

1. Фотоприемники видимого и ИК диапазонов/ Под ред. Р. Дж. М. Киеса. — М.: Мир, 1985. — 452 с.
2. Креков Г. М., Рахимов Р. Ф. Оптико-локационная модель континентального аэрозоля. — Новосибирск: Наука, 1982. — 255 с.
3. Межерис Р. М. Лазерное зондирование атмосферы. — М.: Мир, 1988. — 565 с.
4. Зуев В. Е., Комаров В. С. Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы. — Л.: Гидрометеоздат, 1986. — 264 с.
5. Husson N., Chedin A., Scotte N.E. et. al.// Annales Geophysical. Fasc. 2. Series A. 1986. P. 185—190.
6. Андреев Ю. М., Зуев В. В., Романовский О. А. Автоматизированная система поиска оптимальных длин волн для лазерного газоанализа методом дифференциального поглощения. Ч. I. Методика поиска. Деп. в ВИНТИ 25.05.88, рег. № 4058 – В88. М., 1988. 32 с.
7. Вредные вещества в промышленности/ Под ред. А. П. Пруткова. — Л.: Химия, 1977. — 608 с.
8. Rothman L. S., Gamache R. R., Tipping R. N. et. al.// J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 1992. V. 48. P. 469—507.
9. Firsov K. M., Kataev M. Yu., Mitsel' A. A., Ptashnik I. V., Zuev V. V.// J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 1999. V. 61. P. 25—37.

Статья поступила в редакцию 26 сентября 2005 г.

Analysis of possibility of detection of anomalous near-ground concentrations of nitrogen oxides, ammonia and methane by airborne lidar

O. A. Romanovsky

Institute of Atmosphere Optics, Tomsk State University, Tomsk, Russia

The results of analysis of possibility of detection of anomalous near-ground concentrations of nitrogen oxides, ammonia and methane by airborne lidar based on the method of differential absorption (MDA) are presented. Numerical simulation of remote detection of nitrogen oxides emission is carried out using the frequency-tuned radiation of CO and CO₂ lasers at installation of the MDA-lidar operating in the middle IR wavelength range onboard an aircraft. Calculations have shown that it is possible to measure near-ground concentrations of nitrogen oxides at the level of 0.01 of maximum permissible concentration (MPC). The wavelengths are selected which are the most informative for sensing the methane and ammonia emissions of different intensity from pipe-line by means of tunable TEA CO₂ laser with radiation frequency tuners in the airborne MDA-lidar operating with a topo-target at the distance up to 1 km.

УДК 669.71.536

Методы и средства определения утечки воздуха из модулей космической станции

Н. Д. Сёмкин, К. Е. Воронов, А. Н. Занин, И. В. Пияков

Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С. П. Королева,
г. Самара, Россия

Рассмотрены методы и средства регистрации места утечки воздуха из модуля космической станции, основанные на различных физических явлениях, таких как изменение градиента температуры, изменение давления и микроускорений, вызванные истечением струи воздуха в вакуум. Показана возможность регистрации места утечки воздуха с помощью ионизационного и масс-спектрометрического датчиков.

Длительное существование на околоземной орбите обитаемых космических станций, таких как "Мир", "Альфа", функционирующих в условиях воздействия различных факторов космической среды, требует обеспечения их высокой надежности. Возрастающее в последние два десятилетия количество космического мусора, потоков микрометеороидных частиц, а также наличие больших размеров космических станций увеличивают вероятность их разгерметизации.

Проводимые в настоящее время исследования направлены на создание регистрирующей аппаратуры, с

помощью которой определяется место утечки воздуха с внешней и внутренней сторон космического модуля.

В данной работе проводится анализ существующих и разрабатываемых в настоящее время методов и средств определения утечки воздуха из модулей космической станции. Утечка воздуха из гермоотсеков космического аппарата (КА) вызвана следующими факторами:

- воздействием микрометеороидов или орбитальных осколков (космического мусора.);
- соударением при стыковке–расстыковке КА;

- повреждением корпуса при монтажно-ремонтных работах.

При проектировании аппаратуры необходимо выполнить ряд требований, таких как определение утечки воздуха снаружи модуля, а также при "выходе" экипажа или при использовании манипулятора, причем работу с прибором должен выполнять один космонавт.

Кроме того, средства должны позволять определить характеристики следующих источников утечки:

- отверстие (или трещина) в гермокорпусе;
- утечка через уплотнение;
- утечка через иллюминатор и т. д.;
- утечка через клапаны.

Существуют два подхода к решению рассматриваемой проблемы:

- использование системы управления и ориентации КА на основе информации с акселерометров;
- использование переносных средств космонавтом.

Методы на основе использования системы ориентации КА

Рассмотрим первый подход, основанный на построении модели процесса разгерметизации [1—3].

После пробоя КА появляется струя воздуха, вытекающая из отверстия. Эта струя создает реактивную силу, изменяющую угловое положение КА и его линейную и угловую скорости. Решаемая задача состоит в том, чтобы, зная сигналы с системы управления ориентацией КА, определить место пробоя. На основе рассмотрения молекулярного и вязкостного истечения газа из канала определяются скорости молекул в канале, изменение давления и потока. Расчеты выполнялись для КА цилиндрической формы с ориентацией осей, как показано на рис. 1.

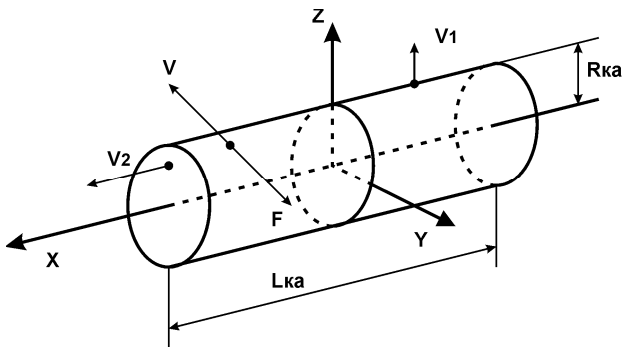


Рис. 1. Схематическое изображение КА. Вектор скорости потока воздуха перпендикулярен оси X

При работе обшивки КА из образовавшегося отверстия истекает воздух, вращая аппарат. По закону сохранения импульса, учитывая, что векторы скорости газовой струи и создаваемой ею силы направлены в противоположные стороны, можно записывать:

$$Fdt = Vdm, \tag{1}$$

где F — реактивная сила;
 V и dm — соответственно, скорость и масса воздуха, истекающая из отверстия за время dt .

Сила F приводит к появлению углового ускорения [2]

$$J_\varepsilon = RF, \tag{2}$$

где ε — вектор углового ускорения;
 R — радиус-вектор отверстия;
 J_ε — матрица моментов инерции:

$$J = \begin{pmatrix} J_x & 0 & 0 \\ 0 & J_x & 0 \\ 0 & 0 & J_x \end{pmatrix}.$$

Решение векторного уравнения с учетом (1) даст следующее:

$$R = \frac{(R, V)V}{V^2} \cdot \frac{[V, \varepsilon J]}{V^2 \frac{dm}{dt}}. \tag{3}$$

Допустим что вектор скорости истекающего воздуха перпендикулярен обшивке КА, при этом возможны два случая, показанные на рис. 1.

В первом случае вектор V лежит в плоскости YZ , и проекция $V_{1x} = 0$. Для векторного случая справедливо равенство $V_{2y} = V_{2z} = 0$.

В реальном КА положение центра масс не постоянно зависит от перемещений людей, аппаратуры и т. д., поэтому она будет смещаться относительно центра аппарата на некоторую величину dR , которая будет меняться с течением времени. В уравнениях (2) и (3) необходимо заменить R на $R-dR$.

