

УДК 620.165.29

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕЛКОДИСПЕРСНОГО ВЕЩЕСТВА С ЛОКАЛЬНОЙ НЕГЕРМЕТИЧНОСТЬЮ ПРИ БОЛЬШИХ ЧИСЛАХ КНУДСЕНА

Добролюбов А.Н., Лебедев А.С.

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, e-mail: vka@mail.ru

В статье рассматриваются вопросы исследования взаимодействия дисперсного индикатора – мелкодисперсного вещества – с локальной негерметичностью при больших числах Кнудсена в целях решения задач локализации течей герметичных отсеков ракетно-космической техники в условиях вакуума. Рассматривается связанное мелкодисперсное вещество – волокнистый чувствительный элемент, представляющий собой пучок органических волокон, способных реагировать на истекающий через локальную негерметичность поток газа. Представлена математическая модель взаимодействия молекулярного пучка с волокнистым чувствительным элементом. Поставлена и решена задача о взаимодействии молекулярного потока, истекающего из негерметичности, с волокнистым чувствительным элементом. Описана технология проведения экспериментальных исследований в целях подтверждения введенных теоретических положений. Приведены результаты экспериментально-теоретических исследований взаимодействия мелкодисперсного вещества – волокнистого чувствительного элемента – с локальной негерметичностью при больших числах Кнудсена, подтверждающие возможность его применения в целях локализации течей герметичных отсеков ракетно-космической техники. Показано, что характер изменения зависимости отклонения волокнистого чувствительного элемента от количественных характеристик течи различен для трёх условных областей диапазонов значений, что связано с конкретными условиями проведения экспериментальных исследований, а именно с вариантом размещения и крепления дисперсного индикатора. Подтверждено, что полученные в рамках данной работы результаты исследований могут быть использованы в существующих системах контроля герметичности герметичных отсеков ракетно-космической техники для обнаружения мест негерметичностей в условиях вакуума при наземных испытаниях и штатной эксплуатации.

Ключевые слова: контроль герметичности, герметичный отсек, ракетно-космическая техника, локализация течей, дисперсный индикатор, мелкодисперсное вещество, молекулярный поток

THE INTERACTION OF FINE-DISPERSED SUBSTANCE WITH A LOCAL LEAKAGE AT HIGH KNUDSEN NUMBERS

Dobrolyubov A.N., Lebedev A.S.

Mozhaisky Military Space Academy, Saint-Petersburg, e-mail: vka@mail.ru

The article deals with the study of the interaction of a dispersed indicator-a fine substance – with local leaks at large Knudsen numbers in order to solve the problems of localization of leaks of sealed compartments of rocket and space technology in vacuum conditions. We consider a bound fine substance-a fibrous sensing element, which is a bundle of organic fibers capable of reacting to a gas flow flowing through a local leak. A mathematical model of the interaction of a molecular beam with a fibrous sensing element is presented. The problem of interaction of a molecular stream flowing from a leak with a fibrous sensing element is posed and solved. The technology of experimental research in order to confirm the introduced theoretical provisions is described. The results of experimental and theoretical studies of the interaction of a fine substance-a fibrous sensing element – with a local leak at high Knudsen numbers are presented, confirming the possibility of its application in order to localize leaks in sealed compartments of rocket and space technology. It is shown that the character changes based on deviations of the fibrous sensitive element from the quantitative characteristics of the leak is different for the three conventional areas of the value ranges that is related to specific conditions of experimental research, namely the accommodation and mounting dispersion of the indicator. It is confirmed that the research results obtained in the framework of this work can be used in existing systems of tightness control of sealed compartments of rocket and space technology to detect places of leaks in vacuum conditions during ground tests and regular operation.

Keywords: leak control, pressurized compartment, rocket and space technology, leak localization, disperse indicator, fine matter, molecular flow

Продолжительный опыт эксплуатации отечественной ракетно-космической техники (РКТ) свидетельствует о наличии проблемы нарушения герметичности её элементов на различных этапах жизненного цикла [1, 2].

