

При определении моментов были использованы значения сил, действующих вдоль осей OX , OY , OZ работающего УДМ, полученные экспериментально на силоизмерительном стенде.

Из графика (рис. 2) следует, что суммарные значения амплитуд моментов сил по осям OX и OY практически совпадают между собой, что соответствует увеличению центробежных сил ротора-маховика с остаточным дисбалансом по мере роста частоты вращения. Момент по оси OZ отсутствует. В диапазоне частот 3100–3600 об/мин имеются отклонения амплитуд моментов сил. Выявление источника этих отклонений требует дополнительных исследований. Предварительное предположение – отклонения вызваны вибрацией наружных колец шарикоподшипников.

Предложенная методика, реализованная в программном обеспечении разработанного стенда, позволяет получать объективные данные о значениях возмущающих моментов, генерируемых УДМ, а также с их помощью определять значения статического и динамического дисбалансов вращающихся частей УДМ.

Таким образом, внедрение экспериментального контроля возмущающих моментов создает предпосылки для повышения точности балансировки на этапе изготовления и совершенствования разрабатываемых

приборов. Это делает силоизмерительный стенд эффективным инструментом, необходимым при создании электродвигателей-маховиков с минимальной виброактивностью.

Библиографические ссылки

1. Бутенин Н. В., Лунц Я. Л., Меркин Д. Р. Курс теоретической механики. В 2 т. СПб.: Лань, 2004. 736 с.
2. Рекламный каталог инженерных решений от компании LMS International (Бельгия). 163 с.

References

1. Butenin N. V., Lunts Ya. L., Merkin D. R. *Kurs teoreticheskoy mekhaniki* (Theoretical mechanics course). Two volumes. Saint-Petersburg, Lan Publ., 2004. 736 p.
2. The LMS International (Belgium) engineering products advertising catalogue, 163 p.

© Денисова А. А., Тверяков О. В.,
Бритова Ю. А., 2014

УДК 620.17

К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ЛОКАЛЬНЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

А. А. Кишкин¹, И. П. Колчанов², А. В. Делков¹, А. А. Ходенков¹

¹Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: spsp99@mail.ru

²ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

Анализируется возможность повышения чувствительности метода контроля герметичности изделий ракетно-космической техники с применением гелиевых масс-спектрометрических течеискателей. Рассматривается теоретическая постановка задачи по пространственному позиционированию источника негерметичности по значениям проекций градиента концентраций пробной среды в специально подготовленной атмосфере в зоне объекта исследования.

Ключевые слова: контроль герметичности, течеискание, локализация утечки, диффузия.

THE PROBLEM OF INCREASING THE SENSITIVITY OF LOCAL CONTROL METHODS FOR TIGHTNESS PRODUCTS OF ROCKET AND SPACE TECHNOLOGY

A. A. Kishkin¹, I. P. Kolchanov², A. V. Delkov¹, A. A. Hodenkov¹

¹ Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: spsp99@mail.ru

² JSC "Information satellite system" named after academician M. F. Reshetnev
52, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662971, Russian Federation

Tightness is one of the most important factors of safety, efficiency and persistence in the rocket and space technology. Mass spectrometer leak detection method is mostly used in the spacecraft production. This article describes the possibility of increasing the sensitivity of the method of leak test of rocket and space technology using helium mass spectrometer leak detectors. Theoretical formulation of the problem on the spatial positioning of the source of leaks from the values of the projections of the concentration gradient in a test environment in a specially prepared area of the object is explored. Concentration field of leak will be concentric semicircles when there are no any incoming flows in testing area. If concentration field is known, it is possible to solve the problem of localization of leaks with the gradient of this field. This article has covered mathematical model of the concentration field and localization leaks algorithm. Problems and prospects of the proposed method are evaluated.

Keywords: tightness test, leak detection, leak localization, diffusion.

Одним из важнейших факторов обеспечения безопасности, работоспособности и сохранности изделий ракетно-космической техники (РКТ) является герметичность, определяющая способность конструкции препятствовать проникновению через нее жидкости и газа.

Повышенные требования предъявляются к герметичности агрегатов с высокотемпературной средой, систем токсичных, пожаро- и взрывоопасных веществ, изделий длительного хранения в заправленном состоянии, а также агрегатов и систем космических аппаратов (КА) с регламентированными сроками активного существования [1; 2].