Уравнения (2) и (3) в проекциях на оси координат имеют для первого случая следующий вид [2]:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{(R_x - dR_z)V_y - (R_y - dR_y)V_z}{J_x} \cdot \frac{dm}{dt}; \\ \varepsilon_y = \frac{(R_x - dR_x)V_y}{J_e} \cdot \frac{dm}{dt}; \\ \varepsilon_z = \frac{(R_x - dR_x)V_y}{J_x} \cdot \frac{dm}{dt}. \end{cases}$$

$$\begin{cases} R_x - dR_x = \frac{V_y J_z \varepsilon_z - V_z J_y \varepsilon_y}{V^2 \frac{dm}{dt}}; \\ R_y - dR_y = \frac{(R_y - dR_y)V_y + (R_z - dR_z)V_z}{V^2} V_y - \frac{V_y J_x \varepsilon_x}{V^2 \frac{dm}{dt}}; \\ R_z - dR_z = \frac{(R_y - dR_y)V_y + (R_z - dR_z)V_z}{V^2} V_z - \frac{V_y J_x \varepsilon_x}{V^2 \frac{dm}{dt}}. \end{cases}$$

Результаты расчетов первого и второго вариантов пробоя обшивки КА приведены в работе [2]. Расчеты проводились для следующих параметров КА: диаметр — 5 м, длина — 10 м, масса — 10 т, давление внутри аппа-

рата — 100 кПа, давление снаружи — 0 Па, толщина обшивки КА — 2 мм.

При заданных массогабаритных показателях КА имеет следующие моменты инерции: $J_x = 31\,250 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; $J_y \approx J_z = 83\,333 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. По сигналам с датчиков углового ускорения определяются проекции скорости истечения струй воздуха.

Зависимость углового ускорения от места пробоя показана на рис. 2, а линейного ускорения — в работе [2]. Координаты места пробоя определяются из выражений

$$\begin{cases} R_x = \frac{V_z J_y \varepsilon_y - V_y J_z \varepsilon_z}{V^2 \frac{dm}{dt}} + dR_x; \\ R_y = \frac{R}{V} V_y; \\ R_z = \frac{R}{V} V_z. \end{cases}$$

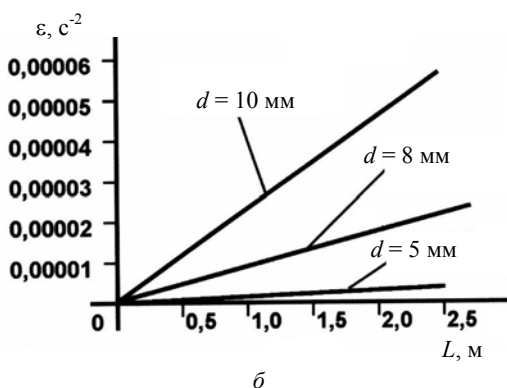
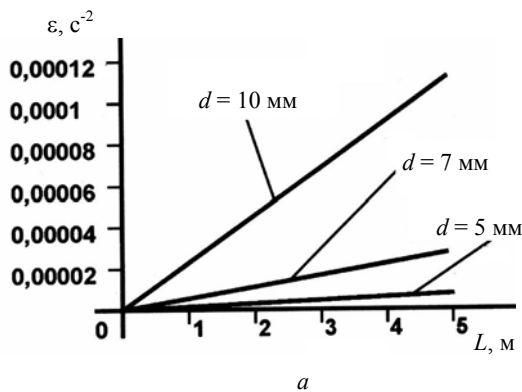


Рис. 2. Зависимость углового ускорения от расстояния между местом пробоя и центром масс: а — пробой боковой стенки; б — пробой с торца

При пробое по второму варианту для определения его места используется система уравнений, приведенная в [2].

Достоинство такой системы регистрации места пробоя — возможность его определения в реальном масштабе

времени. Основной недостаток — может существовать такая зона поражения, в которой невозможно определить местонахождение течи. Это связано с тем, что величина углового ускорения зависит от расстояния между отверстиями (пробоем) до центра масс, и чем меньше это расстояние тем меньше угловое ускорение. Поэтому возле центра масс существует зона, в которой угловое ускорение уже не может быть зарегистрировано датчиками системы управления, при этом, чем меньше размер отверстия, тем эта зона больше. Кроме того, для нахождения положения малых отверстий (<5 мм при больших массах и габаритах КА) необходимо применять датчики микроускорений с высокой чувствительностью. При использовании этого метода на реальных КА со сложной геометрией, требуется проведение сложных расчетов, при этом возможно появление большого количества мест утечки воздуха из КА.

Методы на основе использования датчиков микроускорений КА

Другой подход определения местоположения утечки воздуха из КА заключается в анализе времени прихода сигналов и их амплитудных значений в систему обработки от любых из четырех акселерометров, установленных на обшивке КА с его внутренней стороны [4]. Используются также акселерометры, предназначенные для решения других задач. Для определения координат места удара частиц о поверхность КА (или образовавшейся щели) необходимо знать: время прихода акустической волны к каждому датчику, скорость ее распространения, а также расстояние от места удара до каждого из датчиков и координаты их расположения. Информация от первых трех датчиков может быть использована двумя способами:

временным (учитываются только первые три временных запаздывания);

амплитудным (учитываются только первые три максимальные амплитуды).

Степень точности такого метода зависит от вида и шага сетки. На практике предпочтительнее первый способ (временной) измерения. Реальная поверхность КА неоднородна, т. е. имеются различного рода ребра жесткости, люки, разъемы и т. д., и это неизбежно приводит к появлению сложной интерференционной картины. Возникшие при ударе акустические волны отражаются от неоднородностей конструкций и приходят на два или более датчиков с очень близким временным запаздыванием. Однако аппаратно (или программно) эти два запаздывания можно различить.

Теоретически задача определения местонахождения зоны ударного воздействия частиц на поверхность КА решается с помощью трех датчиков.

Практически для решения задачи необходимо использовать четвертый датчик как начало отсчета времени. По трем из них однозначно определяются координаты зоны удара частиц (рис. 3). Для этого случая записывается следующая система уравнений [4]:

$$\begin{aligned}
 (\Delta t_{2v})^2 &= (x_0 - x_2)^2 + (y_0 - y_2)^2; \\
 (\Delta t_{3v})^2 &= (x_0 - x_3)^2 + (y_0 - y_3)^2; \\
 (\Delta t_{4v})^2 &= (x_0 - x_4)^2 + (y_0 - y_4)^2.
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

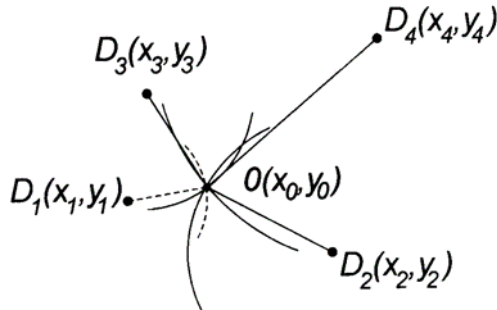


Рис. 3. Схема расположения датчиков по поверхности КА

Датчик $D_1(x_1, y_1)$ выполняет функцию датчика начала отсчета. По сигналу с датчика D_1 после соответствующей обработки начинается отсчет времени. На этот датчик сигнал от источника возмущения упругих колебаний – точки $O(x_0, y_0)$ приходит первым. На датчик $D_2(x_2, y_2)$ — сигнал приходит вторым, на $D_3(x_3, y_3)$ — третьим и на $D_4(x_4, y_4)$ — четвертым. Местоположение зоны возмущения определяется по трем датчикам: D_2, D_3, D_4 .

Решение системы уравнений (4) позволяет определить координаты точки $O(x_0, y_0)$ — места воздействия частицы:

$$\begin{aligned}
 x_0 &= x_2 + R_2 \frac{1 - z^2}{1 + z^2}; \\
 y_0 &= y_2 + R_2 \frac{2z}{1 + z^2},
 \end{aligned}$$

где $z_{1,2} = -\frac{b \pm \sqrt{b^2 - c^2 + a^2}}{c - a}$; $a = 2R_2(x_2 - x_3)$;
 $b = 2R_2(y_2 - y_3)$.

