

платформы или насыпные места, просторные для размещения оборудования, позволяющие удобно и безопасно ловить рыбу. В зоне тихого отдыха уместным будет устройство каскадов, фонтанов, в детской зоне – установка развлекательных разбрызгивающих устройств.

Малые архитектурные формы (МАФ) и элементы благоустройства обогащают визуальное восприятие пространства, а также служат элементами для создания благоприятных и комфортных условий.

На территории зоны отдыха необходимо развить дорожно-тропиночную сеть, а также предусмотреть сочетание различных видов мощения дорожек, например тротуарной плитки и натурального камня. В качестве МАФ могут быть использованы скамейки, беседки, скульптуры и т. п., которые будут не только создавать эстетически привлекательное пространство, но и служить основными ориентирами в разных функциональных зонах. Использование природных материалов в элементах благоустройства создаст гармоничные сочетания с окружающей природой и обеспечит единое восприятие всей местности. Наличие светового оборудования и подсветки, в том числе динамической, в разнообразных оттенках и цветах поможет подчеркнуть архитектурно-ландшафтные детали и особенности территории [3].

Комплексное формирование архитектурно-ландшафтной среды зоны отдыха озера Волотовское, основанное на методе функционального зонирования, представляет собой важный этап в создании комфортной, многофункциональной, эстетически привлекательной и безопасной городской рекреационной территории.

Список литературы

1 **Ананич, В. Н.** Анализ рекреационного потенциала зоны отдыха озера Волотовское в г. Гомеле / В. Н. Ананич // Архитектура и строительство: традиции и инновации : материалы II Междунар. науч.-техн. конф. студ., магистрантов и аспирантов, Гомель, 21 декабря 2023 г. / под общ. ред. А. А. Ерофеева. – Гомель : БелГУТ, 2024. – С. 5–9.

2 Схема озелененных территорий [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://gomel.gov.by/ru/content/gomel/zastrojka-goroda/skhema-ozelenennykh-territoriy/>. – Дата доступа : 31.08.2024.

3 **Потаев, Г. А.** Формирование архитектурно-ландшафтных композиций : учеб.-метод. пособие по дисциплине «Ландшафтная архитектура» для студентов специальности 1-69 01 01 «Архитектура» / Г. А. Потаев, Е. Е. Нитиевская. – Минск : БНТУ, 2010. – 42 с.

УДК 517.958

НЕЛИНЕЙНЫЕ ГИДРОУПРУГИЕ КОЛЕБАНИЯ ТРЕХСЛОЙНОЙ ПЛАСТИНЫ

А. В. ЧЕРНЕНКО

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

В целях создания и исследования надежности, безопасности зданий и сооружений требуется разработка методов неразрушающего контроля упругих элементов различных многослойных конструкций по параметрам их нелинейных колебаний. Такое встречается, когда приходится иметь дело с комбинированными сооружениями, где присутствуют системы гидроохлаждения, гидропривода, гидродинамические опоры, гидравлические демпферы [1]. В работе [2] авторами предложены подходы к моделированию гидроупругих колебаний трехслойных пластин, взаимодействующих с вязкой жидкостью. В работе [3] проведено численное моделирование удара о воду трехслойных прямоугольной и круглой пластин. Исследованию гидроупругого взаимодействия консольнозакрепленных композитных балок с вязким потоком посвящена работа [4]. В работе [5] предложены подходы к математическому моделированию гидроупругих колебаний трехслойных балок и пластин, взаимодействующих с вязкой жидкостью. Моделирование колебаний трехслойных пластин с одновременным учетом упругого основания, инерции и вязкости жидкости, применительно к узким каналам исследовано в [6]. Следует отметить, что в указанных выше работах не рассматривался совместный учет нелинейных свойств упругого основания, а также вязкости жидкости в канале.