В настоящее время орбитальные средства оснащаются системами контроля герметичности, однако ни в одной из данных систем не предусмотрена функция опреде-

ления места негерметичности в целях её оперативной ликвидации [3].

Ключевым вопросом в рамках данной проблемы является выбор методов и средств локализации течей, применимых в условиях вакуума на этапе наземных испытаний и при штатной эксплуатации.

Цель исследования: изучение взаимодействия дисперсного индикатора – мелкодисперсного вещества – с локальной

негерметичностью при больших числах Кнудсена для решения задач локализации течей герметичных отсеков ракетно-космической техники в условиях вакуума.

Материалы и методы исследования

Одним из реализуемых на практике методов контроля герметичности герметичных отсеков (ГО) РКТ в условиях вакуума является метод с использованием дисперсного индикатора – мелкодисперсного вещества.

При взаимодействии истекающего через течь газа с пробным мелкодисперсным веществом нарушается поле его распределения, что может регистрироваться соответствующими средствами [4]. В настоящей работе рассматривается связанное мелкодисперсное вещество – волокнистый чувствительный элемент (ВЧЭ). ВЧЭ представляет собой пучок органических волокон, способных реагировать на истекающий через локальную негерметичность поток газа. Процессы взаимодействия ВЧЭ и несвязанного мелкодисперсного вещества с течью происходят по одним и тем же закономерностям.

При больших числах Кнудсена ($Kn \rightarrow \infty$) реализуется свободномолекулярное течение и в общем случае описывается уравнениями Больцмана. Рассмотрим стационарное истечение газа из прямоугольного отверстия со сторонами $2a \geq 2b$ в вакуум, когда размеры отверстия много меньше размера емкости и длин свободных пробегов молекул и распределение молекул по скоростям описывается максвелловской функцией.

После интегрирования функции распределения по пространству скоростей газодинамические параметры в безразмерном виде вдоль оси симметрии с началом координат в центре отверстия описываются следующими соотношениями [5]:

плотность

$$\bar{\rho} = \frac{1}{\pi} \arctg \left(\frac{\alpha}{\bar{x} \sqrt{\bar{x}^2 + \alpha^2 + 1}} \right),$$

плотность тока

$$\begin{aligned} \bar{\rho} \bar{u} = & \frac{1}{\sqrt{\bar{x}^2 + 1}} \left(1 - \frac{2}{\pi} \arctg \sqrt{\frac{\bar{x}^2 + 1}{\alpha^2}} \right) + \\ & + \frac{\alpha}{\sqrt{\bar{x}^2 + \alpha^2}} \left(1 - \frac{2}{\pi} \arctg \sqrt{\bar{x}^2 + \alpha^2} \right), \end{aligned} \quad (1)$$

скорость

$$\bar{u} = \frac{\bar{\rho} \bar{u}}{4 \bar{\rho}},$$

скоростной напор

$$\bar{\rho} \bar{u}^2 = \frac{(\bar{\rho} \bar{u})^2}{\bar{\rho}},$$

где $\bar{x} = x/a, \alpha = b/a$.

Обезразмеривание осуществлялось следующим образом:

$$\bar{\rho} = \frac{\rho}{\rho_0}, \quad \bar{\rho} \bar{u} = \frac{\rho u}{\rho_0 \sqrt{RT_0}}, \quad \bar{u} = \frac{u}{\sqrt{\frac{8}{\pi} RT_0}}, \quad \bar{\rho} \bar{u}^2 = \frac{\rho u^2}{\frac{RT_0}{2\pi}}.$$

На рис. 1 представлены распределения газодинамических параметров вдоль оси симметрии для отверстия квадратного сечения $\alpha = 1$.

