

ных для принятия конкретных конструктивно-технологических решений для выработки норм и стандартов на проектирование, возведение и эксплуатацию конструкций и сооружений. Решены новые задачи исследования динамического процесса во внецентренно сжатой свае, полностью погруженной в упругое основание, возбуждаемого частичной осадкой основания либо образованием подземной полости вокруг сваи (пузырь). Это обусловлено расширением исследования тонких и длинных свай для морских сооружений, мостов, путепроводов, эстакад и т. п., полностью или частично погруженных в многослойные основания, со значительной надземной частью, подверженных боковым, моментным и прочим нагрузкам. Построенная новая математическая модель динамического процесса, возбуждаемого в статически нагруженной системе конструкции внезапным изменением изгибной жесткости балки, предполагает, что изменяется либо модуль упругости материала балки, либо осевой момент инерции поперечного сечения балки при ее повороте на 90 градусов относительно продольной оси при сохранении направления нагрузки [2–5].

Проведенный анализ показывает, что мониторинг мостовых сооружений с точки зрения потребителей мостовых сооружений направлен на решение следующих важных задач:

- 1) обеспечение сохранности мостовых сооружений;
- 2) повышение долговечности мостовых сооружений путем своевременного обнаружения повреждений и их устранения;
- 3) сохранение грузоподъемности мостовых сооружений путем управления их поведением в процессе эксплуатации;
- 4) повышение эффективности расходования средств на проведение ремонтных мероприятий путем корректного определения времени и вида необходимого ремонта.

#### Список литературы

1 Прочностной мониторинг мостовых сооружений и особенности его применения. Ч. 2. Непрерывный мониторинг состояния мостовых сооружений / И. Г. Овчинников, И. И. Овчинников, О. И. Нигаматова, Е. С. Михалдыкин // Транспортные сооружения. – 2014. – Т. 1, № 2. – URL: <http://t-s.today/PDF/01TS214.pdf> (дата обращения: 10.09.2025). – DOI: 10.15862/01TS214.

2 **Poddubny, A. A.** Dynamic loading of the rod at a sudden change of elastic foundation structure / A. A. Poddubny, V. B. Gordon // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. – 2021. – 1079, 042076. – DOI: 10.1088/1757-899X/1079/4/042076.

3 **Поддубный, А. А.** Динамические догружения стержня при внезапном изменении структуры упругого основания / А. А. Поддубный, В. А. Гордон, Т. В. Потураева // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2021. – № 2 (346). – С. 27–41.

4 **Поддубный, А. А.** Гордон Динамика конструктивно нелинейной системы «балка – основание» при внезапном образовании трещин / А. А. Поддубный, В. А. Гордон // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2022. – № 1 (44). – С. 84–87.

5 Added stress of a cantilever under sudden alterations in its foundation / A. Poddubny, V. Gordon, N. Bakaeva, P. Morev // ADVANCES IN SUSTAINABLE CONSTRUCTION MATERIALS : AIP Conference Proceedings. – 2023. – 2497, 040002. – DOI: 10.1063/5.0103990.

УДК 517.958

## ПРОДОЛЬНЫЕ КОЛЕБАНИЯ СТЕНКИ УЗКОГО КЛИНОВИДНОГО КАНАЛА, ВЫЗВАННЫЕ ЕЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ С ПУЛЬСИРУЮЩИМ СЛОЕМ ЖИДКОСТИ, НАХОДЯЩЕЙСЯ В НЕМ

*В. С. ПОПОВ*

*Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А., Российская Федерация  
Институт проблем точной механики и управления Российской академии наук –  
обособленное структурное подразделение Федерального исследовательского центра  
«Саратовский научный центр РАН», Российская Федерация*

*Л. И. МОГИЛЕВИЧ, А. А. ПОПОВА, Е. В. ЕВДОКИМОВА*

*Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А., Российская Федерация*

Математические модели взаимодействия жидкости с жесткими упруго закрепленными элементами конструкций играют важную роль при исследовании различных изделий современного транс-