Рассматривается плоский канал с абсолютно жесткой и трехслойной стенками, размеры которых в плане $b \times 2\ell$ и $2\ell \ll b$ (рисунок 1). Канал полностью заполнен вязкой несжимаемой жидкостью, которая пульсирует в нем за счет заданного давления на его торцах $p^*(\omega t)$. Верхняя стенка

неподвижная, а нижняя стенка имеет упругое основание, которое рассматриваем как модель обобщения основания Винклера, в рамках которой учитывается не только линейная реакция, пропорциональная прогибу пластины, но и учитывается нелинейная реакция, пропорциональная кубу ее прогиба. Введем декартовую систему координат $Oxyz$, центр которой в состоянии покоя совпадает с центром легкого несжимаемого заполнителя пластины, предполагается $h_0 \ll \ell$.

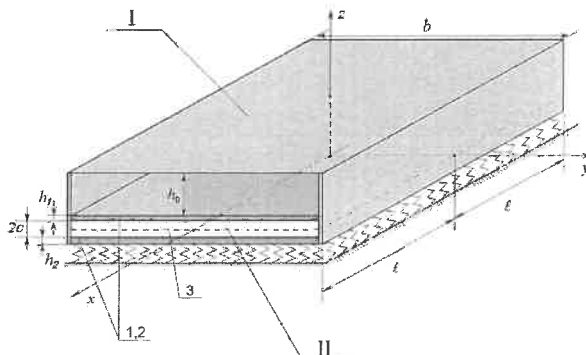


Рисунок 1 – Узкий щелевой канал в рамках плоской задачи, дно которого находится на нелинейном упругом основании: I – неподвижная стенка; II – трехслойная стенка; h_0 – толщина вязкого слоя жидкости; 1, 2, 3 – слои трехслойной стенки; $h_2, h_1, 2c$ – толщина соответствующих слоев

Движение вязкой жидкости в узком канале – ползущее, и уравнения ее движения имеют вид [7]

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \nu \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} \right), \quad \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = \nu \left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right), \quad \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0; \quad (1)$$

граничные условия для уравнений динамики жидкости (1) записываются как

$$V_x = \frac{\partial u}{\partial t}, \quad V_z = \frac{\partial w}{\partial t} \quad \text{при } z = w + c + h_1, \quad V_x = 0, \quad V_z = 0 \quad \text{при } z = \delta, \quad (2)$$

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

где p – давление жидкости; V_z, V_x – проекции вектора скорости жидкости на оси Oz и Ox ; ν – коэффициент кинематической вязкости жидкости; ρ – плотность жидкости; w – упругое перемещение трехслойной пластины по нормали; $p^*(\omega t)$ – гармонически пульсирующая составляющая давления по времени; ω – частота колебаний; t – время.

Уравнения движения нижней стенки запишем как [8, 9]

$$\begin{aligned} a_1 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + a_6 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} - a_7 \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} &= -q_{zx}, \quad a_6 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + a_2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} - a_3 \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} = 0; \\ a_7 \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} + a_3 \frac{\partial^3 \varphi}{\partial x^3} - a_4 \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} - m_0 \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= -q_{zz} + q_f, \end{aligned} \quad (4)$$

где q_{zz} – нормальное напряжение; q_{zx} – касательное напряжение; $m_0 = \rho_1 v_1 + \rho_2 v_2 + 2\rho_3 c$; ρ_k – плотность материала k -го слоя; φ – угол поворота нормали несжимаемого заполнителя; u – продольное перемещение срединной плоскости вдоль оси Ox ; a_1, \dots, a_7 – параметры согласно [8], $q_f = b^* w + \beta w^3$ – напряжение, действующее на пластину со стороны нелинейного основания [9], где b^* – коэффициент жесткости при линейной составляющей напряжения, действующего со стороны основания, β – коэффициент жесткости при кубической составляющей напряжения, действующего со стороны основания.

Получена связанная нелинейная динамическая задача гидроупругости (1)–(4), исследовалась методом возмущений, рассматривая асимптотические разложения по выделенным малым параметрам, что позволило линеаризовать задачу гидродинамики и решить ее. В результате получены выражения напряжений жидкости, действующих на трехслойную пластину – дно канала и показано, что касательные напряжения q_{zx} во много раз меньше, чем нормальные q_{zz} . С учетом данного факта получили интегро-дифференциальное уравнение изгибных колебаний трехслойной пластины – дна канала. Исследование данного уравнения возможно методом гармонического баланса [9], оно позволяет найти гидроупругий отклик трехслойной стенки канала.

