

АВТОРЕФ.
3-281

На правах рукописи

Занин Алексей Николаевич

УСТРОЙСТВО РЕГИСТРАЦИИ МЕСТА УТЕЧКИ ВОЗДУХА
ИЗ МОДУЛЯ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

Специальность 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники
и систем управления

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самарский Государственный
аэрокосмический университет
№ 742608
Научно-техническая библиотека

Самара–2009

004.9(043.3)

50.01

Автореферат
3-281

Работа выполнена в Самарском государственном аэрокосмическом университете имени академика С.П. Королёва (СГАУ) на кафедре радиотехники и медицинских диагностических систем

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор
Сёмкин Николай Данилович.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор
Логвинов Леонид Митрофанович.

доктор технических наук,
профессор
Кузнецов Павел Константинович.

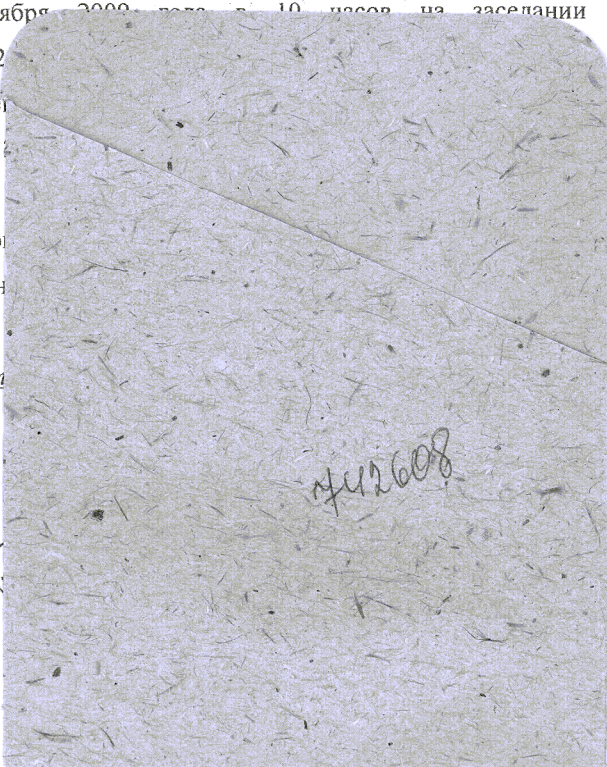
Ведущая организация: НИИ ядерной физики имени Д.В.Скобельцына,
МГУ имени М.В.Ломоносова (НИИЯФ МГУ).

Защита состоится «6» ноября 2009 года в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 201.01.01 Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва в г.Самара, Московское шоссе 34, ауд. 309.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва.

Автореферат разослан «2» октября 2009 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



1. Общая характеристика работы

Диссертация посвящена исследованию и разработке прибора для обнаружения газовых течей в корпусе космической станции (КС).

Актуальность проблемы. При длительной эксплуатации космических аппаратов (КА), орбитальных космических станций существует вероятность сквозного пробоя элементов конструкции частицами искусственного или естественного происхождения, а также образование трещин в результате различного рода напряжений и динамических нагрузок, вследствие чего происходит разгерметизация КА. Разработка аппаратуры, позволяющей быстро локализовать источники утечек воздуха, является важной задачей, как для международной космической станции, так и для некоторых типов КА, что требует создания расчетных моделей объекта исследования (источника утечки газа из модуля КС), методов и средств регистрации, методик проведения экспериментов.

Анализ работ, опубликованных в последнее время по этой теме, показывает, что развитие космической техники требует повышения достоверности обнаружения утечки воздуха истекающего из модуля космической станции и точной регистрации места возникновения течи. Возникают задачи повышения разрешающей способности прибора фиксирующего газовую течь, метода оценки характеристик газовых потоков, истекающих из микротрещин и микропробоев модуля космической станции. В связи с вышесказанным данная работа является актуальной.

Цель и задачи работы. Целью настоящей работы является разработка и создание устройства для регистрации места утечки воздуха, истекающего из модуля космической станции.

В соответствии с поставленной целью определены и основные задачи диссертации, а именно:

1. Анализ существующих методов и устройств обнаружения места утечки воздуха из модуля космической станции;
2. Анализ и разработка математической модели истечения струи газа из модуля космической станции;
3. Разработка алгоритмических и программных средств моделирования процесса истечения воздуха из отсека КС и создание моделей процессов регистрации газовых течей в корпусе КС;
4. Экспериментальное исследование процессов регистрации утечки воздуха в лабораторных условиях;
5. Создание многопараметрического преобразователя с распределенными функциональными возможностями.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1 Разработана физико-математическая модель истечения газа из замкнутого объёма в вакуум для случаев различных каналов, щели, а также при наличии ЭВТИ позволяющая получить зависимости потока газа от параметров источников утечки в пространстве и времени.

2 На основе известных методов и устройств, основанных на различных физических принципах выполнен структурный синтез произвольной совокупности измерительных преобразователей сложных систем, позволяющий найти оптимальную по заданным критериям совокупность методов регистрации утечки воздуха из модуля космической станции.

3 На основе анализа выбранной системы уравнений и соответствующих устройств разработана математическая модель взаимодействия потока воздуха с многопараметрическим устройством регистрации утечки с учетом наличия экранно-вакуумной теплоизоляции (ЭВТИ)

Разработанная модель позволяет определить технические возможности выбранной совокупности датчиков при обнаружении утечки в условиях приближенных к реальным.