Абсолютная герметичность неосуществима, так как все конструкционные материалы обладают определенной проницаемостью. Технически значимыми источниками негерметичности изделий РКТ являются течи в виде неплотностей разъемных стыков, микротрещин и микропор основного материала или сварных и паяных соединений, вызывающие утечки рабочих веществ из замкнутых полостей конструкций агрегатов и систем, определяющие уровень качества их изготовления и регламентируемые нормами герметичности.

Существует постоянная тенденция к ужесточению норм герметичности, вызванная необходимостью дальнейшего увеличения гарантированных сроков хранения и эксплуатации ампулизованных изделий и КА.

Таким образом, усложняются задачи производства, так как известно, что с целью исключения случаев выявления дефектов на конечной стадии изготовления изделий РКТ структура технологического процесса должна предусматривать проведение соответствующих проверок на возможно ранних этапах с установлением норм герметичности более жестких, чем нормы на этапе окончательной их сборки. Эквивалентные диаметры искомых микротечей при этом составляют доли микрометров.

Очевидно, что ограничивающими факторами в ужесточении норм являются технологические возможности обеспечения герметичности при изготовлении и чувствительность используемых методов и средств контроля этого параметра.

При этом чувствительность применяемых методов контроля характеризуется минимальной степенью негерметичности, гарантированно выявляемой при испытании.

Из известных методов течеискания, обладающих высокой чувствительностью, наиболее применяемым в производстве изделий РКТ является масс-спектрометрический метод.

Данный метод основан на обнаружении пробного газа, проникающего через течи контролируемого объекта, в смеси газов, поступающих на вход в вакуум-камеру масс-спектрометрического анализатора, посредством их ионизации в ионном источнике камеры и последующего разделения ионов газов по отношению массы к заряду под действием электрического и магнитного полей. Для селективного определения величины потока пробного газа в масс-спектрометрических газоанализаторах (течеискателях) используется эффект зависимости радиуса траектории ионизированных частиц в постоянном магнитном поле от ускоряющего напряжения и атомной массы газа [3].

Нижний предел чувствительности современных масс-спектрометрических гелиевых течеискателей – $5 \cdot 10^{-13}$ м³ Па/с.

Технологический процесс испытаний в общем виде представляет собой сложную техническую систему (объект испытаний – контрольная среда (пробное вещество) – индикаторное средство – испытательное оборудование), которая включает ряд отдельных процессов: подготовку объекта к испытаниям, заполнение его контрольной средой (пробным веществом) или вакуумирование, транспортировку пробного вещества от дефекта до индикатора, регистрацию параметров испытания [4].

При контроле герметичности в общем случае приходится решать две задачи: определение (преимущественно вакуумными методами) общей степени герметичности сборочной единицы, а при превышении установленной нормы – локализацию течи, т. е. выявление зоны и, по возможности, конкретного места дефекта. Вследствие малых размеров дефектов, вызывающих течи, процесс их обнаружения является трудоемким [4].

Следует отметить, что минимальный порог чувствительности способов, применимых для локализации течей, выше порога чувствительности способов определения степени суммарной негерметичности, и это обстоятельство в ряде случаев приводит к невозможности обнаружения конкретного дефекта и его устранения.

Таким образом, задачей высокочувствительного течеискания является выявление негерметичных участков контролируемых поверхностей изделий (далее –

объекта испытаний) по величине утечки пробного газа на уровне чувствительности применяемых методов контроля.

В качестве пробного газа применяют гелий. Он безопасен в работе, хорошо проникает через течи, у него низкая адсорбируемость.

Преимущества методов поиска течей с использованием гелия с точки зрения промышленности следующие [5]:

- предельный уровень утечки (натекания), который можно определить, удовлетворяет всем практическим задачам отрасли;

- анализ суммарной утечки (общего натекания) в изделии, поиск отдельных течей, возможность определения микроскопических течей.

Возможна перенастройка течеискателей для использования в качестве пробного газа и других газов, например, аргона или азота, но при этом чувствительность прибора ухудшается на 2–3 порядка и исключается возможность проведения испытаний при атмосферном давлении в воздушной среде [2].

