

На правах рукописи



Виноградов Максим Львович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МАЛОГАБАРИТНОГО
МАГНИТОРАЗРЯДНОГО ТЕЧЕЙСКАТЕЛЯ**

Специальность – 05.27.02

Вакуумная и плазменная электроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2013

Работа выполнена на кафедре электронных приборов и устройств Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ” им. В.И. Ульянова (Ленина)».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент,
Барченко Владимир Тимофеевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,
Саксаганский Георгий Леонидович,
главный научный сотрудник ФГУП
«Научно-исследовательский институт
электрофизической аппаратуры
им. Д.В. Ефремова», г. Санкт-Петербург;

кандидат физико-математических наук,
доцент, Пронин Владимир Петрович,
руководитель центра коллективного
пользования Атомно-силовой микроскопии
и вакуумного напыления ФГБОУ ВПО
«Российский государственный
педагогический университет им.
А.И. Герцена», г. Санкт-Петербург.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет».

Защита состоится «24» декабря 2013 г. в 15.00 ч. на заседании диссертационного совета Д212.238.08 при Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете “ЛЭТИ” им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан «22» ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.238.08

Смирнов Е.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Активное развитие аэрокосмической техники, энергетики, эксперименты и опыты в области атомной физики повлекли к появлению жестких требований к вакуумному оборудованию и вакуумным системам. Важными для промышленности стали задачи контроля герметичности крупных и сложных вакуумных систем.

С появлением больших ускорителей частиц потребовалось создавать и поддерживать сверхвысокий вакуум в системах внушительных объемов. Течи неизбежно возникали в разных местах систем: по резьбовым соединениям, фланцам, вентилям и натекателям, по сварным соединениям и так далее. Без специального оборудования для поиска течей создание больших герметичных вакуумных систем стало практически невыполнимой задачей.

Гелиевый масс-спектрометрический течеискатель является наиболее чувствительным прибором для этих целей. Использование гелия в качестве пробного газа обусловлено его высокой способностью проникать через места нарушения герметичности, химической инертностью и малым содержанием в атмосфере.

Для локализации течей в крупных технических объектах, таких как корпуса космических станций или контейнеры для ядерных отходов, используют способ щупа. Однако применяемая для этих целей аппаратура является громоздкой и дорогостоящей. Масса гелиевого масс-спектрометрического течеискателя составляет 20-100 кг. Для исследования крупного объекта оператор вынужден применять щупы длиной более 10 м, что существенно ухудшает время отклика и, зачастую, качество испытаний. Применение масс-спектрометрических течеискателей в полевых условиях, при отсутствии электропитания не является возможным.

Крупные отечественные предприятия и научные учреждения предъявляют спрос на появление нового прибора – портативного гелиевого течеискателя. В свою очередь, отечественные производители заинтересованы в разработке научной базы для создания малогабаритных течеискателей. Эти факторы определяют актуальность научных исследований в данной области.

Степень разработанности тематики.

Впервые конструкция гелиевого течеискателя, построенного на базе магниторазрядного насоса предложена немецким ученым Йоханом Спайсом в 1966 г. Вопросом разработки малогабаритных гелиевых течеискателей в Советском союзе занимались В.В. Голоскоков, В.Е. Кузьмина, Л.Е. Левина, В.В. Панюшкин,

В.В. Пименов. Публикации этой группы ученых содержат информацию о магниторазрядном индикаторе гелия Ингем.

Современные исследования характеристик магниторазрядного течеискателя опубликованы группой ученых СПбГПУ: К.Н. Борнгарт, Д.С. Глухих, Л.Н. Розанов, С.Л. Розанов, Е.Н. Свиридович, В.Л. Суханов, Л.Д. Тхинь, В. В. Филимонов.

Вклад в науку, внесенный перечисленными учеными, позволяет доказать, что переносной гелиевый течеискатель с высокой чувствительностью может быть создан на базе магниторазрядного насоса и сенсора из кварцевого стекла. Однако в данный момент не существует отечественного серийно выпускаемого прибора такого типа, а характеристики зарубежных аналогов значительно уступают масс-спектрометрическим течеискателям. Недостаточно данных о характере и динамике физических процессов, происходящих в основных узлах устройства, данных о физике разрядов, имеющих место в приборе данного типа.

Объектом исследования является вакуумное устройство, предназначенное для поиска течей, – малогабаритный гелиевый течеискатель.

Предметом исследования являются основные узлы малогабаритных магниторазрядных гелиевых течеискателей, обладающих повышенной чувствительностью и улучшенными динамическими характеристиками.

Целью работы является исследование процессов в узлах, ответственных за основные характеристики малогабаритного гелиевого магниторазрядного течеискателя, и разработка прибора с повышенной чувствительностью и улучшенными динамическими характеристиками.

Достижение поставленной в настоящей работе цели, потребовало:

1) Провести теоретические исследования динамики процесса регистрации гелия в процессе эксплуатации магниторазрядного течеискателя.

2) Исследовать пропускную способность и избирательность пропускания материалов фильтров гелия и их конструкций, адаптированных к работе в составе малогабаритного течеискателя.

3) Исследовать характеристики высоковакуумного детектора потока гелия, провести моделирование и разработать методику расчета его рабочих характеристик на заданные параметры.

4) Провести поиск путей улучшения характеристик гелиевых магниторазрядных течеискателей за счет совершенствования конструкции его основных узлов.

5) Разработать конструкцию течеискателя в наибольшей степени удовлетворяющего поставленным требованиям и провести сравнительный анализ экспериментально полученных характеристик с данными расчетов.