Практическая значимость результатов работы определяется следующим:

- исследованы на практике возмущающие факторы истечения газа из модуля КС;
- разработана методика проведения эксперимента по обнаружению места утечки из модуля КС;
- теоретически и экспериментально исследованы зависимости концентрации газа от расстояния до источника течи и начального давления внутри КС;
- разработан и экспериментально исследован прибор регистрации газовых течей.
- разработана методика процесса поиска источника течи в режиме диалога;
- показана возможность точного определения области истечения газа из корпуса КС.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 26 печатных работ, из них 5 – в изданиях, рекомендуемых ВАК России, получен патент на изобретение.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

- анализ существующих методов и устройств регистрации места утечки воздуха из модуля космической станции;
- модели истечения струи и регистрации ее параметров;
- алгоритмические и программные средства моделирования процесса истечения воздуха из отсека КС для различных случаев дефекта ЭВТИ;
- программные средства, позволяющие определить оптимальный состав многопараметрического датчика;
- результаты экспериментов с различными видами натекателей;
- методы определения газовых течей в конструкции корпуса КС;
- устройство регистрации места утечки воздуха из модуля космической станции.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на 9-ти международных и всероссийских и на трех студенческих научно-технических конференциях.

Личный вклад соискателя: все основные оригинальные результаты, на которых базируется диссертация, получены автором.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа изложена на 177 страницах машинописного текста, иллюстрируется 121 рисунками и 11 таблицами и состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 105 наименований.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность темы, сформулированы цели и задачи научных исследований. Рассматриваются достоинства и недостатки существующих методов поиска течей.

Первая глава посвящена сравнительному анализу технических возможностей различных методов и средств регистрации места утечки. В результате анализа различных средств регистрации было получено:

1 Определение места утечки КА на основе использования его системы управления эффективно при больших размерах отверстий.

2 Анализ устройств на основе использования лазера и электронной пушки показывает на возможность получения достаточного для регистрации количества ионов при значительных габаритах, массы и потреблении таких устройств.

3 Более предпочтительным с точки зрения максимального удовлетворения требованиям, предъявляемым к такого рода аппаратуре, является применение электронных пушек, являющихся элементом, например, масс-спектрометра, или ионизационного датчика.

4 С точки зрения высокой надежности, более полной информации об исследуемом объекте, наиболее перспективным является создание многоинформативных преобразователей.

5 Создание малогабаритных, малопотребляющих датчиков на основе микроэлектронных, микрополосковых, МДМ-, МДП- структур для решения проблемы обнаружения утечки воздуха из КА может быть перспективным при решении вопросов повышения их чувствительности к потоку газа из источника течи.

6 Важной проблемой, характерной для любых из рассмотренных методов и устройств является создание системы обработки информации функционирующей на фоне различного рода шумов космической станции.

Вторая глава посвящена построению математической модели истечения газа из различных типов отверстий и математической модели многопараметрического преобразователя.

Модели истечения газа из замкнутого объема в вакуум

При обнаружении утечки воздуха из модуля КС практический интерес представляют: поток газа через отверстие в плоской бесконечно тонкой и не ограниченной по размерам пластине, в длинных и коротких каналах с круговым и не круговым сечением, а также поток газа через щель и через ЭВТИ. Результатом моделирования являются зависимости параметров газовых струй от характеристик канала, щели с учетом динамики модуля КС.

Основой для расчета потока газа через отверстие является уравнение Менделеева-Клапейрона

Поток зависит, в том числе, от геометрических параметров отверстия, в частности, от длины канала (в нашем случае, толщины обшивки КА ~ 2 мм).

Наиболее вероятными являются два типа источника течи: сквозной пробой микрометеороидом или частицами космического мусора, либо щель, образующаяся при повреждении обшивки КС в результате старения конструкции или каких-либо импульсных нагрузок. Поток воздуха I в этих случаях, инициируемый местом утечки воздуха описывается для отверстия и щели с вязкостным истечением, соответственно, уравнениями:

$$I_{отв} = \left\{ \frac{2}{1 - \frac{P_0 - P_{ВЫХ}}{P_0 + P_{ВЫХ}}} \exp \left(-2P_{ВЫХ} \frac{m_0 \pi R D^4}{kMV 256\eta L} \tau \right) \right\}, I_{щ} = \frac{b^2 (P_0^2 - P_{ВЫХ}^2)}{2\eta L} \left\{ \frac{a^2}{8} + \frac{b}{2} b \ln \left(\frac{\frac{a}{2} + b}{b} \right) - \frac{a}{2} \right\} \frac{m_0}{kT}, \quad (1)$$

где P_0 , $P_{ВЫХ}$ – давления внутри КА и на выходе отверстия, соответственно, $k = 1,0352 \cdot 10^{-19}$ Тор·см³/К, $T = 293$ К, $v_{ар}$ – средняя арифметическая скорость молекул в газе, m_0 – молекулярная масса газа, D – диаметр отверстия, a , b – геометрические размеры щели.

Моделирование потока газа через ЭВТИ

ЭВТИ представляет собой слоистую структуру, причем первый и последний слои выполняются из синтетической ткани рисунок 1 и внутренние слои, которые представляют собой полимерные пленки с отверстиями диаметром 2 мм и расположенные на расстоянии 1 см друг от друга (рисунок 2).

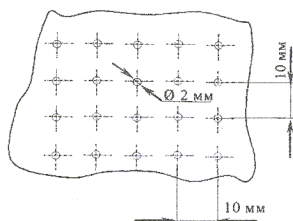
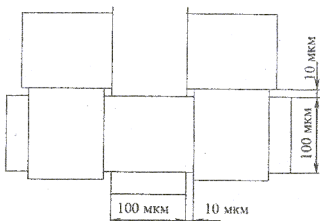


Рисунок 1 – Форма отверстий в ячеистой структуре ЭВТИ.

Рисунок 2 – Форма отверстий в полимерной пленке структуры ЭВТИ.

Толщина пленки составляет 100 мкм, поэтому в расчетах ею пренебрегают. Расстояние между слоями ЭВТИ и обшивкой КА считается равным 0,5 – 1 мм.

Каждое отверстие в пленке рассматривается как вторичный источник распространения фронта воздушной волны полусферической формы, причем давление зависит от расстояния между ним и отверстием предыдущего слоя, а также давлениями в этих отверстиях. Первым и начальным источником является дефект в обшивке космического аппарата. Полученный таким образом профиль давления представляет собой суперпозицию профилей давлений во внешнем слое экранно-вакуумной теплоизоляции. При этом форма распространения молекул воздуха приобретает эллиптичность за счет перераспределения в слоях ЭВТИ.