Быстрое развитие масс-спектрометрии в мире за последние 30 лет привело к тому, что эта технология применяется практически во всех аналитических задачах, связанных с контролем герметичности объектов испытаний.

Использование методов контроля герметичности с помощью гелиевых масс-спектрометрических течеискателей эффективно и дает высокую надежность испытаний, а также гарантирует возможность удовлетворения требований по стандарту EN/ISO 9000 к методам промышленного контроля герметичности.

Современные гелиевые масс-спектрометрические течеискатели обеспечивают возможность автоматизации процедур поиска течи. Результаты испытаний можно задокументировать, определить параметры, использовать в автоматизированных процедурах расчетов, сохранить (создать электронный архив).

Текущее состояние отечественных методик локального высокочувствительного течеискания складывалось в конце 80-х гг. прошлого столетия, что также учитывалось авторами настоящей работы при выборе направления исследований.

Ряд разновидностей масс-спектрометрического метода, предназначенного для поиска мест течей и определения потока через них, приводится в государственном стандарте [6].

При поиске дефектов герметичности всех видов сборочных единиц изделий РКТ, работающих под воздействием внутреннего давления, при испытаниях которых на суммарную негерметичность имелось превышение установленной нормы, основным является способ шупа [7].

Реакция течеискателя и, соответственно, чувствительность контроля герметичности зависят от степени приближения шупа к контролируемой поверхности и от скорости перемещения шупа. Максимальная чувствительность испытания равна чувствительности течеискателя и достигается в том случае, если остановить шуп над течью. Рекомендуемое расстояние от среза шупа до контролируемой поверхности 0,5 мм [8].

Известно [2], что определение в динамическом режиме мест негерметичности способом шупа возможно с чувствительностью $1 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$ и что проведение контроля герметичности в статическом режиме позволяет снижать порог чувствительности способа до значения $5 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$.

Возможность достижения большей чувствительности связано как с изменением испытательной схемы контрольного прибора (например, в случае подсоединения шупа к выходу из высоковакуумного насоса течеискателя порог чувствительности прибора возможно довести до значения $6,7 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$) [2], так и с изменением условий испытаний, например, можно воспользоваться способом аккумуляирования (накопления) пробного газа в той зоне объекта испытаний, где ведется поиск течи [6].

Однако установлено [2], что предельные возможности исследуемого в работе способа реализации масс-спектрометрического метода течеискания лимитируются уровнем и стабильностью фона системы «шуп – замкнутый объем», а также временем накопления концентрации пробного газа, зависящим от характеристик замкнутого объема.

При статическом, наиболее чувствительном режиме испытаний в указанном методе величина утечки определяется по изменению концентрации гелия, регистрируемой газоанализатором с пробоотборником, в различных точках (зонах) вблизи контролируемой поверхности объекта испытаний (его части), помещаемого в замкнутый объем (чехол, локальную камеру и т. п.) [7].

Описание способа. При выборе направления исследований в качестве аналогов объекта исследований рассматривались известные методы статических испытаний, применяемых для выявления негерметичных участков контролируемой поверхности.

В результате, исходя из условий технологичности испытаний, за прототип был принят способ течеискания шупом при атмосферном давлении, краткое описание которого приводится в [9].

На рис. 1 изображена схема применения масс-спектрометрического метода при контроле локальной герметичности объекта 3 с помощью гелиевого течеискателя 1 способом шупа 2 при атмосферном давлении [10].

Процесс проведения испытаний состоит в следующем. Объект и необходимые средства испытаний размещают в замкнутом объеме (в камере или боксе), величина утечки определяется по изменению концентрации гелия в пространстве замкнутого объема, регистрируемой контрольным прибором – течеискателем со шупом с возможностью пространственного позиционирования шупа. Для реализации преимуществ статического режима испытаний из замкнутого объема перед началом проведения замеров удаляется гелийсодержащий воздух, а для получения минимальной концентрации гелия в пространстве замкнутого объема проводится заполнение испытательного объема гелийнесодержащим воздухом и регистрируется остаточное значение концентрации пробного газа (гелия) в атмосфере объема.

Затем в тестируемый объект подают гелий (test gas) [10]. При наличии малых дефектов герметичности в объекте пробный газ через дефекты (течи) начинает вытекать из объекта и поступать в атмосферу замкнутого объема.