Методы исследования.

При выполнении работы использовались методы общей механики, гидродинамики, механики газов и вычислительной математики. Для расчётов, анализа и симуляции физических процессов применялся метод компьютерного моделирования процессов с использованием программных пакетов, предназначенных для решения инженерных задач.

Результаты экспериментальных исследований получены в процессе испытания работы макета малогабаритного течеискателя и отдельных его компонентов на экспериментальном стенде, созданном на базе современного вакуумного оборудования специально для выполнения задач данного исследования.

Научная новизна.

Новая научная информация, представленная в работе, получена при использовании методов математического моделирования на базе как аналитических, так и численных моделей, и в ходе проведения натурных физических экспериментов, выполненных с применением современного измерительного оборудования.

Новизна научных результатов состоит в следующем:

1. На базе аналитических моделей выполнены исследования и анализ динамических процессов течения газа в течеискателе для оценки влияния параметров основных узлов прибора на характеристики течеискателя. Справедливость модели подтверждена верификацией результатов моделирования на экспериментальном макете течеискателя.

2. Теоретически и экспериментально исследована пропускная способность и избирательность пропускания материалов фильтров гелия с точки зрения использования их для изготовления сенсоров малогабаритных течеискателей. Впервые изучено влияние избирательности пропускания сенсора на работу магниторазрядного течеискателя. На примере фторопласта показано, что использование полимерных материалов при изготовлении сенсоров за счет недостаточной селективности пропускания и относительно высокой пропускной способности в холодном режиме, ведет к быстрому ухудшению вакуума при хранении течеискателя и последующему выходу его из строя после длительного хранения. Установлена пригодность использования кварцевого стекла для изготовления сенсоров для магниторазрядных течеискателей и подтверждена на экспериментальном макете.

3. Теоретически и экспериментально исследованы характеристики магниторазрядного насоса, используемого в качестве высоковакуумного детектора

гелия. Теоретические исследования проводились с помощью разработанной методики расчета характеристик высоковакуумного детектора гелия в приближении магнитной гидродинамики в рамках теории «спокойного» разряда. Исследованы характеристики экспериментальной модели магниторазрядного насоса, адаптированного для измерения давления гелия.

4. Исследованы пути улучшения характеристик гелиевых магниторазрядных течеискателей за счет совершенствования конструкции основных узлов. Показана возможность увеличения чувствительности течеискателя за счет повышения давления гелия, вызываемого работой мембранного насоса в качестве компрессора, при периодическом перекрытии выхода газа из корпуса сенсора. Показана возможность уменьшения времени отклика течеискателя путем сокращения длины канала транспортировки газа от места истечения к детектору течеискателя за счет пространственного совмещения заборного отверстия, щупа, сенсора гелия и детектора. Предложена конструкция щупа течеискателя, позволяющая улучшить эксплуатационные характеристики течеискателя в условиях работы на атомных станциях и подобных объектах повышенной опасности, за счет исключения попадания опасных, токсичных и радиоактивных веществ в корпус течеискателя за счет придания щупу свойств фильтрации газов.

Практическая значимость.

Практическая ценность результатов диссертационной работы заключается в том, что в работе сформулированы рекомендации по конструированию как вакуумного прибора в целом, так и отдельных узлов малогабаритного гелиевого течеискателя, таких как фильтр для выделения гелия из смеси газов, высоковакуумный детектор потока гелия и других.

Полученные в результате проведенных исследований рекомендации предназначены для использования в качестве методической основы при разработке малогабаритных гелиевых течеискателей и позволяют проектировать приборы с улучшенными характеристиками, такими как чувствительность, массогабаритные параметры, время отклика, время автономной работы. Рекомендации по конструированию щупа для течеискателей позволяют существенно улучшить эксплуатационные параметры прибора при работе в условиях наличия в окружающей среде опасных, токсичных и радиоактивных веществ.

Результаты внедрения.

Значимость работы подтверждается также и тем, что ее результаты заинтересовали организацию ОАО «Завод «Измеритель»». Результаты диссертационной работы внедрены в производство и использованы при разработке нового малогабаритного гелиевого течеискателя.

Полученные результаты, были использованы инженерами ОАО «Завод «Измеритель» для достижения минимального достоверно регистрируемого малогабаритным течеискателем потока гелия порядка $5 \cdot 10^{-7}$ Па·м³/с, снижения времени реакции прибора на поток гелия до трех секунд и уменьшения массогабаритных характеристик течеискателя.

Составлен акт внедрения результатов диссертационной работы в производство на ОАО «Завод «Измеритель» и получены акты, подтверждающие поставку малогабаритных течеискателей на предприятия ОАО «Газпром Трансгаз», ТОО «КазАтомПром», Белоярская АЭС и другие.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Замена сенсора гелия из фторопласта на кварцевый увеличивает диапазон рабочих температур со 150 °С до 500 °С, снижает удельную проводимость для газов через оболочку сенсора в нерабочем (холодном) состоянии в 10^6 раз и повышает проводимость сенсора по гелию при переходе в рабочее состояние на три порядка.

2. Минимальная толщина стенок селективирующей мембраны, выполненной в форме цилиндрического капилляра, при наличии перепада полного давления, пропорциональна его радиусу, поэтому удельная проводимость не зависит от радиуса и для капилляра из кварцевого стекла при 500 °С равняется $3 \cdot 10^{-9}$ м³/(с·см), следовательно повышение проводимости сенсора по гелию возможно только за счет увеличения длины капилляра.

