

УДК 539.3

DOI: 10.32326/1814-9146-2024-86-3-330-341

**ГРАНИЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
И АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО БАРЬЕРА
С ПОВЕРХНОСТНЫМИ ВОЛНАМИ
В ПОРОУПРУГОЙ ПОСТАНОВКЕ***

© 2024 г. **Петров А.Н., Белов А.А., Литвинчук С.Ю.**

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация

andrey.petrov@mech.unn.ru

Поступила в редакцию 11.07.2024

Исследуется возможность ослабления интенсивности волн на поверхности полупространства установкой барьера на основе решения трехмерной задачи динамической теории частично насыщенной пороупругости методом граничных элементов. Цель применения волнового барьера состоит в создании препятствия для распространения поверхностных волн по территории, занимаемой сооружениями или конструкциями. При организации такого способа защиты эффективными могут быть открытые (или незаполненные) траншеи. Численное моделирование проводится методом граничных элементов, основанном на совместном использовании граничных интегральных уравнений прямого подхода трехмерной изотропной теории пороупругости и интегрального преобразования Лапласа. Для описания пороупругой среды используется модель Био пороупругого материала в случае частичного насыщения. Решение во временной области получается с помощью метода, основанного на квадратурных формулах вычисления интеграла свертки, называемого далее шаговым методом. Рассматривается задача о действии динамической нагрузки на деформируемое частично насыщенное пороупругое полупространство с вертикальным барьером в виде траншеи. Для оценки эффективности гашения волн барьером на поверхности полупространства проводится расчет коэффициента снижения амплитуды перемещений при различных значениях коэффициента насыщенности пороупругого материала полупространства, геометрических размеров барьера и различных граничных условиях. Приводятся графики и карты коэффициента снижения амплитуды перемещений. Результаты моделирования показывают, что наличие барьера в виде траншеи приводит к уменьшению амплитуды волны Рэлея в точках, расположенных за траншеей, при всех рассмотренных значениях исследуемых параметров. Показано, что условие проницаемости или непроницаемости границы траншеи не оказывает заметного влияния на ее свойства по снижению интенсивности поверхностных волн. Полученные результаты могут быть полезны для разработки эффективных методов защиты зданий и сооружений от динамических воздействий.

* Выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект №22-19-00138).

Ключевые слова: модель Био, частично насыщенный пороупругий материал, полупространство, поверхностная волна, волновой барьер, открытая траншея, метод граничных элементов, преобразование Лапласа.

Введение

Одной из задач современного строительства является разработка способов и методов защиты сооружений и инженерных конструкций типа фундаментов от динамических воздействий естественного и искусственного характера. Примерами источников таких воздействий могут быть землетрясения, наземный или подземный транспорт и т.п. В качестве средства защиты от возникающих при этом вибраций могут служить волновые барьеры различного конструктивного исполнения, не позволяющие поверхностным волнам проникать в защищаемые области. При решении связанных с этими процессами задач появляется необходимость в разработке методов и комплексов программ для проведения численного моделирования взаимодействия поверхностных волн с барьерами с учетом свойств грунта, например, пористости и насыщенности.

Одним из возможных способов защиты сооружений от воздействия поверхностных волн являются вертикальные барьеры типа открытых либо заполненных материалом траншей прямоугольной формы. В большей части публикаций по исследованию эффективности таких вертикальных барьеров строятся плоские модели, предполагающие упругий характер деформирования среды и барьера [1–8]. Трехмерные постановки задач использованы в статьях [9–12]. В [13–16] представлены результаты моделирования, полученные с учетом двухфазности материала полупространства. Случай частичного насыщения пороупругой среды рассмотрен в статье [17].

В настоящей статье используется модифицированная по сравнению с представленной в [17] математическая модель частично насыщенной трехмерной изотропной пороупругой среды. Под модификацией в данном случае подразумеваются уточнения в отдельных коэффициентах уравнений движения в виде дополнительного множителя, равного величине пористости, неучтенного авторами без дополнительных замечаний при выводе уравнений. Подробные выкладки с пояснением различий в моделях представлены в [18].

1. Краевая задача в пространстве изображений Лапласа

Уравнения движения строятся объединением определяющих соотношений с соответствующими уравнениями баланса количества движения и уравнениями баланса массы каждой из фаз с учетом кинематических условий. Незвестных функций перемещения твердой фазы u_i и поровых давлений p^f и p^g достаточно для полного описания задачи пороупругой динамики. Рассматривается система уравнений в изображениях по Лапласу при нулевых начальных условиях [18]:

$$\begin{bmatrix} C_1 \delta_{ij} + C_2 (\partial/\partial_i)(\partial/\partial_j) & C_3 \partial_i & C_4 \partial_i \\ C_5 \partial_j & C_6 & C_7 \\ C_8 \partial_j & C_9 & C_{10} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{u}_i(\mathbf{x}, s) \\ \bar{p}^f(\mathbf{x}, s) \\ \bar{p}^g(\mathbf{x}, s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad i, j = 1, 2, 3, \quad \mathbf{x} \in \Phi, \quad \Phi \subset \mathbf{R}^3, \quad (1)$$

