

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

На правах рукописи



Каньшин Илья Александрович

КАРОТАЖНЫЕ ГАЗОНАПОЛНЕННЫЕ НЕЙТРОННЫЕ ТРУБКИ
С ПОВЫШЕННЫМ РЕСУРСОМ

Специальность 1.3.13 – Электрофизика, электрофизические установки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2023

Работа выполнена во ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова»

Научный руководитель: **Прохорович Дмитрий Евгеньевич**
кандидат физико-математических наук, доцент,
начальник научно-исследовательской лаборатории
в составе научно-исследовательского отдела ФГУП
ВНИИА им. Н.Л. Духова

Официальные оппоненты: **Астрелин Виталий Тимофеевич**
кандидат технических наук, старший научный
сотрудник ФГБУН ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск

Лотоцкий Алексей Павлович
доктор физико-математических наук, профессор,
начальник лаборатории ГНЦ РФ «ТРИНИТИ»

Окс Ефим Михайлович
доктор технических наук, профессор
зав. кафедрой физики ФГБОУ ВО «Томский
государственный университет систем управления и
радиоэлектроники» (ТУСУР)

Защита состоится «7» декабря 2023 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета МИФИ.1.06 Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://ds.mephi.ru> Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Отзывы и замечания по автореферату в одном экземпляре, заверенные печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук



М.В. Лалаян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования

В настоящее время существует широкий спектр прикладных задач, требующих использования нейтронной аппаратуры, в частности, каротаж нефтегазовых скважин, для осуществления которого успешно используются нейтронные генераторы (НГ). Постоянная потребность в повышении рабочих характеристик НГ стимулирует решение ряда задач, среди которых актуальной является задача увеличения ресурса каротажных НГ, определяемого сроком службы их базового элемента (излучателя нейтронов) – нейтронной трубки (НТ). В каротажных НГ наряду с вакуумными нейтронными трубками нашли широкое применение газонаполненные нейтронные трубки (ГНТ), представляющие собой малогабаритный линейный ускоритель, состоящий из Пеннинговского плазменного источника (ПИ), ионно-оптической системы (ИОС) извлечения и ускорения ионов изотопов водорода, нейтрон-образующей мишени. Основными параметрами, влияющими на ресурс ГНТ, являются электрическая прочность изделия и стабильность нейтронного потока.

При эксплуатации каротажных ГНТ в течение сотен часов и в условиях температуры окружающей среды $100 \div 130$ °С происходит снижение нейтронного потока. Для его стабилизации и поддержания необходимо увеличивать напряжение, подаваемое на мишень и ускоряющий электрод ИОС ГНТ, до $100 \div 110$ кВ. При таких напряжениях снижается электропрочность изделия, что влечет за собой выход его из строя. Поэтому **актуальной** является задача повышения ресурса газонаполненных нейтронных трубок, работающих в условиях высокой температуры окружающей среды, за счет увеличения электропрочности и стабильности нейтронного потока.

К основным причинам снижения электропрочности ГНТ относятся: образование проводящего слоя и пробой внутренней поверхности изолятора вследствие его запыления, эмиссия электронов из областей ИОС с повышенной локальной напряженностью электрического поля (“тройные”

точки, кромки высоковольтных электродов ИОС, диэлектрические включения и сорбированные газы на поверхности электродов ИОС). Основными причинами нестабильности нейтронного потока являются: десорбция остаточных газов с элементов ГНТ, электрические пробой в ИОС, а также локальный характер токовой нагрузки ускоренного ионного пучка на поверхности нейтрон-образующей мишени, способствующий тому, что её активный слой распыляется, приводя к падению нейтронного потока.

Повышения ресурса каротажных ГНТ можно достичь как путём совершенствования технологии изготовления изделия, так и путём совершенствования его конструкции. Поэтому реализация обоих направлений позволит определить новые научно-конструкторские и научно-технологические решения для повышения ресурса каротажных ГНТ, что является **целью** диссертационной работы. Для достижения цели решались следующие задачи:

- 1) Исследование воздействия ионно-плазменной обработки (ИПО) на электроды и изолятор вакуумного промежутка ИОС;
- 2) Разработка способа измерения эмиттанса корпускулярного потока в ИОС;
- 3) Траекторный анализ корпускулярных потоков в ИОС;
- 4) Исследование влияния корпускулярных потоков и геометрии ИОС на электрическую прочность ГНТ и стабильность нейтронного потока;
- 5) Экспериментальная апробация полученных результатов в конструкции и технологии изготовления ГНТ.

Научная новизна

- Разработан и научно обоснован новый способ измерения эмиттанса корпускулярного потока в ИОС, не требующий контакта диагностических элементов с корпускулярным потоком.
- Впервые экспериментально зафиксирована и научно обоснована зависимость эмиттанса корпускулярного потока от совокупности

геометрических параметров ИОС: диаметра и длины низковольтного электрода, а также величины зазора между низковольтным и высоковольтным электродами.

- Впервые в каротажных ГНТ реализована двухкаскадная система ускорения, разработанная на основе научно обоснованных рекомендаций, полученных по результатам расчетов электрических и магнитных полей, а также траекторного анализа корпускулярных потоков в ИОС.
- Научно обоснованы и экспериментально определены режимы процесса ионно-плазменной обработки узлов ИОС ГНТ, базирующиеся на результатах модельных расчетов зависимостей ионного тока от напряжения разряда и давления газа.

Практическая значимость работы

- Разработан способ измерения эмиттанса не возмущающим пучок бесконтактным методом, который может применяться в отпаянных трубках.
- Разработан способ моделирования динамики корпускулярных потоков в ИОС ГНТ, который может быть применён к электровакуумным приборам (ЭВП), содержащим плазменный источник и ускоряющую систему.
- Техническое решение увеличения электрической прочности ИОС ГНТ за счет секционирования изолятора и введения в его конструкцию градиентных экранов может быть использовано при проектировании ускоряющих систем других ЭВП.
- Ионно-плазменная обработка электродов и изолятора ИОС может быть распространена на весь класс каротажных нейтронных трубок с целью повышения их электропрочности и стабильности работы при повышенной температуре окружающей среды.

Положения, выносимые на защиту

- 1) Технологическое решение повышения электрической прочности ГНТ за счет применения ионно-плазменной обработки электродов и изолятора ИОС, что позволяет снизить на два порядка мощность дозы рентгеновского

излучения в ИОС, приводящую к появлению высоковольтных сбоев и деградации изолятора ГНТ, и величину давления остаточных газов в ГНТ при повышенной температуре окружающей среды.

2) Оптический метод измерения эмиттанса пучка заряженных частиц в газонаполненных нейтронных трубках, отличающийся тем, что позволяет проводить измерения указанной величины бесконтактным способом, не требующим демонтажа изделия.