3. Пороговая чувствительность гелиевого течеискателя, определяемая флуктуациями фонового тока, не зависит от его среднего значения, пропорционального давлению внутри магнитоэлектрического насоса, поэтому давление в магнитоэлектрическом насосе не ограничивает пороговую чувствительность течеискателя.

4. Пространственное совмещение щупа, заборного отверстия, сенсора и датчика сокращает время запаздывания информационного сигнала о наличии течи в тестируемом объекте с 3-5 с до 0,4-0,6 с.

Апробация работы.

Результаты диссертационной работы докладывались на следующих международных и отечественных конференциях: международная научная конференция "Плазменные технологии исследования, модификации и получения материалов различной физической природы" (Казань, 2012 г.); 11-я международная конференция «Пленки и покрытия – 2013» (Санкт-Петербург, 2013 г.); 65-я, 66-я, 67-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ (Санкт-Петербург, 2011-2013 гг.); 66-я, 67-я, 68-я научно-техническая конференция СПб НТО РЭС, посвященная Дню радио (Санкт-Петербург, 2011-

2013); научно-техническая конференция молодых специалистов ОАО «ЦНИИ «Электрон» (Санкт-Петербург, 2013 г.); всероссийская научно-техническая конференция "Вакуумная техника и технология" (Санкт-Петербург, 2012 г.); 3-й международный форум поставщиков атомной отрасли 6-8 декабря (Москва 2011 г.); 3-й региональный форум поставщиков атомной отрасли «АТОМЕКС Северо-Запад» (Санкт-Петербург, 2012 г.); 13-я и 15-я научная молодежная школа "Физика и технология микро- и наносистем" (Санкт-Петербург, 2010-2012 г.).

Исследования по тематике диссертации были высоко оценены, а автор был признан лауреатом конкурсов: «Участник молодежного научно-инновационного конкурса «УМНИК» (2012 г.), «Научные достижения студентов и аспирантов СПбГЭТУ» (2013 г.), «Образовательные, научно-исследовательские и инновационные проекты аспирантов, и молодых научно-педагогических работников СПбГЭТУ» (2013 г.).

Достоверность полученных результатов.

Достоверность полученных теоретических результатов обеспечивается использованием в основе расчета общепринятых формул вакуумной техники, различных алгоритмов и методик, подлинность которых была многократно подтверждена ранее. Достоверность вычислительного эксперимента подтверждается тестовыми расчетами и верификацией результатов на экспериментальном макете. Достоверность экспериментальных исследований подтверждается анализом паспортных данных используемых приборов и определением методической погрешности.

Экспериментальные исследования выполнялись на современном высокочувствительном оборудовании. В распоряжении автора работы были гелиевые масс-спектрометрические течеискатели ТИ1-50, ТИ1-30, ТИ1-22, высоковакуумные откачные посты ПВС 150/63, магниторазрядные насосы НОРД, широкодиапазонные вакуумметры отечественных и зарубежных производителей. Для изучения характеристик отдельных узлов, а также прибора в целом, создан экспериментальный стенд, моделирующий работу портативного гелиевого течеискателя.

Публикации.

Основное содержание работы изложено в 17 печатных работах, включая 2 статьи в рецензируемых журналах из списка ВАК, 6 публикаций в других журналах, 9 работ в материалах научно-технических конференций. Список публикаций приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 69 наименований. Общий объем работы составляет 107 страниц машинописного текста, диссертация содержит 46 рисунков и 5 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определены цель и задачи исследований, сформулированы научная новизна и практическая значимость работы. Приведена общая характеристика работы.

Первая глава исследования посвящена изучению достижений в области течеискания. Уделено внимание современным задачам контроля герметичности, рассмотрены различные методики осуществления течеискания.

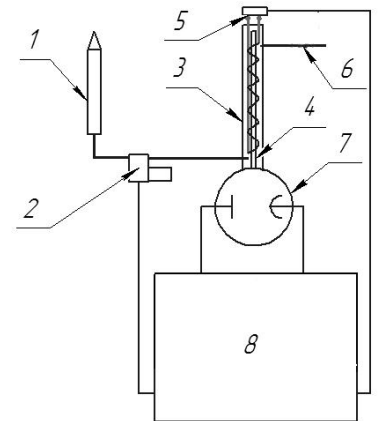
Проведен анализ литературных источников и патентные исследования по теме работы. Исследована история развития малогабаритных гелиевых течеискателей от этапа появления первых публикаций до создания и ввода в эксплуатацию приборов.

Изучены характеристики современных зарубежных портативных гелиевых течеискателей с кварцевым сенсором, работающих по методу щупа. В результате анализа современного состояния вопроса сформулированы основные задачи настоящей работы. Структурная схема магнитоэлектрического течеискателя приведена на рисунке 1.

Вторая глава посвящена математическому моделированию работы течеискателя в статическом и динамическом режимах. Исследовано соотношение (1), связывающее основные параметры конструктивных элементов течеискателя и минимальную регистрируемую прибором течь.

$$Q_{min} = \frac{2d\Delta I_{\phi} S_{mem} S}{a \cdot D_0 \cdot F} \cdot \exp \left[\frac{H_a}{R_{тепл} T} \right], \quad (1)$$

где d – толщина стенки капилляра; ΔI_{ϕ} – амплитуда флуктуаций фонового разрядного тока; S – скорость откачки магнитоэлектрического насоса по гелию; $a = \frac{dI_c}{dp_i}$ передаточная характеристика детектора (зависимость выходного тока I_c от давления в детекторе p_i); S_{mem} – скорость прокачки газовой смеси; D_0 – коэффициент пропорциональности для диффузии гелия через материал



1 – щуп, 2 – мембранный насос, 3 – корпус сенсора, 4 – сенсор гелия, 5 – нагреватель, 6 – канал выхлопа газа, 7 – высоковакуумный детектор гелия, 8 – микропроцессорный блок управления

Рисунок 1. Структурная схема магнитоэлектрического течеискателя

сенсора; Q_{min} – минимальный регистрируемый поток течи; F – нагреваемая площадь сенсора; $R_{тепл} = 2 \cdot 10^{-3}$ ккал/(моль·К); H_a – теплота активации диффузии гелия через материал сенсора; T – температура нагрева материала сенсора.