портного комплекса. Разработка таких моделей напрямую связана с постановкой задач гидроупругости [1, 2]. Особый интерес представляют задачи взаимодействия тонкого слоя вязкой жидкости с ограничивающими его стенками, т. к. такие проблемы характерны для гидравлических демпферов, гидро- и газоопор [3]. В [4, 5] разработаны модели взаимодействия слоя вязкой несжимаемой жидкости с торцевой [4] и нижней [5] стенками щелевого канала, имеющими упругий подвес. В [6,7] исследованы колебания жесткой стенки клиновидного канала, имеющей упругий подвес и взаимодействующей с вязкой ползущей жидкостью в условиях вибрации основания канала. Однако в указанных выше работах не рассмотрена задача о продольных колебаниях упруго закрепленной стенки клиновидного канала при учете инерции движения вязкой жидкости и ее пульсации за счет заданного гармонически изменяющегося по времени перепада давления на торцах.

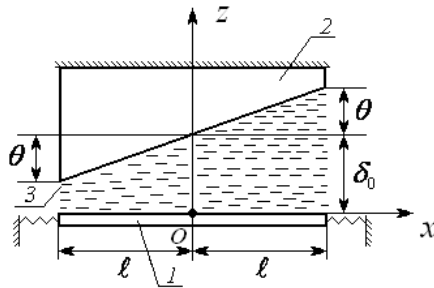


Рисунок 1 – Узкий клиновидный канал, нижняя стенка которого имеет упругое закрепление:

- 1 – стенка с линейно-упругим закреплением;
- 2 – неподвижная стенка;
- 3 – пульсирующая вязкая жидкость

Рассмотрим узкий клиновидный канал с жесткими стенками, размеры которых в плане  $2\ell \times b$ . Полагаем, что  $2\ell \ll b$  и переходим к плоской его схеме (рисунок 1). Канал заполнен вязкой несжимаемой жидкостью, пульсирующей за счет заданного на торцах перепада давления  $\Delta p$ , имеющего постоянную и гармонически пульсирующую составляющие. Верхняя стенка канала клиновидная и неподвижная. Нижняя стенка представляет собой жесткую пластину, имеющую линейно-упругое закрепление на торцах, которое допускает ее колебания в продольном направлении. Пусть в невозмущенном состоянии начало декартовой системы координат  $Oxyz$  совпадает центром поверхности нижней стенки канала, контактирующей с жидкостью. Будем изучать установившиеся колебания стенки, полагая, что амплитуда данных колебаний  $x_m \ll \ell$ .

Движение вязкой жидкости в канале описывается уравнениями Навье – Стокса, дополненными уравнением неразрывности для несжимаемой жидкости [8].

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} \right), \\ \frac{\partial V_z}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_z}{\partial x} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 V_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right), \\ \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_z}{\partial z} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

граничные условия для уравнений динамики жидкости (1) записываются как

$$V_x = \frac{dx_1}{dt}, \quad V_z = 0 \quad \text{при } z = 0, \quad (2)$$

$$V_x = 0, \quad V_z = 0 \quad \text{при } z = \delta_0 + \theta x / \ell,$$

$$p = \Delta p(\omega t) = p_0 + p_m \sin \omega t \quad \text{при } x = \ell, \quad (3)$$

$$p = 0 \quad \text{при } x = -\ell,$$

где  $p$  – давление жидкости;  $V_z, V_x$  – проекции вектора скорости жидкости на оси  $Oz$  и  $Ox$ ;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости жидкости;  $\rho$  – плотность жидкости;  $x_1 = x_m f(\omega t)$  – закон движения нижней стенки канала;  $\theta$  – параметр, описывающий наклон внутренней поверхности верхней стенки канала;  $\omega, p_m$  – заданные частота и амплитуда гармонической пульсации давления на правом торце канала,  $p_0$  – постоянный уровень давления на правом торце канала.