Окончательно для x_0, y_0 получим:

$$\begin{aligned}
 x_0 &= x_2 + R_2 \left(\frac{c^2 - N^2}{c^2 + N^2} \right); \\
 y_0 &= y_2 + 2R_2 \left(\frac{cN}{c^2 + N^2} \right),
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

где $c = \left(-2R_2A - \sqrt{4R_2^2A^2 - [B^2 + A^2 + R_2^2 - R_3^2]^2 + 4R_2^2B^2} \right)$;

$$N = B^2 + A^2 + R_2^2 - R_3^2 - 2R_2B; \quad A = y_2 - y_3;$$

$$B = x_2 - x_3.$$

Точность нахождения зоны ударного воздействия частицы на поверхность КА определяется количеством установленных датчиков [5]. Для определения общего количества датчиков используется следующая зависимость:

$$K = 2 \sum_{i=1}^M \left\{ (nc + 1) + \sum_{j=1}^{N_i} (n_g + 1) \right\},$$

где K — общее количество датчиков на КА;

M — количество отсеков в составе КА, $i \in (1; M)$;

n_i — количество зон на поверхности i -го отсека;

N_i — количество субповерхностей на поверхности i -го отсека;

n_g — количество зон в составе g -той субповерхности i -го отсека $g \in (1; M_g)$.

Чувствительным элементом датчиков системы регистрации является пьезоэлектрический акселерометр, работающий в диапазоне частот 200 кГц.

На рис. 4 приведены величины сигналов для нескольких ударных импульсов простой формы и показаны теоретические формы реакции акселерометров в зависимости от коэффициента демпфирования, нижней и верхней граничных частот.

В случае ударных воздействий малых длительностей (высокоскоростной удар) влиянием нижней граничной частоты ω_1 можно пренебречь, и вид частотной характеристики будет сильно зависеть от демпфирования и резонансной частоты. Из рис. 4 следует, что с точки зрения частотных характеристик наиболее подходящими являются акселерометры с широкой полосой пропускания, т. е. с очень высокой резонансной частотой. Помехи, возникающие из-за механического возбуждения акселерометра, резко уменьшаются.

Структурная схема устройства, реализующая процесс измерения сигналов с восьми акселерометров, приведена на рис. 5 и включает следующие блоки: датчики, усилители, полосовые фильтры, регистры, дешифратор, микроконтроллер, источник опорного напряжения, индикатор.

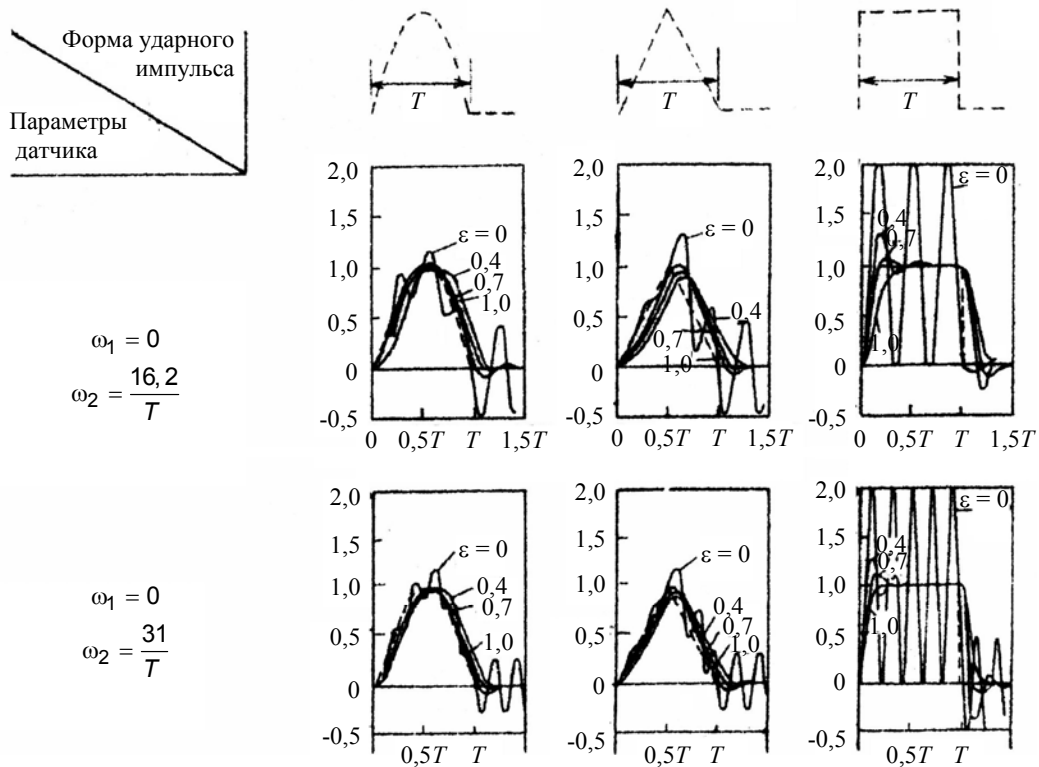


Рис. 4. Несколько ударных импульсов (а, б, в) простой формы

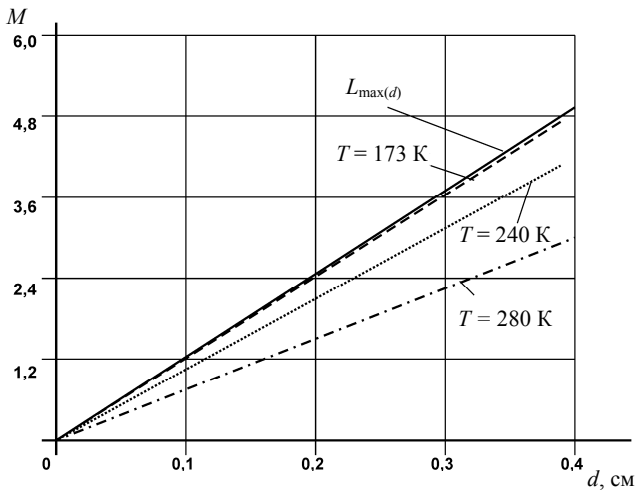


Рис. 5. Зависимость максимальной дальности действия приемника ИК-излучения от диаметра отверстия при условии отсутствия подсвечивающего фона, для различных величин температуры фона: 173, 240, 280 К

Микроконтроллер управляет работой мультиплексора, амплитудно-цифрового преобразователя (АЦП), а также реализует алгоритм обработки данных. Для определения зоны соударения частицы с поверхностью КА используются выражения (5).

Метод обработки использует таблицы значений, заранее полученных и записанных в запоминающее устройство (ПЗУ) в соответствии с формулой (5). Микропроцессор принимает входные параметры и, обрабатывая их по соответствующему алгоритму, получает адрес, по которому располагаются данные в ПЗУ. Эти данные и будут координатами зоны воздейст-

вия частицы (зоны утечки воздуха из КА). Таблица данных представляет собой матрицу размером $2N$ байт, где N — число ячеек интерполяции для x_0, y_0 , соответственно.

Рассмотренное устройство наиболее целесообразно для применения на международной космической станции в связи с ее большими размерами и временем существования. Определение зоны воздействия частиц на элемент поверхности КА предполагает уменьшение времени дальнейшего поиска точного места пробоя, проводимого, например, космонавтом.

Другие подходы к решению проблемы определения места утечки воздуха, использующие системы и элементы КА, пока не найдены. Рассмотрим возможности применения автономных датчиков, используемых космонавтом, т. е. приборов переносного типа.

Анализ моделей истечения воздуха из отверстий (щели) КА [6, 7] позволяет исследовать возможности взаимодействия различных датчиков с потоками воздуха (или другого газа). Поток газа из отверстия при пробое обшивки характеризуется такими показателями как концентрация, угловое расхождение, температура, влажность, скорость, а также зависимость их от времени и расстояния от источника утечки до датчика.

