

На правах рукописи

СУМКИН ПАВЕЛ СЕРГЕЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНТРОЛЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ
ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ**

Специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной
среды, веществ, материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2012

Работа выполнена на кафедре ПР-4 (Электротехника и электроника) в Государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный университет приборостроения и информатики» (МГУПИ).

Научный руководитель: Шатерников Виктор Егорович
доктор технических наук, профессор
МГУПИ,
заведующий кафедрой ПР-4 (электротехника и электроника)

Официальные оппоненты: Будадин Олег Николаевич
доктор технических наук, профессор
ООО «Технологический институт «ВЕМО»,
председатель научно-технического совета
(директор по науке)

Мартынов Сергей Анатольевич
кандидат технических наук, доцент
ЗАО "НИИИИИ МНПО "Спектр", НИО-8,
заведующий отделом

Ведущая организация: ОАО НТЦ «Промышленная безопасность»

Защита состоится 22 мая 2012 года в 12⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д212.119.01 при Государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный университет приборостроения и информатики» (МГУПИ) по адресу: 107996, г. Москва, ул. Стромынка, д. 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Московский государственный университет приборостроения и информатики».

Сведения о защите и автореферат диссертации размещены на официальных сайтах ВАК Министерства образования и науки РФ <http://www.vak.ed.gov.ru> и Государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный университет приборостроения и информатики» (МГУПИ) <http://www.mgupi.ru>.

Автореферат разослан 17 апреля 2012 года.

Ученый секретарь
Диссертационного совета Д212.119.01
д.т.н., профессор



В.В. Филинов

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Контроль герметичности в последнее время приобретает особую актуальность в связи с достижением предельных значений ресурсных параметров машин и оборудования опасных производственных объектах подконтрольных Ростехнадзор РФ. Для оценки технического состояния значительного числа промышленных объектов и оборудования (отнесенных к опасным производственным объектам) успешно применяется контроль герметичности с использованием аппаратурных методов. Одним из самых распространенных аппаратурных способов контроля герметичности является способ шупа (в ряде случаев – метод шупа). Эффективность контроля герметичности при «щуповых» испытаниях в значительной степени определяется выбором конкретной системы контроля герметичности, которая в свою очередь определяется пороговой чувствительностью системы контроля и контролепригодностью объекта контроля. Системы контроля герметичности включают сами течеискатели, методы и устройства их калибровки, пробные вещества (режимы нагрузки ими объектов контроля), а также способы подготовки поверхности объекта контроля (выбор способа очистки поверхности объекта контроля, температуру и условия осушки). Выбор течеискателя определяет тип пробного вещества, которое будет использовано в процессе проведения контроля, время подготовки к контролю, трудоемкость проведения контроля герметичности, селективную избирательность выявления течей и в конечном итоге стоимость проведения контроля герметичности. Анализ систем контроля герметичности для «щуповых» испытаний проведенный в данной работе определяет актуальность исследований, направленных на разработку нового - звуко-резонансного метода контроля герметичности. Данный метод включает новые средства контроля (звуко-резонансный течеискатель «ТИ-ЗОНД» и калиброванную контрольную течь «КТ-1»), а также технологию контроля, которые обеспечивают повышение эффективности контроля герметичности при «щуповых» испытаниях. Звуко-резонансный течеискатель «ТИ-ЗОНД» позволяет проводить эксплуатационный контроль не только с помощью гелия (как пробного газа), но также агрессивных, реакционно-способных газов и паров, например хлора или паров азотной кислоты без потери работоспособности, при этом обеспечивается проверка нижнего порога чувствительности по пробному газу гелию.

Состояние проблемы

Промышленный выпуск течеискателей различных типов в качестве пробных газов в которых используется – гелий, фреоны и элегаз (газы удовлетворяющие нормативно-техническим требованиям проведения контроля герметичности на опасных производственных объектах подконтрольных Ростехнадзору РФ) осуществляют в РФ и за рубежом ряд фирм. Среди ко-

торых ООО Измеритель (Россия), Varian (США), ADIXEN (Alcatel Vacuum Technology) (Германия), Вос edwards (США, Великобритания), и др. Течеискатели в которых использован масс-спектрометрический анализатор настроенный на «пик гелия» обладают очень высоким уровнем чувствительности – до 10^{-12} м³Па/с (в режиме вакуумных испытаний) и селективностью к пробному газу – гелию. В вакуумной схеме данных течеискателей заложена система их калибровки – контрольные течи диффузионного типа, в качестве газа-диффузанта в которых используется гелий, а в качестве проницаемых мембран, как правило, молибденовые стекла. Однако такая высокая чувствительность приборов данного класса обеспечивается только в режиме вакуумных испытаний – при способе вакуумной (гелиевой) камеры, способе термовакуумных испытаний, способе обдува гелием. При способе гелиевого щупа с применением масс-спектрометрических течеискателей чувствительность падает до 10^{-8} - 10^{-7} м³Па/с и хуже, кроме того встает необходимость в калибровке способа, т.е. в проверке нижнего порога чувствительности, состоящем в определении отклика анализатора течеискателя при поднесении к щупу течеискателя контрольной течи калиброванного микропотока пробного газа. Диффузия пробного газа гелия через мембрану из молибденового стекла не обеспечивает потоки имитирующие крупные течи. Применение течей капиллярного типа, когда микропоток пробного газа регулируется диаметром и длиной капилляра, а также давлением на входе в капилляр решает проблему, однако применение таких течей ограничивается их хрупкостью и ненадежностью в следствии конденсации влаги воздуха внутри капилляра и необходимостью его прокали перед началом работы. Также необходимо отметить, что анализатор масс-спектрометрического течеискателя очень чувствителен к загазованности помещения пробным газом, велика постоянная времени (инерционность), габаритные характеристики таких течеискателей не обеспечивают портативности. Стоимость таких течеискателей очень высока. Оборудование требует высокой квалификации специалистов неразрушающего контроля, что также сказывается на эффективности проведения контроля. Тогда как на практике (в большинстве случаев) требуемый уровень пороговой чувствительности хуже обеспечиваемого на несколько порядков. Избирательная селективность к пробному газу гелию анализатора масс-спектрометрического течеискателя требует применение только гелия в качестве пробного газа, применение других газов в качестве пробных требует применения в качестве детектора - спектроанализатора, что еще более удорожает стоимость прибора. Существуют также другие типы анализаторов обеспечивающих проведение гелиевого контроля при «щуповых» испытаниях. Среди них детектор катарометрического типа (детектор по теплопроводности). В основе функционирования всех типов детекторов по теплопроводности (ДТП) лежат закономерности передачи тепла от разогретого чувствительного элемента (филамента) анализатора через окружающую га-

зовую среду к стенке ячейки анализатора. Этот детектор обеспечивает уровень пороговой чувствительности $2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3\text{Па/с}$, однако течеискатели с ДТП не производится отечественной промышленностью и его калибровка ставит такие-же вопросы, как и при использовании масс-спектрометрических течеискателей. Кроме того селективная оценка пробных газов в процессе течеискания возможна только в понимании в какую сторону уменьшается или увеличивается теплопроводность бинарной смеси (пробный газ + воздух) от эталонного газа-носителя (воздуха без примеси пробного газа). Детектор по теплопроводности чувствителен к изменению расхода анализируемого газа, за счет изменения естественного теплосноса нагретого чувствительного элемента (детектор требует термостатирования). Среди недостатков также длительный шум выходного сигнала и дрейф нулевой линии, что ведет к недобраковкам и перебраковкам в процессе контроля течеисканием. Избирательной селективности при поиске утечек пробного газа гелия или его смесей с воздухом можно достигнуть применением диффузионных мембран с управляемой термодиффузией, однако при данном способе требуется создание среднего вакуума со стороны детектора, что ведет к применению вакуумного насоса и потери портативности прибора. В случае использования в качестве анализатора течеискателя диффузионных насосов (постоянно находящихся под вакуумом) с селективными термодиффузионными мембранами (чувствительность приборов $\approx 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3\text{Па/с}$) возникает проблема «отравляемости» детектора, что ведет в недобраковкам и перебраковкам даже при незначительной загазованности объекта контроля пробным газом. Применение в качестве пробного газа фреонов и элегаза (SF_6) накладывает на средства контроля дополнительные требования по обеспечению чистоты воздуха рабочей зоны (отсутствию загазованности пробным газом) в следствии «отравляемости» анализатора течеискателя.