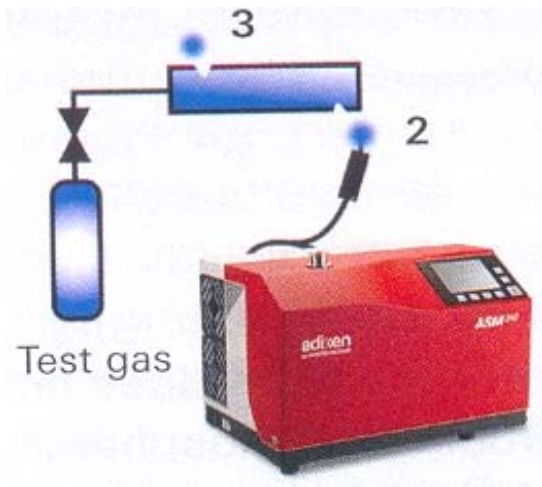


Рис. 1. Схема определения мест утечки гелия из объекта в атмосферу щуповым способом с помощью гелиевого течеискателя

Цель тестирования – обнаружение этих течей и оценка величины интенсивности утечек пробного газа из объекта по изменению его концентрации в локальных зонах испытательного объема.

С этой целью значения концентрации гелия измеряются в разных точках испытательного объема вблизи поверхности тестируемого объекта для построения поля распределения концентраций.

Для получения сведений о местоположении утечки и величине ее интенсивности полученные характеристики поля обрабатываются с применением математического аппарата уравнения диффузии. При этом величина интенсивности утечки с наибольшей точностью определяется известным способом накопления пробного газа в зоне утечки, например, под чехлом [6].

Величины обнаруженных утечек сравнивают с допустимыми значениями через соотношения посредством эталонов для их оценки и устранения дефектов.

Анализ математической модели. Для построения математической модели представленной схемы проанализируем нестационарное уравнение диффузии в замкнутой области.

В качестве расчетной модели будем рассматривать истечение пробного газа из дефекта (течи) с поверхности испытываемого аппарата в окружающее пространство. Поверхность представим плоскостью XU . Тогда положение течи на поверхности будет однозначно определяться двумя координатами на плоскости.

Рассмотрим картину утечки пробного газа через дефект в поверхности исследуемого объекта и поставим задачу локализовать этот дефект. Пусть на плоскости XU имеется течь с координатами (x_T, y_T) . Истечение происходит в объем параллелепипеда со сторонами a, b, h (рис. 2).

Обозначим $c(x, y, z)$ концентрацию диффундирующего вещества (пробного газа) в точке (x, y, z) в момент времени t . В основе вывода уравнения для концентрации лежит закон Фика, согласно которому масса частиц, протекающих за единицу времени через элемент поверхности ds , равна [11]

$$-D \frac{\partial c}{\partial n} ds, \quad (1)$$

где n – нормаль к ds в сторону потока частиц; $D = D(x, y, z)$ – коэффициент диффузии.

Подсчет баланса массы частиц в произвольно фиксированном объеме V с учетом притока частиц через его поверхность S и наличия источников и стоков частиц приводит к уравнению диффузии в частных производных [12]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \text{div}(D \text{ grad } c). \quad (2)$$

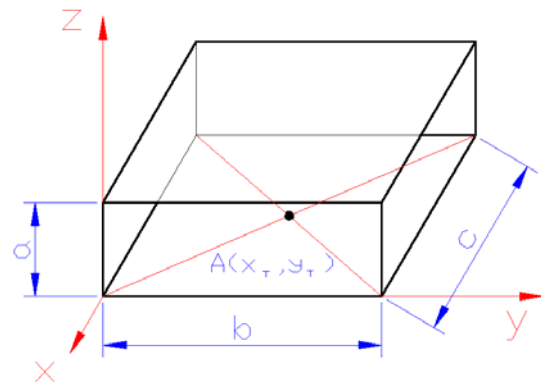


Рис. 2. Расчетная схема моделируемого процесса

При постоянном коэффициенте диффузии (что можно предположить для изотермического случая в рамках решаемой задачи) получим

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \text{div}(\text{grad } c) + Q(x_T, y_T, t), \quad (3)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \left[\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right] + Q(x_T, y_T, t),$$

где x_T, y_T – координаты точки течи; Q – величина утечки в пространство над объектом. Так как решение задачи зависит от времени, пробный газ накапливается в пространстве над объектом, то величина утечки будет также зависеть от времени t .