где δ_{ij} – символ Кронекера, черга над переменной – символ преобразования Лапласа, а также

$$C_1 = G\nabla^2 - (\rho - \gamma S_f \rho_f - \beta S_g \rho_g) s^2, \quad C_2 = K + 2G/3, \quad C_3 = -(\alpha - \gamma) S_f, \quad (2)$$

$$C_4 = -(\alpha - \beta) S_g, \quad C_5 = -(\alpha - \gamma) S_f s,$$

$$C_6 = -\left(\xi S_{ff} S_f + \frac{n}{K_f} S_f - S_w n \right) s + \frac{\gamma S_f}{\rho_f s} \nabla^2, \quad (3)$$

$$C_7 = -(\xi S_{gg} S_g + S_w n) s, \quad C_8 = -(\alpha - \beta) S_g s, \quad C_9 = -(\xi S_{ff} S_g + S_w n) s, \quad (4)$$

$$C_{10} = -\left(\xi S_{gg} S_g + \frac{n}{K_g} S_g - S_w n \right) s + \frac{\beta S_g}{\rho_g s} \nabla^2, \quad (5)$$

s – комплексный параметр интегрального преобразования Лапласа; ρ, ρ_f, ρ_g – плотности пороупругого материала и текучих наполнителей в виде жидкости и газа; S_f, S_g – коэффициенты насыщенности жидкостью и газом; K, K_f, K_g – объемные модули пороупругого материала и текучих наполнителей; G – сдвиговой модуль пороупругого материала; n – пористость.

В (1)–(5) введены обозначения:

$$\rho = \rho_s (1 - n) + n(S_f \rho_f + S_g \rho_g), \quad \alpha = 1 - \frac{K}{K_s},$$

$$\xi = \frac{\alpha - n}{K_s}, \quad S_{ff} = S_f - \chi(S_f - S_{rf}),$$

$$S_{gg} = S_g + \chi(S_f - S_{rf}), \quad S_w = -\frac{\chi(S_{rg} - S_{rf})}{p^d} S_u^{(\chi+1)/\chi},$$

$$\gamma = \frac{k_f n \rho_f s}{n S_f + k_f \rho_f s}, \quad \beta = \frac{k_g n \rho_g s}{n S_g + k_g \rho_g s}, \quad k_f = K_{rf} \frac{k}{\eta_f}, \quad k_g = K_{rg} \frac{k}{\eta_g},$$

где ρ_s – плотность упругого скелета; K_s – объемный модуль упругого скелета; S_u – эффективная насыщенность; S_{rf}, S_{rg} – соответственно остаточные насыщенности жидкостью и газом; χ – индекс распределения размера пор; k – абсолютная проницаемость пороупругого материала; K_{rf}, K_{rg} – относительные фазовые проницаемости пороупругого материала; η_f, η_g – коэффициенты вязкости жидкости и газа; p^d – давление вытеснения.

Рассматриваются краевые условия для системы (1):

$$\bar{u}_i(\mathbf{x}, s) = \tilde{u}_i(s), \quad \bar{p}^f(\mathbf{x}, s) = \tilde{p}^f(s), \quad \bar{p}^g(\mathbf{x}, s) = \tilde{p}^g(s), \quad \mathbf{x} \in \Gamma^D, \quad i = 1, 2, 3, \quad (6)$$

$$\bar{t}_i(\mathbf{x}, s) = \tilde{t}_i(s), \quad \bar{q}^f(\mathbf{x}, s) = \tilde{q}^f(s), \quad \bar{q}^g(\mathbf{x}, s) = \tilde{q}^g(s), \quad \mathbf{x} \in \Gamma^N, \quad i = 1, 2, 3, \quad (7)$$

где t_i – поверхностная сила; q^f, q^g – потоки текучих наполнителей в виде жидкости и газа; Γ^D – граница Дирихле; Γ^N – граница Неймана; $\tilde{u}_i(s), \tilde{p}^f(s), \tilde{p}^g(s), \tilde{t}_i(s), \tilde{q}^f(s), \tilde{q}^g(s)$ – заданные функции перемещений, поровых давлений, усилий и потоков.

2. Схема решения задачи

Решение краевой задачи (1), (6), (7) проводится прямым вариантом метода граничных интегральных уравнений (ГИУ). Для построения соответствующих ГИУ динамической пороупругости в пространстве изображений по Лапласу используется

метод взвешенных остатков [19]. Предварительно регуляризованные в соответствии с подходом Канторовича – Перлина ГИУ решаются далее методом граничных элементов [20].

Пространственная дискретизация при решении задачи (1), (6), (7) заключается в представлении граничной поверхности рассматриваемой области в виде последовательности треугольных и/или четырехугольных восьмиузловых элементов. Далее с использованием биквадратичных функций формы [20] устанавливается соответствие между контрольным элементом в локальных координатах и каждым элементом из последовательности. Аппроксимация граничных перемещений и поровых давлений проводится с помощью билинейных элементов, а аппроксимация поверхностных сил и потоков наполнителей – с помощью постоянных элементов.