Таким образом, несмотря на обширный перечень предложений на рынке течеискательного оборудования в настоящее время недостаточно исследованы подходы к выбору средств контроля при реализации конкретной системы контроля герметичности при «щуповых» испытаниях. т.к. параметры течеискателей (тип пробного газа и нижний порог чувствительности) определяют выбор способа подготовки поверхности объекта контроля и рабочее давление пробной среды, а также определяют требования при проведении контроля. Нет и четких рекомендаций по выбору средств калибровки.

Цель работы и задачи исследования

Цель данной работы – оценка эффективности контроля герметичности при испытаниях способом щупа и разработка нового метода, средств и технологии «щуповых» испытаний при проведении контроля герметичности опасных производственных объектов, обеспечивающих наилучшие показатели для данной методики оценки.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать объективную методику оценки технического уровня систем контроля герметичности (в составе средств контроля которых используются течеискатели реализующие способ щупа), отражающую как их технологические, так и эксплуатационные характеристики;
- определить пути снижения мешающих факторов влияющих на проведение контроля герметичности с использованием способа щупа;
- разработать новые средства контроля, обеспечивающие наилучшие показатели в предложенной методике оценки технического уровня систем контроля герметичности (при использовании способа щупа);
- определить технологические и эксплуатационные параметры разработанных средств контроля и оптимальные режимы их работы;
- разработать новую технологию проведения контроля герметичности с использованием разработанных средств контроля.

Методы исследования:

Для теоретических исследований технологических и эксплуатационных свойств существующих средств контроля герметичности применяемых для реализации способа щупа применялось методика экспертных оценок и аналитические методы. Разработка и исследование новых указанных средств контроля проводились на основе методов оптимизации параметров и путем экспериментальных исследований.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- предложен объективный метод оценки технической эффективности средств контроля герметичности на основе использования функции желательности Харрингтона для построения обобщённых показателей систем контроля (пороговая чувствительность течеискателей, постоянная времени течеискателей, масса средств контроля и т.д.), который реализован для «щуповых» испытаний и условий проведения контроля на базе анализа технологических и эксплуатационных характеристик;
- определены факторы (наличие средств проверки нижнего порога чувствительности течеискателей, их эксплуатационные и метрологические характеристики, обеспечение портативности течеискателей и т.д.) доминирующего влияния на результат проведения контроля и методы их оптимизации. На основе анализа перечисленных факторов определены эксплуатационные и метрологические параметры средств контроля нового звуко-резонансного течеискателя и контрольного образца калиброванной течи диффузионного типа;
- разработана методика калибровки контрольной течи диффузионного типа, позволяющая оценить отсутствие конструктивных дефектов основного материала полимерных пленок (проницаемых диффузионных мембран);

- предложен новый метод контроля герметичности - «звуко-резонансный» с использованием звуко-резонансного течеискателя и калиброванной контрольной течи диффузионного типа.

Практическая ценность работы заключается в том, что:

- на основе экспертных оценок и проведенных расчетов параметров анализатора разработана конструкция звуко-резонансного течеискателя позволяющего проводить эксплуатационный контроль не только с помощью гелия (как пробного газа), но также агрессивных, реакционно-способных газов и паров;

- разработанные звуко-резонансный течеискатель «ТИ-ЗОНД» и калиброванная контрольная течь «КТ-1» с возможностью калибровки ее пузырьковым способом, по технологическим и эксплуатационным характеристиками не уступают лучшим зарубежным аналогам;

- показано, что применение нового метода контроля герметичности (включающего течеискатель и контрольный образец) имеет наилучший показатель в предложенной оценке технического уровня систем контроля герметичности с использованием способа щупа по сравнению с известными средствами контроля герметичности;

- определены эксплуатационные режимы течеискателя «ТИ-ЗОНД» и калиброванной контрольной течи «КТ-1» обеспечивающие проведение контроля герметичности согласно требований Ростехнадзора РФ;

- разработанные контрольный образец течеискания – диффузионная контрольная течь – «КТ-1» и звуко-резонансный течеискатель «ТИ-ЗОНД» прошли полный цикл обработки и испытаний.

- разработана технология контроля герметичности с использованием указанных средств контроля, на основании которых разработана технологическая карта проведения испытаний.

Реализация и внедрение результатов работы:

- предложенный метод контроля герметичности и технология применения разработанных средств контроля легли в основу «Методические рекомендации о порядке проведения контроля герметичности технических устройств и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах» (решение Наблюдательного совета Единой системы оценки соответствия в области промышленной, экологической безопасности, безопасности в энергетике и строительстве от 05.04.2012 № 48-БНС);

- на основе выполненных исследований и разработок организован серийный выпуск разработанных средств контроля на специализированном предприятии ООО «ГЛАВДИАГНОСТИКА» (г. Москва).

Апробация работы

Основные результаты работы доложены и обсуждены на XVIII Всероссийской научно-технической конференции «Неразрушающий контроль и техническая диагностика» (г. Нижний Новгород, 2008 г.), XIV международной научно-практической конференции посвященной 75-летию МГУПИ (Москва 2011 г.), 1-ой международной научно-практической конференции «Вывод из эксплуатации объектов использования атомной энергии. Концептуальные аспекты и практический опыт» (г. Москва 2009 г.), на НТС ОАО «НТЦ «Промышленная безопасность», в ЗАО «НИИИН МНПО «СПЕКТР», МГУПИ, а также вошли в материалы книги «Течеискание» (Издательский дом Спектр, 2011 г.)

Публикации

По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ, из них 2 без соавторов, 2 в журнале, признанном ВАК научным изданием, 1 патент на изобретение, 1 патент на полезную модель. Список работ приведен в автореферате.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа изложена на 115 страницах машинописного текста, иллюстрируется 45 рисунками и состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 93 наименований.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту.

1. Методика оценки технической эффективности систем контроля герметичности в составе средств контроля которых используются течеискатели реализующие способ шупа и условий проведения контроля на базе анализа конструктивно-энергетических и эксплуатационно-метрологических характеристик, а также использования функции желательности Харрингтона для построения обобщённых показателей.
2. Оценка влияния эксплуатационных и метрологических факторов с доминирующим влиянием на эффективность проведения контроля герметичности.
3. Конструкция контрольного образца контроля герметичности - калиброванной контрольной течи «КТ-1» диффузионного типа с возможностью калибровки ее пузырьковым способом.
4. Конструкция и алгоритм работы звуко-резонансного течеискателя «ТИ-ЗОНД».
5. Эксплуатационные режимы течеискателя «ТИ-ЗОНД» и калиброванной контрольной течи «КТ-1».
6. Методика проведения контроля герметичности с применением указанных средств и технологическая карта проведения контроля.

7. «Методические рекомендации о порядке проведения контроля герметичности технических устройств и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах» с использованием данной методики и указанных средств контроля.

2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель исследования и решаемые задачи, указаны наиболее важные научные результаты и приведены основные положения, представляемые к защите.

