

УДК 624.159.1

DOI 10.52928/2070-1683-2024-39-4-33-39

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНСТРУКЦИИ ВЕРТИКАЛЬНОГО БАРЬЕРА В ВИДЕ ОТКРЫТОЙ ТРАНШЕИ С КРЕПЛЕНИЕМ СТЕНОК ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВИБРАЦИЙ, РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ В ГРУНТОВОЙ СРЕДЕ

канд. техн. наук, доц. К.Э. ПОВКОЛАС, О.А. ШАВЛОВСКАЯ
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Рассматривается эффективность использования открытой траншеи без заполнения шириной 1 м с креплением ее стенок для демпфирования колебаний, распространяющихся в грунтовой среде, от точечного источника вибродинамических воздействий. Сформирована математическая модель на основе метода конечных элементов. Для равных физико-механических свойств грунта смоделировано 3 расчетных схемы: в виде свободного распространения колебаний в грунтовой среде без препятствий, в виде открытой траншеи с креплением ее стенок 2-мя заземленными подпорными плитными стенками и с дополнительным креплением в виде наклонных анкерных свай для большей глубины траншеи. По результатам расчетов выявлено, что устройство открытой траншеи на пути распространения волн с креплением ее стенок обеспечивает снижение величин вертикальных амплитуд колебаний поверхности грунта за ней на расстояние, равное двум длинам поверхностной волны. Наибольшее снижение амплитуд колебаний отмечается непосредственно за открытой траншеей на расстоянии, равном 15–30% от длины поверхностной волны. Оно достигает 43% для варианта крепления стенок траншеи вертикальными заземленными подпорными конструкциями и 73% для варианта крепления стенок открытой траншеи большей глубины дополнительными наклонными анкерными сваями.

Ключевые слова: вибродинамические воздействия, грунтовая среда, барьер, траншея, виброизоляция, расчет, конечные элементы.

Введение. Наличие развитой транспортной сети и промышленных зон в городах приводит к появлению вблизи них вибрационных полей за счет волн, распространяющихся в грунтовой среде. Вносит значительный вклад и производство строительных работ (забивка и вибропогружение свай и шпунта, виброуплотнение грунтов) в условиях стесненной городской застройки. Колебания оказывают негативное влияние на людей, высокоточное оборудование и конструкции строений, ускоряя их физический износ и вызывая образование дефектов и повреждений. Они распространяются в грунтовой среде в виде продольных, поперечных и поверхностных (Рэлеевских) волн, последние из которых оказывают наибольшее влияние на здания и сооружения. Достигая грунтовых оснований фундаментов строений, они вызывают их дополнительные неравномерные динамические осадки за счет виброуплотнения и виброползучести грунта, которые приводят к появлению дополнительных напряжений в наземных конструкциях и, как следствие, к образованию трещин.

Для оценки вероятного повреждения строений при прохождении поверхностных волн в настоящее время в основном используют эмпирический подход, суть которого заключается в сравнении пиковой величины скорости колебаний с предельной величиной, которая отличается в нормах различных стран и зависит от частоты вынужденных колебаний, инженерно-геологических условий, конструктивной схемы строений и наличия повреждений. В Германии, Норвегии и Великобритании нормируется скорость вертикальных колебаний фундамента строения, в Беларуси и США – скорость колебания грунта перед фундаментом. Кроме этого, автором предложен новый подход [1] в оценке повреждения конструкций, который заключается в определении суммарных (динамических и статических) неравномерных осадок фундаментов и сравнении их с предельными величинами по технико-нормативным правовым актам, или расчете строительных конструкций на основании силовых факторов, полученных в ходе прямого статического и динамического анализа конструкций. В данной методике расчета величина максимального ускорения колебаний грунта под подошвой фундамента сравнивается с критическим ускорением колебаний, при котором начинают развиваться сдвиговые и объемные деформации грунта. При этом предполагается, что уплотнение грунта под подошвой фундамента происходит до его предельно плотного состояния. Получить величину критического ускорения колебаний можно путем испытаний в виброкомпрессионном приборе. Для ориентировочного назначения этой величины можно воспользоваться данными приложения Д¹.

Для снижения этих воздействий используют виброизоляцию источника, приемника колебаний или преобразование грунтовой среды между ними. В случае невозможности виброизоляции источника или приемника колебаний используют устройство барьеров между ними в грунтовой среде.