В качестве граничных и начальных условий для этого уравнения в рассматриваемом случае можно указать:

– равенство концентрации в области в начальный период времени и на границах области в любой момент времени фоновому значению концентрации (для рассматриваемой задачи с учетом предварительной очистки атмосферы от гелия его фоновую концентрацию можно принять равной нулю, $c_\phi = 0$)

$$\begin{aligned} c|_{t=0} &= c_\phi, & c|_{x=0} &= c|_{x=a} = c_\phi, \\ c|_{y=0} &= c|_{y=b} = c_\phi, & c|_{z=0} &= c|_{z=h} = c_\phi; \end{aligned} \quad (4)$$

– равенство нулю производной по концентрации на границе области (отсутствие утечки вещества через границу испытательной камеры, граница является непроницаемой):

$$\begin{aligned}\frac{\partial c}{\partial x}\bigg|_{x=0} &= \frac{\partial c}{\partial x}\bigg|_{x=a} = 0, \\ \frac{\partial c}{\partial y}\bigg|_{y=0} &= \frac{\partial c}{\partial y}\bigg|_{y=b} = 0, \\ \frac{\partial c}{\partial z}\bigg|_{z=0} &= \frac{\partial c}{\partial z}\bigg|_{z=h} = 0.\end{aligned}\quad (5)$$

Решение указанного дифференциального уравнения параболического типа в частных производных позволит при известных параметрах течи установить скалярное поле концентраций в исследуемой области. Аналитические методы решения уравнения диффузии в стационарном случае в специализированной литературе представлены достаточно широко (см., например, [13]).

В случае отсутствия тепловой конвекции и внешних набегающих потоков поверхности уровня скалярного поля концентраций будут иметь вид полусфер с центром в источнике утечки (рис. 3).

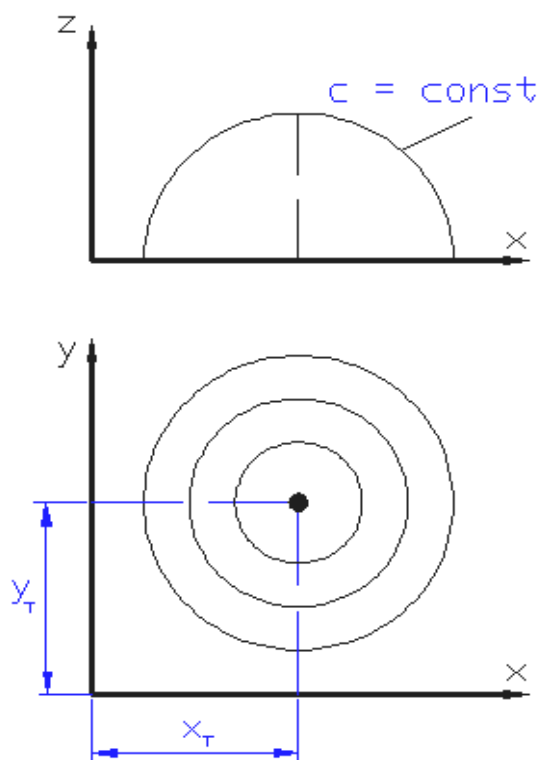


Рис. 3. Линии уровня стационарного распределения концентрации в плоскостях XY и XZ (концентрационное поле)

Таким образом, при известном положении и величине утечки можно однозначно установить концентрационное поле для пробного газа. Для нескольких источников суммарное поле определяется суперпозицией. При учете факторов наличия переменного ко-

эффициента диффузии, конвективных потоков наиболее рационально для получения поля концентраций использовать численные методы.

Алгоритм локализации течи. Для методов контроля герметичности при локализации течи в рамках описанной математической модели стоит обратная задача решения дифференциального уравнения диффузии – при известном поле концентраций найти источник течи и определить ее интенсивность. Поле концентраций пробного газа можно получить замерами пространственно ориентированным щупом.

