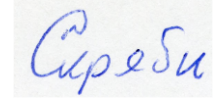


На правах рукописи



СКРЯБНЕВ АРТЕМ ЮРЬЕВИЧ

**ВАКУУММЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД МОНИТОРИНГА
ГЕРМЕТИЧНОСТИ КРУПНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ**

Специальность: 05.04.06 – «Вакуумная, компрессорная техника и
пневмосистемы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2012

Работа выполнена на кафедре «Информационная машиностроительная технология» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Розанов Леонид Николаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,
Кузьмин Валерий Васильевич

кандидат технических наук, доцент,
Барченко Владимир Тимофеевич

Ведущая организация: ОАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева, г.
Королев, Московская область.

Защита состоится «24» апреля 2012 г. в 14 ч. на заседании диссертационного совета Д 212.229.09 в ФГБОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет" по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, Главное здание, ауд. 225.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет".

Автореферат разослан «23» марта 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,



Хрусталеv Б.С.

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Герметичность крупных технических объектов, таких, например, как космические станции или хранилища ядерных отходов, является обязательным условием их эксплуатации. Разгерметизация космической станции во время полета может привести к тяжёлым последствиям, таким как выход из строя дорогостоящего оборудования или гибель космонавтов. Разгерметизация хранилища ядерных отходов может привести к экологической катастрофе.

Во время изготовления крупные технические объекты проверяются на герметичность методом щупа при помощи гелиевых течеискателей. Однако применяемая для этих целей аппаратура слишком громоздка и не может быть использована для проверки герметичности во время эксплуатации.

Система непрерывного измерения давления внутри космического корабля позволяет зафиксировать появление крупных течей, минимальная величина которых составляет $10^2 \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$. При деградации сварных швов и во многих других случаях возникновению больших течей предшествует появление малых течей, которые могут являться средством диагностики возможности возникновения чрезвычайных ситуаций. Причиной возникновения малых течей также может являться воздействие организмов бактерий на корпус объекта.

Малые течи опасны тем, что их возникновение приводит к неучтенному перерасходу газов, обеспечивающих жизнедеятельность и поддерживающих определенный уровень давления внутри космических аппаратов и станций. Запасы этих газов ограничены, следовательно, незапланированный перерасход, особенно при длительных полетах, может привести к неблагоприятным последствиям.

Условия длительного полета космических аппаратов, например международной космической станции, таковы, что внутри аппарата обеспечивается атмосферное давление, а давление снаружи составляет порядка $10^{-5} \dots 10^{-7} \text{ Па}$. При возникновении течей, выходящий газ вносит существенные изменения в параметры собственной атмосферы станции.

Для измерения малых течей от 10^2 до $10^{-3} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$ перспективным является создание систем мониторинга герметичности с измерением распределения давления в собственной атмосфере объекта. Для реализации таких систем необходимо создать специальную аппаратуру, которая должна обеспечивать достаточную чувствительность, удобство применения и иметь небольшие габариты. Для определения момента разгерметизации необходимо обеспечить непрерывность измерений, т.е. мониторинг герметичности.

Цель работы

Целью данной работы является разработка вакуумметрического метода мониторинга герметичности крупных технических объектов. Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести исследование течения газов через дефекты различной формы при больших отношениях давлений, учитывая возможность одновременного существования нескольких режимов течения.
- произвести моделирование молекулярных потоков в собственной атмосфере и давлений внутри ЭВТИ, возникающих в случае образования течи в корпусе технического объекта.
- произвести теоретический анализ возможности расширения пределов измерения тепловых преобразователях; разработать и испытать вакуумметрические преобразователи комбинированного типа с целью расширения их диапазона измерения.
- разработать теоретические основы вакуумметрического метода мониторинга герметичности космических аппаратов, позволяющую определять момент появления течи, а также осуществлять локализацию течи и расчет ее величины.

Научная новизна

Теоретически получены зависимости величины газового потока через дефекты оболочки в виде канала условно круглой и щелевой формы при больших перепадах давления и одновременном существовании в канале нескольких режимов течения газа;

Методом Монте-Карло проведено математическое моделирование стационарного распределения концентрации газа, вытекающего из дефекта оболочки в собственную атмосферу технического объекта, при наличии ЭВТИ; получены аналитические зависимости распределения концентрации газа в собственной атмосфере в зависимости от свойств ЭВТИ.

Методом Монте-Карло проведено математическое моделирование стационарного распределения давления газа, вытекающего из дефекта оболочки технического объекта, внутри ЭВТИ; получены аналитические зависимости распределения давления газа между слоями ЭВТИ в зависимости от её свойств.

Разработаны теоретические основы вакуумметрического метода мониторинга герметичности крупных технических объектов, позволяющего определить момент появления течи, величину и место течи по информации о концентрации газа в нескольких точках внешней собственной атмосферы технического объекта.

Практическая ценность

Получены зависимости, позволяющие определить геометрические размеры условных дефектов по величине течи.

Определены давления между слоями ЭВТИ при различной величине течи.

Разработаны широкодиапазонные комбинированные вакуумные преобразователи, которые могут применяться в различных областях вакуумной техники. Разработанная система мониторинга герметичности может применяться на международной космической станции.