3) Способ траекторного анализа корпускулярных потоков, основанный на сочетании физического эксперимента по изучению влияния геометрических параметров ИОС на эмиттанс экстрагируемого пучка ионов и последующего численного моделирования динамики корпускулярных потоков в ИОС ГНТ с использованием экспериментально найденного эмиттанса.

4) Техническое решение повышения стабильности нейтронного потока и электропрочности ГНТ за счет изменения формы электродов ИОС и введения в её конструкцию градиентных электродов, что обеспечивает устранение пиков локальной напряженности электрического поля в ИОС, её стойкость к воздействию запыления и увеличение ресурса ГНТ в 2 раза.

Достоверность результатов, полученных в диссертационной работе, подтверждается систематическим характером выполненных исследований и большой статистикой измерений, совпадением полученных экспериментальных данных с результатами имеющихся модельных представлений и численных расчетов.

Апробация работы

Основные результаты диссертации были представлены на 17 профильных конференциях: IX Конференция «Современные средства диагностики плазмы и их применение», г. Москва; «Научная сессия НИЯУ МИФИ – 2015», Москва; «IX, XI - XIV Научно – техническая конференция ВНИИА (2015, 2017, 2018, 2019, 2020)», г. Москва; 14 – ая научно-технической конференция «Молодёжь в науке», г. Саров; XI отраслевая научно-техническая конференция молодых специалистов Госкорпорации «Росатом» «Высокие технологии атомной

отрасли. Молодежь в инновационном процессе», г. Нижний Новгород; Отраслевая научно-техническая конференция «Методы и средства физических измерений», г. Москва; V, VII и VIII Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз-2019, 2020, 2021, г. Москва; 14th, 15th International Conference “Gas Discharge Plasmas and Their Applications” (GDP 2019, 2021), г. Томск и г. Екатеринбург; 7th, 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE 2020, 2022), г. Томск.

Публикации

Основные материалы диссертации представлены в 14 работах, опубликованных в рецензируемых изданиях [1-14], 8 из них в журналах, индексируемых в базах Scopus и Web of Science [1, 3-5, 8, 9, 11, 12], 2 работы опубликованы в журналах из перечня ВАК [2, 7], 4 работы представлены в сборниках трудов международных конференций [6, 10, 13, 14].

Личный вклад автора

Все выносимые на защиту результаты и положения диссертационной работы получены и разработаны автором лично, либо при его непосредственном участии. Автор участвовал в постановке, проведении и обработке результатов всех экспериментов и расчетов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и 6 приложений. Общий объем диссертации составляет 198 страниц, включая 125 рисунков, 7 таблиц. Библиография содержит 186 наименований.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

Глава 1 диссертации содержит два раздела. Первый раздел посвящен анализу работ, связанных с электрической прочностью ЭВП, при решении

задачи повышения которой различают межэлектродную электропрочность вакуумной изоляции и электропрочность изолятора [15]. Основные причины снижения электрической прочности ЭВП: снижение электрического сопротивления между электродами и локальное повышение напряженности электрического поля [16].

Установлено, что снижение электрического сопротивления между электродами ускоряющей системы ЭВП обусловлено загрязнением внутренней поверхности изолятора. В свою очередь, к локальному повышению напряженности электрического поля приводит наличие механических дефектов, диэлектрических включений, окисных пленок и сорбированных газов на поверхности высоковольтного электрода вакуумного промежутка ЭВП [17]. Локальное повышение электрического поля инициирует протекание электронной эмиссии, вследствие чего происходит облучение диэлектрика как электронными потоками, так и потоками γ -квантов, способствующее зарядке и деградации вакуумной оболочки ЭВП [18].

Анализ литературы позволил определить основные направления устранения перечисленных выше неблагоприятных процессов, связанные с изменением конструкции ЭВП. Среди них можно выделить секционирование изолятора для равномерного распределения потенциала вдоль его внутренней поверхности, экранирование “тройных” точек и областей ускоряющей системы ЭВП, в которых наблюдаются максимумы электрического поля, изменение формы изолятора и высоковольтных электродов [19].

В свою очередь, в направлении технологического совершенствования изготовления ЭВП, исходя из литературы, акцент делается на сочетании оригинальных методов подготовки деталей и узлов перед монтажом в изделие (обработка в газовом разряде и в потоке частиц, оплавление поверхности электродов импульсным пучком электронов [20, 21]) с традиционными (химическая очистка и высокотемпературная вакуумная обработка). После такого сочетания наблюдалось существенное улучшение рабочих характеристик приборов, их стабильности и электропрочности [21].

Второй раздел **Главы 1** посвящен траекторному анализу корпускулярных потоков в ЭВП, роль которого применительно к ГНТ заключается в определении их влияния на электропрочность прибора. Для траекторного анализа используется ряд компьютерных программ, которые условно разделяются на несколько групп. Первая учитывает влияние ионного источника на характеристики ускоренного пучка, но требует проведения дополнительных физических экспериментов, нацеленных на определение недостающих параметров плазмы в ионном источнике [22]. Вторая группа – это программы, не учитывающие влияние ионного источника на характеристики экстрагируемого из него пучка, что обуславливает неудобство их использования ввиду “ручной” процедуры определения параметров эмитирующей ионы границы – плазменного мениска [23, 24]. Такой, в достаточной мере, произвольный подход порождает высокую степень недостоверности конечного результата. Поэтому автором диссертации сделан вывод о том, что для проведения траекторного анализа в ГНТ необходим способ моделирования, одновременно обладающий оперативностью и учитывающий специфику влияния ионного источника на формирование пучка в ИОС ГНТ.

Также в **Главе 1** рассмотрено понятие эмиттанса корпускулярного потока, обращение к которому обусловлено предположением о рассогласованной работе ионного источника и ИОС, выраженной в расходимости пучка, что приводит к распылению электродов и запылению изолятора ИОС. Рассмотрены методы измерения эмиттанса, и установлено, что каждый из существующих требует размещения диагностических элементов на пути пучка [25]. В обзор также вошла информация о поведении эмиттанса в зависимости от электрических и геометрических параметров ускоряющих систем, полученная, однако, только по результатам численного моделирования, которое не учитывало влияния малости замкнутого объема ЭВП и специфики влияния ионного источника на эмиттанс пучка [23]. Отсутствие экспериментальных результатов, которые могли бы

верифицировать численные расчёты авторов рассмотренных работ, побуждает к проведению таких исследований применительно к конструкции ГНТ с тем, чтобы использовать экспериментальные результаты при траекторном анализе корпускулярных потоков в ИОС.

Таким образом, автором диссертации определено направление работы, связанное с исследованием влияния технологических и конструкционных изменений на ресурс ГНТ, которое включает в себя численное моделирование, сочетающееся с экспериментальными исследованиями.

