

$$p = p_1(\omega t) \text{ при } r = R, \quad (4)$$

$$p_1 = p_m \sin \omega t,$$

где  $\rho$  – плотность жидкости, изменяющаяся по баротропному закону;  $\omega$ ,  $p_m$  – частота и амплитуда пульсации давления на торце.

Сформулированная математическая модель (1)–(4) исследовалась методом возмущений. Асимптотический анализ дал линеаризованную задачу динамики жидкости и из ее решения методом итераций [6] найден закон изменения давления. После этого решалось уравнение (1) методом гармонического баланса и определены основной нелинейный отклик диска и соответствующая ему фазовая характеристика. Эти характеристики представляют собой неявные функции амплитуды и частоты колебаний, но их возможно исследовать численно по аналогии с [6, 7].

*Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание по теме 122030100145-3).*

#### Список литературы

- 1 Аэрогидроупругость конструкций / А. Г. Горшков [и др.]. – М. : Физматлит, 2000. – 592 с.
- 2 Вельмисов, П. А. Об одном классе начально-краевых задач в аэрогидроупругости / П. А. Вельмисов, Ю. А. Тамарова, Ю. В. Покладова // Итоги науки и техники. Современная математика и ее приложения. Тематические обзоры. – 2022. – Т. 204. – С. 16–26.
- 3 Païdoussis M. P. Fluid-structure Interactions: Cross-Flow-Induced Instabilities. New York: Cambridge University Press, 2010. – 414 p.
- 4 Могилевич, Л. И. Продольные и поперечные колебания упругозакрепленной стенки клиновидного канала, установленного на вибрирующем основании / Л. И. Могилевич, В. С. Попов, А. А. Попова // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2018. – № 3. – С. 28–36.
- 5 Попов, В. С. Моделирование взаимодействия стенки канала с упругозакрепленным торцевым уплотнением / В. С. Попов, А. А. Попова // Компьютерные исследования и моделирование. – 2020. – Т. 12. – № 2. – С. 387–400.
- 6 Попов, В. С. Моделирование гидроупругих колебаний стенки канала, имеющей нелинейно-упругую опору / В. С. Попов, А. А. Попова // Компьютерные исследования и моделирование. – 2022. – Т. 14. – № 1. – С. 79–92.
- 7 Modeling nonlinear hydroelastic response for the endwall of the plane channel due to its upper-wall vibrations / M. Barulina [et al.] // Mathematics. – 2022. – Vol. 10. – Art. no. 3844.
- 8 Константиnescу, В. Н. Газовая смазка / В. Н. Константиnescу. – М. : Машиностроение, 1968. – 718 с.
- 9 Турчак, Л. И. Математическое моделирование проблем газовой смазки / Л. И. Турчак, В. П. Шидловский // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2011. – Т. 51. – № 2. – С. 329–348.
- 10 Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – М. : Дрофа, 2003. – 840 с.

УДК 517.958

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СЛОЯ ВЯЗКОГО ГАЗА, НАХОДЯЩЕГОСЯ В УЗКОЙ ЩЕЛИ, С ЕЕ СТЕНКОЙ, ИМЕЮЩЕЙ ПОДВЕС С МЯГКОЙ КУБИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ

*В. С. ПОПОВ, М. В. ПОПОВА, Д. В. КОНДРАТОВ Т. С. КОНДРАТОВА*  
*Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А.,*  
*Российская Федерация*

При разработке и исследовании различных изделий современного транспортного комплекса, включающих в свой состав жесткие элементы с упругими связями или упругоподатливые элементы, контактирующие с жидкостью или газом, требуется привлечение подходов теории гидроаэроупругости [1, 2]. Например, с такими ситуациями приходится сталкиваться в демпферах колебаний, датчиках гидросистем, гидро- и газоопорах [3, 4]. В [5] исследовано взаимодействие несжимаемой вязкой жидкости в узком клиновидном канале с его жесткой стенкой на линейно-упругом подвесе. В [6, 7] разработаны модели взаимодействия вязкой несжимаемой жидкости с торцевой [6] и нижней [7] стенками, имеющими линейно-упругий подвес, узкой щели, которую она заполняет. В [8, 9] рассмотрены аналогичные задачи, когда стенка канала имеет подвес с кубической нелинейностью [8] или представляет собой пластину на нелинейно-упругом основании [9]. Однако в работах, которые указаны выше за рамками исследований, остался случай сжимаемого вязкого газа, взаимодействующего нелинейно-упругозакрепленной стенкой канала.