Автор защищает

Зависимость величины газового потока от размеров дефектов в виде каналов условно круглой и условно щелевой формы при одновременном существовании в канале нескольких режимов течения газа;

Численные и аналитические зависимости распределения концентрации газа, вытекающего из дефекта оболочки, в собственной атмосфере технического объекта в зависимости от свойств ЭВТИ.

Численные и аналитические зависимости распределения давления газа, вытекающего из дефекта оболочки, внутри ЭВТИ в зависимости от её свойств.

Способ определения величины и места течи по информации о концентрации газа в нескольких точках собственной атмосферы технического объекта.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных теоретических зависимостей для течения газа через дефекты оболочки обеспечивается использованием в основе расчета общепринятых формул вакуумной техники и различных алгоритмов и методик, подлинность которых многократно подтверждена ранее.

Достоверность вычислительного эксперимента подтверждается тестовыми расчетами и оценками неопределенности выполненных расчетов.

Достоверность экспериментальных исследований подтверждается анализом паспортных данных используемых приборов и определением методической погрешности.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы доложены на: международной научно-практической конференции «Неделя науки СПбГПУ» 2009-2010 годов, VI международной научно-практической конференции «Информационные технологии в науке, технике и образовании» (Абхазия, Пицунда, 2010г.), научно-технической конференции «Вакуумная техника и технология» (Санкт-Петербург, 2010, 2011 гг.), международной научно-технической конференции «Вакуумная техника, материалы и технология» (Москва, 2010г.)

Публикации

Основное содержание работы изложено в 12 печатных работах, в том числе в 3-х статьях, изданных в журнале «Вакуумная техника и технология», входящем в перечень ВАК РФ.

Структура и объем работы.

Работа состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы, изложена на 146 страницах, включая: 2 таблицы и 76 рисунков. Библиография включает 78 наименований.

Содержание работы

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

В **первой главе** рассмотрено состояние вопроса, на основании которого сформулированы основные задачи исследования.

Рассмотрено разделение течения газов в вакуумных системах на различные режимы. Большой вклад в разработку корректных способов вычисления проводимости трубопроводов и отверстий внесли: М. Кнудсен, М. Смолуховский, П. Клаузинг и др.

Приведены методы расчета и исследования молекулярных потоков в вакуумных системах. Анализ молекулярных потоков в вакуумных системах посвящены работы С.Дэшмана, Г.Л. Саксаганского, Л.Н. Розанова, Л.А.Беляева и др.

Рассмотрены существующие современные вакуумметрические преобразователи теплового и магнитного типов, а также комбинированные приборы.

Приведены существующие методы мониторинга герметичности крупных технических объектов, в частности космических аппаратов (КА). Рассмотрены такие методы как, метод на основе использования системы ориентации КА, метод на основе ионизации атомов и молекул газа, манометрический метод и др.

В результате анализа современного состояния вопроса сформулированы основные задачи настоящей работы.

Во **второй главе** выполнен теоретический анализ течения газа через дефекты оболочки вакуумных аппаратов. При расчете дефекты оболочки заменялись условными течами круглой формы и течами прямоугольной формы с соотношением сторон 1:10 и 1:100. Выполнен расчет течения газа для таких дефектов при различных режимах течения. При этом предполагалось, что по всей длине канала существует какой-то один определенный режим.

Затем рассмотрено течение через круглый канал при условии одновременного существования в канале нескольких режимов течения. Расчет произведен по схеме, представленной на рис. 1. Рассматривается трубопровод длины l и диаметрам D , соединяющий два бесконечно больших объема. Давление на одном конце p_1 , на другом p_4 . При расчетах примем $p_1=10^5$ Па, $p_4=10^{-5}$ Па. Необходимо определить поток газа Q , проходящий и через трубопровод и длины участков трубопровода, соответствующие вязкостному ($l1$), молекулярно-вязкостному ($l2$) и молекулярному ($l3$) режимам течения газа.

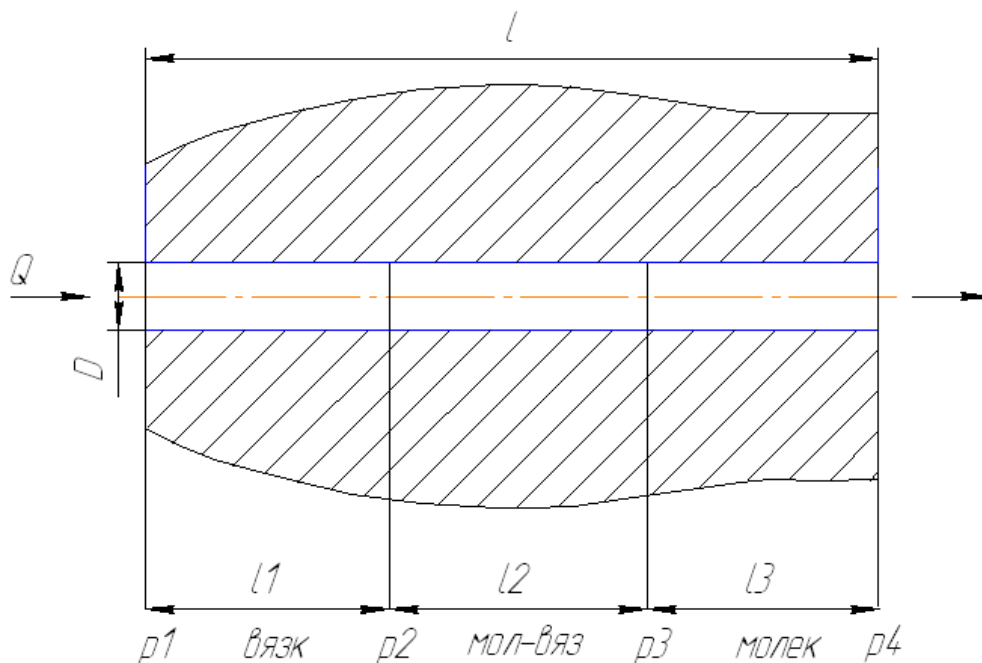


Рис. 1. Расчетная схема

На основании соотношений для различных режимов течения составлена система уравнений:

$$\begin{cases} Q = \frac{\pi D^4 (p_1 + p_2)(p_1 - p_2)}{256\eta l_1} \\ Q = \frac{\pi D^3 v_{ap} (p_3 - p_4)}{12l_3} \\ Q = \left(\frac{Z\pi D^3 v_{ap}}{12l_2} + \frac{\pi D^4 (p_2 + p_3)}{256\eta l_2} \right) (p_2 - p_3) \\ l_1 + l_2 + l_3 = l \end{cases} \quad (1)$$

где η - коэффициент динамической вязкости, Н/м³·с; v_{ap} - среднеарифметическая скорость молекулы газа, м/с; Z - функция среднего давления в трубе; p_2 - давление соответствующее переходу из вязкостного режима в молекулярно-вязкостный, Па ; p_3 - давление перехода из молекулярно-вязкостного в молекулярный режим течения, Па.

На рис.2 показаны в качестве примера для течи общей длиной 4 мм длины участков, в которых существуют различные режимы течения газа.

Решения системы (1) представлены в графической форме. Аппроксимация решения в виде

$$d = aQ^b, \quad (2)$$

где $a = 7 \cdot 10^{10}$, $b = 3,57$, позволяет с точностью 83% определить диаметр условной течи по величине потока натекания при одновременном существовании нескольких режимов течения газа.

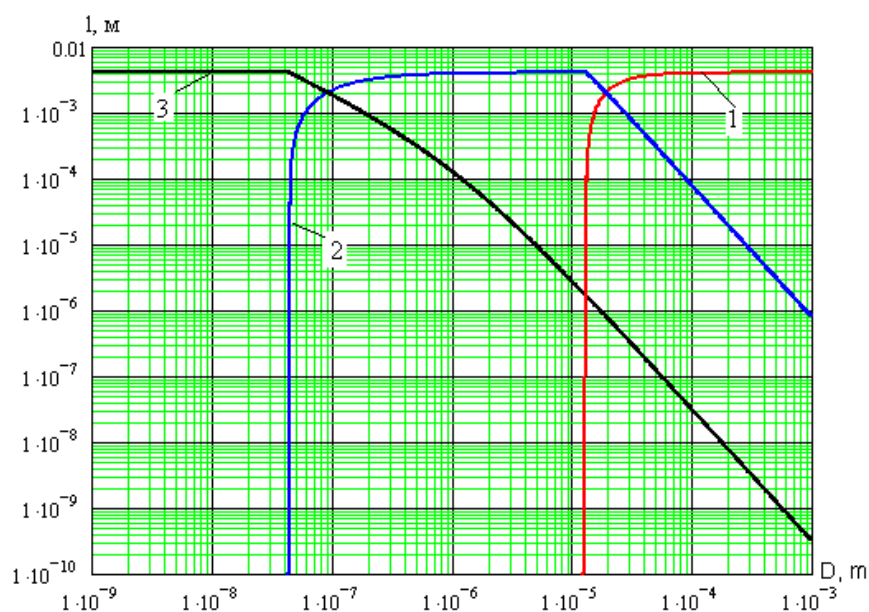


Рис. 2. Зависимость длины участка от диаметра трубопровода при толщине оболочки 4мм и перепаде давления 10^5 Па: 1 – вязкостный режим, 2 – молекулярно-вязкостный режим, 3 – молекулярный режим.

Сравнительный анализ методов расчета газовых потоков через условные течи показал, что расчеты только в молекулярном или вязкостном режимах течения могут дать ошибку более 100%, а использование молекулярно-вязкостного режима во всем трубопроводе дает ошибку 15% по сравнению с методикой расчета, предполагающей наличие одновременного существования нескольких режимов течения.

Результаты анализа времени истечения газа из объектов представлены в графической форме. Например, снижение давления внутри МКС с 10^5 до $6 \cdot 10^4$ Па за 100 часов происходит при круглом дефекте 0,5 мм, а при щелевом (1:100) дефекте 0.06 мм.

В **третьей главе** выполнено моделирование молекулярных потоков течения газа при наличии ЭВТИ. Моделирование выполнено методом Монте-Карло. На рис. 3 представлена схема моделирования. Моделирование оболочки ЭВТИ осуществляется следующим способом. ЭВТИ состоит из определенного числа слоев Nsl , расстояние между которыми равно A (мм). В каждом слое имеются отверстия радиусом Ro (мм), расположенные в узлах прямоугольной сетки. Расстояние между отверстиями по оси x – lx (мм), по оси y – ly (мм). Каждый последующий слой расположен относительно предыдущего таким образом, чтобы центры отверстия $n+1$ -го слоя были расположены в пересечении диагоналей узлов сетки n -го слоя. Координаты четырех отверстий ближайших к началу координат на 1-м слое $(lx/2, ly/2)$; $(-lx/2, ly/2)$, $(lx/2; -ly/2;)$, $(-lx/2; -ly/2)$.