Методы на основе переносных датчиков утечки воздуха из КА

Рассмотрим вопрос о возможности использования волн ИК-диапазона для обнаружения микротрещин и пробоев в обшивке КА [8, 9]. Как известно, для характеристики излучения нагретых тел используют понятие "абсолютно черное тело" (АЧТ). Основной характеристикой излучения АЧТ является спектральная повер-

ность плотности излучения r_λ , [Вт/(см²·мкм)]. Зависимость спектральной плотности излучения АЧТ от температуры определяется формулой Планка

$$r_\lambda = \frac{c_1}{\lambda^5 \left(\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right)},$$

где T — абсолютная температура К;

$$c_1 = 3,74 \div 10^{-12} \text{ Вт/см}^2;$$

$$c_2 = 14\,388 \text{ мкм} \cdot \text{К}.$$

Интегрируя выражение для спектральной плотности АЧТ в диапазоне от 0 до λ_M , получаем:

$$r_{0-\lambda_M} = \int_0^{\lambda_M} r_\lambda(T) d\lambda = \frac{\sigma T^4}{4},$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-12} \text{ Вт/(см}^2 \cdot \text{К}^4)$ — постоянная Стефана-Больцмана.

Таким образом, в коротковолновой части спектра АЧТ излучается только четверть потока излучения. Сигнал приемника излучения (болометра, фоторезистора и т. д.) пропорционален потоку излучения от объекта, т. е. интегральной плотности излучения в некотором диапазоне длин волн. Этот диапазон зависит от спектральных характеристик приемника излучения и оптических элементов тепловизора. Современные тепловизоры [9], как правило, работают в спектральных диапазонах длин волн 3—5 или 8—12 мкм. В диапазоне 3—5 мкм при $T = 300 \text{ К}$ АЧТ излучает лишь 1,3 % потока, в диапазоне 8—12 мкм — 26,4 %, что делает его более предпочтительным. Тепловизор реагирует, по сути дела, на контраст лучистости. При рассмотрении задачи о возможности обнаружения отверстия в обшивке КА можно сделать вывод, что тепловое излучение такого отверстия близко к излучению АЧТ. Максимум такого излучения наблюдается при длине волны 9,66 мкм и температуре газа внутри КА около 300 К.

Схема приемника теплового излучения включает следующие основные элементы: фокусирующая система (совокупность линз или зеркал), чувствительный элемент (болометр, фоторезистор), усилитель, индикаторное устройство [10].

Различают три группы фоторезисторов: пленочные, монокристаллические и легированные примесями.

Фоторезисторы из HgCdTe имеют спектральный диапазон чувствительности 8—13 мкм, максимальное значение обнаружительной способности порядка $2 \cdot 10^{10}$ — $9 \cdot 10^{10}$ см·Гц^{1/2}/Вт при длине волны 10 мкм, сопротивление 100—300 Ом. Зависимость выходного напряжения приемника от падающего лучистого потока имеет линейный участок до значения порядка $(10^{10}$ — $10^5)F_{\text{тр}}$.

Максимальная дальность действия тепловизора при наблюдении объекта на неизлучающем фоне определяется внутренними шумами приемника излучения и усилителя, при наблюдении объекта на однородном излучающем фоне существует постоянная засветка приемника. При этом максимальная длительность дей-

ствия прибора уменьшается за счет ухудшения пороговой чувствительности приемника и уменьшения величины полезного сигнала.

Расчеты по методу, предложенному в [11], показывают, что максимальная дальность действия линейно зависит от размера отверстия в обшивке КА.

На рис. 5 показаны зависимости максимальной дальности действия приемника от диаметра отверстия при условии отсутствия подсвечивающего фона для различных величин температуры фона. В реальных условиях функционирования элементов конструкций КА излучаемый ими фон является неоднородным, что предполагает разработку специальных методик обработки информации на фоне шумов, а также поиска места утечки воздуха из отверстия (щели). Кроме того, увеличивается неоднородность в определении места утечки, и даже высокая чувствительность приемника излучения может не дать положительных результатов. С другой стороны, существует большая проблема осуществления физического моделирования работы такого прибора в условиях реального воздействия факторов космической среды в лабораторных условиях. Последнее в той или иной степени касается и других методов регистрации утечки воздуха из модулей КА.

В настоящее время разработан ряд приборов для определения места утечки воздуха из модуля космической станции. Комплект аппаратуры "Бар" был поставлен ЦНИИ машиностроения Росавиакосмоса для обнаружения места утечки воздуха из станции "Мир". Специалисты ЦНИИмаша предложили использовать для этого температурно-влажностный метод. Место утечки определялось по захлаживанию его окрестностей вследствие понижения температуры адиабатически расширяющегося воздуха при истечении его в вакуум. Как показали расчеты и эксперименты, необходимо обнаружить градиентную зону диаметром около 2 см с температурой, на 1—1,5 °С ниже окружающей температуры и с влажностью, на 2—3 % выше фона.

В комплект "Бар" вошли следующие приборы:

- дистанционный ИК-термометр "Кельвин" для измерения температуры поверхности отсеков с точностью 1 °С (разработан ЗАО "Евромикс", Москва);
- автономный термогигрометр "Ива-6А" для измерения параметров воздушной среды с точностями 0,5 °С по температуре и 1 % — по относительной влажности (разработан ООО "Микрофлор", Москва);
- дистанционный автономный пироэндоскоп "Пирэн" для измерения контраста температуры (точность определения температуры 0,1 °С) и наблюдения мест измерений в труднодоступных зонах (разработан в ЦНИИмаше, г. Королев).

Принципиально новой разработкой является "Пирэн", который представляет собой эндоскоп, заключенный в гибкий металлический тубус с установленным на управляемом рабочем конце датчиком температуры. Космонавт-оператор управляет изгибом эндоскопа, доставляя термодатчик в труднодоступные места. Температура измеряется бесконтактным методом по ИК-излучению элементов конструкции станции. Оператор может освещать место работы и осматривать его по проложенным внутри эндоскопа

волоконно-оптическим кабелям. Эндоскоп поставлен ООО "Микромед-плюс" (Санкт-Петербург), термодатчик с блоком индикации — ЗАО "Евромикс".

Кроме "Бара" для поиска негерметичности КБ "Салют" ГКНПЦ имени М. В. Хруничева разработан акустический пеленгатор УТ-2К, способный регистрировать свист воздуха, истекающего в окружающую среду.

Методы на основе ионизации атомов и молекул газа

Как показывают эксперименты наиболее перспективным является использование методов, основанных на ионизации каким-либо источником атомов и молекул воздуха с последующей сепарацией ионов кислорода и азота.

В этом случае необходимо рассматривать возможности возбуждения или ионизации исследуемого газа с помощью лазера и электронной пушки.

Можно попытаться использовать возбуждение атомов с тем, чтобы затем ионизационным методом их детектировать. Для этой цели применяют оптическое излучение. Вероятность возбуждения атома из уровня 1 на уровень 2 с энергией перехода E_{21} и вырождением уровня ξ определяется выражением [12]

$$W_{12} = \frac{\xi}{\xi_1 + \xi_2} \exp\left(-\frac{E_{21}}{k \cdot T_{rad}}\right),$$

где T_{rad} — температура оптического излучения на частоте перехода $\omega = E_{21} / \hbar$;

k — постоянная Больцмана.

Вероятность возбуждения состояний атомов с энергией несколько электронвольт очень мала, так как температура излучения обычных источников света $T_{rad} \ll E_{21} / \hbar$. Для получения высокой вероятности возбуждения атома необходимо выполнить условие $kT_{rad} \gg E_{21}$, т. е. нужен источник света с очень высокой температурой излучения. Именно таким свойством обладает лазер.

Для регистрации поглощения света атомом можно использовать различные методы. Наиболее простой и быстрый способ эффективного детектирования возбужденных атомов — фотоионизация атомов излучением с частотой ω_n , удовлетворяющей условию $J - \hbar\omega_{12} < \hbar\omega_n < 1$, где J — потенциал ионизации атома.

В фотоионизационном методе используется способность лазерного излучения осуществлять путем стимулированных квантовых переходов быстрое резонансное возбуждение атома под действием нескольких лазерных импульсов с соответствующими частотами на высоколежащие состояния, из которых происходит их ионизация, либо лазерным излучением, либо другим эффективным методом (например, электрическим полем). Метод на основе фотоионизации довольно универсален, так как не требует специальной схемы уров-

ней, типа и скорости распада атомов и применим принципиально к любому атому.