Построенные ГИУ сводятся к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) применением метода коллокации в узлах аппроксимации граничных функций. Решение СЛАУ находится по методу Гаусса.

Так как решение СЛАУ зависит от комплексного параметра интегрального преобразования Лапласа, для получения решения во времени используется метод численного обращения, называемый шаговым. Шаговый метод основан на квадратурных формулах вычисления интеграла свертки, выведенных в [21, 22]. Если известен вид сворачиваемых функций в пространстве изображений по Лапласу, то метод может быть использован для численного нахождения обратного преобразования.

3. Пример численного расчета

Рассмотрена задача о действии динамической нагрузки на деформируемое частично насыщенное пороупругое полупространство с открытой траншеей (рис. 1). В расчетах использованы следующие значения геометрических параметров: $l = 6$ м, $d = 12$ м, $a = 1$ м, $r_1 = r_2 = 1$ м, $b_1 = 1,46$ м, $b_2 = 5,38$ м, $b_3 = 11,1$ м.

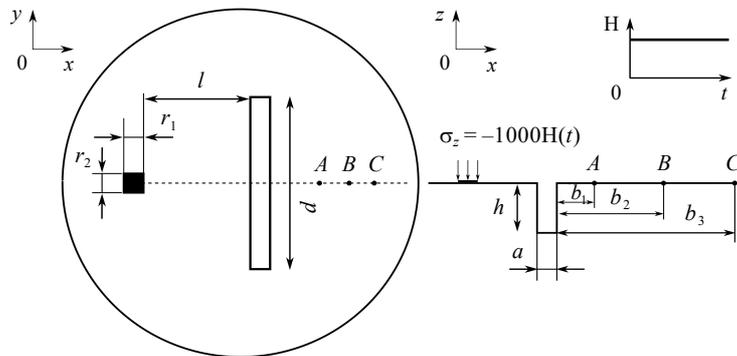


Рис. 1. Схема задачи

Изменение во времени нестационарной нормальной поверхностной силы описывается функцией Хевисайда. На всей поверхности полупространства заданы нулевые поровые давления обоих текучих наполнителей. На границе траншеи заданы нулевые усилия и рассмотрены случаи нулевых поровых давлений и нулевых потоков обоих текучих наполнителей. Параметры модели пороупругого материала полупространства взяты из [17]: $n = 0,23$, $\rho_s = 2650$ кг/м³, $\rho_f = 997$ кг/м³, $\rho_g = 1,1$ кг/м³, $K = 1,02 \cdot 10^9$ Н/м², $G = 1,44 \cdot 10^9$ Н/м², $K_s = 3,5 \cdot 10^{10}$ Н/м², $K_f = 2,25 \cdot 10^9$ Н/м², $K_g =$

$= 1,1 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$, $k = 2,5 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$, $\eta_f = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2$, $\eta_g = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2$, $p^d = 5 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$, $S_{jf} = 0$, $S_{rg} = 1$, $\chi = 1,5$.

На рис. 2–4 представлены графики зависимостей от времени вертикального перемещения в точках A , B , C , расположенных на различном расстоянии от траншеи при заданных нулевых поровых давлениях обоих наполнителей. Коэффициент насыщенности S_f принят равным 0,9.