Уравнение движения нижней стенки запишем как [7]

$$m \frac{d^2 x_1}{dt^2} + n_1 x_1 = b \int_{-\ell}^{\ell} q_{zx} \Big|_{z=0} dx, \quad q_{zx} = \rho \nu \left( \frac{\partial V_x}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial x} \right). \quad (4)$$

Здесь  $q_{zx}$  – касательное напряжение в жидкости;  $m$  – масса стенки;  $t$  – время,  $n_1$  – коэффициент жесткости подвеса.

Сформулированная задача гидроупругости (1)–(4) исследовалась методом возмущений. Это позволило перейти к линеаризованной задаче динамики тонкого слоя вязкой жидкости в узкой клиновидной щели, но с учетом локального члена инерции. Данная задача решалась методом итераций подобно [5]. В результате определены законы изменения гидродинамических параметров в жидкости. На следующем этапе решалось уравнение (4) для режима установившихся гармонических колебаний. После этого были определены гидроупругий отклик стенки и соответствующая ему характеристика фазового сдвига. Данные характеристики можно исследовать численно, и в частности, с их помощью найти резонансные частоты колебаний стенки канала.

*Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание по теме 125020501400-6).*

#### Список литературы

- 1 Аэрогидроупругость конструкций / А. Г. Горшков, В. И. Морозов, А. Т. Пономарев, Ф. Н. Шклярчук. – М. : Физматлит, 2000. – 592 с.
- 2 Fluid-structure interactions: cross-flow-induced instabilities / M. P. Paidoussis, S. J. Price, E. Langre Cambridge : Cambridge University Press, 2010. – 414 p.
- 3 **Константинеску, В. Н.** Газовая смазка / В. Н. Константинеску. – М. : Машиностроение, 1968. – 718 с.
- 4 **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.
- 5 **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.
- 6 **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.
- 7 **Mogilevich, L. I.** Mathematical modeling of elastically fixed wall longitudinal oscillations of wedge-shaped channel under foundation vibration / L. I. Mogilevich, V. S. Popov, L. N. Rabinsky // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2016. – Vol. 12, № 4. – P. 9–17.
- 8 **Лойцянский, Л. Г.** Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – М. : Дрофа, 2003. – 840 с.

УДК 539.3

## НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СФЕРИЧЕСКОМ УПРУГОМ СЛОЕ С ВЯЗКОУПРУГИМ ПОКРЫТИЕМ

*С. Г. ПШЕНИЧНОВ*

*Научно-исследовательский институт механики МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация*

Развитие современных технологий, а также появление новых материалов создают необходимость исследований динамики кусочно-однородных сред с вязкоупругими компонентами. Некоторые результаты в этой области, полученные в недавнее время, содержатся, например в работах [1–6], при этом в большинстве известных публикаций внимание уделяется не переходным волновым процессам, а гармоническим колебаниям и волнам. Среди разнообразных подходов к изучению нестационарных волн в средах рассматриваемого типа весьма важным является развитие аналитических методов построения решений соответствующих начально-краевых задач, однако на сегодня достигнутых успехов в этом направлении явно недостаточно. В настоящей работе представлены результаты исследований нестационарных процессов в сферическом упругом слое с вязкоупругим покрытием, полученные на основе более ранних аналитических разработок [7, 8].

Рассмотрена задача о распространении нестационарных возмущений в кусочно-однородном полом шаре, состоящем из двух однородных концентрических сферических слоев с условиями непрерывности на границе между ними. Один слой – из упругого материала, другой же, более тонкий, который будем называть покрытием, является вязкоупругим. Конструкция изначально покоится, но в момент  $t = 0$  на внешнюю поверхность полого шара начинает действовать равномерно распределенная нормальная нагрузка  $P(t)$ , при этом полость шара остается свободной.