Синтез многопараметрического преобразователя

Изучение объекта исследования, и рассмотрение возможных методов и средств поиска места течи, позволяет сделать вывод, что использование какого-либо одного из них не обеспечивает перекрытия всего диапазона давлений, создаваемых различными утечками. Для решения данной проблемы применено комплексирование методов регистрации, использующих несколько датчиков. Однако создание таких систем связано с определенными трудностями и первая из них – решение вопроса о том, какие датчики должны войти в измерительный комплекс.

Из большого числа всех вариантов, полученных в результате проектирования можно синтезировать наилучший, с точки зрения предъявленных к нему требований. Для правильного выбора необходимо ввести количественную оценку. Для этого вводится некоторая функция $F(z)$, называемая функцией цели. Вид функции выбирается таким, чтобы оптимальный вариант имел минимальное значение функции цели. Для получения оптимальной по заданным параметрам структуры комплекса датчиков проведен структурный синтез произвольной совокупности измерительных преобразователей сложных систем.

Существует множество функций целей, наиболее распространенными среди которых являются линейные функции и как пример функция взвешенных сумм

$$F_{ц} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k [\alpha_j |P_{ij} - P_{j\text{опт}}|] \quad (2)$$

где i – номер датчика, j – номер параметра i -го датчика, α_j – весовой коэффициент j -го параметра, $P_{j\text{опт}}$ – оптимальное значение j -го параметра, P_{ij} – значение j -го параметра для i -го датчика. Весовые коэффициенты задаются априорно. Минимальное значение $F(z)$ будет соответствовать выбранной совокупности уравнений, обеспечивающей максимальную точность измерения.

Поиск минимума целевой функции должен осуществляться в пределах допустимой области, которая должна удовлетворять следующим условиям:

- 1 Условие выполнения наложенных ограничений на массу, габариты и потребляемую мощность;
- 2 Условие полноты, состоящее в том что система уравнений, входящих в Ω_0 , должна разрешаться относительно заданных параметров объекта исследования, то есть число уравнений должно соответствовать числу неизвестных.
- 3 Условие совместимости датчиков, которым соответствуют вектора $\vec{z} \in \Omega_j$.

Выбранная совокупность описывается уравнениями:

$$U_T = \sum_{i=0}^n a_i p^i, \quad U_{II} = \frac{\int_{-\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}} U(t) dt}{\int_0^T U(t) dt}, \quad U_{\Sigma} = \left[\frac{\sigma_1 x_1 - x_0}{\varepsilon_0 x_1 + \varepsilon_1 x_0} \right], \quad (4)$$

где U_T , U_{II} , U_{Σ} – напряжение на термопарном, ионизационном и электретном датчиках соответственно; a_i – коэффициенты степенного ряда; $U(t)$ – напряжение с приемника ионов; T – время регистрации спектральной линии; t_0 – ширина спектральной линии; x_0 – расстояние между обкладками в состоянии покоя; x_1 – толщина электрета; $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; ε_1 – относительная проницаемость; σ_1 – плотность заряда.

Чувствительность пьезоэлектрического датчика ограничивает зону регистрации течи единицами сантиметров для отверстий диаметром менее 0,5 мм и щелей длиной порядка 10 мм и шириной до 0,5 мм при наличии слоя ЭВТИ. Данные выводы верны при нормальном давлении внутри КА.

Термопарный датчик позволяет обнаруживать источники течи (каналы, под ЭВТИ, в том числе и при наличии сквозного пробоя в ЭВТИ) диаметрами порядка 0,1-0,5 мм в радиусе до 50 см, для более крупных отверстий (щелей), зона обнаружения может достигать 1-1,5 м и более.

Ионизационным датчиком можно обнаружить большинство источников утечек диаметром 0,1-0,5 мм в радиусе до 0,5-1 м, в зависимости от уровня шумов. Более крупные источники можно обнаружить в зоне до 5м. Для этого типа датчиков существенным является наличие шумов. Они, в частности, резко ограничивают зону чувствительности, так как потоки от малых (до 0,1 мм) и средних (0,1 – 0,5мм) каналов перекрываются шумовыми потоками уже на расстоянии 0,5-1,5 м. Выходом из сложившейся ситуации может служить использование датчиков на базе масс-спектрометра (с учетом специальной доработки), в качестве приемника которого используется ВЭУ-7.

Значения шумов СВА взяты приблизительно 10^5 мм.рт.ст. и 10^6 мм.рт.ст.

Анализ многопараметрического преобразователя

Построена модель поиска места утечки воздуха из модуля КС с соответствующими допущениями (рисунок 3).

Результаты расчетов приведены на рисунке 4.

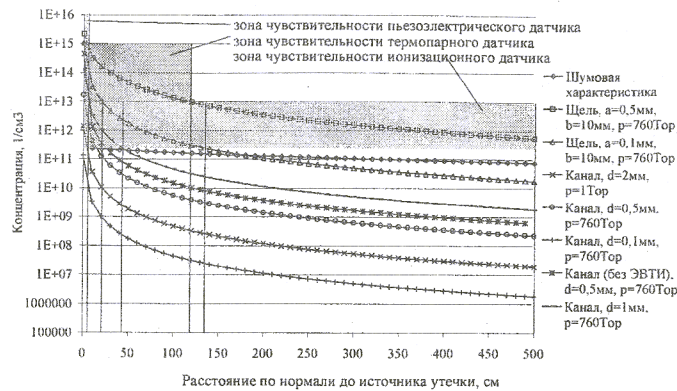


Рисунок 3 – Зоны чувствительности выбранных датчиков в зависимости от концентрации p воздуха на расстоянии R по нормали к источнику утечки до источника утечки. Обшивка КА покрыта ЭВТИ. Параметры КА: объем 180 м^3 , температура 293 К , тип газа – воздух (29 г/моль), давление внутри КА p , толщина обшивки КА 2 мм . Шумы – 10^{-5} Тор при $r = 20 \text{ см}$.