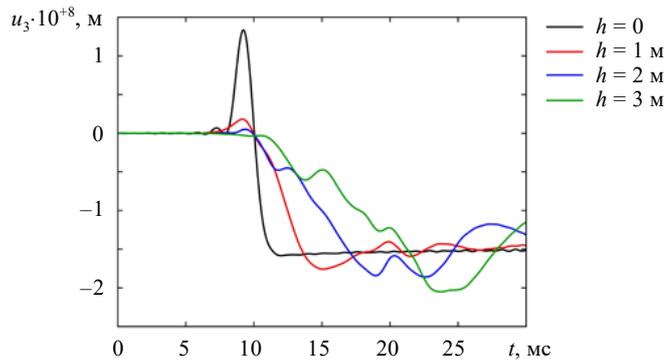


Рис. 2. Перемещение u_3 в точке A при $S_f = 0,9$

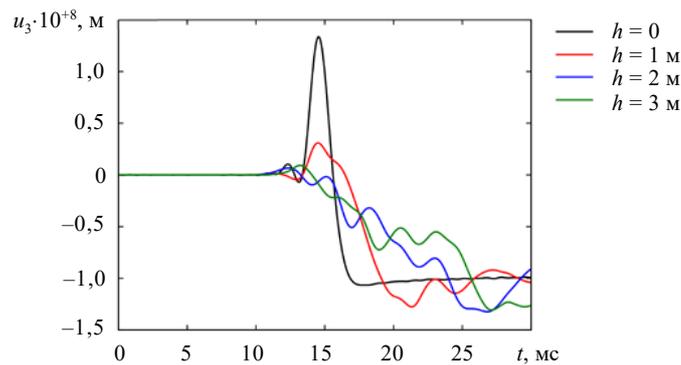


Рис. 3. Перемещение u_3 в точке B при $S_f = 0,9$

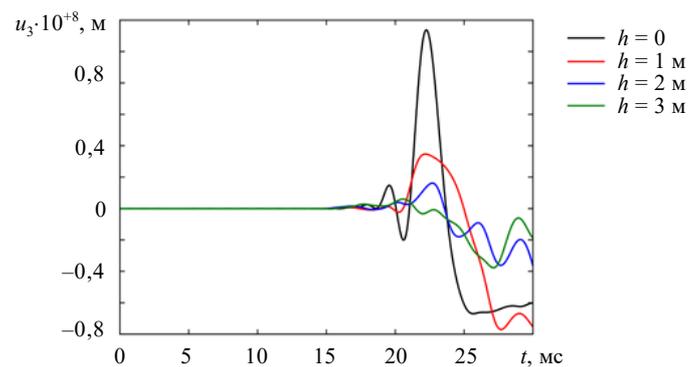


Рис. 4. Перемещение u_3 в точке C при $S_f = 0,9$

На рис. 2–4 видно, как наличие траншеи приводит к тому, что вертикальное перемещение u_3 после прибытия продольной волны принимает значения больше нуля при различной глубине траншеи. При отсутствии траншеи перемещение u_3 принимает

значение меньше нуля вслед за прибытием продольной волны в каждой из трех рассматриваемых точек. Значения перемещения u_3 вслед за прибытием волны Рэлея меньше нуля и в случае наличия траншеи, и в случае ее отсутствия. При этом в случае наличия траншеи пиковое значение перемещения u_3 по абсолютной величине не превышает соответствующего значения в этот же момент времени в случае ее отсутствия. С момента времени, когда перемещение u_3 в каждой точке при отсутствии траншеи принимает значение, соответствующее статическому решению, перемещение u_3 при наличии траншеи независимо от ее глубины изменяется в диапазоне значений со средним, близким по величине к статическому. Диапазон значений, в котором изменяется перемещение u_3 на рассматриваемом временном интервале, меньше в случае наличия траншеи, чем в случае ее отсутствия, и уменьшается с увеличением расстояния от траншеи в обоих случаях. В то же время увеличение глубины траншеи приводит к тому, что диапазон изменения перемещения u_3 на рассматриваемом временном промежутке уменьшается для каждой из рассмотренных точек за траншеей.

Для оценки эффективности траншеи в снижении интенсивности волн на полупространстве проводится расчет значений коэффициента снижения амплитуды (КСА) A_{rf} в каждом узле гранично-элементной сетки, КСА определяется отношением:

$$A_{rf} = \frac{A^{\text{bar}}}{A^{\text{non-bar}}},$$

где A^{bar} – амплитуда перемещений на полупространстве с барьером, $A^{\text{non-bar}}$ – амплитуда перемещений на полупространстве без барьера. Амплитуда рассчитывается по формуле:

$$A = \left(\sum_{i=1}^3 (u_i^{\text{max}} - u_i^{\text{min}})^2 \right)^{1/2},$$

где u_i^{max} – максимальное значение i -й компоненты вектора перемещения в узле на рассматриваемом временном интервале, u_i^{min} – минимальное значение этой компоненты.

На рис. 5 представлены графики изменения КСА A_{rf} с увеличением расстояния от траншеи в точках на линии AC при различных значениях параметра h .

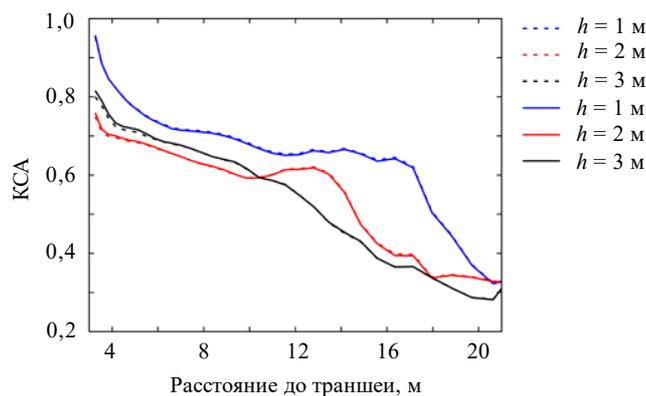


Рис. 5. График изменения КСА A_{rf} при различной глубине и условиях на границе траншеи

Кривые, обозначенные штриховой линией, соответствуют случаю непроницаемой границы траншеи, сплошной линией обозначены кривые, соответствующие случаю

проницаемой границы. Результаты расчетов показали, что граничные условия на траншее оказывают незначительное влияние на отклик полупространства, и соответствующие кривые на рис. 4 практически неразличимы. Видно, что при любой глубине траншеи значения КСА A_{rf} не превышают 1 на расстоянии от 3,5 до 21 м от траншеи. Это означает, что наличие траншеи дает экранирующий эффект в рассматриваемой задаче. Экранирующий эффект от наличия траншеи усиливается с увеличением расстояния от нее при всех рассмотренных значениях глубины h . В случае, когда глубина траншеи составляет 1 м, эффективность траншеи оказывается хуже, чем в случаях $h = 2$ м или $h = 3$ м. Рисунок 4 иллюстрирует этот результат: кривая значений КСА A_{rf} при $h = 1$ м располагается выше двух других кривых во всех точках на линии AC . Также видно, что увеличение глубины траншеи с 2 до 3 м не приводит к увеличению эффективности траншеи: при $h = 3$ м соответствующая кривая на рис. 4 располагается выше кривой, соответствующей $h = 2$ м, до точки, расположенной на расстоянии примерно 10 м от траншеи. С увеличением расстояния более 10 м наблюдается противоположная ситуация.