На основе решения дифференциального уравнения баланса потоков в магниторазрядном течеискателе получено соотношение (2), характеризующее измерение давления с учетом переходных процессов при работе течеискателя.

$$p_i(t) = \frac{F \cdot D_0 \cdot Q_t}{S \cdot d \cdot S_{mem}} \cdot e^{-\frac{H_a}{R_{тепл} T}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{S}{V} t}\right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{S_{mem} \cdot t}{V_t}}\right) \cdot e^{-\frac{(t-t_1) S_{mem}}{V_t}}, \quad (2)$$

где Q_t – поток гелия из течи, V – внутренний объем детектора, V_t – внутренний объем канала доставки газа. В данной математической модели экспоненциальные члены описывают следующие процессы: $e^{-\frac{H_a}{R_{тепл} T}}$ – температурная зависимость интенсивности диффузии атомов гелия через кварцевое стекло; $\left(1 - e^{-\frac{S}{V} t}\right)$ – откачка гелия магниторазрядным насосом течеискателя; $\left(1 - e^{-\frac{S_{mem} \cdot t}{V_t}}\right)$ – доставка смеси газов мембранным насосом через щуп в корпус сенсора течеискателя; $e^{-\frac{(t-t_1) S_{mem}}{V_t}}$ – захват гелия щупом течеискателя ($(t - t_1)$ – время приложения щупа к гелиевой течи).

Модель позволяет исследовать динамику изменения давления в детекторе гелия при приложении к щупу течеискателя течи определенного потока. На рисунке 2 показаны зависимости, полученные в результате расчетов с применением соотношений (1) и (2) в статическом и динамическом приближении.

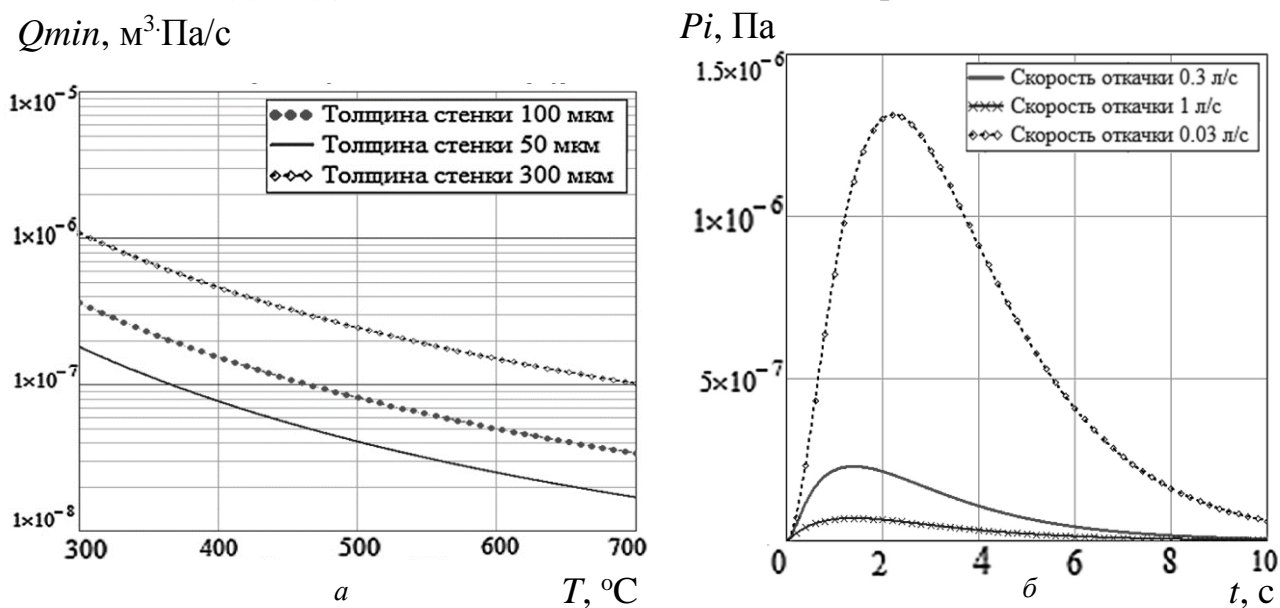


Рисунок 2. Зависимость пороговой чувствительности течеискателя от температуры при различной толщине стенки капилляра (а), зависимость давления гелия в детекторе от времени при различной скорости откачки детектора (б)

Передаточная характеристика магниторазрядного насоса, применяемого в качестве детектора, имеет вид $a = \frac{I_c}{p_i}$. В этом случае, на основе соотношения (2), получено выражение для тока сигнала детектора:

$$I_c(t) = a \cdot \frac{F \cdot D_0 \cdot Q_t}{S \cdot d \cdot S_{mem}} \cdot e^{-\frac{H_a}{R_{тепл} T}} \cdot (1 - e^{-\frac{S}{v} t}) \cdot (1 - e^{-\frac{S_{mem} \cdot t}{V_t}}) \cdot e^{-\frac{(t-t_1) S_{mem}}{V_t}}. \quad (3)$$

На основе полученной математической модели динамики прокачки смеси газов, диффузии и регистрации гелия детектором разработана компьютерная программа для расчета амплитуды и длительности разрядного тока детектора, вызываемого определенным потоком гелия от течи. Программа позволяет моделировать выходной сигнал детектора течеискателя при различных параметрах составных частей прибора. Зная уровень флуктуаций фонового тока детектора, по данным моделирования можно проанализировать возможность регистрации течи определенного потока гелия. Экспериментальная зависимость изменения тока сигнала при приложении потока гелия, показанная на рисунке 3, подтверждает правильность расчетных данных.