При известном поле концентраций задачу локализации течи можно решить при помощи нахождения градиента поля (рис. 4). Градиент концентрации будет направлен к источнику течи, а его величина будет зависеть от интенсивности утечки. Модуль градиента будет определяться приращением концентрации по трем направлениям:

$$\text{grad}(c) = \frac{\partial c}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial c}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial c}{\partial z} \vec{k}. \quad (6)$$

Для нахождения градиента поля в общем случае достаточно измерить концентрацию в трех точках (не лежащих в одной плоскости), чтобы найти компоненты приращения концентрации по трем направлениям. Для обеспечения точности вычислений число точек измерения может быть увеличено.

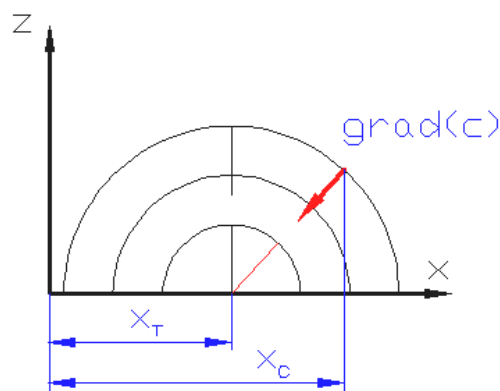


Рис. 4. Положение вектора градиента в поле концентраций

При известном градиенте поля положение течи можно найти из соотношения

$$x_c = x_T + r \cos \Theta, \quad (7)$$

где x_c – координата по x точки, в которой производился замер концентрации; Θ – угол наклона вектора градиента с осью x .

Координата y ищется аналогично. Для удобства вычислений три точки измерений лучше располагать на взаимно перпендикулярных осях, пересекающихся в одной точке. Установив положение источника течи, можно определить его интенсивность.

Данный алгоритм пригоден для локализации течей в случае наличия одного источника. При большем числе источников задача локализации рассматривается как суперпозиция нескольких решений.

Проблемы и перспективы способа. Для испытательного объема конечных размеров уравнение диффузии необходимо рассматривать в параболической форме, с учетом времени протекания процесса. Это обусловлено влиянием атмосферного давления в граничных плоскостях испытательного объема на скорость выделения пробного газа в замкнутый объем.

Поэтому процесс испытаний осложнен необходимостью замера времени измерений и его пересчета на время для идеального случая.

Идеальный случай стационарного уравнения можно рассматривать, если принять границы области бесконечными (условия вакуума при отсутствии тепловой конвекции и внешних набегающих потоков). В этих условиях поверхности уровня этого поля будут иметь вид полусфер с центром в источнике утечки. При наличии значительных скоростей истечения газа поверхности уровня имеют вид гиперболоидов, вытянутых вдоль оси z .

Для анализа такой картины распределения необходимо уравнение диффузии решать совместно с уравнением движения пробного газа в исследуемой области.

Проведенный эксперимент показал, что и при малой величине утечки пробного газа из течи объекта при наличии в пространстве замкнутого объема сил, движущих газовые потоки, поток пробного газа будет отклоняться и смешиваться с другими потоками, обусловленными факторами локального газовыделения, и задавать нестабильность регистрируемому выходному сигналу течеискателя (рис. 5), настроенного на максимальную чувствительность.

На графике (рис. 5) вертикальная линия, ограниченная стрелками, – амплитуда вероятного разброса значений сигнала вследствие остаточной нестабильности фона системы «щуп – замкнутый объем». Горизонтальная прямая линия на графике – условный браковочный порог.

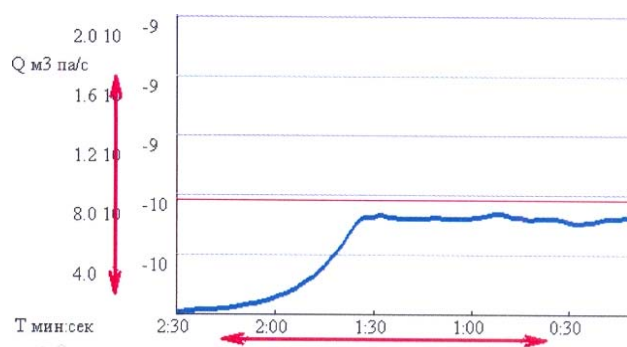


Рис. 5. Графическое отображение натекания пробного газа в вакуум-камеру анализатора (реакция течеискателя на микротечь)

При наличии в испытательном объеме неоднородного поля распределения температур необходимо учитывать и его влияние на коэффициент диффузии. Соответственно, в схеме испытаний необходимо предусмотреть замер температур в различных точках объема.