На рис. 6–8 представлена графика, называемая тепловой картой и иллюстрирующая изменение КСА A_{rf} в точках полупространства при $S_f = 0,9$ и различных значениях h .

На рисунках видно, что область, где КСА A_{rf} не превышает значения 1, расположена преимущественно за траншеей. Видно также, что здесь же расположена область, где КСА A_{rf} не превышает значения 0,5, и площадь указанной области увеличивается с ростом глубины траншеи h .

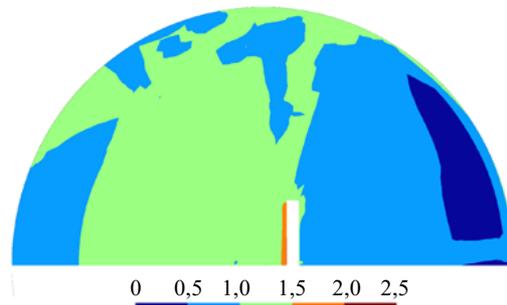


Рис. 6. Карта КСА A_{rf} при $h = 1$ м и $S_f = 0,9$

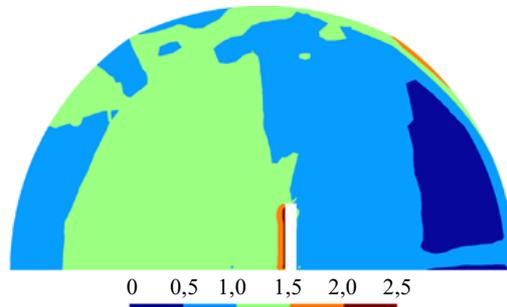


Рис. 7. Карта КСА A_{rf} при $h = 2$ м и $S_f = 0,9$

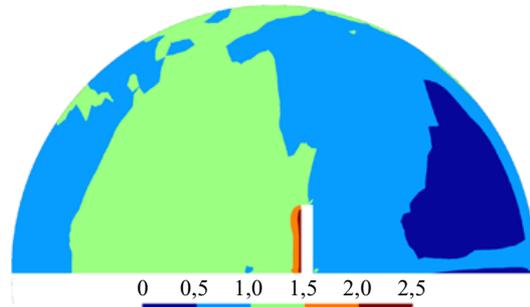


Рис. 8. Карта КСА A_{rf} при $h = 3$ м и $S_f = 0,9$

Дальнейший анализ касается влияния коэффициента насыщенности на решение и рассеивающие свойства барьера в виде траншеи. Результаты соответствующих численных экспериментов представлены на рис. 9, 10.

Рисунок 9 показывает, что увеличение коэффициента насыщенности S_f с 0,9 до 0,95 не приводит к заметному количественному отличию между двумя решениями. На графиках это проявляется так, что соответствующие кривые КСА в точках на линии AC за траншеей располагаются близко друг другу. Однако далее с последовательным ростом коэффициента насыщенности S_f до 1 соответствующие кривые становятся хорошо различимыми, и кривые, рассчитанные при больших значениях S_f , располагаются выше, сохраняя в то же время характер поведения на всем рассматриваемом расстоянии за траншеей. Кривая, соответствующая случаю полного насыщения $S_f = 1$, располагается выше остальных кривых, и в этом случае КСА A_{rf} принимает значения больше 0,5 на линии AC .

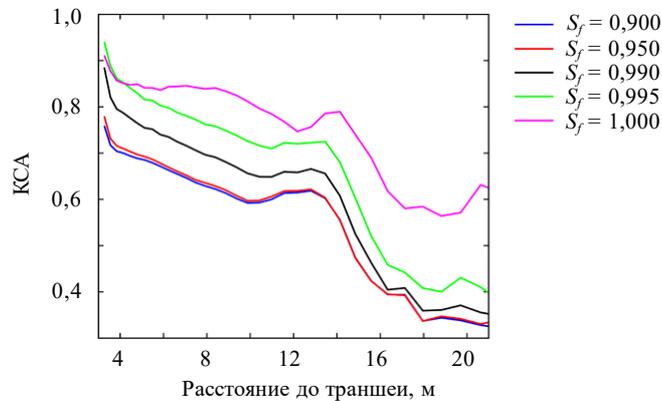


Рис. 9. Графики изменения КСА A_{rf} при различных значениях S_f и $h = 2$ м

Представленная на рис. 10 карта КСА A_{rf} показывает, что область значений КСА A_{rf} , меньших, чем 1, располагается также за траншеей, как и в случае частичного насыщения материала. Однако при $S_f = 1$ и глубине траншеи $h = 2$ м на представленной карте отсутствует область, где значения КСА A_{rf} меньше 0,5.