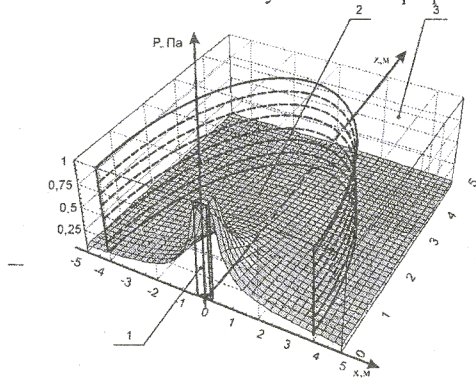


Рисунок 4 – Зоны работы датчиков при поиске течи от канала $D = 0,5 \text{ мм}$. 1 – зона работы электретного датчика, 2 – зона работы термопарного датчика, 3 – зона работы масс-сепаратора.

Из рисунка 4 видно, что поиск следует начинать при помощи масс-сепаратора, затем при помощи термопарного датчика, и на последнем этапе при помощи электретного микрофона. Однако при поиске малых течей электретный датчик становится неинформативным и исключается из алгоритма поиска.

Таким образом, представляется возможным определить место утечки воздуха. Однако остаются вопросы, связанные с точностью определения места и параметрами самого дефекта. Для их решения необходимо ввести ещё один измеряемый параметр, а именно, расстояние R от источника до преобразователя.

$$\begin{cases} U'_T = \frac{1}{-1,606 \times 10^{-5} p^2 + 0,005 p + 0,105} \\ U'_H = 392415,813 p^3 - 1446,813 p^2 + 242,112 p - 0,0001 \\ U'_3 = -2,78 \times 10^{-14} p^3 + 5,07 \times 10^{-9} p^2 + 5,229 \times 10^{-6} p + 0,199 \end{cases} \quad (5)$$

где U'_T , U'_H , U'_3 – значения уровня сигнала с термопарного, ионизационного и электретного датчиков, соответственно, p – давление газа.

В третьей главе приведены результаты экспериментального моделирования взаимодействия потока воздуха с прибором для определения параметров утечки воздуха из модуля КС.

Для проведения экспериментов с многопараметрическим преобразователем параметров струи газа разработан экспериментальный стенд. За основу взят ионизационный датчик, использующийся в режиме сепарации масс. Диапазон его работы – $1,33 \cdot 10^{-2} \div 1,33 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$, что позволяет определять малые значения потоков газа. Для расширения динамического диапазона регистрации давления газа, выходящего из отверстия, в преобразователь введены термопарный и микрофонный датчики. Структурная схема прибора приведена на рисунке 5.

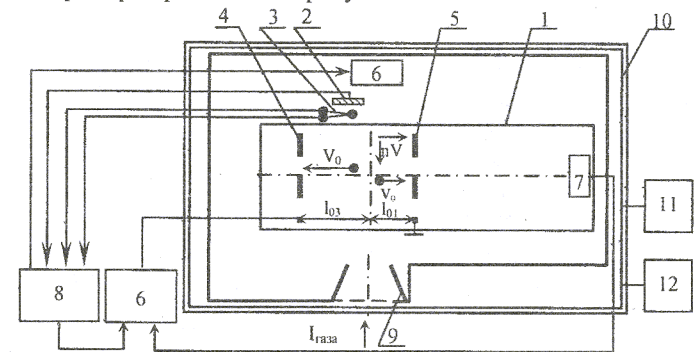


Рисунок 5 – Структурная схема прибора для регистрации места утечки воздуха из модуля международной космической станции

1 – масс-сепаратор с широким диапазоном масс; 2 – микрофонный датчик; 3 – термопарный датчик; 4 – выталкивающая сетка; 5 – заземляющая сетка; 6 – источник электронов; 7 – приемник ионов; 8 – блок обработки и индикации; 9 – приемная камера; 10 – вакуумная камера; 11 – система откачки воздуха; 12 – вакуумметр

Для проведения экспериментов в области давлений более $1,33 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$ разработан экспериментальный стенд, состоящий из вакуумной камеры, с подключенной к ней системой откачки воздуха. Для имитации течи в стенке вакуумной камеры установлен натекатель с устройством управления. Внутри вакуумной камеры напротив натекателя установлен многопараметрический преобразователь.

Для имитации различных уровней течей были изготовлены несколько натекателей.

В режиме работы термопарного датчика получена зависимость давления потока p от расстояния по нормали к источнику утечки до источника (рисунок 7).

Результаты экспериментов показали на удовлетворительное совпадение характера экспериментальной кривой с теоретическими расчетами в случае отсутствия ЭВТИ, что подтверждает теоретические расчеты.

В режиме работы микрофонного датчика была исследована зависимость выходного напряжения датчика от начального давления в камере при различных величинах потоков воздуха (рисунок 8).

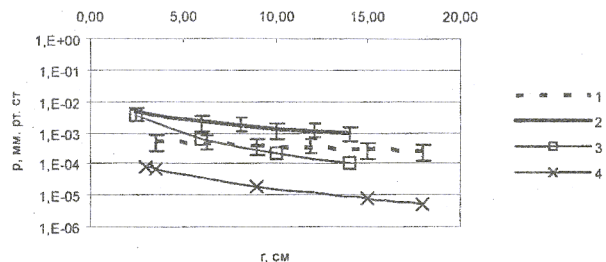


Рисунок 7 – Экспериментальные и теоретические зависимости для термпарного датчика
1, 3 – экспериментальные зависимости с ЭВТИ и без ЭВТИ соответственно; 2, 4 – теоретические зависимости с ЭВТИ и без ЭВТИ соответственно. Параметры отверстия: длинный канал, $l = 2,43 \cdot 10^{-1} \text{ Па} \cdot \text{л} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$, температура 293К, тип газа – воздух ($M = 29 \text{ г/моль}$), начальное давление внутри вакуумной камеры 1 Па.