Учитывая, что автоионизационные состояния лежат выше границ ионизации, а также число резонансных ситуаций возбуждения атомов из основного состояния до ионизации увеличивается, целесообразно использовать метод прямой резонансной фотоионизации. В этом случае аппаратура ионизации будет проще, и затраты энергии уменьшаются.

Для определения количества ионов, образовавшихся в результате взаимодействия лазера с газовой средой, приведем приближенный расчет.

Исходя из выбранной схемы фотоионизации, а также из опытов проводимых экспериментов по фотоионизации атомов ксенона выбираем длину волны лазера, равную 256 нм, т. е. частота излучения лазера будет равна

$$\omega = \frac{2\pi c}{\lambda} = 7,36 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}.$$

Энергия одного фотона в таком излучении будет

$$\hbar\omega = 4,85 \text{ эВ},$$

где $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 6,59 \cdot 10^{-16} \text{ эВ}\cdot\text{с}$;

h — постоянная Планка.

Напряженность ионизирующего поля определяется формулой

$$E = \frac{\omega \sqrt{2m \cdot I_i}}{e} 10^{-2} \text{ [В/см]} = 8,64 \cdot 10^6 \text{ В/см},$$

где m — масса электрона;

I_i — потенциал ионизации;

e — элементарный заряд.

Вероятность многофотонной ионизации [13]:

$$W = \omega \left(\frac{I}{\hbar\omega}\right)^{2l+\frac{3}{2}} \left(\frac{e^2 E^2}{3m\omega^2 E_i}\right)^{\left(\frac{E_i}{\hbar\omega}+1\right)},$$

где $l = 3$ — орбитальный момент;

E_i — потенциал ионизации атома ксенона, равный 12,127 эВ.

Для первой ступени ионизации: $W_{12} = 0,723 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$, для второй — $W_{2i} = 1,9 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$, т. е. возбуждение ксенона до 9,5679 эВ происходит за 0,723 мкс, а ионизация — за 1,9 мкс.

При частоте повторения импульсов в лазере 100 Гц, определим интенсивность излучения лазера как:

$$I_{12} = f \Phi_{sat12} = 64,6 \text{ Вт/см}^2;$$

$$I_{2i} = f \Phi_{sat2i} = 6,62 \text{ Вт/см}^2,$$

где Φ_{sat1} и Φ_{sat2} — плотности энергии насыщения, соответственно равные $6,46 \cdot 10^{-4}$ и $6,62 \cdot 10^{-2}$ Дж/см².

Количество образующихся фотоионов можно определить из уравнения [14, 15]

$$\frac{N_i}{N_a} = 1 - \frac{a_1 + a_2}{2a_2} \exp(-(a_1 - a_2)t) - \frac{a_1 - a_2}{2a_2} \exp(-(a_1 + a_2)t), \quad (6)$$

где $N_a = 10^{10}$ см⁻³ — концентрация облучаемых атомов;

$$a_1 = W_{12} \left(1 + \frac{W_{2i}}{2W_{12}} \right); \quad a_2 = W_{12} \sqrt{1 + \left(\frac{W_{2i}}{2W_{12}} \right)^2};$$

$$a_1 = 7,24 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}; \quad a_2 = 7,23 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}.$$

Уравнение (6) запишем в виде

$$\begin{aligned} \frac{N_i}{N_a} &= 1 - 1,0004 \exp(-1000t) + \\ &+ 0,0007 \exp(-14,47 \cdot 10^5 t); \quad (7) \\ N_i &= (1 - 1,0004 \exp(-1000t) + \\ &+ 0,0007 \exp(-14,47 \cdot 10^5 t)) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}. \end{aligned}$$

Если возбуждающий и ионизирующий импульсы точно синхронизированы во времени с началом $t = 0$, то при длительности импульсов 20 нс через два импульса будет получено на единицу длины 6342 фотона/см. При длине зоны взаимодействия лазера с газом 50 см будет получено 317 100 ионов.

Если считать, что распределение ионов в пространстве определяется по нормальному закону, то число ионов, падающих на детектор (вторично-электронным умножитель), будет определяться как

$$N(R) = \frac{N_0}{4\pi^2} \exp\left(-\frac{R^2}{2}\right).$$

На рис. 6 приведена теоретическая зависимость количества ионов на входе детектора от расстояния между источником утечки и детектором.

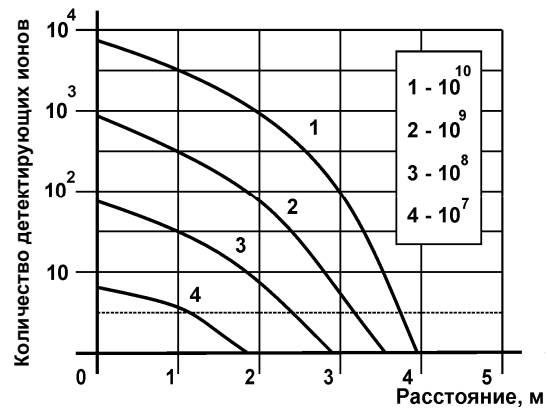


Рис. 6. Зависимость количества ионов на входе детектора от расстояния между источником утечки и детектором

Сравнивая характеристики газовых лазеров и лазеров на красителе, можно сделать вывод, что для получения излучения с $\lambda = 256$ нм лучше использовать лазеры на красителях с удвоением частоты, что обеспечивает нужную частоту повторения импульсов 100 Гц, в то время как газовые лазеры для получения этой частоты повторения импульсов значительно усложняются и имеют большие габаритные размеры. Длина волны 256 нм получается с помощью удвоения частоты излучения лазера на кристалле АДР длиной 25 нм (60°-й Z-срез) при пиковой мощности излучения лазера до 10 кВт. Спектральная ширина линии лазера на красителе сужается до 0,2 нм с помощью дифракционной решетки и призмы, установленных внутри резонатора. Угол фокусировки внутри кристалла составляет 3,2 мрад, расходимость луча 0,1 мрад. Габаритные размеры резонатора лазера на кристалле 200 мм, а газового лазера — 300×20 мм.

Таким образом, общие размеры устройства (с учетом блока обработки) составляют 350×50 мм.

Ионизация электронным пучком

Другим источником ионизации являются электронные пучки, получаемые с помощью так называемых электронных пушек различных конструкций. Для использования такого способа необходимо определить основные соотношения и характеристики устройства его реализации.

Приведем краткий расчет параметров источника электронов (пушки) и электронного пучка.

При распространении пучка электронов в условиях высокого вакуума основным в его динамике является электростатическое расталкивание частиц, обусловленное пространственным зарядом пучка. Рассмотрим инжекцию в вакуум цилиндрического однородного пучка электронов с начальной энергией частиц E , током I и радиусом a . Из уравнения Пуассона для электрического поля следует, что заряд пучка создает радиальное электрическое поле E_r , равное [16, 17]

$$E_r = -60 \frac{I}{\beta a} \begin{cases} \xi, & \text{при } \xi \leq 1 \\ \xi, & \text{при } \xi > 1 \end{cases},$$

где $\xi = \frac{r}{a}$; $\beta = \frac{v}{c}$;

v — скорость электронов пучка.

В этом поле электроны приобретают потенциальную энергию W_1

$$W_{\max} = -eE; \quad a = \frac{I}{17\beta}.$$

Распространение пучка электронов возможно, если кинетическая энергия частиц E превышает их потенциальную энергию, т. е. $E > W_{\max}$ или $I < I_{\max} = 17\beta E$.

Таким образом, поле пространственного заряда ограничивает ток пучка, инжектируемого в вакуум. В нерелятивистской области энергии частиц $17\beta \approx E^{1/2}$, где E имеет размерность в кэВ.

Энергия пучка $E = eU_{k-a}$, где e — заряд электрона; U_{k-a} — разность потенциалов между катодом.

При $U_{k-a} = 3$ кВ; $U_a = 1$ кВ; $E = 2000$ эВ, имеем ток $I < I_{\max} = 2^{3/2} = 2,8$ А.