Указанные особенности усложняют математическую модель диффузии в пространстве испытательного объема.

Решение можно найти численными методами [14] с введением дополнительных граничных условий и применением аппарата программного обеспечения испытаний. При этом нестабильность характеристик применяемого контрольного оборудования должна быть сведена к минимуму [15].

Таким образом, установлено следующее. При известном поле концентрации пробного газа возможно решить задачу локализации течи в специально подготовленной атмосфере через нахождение градиента для этого поля. В отсутствие набегающих потоков и при пренебрежимо малой величине течи изолинии поля концентраций будут являться концентрическими полукруговостями с центром в источнике пробного газа. Градиент поля концентраций можно найти замерами концентраций пространственно ориентированным щупом течеискателя не менее чем в трех различных точках исследуемой области.

Предполагая наличие на контролируемой поверхности объекта нескольких микротечей, поток через каждую из которых меньше чувствительности существующих средств контроля, работы по снижению потерь от дефектов герметичности возможно проводить в направлении повышения эффективности метода локального течеискания, заключающегося в учете влияния на достоверность определения величин потоков течей условий отбора пробного вещества в анализатор течеискателя и в оценке точностных характеристик применяемого контрольного оборудования.

Библиографические ссылки

1. Экспериментальная отработка космических летательных аппаратов / В. А. Афанасьев [и др.] ; под ред. Н. В. Холодкова. М. : Изд-во МАИ, 1994. 412 с.
2. Гардымов Г. П., Парфенов Б. А., Пчелинцев А. В. Технология ракетостроения : учеб. пособие. СПб. : Специальная литература, 1997. 320 с.
3. Гурвич А. К., Ермолов И. Н., Сажин С. Г. Неразрушающий контроль. Кн. 1. Общие вопросы / под ред. В. В. Сухорукова. М. : Высш. шк., 1992. 416 с.
4. Технология производства жидкостных ракетных двигателей : учебник / В. А. Моисеев, В. А. Тарасов, В. А. Колмыков, А. С. Филимонов. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. 380 с.
5. Белокур И. П., Коваленко В. А. Дефектоскопия материалов и изделий. Киев : Техника, 1989. 192 с.
6. ГОСТ 28517–90. Контроль неразрушающий. Масс-спектрометрический метод течеискания. Общие требования. М. : Стандартинформ, 2005.
7. Технология производства космических аппаратов : учебник для вузов / Н. А. Тестоедов [и др.] ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т., Красноярск. 2009. 352 с.
8. Шешин Е. П. Вакуумные технологии : учеб. пособие. Долгопрудный : Изд. дом «Интеллект», 2009. 504 с.
9. Тарасевич Р. М. Методы и средства проверки герметичности узлов, отсеков и систем летательных аппаратов : учеб. пособие. М. : МАИ, 1974. 145 с.

10. The Vacuum Technology Book Volume II. Germany, publ. Pfeiffer Vacuum GmbH, 2013. URL: <http://www.norm.gr/documents/Vacuum-Technology-Book-II-Part-2.pdf> (дата обращения: 5 December 2013).

11. Романовский Р. К. Лекции по уравнениям математической физики. Уравнения колебаний и диффузии : учеб. пособие. Омск : Изд-во ОмГТУ, 2004. 102 с.

12. Дмитриев Е. А. Явления переноса массы в примерах и задачах : учеб. пособие. М. : РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2005. 120 с.

13. Мартинсон Л. К., Малов Ю. И. Дифференциальные уравнения математической физики : учебник для студентов вузов. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1996. 368 с.

14. Фарлоу С. Уравнения с частными производными для научных работников и инженеров. М. : Мир, 1985. 384 с.

15. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий : справочник. В 2 кн. / под ред. В. В. Клюева. М. : Машиностроение, 1986. Кн. 1. 488 с; кн. 2. 352 с.