Рассмотрим узкую щель (рисунок 1). Ее стенки жесткие с размерами в плане  $2\ell \times a$  и  $2\ell \ll a$ . В щели находится вязкий газ в изотермическом состоянии, динамическую вязкость которого принимаем постоянной. На торцах щели задана пульсация давления  $p_1$  на фоне постоянного уровня давления  $p_0$  (невозмущенного состояния, при котором расстояние между стенками –  $\delta$ ). Нижняя стенка имеет подвес с мягкой кубической нелинейностью, допускающий ее колебания в вертикальном направлении, верхняя стенка неподвижна. Изучаем плоскую задачу, вводя декартову систему координат  $Oxuz$  с началом в центре нижней стенки щели при ее невозмущенном состоянии. Рассматриваем установившиеся нелинейные колебания стенки с амплитудой  $z_m \ll \delta$ .

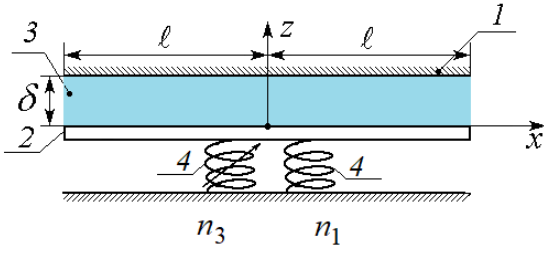


Рисунок 1 – Щель с вязким пульсирующим газом, нижняя стенка которой имеет подвес:  
1 – неподвижная стенка; 2 – стенка на подвесе 4 с мягкой кубической нелинейностью;  
3 – пульсирующий вязкий газ

Уравнения динамики вязкого газа в узкой щели запишем как [10]

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{4}{3} \mu \frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \left( \frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \right), \quad (1)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{4}{3} \mu \frac{\partial v_z}{\partial z} - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \left( \frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) \right),$$

$$\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial p}{\partial t} + v_x \frac{\partial p}{\partial x} + v_z \frac{\partial p}{\partial z} \right) + \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0,$$

граничные условия для уравнений газа в щели (1) имеют вид

$$v_x = 0, \quad v_z = \frac{dz}{dt} \quad \text{при} \quad z = z_m f(\theta t), \quad (2)$$

$$v_x = 0, \quad v_z = 0 \quad \text{при} \quad z = \delta,$$

$$p = p_1(\omega t) \quad \text{при} \quad x = -\ell, \quad (3)$$

$$p = p_1(\omega t) \quad \text{при} \quad x = \ell,$$

$$p_1 = p_m \sin \omega t,$$

где  $p$  – давление газа;  $v, v_x$  – проекции скорости газа на оси  $Oz$  и  $Ox$ ;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости газа;  $\rho$  – плотность газа, изменяющаяся по баротропному закону;  $\theta$  – характерная частота нелинейных колебаний нижней стенки;  $\omega$ ;  $p_m$  – заданные частота и амплитуда пульсации давления на торцах щели.

Уравнение движения нижней стенки запишем как [7]

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} + n_1 z - n_3 z^3 = a \int_{-\ell}^{\ell} q_n \Big|_{z=z_m f} dx, \quad (4)$$

$$q_n = -p + 2\mu \frac{\partial v_z}{\partial z} - \frac{2}{3} \mu \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right).$$

Здесь  $m$  – масса стенки;  $t$  – время;  $n_1$  – коэффициент жесткости линейной составляющей реакции подвеса;  $n_3$  – коэффициент жесткости кубической составляющей реакции подвеса, т. к. рассматриваем мягкую нелинейность, полагаем  $n_3 > 0$ .

Сформулированная задача аэроупругости (1)–(4) исследовалась методом возмущений. После этого рассматривалась линеаризованная задача динамики тонкого слоя газа в узкой щели и определялся закон изменения давления в нем методом итераций [7]. На следующем этапе решалось уравнение (4) методом гармонического баланса и определены основной нелинейный аэроупругий отклик стенки и соответствующая ему характеристика фазового сдвига. Данные характеристики возможно исследовать численно по аналогии с [9], в частности, определять резонансные частоты колебаний стенки, а также области ее неустойчивых колебаний со скачкообразным изменением амплитуд колебаний.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00159.