Глава 2 посвящена разработке физико-математического метода моделирования динамики корпускулярных потоков в ИОС ГНТ. Данный метод основан на сочетании физического эксперимента по изучению влияния геометрических параметров ИОС на эмиттанс экстрагируемого пучка ионов и последующего численного моделирования динамики корпускулярных потоков в ИОС ГНТ с использованием экспериментально найденного эмиттанса.

Для этого автором диссертации был разработан оптический метод измерения эмиттанса пучка заряженных частиц, который позволяет проводить измерения указанной величины бесконтактным способом, не требующим размещения диагностических элементов на пути пучка [9]. Разработанный метод базируется на восстановлении значения эмиттанса и параметров Твисса в фиксированной поперечной движению пучка плоскости в системе его транспортировки. Принцип измерения эмиттанса на примере плоскости выходной апертуры ПИ ГНТ приведён на рис. 1а. К ускоряющему электроду ИОС 5 прикладывается отрицательный относительно земли потенциал, что приводит к экстракции из ПИ и ускорению в ИОС пучка положительно заряженных ионов б. В ускорительном зазоре в i -х поперечных движению пучка плоскостях, располагающихся на расстояниях L_i от плоскости вычисления эмиттанса 3, последовательно измеряются поперечные размеры пучка $d_i = 2 \cdot r_i^{\text{ЭКСП}}$ и посредством численного моделирования вычисляется

величина осевого потенциала в ИОС U_i относительно плоскости измерения эмиттанса 3. Измерение поперечных размеров пучка d_i выполняется на этапе обработки полученных в ходе физического эксперимента фотографий его светящегося следа, возникающего при транспортировке пучка ионов вследствие его взаимодействия с газовой средой (рис. 1б).

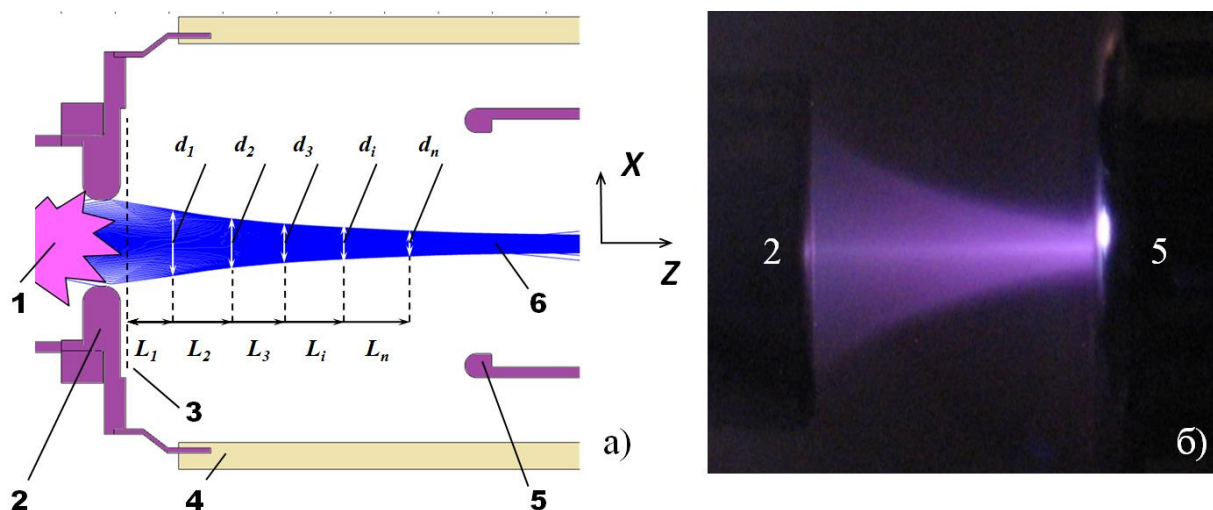


Рисунок 1 – Схематичное изображение плоскостей измерения размеров пучка в ГНТ (а) и фотография светящегося следа пучка ионов в ускорительном зазоре ИОС (б): 1 – газоразрядная плазма в ПИ; 2 – заземленная выходная апертура ПИ; 3 – плоскость вычисления эмиттанса; 4–изолятор ИОС; 5 – ускоряющий электрод ИОС; 6 – пучок ионов; d_i – измеряемые экспериментально поперечные размеры пучка на расстоянии L_i от плоскости измерения эмиттанса

Для восстановления эмиттанса и параметров Твисса решается система уравнений (1), в которую входит массив значений осевого потенциала U_i в ускорительном зазоре ИОС, а также геометрических параметров ИОС d_i и L_i (рис. 1а). Процессы обработки фотографий следа пучка в ИОС, определения его поперечных размеров и вычисления эмиттанса и параметров Твисса были автоматизированы и реализованы в разработанном совместно с А.А. Солодовниковым в программном обеспечении в среде LabVIEW.

$$\begin{pmatrix} \beta\varepsilon \\ \alpha\varepsilon \\ \gamma\varepsilon \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -2 \sum_{i=1}^n S_i & \sum_{i=1}^n S_i^2 \\ -2 \sum_{i=1}^n S_i & 4 \sum_{i=1}^n S_i^2 & -2 \sum_{i=1}^n S_i^3 \\ \sum_{i=1}^n S_i^2 & -2 \sum_{i=1}^n S_i^3 & \sum_{i=1}^n S_i^4 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n (r_i^{\text{эксн}})^2 \\ -2 \sum_{i=1}^n S_i (r_i^{\text{эксн}})^2 \\ \sum_{i=1}^n S_i^2 (r_i^{\text{эксн}})^2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

где $S_i = 2L_i / (\sqrt{U_i/U_1} + 1)$.

С помощью “бесконтактного” метода измерения эмиттанса автором проведено экспериментальное исследование его зависимости от геометрических параметров ИОС с использованием ионного источника каротажной ГНТ. В качестве геометрических параметров ИОС выступали длина ускорительного зазора $L_{уз}$, длина и диаметр фокусирующего электрода $L_{фэ}$ и $D_{фэ}$ (рис. 2). ПИ ГНТ размещался в вакуумной камере исследовательского стенда [1-3, 5], к которой пристыковывался изолятор с размещенной в нём разборной ИОС (рис. 2).