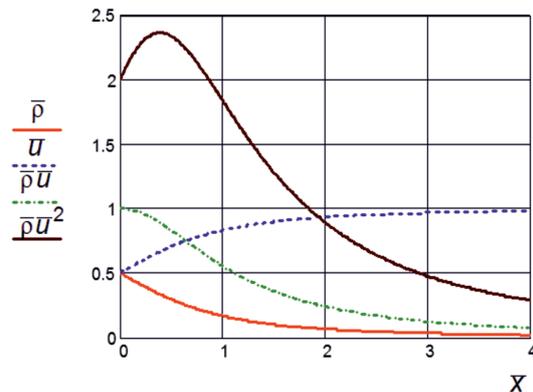


Рис. 1. Распределения газодинамических параметров вдоль оси симметрии для отверстия квадратного сечения $\alpha = 1$

Построим математическую модель взаимодействия молекулярного пучка с дисперсным индикатором. Схема задачи показана на рис. 2.

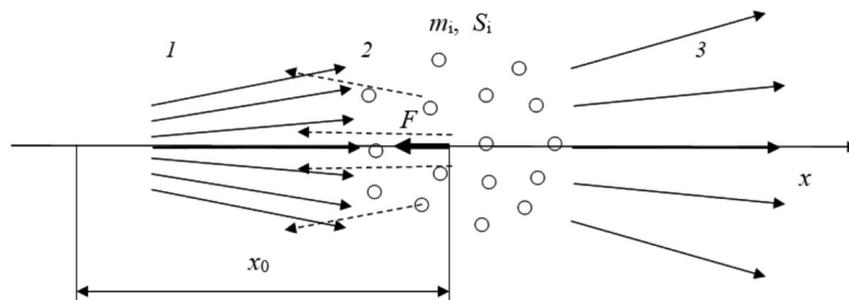


Рис. 2. Схема задачи построения математической модели взаимодействия молекулярного пучка с дисперсным индикатором

Пусть дисперсный индикатор массой m_i и площадью миделя S_i в начальный момент времени находится на расстоянии x_0 от начала координат (центра отверстия) в вакууме. В момент времени $t > 0$ вследствие возникновения негерметичности на него начинает воздействовать молекулярный поток с параметрами (1), рассчитанными при $\bar{x} = \bar{x}_0$. При этом часть молекул, пересекающих сечение с площадью миделя индикатора отразится с ненулевой осевой проекцией скорости в обратном направлении, а некоторый поток молекул пролетит насквозь.

Составим уравнение сохранения количества движения молекулярного потока и дисперсно-го индикатора:

$$m_i \Delta v_i + (1 - W) \rho u S_i [(1 + \zeta) u - v_i] \cdot \Delta t = F \Delta t, \quad (2)$$

где m_i , S_i – масса индикатора и площадь его миделя; Δv_i – изменение скорости индикатора за элементарный промежуток времени Δt ; F – внешняя сила, действующая на индикатор (например, сила тяжести или сила сопротивления при закреплении); ζ – коэффициент восстановления при ударе молекул по поверхности дисперсной частицы; W – вероятность того, что молекула, траектория которой пересекает дисперсный индикатор, не отразится, а пролетит его насквозь.

Величина W называется вероятностью прохождения или коэффициентом Клаузинга. Для простых геометрических форм, таких как цилиндрический канал, диффузор, конфузор и др. коэффициент Клаузинга может быть определен теоретически [5]. Для сложных геометрических форм и дисперсных образований, к которым относится рассматриваемый индикатор, W целесообразно определять экспериментально.

Разделим (2) на Δt и устремим к нулю $\Delta t \rightarrow 0$, получим дифференциальное уравнение

$$m_i \frac{dv_i}{dt} + (1 - W) \rho u S_i [(1 + \zeta) u - v_i] = F_i, \quad (3)$$

позволяющее совместно с (1) описать динамику взаимодействия дисперсного индикатора с молекулярным потоком.