В первой главе рассмотрены основные средства контроля герметичности используемые при «щуповых» испытаниях, а также способы и средства их калибровки. Проведен анализ существующих нормативно-технических документов (регламентирующих проведение неразрушающего контроля опасных производственных объектах подконтрольных Ростехнадзор РФ и Росатом) отражающих проведение контроля герметичности с применением указанных способов и средств контроля. Приведены экспертные оценки основных технологических и эксплуатационных параметров контроля герметичности при проведении испытаний способом «щупа» полученные при проведении опросов специалистов неразрушающего контроля таких экспертных организаций как ОАО «ВНИИПТхимнефтеаппаратуры», ФГУП ЦНИИ КМ "Прометей", НУЦ «КАЧЕСТВО», ОАО «НИКИМТ-Атомстрой» Эксперт-Центр, ФГУП НИИВТ им. С.А. Векшинского и т.д.

Проведение контроля герметичности технических устройств и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах, регламентируется назначенным классом герметичности. Класс герметичности назначается разработчиком объекта контроля (исходя из нормы герметичности) и определяется конструкционными и технологическими особенностями объекта контроля (ОК), контролепригодностью ОК, а также технико-экономическими показателями контроля. Каждому классу герметичности соответствует перечень применимости систем контроля герметичности. Система контроля герметичности включает в себя сочетание определенных способа и режимов контроля и способа подготовки объекта к контролю, ее выбор обуславливается порогом чувствительности системы контроля герметичности. Как показывает практика, выбор системы контроля герметичности влияет на эффективности контроля, которая определяется следующими факторами:

- диапазоном пороговых чувствительностей систем контроля герметичности (классом герметичности);
- пороговой чувствительностью течеискателей;
- выбором конкретного способа, метода контроля, а также пробных веществ;
- качеством подготовки поверхности ОК;

- надежностью воспроизводимости потоков пробного вещества через контрольный образец, время калибровки контрольного образца и течеискательного оборудования;

- сложностью и специфичностью оборудования средств контроля;
- квалификацией специалистов неразрушающего контроля;
- массогабаритными и эргономическими характеристиками средств контроля;
- постоянной времени течеискателя;
- временем и условиями контроля (временем обучения работе с приборами).

Одним из самых распространенных способов в технике течеискания является способ шупа. При контроле способом шупа ОК заполняется пробным веществом (пробным газом) до давления выше атмосферного, после чего наружная поверхность ОК контролируется специальным шупом, соединенным с детектором течеискателя. В результате перепада давления пробное вещество проникает через имеющийся сквозной дефект и в месте течи улавливается шупом и индицируется анализатором течеискателя.

Анализ типовых задач стоящих перед контролем герметичности (по экспертным оценкам) для «шуповых» методов и способов объективно указывает на то, что пороговые чувствительности систем контроля для большинства случаев лежат в диапазоне 10^{-7} до 10^{-4} м³ · Па/ с, при этом в настоящее время вся течеискательная аппаратура выпускается как индикаторная, и для достоверности контроля перед началом работы нижний порог чувствительности течеискателя и системы контроля герметичности проверяется (перед началом рабочей смены) по специальным эталонам (источникам микропотока пробного газа) – калиброванным контрольным течам. Способ калибровки, время и трудоемкость калибровки контрольных течей также является характеристикой системы контроля герметичности и влияет на эффективность проведения контроля герметичности.

Вторая глава посвящена разработке методики оценки технического уровня систем контроля герметичности при проведении контроля с реализацией способа шупа. Предложено проводить оценку технического уровня на основе анализа систем контроля герметичности по совокупности конструктивно-энергетических, метрологических и эксплуатационных показателей. В основу построения модели оценки эффективности (технического уровня) был положен алгоритм, используемый при решении задач оптимизации на основе функция желательности Харрингтона. Показатель технической эффективности представлен в виде выражения:

$$D_{\Sigma} = D^{k^3} \cdot D^{3M}, \quad (1)$$

где: D_{Σ} - показатель технического уровня, D^{k^3} – обобщённый показатель конструктивно-энергетической эффективности, D^{3M} – обобщённый показатель эксплуатационно-метрологической эффективности.

Нахождение обобщённого показателя (D) для каждой совокупности частных откликов, преобразованных в безразмерные значения функции желательности, проводилось по формулам в соответствии с обобщённой функцией Харрингтона:

$$D^{KЭ} = \sqrt[4]{\prod_{u=1}^4 d_u^{KЭ}}, \quad (2)$$

где: $D^{KЭ}$ – обобщённый показатель конструктивно-энергетической эффективности, d_u – безразмерный частный отклик функции желательности.

$$D^{ЭМ} = \sqrt[8]{\prod_{u=5}^{12} d_u^{ЭМ}}, \quad (3)$$

где: $D^{ЭМ}$ – обобщённый показатель эксплуатационно-метрологической эффективности, d_u – безразмерный частный отклик функции желательности.

На рис. 1 представлены шкалы желательности технических характеристик, определяющих конструктивно-энергетическую эффективность. На рис. 2 представлены шкалы желательности технических характеристик, определяющих эксплуатационно - метрологическую эффективность системы контроля герметичности.

Технические характеристики получены с использованием анализа наиболее важных нормативных документов, таких как ОСТ 26.260.14-2001 Отраслевой стандарт сосуда и аппараты, работающие под давлением. Способы контроля герметичности., ГОСТ 25136-82 Соединения трубопроводов. Методы испытаний на герметичность., ОСТ 5.0170-81 Контроль неразрушающий. Металлические конструкции. Газовые и жидкостные методы контроля герметичности., ГОСТ 24054-80 Изделия машиностроения и приборостроения. Методы испытаний на герметичность. Общие требования., РД 26-12-29-88 Правила проведения пневматических испытаний изделий на прочность и герметичность., ПБ 03-581-03 Правила устройства и безопасной эксплуатации компрессорных установок, воздухопроводов и газопроводов., ПНАЭГ-7-019-89. Контроль герметичности. Газовые и жидкостные методы.

В таблице №3 представлены вычисленные, согласно предложенной методики, значения показателя технической эффективности D_{Σ} для группы из 10-ти течейскаателей (в схеме реализации которых заложен способ щупа) ведущих фирм: ООО Измеритель (Россия), Varian (США), ADIXEN (Alcatel Vacuum Technology) (Германия), Voc edwards (США, Великобритания), HELLING, UE Systems, Testo AG.

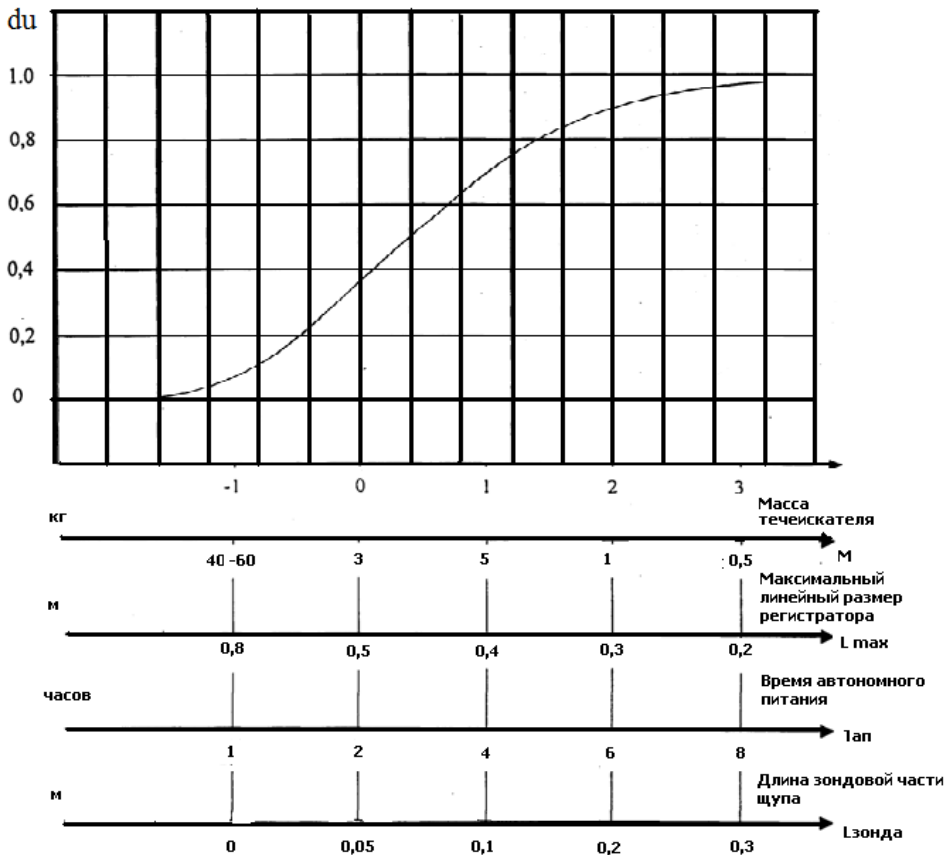


Рис.1. Шкалы желательности технических характеристик, определяющих конструктивно-энергетическую эффективность