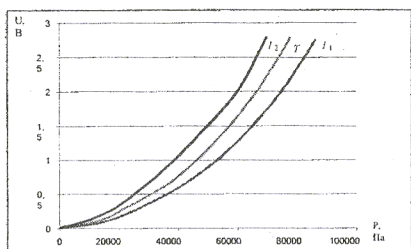


Рисунок 8 – Зависимость напряжения выходного сигнала микрофонного датчика от начального давления в камере
 $I_1 = 3,3 \cdot 10^{-1} \text{ Па} \cdot \text{л} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$; $I_2 = 5,45 \cdot 10^{-2} \text{ Па} \cdot \text{л} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$; T – теоретическая зависимость

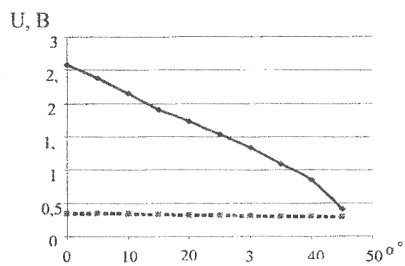


Рисунок 9 – График зависимости выходного сигнала микрофонного датчика U от угла направления на источник течи. Пунктирной линией показан график зависимости с ЭВТИ в качестве преграды перед потоком. Начальное давление $p = 133 \text{ Па}$, $F = 1,1 \cdot 10^{-1} \text{ Па} \cdot \text{л} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$

Для исследования чувствительности микрофонного датчика в зависимости от его углового положения к нормали оси струи прибор в камере был установлен на штатив с возможностью его поворота.

В случае наличия ЭВТИ в качестве преграды, датчик не обнаруживает разности сигнала, так как источник звукового сигнала сильно приглушен.

Проведена серия экспериментов для определения формы струи, истекающей из натекателя, диаграмма направленности струи воздуха изображена на рисунке 10

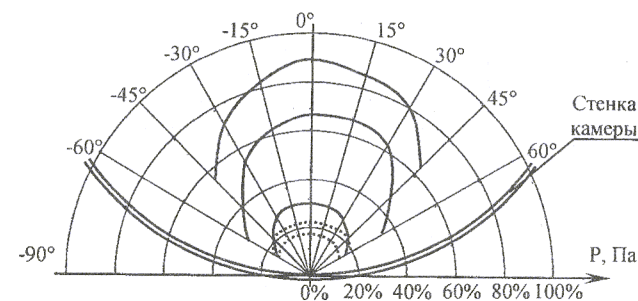


Рисунок 10 – Диаграмма направленности струи

Эксперименты для подтверждения возможности использования ионизационного датчика в режиме сепарации масс для моделирования процесса поиска места утечки из модуля космической станции проводились в РКК "Энергия" в вакуумной камере объемом 190 м^3 и остаточным давлением в испытательной камере $1,33 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$.

Стенд (рисунок 11) содержит вакуумную камеру $\sim \varnothing 6$ метров, в которую введены длинные каналы с капиллярами К1 и К2. К1 закрыт слоями ЭВТИ для имитации покрытия модуля КС. Давление воздуха в них регулируется манометром.

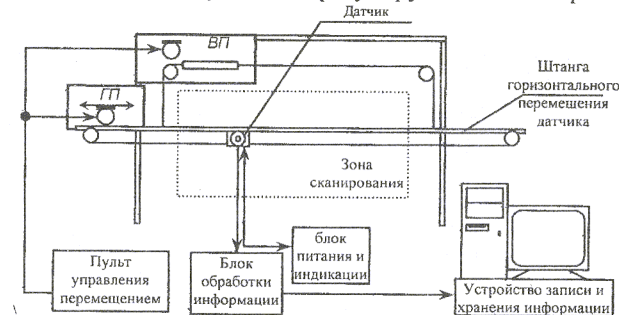


Рисунок 11 – Схема экспериментальной установки

Ниже показаны сигналы с ионизационного датчика в процессе его перемещения по горизонтали без ЭВТИ (рисунок 12) и с ЭВТИ (рисунок 13) относительно капилляров. Величина потока составляла $1,1 \cdot 10^{-1} \text{ Па} \cdot \text{л} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$. Максимальное значение сигнала соответствует совмещению оси прибора с осью капилляра. Наличие других максимумов объясняется попаданием в ионизационный датчик отраженных от стенок вакуумной камеры частиц воздуха, а также возможными турбулентностями струи газа из капилляра и в связи с этим неравномерностью углового распределения струи.

Графики получены с помощью специально разработанной аппаратуры и ЭВМ. Дискретность записи в ЭВМ составляла 2000 значений в секунду.

Натекающий контрольный поток воздуха создает дополнительный фон к естественному шумовому фону в камере. Чем больше этот дополнительный фон, тем труднее с ним справиться насосам, откачивающим из камеры воздух.

Проведена серия экспериментов для определения зоны неопределенности при определении места утечки.

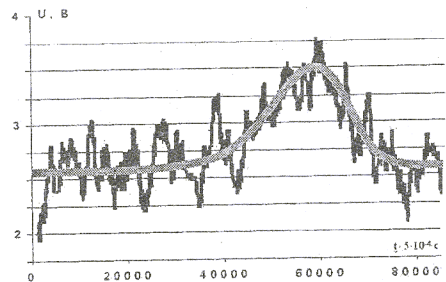


Рисунок 12 – Зависимость выходного сигнала от времени при продвижении датчика по горизонтали справа налево

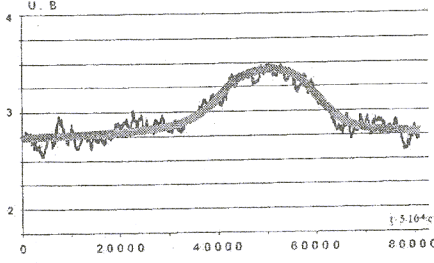


Рисунок 13 – Зависимость выходного сигнала от времени при продвижении датчика по горизонтали, капилляр обернут ЭВТИ, натекание $5,5 \cdot 10^{-1}$ Па·л·с $^{-1}$ ·м $^{-2}$

Рама с устройством перемещения устанавливалась на различных расстояниях (2,0; 1,5; 1,0; 0,5 м), и производилось сканирование квадрата размером 2x2 м, по результатам измерений построены объемные графики чувствительности прибора (рисунки 14, 15).