Рассмотрим задачу о взаимодействии молекулярного потока, истекающего из негерметичности с координатами $(x_0, 0)$ с дисперсным индикатором, подвешенным на нити с распределенной нагрузкой $q = mg$ (m – масса единицы длины нити, g – ускорение свободного падения) с начальным положением $(0, 0)$ (рис. 3).

Уравнения равновесия нити в плоскости имеют вид [6]:

$$\frac{d}{dl} \left(Q_1 \frac{dx}{dl} \right) = 0, \quad (4)$$

$$\frac{d}{dl} \left(Q_1 \frac{dy}{dl} \right) + q = 0,$$

где L – длина нити, Q_1 – сила ее натяжения, $q = mg$ – распределенная нагрузка от веса нити.

Перейдем к безразмерным переменным $de = dl/l$, $\bar{Q}_1 = Q_1 / mgl$, $\bar{q} = q / mg$, $\bar{x} = x/l$, $\bar{y} = y/l$ имеем

$$\frac{d}{d\varepsilon} \left(\bar{Q}_1 \frac{d\bar{x}}{d\varepsilon} \right) = 0, \quad (5)$$

$$\frac{d}{d\varepsilon} \left(\bar{Q}_1 \frac{d\bar{y}}{d\varepsilon} \right) - 1 = 0.$$

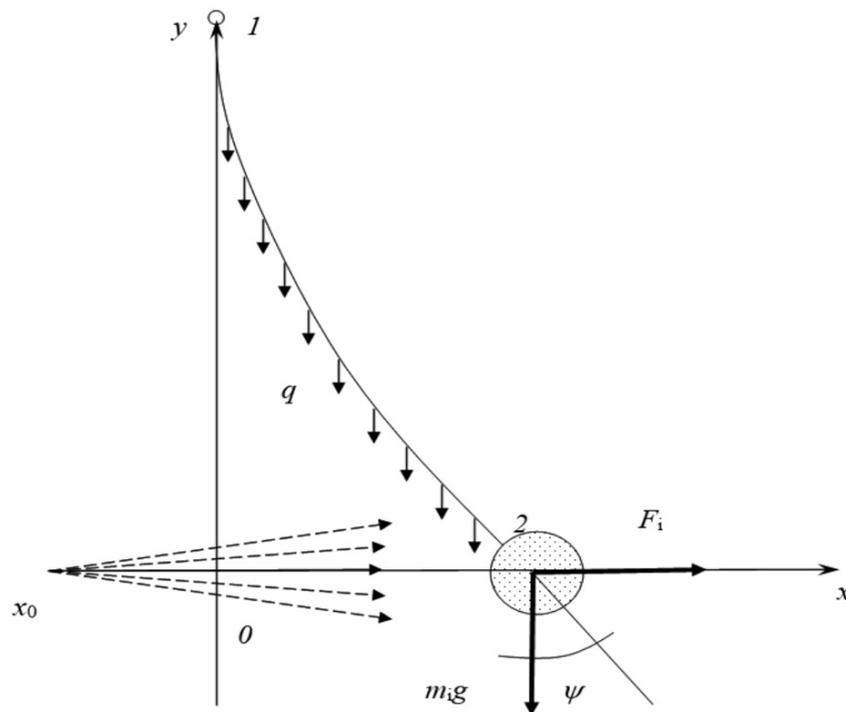


Рис. 3. Схема задачи взаимодействия молекулярного потока, истекающего из негерметичности, с дисперсным индикатором, подвешенным на нити

Интегрируя (5) и опуская промежуточные выкладки [6], получим уравнение формы нити:

$$y = C_1 ch\left(\frac{x}{C_1} + C_2\right) + C_3. \quad (6)$$

Для определения неизвестных C_1 , C_2 и C_3 необходимы дополнительные условия. Таковыми в соответствии с условиями задачи являются: координата узла подвеса

$$y_1 = C_1 ch\left(\frac{x_1}{C_1} + C_2\right) + C_3, \quad (7)$$

длина нити

$$l = \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx \Rightarrow l = C_1 \left[sh\left(\frac{x_2}{C_1} + C_2\right) - sh\left(\frac{x_1}{C_1} + C_2\right) \right],$$