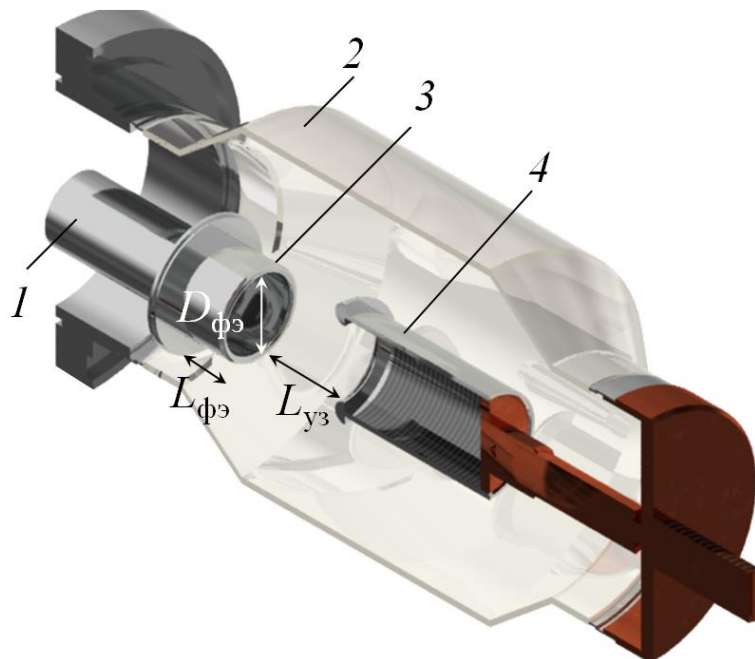


Рисунок 2 – Схема исследуемой ИОС: **1** – ПИ каротажной ГНТ, **2** – изолятор ИОС, **3** – фокусирующий электрод ИОС, **4** – ускоряющий электрод ИОС

Проведение данных исследований является I этапом разработанного автором диссертации метода моделирования динамики пучка в ИОС ГНТ [7,

10, 11]. Эксперименты проводятся по плану, который позволяет реализовать все возможные комбинации факторов $L_{уз}$, $D_{фэ}$, $L_{фэ}$ и изучить как их отдельное, так и совокупное влияние на эмиттанс [26]. Конечным результатом факторного эксперимента является зависимость $\varepsilon = f(L_{уз}, D_{фэ}, L_{фэ})$, которая затем применяется на II и III этапах метода моделирования, когда изучается динамика пучка в моделируемой ИОС, а в качестве исходных данных для реализации старта ионного пучка используется эмиттанс, вычисляемый из аналитической зависимости, полученной в ходе физического эксперимента на I этапе. В качестве примера представлена зависимость эмиттанса от геометрических параметров ИОС одной из каротажных ГНТ (2):

$$\varepsilon(L_{уз}, D_{фэ}, L_{фэ}) = 0,024 \cdot L_{уз}^{-0,00016} \cdot D_{фэ}^{-0,179} \cdot L_{фэ}^{-0,0042} \cdot L_{уз} \cdot D_{фэ} + 0,0085 \cdot D_{фэ} \cdot L_{фэ} + 2,26 \quad (2)$$

Применение разработанного автором диссертации метода моделирования динамики корпускулярных потоков в ИОС ГНТ нашло отражение в **Главе 3**, посвященной разработке трубки с повышенным ресурсом и стабильностью нейтронного потока. С использованием зависимости (2) и с учётом геометрических параметров ИОС штатной каротажной ГНТ вычислен эмиттанс пучка, который составил величину $1,5\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{рад}$. Значение эмиттанса явилось начальным условием для реализации старта ионов в ИОС штатной каротажной ГНТ (рис. 3а). В результате моделирования показано, как взаимодействие ионов и атомов рабочего газа с электродами ИОС приводит к их распылению и последующему запылению изолятора [12-14]. Автором установлено, что в результате того, что профиль напыления на изоляторе имеет выраженные границы (рис. 3б), то на отдельных его участках возникает локальная напряженность поля, превышающая пробойное значение (рис. 3в) и снижается электрическое сопротивление между электродами ИОС [13]. С учётом негативных последствий влияния напыленного слоя на электропрочность ГНТ сформулированы следующие требования к разрабатываемой конструкции трубки: защита изолятора от корпускулярных

потоков, снижение пиков локальной напряженности электрического поля и стабильность нейтронного потока.

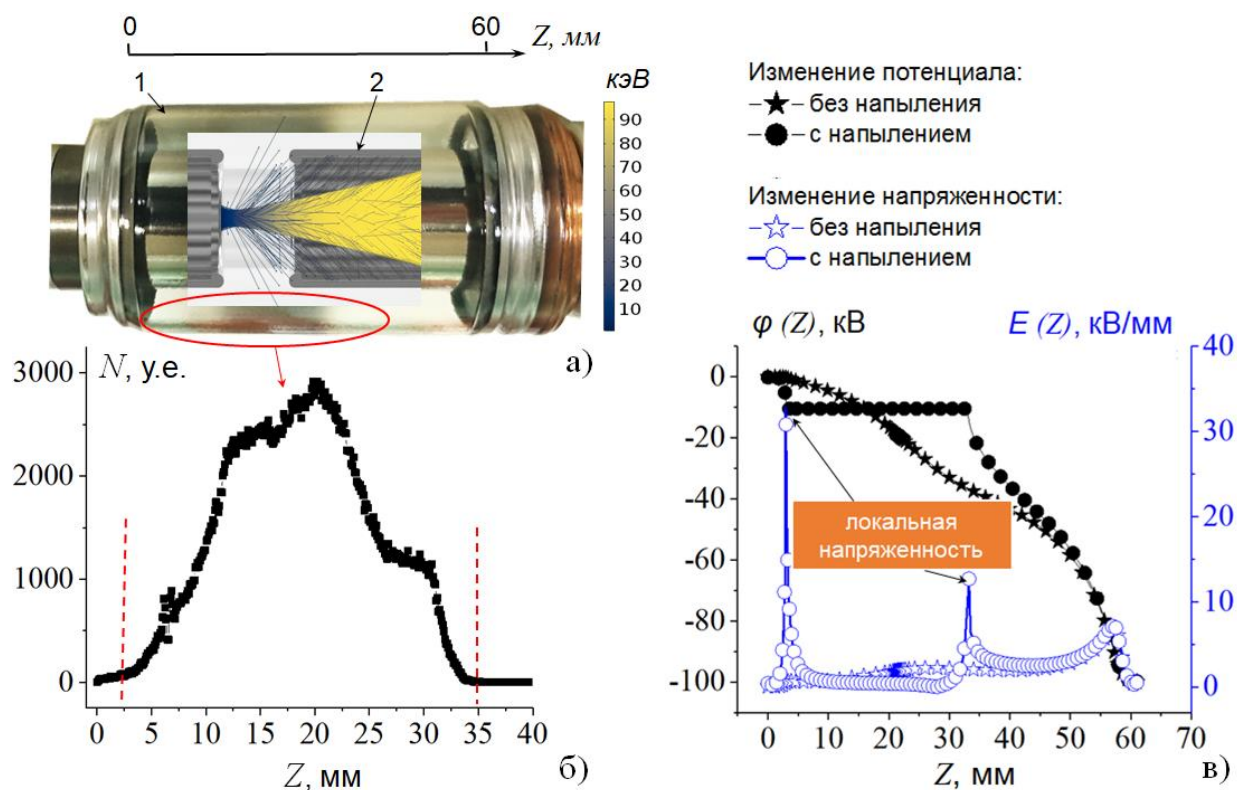


Рисунок 3 – Расчетные траектории ионного пучка и нейтралов перезарядки и запыления на изоляторе после 100 ч. работы штатной ГНТ (а); распределение атомов металла на поверхности изолятора (б); распределение потенциала и модуля напряженности поля вблизи внутренней поверхности изолятора в отсутствии и наличии на ней напыления (в): **1** – фокусирующий электрод ИОС, **2** – ускоряющий электрод ИОС. На рисунке отражено 5 % общего числа частиц

С использованием предложенного метода физико-математического моделирования автором диссертации была разработана новая конструкция каротажной ГНТ. По результатам экспериментальных исследований установлено, что в данном изделии в отличие от штатной каротажной ГНТ в течение всего времени наработки отсутствует запыление изолятора ИОС, как это видно из фотографии новой трубки, отработавшей в течение 900 часов (рис. 4).