Опираясь на данные анализа вышеперечисленных характеристик сформулированы требования к современному течеискателю и средствам проверки его работоспособности – калиброванным контрольным течам. Полные требования к средствам контроля из создаваемой системы контроля герметичности приведенные в табл. №2.

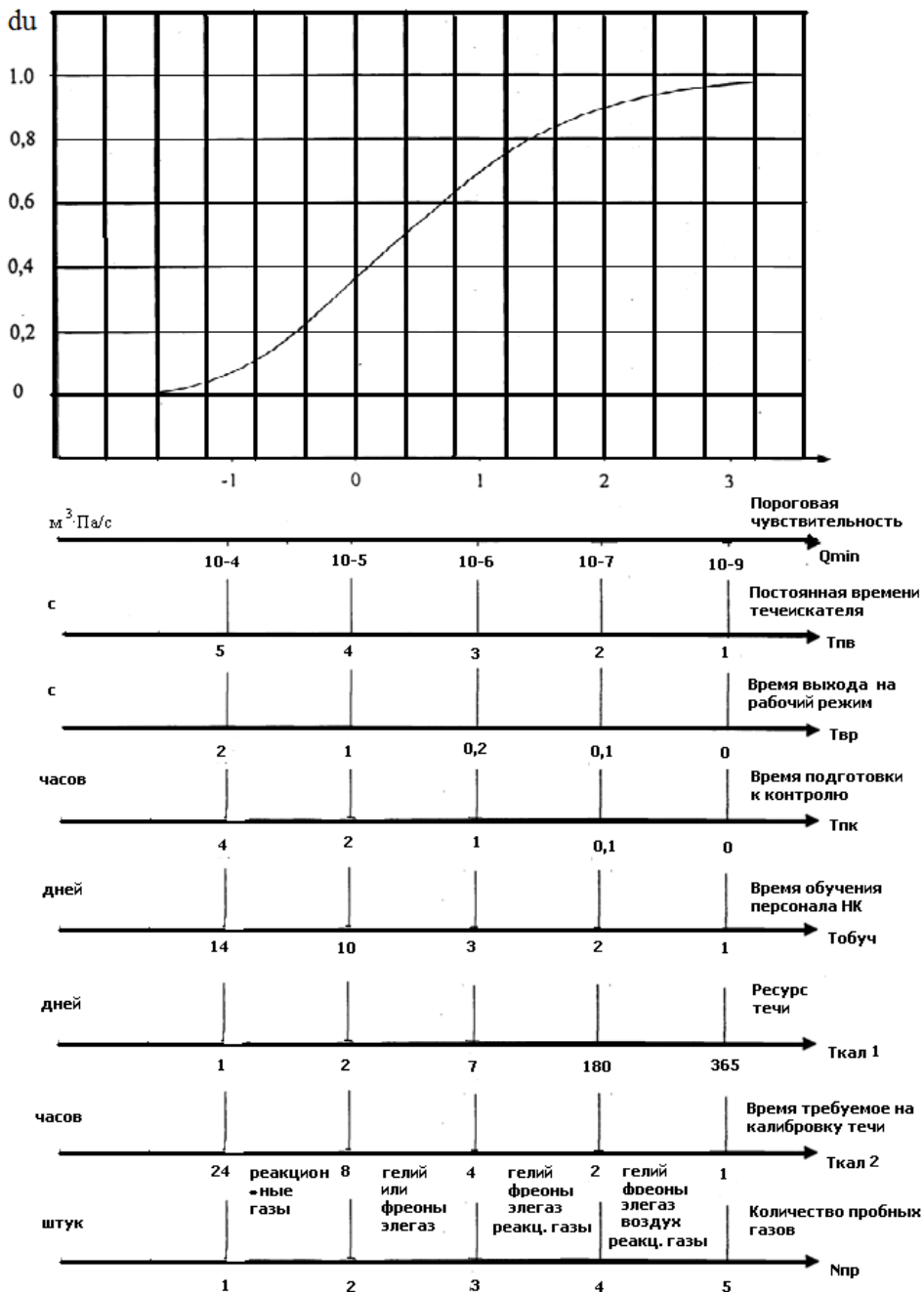


Рис.2. Шкалы желательности технических характеристик, определяющих эксплуатационно-метрологическую эффективность

Третья глава разработке посвящена разработке средств контроля герметичности обеспечивающих показатели согласно выводов приведенных во второй главе. Приведены параметры расчетов и конструкция контрольного образца герметичности - калиброванной контрольной течи «КТ-1» диффузионного типа с возможностью калибровки ее пузырьковым способом. Представлены конструкция, алгоритм работы нового звуко-резонансного течеискателя «ТИ-ЗОНД» и определение его технологических и эксплуатационных характеристик.

Задача разработки нового контрольного образца состоит в создании течи, в которой можно было бы применить высокостабильный процесс диффузионного проникновения газа через полимерную пленку для получения больших потоков пробного газа с повышением достоверности и точности калибровки течей, а следовательно, и настройки системы контроля герметичности при испытаниях, с помощью, например, гелия, а также использования таких течей для контроля герметичности с помощью пенообразующих пленочных составов и воды с сохранением простоты конструкции, технологичности изготовления и мобильности, что значительно расширяет эксплуатационные возможности калиброванных контрольных течей.

Сущность разработки состоит в создании наилучших условий для формирования потока пробного газа (гелия) путем сбора его после выхода из проницаемого элемента в одну точку у входа в капилляр и выхода через последний в виде потока, имитирующего поток реальной течи, который контактируя с индикаторной жидкостью образует пузырь, гарантированно исключая при этом попадание индикаторной жидкости на проницаемый элемент, так как длина капилляра больше высоты капиллярного поднятия в нем жидкости, а диаметр его обеспечивает образование сферического мениска индикаторной жидкости.

Наиболее стабильные диффузионные процессы для указанных свойств получения калиброванных потоков пробных веществ протекают в полимерных материалах. Проницаемость полимерных материалов зависит от физических и химических свойств компонентов, а также от условий протекания процесса: температуры, давления, концентрации. Эти условия при тестировании полимерных пленок приводились к нормальным. Для измерения проницаемости полимерных пленок использовались методы, основанные на определении потока диффундирующего вещества.

Соотношение между потоком вещества и градиентом концентрации определяется законом Фика:

$$J = -D \frac{\partial c}{\partial x}, \quad (4)$$

где J – поток вещества, диффундирующего в направлении x ; D – коэффициент диффузии; C – концентрация пробного газа.

При стационарном потоке газа через полимерный материал решение уравнения Фика приводит к выражению:

$$Q = -D \frac{\Delta c}{x} S t = -D \frac{C_2 - C_1}{x} S t, \quad (5)$$

где Q – количество вещества, прошедшего через пленку толщиной x и площадью S за время t при градиенте концентрации $\Delta C/x$; C_1 и C_2 – концентрации вещества по обе стороны пленки. Таким образом, скорость переноса газа через полимерные пленки пропорциональна площади полимерной мембраны и обратно пропорциональна ее толщине.