натяжение нити в узле подвеса

$$Q_1 = \sqrt{F^2 + \left(1 + \frac{m_i}{ml}\right)^2}, \quad (8)$$

$$Q_1 = C_1 ch\left(\frac{x_1}{C_1} + C_2\right),$$

условие равновесия относительно узла подвеса

$$F_i \cos \psi = \frac{1}{2} \sin \psi, \quad x_2 = l \cdot \sin \psi. \quad (9)$$

Система (6)–(9) совместно с (3) дает решение поставленной задачи.

Теоретические исследования, проведенные с использованием современных высокоэффективных численных методов, показывают достаточно высокую эффективность рассматриваемого метода контроля герметичности. Однако некоторые допущения, положенные в основу разработанных математических моделей, требовали экспериментального подтверждения полученных результатов по адекватности реальным физическим процессам.

Результаты исследования и их обсуждение

В целях проведения экспериментальных исследований создан специальный стенд на базе стационарной вакуумной установки СМ 297М, дополнительно оборудованной электромеханическим манипулятором МЭМ-5С с синхронно следящей связью и системой управляющей и контрольно-измерительной аппаратуры.

Для проведения экспериментальных исследований в барокамеру установки СМ 297М помещался имитатор ГО с течью. На поперечную балку, расположенную внутри барокамеры, подвешивалась гибкая лавсановая нить длиной $L = 0,57$ м и погонной массой $m = 30$ мг с закреплённым на ней

ВЧЭ. Барокамера откачивалась до давления $(1,0 \dots 1,2) \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. В процессе проведения эксперимента проводился замер суммарного натекания в барокамеру, по величине которого были рассчитаны количественные характеристики течи. Одновременно с помощью катетометра КМ-8 через смотровое окно барокамеры производилось визуальное наблюдение за поведением ВЧЭ и осуществлялись замеры отклонения элемента от контрольной точки. Все данные и результаты документировались, после чего изменялись количественные характеристики течи путём изменения давления на входе в имитатор герметичного отсека, и измерения повторялись. В последующем гибкая нить с элементом удалялась с помощью манипулятора МЭМ-5С от течи в горизонтальном и вертикальном направлениях на фиксированное расстояние и производились вышеперечисленные замеры количественных характеристик течи и отклонения волокнистого чувствительного элемента.

Результаты исследования взаимодействия мелкодисперсного вещества с локальной негерметичностью при больших числах Кнудсена представлены на рис. 4.

На рис. 4 фигурами (кружками и треугольниками) представлены результаты опытных замеров. Сплошными линиями показаны результаты теоретических расчетов. Там же показано, что характер изменения зависимости отклонения ВЧЭ от количественных характеристик течи различен для трёх условных областей диапазонов значений. Это связано с конкретными условиями проведения экспериментальных исследований, а именно с вариантом размещения и крепления дисперсного индикатора.

Для диапазона количественных характеристик течей ($4,45 \leq Q \leq 11,11$ л мкм рт. ст/с), лежащих в области I, нить можно представить в виде балки с односторонней заделкой, которая при взаимодействии молекулярного пучка с дисперсным индикатором изгибается на расстояния, соизмеримые с её поперечным размером. В этом случае необходимо учитывать влияние сил упругости, возникающих при изгибе нити, на процесс отклонения индикатора от контрольной точки.

Для диапазона количественных характеристик течей ($Q \geq 13,33$ л мкм рт. ст/с), лежащих в области III нить с ВЧЭ представляется в виде абсолютно гибкого маятника и отклоняется на расстояния, несоизмеримо большие, чем её поперечные размеры. В этом случае действие сил тяжести превосходит действие сил упругости и, соответственно, изменение зависимости отклонения ВЧЭ от количественных характеристик течей имеет иной характер.