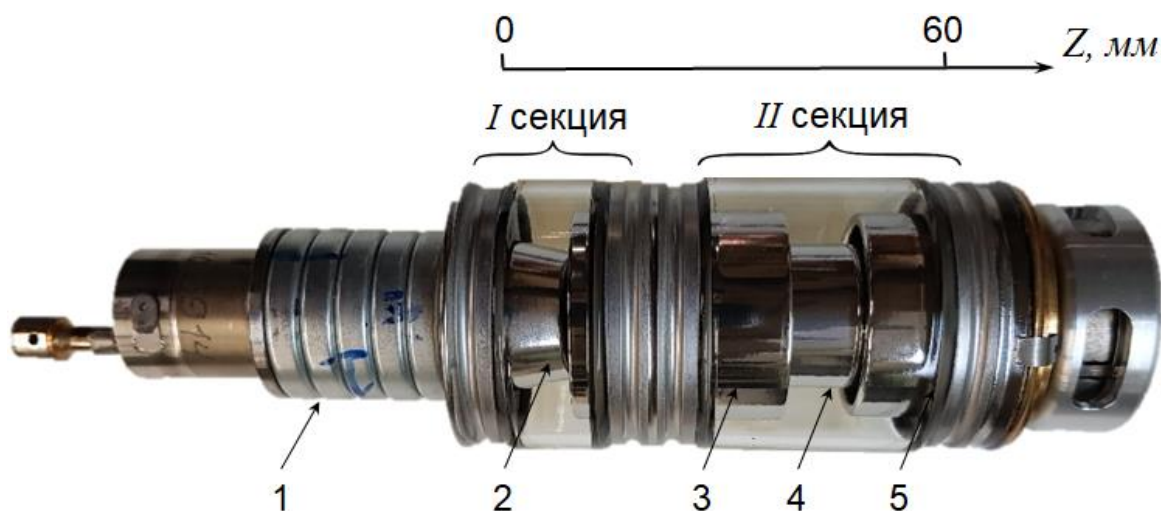


Рисунок 4 – Новая ГНТ после 900 часов работы: 1 – ПИ, 2 – фокусирующий электрод ИОС, 3 – градиентный электрод, 4 – ускоряющий электрод ИОС, 5 – экран высоковольтного спая

Кроме того, исходя из графиков, представленных на рис. 5, видно, что в ИОС новой ГНТ нет локальных пиков напряженности электрического поля и резких перепадов напряжения по длине изолятора, как это было в запылённой конструкции штатной ГНТ (см. рис. 3в). Добиться таких преимуществ позволило секционирование изолятора и размещение в конструкции ИОС трубки градиентных электродов (рис. 4), экранирующих изолятор от запыления, а также обеспечивающих устранение пиков локальной напряженности электрического поля в ИОС (рис. 5).

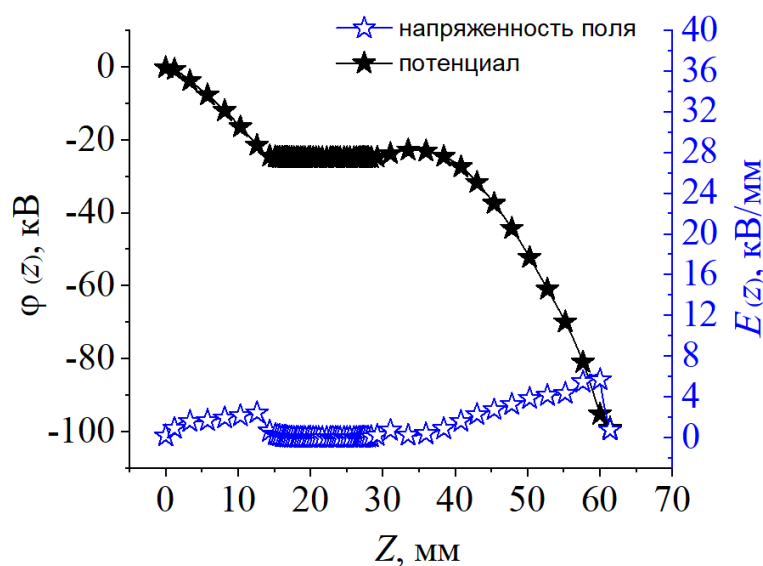


Рисунок 5 – Распределение потенциала и модуля напряженности поля вблизи внутренней поверхности изолятора новой ГНТ

Как показывает статистика, полученная из результатов исследований пяти новых ГНТ, средний ресурс новой трубки составляет около 700 часов, что в два раза превышает средний ресурс штатных изделий в составе каротажного НГ (рис. 6а).