В большинстве случаев лимитирующим фактором процесса диффузии являются сорбция и растворение пробного газа в пограничном слое материала. Считая что растворимость газа в полимерной пленке подчиняется закону Генри:

$C = \sigma p$, $P = D\sigma$, где σ – коэффициент растворимости; p – давление газа; P – коэффициент проницаемости; D – коэффициент диффузии; C – концентрация пробного газа.

$$\frac{Q}{t} \Delta p = P \frac{\Delta p^2}{x} S, \quad (6)$$

где Q – количество вещества, см³; Δp – разность давлений пробного газа, атм.; P – коэффициент проницаемости, см³см/см²с атм.; x – толщина полимерного материала, см; S – площадь мембраны, см².

В качестве проницаемых мембран были проанализированы полимерные пленки с механическими свойствами, приведенными в таблице №1. Для определения количества продиффундировавшего гелия применяли пузырьковый метод (способом аквариума) при фиксированной площади полимерной мембраны.

Изменение давления пробного газа (см. рис. 3 А) на входе корпуса контрольной течи приводит к изменению скорости диффузии газа через проницаемую мембрану 3, зависимость расхода от давления $Q_T = f(p)$ указывается в калибровочной характеристике.

Схема установки для измерения потоков пузырьковым методом представлена на рис. 3 Б. Величину потока пробного газа определяли по формуле:

$$Q_T = \frac{4}{3\tau} \Pi (r^3 - d_k^3) p_{атм}, \quad (7)$$

где Q_T – поток пробного газа, м³ · Па/с; $p_{атм}$ – атмосферное давление, Па; d – диаметр пузырька в момент измерения, м; d_k – диаметр капилляра, м; τ – время образования пузырька, с.

Диапазон измеряемых потоков газа $1,3 \cdot 10^{-8} \dots 1,3 \cdot 10^{-4}$ м³ · Па/с.

Таблица №1

№	Полимер, марка (ГОСТ, ТУ)	Коэффициенты проницаемости по гелию (справочные) $\cdot 10^8$ (при 20°C), $\text{см}^3\text{см}/\text{см}^2 \text{ с атм.}$	Коэффициенты проницаемости по гелию (определенные способом аквариума) $\cdot 10^8$ (при 20°C), $\text{см}^3\text{см}/\text{см}^2 \text{ с атм.}$
1	Политетрафторэтилен, Ф-4 (ТУ 6-05-810-88)	0,2 – 7,8	4,5±0,5
2	Полиэтилентерефталат, ПН (ТУ РБ 00204079-143-95)	1-1,2	1,1±0,5
3	Полиэтилен ВД, ПВД 10204 - 003 (ГОСТ 16337 – 77)	3,7-4	3,8±0,5
4	Полиэтилен НД, ПНД (ТУ 273-83 2243-104-00203335-97)	0,8-1	0,8±0,5

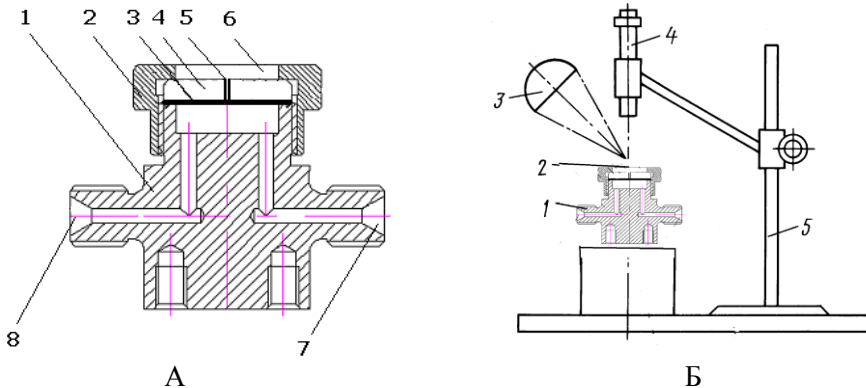


Рис. 3. Конструкция калиброванной контрольной течи «КТ-1». Принципиальная схема установки для измерения потоков течей пузырьковым методом:
 А) 1 – корпус; 2 – прижимной кольцевой элемент, 3 – проницаемая мембрана; 4 – конденсор газа с емкостью для калибровки пузырьковым методом; 5 – капиллярный канал конденсора для выхода пробного газа; 6 – калибровочная емкость; 7, 8 – вход и выход для подключения к магистрали пробного газа
 Б) 1 – калиброванная контрольная течь «КТ-1»; 2 – конденсор газа с емкостью для калибровки пузырьковым способом; 3 – осветитель; 4 – микроскоп; 5 – штатив

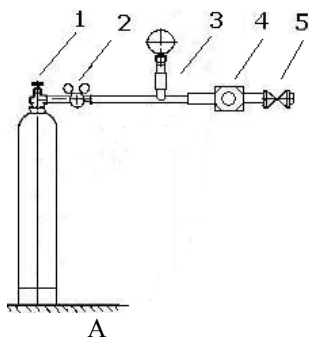


Рис. 4. Схема подключения течи «КТ-1» к магистрали с пробным газом, внешний вид течи «КТ-1»:

А) 1- баллон с пробным газом; 2 – газовый редуктор; 3-манометр; 4 – калиброванная контрольная течь «КТ-1»; 5 – газовый клапан

Б) Внешний вид течи «КТ-1»

Наличие систематической погрешности результатов измерений определялось сопоставлением паспортных (справочных) данных с результатами измерений по данной расчетной методике (ф. 4-6) с измерением потоков пробного газа выполненных методом аквариума. Значимая систематическая погрешность отсутствовала. Графики выполненных измерений для указанных полимерных материалов приведены на рис. 5.

Точность методики:

- для проницаемости в пределах $0,8-4,5 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3 \text{ см}^2 \text{ с атм}$ относительное среднее квадратическое отклонение результатов измерений составляло $0,1 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3 \text{ см}^2 \text{ с атм}$, полная погрешность результатов измерений – $0,5 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3 \text{ см}^2 \text{ с атм}$.

Полная погрешность измерений укладывается в диапазон не более $\pm 30\%$, что соответствует справочным данным.

Разработанный источник микропотоков пробного газа гелия - калиброванная контрольная течь «КТ-1» использовали при разработке анализатора звуко-резонансного течеискателя «ТИ-ЗОНД».

Звуко-резонансный метод контроля герметичности, основан на индикации утечек пробных газов, прошедших сквозь течи объекта контроля, скорость звука и коэффициент затухания акустических колебаний в которых отличается от воздуха. Среди достоинств метода - возможность селективной оценки пробных газов, значительно меньшее время выхода на рабочий режим (за счет отсутствия конвективного теплообмена и контакта пробного газа с чувствительным элементом детектора). Использование дифференциальной схемы позволяет производить отстройку от большинства фоновых (неизбежно присутствующих в зоне контроля) и электрических помех, при этом полезной составляющей будет разность изменения скорости звука в одном и другом канале анализатора, т.е. оценивается градиент концентрации расхода пробного газа через место течи.