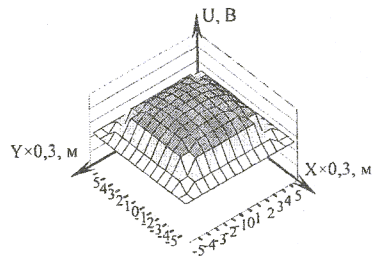


Рисунок 14 – График зависимости выходного сигнала масс-сепаратора от координат X, Y на расстоянии Z=2,0 м

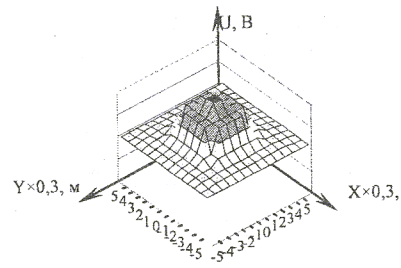


Рисунок 15 – График зависимости выходного сигнала микрофонного датчика от координат X, Y при расстоянии Z=0,5 м

1. Разработанный прибор может обнаруживать источник течи с величиной потока от 10^{-3} до $700 \text{ Па} \cdot \text{л} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$.
2. Масс-спектрометрический сепаратор позволяет обнаруживать источники утечки воздуха из КА через отверстия $\varnothing 0,1-0,5 \text{ мм}$ на расстоянии до 1-1,5 м. Метод сепарации позволяет значительно уменьшить влияние шумов СВА КА, на процесс обнаружения места утечки и точнее локализовать место течи при слабых потоках воздуха из источника течи (30 мТорр/с и менее).
3. Микрофонный датчик позволяет обнаруживать источник течи с величиной потока от 133 до $700 \text{ Па} \cdot \text{л} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$. Также микрофонный датчик определяет вектор направления на источник течи.

Четвертая глава посвящена анализу погрешностей. Рассмотрены классификация погрешностей, основные причины появления различных погрешностей и их вклад в суммарную погрешность.

Разработана методика поиска места утечки воздуха из международной космической станции, позволяющая уменьшить зону неопределенности местонахождения течи.

Предлагается сначала провести серию измерений на большом расстоянии от обшивки КА (примерно 2 – 3 метра). Все измерения выполняются на одной высоте от обшивки, таким образом, координата Z для всех точек матрицы постоянна. В случае обнаружения максимума в матрице [P2] необходимо провести измерения давлений на меньшем расстоянии от обшивки модуля, так как направление струи воздуха может

быть отличным от нормали к обшивке. За начало координат принимается первая точка измерения. Так как схема измерений аналогична для координаты X и Y, то процесс вычисления можно представить на плоскости (рисунок 16).

Координаты точки B (X_b, Y_b, Z_b):

$$\begin{cases} X_b = X_1 - \frac{(X_2 - X_1)(Z_2 - Z_1)}{Z_1} \\ Y_b = Y_1 - \frac{(Y_2 - Y_1)(Z_2 - Z_1)}{Z_1} \\ Z_b = Z_2 \end{cases} \quad (6)$$

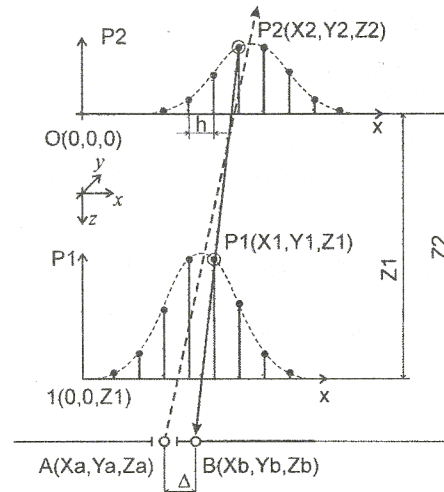


Рисунок 16 – Схема определения места утечки воздуха из модуля МКС.

Максимальное смещение истинных координат максимума от измеренных составит при цифровой обработке половину шага, а именно $h/2$. Максимальная погрешность будет определяться как:

$$\Delta_{\text{ит}} = \sqrt{(X_a - X_b)^2 + (Y_a - Y_b)^2} = h\sqrt{2} \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1} + \frac{1}{2} \right) \quad (7)$$

При шаге сканирования равном 15 см, максимальная погрешность составит 12,5 см.

В пятой главе приведена конструкция и внешний вид устройства обнаружения места утечки воздуха из космической станции, рассмотрены конструктивно-технологические особенности построения датчиков преобразователя газовых потоков.

Приведены описания конструкции датчиков, и всего преобразователя в целом.

