Санкт-Петербург. – 2003. – С. 117 – 118.
17. Корепин Г.Ф., Киселев А.Б. Моделирование процессов термовакuumной обработки мощных СВЧ приборов с целью повышения их электропрочности. // 4 международная научно-практическая конференция «Участие молодых ученых, инженеров и педагогов в разработке и реализации инновационных технологий». Сборник научных докладов. М.: – 2003. – С. 224 – 232.
18. Корепин Г.Ф., Полевич А.И. Определение причин повышения давления в вакуумной системе в процессе откачки электровакуумных приборов // материалы научно-технического семинара “Вакуумная техника и технология” – Санкт-Петербург. – 2004. – С. 68 –69.
19. Корепин Г.Ф. Условия герметизации течей ЭВП СВЧ // материалы 11-ой научно-технической конференции “Вакуумная наука и техника” – М.: МИЭМ – 2004. – С. 100 – 104.
20. Корепин Г.Ф., Юнаков А.Н. Поверхностное газосодержание и термовакuumная обработка электронной пушки высоковольтных ЭВП // материалы 12-ой научно-технической конференции “Вакуумная наука и техника” – М.: МИЭМ. – 2005. – С. 89 – 93.
21. Корепин Г.Ф. Ограничение чувствительности течеискания отпаянных ЭВП // Вакуумная техника и технология – тезисы докладов Всероссийского семинара “Вакуумная техника и технология 2006” – Санкт-Петербург. – 2006. – Т.16, № 1 – С. 23 – 24.
22. Корепин Г.Ф., Самарцев И.И., Волкова Н.И. Особенности запаздывания

зажигания разряда миниатюрных магнитных электроразрядных насосов // Сборник научных трудов научно-технического семинара “Вакуумная техника и технология-2009”. – Санкт-Петербург. – 2009. – С. 27 – 29.

23. Корепин Г.Ф., Юнаков А.Н. Стоки и истоки поверхностных газов отпаянных ЭВП // Вакуумная техника и технология – тезисы докладов научно-технической конференции “Вакуумная техника и технология-2010” – Санкт-Петербург. – 2010. – Т.20, № 2 – С. 56.

24. Корепин Г.Ф., Киселев А.Б. О применении магнитных электроразрядных насосов // Вакуумная техника и технология – тезисы докладов научно-технической конференции “Вакуумная техника и технология-2011” – Санкт-Петербург. – 2011. – Т.21, № 2 – С. 80 – 82.

25. Бакуменко А.В., Киселев А.Б., Корепин Г.Ф., Морозов О.А., Соколов А.М. Способ реставрации электровакуумных приборов с оксидным катодом // патент РФ № 2243611, зарегистрирован 27.12.2004.

26. Бакуменко А.В., Земчихин Е.М., Киселев А.Б., Корепин Г.Ф., Лопин М.И. Способ реставрации электровакуумных СВЧ-приборов большой мощности // патент РФ № 2244979, зарегистрирован 20.01.2005.

27. Корепин Г.Ф., Киселев А.Б. Способ измерения изменения парциальных давлений газов в мощном электровакуумном приборе // патент РФ № 2306551, зарегистрирован 20.09.2007.

28. Корепин Г.Ф., Корепин С.Г., Малькова Н.В., Жукова Е.П., Прошунина Н.Н., Носова Л.В., Манахов А.И. Способ определения расстояния между электродами вакуумированного электровакуумного прибора (варианты) // патент РФ 2395864, зарегистрирован 22.07.2010.

Подписано в печать 03.05.2012  
Формат 60x80/16. Объем 1 усл.-печ. Лист  
Тираж 50 экз. ризограф ОАО «Исток Аудио Интернэйшнл»