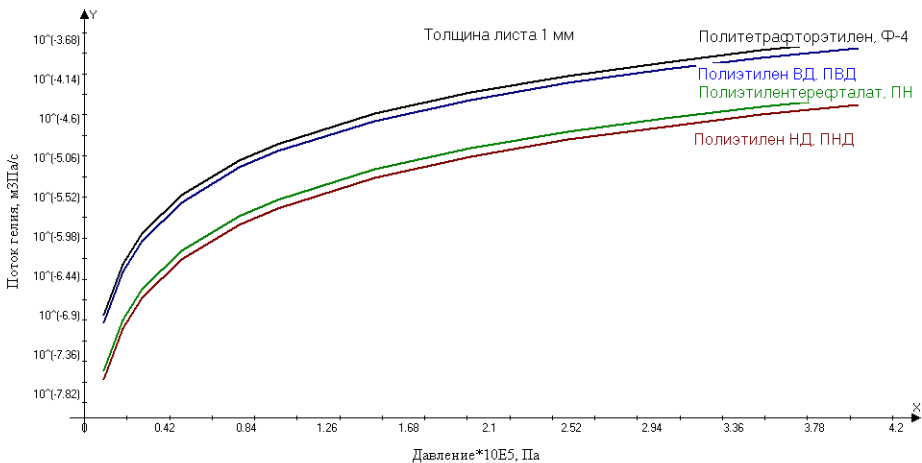


Рис. 5. Графики зависимостей проницаемости полимерных пленок (толщиной 1 мм, $S=1,26 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$)

Использование звукового детектора дает возможность использования метода для поиска утечек агрессивных газов и паров, например плавиковой кислоты, хлора, за счет отсутствия контакта между пробным газом и чувствительными элементами анализатора.

Предложенный анализатор звуко-резонансного течеискателя «ГИ-ЗОНД» (рис. 6 А) представляет собой дифференциальный время-импульсный анализатор с ячейками анализатора обеспечивающими резонанс акустических колебаний. Анализатор состоит из излучателя 1, камеры рабочего канала 2, и идентичной ей камеры канала сравнения 3 (рис. 6 А). При этом, длина гибкой части шупа L_3 выбиралась согласно требованиям к течеискателю (таблица №2). Расстояние между точками забора газа L_1 рабочего канала и канала сравнения выбиралось исходя из современных требований методик техники течеискания и диффузионных процессов пробный газ - воздух. Длина ячейки L_2 и скорость прокачки газовой пробы через анализатор течеискателя выбиралась из условий обеспечения акустического резонанса и требованиям максимальной чувствительности к пробному газу гелию, изложенным в таблице №2. Изменение времени, за которое звуковой импульс проходит расстояние между источником звуковых колебаний и приемниками пропорционально изменению плотности среды относительно некоторого начального значения. Схема экспериментальной установки обработки параметров анализатора звуко-резонансного течеискателя показана на рис. 7.

Сравнение скорости звука (при давлении 98,1 кПа) в отдельных газах и воздухе показывает, что использование звуко-резонансного метода пред-

почтительно для определения утечек водорода ($V_{зв}=1284$ т, ($^{\circ}\text{C}$)), гелия ($V_{зв}=965$ при $t=0^{\circ}\text{C}$), азота ($V_{зв}=136$ при $t=0^{\circ}\text{C}$), хлора ($V_{зв}=206$ при $t=0^{\circ}\text{C}$), фреона-12 ($V_{зв}=140$ при $t=17^{\circ}\text{C}$) и других аналогичных газов, либо их смесей.

Для практического применения зависимость скорости звука в газовой смеси от состава описывается уравнением, аддитивным относительно скорости звука в отдельных компонентах смеси:

$$V_{зв см} = c_1 V_{зв1} + c_2 V_{зв2} + \dots + c_n V_{звn}, \quad (8)$$

где $V_{зв см}$ – скорость звука в смеси газов; c_1, c_2, \dots, c_n – концентрации компонентов в долях единицы; $V_{зв1}, V_{зв2}, \dots, V_{звn}$ – скорости звука в компонентах.

Определение скорости распространения звуковой волны в ячейке анализатора производится с использованием уравнения стоячей волны, образующейся в результате интерференции двух когерентных волн, распространяющихся навстречу друг другу, полученных от одного источника.

$$\xi = \xi_{пр} + \xi_{обр} = \left| 2A_0 \cos \frac{\omega L_2}{V_{зв см}} \right| \sin \omega t, \quad (9)$$

где A_0 – амплитуда начального колебания, ω – круговая частота, L_2 – длина ячейки анализатора, t – время, $V_{зв см}$ – скорость звука в смеси газов.

Используя известные соотношения:

$$V_{зв см} = \lambda/T \quad \text{и} \quad \omega = 2\pi/T,$$

уравнение (9) запишем в виде:

$$\xi = \left| 2A_0 \cos \left[\pi L_2 / \lambda \right] \right| \sin \omega t, \quad (10)$$

Из уравнения (10) видно, что амплитуда стоячей волны зависит от длины ячейки анализатора L_2 :

$$A = \left| 2A_0 \cos \left[\pi L_2 / \lambda \right] \right|, \quad (11)$$

В точках, где $2\pi L_2 / \lambda = \pm \pi n$ ($n=0, 1, 2, \dots$), амплитуда достигает максимального значения, равного $2A_0$.

Частота колебаний в анализаторе течейскаателя подбиралась таким образом, чтобы его длина соответствовала пучности, при этом критерием изменения скорости звука (попаданию в ячейку анализатора пробного газа) являлось изменение амплитуды результирующего колебания (рис.6). Анализатор может быть использован для контроля бинарных и квазибинарных пробных газов, для которых соотношение (8) может быть приведено к виду:

$$V_{зв см} = V_{зв cp} c_n + (1 - c_n) V_{зв cp}, \quad (12)$$

где c_n – объемная доля газового компонента; $V_{зв cp}$ – средняя скорость звука в сумме неопределяемых компонентов (например, в воздухе).

В качестве информационного параметра $\Delta_{инф}$ сигнальной части дифференциального анализатора звуко-резонансного течейскаателя было выбрано изменение относительных времен пролета (по модулю) звуковых импуль-

сов в ячейках звуко-резонансного анализатора от изменения микропотоков пробных газов:

$$\Delta_{\text{инф}} = (t_{\text{раб}} - t_{\text{ср}}) / t_{\text{имп}} \cdot 100\%, \quad (13)$$

где $t_{\text{раб}}$ – время пролета звукового импульса в ячейке рабочего канала; $t_{\text{ср}}$ – время пролета звукового импульса в ячейке канала сравнения; $t_{\text{имп}}$ – период звуковых колебаний.

График зависимостей изменения относительных времен пролета (по модулю) звуковых импульсов в ячейках звуко-резонансного анализатора от изменения микропотоков представлены на рис.8.

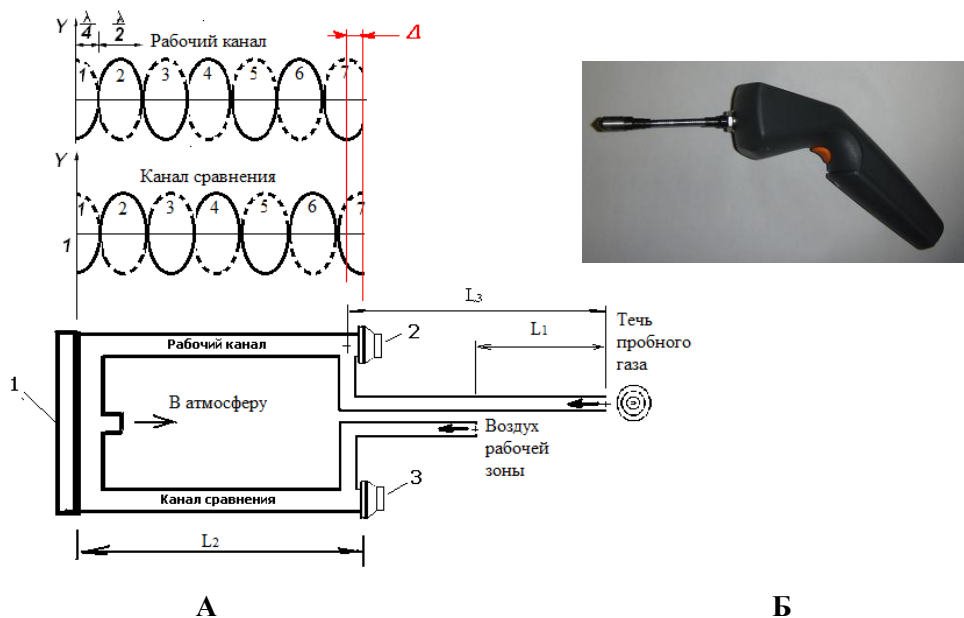


Рис. 6. Схема проведения эксперимента по определению минимального порога чувствительности и постоянной времени анализатора звуко-резонансного течеискателя, внешний вид течеискателя «ТИ-ЗОНД»:

- А) 1- звуковой излучатель; 2- приемник звуковых колебаний рабочего канала; 3 – приемник звуковых колебаний канала сравнения с воздухом рабочей зоны
 Б) Звуко-резонансный течеискатель «ТИ-ЗОНД»

В таблице №3 приведен новый расчет показателей технической эффективности D_2 средств контроля герметичности, оценка которых проводилась во второй главе с применением нового средства контроля - калиброванной контрольной течи «КТ-1», а также расчет показателя технической эффективности для разработанной системы контроля герметичности с применением звуко-резонансного течеискателя «ТИ-ЗОНД».