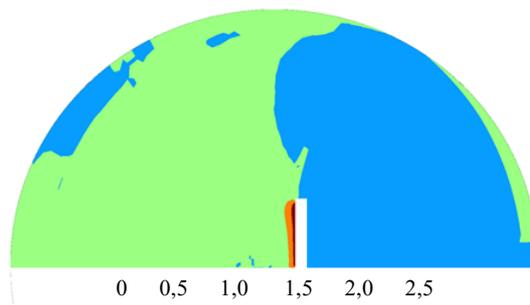


Рис. 10. Карта КСА A_{sf} при $h = 2$ м и $S_f = 1$

Заклучение

Получено гранично-элементное решение задачи о действии динамической нагрузки на деформируемое частично насыщенное пороупругое полупространство с волновым барьером в виде траншеи в форме прямоугольного параллелепипеда. Представлены результаты численного анализа влияния коэффициента насыщенности пороупругого материала на волновые картины в полупространстве при наличии волнового барьера, влияния глубины траншеи на волновые картины в полупространстве, влияния граничных условий на границе барьера для случаев проницаемых и непроницаемых границ на волновые картины в полупространстве. Показано, что наличие барьера в виде траншеи приводит к снижению амплитуды волны Рэлея в области за траншеей, а также то, что условие проницаемости или непроницаемости границы траншеи не оказывает заметного влияния на свойства барьера по снижению величины перемещений при распространении волн на полупространстве.

Список литературы

1. Masahiko Fuyuki, Yoshiro Matsumoto. Finite difference analysis of Rayleigh wave scattering at a trench. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1980. Vol. 70. Iss. 6. P. 2051–2069. <https://doi.org/10.1785/BSSA0700062051>.
2. Israil A.S.M., Banerjee P.K. Two-dimensional transient wave-propagation problems by time-domain BEM. *International Journal of Solids and Structures*. 1990. Vol. 26. Iss. 8. P. 851–864.
3. Bolt B.A., May T.W. The effectiveness of trenches and scarps reducing seismic energy. *Proceedings of 2nd U.S. Conference on Earthquake Engineering*. Stanford University, 22–24 Aug. 1979. P. 1104–1113.
4. May T.W., Bolt B.A. The effectiveness of trenches in reducing seismic motion. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 1982. Vol. 10. Iss. 2. P. 195–210. DOI: 10.1002/EQE.4290100203.
5. Al-Hussaini T.M., Ahmad S. Active isolation of machine foundations by in-filled trench barriers. *Journal of Geotechnical Engineering*. 1996. Vol. 122. Iss. 4. P. 288–294. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1996)122:4(288).
6. Ahmad S., Al-Hussaini T.M., Baker J.M. Numerical and experimental studies on vibration screening by open and in-filled trench barriers. In: *Proceedings of the International Workshop WAVE 2000*. Bochum, Germany. 2000. P. 241–250.
7. Tsai P.H., Chang T.S. Effects of open trench siding on vibration-screening effectiveness using the two-dimensional boundary element method. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2009. Vol. 29. Iss. 5. P. 865–873. DOI: 10.1016/j.soildyn.2008.09.005.
8. Saikia A., Dutta A.K., Das U.K. Finite element study on vibration isolation using dual open trench barriers. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*. 2014. Vol. 11. P. 20–29.