#### Список литературы

- 1 Горшков А. Г. Аэрогидроупругость конструкций / А. Г. Горшков. – М. : Физматлит, 2000. – 592 с.
- 2 Païdoussis, M. P. Dynamics of cylindrical structures in axial flow: A review / M. P. Païdoussis // Journal of Fluids and Structures. – 2021. – Vol. 107. – Art. no. 103374.
- 8 Константиnescу, В. Н. Газовая смазка / В. Н. Константиnescу. – М. : Машиностроение, 1968. – 718 с.
- 4 Распопов, В. Я. Микромеханические приборы. – М. : Машиностроение, 2007. – 400 с.
- 4 Могилевич, Л. И. Продольные и поперечные колебания упругозакрепленной стенки клиновидного канала, установленного на вибрирующем основании / Л. И. Могилевич, В. С. Попов, А. А. Попова // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2018. – № 3. – С. 28–36.
- 6 Попов, В. С. Моделирование взаимодействия стенки канала с упругозакрепленным торцевым уплотнением // Компьютерные исследования и моделирование. – 2020. – Т. 12, № 2. – С. 387–400.
- 6 Попов, В. С. Моделирование гидроупругих колебаний стенки канала, имеющей нелинейно-упругую опору / В. С. Попов, А. А. Попова // Компьютерные исследования и моделирование. – 2022. – Т. 14, № 1. – С. 79–92.
- 7 Modeling nonlinear hydroelastic response for the endwall of the plane channel due to its upper-wall vibrations / M. Barulina [et al.] // Mathematics. – 2022. – Vol. 10. – Art. no. 3844.
- 9 Моделирование гидроупругого отклика пластины, установленной на нелинейно-упругом основании и взаимодействующей с пульсирующим слоем жидкости / Д. В. Кондратов [и др.] // Компьютерные исследования и моделирование. – 2023. – Т. 15, № 3. – С. 581–597.
- 10 Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – М. : Дрофа, 2003. – 840 с.

УДК 536.24

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОЗЫ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛИИМИДНЫХ ПЛЕНОК С МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫМ ПОКРЫТИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ ЭКРАННО-ВАКУУМНОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ

*П. Ф. ПРОНИНА, О. В. ТУШАВИНА*

*Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация*

Регулирование внешнего теплообмена является одной из основополагающих задач для функционирования космического аппарата. К регулированию внешнего теплообмена относят термооптические покрытия и экранно-вакуумную теплоизоляцию (ЭВТИ). Типичное обычное покрытие ЭВТИ состоит из 10–12 металлизированных полимерных пленок, разделенных стеклотканью (стекловуалью) или сетками из полиэстера. ЭВТИ – лучший теплоизоляционный материал для использования в вакууме и наиболее предпочтительный изоляционный материал для космических кораблей и криогенных систем. Однако традиционный ЭВТИ имеет ряд недостатков: трудно или невозможно поддерживать требуемое значение зазора между слоями пленки, трудно обеспечить стабильные рабочие характеристики, сложен процесс изготовления и монтажа. При этом ЭВТИ может подвергаться механическим воздействиям не только при монтаже, но и в процессе эксплуатации. Всё это может повлечь изменение плотности укладки экранов и в результате приведет к нестабильным теплофизическим характеристикам. Работа посвящена исследованию влияния дозы излучения на физико-механические характеристики полиимидных пленок с металлизированным покрытием элементов экранно-вакуумной теплоизоляции. Проведено испытание на растяжение прямоугольных образцов производства НПП «Полипен» марки ПМ-1ЭУ-ОА с алюминиевым покрытием. Образцы предварительно были вырезаны из полиимидного металлизированного рулона. При этом часть образцов подверглась излучению, равному 25, 50 кГр. Облучение проводилось на воздухе. В ходе исследования были получены диаграммы: «напряжения – деформация», определенная на испытаниях на растяжение образца, и «перемещения – нагрузка». Определен модуль Юнга, предел прочности и соответствующие ему деформации для каждого типа образца. Определено влияние уровня излучения на каждый из исследуемых параметров, имеющее нелинейный характер.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (Грант РФФ № 23-19-00684), выданного Московскому авиационному институту.*