Одним из направлений виброизоляции является устройство вертикального барьера на пути распространения поверхностных волн в виде траншеи, открытой или заполненной материалами, имеющими физико-механические свойства, отличные от грунтовой среды. В качестве материала заполнения траншей наиболее часто используют геоплену EPS [2; 3], резе – древесные опилки и резиновую крошку [4], газонаполненные баллоны под давлением [5] и бетон [6]. Наиболее эффективным считается устройство открытых траншей без заполнения. Исследования их эффективности проводились экспериментально на натурных моделях в середине 60-х годов прошлого века [7]

¹ ТКП 45-5.01-264-2012. Основания и фундаменты зданий и сооружений. Фундаменты при вибродинамических воздействиях. Правила проектирования. – Минск: Стройтехном, 2012. – 114 с.

и в настоящее время продолжают уже теоретически, на основании численного моделирования [8]. На практике открытые траншеи во многих случаях не применимы в течение длительного времени из-за проблем с обеспечением устойчивости их стенок. Кроме того, эффективность экранирования снижается при высоком уровне грунтовых вод, когда траншея частично затоплена и отсутствует возможность водопонижения. Временное использование открытых траншей вполне приемлемо при производстве строительных работ по забивке свай, вибропогружению и виброизвлечению стального шпунта, вибротрамбовке и ударному уплотнению грунта.

Устойчивость стенок траншеи определяется величинами удельного сцепления, угла внутреннего трения и удельного веса грунта. Определяющей величиной является удельное сцепление. Глубина траншеи h , при отсутствии пригрузки на прилегающей поверхности грунта, при которой обеспечивается устойчивость стенок скважины, определяется по следующей формуле механики грунтов, исходя из предположения о потере устойчивости грунта с его смещением по плоской поверхности скольжения:

$$h = \frac{c \cdot (1 - \lambda_a)}{\gamma \cdot \lambda_a \cdot \operatorname{tg} \varphi}, \quad (1)$$

где γ – осредненный по слоям удельный вес грунта в пределах глубины скважины h ;
 φ – угол внутреннего трения;
 c – удельное сцепление;
 λ_a – коэффициент активного давления грунта, определяемый по следующей формуле:

$$\lambda_a = \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right).$$

К примеру, ориентировочные значения глубины траншеи h , вычисленные по формуле (1) для характеристик грунтов четвертичных отложений, при которой ее стенки сохраняют устойчивость, составят:

- для песка пылеватого (коэффициент пористости $e = 0,45$; $\varphi = 36^\circ$; $c = 8$ кПа; $\gamma = 18$ кН/м³) – $h = 1,74$ м;
- для супеси пластичной ($e = 0,45$; $\varphi = 28^\circ$; $c = 19$ кПа; $\gamma = 19$ кН/м³) – $h = 3,33$ м;
- для суглинка полутвердого ($e = 0,45$; $\varphi = 26^\circ$; $c = 47$ кПа; $\gamma = 19$ кН/м³) – $h = 7,9$ м;
- для глины полутвердой ($e = 0,55$; $\varphi = 21^\circ$; $c = 81$ кПа; $\gamma = 19$ кН/м³) – $h = 12,4$ м.

Согласно данным [4; 8], эффективной считается глубина барьера h не менее длины поверхностной (Рэлеевской) волны L_R .

Скорости распространения продольных V_p , поперечных V_s волн в исходной грунтовой среде определялись по общеизвестным формулам теории упругости:

$$V_p = \sqrt{\frac{E \cdot (1 - \mu)}{\rho \cdot (1 + \mu) \cdot (1 - 2 \cdot \mu)}}; \quad (2)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{\rho \cdot 2 \cdot (1 + \mu)}}. \quad (3)$$

Скорость Рэлеевской волны V_R определяется по приближенной формуле Бергманна-Викторова

$$V_R = \frac{0,87 + 1,12 \cdot \mu}{1 + \mu} \cdot V_s, \quad (4)$$

где E , μ и ρ – соответственно динамический модуль упругости, коэффициент Пуассона и плотность грунта.
 Длина Рэлеевской волны L_R определяется по формуле

$$L_R = \frac{V_R}{f}, \quad (5)$$

где f – техническая частота колебаний, Гц.