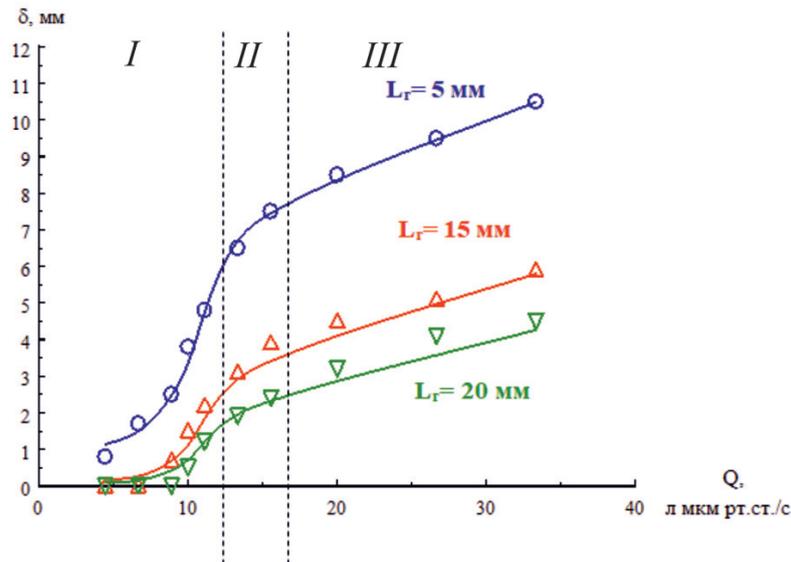


Рис. 4. Зависимость отклонения ВЧЭ от количественных характеристик течи

Существует также некая промежуточная область значений (область II) ($11,11 \leq Q \leq 13,33$ л мкм рт. ст/с), при которой происходит процесс перехода от одной модели к другой.

В связи с тем, что при моделировании процесса взаимодействия молекулярного пучка с ВЧЭ были применены две различные модели, для построения графических зависимостей был использован робастный метод сглаживания данных (робастная локально-взвешенная регрессия), позволяющий обеспечить более полную картину связи между переменными Q и δ .

Выводы

1. Исследование взаимодействия ВЧЭ с локальной негерметичностью при больших числах Кнудсена показало возможность его применения в целях локализации течей ГО РКТ.

2. Полученные результаты могут быть использованы в существующих системах

контроля герметичности ГО РКТ для обнаружения мест негерметичностей в условиях вакуума при наземных испытаниях и штатной эксплуатации.

Список литературы

1. Александров А.А. Путь к звездам. Из истории советской космонавтики. М.: Вече, 2011. 99 с.
2. Нештатные ситуации на Международной космической станции // TASS.RU: ежен. интернет-изд. 2019. 24 авг. [Электронный ресурс]. URL: <https://tass.ru/info/6794868> (дата обращения: 24.11.2019).
3. Алексахов В.Ю., Алексеев К.В., Добролюбов А.Н., Лебедев А.С., Лебедев Е.Л., Садин Д.В. Новые решения задачи контроля герметичности орбитальных средств // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2014. Вып. 644. С. 124–129.
4. Алексахов В.Ю., Алексеев К.В., Варварский В.М., Лебедев Е.Л., Садин Д.В. Предельно автомодельное движение твердой частицы в свободномолекулярном потоке газа, истекающего из отверстия // Прикладная механика и техническая физика. 2012. Т. 53. № 6. С. 41–48.
5. Кошмаров Ю.А., Рьзов Ю.А. Прикладная динамика разреженного газа. М.: Машиностроение, 1977. 184 с.
6. Светлицкий В.А. Механика гибких стержней и нитей. М.: Машиностроение, 1978. 222 с.