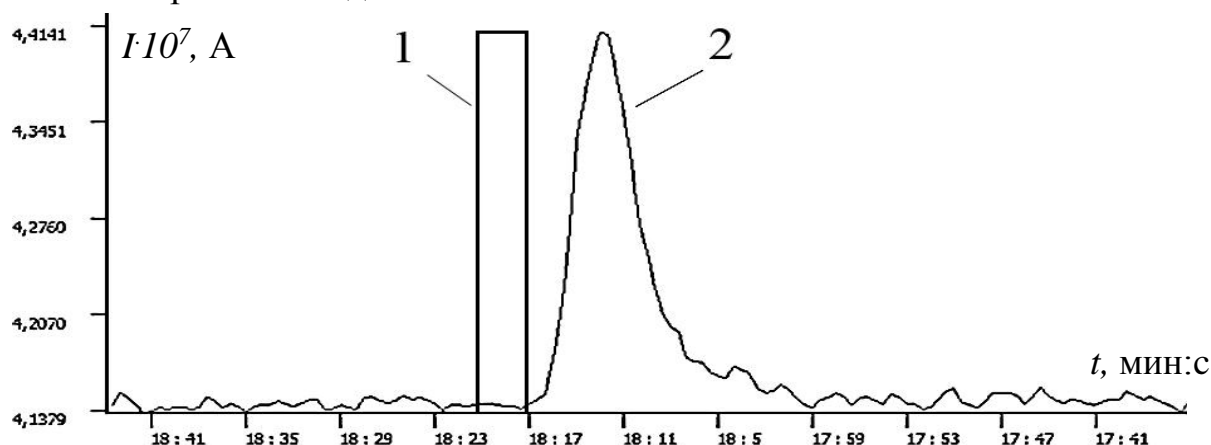


Рисунок 3. Зависимость изменения тока сигнала 2 при приложении потока гелия 1

Динамическая модель работы течеискателя позволила изучить переходные процессы, возникающие в ходе эксплуатации течеискателя. Особенности данных процессов должны учитываться при разработке портативного гелиевого течеискателя, в том числе при разработке алгоритмов распознавания сигнала течи.

Третья глава посвящена исследованию пропускной способности и избирательности пропускания материалов фильтров гелия и конструкций фильтров, адаптированных к работе в составе малогабаритного течеискателя.

На примере фторопласта показано, что использование полимерных материалов при изготовлении сенсоров за счет недостаточной селективности пропускания и относительно высокой пропускной способности в холодном режиме, ведет к быстрому ухудшению вакуума при хранении течеискателя и последующему выходу его из строя после длительного хранения. Установлена

пригодность применения кварцевого стекла для изготовления сенсоров для высокочувствительных магниторазрядных течеискателей, которая подтверждена на экспериментальном макете.

Теоретически и экспериментально доказано, что величина пропускной способности сенсора из кварцевого стекла по гелию при нагреве от 25 до 500 °С возрастает на три порядка. Разработана конструкция корпуса сенсора течеискателя, обеспечивающая нагрев сенсора до рабочей температуры и длительное взаимодействие с сенсором смеси газов, анализируемой на наличие гелия.

На рисунке 4 в логарифмическом масштабе представлены значения величины колебаний тока сигнала при использовании кварцевого и фторопластового сенсоров и показан эскиз конструкции сенсора.



Рисунок 4. Колебания тока сигнала при использовании кварцевого и фторопластового сенсоров (а); конструкция узла сенсора течеискателя (б): 1 – корпус сенсора, 2 – нагреватель, 3 – сенсор на основе капилляра, 4 – разъем питания

Проведен расчет минимальной толщины стенки капилляра, выдерживающей перепад давления газов между наружной и внутренней стенками в магниторазрядном течеискателе. Применение капилляра с большим радиусом с целью увеличения площади сенсора гелия на основе кварцевого капилляра приводит к пропорциональному увеличению минимальной толщины стенки капилляра, обеспечивающей механическую прочность к перепаду давлений в приборе. Поэтому максимальная удельная проводимость сенсора на основе кварцевого капилляра остаётся постоянной для заданной температуры и составляет $3 \cdot 10^{-9}$ м³/с на 1 см длины капилляра при нагреве до 500 °С.

В четвертой главе представлены результаты исследований характеристик высоковакуумного детектора гелия. После рассмотрения различных видов высоковакуумных датчиков, для выполнения функции детектора гелия в течеискателе выбран магниторазрядный насос, благодаря наличию у него линейной зависимости разрядного тока от концентрации газа в области низких давлений и способности откачивать гелий. Теоретические исследования проводились с помощью разработанной методики расчета характеристик по

заданным параметрам высоковакуумного детектора гелия в приближении магнитной гидродинамики в рамках теории «спокойного» разряда. Получены соотношения, которые предназначены для прогнозирования основных характеристик высоковакуумного детектора гелия на этапе проектирования, а также для сопоставления характеристик магнитоэрозийных насосов различных конструкций и выбора оптимальной конструкции насоса для применения в качестве детектора гелия в течеискателе.