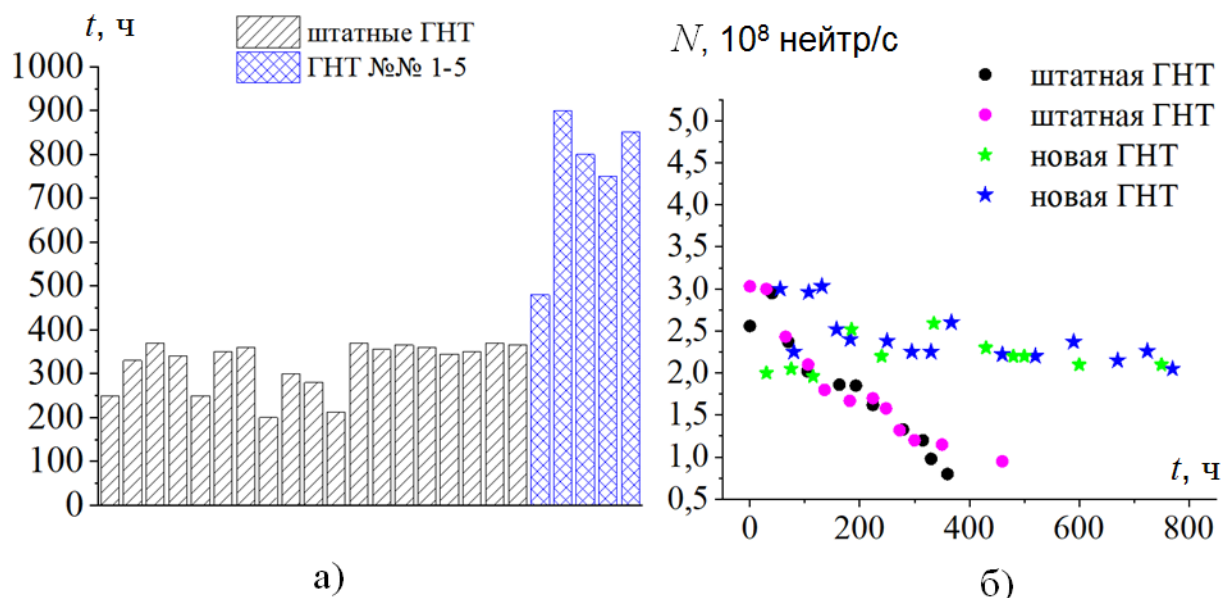


Рисунок 6 – Статистика времени наработки штатных ГНТ и трубок с новой конструкцией ИОС (а) и зависимость нейтронного потока от времени наработки в штатных и новых трубках (б)

Наряду с повышенной электропрочностью в трубках, разработанных автором диссертации, наблюдается стабильность нейтронного потока в течение всего времени наработки. На рис. 6б представлена зависимость нейтронного потока от времени наработки двух новых ГНТ, а также для сравнения типичные зависимости нейтронного потока от времени наработки штатных ГНТ на примере нескольких из них. Из рисунка видно, что после 50 часов наработки в штатно изготовленных изделиях начинается падение нейтронного потока. В то же время в новых ГНТ такого характера зависимости не наблюдается, и наоборот, прослеживается стабильность в пределах погрешности измерений. Такой результат обеспечивается за счет изменения формы электродов ИОС.

Глава 4 диссертации посвящена исследованию влияния ИПО деталей и узлов на электропрочность вакуумной изоляции и стабильность работы ГНТ.

Исследования проводились на стенде, в вакуумной камере которого размещались изолятор и электроды ИОС ГНТ (рис. 7), а в качестве рабочего газа выступал аргон, как наиболее часто применяемый в ИПО. Автором диссертации была разработана процедура ИПО, включая её автоматизацию, что позволяло контролироваться процесс обработки программно. По результатам исследований автором предложено добавить ИПО изолятора и электродов ИОС к существующей технологии их подготовки перед монтажом в изделие, а эффективность принятых мер для повышения электропрочности ГНТ оценивать далее на этапе испытаний изделий [8].

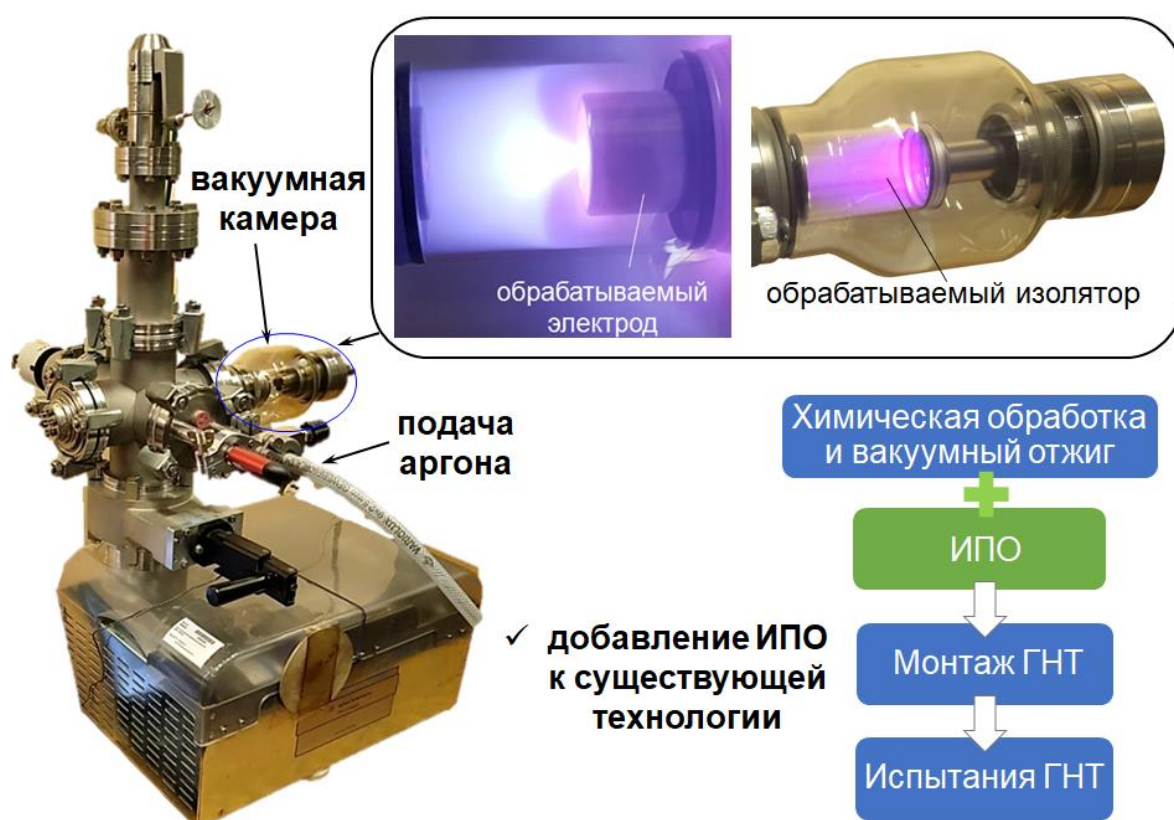


Рисунок 7 – Ионно-плазменная обработка изолятора и электродов ИОС

Для этого диссертантом на основе статистики испытаний каротажных ГНТ были определены критерии, достаточные для оценки электропрочности. Это мощность дозы рентгеновского излучения в ИОС и давление остаточных газов. Экспериментально установлено, что при значении мощности дозы рентгеновского излучения свыше 1 мкЗв/ч и давлении остаточных газов выше 1 мТорр наблюдается свечение изолятора, пробой и деградация его

поверхности. Поэтому условием электрической прочности ГНТ и, соответственно, критерием эффективности ИПО явилось значение мощности дозы рентгеновского излучения меньше 1 мкЗв при максимальном для данной ГНТ ускоряющем напряжении и давления остаточных газов меньше 1 мТорр.

На рис. 8 приведены результаты исследований каротажных ГНТ, изготовленных штатно и с применением ИПО. Из рисунка видно, что в трубках, где ИПО применялась, мощность дозы существенно ниже 1 мкЗв/ч, а давление остаточных газов не превышает 0,5 мТорр. Таким образом, Снижение мощности дозы рентгеновского излучения в ГНТ, к узлам ИОС которой применена ИПО, по сравнению с изделиями, где ИПО не применялась, свидетельствует о повышении электропрочности ГНТ и, соответственно, об эффективности ИПО.