Скорости распространения волн в грунте составили: продольной $V_p = 344,6$ м/с; поперечной $V_s = 184$ м/с; Рэлеевской $V_R = 171$ м/с. Соответствующие им длины волн: продольной $L_p = 13,78$ м; поперечной $L_s = 7,36$ м; Рэлеевской $L_R = 6,84$ м. Коэффициент относительного демпфирования ξ принят равным 0,05. Сравнение времени распространения волн, вычисленных при помощи приведенных формул и определенных при помощи конечных элементов, показало их полную сходимость.

Эффективная глубина барьера h должна быть не менее L_R [4; 8].

В случае длительной эксплуатации барьера в виде открытой траншеи или недостаточности ее глубины h для достижения требуемого эффекта виброизоляции необходимо обеспечить устойчивость ее стенок. Достигнуть этого возможно путем устройства специального крепления стенок траншеи без распорок, соединяющих противоположные стенки траншей.

Цель данной работы – оценка эффективности вертикального виброизоляционного барьера в виде открытой траншеи с креплением ее стенок, путем математического моделирования на основании метода конечных элементов.

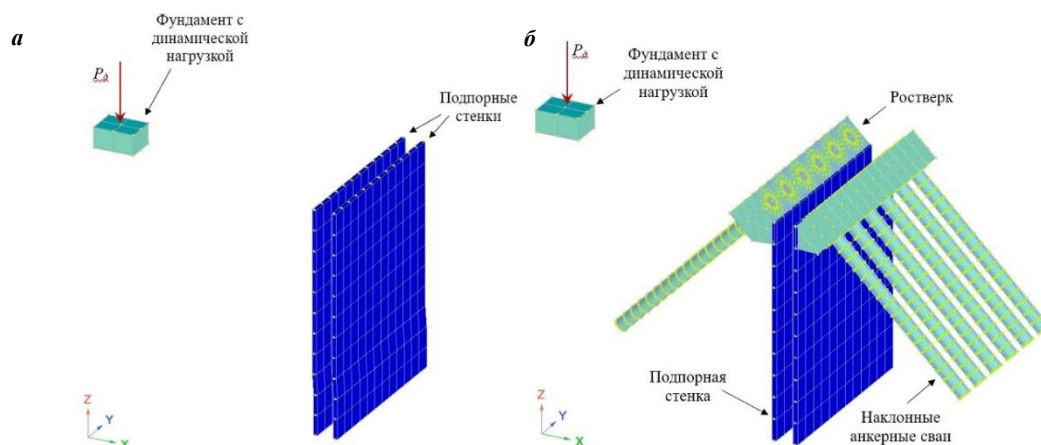
Для достижения указанной цели в рамках данной работы решены следующие задачи:

- выполнено численное моделирование методом конечных элементов вертикального барьера в виде открытой траншеи с двумя вариантами крепления ее стенок: из 2-х защемленных подпорных стенок без анкерного крепления и с дополнительным креплением наклонными анкерными сваями;
- проведен сравнительный анализ эффективности применения указанных вариантов крепления по сравнению со свободным распространением волн без препятствий.

Численное моделирование виброотсечных барьеров. Ввиду отсутствия возможности получения замкнутых аналитических решений, анализ эффективности грунтовой изоляции выполнен путем численного моделирования на основе метода конечных элементов на следующем примере.

Источник вибродинамических воздействий генерирует ударный импульс по железобетонному фундаменту размерами в плане 2*2 м толщиной 1 м в виде полуволны синусоиды с вертикальным приложением динамической нагрузки с амплитудой $P_d = 1000$ кН длительностью 0,02 с, что соответствует частоте 25 Гц. Вертикальная ось симметрии траншеи шириной 1 м расположена на расстоянии 12,5 м от точки приложения динамической нагрузки. Расчет выполнен в конечно-элементном расчетном комплексе Lira 10.8 с использованием конечных элементов, моделирующих упругое инерционное полупространство. Время интегрирования 0,3 сек. Шаг интегрирования 0,001 сек. Для исключения отражения волн от боковых и нижней границ массива применялся конечный элемент «неотражаемые границы». На рисунке 1 приводятся фрагменты расчетных схем, показывающие взаимное расположение источника вибрации и барьеров в виде траншей с креплением. Рассмотрено 3 расчетных схемы:

- 1 схема – свободное распространение колебаний в грунтовой среде без препятствий;
- 2 схема – распространение колебаний при наличии защемленных подпорных стен без анкерного крепления (см. рисунок 1, а);
- 3 схема – распространение колебаний при наличии защемленных подпорных стен с анкерным креплением (см. рисунок 1, б).