Исследованы характеристики экспериментальной модели магнитоэрозийного насоса, адаптированного для измерения давления гелия. На рисунке 5 представлены расчеты зависимости тока высоковакуумного детектора гелия от давления при различном анодном напряжении и экспериментально полученная временная зависимость среднего значения разрядного тока и амплитуды флуктуаций тока детектора.

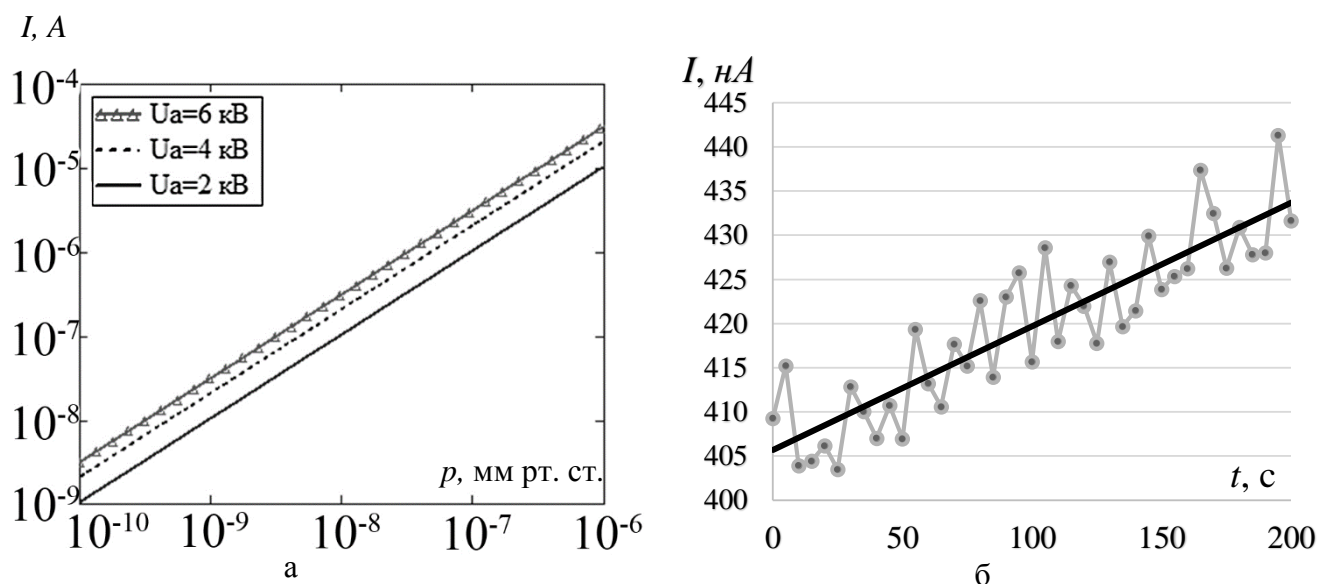


Рисунок 5. Зависимость тока высоковакуумного детектора гелия от давления при различном анодном напряжении (а), зависимость среднего значения разрядного тока и амплитуды флуктуаций тока детектора от времени (б)

При включении течеискателя наблюдается дрейф среднего значения тока высоковакуумного детектора гелия, на который накладываются стохастические колебания тока с амплитудой порядка 10 нА, величина которых ограничивает чувствительность течеискателя. Амплитуда стохастических колебаний тока находится в тех же пределах при выходе среднего значения тока на установившийся уровень и при его дрейфе в процессе работы прибора. Установлено, что величина стохастических колебаний не может быть уменьшена снижением уровня среднего значения тока высоковакуумного детектора гелия, определяемого давлением внутри него. Т.о. чувствительность течеискателя не зависит от величины давления газа в рабочем диапазоне давлений детектора гелия.

В пятой главе приведены результаты поиска путей улучшения характеристик гелиевых магниторазрядных течеискателей за счет совершенствования конструкции основных узлов прибора. Установлено, что повышение чувствительности течеискателя может быть достигнуто за счет того, что импульсный клапан периодически перекрывает отток, а мембранный насос продолжает нагнетать контролируруемую на наличие гелия смесь газов в корпус сенсора.

Исследована конструкция щупа для гелиевых течеискателей, отличающаяся наличием у щупа течеискателя фильтрующих свойств, вызывающих предотвращение попадания веществ, отличных от гелия, в регистрирующий прибор. Дополнительно уменьшается время транспортировки пробного газа от микродефекта до регистрирующего прибора.

Показано, что удаление низковакуумной системы транспортировки газа, за счет пространственного объединения щупа, заборного отверстия, сенсора, детектора и электрометрического каскада, позволяет добиться снижения времени реакции и минимизации массы и габаритов портативного гелиевого течеискателя.

Проведен анализ способности к восстановлению течеискателя после насыщения гелием и хранения. Показано, что течеискатель не насыщается поступающим гелием и способен откачивать его в больших количествах. После длительного хранения прибора без питающего напряжения восстановление работоспособности происходит без дополнительных средств откачки и занимает время порядка нескольких десятков минут.