Электронная пушка, формирующая параллельный цилиндрический пучок, может быть создана путем использования части плоскопараллельного потока, из которого "вырезается" область в виде цилиндра. Для определения формы фокусирующих электродов решается внешняя задача при следующих начальных условиях, заданных на границе области [17]:

$$j = 2,33 \cdot 10^{-6} \frac{U_a^{3/2}}{z^2}; \quad U = U_a \left(\frac{z}{d} \right)^4,$$

где z — координата вдоль оси пучка;

d — расстояние катод—анод;

j — плотность тока.

Основной параметр такой пушки определяется соотношением, вытекающим из закона "степени 3/2":

$$P = \frac{I}{U_a^{3/2}} = 2,33 \cdot 10^{-6} \frac{\pi r_k^2}{d^2},$$

где I — ток пучка;

r_k — радиус катода.

При $U_a = 1$ кВ и $I = 30$ мкА значение

$$P = 0,95 \cdot 10^{-9} \frac{A}{B^{3/2}}, \quad \text{тогда } d = \sqrt{\frac{2,33 \cdot 10^{-6} \pi r_k^2}{P}} \quad \text{при}$$

$r_k = 0,2$ мм и $d = 17,5$ мм.

На выходе из пушки при $z = d$, т. е. на аноде плотность тока составит

$$j = 2,33 \cdot 10^{-6} \frac{U_a^{3/2}}{d^2} = 24 \text{ мА/см}^2.$$

Расфокусирующее действие анодного отверстия в рассматриваемой пушке можно приближенно учесть, если исходить из предположения, что оно эквивалентно действию линзы-диафрагмы, фокусное расстояние которой

$$f = \frac{4U_a}{\left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)_{z=d}} = 52,5 \text{ мм},$$

тогда угол наклона электронных траекторий на выходе из пушки определяется формулой

$$\alpha = \text{tg} \alpha = \frac{r_k}{|f|} = \frac{1}{3} \frac{r_k}{d} = 0,0038^\circ.$$

На фокусирующей электрод подается напряжение 400 В при токе 10 мА.

Габаритные размеры электронной пушки составят на более 60x60x50 мм. Ионизация газа происходит в результате столкновений электронов с молекулами газов. Скорость образования ионов зависит от состава газов, их давления, плотности заряда в электронном пучке и его скорости. Она может быть выражена формулой

$$n_i = B_i p \frac{j}{e},$$

где n_i — количество ионов в 1 см³ объема в секунду;

B_i — удельная ионизация, которая определяется числом ионов, создаваемых одним электроном на отрезке пути 1 см;

p — давление газа;

j — плотность электронного тока;

e — заряд электрона.

Количество ионов, образующихся на единице длины пучка в 1 с, может быть вычислено с помощью формулы

$$N = n_i r_n^2 \pi = B_i p \frac{j}{e} \pi r_n^2,$$

где $p = N_a k T$ — давление газа;

N_a — концентрация атомов газа;

T — температура газа;

k — постоянная Больцмана.

Плотность электронного потока определяется по формуле

$$j = 2,33 \cdot 10^{-6} \frac{U_a^{3/2}}{z^2} [\text{А/см}^2],$$

где z — расстояние от катода до рассматриваемой точки.

Учитывая угол наклона электронных траекторий на выходе из пушки, радиус пучка электронов на расстоянии z от катода определяется из формулы

$$r_n = r_{n0} + 2z \cdot \operatorname{tg} \alpha,$$

где $r_{n0} = r_k = 0,2$ мм.

При длине зоны взаимодействия электронного пучка с газом, равной 50 см, количество образующихся ионов найдем по формуле

$$N_i = \frac{2,7 \cdot 10^6 B_i N_a (0,02 + 2z \cdot \operatorname{tg} \alpha)^2}{z^2}.$$

При распределении ионов в пространстве по нормальному закону

$$N(z) = \frac{N_i}{4\pi^2} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right)$$

можно определить число ионов, детектируемых приемником ионов.

На рис. 7 приведены теоретические зависимости детектируемых ионов от расстояния между объектом и приемником при различных значениях концентрации газа N_a .

Количество ионов

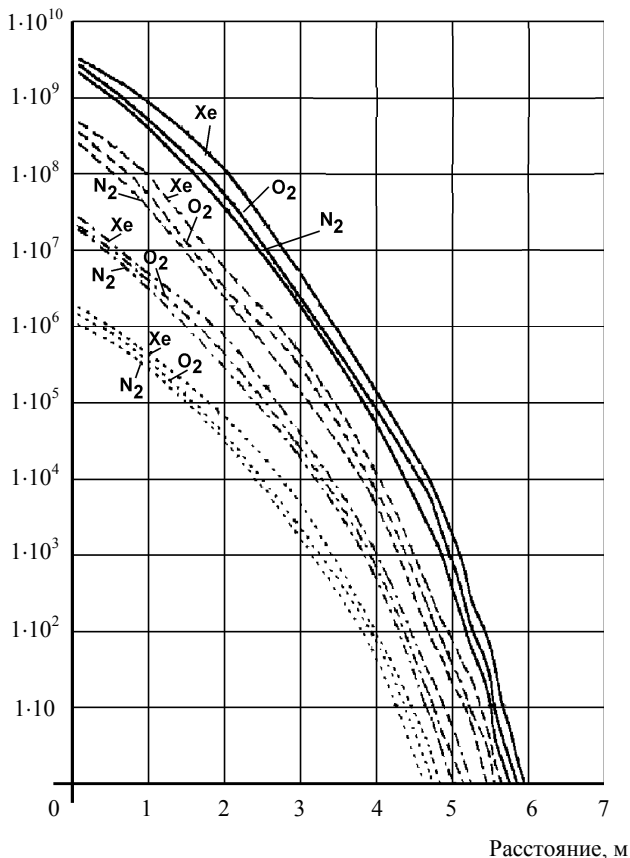
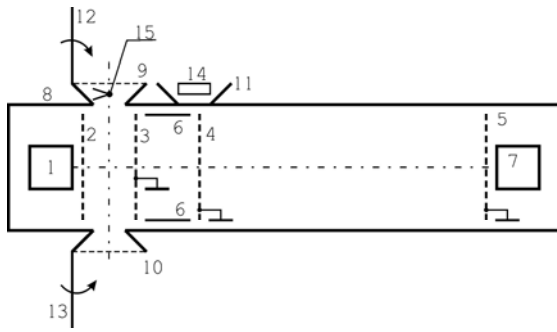


Рис. 7. Зависимость детектируемых ионов от расстояния между объектом и приемником при различных концентрациях $N_a, 1/\text{см}^3$: — 10^{10} ; - - - 10^8 ; - · - · 10^9 ; ···· 10^7

Сравнение оценки количества ионов, падающих в приемник при облучении объекта лазером (см. рис. 7) и электронным пучком (см. рис. 6), показывает, что оба подхода по чувствительности могут быть практически реализованы. Однако такие устройства имеют значительное потребление и высокие напряжения. Применение их в качестве ручных устройств при работе в космических условиях является проблематичным. При уменьшении величины их энергетических параметров уменьшается чувствительность как функция расстояния прибора до источника течи. Для практической реализации таких устройств требуется экспериментальная проработка с учетом различных шумовых моделей (например, влияние собственной внешней атмосферы КА).

Методы и устройства на основе использования масс-спектрометров

Использование источника электронов, работающих в малом объеме ионизации, является менее энергопотребляющим в случае, когда он является элементом, например, времяпролетного или другого типа масс-спектрометра [18—20]. Такие приборы — наиболее чувствительны к различным химическим элементам газовых потоков, в частности при использовании в качестве приемника ионов микроканальных пластин или ВЭУ-7. Однако здесь возникают такие же проблемы при обработке полезных сигналов на фоне помех (газовой компоненты собственной внешней атмосферы). Поэтому в чистом виде применение известных конструкций данного типа приборов требует проработки соответствующих технических решений и специальных методов обработки. В работах [21—23] показана возможность применения масс-спектрометра в режиме сепарации масс. Схема такого масс-спектрометра показана на рис. 8, а.