References

1. Afanasev V. A. [et al.] *Eksperimental'naya otrabotka kosmicheskikh letatel'nykh apparatov* (Experimental verification of spacecraft). Edited by Kholodkov N. V. Moscow, MAI publ., 1994. 412 p.

2. Gardymov G. P., Parfenov B. A., Pchelincev A. V. *Tekhnologiya raketostroeniya* (Rocket technology). St. Petersburg, Spetsial'naya literatura publ., 1997. 320 p.

3. Gurvich A. K., Ermolov I. N., Sazhin S. G. *Nerazrushayushchiy kontrol'. Kn. 1. Obshhie voprosy* (Non-destructive testing. Book 1. Common questions). Edited by V.V. Suhorukov. Moscow, Higher School Publ., 1992. 416 p.

4. Moiseev V. A., Tarasov V. A., Kolmykov V. A., Filimonov A. S. *Tekhnologiya proizvodstva zhidkostnykh raketnykh dvigateley* (Technology of production of liquid rocket engines). Moscow, MSTU Publ., 2008. 380 p.

5. Belokur I. P., Kovalenko V. A. *Defektoskopiya materialov i izdeliy* (Flaw detection of materials and products). Kiev, Technology Publ., 1989. 192 p.

6. GOST 28517-90. *Kontrol' nerazrushayushchiy. Mass-spektrometricheskii metod techeiskaniya. Obshchie trebovaniya* (Nondestructive testing. Mass spectrometry leak detection. General requirements). Moscow, Standartinform, 2005.

7. Testodov N. A. [et al.] *Tekhnologiya proizvodstva kosmicheskikh apparatov* (Production technology of spacecraft.). Krasnoyarsk, SibSAU Publ., 2009. 352 p.

8. Sheshin E. P. *Vakuumnye tehnologii* (Vacuum technology). Dolgoprudnyy, Intellect Publ., 2009. 504 p.

9. Tarasevich R. M. *Metody i sredstva proverki germetichnosti uzlov, otsekov i sistem letatel'nykh apparatov* (Methods and tools for leak testing nodes, compartments and aircraft systems). Moscow, MAI, 1974. 145 p.

10. The Vacuum Technology Book Volume II. Germany, publ. Pfeiffer Vacuum GmbH, 2013. : Available at: <http://www.norm.gr/documents/Vacuum-Technology-Book-II-Part-2.pdf> (accessed 5 December 2013).

11. Romanovskij R. K. *Lektsii po uravneniyam matematicheskoy fiziki. Uravneniya kolebaniy i diffuzii* (Lectures on Differential Equations. Fluctuations and the diffusion equation). Omsk, OmGTU Publ., 2004. 102 p.

12. Dmitriev E. A. *Yavleniya perenosy massy v primerakh i zadachakh* (Mass transfer phenomena in the examples and problems). Moscow, Publ. MUCTR of D.I. Mendelev, 2005. 120 p.

13. Martinson L. K., Malov Ju. I. *Differentsial'nye uravneniya matematicheskoy fiziki* (Differential equations of mathematical physics). Moscow, MG TU Publ., 1996. 368 p.

14. Farlou S. *Uravneniya s chastnymi proizvodnymi dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* (Partial Differential Equations for Scientists and Engineers). Moscow, Mir Publ., 1985. 384 p.

15. *Pribory dlya nerazrushayushhego kontrolya materialov i izdelij. Spravochnik*. (Instruments for nondestructive testing of materials and products. Handbook), edited by V. V. Kljuev. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986.

© Кишкин А. А., Колчанов И. П.,
Делков А. В., Ходенков А. А., 2014

УДК 629.78.054:621.396.018

ПРИМЕНЕНИЕ ПЛИС ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛОГИКИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БОРТОВОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Д. А. Недорезов¹, А. В. Пичкалев¹, С. С. Красненко¹, О. В. Непомнящий²

¹ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52
E-mail: nd@iss-reshetnev.ru

²Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79. E-mail: 2955005@gmail.com

Описаны способ и устройство для микропрограммной отработки и испытаний радиоэлектронной аппаратуры, основанные на эмуляции логики функционирования объекта испытаний в программируемых логических