Разработан прототип малогабаритного гелиевого магниторазрядного течеискателя. Экспериментальное и теоретическое исследование его характеристик показало, что прибор соответствует лучшим мировым аналогам. Минимальный достоверно регистрируемый малогабаритным течеискателем поток гелия составил порядка $5 \cdot 10^{-7}$ Па·м³/с, время реакции прибора на поток гелия – менее трех секунд. При дальнейшем внедрении указанных в работе конструктивных решений прогнозируется достижение существенного преимущества технических характеристик прибора перед продукцией зарубежных производителей: по чувствительности – до 10 раз, по времени реакции – в 2-3 раза.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В ходе выполнения настоящей работы были решены задачи, сформулированные выше, и получены следующие результаты:

1. Построена математическая модель динамики процесса регистрации гелия в процессе эксплуатации магниторазрядного течеискателя, на основе которой разработана программная модель для оценки технических характеристик малогабаритных гелиевых течеискателей по заданным параметрам основных узлов

прибора на этапе разработки, изготовления и испытания течеискателей. С помощью компьютерного моделирования с использованием данной программы проведены теоретические исследования динамических характеристик магниторазрядных течеискателей. На базе экспериментального стенда, моделирующего работу магниторазрядного течеискателя, получены значения динамических характеристик прибора, подтверждающие правильность теоретических исследований.

2. Исследованы материалы, обладающие свойством селективно пропускать гелий, и произведена оценка их пригодности для изготовления фильтров гелия для малогабаритного магниторазрядного течеискателя. Выбрана конструкция сенсора в виде капилляра и установлено, что повышение проводимости по гелию сенсора такой конструкции возможно только за счет увеличения длины капилляра. Исследования показали, что минимальная толщина стенок селективирующей мембраны, выполненной в форме цилиндрического капилляра, при наличии перепада полного давления по обе его стороны, пропорциональна радиусу капилляра, вследствие чего удельная проводимость не зависит от радиуса и для кварцевого капилляра равняется $3 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{с}$ на 1 см длины капилляра при $500 \text{ }^\circ\text{C}$.

3. Разработана конструкция корпуса сенсора, позволяющая осуществлять электрическое управление пропускной способностью сенсора, защищая детектор гелия от отравления атмосферными газами в процессе хранения. Удельная расходуемая мощность на нагрев кварцевого стекла составляет $20 \text{ Вт}/\text{см}^2$ активной площади сенсора.

4. Установлено, что замена сенсора гелия из фторопласта на кварцевый позволяет расширить диапазон рабочих температур со $150 \text{ }^\circ\text{C}$ у фторопласта до $500 \text{ }^\circ\text{C}$ у кварцевого стекла, снизить удельную проводимость для газов через оболочку сенсора в нерабочем (холодном) состоянии в 10^6 раз и обеспечить изменение проводимости кварцевого сенсора по гелию при переходе в рабочее состояние на три порядка.

5. Исследованы основные характеристики высоковакуумного детектора потока гелия. На основе теории «спокойного» разряда создана методика расчета характеристик высоковакуумного детектора потока гелия на этапе проектирования. На основе анализа результатов исследования показано, что малогабаритный магниторазрядный насос может быть использован в качестве высоковакуумного детектора гелия благодаря наличию линейной зависимости разрядного тока от давления и способности откачивать гелий.

6. Исследована пороговая чувствительность магниторазрядного гелиевого течеискателя, определяемая величиной минимального приращения тока магниторазрядного насоса при попадании в него гелия, регистрируемого на уровне

стохастических колебаний фонового тока. Экспериментально установлено, что в рабочих режимах амплитуда флуктуаций фонового тока не зависит от его среднего значения, которое линейно связано с давлением внутри насоса, поэтому давление в нем не ограничивает чувствительность течеискателя.

7. Исследованы возможности совершенствования конструкции основных узлов малогабаритного течеискателя. Установлено, что увеличение чувствительности гелиевого течеискателя, не менее чем в 5 раз, можно достичь благодаря периодическому повышению концентрации гелия в области сенсора за счет расположения на корпусе сенсора в месте выхода газа импульсного клапана, подключенного к микропроцессорному блоку управления.

8. Разработана конструкция щупа для гелиевых течеискателей, в наконечнике которого расположен сенсор на основе капилляра из кварцевого стекла, наконечник снабжен микровентилятором. Щуп данной конструкции обладает фильтрующими свойствами, вызывающими предотвращение попадания веществ, отличных от гелия, в регистрирующий прибор, что позволяет улучшить эксплуатационные характеристики течеискателя в условиях работы на атомных станциях и объектах повышенной токсикологической и радиационной опасности.

9. На основе предложенных критериев оптимизации, разработан прототип конструкции перспективного течеискателя, соответствующего лучшим мировым образцам и способного измерять поток гелия порядка 10^{-7} м³Па/с и менее.

Рекомендации по дальнейшей разработке темы и применению полученных результатов.

В результате работы получены описания основных физических процессов, имеющих место в гелиевом течеискателе, предложены конструкции основных узлов прибора, методики изготовления и оценки характеристик элементов малогабаритного гелиевого течеискателя. Результаты исследования планируется использовать при разработке отечественного малогабаритного гелиевого течеискателя. Помимо этого, полученные результаты полезны для совершенствования масс-спектрометрических течеискателей и вакуумных систем на их основе. Развитием тематики исследования является изучение вопросов эксплуатации портативного течеискателя на реальных объектах в новых областях применения, например автоматизация сбора данных и локализация положения течеискателя на местности при геологических и других исследованиях. Перспективна дальнейшая разработка темы исследований в направлении адаптации прибора для измерения концентрации гелия в воде, в том числе при проведении глубоководных океанологических исследований.

Публикации по теме диссертации.