Результаты моделирования рассматриваются как распределение концентрации следов траекторий молекул по плоскости (Рис.3). Исследуется плоскость радиуса R , параллельная плоскости xu и установленная на высоте H от плоскости вылета частиц. Данная плоскость разбивается на Nsh_p колец,

центр которых лежит в точке $(0;0;H)$, с шагом Sh_p . Таким образом, для i -го кольца внутренний диаметр равен $(i-1)*Sh_p$, а внешний $i*Sh_p$. Для каждой запущенной частицы вычисляется, в какое из колец она попадет.

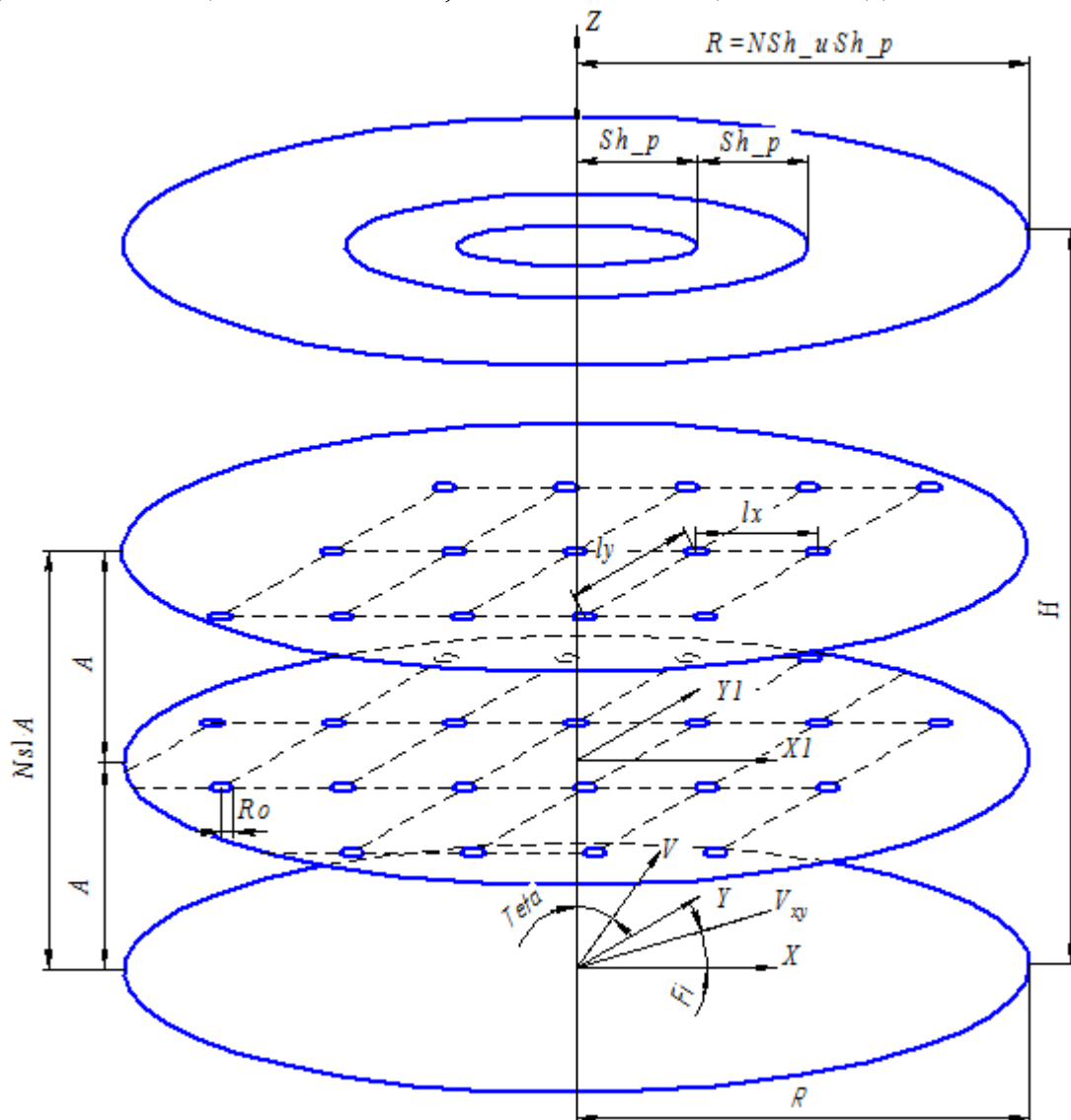


Рис. 3. Схема моделирования.

После обработки всех частиц для каждого кольца вычисляется параметр NQ по формуле:

$$NQ_i = N_i / (S_i \cdot N_{ch_nom}), \quad (3)$$

где N_i – число частиц попавших в i -е кольцо, S_i – площадь i -го кольца, N_{ch_nom} – общее число запущенных частиц.

Параметр NQ отражает долю частиц попавших в определенное кольцо на единицу поверхности. Давление газа и концентрация прямо пропорциональны значению параметра NQ .

