

$$k_p = \frac{k_{кр} - n}{\sqrt{2n}}. \quad (1)$$

Что касается распределения Эрланга, то здесь основными статическими параметрами являются:
– плотность вероятностей для входящего потока

$$f(t) = \frac{\lambda(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t}; \quad (2)$$

– математическое ожидание

$$M(t) = \frac{\alpha}{\lambda};, \quad (3)$$

– дисперсия при учёте параметров α и λ

$$D(t) = \frac{\alpha}{\lambda^2}. \quad (4)$$

Таким образом, вопрос определения закона распределения случайных параметров, характерных для железнодорожного транспорта, является достаточно трудоёмким процессом, в том числе и потому, что не всегда достаточно одного критерия. Основное направление в области прогнозирования транспортных потоков должно быть направлено на развитие методологических основ поиска адекватной картины распределения данных о базовых параметрах железнодорожного транспорта. Необходимо отметить, что нормальное распределение не всегда подходит под особенности изменения исследуемой группы параметров. Поэтому статические критерии наиболее подходят для составления достаточно точных линейных прогнозов изменения параметров погрузки-выгрузки на железнодорожном транспорте.

Список литературы

- 1 Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года : утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 июня 2008 г. № 877-р. – URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/3/1010?type> (дата обращения: 09.09.2025).
- 2 Задачи и перспективы развития научных исследований в рамках сотрудничества между ОАО «РЖД» и Российской академией наук / Н. А. Махутов, Б. М. Лапидус, М. М. Гаденин, Е. Ю. Титов // Железнодорожный транспорт. – 2023. – № 7. – С. 6–11.
- 3 Мозалевская, А. К. Применение комплексного подхода для формирования программных средств прогнозирования грузовых перевозок / А. К. Мозалевская, Е. В. Маловецкая // Инновационное развитие транспортного и строительного комплексов : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию БелИИЖТа - БелГУТа, Гомель, 16–17 ноября 2023 года ; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2023. – С. 122–123. – EDN TCZNHB.
- 4 Malovetskaya, E. Prospects for Comprehensive Forecasts When Assessing the Load of Railway Transport Infrastructure / E. Malovetskaya, E. Voskresenskaya, A. Mozalevskaya // Finance, Economics, and Industry for Sustainable Development (ESG 2023) : Proceedings of the 4th International Scientific Conference on Sustainable Development, St. Petersburg, 19–20 oct. 2023 г. – Cham : Springer Nature Switzerland AG, 2024. – P. 217–225. – EDN GLELMN.
- 5 Маловецкая, Е. В. Возможности повышения эффективности перевозочного процесса на основе построения комплексных прогнозных моделей загрузки инфраструктуры / Е. В. Маловецкая, А. К. Мозалевская // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2023. – Т. 17, № 7. – С. 38–46. – DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-7-38-46. – EDN IAEWSG.
- 6 Маловецкая, Е. В. Оценка влияния неравномерностей на перевозочный процесс / Е. В. Маловецкая, А. К. Мозалевская // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 160-летию Белорусской железной дороги. В 2 ч., Гомель, 24–25 ноября 2022 года ; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2022. – С. 207–209. – EDN BRTMRC.

УДК 539.31

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОПРОСОВ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ДИНАМИКИ АНИЗОТРОПНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК, ОСНОВАННЫХ НА ГИПОТЕЗАХ ЧОУ

А. В. НИКИФОРОВ, Д. О. СЕРДИУК, Г. В. ФЕДОТЕНКОВ

Московский авиационный институт (НИИ), Российская Федерация

НИИ механики МГУ имени М. В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация

Объектом исследования является тонкая, упругая, анизотропная неограниченная по длине цилиндрическая оболочка постоянной толщины h (рисунок 1).

Материал оболочки анизотропный с моноклинным типом симметрии упругой среды, характеризуется девятью независимыми упругими постоянными: $c_{11}, c_{12}, c_{16}, c_{22}, c_{26}, c_{44}, c_{45}, c_{55}, c_{66}$. Математическая модель оболочки построена при обобщении гипотез Чоу [4–6] для тонких пластин на тонкие оболочки. На боковую поверхность оболочки в начальный момент времени $t = 0$ воздействует

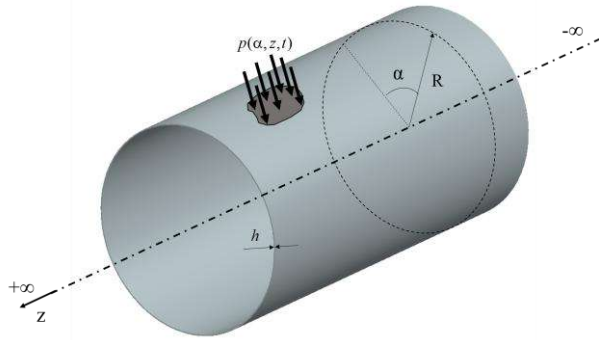


Рисунок 1 – Объект исследования

нестационарное нормальное давление $p(\alpha, z, t)$ с переменной по координатам и времени амплитудой. Движение оболочки рассматривается в цилиндрической системе координат $OR\alpha z$. Постановка начально-краевой задачи включает в себя уравнения движения в перемещениях для анизотропной оболочки, нулевые начальные условия и условия ограниченности решения на бесконечности.