Статьи в журналах перечня ВАК

1. Виноградов, М.Л. Разработка портативного прибора контроля герметичности вакуумных систем / М.Л. Виноградов // Технологии техносферной безопасности: электронный журнал. – 2013. - Вып. 3 (49). – 6 с. - <http://ipb.mos.ru/ttb/2013-3>.
2. Виноградов, М.Л. Высоковакуумный детектор потока гелия для течеискателя / М.Л. Виноградов // Технологии техносферной безопасности: электронный журнал. – 2013. - Вып. 5 (51). – 9 с. - <http://ipb.mos.ru/ttb/2013-5>.

Наличие авторских свидетельств или патентов на изобретения

3. Заявка на полезную модель, МПК G01M 3/04. Малогабаритный гелиевый течеискатель / Барченко В.Т, Виноградов М.Л.; заявитель и патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)». – №2013137627/28(056725); заявл.09.08.2013. – 9 с.

Статьи в других журналах и сборниках

4. Барченко, В.Т. Исследование и моделирование сенсора гелия для портативного гелиевого течеискателя / В.Т. Барченко, М.Л. Виноградов // Вестник Полоцкого государственного университета. Физика, сер. С. – 2013. – Т.1. - С. 50-59.
5. Бухштаб, А.И. Проблемы контроля герметичности в аэрокосмической промышленности / А.И. Бухштаб, Г.В. Шульженко, М.Л. Виноградов // Аэрокосмический курьер. – 2012. - № 3 (81). – С. 55.
6. Барченко, В.Т. Разработка сенсора гелия для малогабаритного течеискателя / В.Т. Барченко, М.Л. Виноградов // Сб. докл. науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ, г. С.-Петербург., 1 - 8 фев. 2013 г. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ, 2013. – С. 47-51
7. Виноградов, М.Л. Моделирование канала подачи пробы к сенсору в течеискателе «Гелин» / М.Л. Виноградов // Сб. докл. 65-й науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ «ЛЭТИ», г.С.Петербург., 24 янв.-4 фев. 2012 г.– СПб.: Изд-во СПбГЭТУ, 2012. - С. 59-61
8. Виноградов, М.Л. Сенсоры для гелиевых течеискателей / М.Л. Виноградов // Сб. докл. 64-й науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ «ЛЭТИ», г.С.Петербург., 25 янв. - 5 фев. 2011 г.– СПб.: Изд-во СПбГЭТУ, 2011. - С. 74-77

Материалы международных научно-технических конференций

9. Виноградов, М.Л. Математическое моделирование процессов газопереноса гелия в малогабаритном течеискателе / М.Л. Виноградов, В.Т. Барченко // сб.

материалов конф. плазменные технологии исследования, модификации и получения материалов различной физической природы, 16-18 октяб. 2012 г.– Казань, 2012. - С. 113-115

10. Виноградов, М.Л. Сепарация гелия из смеси газов в портативном магниторазрядном течеискателе / М.Л. Виноградов, В.Т. Барченко // Пленки и покрытия – 2013: труды 11-й междунар. конф., г.С.-Петербург., 6-8 мая 2013 г. – СПб., 2013. - С. 220-222.
11. Виноградов, М.Л. Переносной течеискатель для контроля дефектов покрытий / М.Л. Виноградов, В.Т. Барченко, // Быстрозакаленные материалы и покрытия : труды 11-й Всерос. с междунар. участием науч.-технич. конф., г.Москва, 2—22 нояб. 2012 г. – М. - С. 147-151.

Материалы национальных научно-технических конференций

12. Барченко, В.Т. Моделирование переходных процессов в гелиевом магниторазрядном течеискателе / В.Т. Барченко, М.Л. Виноградов // 68-я науч.-техн. конф. СПбНТОРЭС, посвященная Дню радио, г.С.-Петербург., 7 мая 2013 г. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ, 2013. – С.152-154
13. Виноградов, М.Л. Изучение температурной зависимости пропускной способности сенсора в гелиевом магниторазрядном течеискателе / М.Л. Виноградов, В.Т. Барченко // Материалы 67-й науч.-техн. конф. СПбНТОРЭС, посвященной Дню радио, г.С.Петербург., 19–27 апр. 2012 г. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ, 2012. - С. 250-252.
14. Барченко, В.Т. Выделение гелия из газовой смеси в малогабаритном магниторазрядном гелиевом течеискателе / М.Л. Виноградов, В.Т. Барченко // Материалы 66-й науч.-техн. конф. СПбНТОРЭС, посвященной Дню радио, г. С.-Петербург., - СПб.: Изд-во СПбГЭТУ, 2011. - С. 326-327.
15. Виноградов, М.Л. Гелиевый течеискатель на базе магниторазрядного насоса. Изучение пропускной способности кварцевого сенсора / В.Т. Барченко, А. И. Бухштаб, М.Л. Виноградов // Вакуумная техника и технология: материалы конф., г. С.-Петербург., 13 - 15 июня 2012 г. – С. 29
16. Виноградов, М.Л. Применение сенсора на основе оксида кремния в гелиевом течеискателе / М.Л. Виноградов // Физика и технология микро- и наносистем. Карбид кремния и родственные материалы: материалы 15-й науч. молодеж. школы, г. Зеленогорск, 2 сент. 2012 г. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ, 2012. - С. 37.
17. Виноградов, М.Л. Использование кварцевого капилляра в качестве сенсора портативного гелиевого течеискателя / М.Л. Виноградов, В.Т. Барченко // Физика и технология микро- и наносистем: материалы 13-й науч. молодеж. школы по твердотельной электронике , г. Зеленогорск, 12-13 нояб. 2010 г. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ, 2010. - С. 27