9. Carrion R., Mesquita E. A boundary element study on 3D soil vibration isolation using open or filled trenches as barriers. *17th International Congress of Mechanical Engineering*. São Paulo, Brazil, 10–17 Nov. 2003. 9 p.
10. Adam M., Von Estorff O. Reduction of train-induced building vibrations by using open and filled trenches. *Computers & Structures*. 2005. Vol. 83. Iss. 1. P. 11–24. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2004.08.010>.
11. Shahrabi Farahani Z., Rafiee-Dehkharghani R. Enhancing wave barrier design for train-induced vibrations: A comparative analysis of 2D and 3D finite element simulations. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2024. Vol. 42. P. 5169–5188. <https://doi.org/10.1007/s10706-024-02835-z>.
12. Jazebi M., Ahmadi M.M., Saberian M. et al. Performance of open and in-filled (geofoam) trenches in mitigating ground-borne vibrations induced by impact loading. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2023. Vol. 16. P. 718–730. <https://doi.org/10.1007/s42947-022-00159-w>.
13. Cao Zhigang, Cai Yuanqiang, Boström Anders, Zheng Jianguo. Semi-analytical analysis of the isolation to moving-load induced ground vibrations by trenches on a poroelastic half-space. *Journal of Sound and Vibration*. 2012. Vol. 331. Iss. 4. P. 947–961. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2011.09.009>.
14. Feng S.J., Li J.P., Zhang X.L., Chen Z.L., Li Y.C. Effects of water table on ground-borne vibration screening effectiveness by using open trenches. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2020. Vol. 131. Article No 106031. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106031>.
15. Chiang C.H., Tsai P.H. A numerical study of the screening effectiveness of open trenches for high-speed train-induced vibration. *Shock and Vibration*. 2014. Vol. 2014. P. 489090-1 – 489090-12. <https://doi.org/10.1155/2014/489090>.
16. Sun L., Shi G., Li M., Jin J. Field tests and three-dimensional semi-analytical boundary element method analysis of a row of holes as active barrier in saturated soil. *Journal of Testing and Evaluation*. 2021. Vol. 49. Iss. 1. P. 60–81. DOI: 10.1520/JTE20200248.
17. Li P., Schanz M. Time domain boundary element formulation for partially saturated poroelasticity. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2013. Vol. 37. Iss. 11. P. 1483–1498. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2013.08.002>.
18. Igumnov L.A., Petrov A.N., Belov A.A., Mironov A.A., Lyubimov A.K., Dianov D.Yu. Numerically-analytically studying fundamental solutions of 3-D dynamics of partially saturated poroelastic bodies. *Materials Physics and Mechanics*. 2019. Vol. 42. Iss. 5. P. 596–601. DOI: 10.18720/MPM.4252019_12.
19. Угодчиков А.Г., Хуторянский Н.М. *Метод граничных элементов в механике деформируемого твердого тела*. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1986. 295 с.
20. Гольдштейн Р.В. К вопросу о применении метода граничных интегральных уравнений для решения задач механики сплошных сред. В кн: *Метод граничных интегральных уравнений: Вычислительные аспекты и приложения в механике (Механика: новое в зарубежной науке)*. М.: Мир, 1978. С. 183–209.
21. Lubich C. Convolution quadrature and discretized operational calculus. I. *Numerische Mathematik*. 1988. Vol. 52. Iss. 2. P. 129–145. DOI: 10.1007/BF01398686.
22. Lubich C. Convolution quadrature and discretized operational calculus. II. *Numerische Mathematik*. 1988. Vol. 52. Iss. 4. P. 413–425. DOI: 10.1007/BF01462237.

References

1. Masahiko Fuyuki, Yoshiro Matsumoto. Finite difference analysis of Rayleigh wave scattering at a trench. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1980. Vol. 70. Iss. 6. P. 2051–2069. <https://doi.org/10.1785/BSSA0700062051>.
2. Israil A.S.M., Banerjee P.K. Two-dimensional transient wave-propagation problems by time-domain BEM. *Int. J. Solids Structures*. 1990. Vol. 26. Iss. 8. P. 851–864.
3. Bolt B.A., May T.W. The effectiveness of trenches and scarps reducing seismic energy. *Proceedings of 2nd U.S. Conference on Earthquake Engineering*. Stanford University, 22–24 Aug. 1979. P. 1104–1113.

4. May T.W., Bolt B.A. The effectiveness of trenches in reducing seismic motion. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 1982. Vol. 10. Iss. 2. P. 195–210. DOI: 10.1002/EQE.4290100203.
5. Al-Hussaini T.M., Ahmad S. Active isolation of machine foundations by in-filled trench barriers. *J. Geotech. Eng.* 1996. Vol. 122. Iss. 4. P. 2 88–294. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1996)122:4(288).
6. Ahmad S., Al-Hussaini T.M., Baker JM. Numerical and experimental studies on vibration screening by open and in-filled trench barriers. In: *Proceedings of the International Workshop WAVE 2000*. Bochum, Germany. 2000. P. 241–250.
7. Tsai P.H., Chang T.S. Effects of open trench siding on vibration-screening effectiveness using the two-dimensional boundary element method. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2009. Vol. 29. Iss. 5. P. 865–873. DOI: 10.1016/j.soildyn.2008.09.005.
8. Saikia A., Dutta A.K., Das U.K. Finite element study on vibration isolation using dual open trench barriers. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*. 2014. Vol. 11. P. 20–29.
9. Carrion R., Mesquita E. A boundary element study on 3D soil vibration isolation using open or filled trenches as barriers. *17th International Congress of Mechanical Engineering*. São Paulo, Brazil. 10–17 Nov. 2003. 9 p.
10. Adam M., Von Estorff O. Reduction of train-induced building vibrations by using open and filled trenches. *Computers & Structures*. 2005. Vol. 83. Iss. 1. P. 11–24. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2004.08.010>.
11. Shahrabi Farahani Z., Rafiee-Dehkharghani R. Enhancing wave barrier design for train-induced vibrations: A comparative analysis of 2D and 3D finite element simulations. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2024. Vol. 42. P. 5169–5188. <https://doi.org/10.1007/s10706-024-02835-z>.
12. Jazebi M., Ahmadi M.M., Saberian M. et al. Performance of open and in-filled (geofoam) trenches in mitigating ground-borne vibrations induced by impact loading. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2023. Vol. 16. P. 718–730. <https://doi.org/10.1007/s42947-022-00159-w>.
13. Cao Zhigang, Cai Yuanqiang, Boström Anders, Zheng Jianguo. Semi-analytical analysis of the isolation to moving-load induced ground vibrations by trenches on a poroelastic half-space. *Journal of Sound and Vibration*. 2012. Vol. 331. Iss. 4. P. 947–961. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2011.09.009>.
14. Feng S.J., Li J.P., Zhang X.L., Chen Z.L., Li Y.C. Effects of water table on ground-borne vibration screening effectiveness by using open trenches. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2020. Vol. 131. Article No 106031. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106031>.
15. Chiang C.H., Tsai P.H. A numerical study of the screening effectiveness of open trenches for high-speed train-induced vibration. *Shock and Vibration*. 2014. Vol. 2014. P. 489090-1 – 489090-12. <https://doi.org/10.1155/2014/489090>.
16. Sun L., Shi G., Li M., Jin J. Field tests and three-dimensional semi-analytical boundary element method analysis of a row of holes as active barrier in saturated soil. *J. Test. Eval.* 2021. Vol. 49. Iss. 1. P. 60–81. DOI: 10.1520/JTE20200248.
17. Li P., Schanz M. Time domain boundary element formulation for partially saturated poroelasticity. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2013. Vol. 37. Iss. 11. P. 1483–1498. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2013.08.002>.
18. Igumnov L.A., Petrov A.N., Belov A.A., Mironov A.A., Lyubimov A.K., Dianov D.Yu. Numerically-analytically studying fundamental solutions of 3-D dynamics of partially saturated poroelastic bodies. *Materials Physics and Mechanics*. 2019. Vol. 42. Iss. 5. P. 596–601. DOI: 10.18720/MPM.4252019_12.
19. Ugodchikov A.G., Khutoryansky N.M. *Metod granichnykh elementov v mekhanike deformiruemogo tverdogo tela [The Method of Boundary Elements in the Mechanics of a Deformable Solid]*. Kazan. Publishing House of the Kazan University. 1986. 295 p. (In Russian).
20. Goldshteyn R.V. K voprosu o primenenii metoda granichnykh integralnykh uravneniy dlya resheniya zadach mekhaniki sploshnykh sred [On the application of the method of boundary integral equations for solving problems of continuum mechanics]. V kn.: *Metod granichnykh integralnykh uravneniy: Vychislitelnye aspekty i prilozheniya v mekhanike (Mekhanika: novoe*