Также выполнен расчет давления газа между слоями ЭВТИ. Для этого пространство между слоями разбито на определенное количество колец. Для каждой частицы при ее соударении с ЭВТИ вычисляется, в каком кольце оно произошло. После обработки всех частиц вычисляется, сколько произошло

соударений в каждом кольце. После обработки всех частиц рассчитывается давление в каждом кольце рассчитывается по формуле:

$$P_{ij} = \frac{4kTN_{ij}}{v_a F_{ij}} \quad (4)$$

где P_{ij} – давление в j -том кольце i -го слоя, Па, N_{ij} – количество соударений с j -тым кольцом i -го слоя, F_{ij} – площадь j -го кольца i -го слоя, m^2 , T – температура газа, К, v_a – среднеарифметическая скорость молекул, м/с, k – постоянная Больцмана, $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К

При рассмотрении потоков без ЭВТИ результаты, полученные с помощью аналитических расчетов, и с помощью моделирования вполне согласуются.

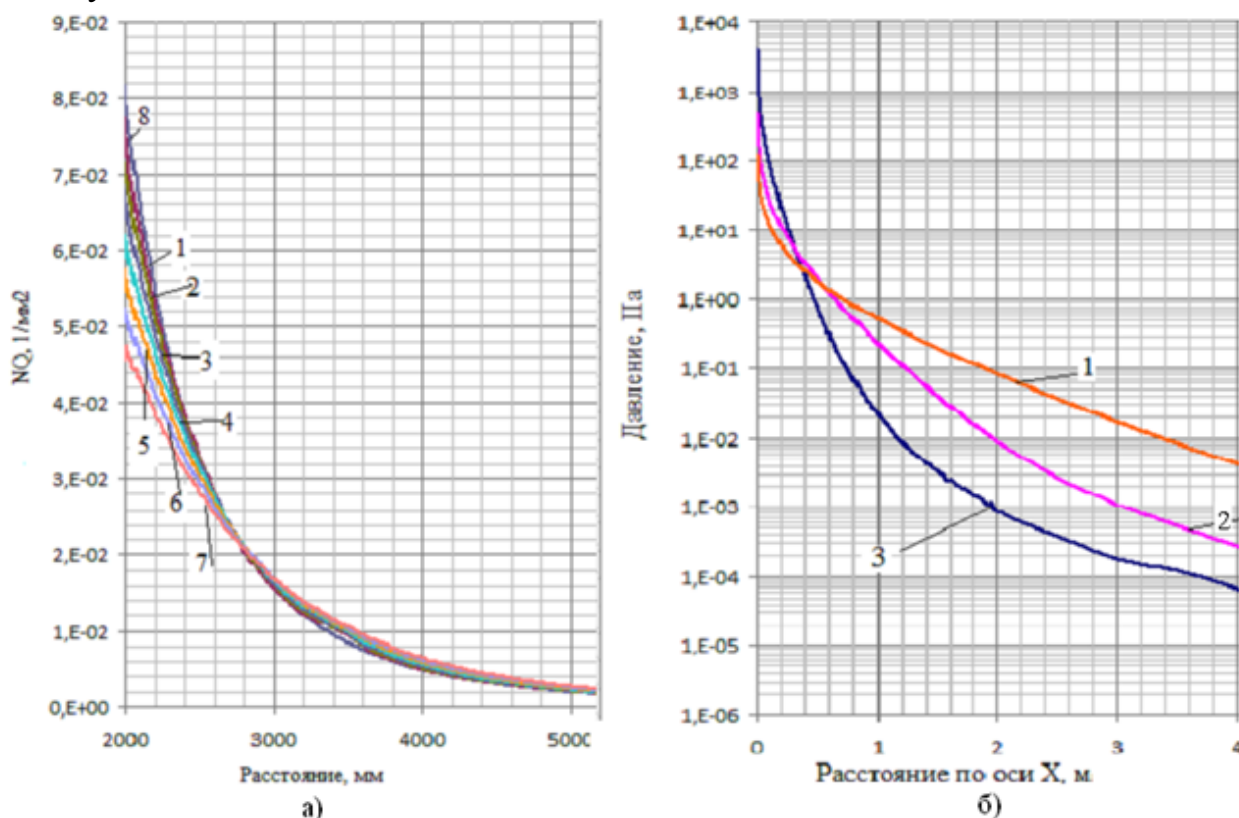


Рис. 4. а) Распределение молекул для ЭВТИ с параметрами $H=2000$ мм, $R_0=0,5$ мм, $A=5$ мм, 1 – 1 слой, 2 – 2 слоя, 3 – 3 слоя, 4 – 4 слоя, 5 – 5 слоев, 6 – 6 слоев, 7 – 7 слоев, 8 – 0 слоев; б) Распределение давления под первым слоем ЭВТИ с параметрами $R_0=0,5$ мм, $N_{sl}=7$. 1 – $A=0,5$ мм; 2 – $A=2$ мм; 3 – $A=5$ мм.

По результатам моделирования с ЭВТИ сделаны следующие выводы:

- По мере увеличения расстояния между слоями, увеличения расстояния между слоями ЭВТИ, увеличивается влияние каждого последующего слоя на распределение молекул. При этом, чем больше слоев в ЭВТИ, тем более «размытым» становится распределение молекул.
- Изменение радиуса отверстий в ЭВТИ в зависимости от других параметров (расстояние между слоями, количество слоев) по-разному оказывает влияние на распределение концентрации.