Список литературы

- 1 Прецизионные газовые подшипники / Ю. Я. Болдырев [и др.]. – СПб. : ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2007. – 504 с.
- 2 **Kondratov, D. V.** Hydroelastic oscillations of three-layered channel wall resting on elastic foundation / D. V. Kondratov, V. S. Popov, A. A. Popova // Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2020. – P. 903–911. – DOI : 10.1007/978-3-030-22041-9_96.
- 3 **Крупенин, А. М.** Удар трехслойной пластины о свободную поверхность жидкости / А. М. Крупенин, М. И. Мартиросов, Л. Н. Рабинский // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2015. – № 5–2. – С. 65–73.
- 4 Viscous fluid-structure interaction response of composite hydrofoils / Liao, Y. [et al.] // Composite Structures. – 2019. – Vol. 212. – P. 571–585. – DOI : 10.1016/j.compstruct.2019.01.043.
- 5 **Mogilevich, L. I.** Hydroelastic response of a circular sandwich plate interacting with a liquid layer / L. I. Mogilevich, V. S. Popov, A. A. Popova // Journal of Physics : Conference Series. – 2020. – Vol. 1546. – P. 012–137.
- 6 **Черненко, А. В.** Математическое моделирование гидроупругих колебаний однослойных и трехслойных пластин, образующих стенки каналов с пульсирующей вязкой жидкостью, установленных на упругом основании: специальность 05.13.18 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ : дис.... канд. физ.-мат. наук / А. В. Черненко. – Саратов, 2022. – 20 с.
- 7 **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.
- 8 **Горшков, А. Г.** Механика слоистых вязкоупругопластических элементов конструкций / А. Г. Горшков, Э. И. Старовойтов, А. В. Яровая. – М. : Физматлит, 2005. – 576 с.
- 9 **Попов, В. С.** Динамика взаимодействия пульсирующего слоя вязкой сжимаемой жидкости с пластиной на нелинейно-упругом основании / В. С. Попов, А. А. Попова // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Сер. Естественные науки. – 2024. – № 3 (114). – С. 45–69.

УДК 691.32.05

ПРИМЕНЕНИЕ НАНОДОБАВОК В БЕТОН КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

В. В. ШЕЛЮТО

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

В современном строительстве надежность и безопасность зданий и сооружений являются приоритетными задачами. Так, сегодня одним из наиболее перспективных направлений в области современных строительных материалов является использование нанодобавок в бетонных смесях. Нанотехнологии предлагают уникальные возможности для улучшения механических и физико-химических свойств бетона. Так, нанодобавки способны существенно повысить прочность, долговечность и устойчивость бетона к внешним воздействиям, что делает его более надежным и долговечным.

Структура традиционного бетона

Структура классического бетона представляет собой сложную многокомпонентную систему, где взаимодействие различных элементов определяет его физико-механические свойства. Прежде всего следует отметить, что заполнители как мелкие, так и крупные играют ключевую роль в формировании прочности и долговечности бетона. Мелкие заполнители, такие как песок, способствуют уменьшению пустотности и повышению плотности, тогда как крупные заполнители, например гравий или щебень, могут влиять на прочность на сжатие за счет оптимизации распределения нагрузок.

Соотношение воды и цемента является одним из наиболее критичных параметров в технологии бетона. Снижение содержания воды при сохранении необходимой подвижности смеси ведет к увеличению прочности бетона. Это связано с тем, что избыточная вода может создавать капиллярные поры, которые негативно сказываются на механических характеристиках.

Также важным является процесс гидратации цемента, который зависит от условий окружающей среды, таких как температура и влажность. Оптимальные условия для гидратации способствуют формированию прочной микроструктуры, что, в свою очередь, влияет на конечные характеристики бетона.

Нанодобавки: определение и классификация

Нанодобавки – это материалы, состоящие из структурных элементов (наночастиц), которые могут быть представлены в виде кластера диаметром 1–100 нм, включающего в себя от нескольких