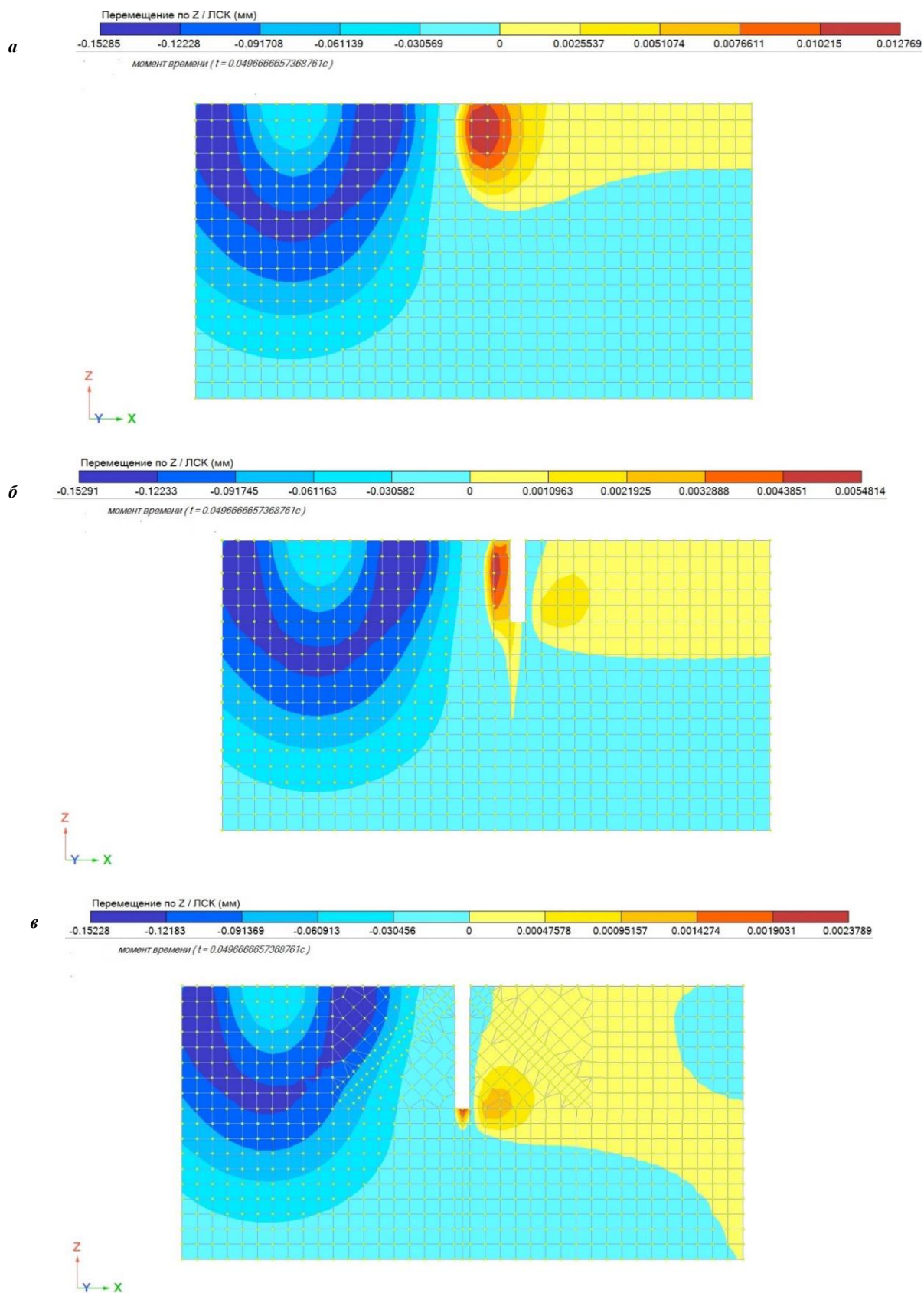
а – крепление траншеи глубиной 5 м с защемленными подпорными стенками высотой 10,6 м и толщиной 200 мм без анкерного крепления; **б** – крепление траншеи глубиной 8,13 м с защемленными подпорными стенками длиной 11,13 м толщиной 200 мм с креплением наклонными железобетонными сваями длиной 10 м и диаметром 400 мм