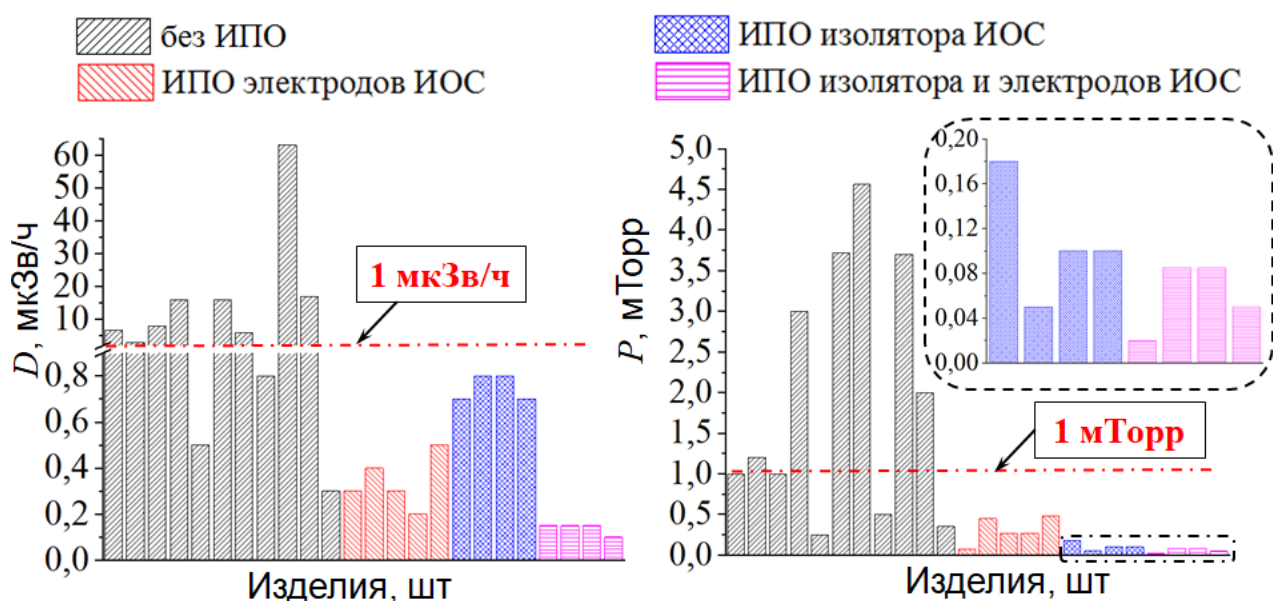


Рисунок 8 – Сравнительные результаты исследований групп изделий ГНТ по мощности дозы рентгеновского излучения и давлению остаточных газов

В **Заключении** приведены основные результаты диссертационной работы, сформулированные следующим образом:

- Разработана процедура ИПО электродов и изолятора ИОС ГНТ. Для оценки эффективности ИПО были введены следующие критерии, свидетельствующие об изменении электропрочности ГНТ: мощность дозы

рентгеновского излучения, генерируемого в высоковольтном промежутке ИОС и давление остаточных газов в ГНТ.

- По результатам исследований изделий выявлено:

- ✓ снижение на два порядка мощности дозы рентгеновского излучения в ИОС, приводящей к появлению высоковольтных сбоев и деградации изолятора ГНТ;

- ✓ снижение на два порядка величины давления остаточных газов в ГНТ при повышении температуры окружающей среды до 150 °С;

- Разработан способ измерения эмиттанса, позволяющий проводить измерения указанной величины в ГНТ не возмущающим пучок, “бесконтактным” методом. Способ основан на фоторегистрации видимых поперечных размеров корпускулярного потока в ИОС и минимизации их разности с теоретической оценкой поперечных размеров пучка. Для автоматизации процесса обработки фотографических изображений следа пучка в ИОС, определения его поперечных размеров и вычисления эмиттанса и параметров Твисса разработано программное обеспечение в среде LabVIEW.

- Представлены результаты применения “бесконтактного” метода измерения эмиттанса пучка ионов, экстрагируемого из ПИ. Зафиксировано уменьшение эмиттанса с ростом величины ускоряющего напряжения и длины ускорительного зазора, а также увеличение эмиттанса с ростом длины и диаметра выходной апертуры фокусирующего электрода ИОС. Влияния диаметра входной апертуры ускоряющего электрода ИОС на эмиттанс экстрагируемого из ПИ ГНТ пучка в пределах погрешности измерений не обнаружено.

- Разработана факторная модель, используемая для вычисления эмиттанса без проведения физического эксперимента при моделировании транспортировки пучка в ИОС. На базе факторной модели разработан способ моделирования динамики корпускулярных потоков в ИОС ГНТ, где в качестве стартовых параметров пучка используется эмиттанс, что исключает появление

неоднозначности результатов, обусловленной игнорированием влияния ПИ на характеристики экстрагируемого пучка.

- Проведен анализ электропрочности конструкции ИОС штатной ГНТ, в ходе которого установлена причины появления напыленного слоя и его влияние на электропрочность изделия. Показано, что напыленный слой имеет выраженные границы на изоляторе, которые в этом случае могут рассматриваться как “тройные” точки, провоцирующие поверхностные и сквозные пробой изолятора. Выявленные недостатки рассмотренной конструкции ИОС ГНТ позволили сформулировать следующие требования к вновь разрабатываемой ИОС:

- снижение пиков локальной напряженности поля в “тройных” точках и вблизи кромок отрицательного электрода ИОС, имеющих малый радиус кривизны;
- защита изолятора от воздействия корпускулярных потоков;
- стабильность нейтронного потока.

- Спроектирована двухсекционная ИОС, удовлетворяющая заявленным выше требованиям; конструкция ИОС имеет в своем составе градиентный экран и экран высоковольтного спая второй секции изолятора. Представлены этапы разработки новой ИОС, основанные на анализе электропрочности конструкции и моделировании динамики корпускулярных потоков в ИОС.

Изготовлены изделия с новой конструкцией ИОС и проведены их исследования, показавшие увеличение ресурса данного типа трубок в среднем в 2 раза. Способность новой конструкции трубок в течение всего ресурса выдерживать разность потенциалов 100 кВ свидетельствует о повышении электропрочности по сравнению с штатной ГНТ. Указанное обстоятельство наряду со стабильностью нейтронного потока в ходе ресурсных испытаний открывает перспективы использования новой конструкции ГНТ в любой модификации каротажных НГ, использующих ГНТ.