Внешний вид преобразователя показан на рис.5

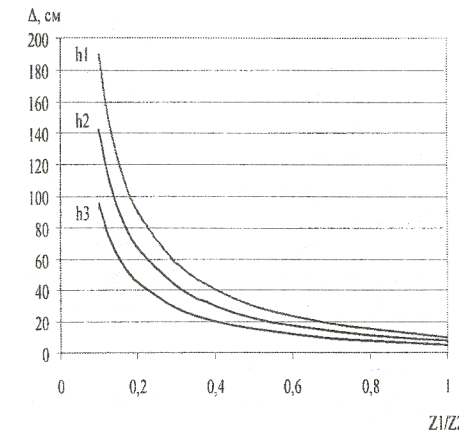


Рисунок 17 – Зависимость погрешности Δ от соотношения Z1/Z2

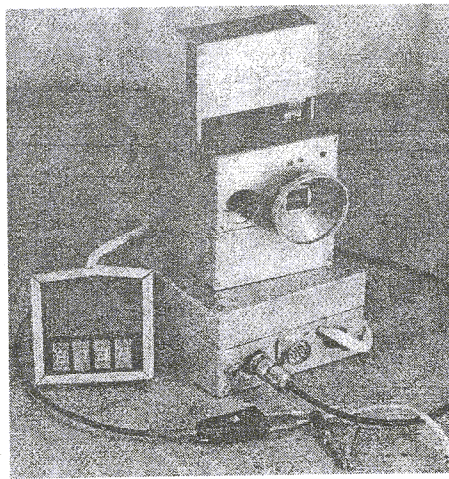


Рисунок 18 – Внешний вид преобразователя газовых потоков

Преобразователь имеет одно окно для проникновения газа в область ионизации, другое окно снабжено насадкой для уточнения места течи. Многопараметрический датчик обладает следующими параметрами:

Диапазон регистрируемых потоков от $1,6 \cdot 10^{-2}$ Пал·с⁻¹·м⁻²,

Что соответствует течи диаметром 0,1 мм в обшивке толщиной 2 мм при давлении внутри космического аппарата 1 атм.

Максимальное расстояние регистрации минимального потока при давлении внутри космического аппарата 1 атм., с учетом СВА 2,0 м

Масса: 0,4 кг

Энергопотребление: 1,5 Вт

Габариты: датчиковый блок (в сложенном состоянии) 84×80×66 мм

Время автономной работы прибора 3 часа.

2. Основные результаты работы и выводы

1 На основании проведенного анализа произведен выбор наиболее перспективных средств регистрации места утечки воздуха из космической станции

2 Разработана теоретическая модель объекта исследования для канала и щели с внутренним и сквозным истечением в ЭВТИ.

3 На основе известных методов и устройств, основанных на различных физических принципах выполнен структурный синтез произвольной совокупности измерительных преобразователей сложных систем, позволяющий найти оптимальную по заданным критериям совокупность методов регистрации утечки воздуха из модуля космической станции.

4 На основе анализа выбранной системы уравнений и соответствующих устройств разработана математическая модель взаимодействия потока воздуха с многопараметрическим устройством регистрации утечки с учетом наличия экранно-вакуумной теплоизоляции (ЭВТИ), позволяющая найти возможности регистрации утечки воздуха с помощью разработанных аппаратных средств, с учетом шумовой характеристики собственной внешней атмосферы космического аппарата.

5 Проведены лабораторные эксперименты с датчиками преобразователя (масс-сепаратор, термопарный и пьезоэлектрический), в вакуумной камере при различных натеканиях воздуха, подтверждающие работоспособность прибора в рассматриваемом диапазоне потоков воздуха.

6 Разработана методика поиска места утечки, позволяющая оптимизировать процесс обнаружения утечки.

7 Сравнительный анализ теоретических моделей и проведенных экспериментов показал адекватность разработанной физико-математической модели и правомерность принятых допущений.

8 Разработаны аппаратные средства регистрации места утечки воздуха из модуля космической станции, на основе многопараметрического преобразователя.

9 Разработан экспериментальный стенд для тарировки устройства в натуральных условиях, позволяющий отработать методику в реальных космических условиях.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

В изданиях рекомендуемых ВАК России:

1. Семкин, Н.Д. Метод определения места утечки воздуха из модулей космической станции [Текст]/ Н.Д.Семкин, К.Е.Воронов, Д.Г.Бобин, А.Н.Занин// Метрология, 2000, №8, с.32
2. Ананьин, А.А. Моделирование процессов утечки газа из модуля космического аппарата [Текст]/ А.А.Ананьин, А.Н.Занин, Н.Д.Семкин//Измерительная техника, 2001, №4, с29-32.
3. Семкин, Н.Д. Прибор для обнаружения места утечки газа из модуля космического аппарата [Текст]/ Н.Д.Семкин, К.Е.Воронов, А.Н.Занин, А.А.Кириллов//Приборы и техника эксперимента, 2003, №5, с. 141-146
4. Семкин, Н.Д. Методы и средства определения утечки воздуха из модулей космической станции [Текст]/ Н.Д.Семкин, К.Е.Воронов, А.Н.Занин, И.В.Пияков//Прикладная физика, 2006, №2, с.108-121
5. Семкин, Н.Д. Времяпролетный масс-спектрометр для обнаружения места утечки воздуха из модуля космического аппарата [Текст]/ Н.Д.Семкин, А.Н.Занин, И.В.Пияков, К.Е.Воронов//Приборы и техника эксперимента, 2007, №1, с.116-120

В других изданиях:

6. Занин, А.Н. Структурный синтез оптимальной информационной системы для контроля параметров микрочастиц [Текст]/ А.Н.Занин//Первая международная молодежная школа-семинар "БИКАМП'98". Тезисы докладов. Санкт-Петербург. Издательство Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, 1998, 86 с.
7. Модель определения места пробоя обшивки космического аппарата. [Текст]/ А.А.Ананьин, А.Н.Занин, Н.Д.Семкин //Вестник Самарского Государственного Аэрокосмического Университета имени академика С.П. Королёва. Выпуск 3, Самара, 2000, с. 23 – 28.
8. Многопараметрический преобразователь параметров струи газа из модуля космической станции [Текст]/ А.Н.Занин//Вестник Самарского Государственного Аэрокосмического Университета имени академика С.П. Королёва. Выпуск 3, Самара, 2000, с. 40 – 42.
9. Моделирование процессов утечки газа из модуля космического аппарата [Текст]/ А.А.Ананьин, А.Н.Занин, Н.Д.Семкин //Вестник Самарского Государственного Аэрокосмического Университета имени академика С.П. Королёва. Выпуск 4, Самара, 2000, с. 37 – 43.
10. Занин, А.Н. Ионизационный датчик для регистрации параметров газовой струи из модуля КА [Текст]/ А.Н.Занин//50 студенческая научно-техническая конференция. Тезисы докладов. СГАУ, Самара, 2000 г., с. 43-44.
11. Ананьин, А.А. Перспективы развития времяпролетных масс-спектрометров для исследования пылевых и газовых частиц в космических условиях [Текст]/ А.А.Ананьин, Р.А.Помельников, А.Н.Занин, С.В.Мясников//Международная конференция. Тезисы докладов. Самара, СГАУ, 2000 г., с. 55.
12. Ананьин, А.А. Оценка влияния возможных утечек воздуха из гермоотсеков на динамику КА "Фотон"/"Бион" [Текст]/ А.А.Ананьин, А.Н.Занин//Международная конференция. Тезисы докладов. Самара, СГАУ, 2000 г., с. 45.
13. Balakin, V.L. Impact of space debris on international space station: methods and means of detection of a place of depressurization [Текст]/ V.L.Balakin, I.V.Belokonov, N.D.Semkin, K.E.Vorono, V.