- При наличии ЭВТИ значение концентрации меняется в зависимости от расстояния до источника молекул, таким образом, вакуумметрический метод мониторинга герметичности можно применить для объектов покрытых слоем ЭВТИ. Чтобы определить теоретическую функцию зависимости молекул от расстояния до течи можно использовать предложенную программу расчета. Полученные в результате расчета данные целесообразно аппроксимировать к зависимости вида $NQ(x)=ax^n$.
- При образовании течи, по мере увеличения количества слоев ЭВТИ давление газа под ними растет. Давление под каждым следующим слоем меньше чем под предыдущим.
- По мере увеличения расстояния между слоями функция давления от расстояния до источника газа становится более убывающей. Аналогичная тенденция наблюдается при увеличении размеров отверстий.

В четвертой главе рассматриваются вакуумметрические преобразователи. На основании уравнения теплового баланса получена теоретическая градуировочная характеристика для однокамерных и двухкамерных тепловых преобразователей:

$$P = \frac{(AD - EG(I^2R - B)) - \sqrt{(EG(I^2R - B) - AD)^2 - 4(G(I^2R - B) - AC)FG(I^2R - B)}}{2(G(I^2R - B) - AC)} \quad (5)$$

В формуле (5) использованы следующие обозначения: $A = 2\pi l \lambda_H (T_H - T_B)$; $B = 2(E_H + E_M)$; $R = R_0(1 + a_c(T_H - T_B))$; $C = \ln(r_2/a) + \ln(r_1/a)$; $D = 2L_1/r_2 \ln(r_2/a) + 2L_1/r_1 \ln(r_1/a)$; $E = 2L_1/r_1 + L_1/r_2$; $F = 4L_1/r_1 \cdot L_1/r_2$; $G = \ln(r_2/a) \ln(r_1/a)$, где l – длина нити, м; λ – коэффициент теплопроводности газа, Вт/м·К; a – радиус нити, м; r_i – радиус i -ой камеры; T_H, T_B – температура нити и баллона, К; E_H, E_M – потери теплоты за счет излучения нити и за счет теплопроводности материала нити, Вт, a_c – температурный коэффициент сопротивления материала нити, K^{-1} . Анализ формулы (5) показал, что использование в тепловых преобразователях корпуса состоящего из двух камер различного радиуса позволяет расширить измеряемый диапазон.

Сконструированы и испытаны вакуумметрические преобразователи комбинированного типа. Такой датчик (рис.3) объединяет в себе преобразователи теплового и инверсно-магнетронного типов.

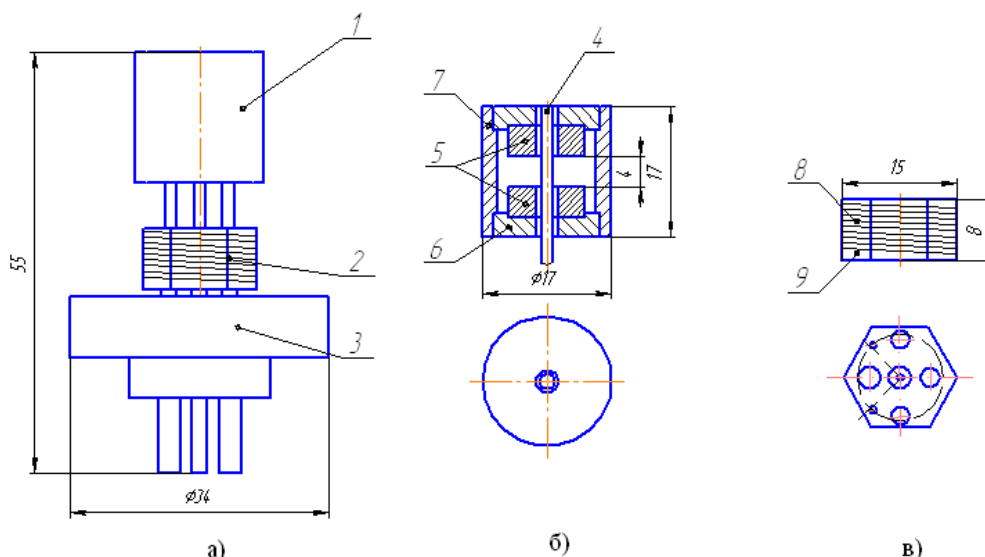


Рис. 5 Комбинированный преобразователь ПК-4. а – общий вид; б – магнитная часть; в – тепловая часть.

Магнитная часть 1 состоит из анода 4 и магнитной системы состоящей из двух магнитов 5, шайб 6 и втулки 7. Тепловая часть 2 состоит из основания 9, на которое намотана нить 8, выступающая в качестве нагревателя. Диапазон измерений тепловой части – $10^0 \dots 2 \cdot 10^4$ Па, магнитной – $10^{-5} \dots 10^1$, таким образом, весь измеряемый диапазон – $10^{-5} \dots 2 \cdot 10^4$ Па.



Рис. 6. Экспериментальная установка для испытаний преобразователей.