Рисунок 1. – Взаимное расположение конструкций крепления траншеи и фундамента с динамической нагрузкой

Расстояние от точки приложения нагрузки до ближайшей подпорной стенки составляет 12 м. Бетон конструкций принят класса С25/30. Грунт представляет из себя средний песок средней прочности со следующими физико-механическими свойствами: удельный вес грунта $\gamma = 18$ кН/м³; коэффициент пористости в природном сложении $e = 0,65$; динамический модуль упругости $E_d = 150$ МПа; модуль общей деформации $E_o = 15$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$; угол внутреннего трения $\varphi = 25^\circ$; удельное сцепление $c = 1$ кПа.

Расчеты показывают, что устойчивость подпорной стенки без анкерного крепления (см. рисунок 1, а) обеспечивается при глубине траншеи $h = 5$ м ($0,73 L_R$), с креплением наклонными анкерами (см. рисунок 1, б) – при глубине $h = 8,13$ м ($1,19 L_R$).

На рисунке 2 показаны изополя вертикальных динамических амплитуд перемещений при прохождении волны через место расположения барьеров спустя 0,0497 сек. после приложения динамической нагрузки в источнике при свободном распространении (см. рисунок 2, а), наличии барьеров с 2-мя подпорными стенками (см. рисунок 2, б) с глубиной траншеи 5 м и дополнительным креплением анкерными сваями (см. рисунок 2, в) с глубиной траншеи 8,13 м.

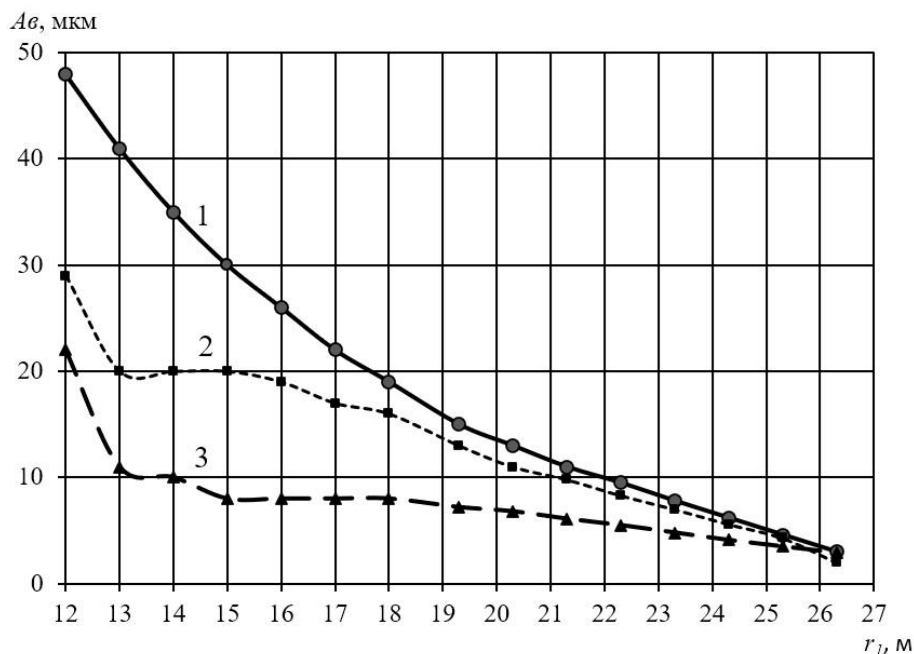


а – при свободном распространении (схема 1); **б** – при наличии барьера с 2-мя подпорными стенками с глубиной траншеи 5 м (схема 2); **в** – дополнительным креплением анкерными сваями с глубиной траншеи 8,13 м (схема 3)

Рисунок 2. – Изополя вертикальных динамических перемещений при прохождении волны через место расположения барьеров спустя 0,0497 сек. после приложения динамической нагрузки в источнике (вертикальный разрез расчетной схемы)