14. Прибор для определения состава газовых потоков [Текст]/ А.Н. Занин, И.В. Пияков// Вестник Самарского Государственного Аэрокосмического Университета имени академика С.П. Королёва. Выпуск 5, Самара, 2001, с. 18 – 21.
15. Математические модели истечения воздуха из модуля космической станции [Текст]/ А.А.Ананьин, К.Е.Воронов, А.Н.Занин//Вестник Самарского Государственного Аэрокосмического Университета имени академика С.П. Королёва. Выпуск 6, Самара, 2001, с. 47 – 56.
16. Воздействие космического мусора на орбитальные пилотируемые космические модули: методы и средства обнаружения места разгерметизации [Текст]/ К.Е.Воронов, А.Н.Занин, Н.Д.Семкин//Международная космическая конференция – 2001 "Космос без оружия – арена мирного сотрудничества в XXI веке". Тезисы докладов. –М.: Изд-во МАИ, 2001, 204 с.
17. Кудряшов, А.А. Сепарация ионных пакетов во время пролета масс-спектрометре. [Текст]/ А.А.Кудряшов, А.Н.Занин. XXVII Самарская областная студенческая научная конференция, Самара 18-28 апреля 2001г.
18. Воронов, К.Е. Прибор для обнаружения места утечки воздуха из космического аппарата [Текст]/ К.Е.Воронов, А.Н.Занин, И.В.Пияков//Управление движением и навигация летательных аппаратов: сб. тр. X Всерос. научн.-техн. семинара по управлению движением и навигации летательных аппаратов, СГАУ, Самара, 2002, с. 256-259.
19. Воронов, К.Е. Прибор для регистрации утечки воздуха из модуля космической станции [Текст]/ К.Е.Воронов, А.Н.Занин, Н.Л.Боговяленский//Третья международная народно-практическая конференция «Современные информационные и электронные технологии». Тезисы докладов, Одесса, Украина, 2002 г., с. 56.
20. Семкин, Н.Д. Многопараметрический преобразователь утечки газа из модуля международной космической станции [Текст]/ Н.Д.Семкин, А.Н.Занин, К.Е.Воронов, М.А.Назимов, А.А.Кириллов//Научно-техническая конференция. Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления «Датчик-2003». Тезисы докладов, Москва, 2003г., с. 112.
21. Воронов, К.Е. Обнаружение и регистрация утечки воздуха из международной космической станции [Текст]/ К.Е.Воронов, А.А.Кириллов, А.Н.Занин, И.В.Пияков//II-я Международная научно-техническая конференция «Физика и технические приложения волновых процессов». Тезисы докладов, Самара, СГАУ, 2003 г. с. 67.
22. Занин, А.Н. Метод и средство регистрации утечки воздуха из модуля космического аппарата [Текст]/ А.Н.Занин, К.Е.Воронов, Н.Д.Семкин//Всероссийская научно-техническая конференции «Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций». Тезисы докладов, Самара, СГАУ, 2005г., с. 44.
23. Пияков, И.В. Прибор для регистрации места утечки воздуха из Международной космической станции [Текст]/ И.В.Пияков, А.Н.Занин//V Международная научно-техническая конференция «Физика и технические приложения волновых процессов». Тезисы докладов, Самара, СГАУ, 2006 г., с. 58.
24. Пияков, И.В. Многопараметрический течеискатель для регистрации мест утечки воздуха из международной космической станции [Текст]/ И.В.Пияков, А.Н.Занин// VII Международная научно-техническая конференция «Физика и технические приложения волновых процессов». Тезисы докладов, Самара, СГАУ, 2008 г. с. 68.
25. Пияков, И.В. Многопараметрический течеискатель для регистрации мест утечки воздуха из международной космической станции (МКС) [Текст]/ И.В.Пияков, А.Н.Занин// Международная конференция SPEXP. Тезисы докладов, Самара, СГАУ, 2008г., с. 78.
26. Пияков, И.В. Автоматизация процесса поиска места утечки воздуха из модулей космической станции [Текст]/ И.В.Пияков, А.Н.Занин//Материалы Всероссийской научно-технической конференции "Актуальные проблемы ракетно-космической техники и её роль в устойчивом социально-экономическом развитии общества", посвященной 50-летию образования ЦСКБ и 90-летию со дня рождения Д.И.Козлова (28 сентября – 3 октября 2009г., г.Самара, под общей ред. А.Н.Кирилина, СамНЦ РАН – Самара 2009г., с.157.
27. Пат. 46128 Российская Федерация, Пылеударный масс-спектрометр [Текст]/ Пияков И.В., Воронов К.Е., Занин А.Н., Помельников Р.А., бюл. №16 от 10.06.2005.

Отпечатано с готового оригинал-макета

Подписано в печать 25.09.09

Формат 60x84 1/16 Бумага офсетная

Тираж 100 экз.