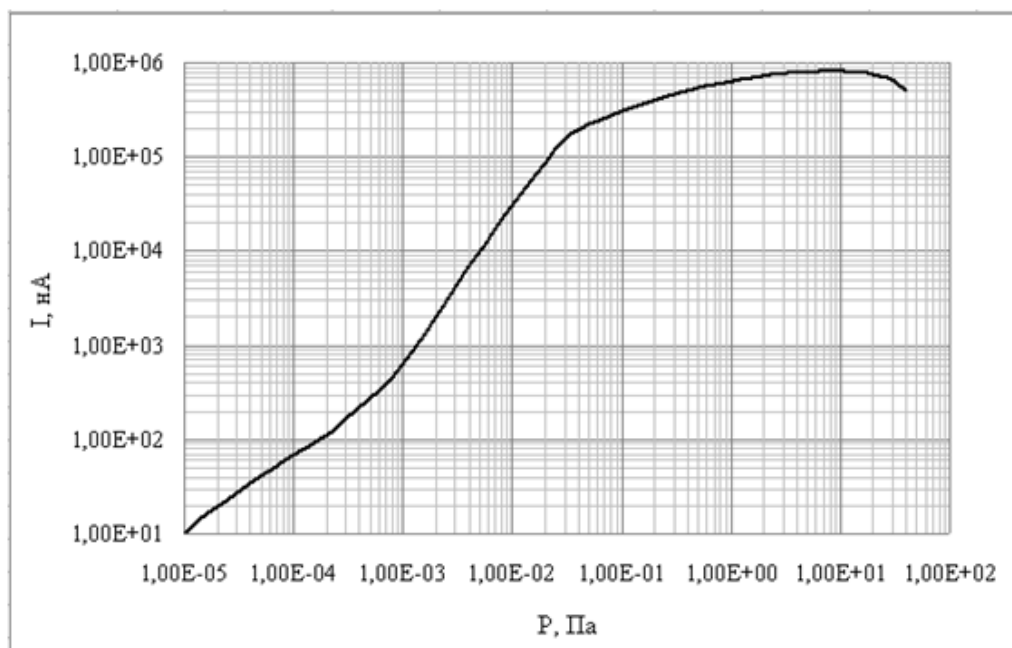


Рис. 7. Пример результатов испытаний магнитной части комбинированного преобразователя

В пятой главе рассматриваются возможные варианты мониторинга герметичности космических аппаратов вакуумметрическим методом. Получены теоретические зависимости показывающие, как зависит концентрация газа n от расстояния до места течи r при различных степенях вакуума. Для молекулярного режима течения:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{r_2^4}{r_1^4} \quad (6)$$

Рассмотрены возможные технологические схемы реализации мониторинга герметичности. Подробно рассмотрена схема мониторинга с помощью закрепленных вакуумметрических преобразователей.

Согласно данной схеме преобразователи можно закреплять в узлах прямоугольной сетки с шагом s_1 и s_2 (рис.8).

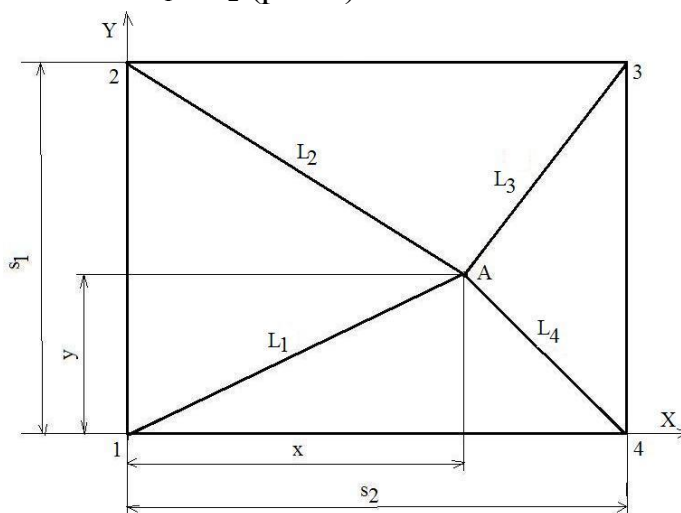


Рис. 8 Локализация течи с помощью установленных преобразователей.

После опроса всех установленных датчиков можно выполнить грубую локализацию течи, выбрав элемент сетки, для которого сумма показаний четырех датчиков. Далее, исходя из геометрических соображений, можно рассчитать расстояния от каждого датчика до течи. Используя (6) можно составить систему уравнений, решив которую можно найти x и y :

$$C_{12} = \frac{r_2^4}{r_1^4} = \left(\frac{\sqrt{(s_1 - y)^2 + x^2 + D^2}}{\sqrt{x^2 + y^2 + D^2}} \right)^4$$

$$C_{14} = \frac{r_4^4}{r_1^4} = \left(\frac{\sqrt{(s_2 - x)^2 + y^2 + D^2}}{\sqrt{x^2 + y^2 + D^2}} \right)^4$$
(7)

Далее получено выражение, позволяющее определить величину течи исходя из расстояния до нее от датчика:

$$Q = p \cdot \frac{\pi \cdot v_m \cdot r^4}{D}$$
(8)

Основные результаты и выводы

В результате выполнения настоящей работы были решены задачи, сформулированные выше. По результатам проведенного исследования следует сделать следующие основные выводы:

Расчет потока через условные течи при учете одновременного существования нескольких режимов течения позволяет повысить точность на 10-20%

По результатам моделирования с ЭВТИ сделаны следующие выводы:

- По мере увеличения расстояния между слоями, увеличивается влияние каждого последующего слоя на распределение молекул. При этом, чем больше слоев в ЭВТИ, тем более «размытым» становится распределение молекул.
- Изменение радиуса отверстий в ЭВТИ в зависимости от других параметров (расстояние между слоями, количество слоев) по-разному оказывает влияние на распределение концентрации.
- При наличии ЭВТИ значение концентрации меняется в зависимости от расстояния до источника молекул, таким образом, вакуумметрический метод мониторинга герметичности можно применить для объектов покрытых слоем ЭВТИ. Чтобы определить теоретическую функцию зависимости молекул от расстояния до течи можно использовать предложенную программу расчета. Полученные в результате расчета данные целесообразно аппроксимировать к зависимости вида $NQ(x) = ax^n$.
- При образовании течи, по мере увеличения количества слоев ЭВТИ давление газа под ними растет. Давление под каждым следующим слоем меньше чем под предыдущим.
- По мере увеличения расстояния между слоями функция давления от расстояния до источника газа становится более убывающей. Аналогичная тенденция наблюдается при увеличении размеров отверстий.

Использование в тепловых преобразователях корпуса состоящего из двух камер различного радиуса позволяет расширить измеряемый диапазон. Спроектированный комбинированный преобразователь позволяет охватить диапазон давлений $10^{-5} \dots 2 \cdot 10^4$ Па.

Разработанная система мониторинга герметичности космических аппаратов, позволяет вести непрерывное наблюдение за объектом, а также осуществлять локализацию течи и расчет ее величины с нижним пределом измерения $10^{-3} \text{ м}^3\text{Па/с}$.

Публикации по теме диссертации

Статьи в журналах Перечня ВАК

1. Гапонов В.А., Прокофьев А.В., Рабинович Б.А., Розанов Л.Н., Скрыбнев А.Ю. Вакуумметрический метод определения герметичности космического аппарата при орбитальном полете. // Вакуумная техника и технология. – 2010. – Т. 20. – №3. – С.191-196.

2. Дубинин Б.А., Розанов Л.Н., Скрыбнев А.Ю., Суханов В.Л., Христенко В.В. Магнитный вакуумметр для течеискателей. // Вакуумная техника и технология. – 2010. – Т. 20. – №3. – С.191-196.

3. Розанов Л.Н., Скрыбнев А.Ю. Течение газа через круглый трубопровод при больших перепадах давления. // Вакуумная техника и технология. – 2010. – Т. 20. – №1. – С.3-8.

Доклады на конференциях

1. Балакирев А.А., Скрыбнев А.Ю. Исследование характеристик теплового преобразователя. Тезисы доклада научно-технической конференции «Вакуумная техника и технология-2011». // Вакуумная техника и технология. – 2011. – Т. 21. – №2. – С.77.

2. Гапонов В.А., Прокофьев А.В., Рабинович Б.А., Розанов Л.Н., Скрыбнев А.Ю. Вакуумметрический метод определения герметичности космического аппарата при орбитальном полете. Тезисы доклада научно-технической конференции «Вакуумная техника и технология-2011». // Вакуумная техника и технология. – 2011. – Т. 21. – №2. – С.67-68.

3. Дубинин Б.А., Розанов Л.Н., Скрыбнев А.Ю., Суханов В.Л., Христенко В.В. Магнитный вакуумметр для течеискателей. Тезисы доклада научно-технической конференции «Вакуумная техника и технология-2010». // Вакуумная техника и технология. – 2010. – Т. 20. – №2. – С.67.

4. Кривоустова Е.В., Розанов Л.Н., Розанов С.Л., Скрыбнев А.Ю. Определение параметров малых течей в крупных вакуумных объектах. // Материалы 17-ой научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника». – М.:МИЭМ. – 2010. – С.132-133.

5. Розанов Л.Н., Скрыбнев А.Ю. Течение газа через дефекты оболочки космического корабля. // Вакуумная техника, материалы и технология. Материалы V Международной научно-технической конференции. Под

редакцией доктора технических наук, профессора Нестерова С.Б. – М: Новелла. – 2010. – С. 31.

6. **Розанов Л.Н., Скрыбнев А.Ю.** Комбинированный вакуумметрический преобразователь. Тезисы доклада научно-технической конференции «Вакуумная техника и технология-2011». // Вакуумная техника и технология. – 2011. – Т. 21. – №2. – С.76.

7. **Скрыбнев А.Ю., Розанов Л.Н.** Расчет распределения концентрации газа в собственной атмосфере космического аппарата при возникновении малой течи в корпусе с ЭВТИ. // XXXIX Неделя науки СПбГПУ: материалы международной научно-практической конференции. Ч.IV. – СПб.: СПбГПУ. – 2010. – С.54.

8. **Скрыбнев А.Ю., Розанов Л.Н.** Система мониторинга герметичности космических аппаратов. // XXXVIII Неделя науки СПбГПУ: материалы международной научно-практической конференции. Ч.IV. – СПб.: СПбГПУ. – 2009. – С.41-42.

9. **Скрыбнев А.Ю., Щенев В.В.** Распределение концентрации собственной атмосферы космического аппарата при наличии ЭВТИ. Тезисы доклада научно-технической конференции «Вакуумная техника и технология-2011». // Вакуумная техника и технология. – 2011. – Том. 21. – №2. – С.76-77.