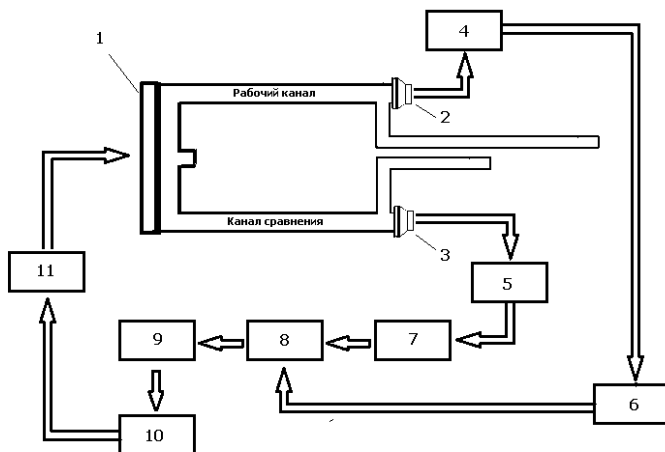


Рис. 7. Схема электронных узлов проведения эксперимента по определению минимального порога чувствительности и постоянной времени анализатора звуко-резонансного течеискателя:

А) 1- звуковой излучатель; 2,3 – приемники звуковых колебаний (электретные микрофоны); 4,5-электронные усилители; 6,7 –схемы фильтрации полезного сигнала; 8 – 2-х каналный аналого-цифровой преобразователь; 9-компьютер с программным 2-х каналным осциллографом и генератором сигналов; 10- цифро-аналоговый преобразователь; 11- усилитель аналогового сигнала

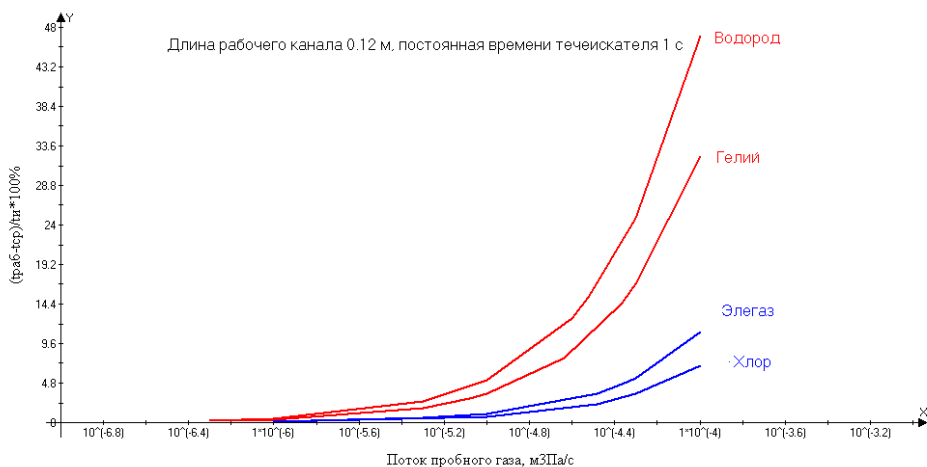


Рис. 8. Графики зависимостей изменения относительных времен пролета (по модулю) звуковых импульсов в ячейках звуко-резонансного анализатора от изменения микропотоков пробных газов (красным показаны пробные газы

уменьшающие время пролета относительно чистого воздуха, синим - увеличивающие)

Четвертая глава посвящена разработке технологии контроля герметичности с применением звуко-резонансного течеискателя «ТИ-ЗОНД» и калиброванной контрольной течи «КТ-1» диффузионного типа с возможностью калибровки ее пузырьковым способом. Производится новый расчет показателей технической эффективности D_{Σ} средств контроля герметичности, оценка которых проводилась во второй главе с применением нового средства контроля - калиброванной контрольной течи «КТ-1», а также расчет показателя технической эффективности для разработанной системы контроля герметичности с применением звуко-резонансного течеискателя «ТИ-ЗОНД». Глава сопровождается примером технологической карты проведения контроля герметичности с применением указанных средств контроля.

Технические параметры разработанных средств контроля герметичности и звуко-резонансного метода контроля приведены в таблице №2.

Таблица №2

№	Факторы влияющие на эффективность контроля герметичности при испытаниях способом щупа	Параметры созданных средств контроля (диапазон значений для максимального показателя технической эффективности D_{Σ})
1	Чувствительность течеискателя	$5 \cdot 10^{-7}$ до 10^{-4} м ³ · Па/с, устойчивая работа в условиях загазованности ОК
2	Время выхода на режим течеискателя	5 минут (≤ 6 минут)
3	Масса течеискателя	0.3 кг (≤ 1 кг,)
4	Габаритные размеры	0,35*0,15*0,10 м ($\leq 0,2-0,3$ м)
5	Пробный газ	Гелий
6	Количество дополнительных пробных газов	Все газы отличающиеся по скорости звука от воздуха (не менее трех)
7	Постоянная времени течеискателя	1 секунда (≤ 1 с)
8	Длина зондовой части щупа	0.12 м ($\geq 0,1$ м)
9	Время обучения персонала НК работе с прибором	1 день (≤ 1 день)
10	Калиброванная контрольная течь диффузионного типа	Диапазон расходов $1,3 \cdot 10^{-10}$ - $1,3 \cdot 10^{-4}$ м ³ · Па/с (калибровка пузырьковым способом, время затрачиваемое на калибровку течи не более 1 ч, срок эксплуатации до перекалибровки не менее 1 года)

Таблица №3.

№	Марка течеискателя (страна производитель)	Показатель технической эффективности D_{Σ} , рассчитанный ранее	Показатель технической эффективности D_{Σ} , рассчитанный для новых средств контроля
1	Звуко-резонансный течеискатель «ТИ-ЗОНД»	-	0.39
2	Гелиевый течеискатель GAS CHECK 3000 (Англия)	0.29	0.36
3	Течеискатель галогенный GAS CHECK 5000 (Англия)	0.23	0.23
4	Водородно-гелиевый течеискатель ТИЗ-1 "ГЕЛИН" (Россия)	0.16	0.23
5	Течеискатель метана, пропана и водорода testo 0632 (Германия)	0.22	0.22
6	Течеискатель углеводородов ITE-8900A (Бельгия)	0.22	0.22
7	УЗ течеискатель ULTRAPROBE 10000 (США)	0.21	0.21
8	Гелевый течеискатель PDH-4 (HELLING)	0.14	0.21
9	УЗ течеискатель Hellophone (HELLING)	0.19	0.19
10	Гелиевый течеискатель ТИ1-30 (Россия)	0.11	0.18
11	Течеискатель галогенный БГТИ-7/1(Россия)	0.14	0.14

Основные результаты работы.