Решение поставленной задачи можно получить с применением метода функций Грина (фундаментальных решений), суть которого заключается в связи искомого решения с нагрузкой при помощи интегрального оператора типа свёртки по пространственным переменным и времени. Ядром этого оператора является фундаментальное решение, которое представляет собой динамический отклик в ответ на воздействие единичной сосредоточенной по координатам и времени нагрузки, математически описываемой дельта-функцией Дирака.

Целью работы является построение фундаментальных решений для нормального $G(\alpha, z, t) = G_b(\alpha, z, t) + G_s(\alpha, z, t)$ и тангенциальных $U_\alpha(\alpha, z, t), U_z(\alpha, z, t)$ перемещений. Фундаментальные решения представляют собой перемещения в ответ на воздействие единичной сосредоточенной нагрузки математически описываемой дельта-функцией Дирака. Соответствующая постановка задачи о фундаментальных решениях имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 U_\alpha}{\partial t^2} &= K_{11}(U_\alpha) + K_{12}(U_z) + K_{13}(G_b) + K_{14}(G_s), \\ \frac{\partial^2 U_z}{\partial t^2} &= K_{21}(U_\alpha) + K_{22}(U_z) + K_{23}(G_b) + K_{24}(G_s), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{1}{R^2} \frac{\partial^4 G_b}{\partial t^2 \partial \alpha^2} + \frac{\partial^4 G_b}{\partial t^2 \partial z^2} = K_{31}(U_\alpha) + K_{32}(U_z) + K_{33}(G_b) + K_{34}(G_s),$$

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} (G_b + G_s) = K_{41}(U_\alpha) + K_{42}(U_z) + K_{43}(G_b) + K_{44}(G_s) + \frac{\delta(\alpha, z) \delta(t)}{\rho h},$$

$$U_\alpha|_{t=0} = U_z|_{t=0} = G_b|_{t=0} = G_s|_{t=0} = 0, \quad \frac{\partial U_\alpha}{\partial t} \Big|_{t=0} = \frac{\partial U_z}{\partial t} \Big|_{t=0} = \frac{\partial G_b}{\partial t} \Big|_{t=0} = \frac{\partial G_s}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0, \quad (2)$$

$$\lim_{|z| \rightarrow \infty} U_\alpha = 0, \quad \lim_{|z| \rightarrow \infty} U_z = 0, \quad \lim_{|z| \rightarrow \infty} G_b = 0, \quad \lim_{|z| \rightarrow \infty} G_s = 0. \quad (3)$$

Здесь K_{ij} – дифференциальные операторы; $\delta(\bullet)$ – дельта-функция Дирака.

При решении задачи (1)–(3) используются интегральное преобразование Лапласа по времени t , интегральное преобразование Фурье по координате z , разложение в экспоненциальные ряды Фурье по угловой координате α . При построении оригиналов искомых функций U_α, U_z, G_b, G_s используется аналитический метод вычетов для интегрального преобразования Лапласа [2], [3] и метод быстро осциллирующих функций для интегрального преобразования Фурье с использованием численного интегрирования [1] и оценкой относительной погрешности по заданной норме.

На рисунке 2 представлены фундаментальные решения $G(\alpha, z, t) = G_b(\alpha, z, t) + G_s(\alpha, z, t)$ для тонкой упругой анизотропной цилиндрической оболочки, основанной на гипотезах Чоу в моменты времени 0,1 и 0,3 мс соответственно. Оболочка имеет радиус $R = 0,6$ м и толщину стенки $h = 0,005$ м.

Материал оболочки – углепластик с плотностью $\rho = 1750 \text{ кг/м}^3$ и упругими постоянными, в ГПа, $c_{11} = 95,5$, $c_{12} = 28,9$, $c_{16} = 44,7$, $c_{22} = 25,9$, $c_{26} = 15,6$, $c_{44} = 4,4$, $c_{45} = -1,78$, $c_{55} = 6,45$, $c_{66} = 32,7$.