Основные публикации по теме диссертации

1. A N Dolgov, V G Markov, **I A Kanshin**, D E Prokhorovich, A G Sadilkin. Diagnostic suite for study of corpuscular flow dynamics in ion-optical system of neutron tube // Journal of Physics: Conference Series **666** (2016) 012023 (**Scopus, WoS**)
2. Н.В. Мамедов, Н.Н. Щитов, **И.А. Каньшин** Исследование зависимостей эксплуатационных характеристик источника ионов Пеннинга от его геометрических параметров // Физико-химическая кинетика в газовой динамике 2015 Т.16 (4) (**ВАК**)
3. N.V. Mamedov, N.N. Shchitov, and **I.A. Kan'shin** An Experimental Apparatus for Penning Ion Source Research // Instruments and Experimental Techniques, 2016, Vol. 59, No. 6, pp. 870–878. (**Scopus, WoS**)
4. N V Mamedov, D V Kolodko, I A Sorokin, **I A Kanshin** and D N Sinelnikov Energy & mass-charge distribution peculiarities of ion emitted from penning source // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1823304 (526071879) 0012063. (**Scopus, WoS**)
5. N.V. Mamedov, D.E. Prokhorovich, D.I. Yurkov, **I.A. Kanshin**, A.A. Solodovnikov, D.V. Kolodko, and I.A. Sorokin Measurements of the Ion-Beam Current Distribution over a Target Surface under a High Bias Potential // Instruments and Experimental Techniques. – 2018. - Vol. 61. - No. 4. - pp. 530–537. (**Scopus, WoS**)
6. N.V. Mamedov, D.E. Prokhorovich, **I.A. Kanshin**, A.A. Solodovnikov, D.V. Kolodko, and I.A. Sorokin Comparison of the ion beam profile measuring methods // AIP Conference Proceedings 2011, 080006 (2018). (**Scopus, WoS**)
7. **Каньшин, И.А.** Повышение электрической прочности газонаполненных нейтронных трубок для обеспечения стабильности генерируемых нейтронных импульсов // Технологии ЭМС. - № 3 (66). – 2018. – С. 26-35 (**ВАК**)

8. **I A Kanshin** and V G Markov Preparation of high-voltage vacuum gap surfaces by the glowing discharge // Journal of Physics: Conference Series 1393 (2019) 012093 IOP Publishing, doi:10.1088/1742-6596/1393/1/012093 (**Scopus, WoS**)
9. **I.A. Kanshin** and A.A. Solodovnikov Measuring the Emittance of a Charged-Particle Beam in a Small Linear Accelerator // Instruments and Experimental Techniques, 2020, Vol. 63, No. 3, pp. 315–324. (**Scopus, WoS**)
10. **I.A. Kanshin** Trajectory Analysis of the Corpuscular Flow Extracted from a Small-Sized Linear Accelerator Plasma Source / Published in: 2020 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE). 978-1-7281-2685-2/20/\$31.00 ©2020. IEEE. DOI: 10.1109/EFRE47760.2020.9241976. pp. 474-478 (**Scopus proceeding**)
11. **I A Kanshin** Simulation of charged particle beam dynamics extracted from a plasma source // Journal of Physics: Conference Series 2064 (2021) 0120113 IOP Publishing, doi: 10.1088/1742-6596/2064/1/012113 (**Scopus, WoS**)
12. **I.A. Kanshin**, N.V. Mamedov, A.A. Solodovnikov, N.E. Efimov Estimation of the electrodes sputtering of the miniature linear accelerator // Vacuum. – 2022. – V.202. – Art.111194. (**Scopus**)
13. **И.А. Каньшин** Повышение электрической прочности ускоряющей системы малогабаритного ускорителя ионов // Proceedings of 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2022), Tomsk, Russia, pp, 663-668, doi: 10.56761/EFRE2022.C1-O-004101 (**Scopus proceeding**)
14. **И.А. Каньшин**, Н.В. Мамедов, А.А. Солодовников, Н.Е. Ефимов, А.С. Рохманенков Моделирование движения ионов и распыления электродов в миниатюрном линейном ускорителе // Proceedings of 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2022), Tomsk, Russia, pp, 675-680, doi: 10.56761/EFRE2022.C1-O-015201 (**Scopus proceeding**)

Список используемой литературы

15. Емельянов, А.А. Импульсные технологии повышения электрической прочности в вакууме / А.А. Емельянов, Е.А. Емельянова. – Москва: Физматлит, 2009. – 159 с.
16. Шехмейстер, Е.И. Технология производства электровакуумных приборов: Учеб. для учащихся техникумов по спец. «Производство изделий электр. техники» / Е.И. Шехмейстер. – М.: Высш. шк., 1992. – 543 с.
17. Латам, Р.В. Вакуумная изоляция установок высокого напряжения. Пер. с англ. / Р.В. Латам. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 192 с.
18. Э.И. Рау [и др.] Механизмы зарядки диэлектриков при их облучении электронными пучками средних энергий // Физика твердого тела. – 2008. – Т. 50, вып. 4. – С. 599-607.
19. Karthik, R.V. A Simulation Analysis to Improve the Dielectric Strength Inside High Voltage Vacuum Interrupters / Karthik Reddy Venna. – 2015. – p. 114.
20. Вертеш-Тунык, М.Н. Очистка поверхностей деталей вакуумного тракта для сверхвысокого вакуума физических установок / М.Н. Вертеш-Тунык.- Дубна, Объединенный институт ядерных исследований, препринт Р9-96-20. – 1996. – 25 с.
21. Пат. 2384911 Российская Федерация МПК H01J19/44 (2006.01), G01R 31/12 (2006.01) Способ обработки электродов изолирующих промежутков высоковольтных электровакуумных приборов / Батраков А.В., Озур Г.Е., Проскуровский Д.И., Ротштейн В.П., патентообладатель Институт сильноточной электроники СО РАН, № 2008149392/28; заявл. 15.12.2008; опубл. 20.03.2010, – 5 с.: ил.
22. K. Holste [et al] Emittance measurement setup facilitating plasma diagnostic of ion thrusters // The 33rd International Electric Propulsion Conference IEPC-2013-191. – 2013. – 14 p.
23. Soliman, B.A., Abdelrahman, M.M. Simulation of ion beam extraction and focusing system // Chinese Physics C. – 2011. – Vol. 35, No. 1. – PP. 83 – 87.

24. T. Kalvas [et al] IBSIMU: A three-dimensional simulation software for charged particle optics // Review of scientific instruments 81, 02B703. – 2010. – p. 3.
25. Dong Hyun An [et al] Transverse Beam Emittance Measurement Using Quadrupole Variation at KIRAMS-430 // Journal of the Korean Physical Society. – 2015. – V. 66, №3 – P. 323 – 329.
26. Соколовская, И.Ю. Полный факторный эксперимент. Методические указания для самостоятельной работы студентов / И.Ю. Соколовская. – Новосибирск: НГАВТ, 2010. – 36 с.

Научное издание

Каньшин Илья Александрович

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук на тему: Каротажные газонаполненные нейтронные трубки
с повышенным ресурсом