1. Разработана методика оценки технического уровня систем контроля герметичности (в составе средств контроля которых используются течеискатели реализующие способ шупа), отражающая как их технологические, так и эксплуатационные характеристики;
2. Определена совокупность факторов, оказывающих доминирующее влияние на результат проведения контроля герметичности при использова-

нии щуповых методов испытаний. Показано, что применение нового средства проверки нижнего порога чувствительности при проведении испытаний способом (методом) щупа калиброванной контрольной течи «КТ-1» увеличивает рассчитанный показатель технической эффективности D_{Σ} для случаев гелиевого контроля на величину 0,7, что соизмеримо с самым низким показателем технической эффективности для гелиевого течеискателя «ТИ1-30» до применения указанной калиброванной течи.

3. Установлена зависимость проницаемости пробным газом для ряда исследованных в работе образцов полимерных пленок с толщинами 0,3-1 мм (имевших проницаемость по гелию $0,8-4,5 \cdot 10^{-8}$ см³см/см² с атм). Было установлено, что увеличение парциального давления от 0,1 до 0,4 МПа практически не влияло на изменение проницаемости, что свидетельствовало об отсутствии сквозного фазового потока по микродефектам структуры полимерных образцов, полная погрешность измерений укладывается в диапазон не более ± 30 %, что соответствует справочным данным. По результатам испытаний определен наиболее эффективный полимерный материал для решения поставленной задачи – политетрафторэтилен (Ф-4).

4. Разработана конструктивно-компоновочная схема калиброванной контрольной течи «КТ-1» с возможностью калибровки ее пузырьковым способом. Показано, что диапазон расходов микропотоков пробного газа гелия составляет $1,3 \cdot 10^{-10} - 1,3 \cdot 10^{-4}$ м³ · Па/с. Показано, что разработанная конструкция обеспечивает в частности уменьшение времени потребного на калибровку до одного часа. При этом время до последующей перекалибровки составляет не менее 1 года. С учётом влияния тех же конструктивных параметров и свойств полимерных материалов, получены аналитические выражения для вычисления характеристик проницаемости пробным газом полимерных пленок, обеспечивающих исключение систематической погрешности измерения микропотоков пробного газа, а также предложена оптимальная методика калибровки нижнего порога чувствительности течеискателей.

5. На основе разработанной методики оценки технического уровня систем контроля герметичности произведен анализ технических характеристик анализаторов течеискателей с лидирующими показателями технической эффективности D_{Σ} . Показано, что для разработки нового анализатора течеискателя предпочтительнее использование анализаторов изменения скорости звука (по сравнению с изменением теплопроводности бинарной газовой смеси воздух-пробный газ) как главного информационного параметра.

6. Выявлено определяющее влияние дифференциальной схемы построения анализатора разрабатываемого течеискателя, а также сечения ячейки анализатора звуко-резонансного течеискателя на чувствительность проведения контроля. Расчетным путем определено (и подтверждено экспериментально), что для потока пробного газа гелия $5 \cdot 10^{-7}$ м³ Па/с оценка $\Delta_{\text{инф}}$ должна производиться в пределах 0,2 %. При прочих равных условиях най-

дено, что обеспечение надежного выявления течей пробного газа гелия (менее $5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$) обеспечивается повышением постоянной времени течеискателя $\geq 2 \text{ с}$. Предложена конструкция, компоновка и частоты работы миниатюрного анализатора звуко-резонансного течеискателя, при которых обеспечивается минимальная чувствительность к посторонним мешающим факторам проведения контроля (повышенную помехозащищенность к ударным нагрузкам).

7. Определено, что разработанная блок-схема работы прибора при подготовительных операциях к контролю герметичности (проверка нижнего порога чувствительности течеискателя, выбор пробного газа) не превышает рассчитанный временной интервал – 5 минут для обеспечения наилучшего показателя технической эффективности D_{Σ} . Также опытным путем определено, что время необходимое для обучения данной технологии контроля не превышает рассчитанного для наилучшего показателя технической эффективности.

8. Определено, что разработанная система контроля на основе звуко-резонансного метода контроля герметичности с использованием разработанных средств контроля имеет самый высокий показатель технической эффективности $D_{\Sigma} = 0.39$.

9. Предложенный метод контроля герметичности и технология применения разработанных средств контроля легли в основу «Методические рекомендации о порядке проведения контроля герметичности технических устройств и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах».

3. СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ, ОТРАЖАЮЩИХ ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Сумкин П.С. Метрологическое обеспечение контроля течеисканием. Стандартные образцы и методы калибровки. Приборы. № 10 (136), 2011 г. С. 45-50.

2. Сумкин П.С. Неразрушающий контроль течеисканием при испытаниях «способом щупа». Контроль. Диагностика. №1 2012 г. - С.33-38.

Публикации в журналах и сборниках научных трудов, материалах конференций:

3. Сумкин П.С., Сажин С.Г., Евлампиев А.И., Шкатов П.Н., Коновалов Н.Н., Шевченко В.П., Новиков В.П., Антипов В.С., Методические рекомендации о порядке проведения контроля герметичности технических устройств и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах (решение Наблюдательного совета Единой системы оценки соответствия в области промышленной, экологической безопасности, безопасности в энергетике и строительстве от 05.04.2012 № 48-БНС), «СДОС-07-2012». (лично автором выполнено 50%).

4. Патент на изобретение № 2402003, RU, G01 M3/28, 20.10.2010 г. Диффузионная течь/ Сумкин П.С., Наумов В.Н., Полковников А.В., Горбачев В.И.; Официальный бюллетень федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам №10. - С.18. (лично автором выполнено 50%).
5. Патент на полезную модель № 90198, RU, G01 M3/28, 27.12.2009 г. Диффузионная течь/ Сумкин П.С., Наумов В.Н., Полковников А.В., Горбачев В.И.; Официальный бюллетень федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам №6. - С.26. (лично автором выполнено 50%).
6. Сумкин П.С., Наумов В.Н., Полковников А.В. Требования к портативному течеискателю для атомной энергетики. Тезисы докладов 18-ой Всероссийской научно-технической конференции «Неразрушающий контроль и техническая диагностика», Нижний Новгород, 2008 г.– С. 241-243. (лично автором выполнено 50%).
7. Сумкин П.С. Разработка методических рекомендаций о порядке проведения контроля течеисканием технических устройств и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах. Тезисы докладов 14-ой международной научно-практической конференции посвященной 75-летию МГУПИ, Москва, 2011 г. – С. 208-214.
8. Сумкин П.С., Наумов В.Н., Полковников А.В., Горбачев В.И. Проблемы дистанционного контроля герметичности контейнеров с радиоактивными отходами и отработанным ядерным топливом. Тезисы докладов 1-ой международной научно-практической конференции «Вывод из эксплуатации объектов использования атомной энергии. Концептуальные аспекты и практический опыт», лично автором выполнено 50%, Москва 2009 г.– С. 45. (лично автором выполнено 50%).
9. Шатерников В.Е., Сумкин П.С., Контроль течеисканием с использованием способа «щупа», Вестник московского государственного университета приборостроения и информатики №38, лично автором выполнено 50%, 2012 г.-С.91-99. (лично автором выполнено 75%).
10. Евлампиев А.И., Попов Е.Д., Сажин С.Г., Сумкин П.С. Течеискание. Книга – М.: Издательский дом Спектр, 2011 г. - С.208. (лично автором выполнено 50%).
11. Сумкин П.С. Сравнительный анализ средств визуального и измерительного контроля в РФ и средств оптического контроля в США. Тезисы докладов 19-ой Всероссийской научно-технической конференции «Неразрушающий контроль и техническая диагностика», Самара, 2011 г.– С.214.

Подписано в печать 16.04.2012г. Формат 60x84. 1/27.

Объем 1,0 п.л. Тираж 100 экз. Заказ

Московский государственный университет приборостроения и информатики