Анализ результатов расчетов. Из представленных на рисунке 2 данных следует, что при прохождении поверхностной волны через барьеры происходит ее искажение, сопровождающееся значительным уменьшением амплитуд вертикальных колебаний за ними. Наибольший эффект демпфирования наблюдается при использовании варианта крепления с большей глубиной траншеи (см. схему 3, рисунок 1, б; рисунок 2, в). Спектральный анализ колебаний показывает, что частота колебаний также изменяется с ростом расстояния от их источника. В зоне виброизоляции за подпорной стенкой доминирующие частоты колебаний грунта на поверхности массива составляют 12,5–14 Гц для расчетной схемы 1; 11–12,5 Гц для расчетной схемы 2 и 10–12 Гц для расчетной схемы 3.

На рисунке 3 приводятся зависимости вертикальных колебаний A_e поверхности грунтового массива от расстояния r_l от источника колебаний начиная с 12 м от точки приложения динамической нагрузки, что соответствует положению верха конструкции крепления, ближайшей к источнику колебаний.



- 1 – по схеме 1 (свободное распространение колебаний в грунтовой среде без препятствий);
 2 – по схеме 2 (распространение колебаний при наличии защемленных подпорных стен без анкерного крепления);
 3 – по схеме 3 (распространение колебаний при наличии защемленных подпорных стен с анкерным креплением)

Рисунок 3. – Зависимость амплитуды вертикальных колебаний A_e на поверхности грунтового массива от расстояния r_l от точки приложения динамической нагрузки

Для более наглядного отображения относительного демпфирования колебаний воспользуемся представлением данных в виде относительного снижения колебаний.

Для определения относительного снижения максимальных вертикальных амплитуд смещений A_e поверхности грунта за барьером от относительного расстояния r_2/L_R от оси стенки барьера, обращенной к источнику вибраций, в направлении их распространения, введем коэффициент относительного снижения амплитуды A_{omn} , который определяется по формуле:

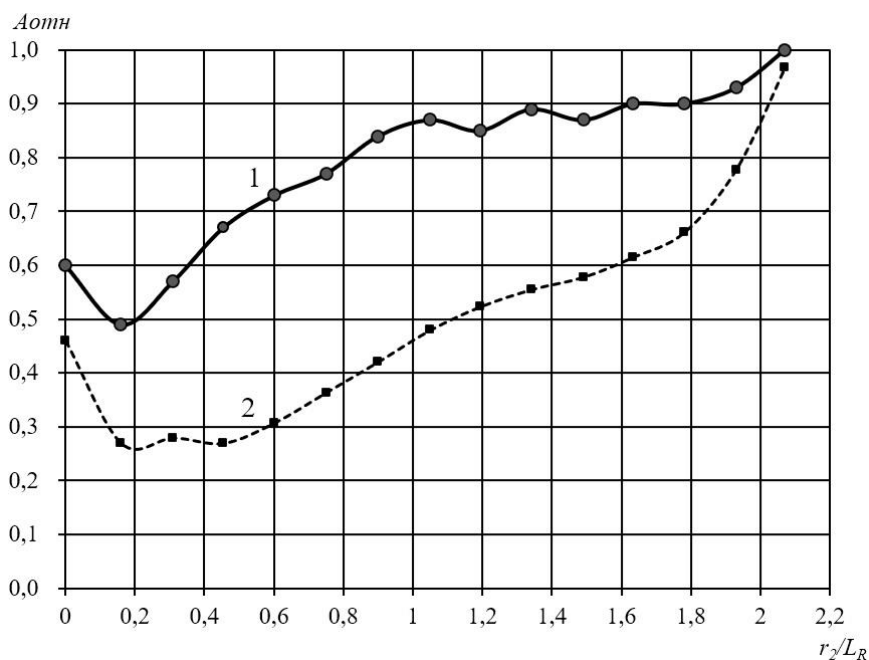
$$A_{omn} = \frac{A(r)_{after}}{A(r)_{before}}, \quad (6)$$

где $A(r)_{after}$ – максимальная амплитуда вертикальных амплитуд смещений A_e поверхности грунта за барьером на расстоянии r от точки приложения динамической нагрузки после его устройства;

$A(r)_{before}$ – снижения максимальных вертикальных амплитуд смещений A_e поверхности грунта за барьером на расстоянии r от точки приложения динамической нагрузки до его устройства.

r_2 – расстояние от оси стенки барьера, обращенной к источнику вибраций, в направлении их распространения за барьером.