а

Рис. 8. Масс-спектрометр в режиме сепарации масс:

а — устройство обнаружения утечки воздуха из КА;

б — сигналы при сепарации азота и кислорода из газовой смеси

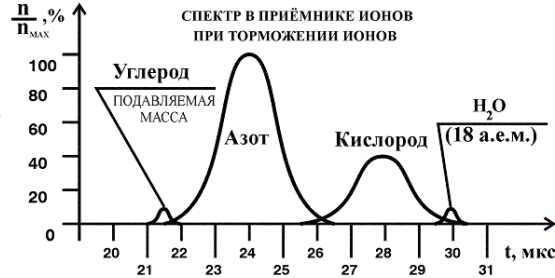
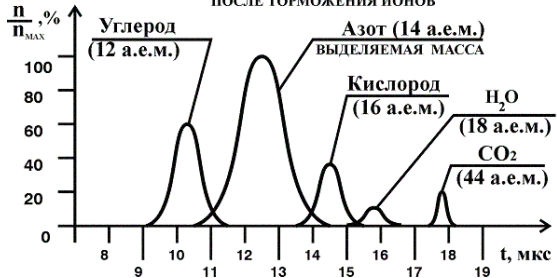
1 — ионный источник с электронной пушкой; 2 — ускоряющая сетка; 3, 4, 5 — заземленные сетки; 6 — отклоняющие пластины поперечного электрического поля; 7 — приемник ионов;

8 — корпус; 9—11 — приемные камеры;

12, 13 — герметичные заслонки; 14 — микрофонный датчик; 15 — термопарный датчик;

б — сигналы при сепарации азота и кислорода из газовой смеси

СПЕКТР В ПРОСТРАНСТВЕ МЕЖДУ ОТКЛОНЯЮЩИМИ ПЛАСТИНАМИ ПОСЛЕ ТОРМОЖЕНИЯ ИОНОВ



б

В этой схеме применен выталкивающий импульс специальной формы [21]

$$E(t) = \begin{cases} \frac{m_0}{q} \frac{TL_1}{t_0(T-t_0)^2}, & 0 \leq t \leq t_0; \\ \frac{m_0}{q} \frac{TL_1}{t(T-t)^2}, & t_0 \leq t \leq T. \end{cases}$$

Ионный источник с электронной пушкой 1 создает поток электронов в пространстве между сетками 2 и 3 с частотой 200 Гц. При этом происходит ионизация газа в рабочей камере. В момент t_0 на ускоряющую сетку 2 попадает изменяемый во времени выталкивающий импульс положительной полярности. В тот же момент подается положительный импульс на отклоняющие пластины поперечного электрического поля 6, в течение времени t_0 для отклонения ионов в начальный момент. В остальное время ионы регистрируемой компоненты газа из промежутка между сетками 2 и 3 проходят в приемник ионов 7, в котором будет зарегистрирована расчетная масса (например кислород или азот), содержащаяся в потоке истекающего из отверстия воздуха. Закон изменения электрического поля выталкивающего импульса рассчитывается таким образом, что устройством может быть выделена только одна масса, а остальные массы подавляются и не попадают в приемник ионов 7, т. е. происходит сепарация масс.

Таким образом, повышается достоверность регистрации утечки воздуха из отверстия в обшивке КА в условиях существования газовой компоненты собственной атмосферы (СВА). В приборе дополнительно установлены микрофонный (6) и термопарный (7) датчики [22, 23]. При значительной величине утечки (диаметр отверстия 1—2 мм) и на небольших расстояниях от места утечки воздуха регистрация производится с помощью микрофонного и термопарного датчиков, а с увеличением расстояний от места утечки газа — с помощью ионизационного преобразователя. Переключе-

ние датчиков осуществляется автоматически при обработке информации со всех датчиков.

Сигнал с приемника 7 (см. рис. 8, б) пропорционален числу ионов выделяемой массы.

Измеряется соотношение сигналов от масс ионов кислорода U_{16} и азота U_{14} , что указывает наличие воздуха из места утечки, т. е.:

$$\frac{U_{14}}{U_{16}} = \frac{78}{21}.$$

Для устранения шумов скафандра космонавта и СВА КА производится настройка прибора. Заслонка 12 закрывается, а 13 — открывается. Замеряются уровни содержания кислорода и азота в газовой составляющей СВА. При измерении полного уровня азота и кислорода от места утечки скафандра и СВА заслонка 13 закрывается, а 12 — открывается.

Для определения уровня шума скафандра в него можно дополнительно ввести заранее известное количество безопасного эталонного газа, например гелия. Вычитая из полного спектра спектр шумов, получим величину полезного сигнала. Эталонный спектр воздуха вносится в память прибора при его настройке. С помощью изменения параметров выталкивающего импульса (t_0 , E_0 , T) ионизационный преобразователь можно настроить на одну или две из составляющих воздуха — кислород и азот. Измеряемый диапазон давлений в струе воздуха 10^{-3} — 10^{-7} мм рт. ст., при этом расчетный диапазон возможных расстояний прибора до объекта составляет 0,01—6 м, при которых возможна расчетная устойчивая регистрация.

В работах [6, 7] приведены модели истечения воздуха через отверстие в оболочке КА. Рассмотрены истечения воздуха из длинных и коротких каналов, а также из щели через электровакуумную термоизоляцию (ЭВТИ).

Показаны изменения концентрации частиц воздуха от расстояния и времени.

Многоинформативные преобразователи параметров газа из КА

Процесс утечки воздуха из КА как объект исследования характеризуется такими основными параметрами как концентрация, температура, влажность, неравномерность потока в пространстве, его геометрия.

В идеальном случае необходимо создать такой преобразователь, который воспринимал бы основные из указанных параметров источника течи. Для этого на основе рассмотренных датчиков, основанных на различных принципах, необходимо провести синтез многопараметрического преобразователя, оптимального по каким-либо заданным критериям, например по методике [24]. Одним из примеров такого преобразователя может служить прибор, приведенный в [25].

Датчиковый блок (рис. 9) включает ионизационный 1, два термопарных 2, 3 и микрофонный 4 датчики, согласующие усилители 5—8, модуль обработки первичных сигналов 9, индикаторное устройство 10 и лазерную указку 15. Вся область регистрации разбита на три части, соответствующие областям оптимальной чувствительности ионизационного, термопарного и микрофонного датчиков ($10^{-6} \div 1$ мм рт. ст.). Эксперименты выполнялись в вакуумной камере диаметром 6 м, в которую введены длинные каналы с капиллярами. Устройство напуска воздуха позволяло получать контролируемые потоки газа в диапазоне 30—300 мл. мм рт. ст./с. Устройство перемещения преобразователя позволяло с помощью микродвигателя передвигать его вместе со штангой по двум координатам x и y относительно капилляров.

На рис. 10, *a*, *б* показаны сигналы с ионизационного датчика преобразователя в процессе его перемещения вверх—вниз и слева направо относительно капилляров. Величина потока составляет 105 мл. мм рт. ст./с.

На рис. 10, *a* дан график движения преобразователя справа налево. Максимальное значение импульса соответствует совмещению оси прибора с осью капилляра. Наличие других максимумов объясняется попаданием в ионизационный датчик отраженных от стенок камеры частиц воздуха, а также возможными турбулентностями углового распределения струн. При движении преобразователя слева направо (см. рис. 10, *б*) также наблюдается основной и побочные максимумы.

Чувствительность ионизационного датчика можно увеличить установкой вместо коллектора ионов микроканального умножителя ВЭУ-7. Однако при этом необходимо проводить соответствующую обработку полезного сигнала на уровне шумов СВА [26].

На рис. 11 приведены зависимости концентрации n частиц воздуха от расстояния R по нормали к источнику от прибора для различных датчиков с учетом защитной ЭВТИ для различных источников течи при величине шума 10^5 мм рт. ст. Видно распределение чувствительности (концентрации n) от расстояния R . Габаритные размеры разработанного прибора [25] $100 \times 100 \times 100$ мм, масса 0,7 кг и $P \leq 3$ Вт, что позволяет использовать его в реальных условиях космонавтом. При установке приемника в виде ВЭУ-7 для его пита-

ния требуется преобразователь на 1,5...—2 кВ, что является недостатком.