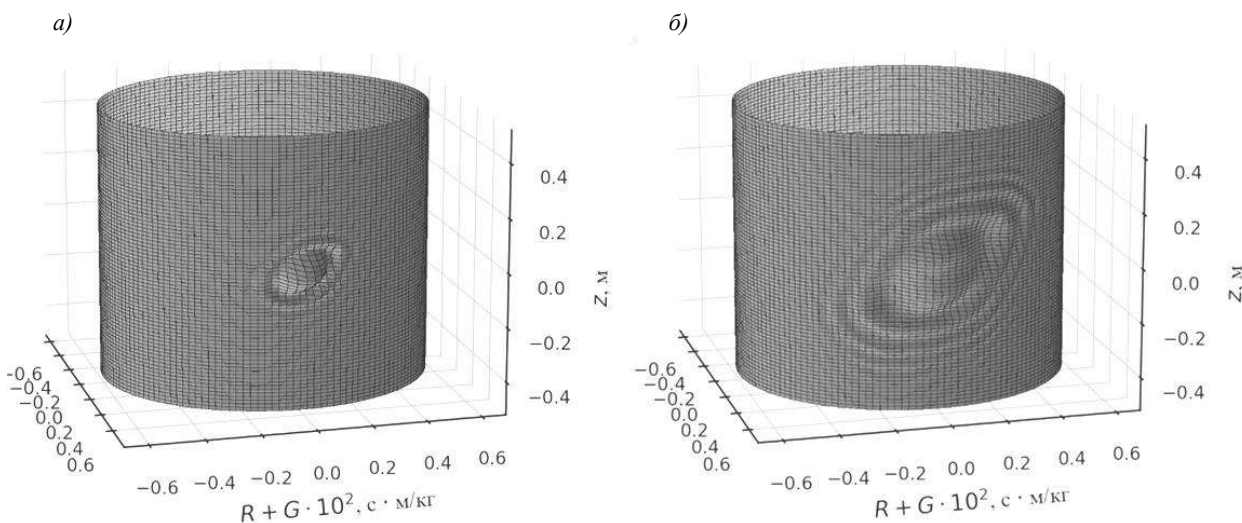


Рисунок 2 – Фундаментальные решения для нормального перемещения:
а – 0,1 мс; б – 0,3 мс

Представленные на рисунке 2 результаты иллюстрируют асимметричный характер распространения изгибных возмущений в материале анизотропной оболочки, что согласуется с рассмотренной моделью симметрии упругой среды.

Список литературы

- 1 **Бахвалов, Н. С.** Численные методы / Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобельков. – 7-е изд. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. – 636 с.
- 2 **Бейтмен, Г.** Таблица интегральных преобразований. Т. 1. Преобразования Фурье, Лапласа, Меллина / Г. Бейтмен, А. Эрдейи. – М. : Наука, 1969. – 656 с.
- 3 Волны в сплошных средах : учеб. пособие для вузов / А. Г. Горшков, А. Д. Медведский, Л. Н. Рабинский, Д. В. Тарлаковский. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 472 с.
- 4 **Михайлова, Е. Ю.** Общая теория упругих оболочек : учеб. пособие / Е. Ю. Михайлова, Д. В. Тарлаковский, Г. В. Федотенков. – М. : МАИ, 2018. – 112 с.
- 5 **Chow, T. S.** On the Propagation of Flexural Waves in an Orthotropic Laminated Plate and Its Response to an Impulsive Load / T. S. Chow // Journal of Composite Materials. – 1971. – 5:306. – DOI : 10.1177/002199837100500302.
- 6 **Timoshenko, S.** On the correction for shear of the differential equation for transverse vibrations of prismatic bars / S. Timoshenko. Phil. Mag., ser. 6. – 1921. – Vol. 41. – P. 744.

УДК 539.3+51-74; 622.2

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОТРАБОТКЕ ВЫРАБОТКАМИ БОЛЬШОЙ ПРОТЯЖЕННОСТИ С УЧЕТОМ ДАННЫХ СКВАЖИН ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОЙ РАЗВЕДКИ

Д. А. ПЕТРАЧКОВ, М. А. НИКОЛАЙЧИК, М. А. ЖУРАВКОВ
Белорусский государственный университет. г. Минск

Очистные горные работы выработками большой протяженности (лавами) вызывают перераспределение напряжений в вышележащих слоях глинисто-мергелевой толщи (ГМТ) и могут вызывать появление микротрещиноватости и водопроницаемости породной толщи [1]. Задача определения напряженно-деформированного состояния (НДС) в массиве горных пород при масштабном освоении подземного пространства является ключевой при решении широкого ряда задач геомеханики, включая задачи устойчивости породного массива, нахождения высоты зоны распространения трещин и связанные с ними задачи обеспечения безопасности подземных и наземных сооружений при разработке месторождений полезных ископаемых. В то же время широкое многообразие факто-