v zarubezhnoy nauke) [In: *Method of Boundary Integral Equations: Computational Aspects and Applications in Mechanics (Mechanics: New in Foreign Science)*]. Moscow. Mir Publ. 1978. P. 183–209 (In Russian).

21. Lubich C. Convolution quadrature and discretized operational calculus. I. *Numerische Mathematik*. 1988. Vol. 52. Iss. 2. P. 129–145. DOI: 10.1007/BF01398686.

22. Lubich C. Convolution quadrature and discretized operational calculus. II. *Numerische Mathematik*. 1988. Vol. 52. Iss. 4. P. 413–425. DOI: 10.1007/BF01462237.

**BOUNDARY ELEMENT MODELING AND ANALYSIS
OF THE INTERACTION OF A VERTICAL BARRIER
WITH SURFACE WAVES IN A POROELASTIC FORMULATION***

Petrov A.N., Belov A.A., Litvinchuk S.Yu.

*National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,
Nizhny Novgorod, Russian Federation*

andrey.petrov@mech.unn.ru

Received by the Editor 2024/07/11

The paper studies the possibility of attenuating the wave intensity on the surface of a half-space by installing a barrier based on the solution of a three-dimensional problem of the dynamic theory of partially saturated poroelasticity using the boundary element method. The basic idea of using a wave barrier is to create an obstacle to the propagation of surface waves over the territory occupied by structures or constructions. Open or unfilled trenches can be effective when organizing this method of protection. In the paper, numerical modeling is performed using the boundary element method based on the combined use of boundary integral equations of the direct approach of the three-dimensional isotropic theory of poroelasticity and the integral Laplace transform. To describe the poroelastic medium, the Biot model of a poroelastic material in the case of partial saturation is used. The solution in the time domain is obtained using a method based on quadrature formulas for calculating the convolution integral and referred to hereinafter as the step method. The problem of the action of a dynamic load on a deformable partially saturated poroelastic half-space with a vertical barrier in the form of a trench is considered. To assess the efficiency of wave damping by a barrier on the surface of a half-space, the amplitude reduction factor is calculated for different values of the saturation coefficient of the poroelastic material of the half-space, geometric dimensions of the barrier and boundary conditions. Graphs and maps of the amplitude reduction factor are provided. The simulation results show that the presence of a barrier in the form of a trench leads to a decrease in the Rayleigh wave amplitude at points located behind the trench, for all considered values of the parameters under study. It is also shown that the condition of permeability or impermeability of the trench boundary does not have a noticeable effect on its properties in reducing the intensity of surface waves. The results obtained can be useful for developing effective methods for protecting buildings and structures from dynamic effects.

Keywords: Biot model, partially saturated poroelastic material, half-space, surface wave, wave barrier, open trench, boundary element method, Laplace transform.

*The research was supported by the Russian Science Foundation (project No 22-19-00138).