Несмотря на высокую чувствительность ионизационного датчика, он обладает также следующим недостатком: наличие нити накала источника электронов, которая может перегореть. В связи с этим в приборе имеются два (или четыре) переключаемых накала.

Указанного недостатка лишен магниторазрядный преобразователь. Такой датчик входит в комплекс "Гермес", разработанный ЦНИИ робототехники и технической кибернетики. Однако такой датчик требует напряжения $U_{ak} \approx 2$ кВ.

Другим устройством на основе микрофонного датчика, входящего в состав аппаратуры "Гермес", является устройство УПТ. Оно предназначено для контроля герметичности отсеков КА в натуральных условиях, индикации наличия утечки газовой среды в негерметичном отсеке и обнаружения места дефекта в оболочке КА при поиске его внутри отсека. Диапазон обнаруживаемых утечек 5...500 мм рт. ст./с (0,3—30 мм рт. ст./мин).

Приборы на основе тонких пленок

В настоящее время имеется широкий выбор пленочных МДМП-структур (металл—диэлектрик—металл—полупроводник), а также большая номенклатура новых материалов для электронной техники. В связи с этим есть выбор различных функциональных устройств: пленочные болометры, фоторезисторы, различные МДМ- и МДП-структуры.

Построение датчиков утечки воздуха из КА на их основе является перспективным в связи с их малым весом, потреблением, обеспеченностью изготовления современными технологиями.

Кроме того, в этом случае наиболее эффективно может быть решена проблема создания многопараметрического преобразователя параметров газовой струи для работы в условиях космоса. Наиболее эффективные решения в создании такой аппаратуры зависят от выбора новых материалов, критериев совместности пленочных датчиков в едином конструктивном исполнении. Приведем некоторые примеры конструктивных схем на основе тонких пленок.

На рис. 12 представлена схема МДМ-МДП-структуры (металл—диэлектрик—полупроводник). На полупроводниковую пластину методом фотолитографии поверх диэлектрической пленки наносится металлическая пленка в виде полосковой двухфазной решетки 1, подключаемая к генератору 2. Полосковая структура 1 образует пленочный конденсатор. При попадании на его поверхность потока воздуха, обладающего определенной влажностью, меняется проводимость между полосками, т. е. меняется диэлектрическая проницаемость. На небольших расстояниях от источника течи возможно его обнаружение. При использовании МДМ-структуры (1 — металл; 5 — диэлектрик; 6 — полупроводник), регулирующей на набегающий поток воздуха также возможно обнаруживать место утечки при небольших расстояниях от него датчика. В этом случае датчик подключается к схеме измерения 4 при расстоянии между соседними полосками 1, равном ~100 мкм и 10 В питания напряженности поля, много

меньшего пробивного. Применение бескорпусных микросхем или фототранзисторов 7 и термодатчиков 3 также является целесообразным, так как с их помощью возможно регистрировать температуру и влажность, характерные для изучаемого объекта.

На основе вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

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 габаритных размерах, массе 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 космического аппарата.

Л и т е р а т у р а

1. Сёмкин Н. Д., Воронов К. Е., Бобин Д. Г. Устройство обнаружения места утечки воздуха из модулей космического аппарата: Пат. 189074 РФ; бюл. № 25 от 10.09.2002.
2. Сёмкин Н. Д., Воронов К. Е., Бобин Д. Г., Занин А. Н.// Метрология, 2000. № 8. С. 32—39.
3. Липняк Л. В., Ольшанский В. А., Щербаков Э. В. Способ контроля герметичности в атмосферных условиях крупногабаритных космических аппаратов: Пат. 2112946 РФ, БИ. 1998. № 15. С. 123.
4. Сёмкин Н. Д., Горелов Ю. А. Система определения утечки воздуха из модуля космической станции// Вестник СГАУ. Сер. Актуальные проблемы радиоэлектроники. — Самара, 1999. Вып. 1. С. 28—30.
5. Аш Ж. Датчики измерительных систем. — М.: Мир, 1992. — 576 с.

6. Balakin V. L., Belokonov I. V., Semkin N. D., Voronov K. E., Zanin A. N. Impact of Space Debris on International Space Station: Methods and means of detection of a place of depressurization//Proc. Third European Conference on space Debris. European Space Operations Centre (ESOC), Darmstadt, Germany, 19—21 March 2001 (ESA SP-473, October 2001).

7. Анянин А. А., Занин А. Н., Сёмкин Н. Д. Моделирование процессов утечки газа из модуля космического аппарата// Измерительная техника, 2001. № 4. С. 29—32.

8. Криксунов Л. З. Справочник по основам информационной техники. — М.: Сов. радио, 1978. — 400 с.

9. Жуков А. Г., Горюнов А. Н., Кальфа А. А. Тепловизионные приборы и их применение/ Под ред. Н. Д. Девяткова. — М.: Радио и связь, 1983. — 168 с.

10. Сафронов Ю. П., Андрианов Ю. Г., Иевлев Д. С. Информационная техника в космосе. — М.: Воениздат, 1963. — 273 с.

11. Криксунов Л. З. Приборы ночного видения. — Киев: Техника, 1975. — 215 с.

12. Летоков В. С. Лазерная фотоионизационная спектроскопия. — М.: Наука, 1987 г. — 320 с.

13. Справочник по лазерам/ Под редакцией А. М. Прохорова, т. 1. М.: Сов. Радио., 1976 г. — 330с.

14. Делоне Н. Б. Взаимодействие лазерного излучения с веществом: курс лекций// Учеб. руководство. — М.: Наука, 1989. — 280 с.

15. Делоне Н. Б., Крайнов В. П. Атом в сильном световом поле. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 224 с.

16. Молоковский С. И., Сушков А. Д. Интенсивные электронные и ионные пучки. — М.: Сов. радио, 1966. — 456 с.

17. Аммовецкий И. В. Электронные пучки и электронные пушки. — М.: Атомиздат, 1977.

18. Сысоев А. А., Чупахин М. С. Введение в масс-спектрометрию. — М.: Атомиздат, 1977.

19. Сёмкин Н. Д. Проектирование масс-спектрометров для космических исследований// Уч. пособие. — Самара: СГАУ, 2000. — 164 с.

20. Сёмкин Н. Д., Пияков И. В. и др. Перспективы развития времяпролетных масс-спектрометров для анализа газовых и пылевых частиц// Прикладная физика, 2002. № 2. С. 24—42.

21. Сёмкин Н. Д., Юсупов Г. Я. и др. Способ формирования массовой линии во времяпролетном масс-спектрометре// Пат. 1691905 РФ; Бюл. № 42 от 15.11.91.

22. Семкин Н. Д., Балакин В. Л., Воронов К. Е., Пияков И. В. Прибор для обнаружения места утечки воздуха из Международной космической станции// Авиакосмическое приборостроение, 2003. № 7. С. 29—35.

23. Сёмкин Н. Д., Пияков И. В. Моделирование ионных пакетов в преобразователе газовых потоков времяпролетного типа//Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 2003. № 3. Т. 6. С. 80—85.

24. Сёмкин Н. Д. Анализ методов регистрации высокоскоростных пылевых частиц и их структурный синтез// ВИНТИ, № 8566-В87. — Куйбышев, 1987. — 37 с.

25. Сёмкин Н. Д., Занин А. Н., Воронов К. Е., Кириллов А. А. Прибор для обнаружения места утечки газа из модуля космического аппарата// ПТЭ, 2003 № 5. С. 1—6.

26. Сёмкин Н. Д., Бочкарев В. А., Юсупов Г. Я. Устройство для определения химического состава пылевых частиц// Метрология. 1988. № 1. С. 50—58.

Статья поступила в редакцию 26 апреля 2005 г.

Determination methods and means of air escape from space station models

N. D. Semkin, K. E. Voronov, A. N. Zanin, I. V. Pijakov
Samara State Aerospace University named by academician S. P. Korolev

Registration methods and means of the place of air escape from space station module based on different physical effects such as temperature gradient changing, pressure changing and others caused by airflow escape in vacuum, are considered in this article. Registration possibility of the place of air escape using ionization and mass-spectrometric sensors are considered as well.