Зависимость $A_{omn} = f(r_2/L_R)$ представлена на рисунке 4.



- 1 – по схеме 2 (распространение колебаний при наличии защемленных подпорных стен без анкерного крепления);
2 – по схеме 3 (распространение колебаний при наличии защемленных подпорных стен с анкерным креплением)

Рисунок 4. – Зависимость $A_{отн} = f(r_2/L_R)$

Из представленных на рисунке 3 и 4 данных следует, что использование открытой траншеи с креплением ее стенок обеспечивает снижение величин вертикальных амплитуд колебаний поверхности грунта за ней на расстоянии, равное $2 L_R$. На больших расстояниях эффект демпфирования колебаний исчезает. Этот факт также отмечается в исследовании [8]. Наибольший эффект демпфирования колебаний наблюдается на расстоянии $(0,15-0,3) L_R$, непосредственно за траншеей, и достигает 43% для варианта крепления по схеме 2 с глубиной траншеи, равной 5 м ($0,73 L_R$), и 73% для варианта крепления по схеме 3 с глубиной траншеи равной $8,13 \text{ м}$ ($1,19 L_R$). Можно достоверно утверждать, что дальнейшее увеличение глубины траншеи повысит эффект демпфирования, но при этом требуется вводить дополнительные элементы крепления подпорных стенок траншеи для обеспечения их прочности и устойчивости. К примеру, при строительстве станции метро «Юбилейная» в г. Минск (Беларусь) глубина строительного котлована с подпорными стенами, выполненными методом «стена в грунте», и многоярусным креплением преднапрягаемыми анкерами с канатными тягами составила $29,375 \text{ м}$ при глубине подпорных стен 36 м .

Заключение. На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. Введение в грунтовую среду на пути распространения колебаний открытой траншеи с креплением ее стенок обеспечивает снижение величин вертикальных амплитуд колебаний поверхности грунта за ней на расстоянии, равное $2 L_R$. На больших расстояниях эффект демпфирования колебаний исчезает.

2. Наибольшее снижение амплитуд вертикальных колебаний поверхности грунтового массива происходит непосредственно за открытой траншеей на расстоянии, равном $(0,15-0,3) L_R$. Оно достигает 43% для варианта крепления стенок вертикальными защемленными подпорными стенками с глубиной траншеи, равной $0,73 L_R$, и 73% для варианта крепления ее стенок дополнительно наклонными анкерными сваями с глубиной траншеи равной $1,19 L_R$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Повколас К.Э. Методика расчета дополнительных динамических осадок оснований плитных фундаментов зданий и сооружений от вибраций, распространяющихся в грунтовой среде // Наука и техника. – 2024. – Т. 23, № 1. – С. 46–57. DOI: 10.21122/2227-1031-2024-23-1-46-57.
2. Alzawi A., Hesham El Naggat M. Full Scale Experimental Study on Vibration Scattering Using Open and In-filled (Geofoam) Wave Barriers // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2011. – Vol. 31, № 3. – P. 306–317. DOI: 10.1016/j.soildyn.2010.08.010.
3. Naghizadehrokni M., Ziegler M., Sprengel J. A full Experimental and Numerical Modelling of the Practicability of thin Foam Barrier as Vibration Reduction Measure // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2020. – Vol. 139. DOI: 10.1016/j.soildyn.2020.106416.
4. Numerical evaluation of tire chips-filled trench barriers for effective vibration isolation / K. Tandon, D. Kumar, R. Ayothiraman et al. // Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control. – 2023. – Vol. 42(1). – P. 325–344. DOI: 10.1177/14613484221118998.
5. Массарш К.Р. Виброизоляция с использованием газонаполненных подушек // Развитие городов и геотехническое строительство. – 2006. – № 10. – С. 176–191.

6. Кузнецов С.В., Нафасов А.Э. Горизонтальные сейсмические барьеры для защиты от сейсмических волн // Вестн. МГСУ. – 2010. – Вып. 4. – С. 131–134.
7. Woods R.D. Screening of surface waves in soils // J. Soil Mech. Found. Div., ASCE. – 1968. – Vol. 94. – P. 951–977.
8. Efficiency of Open and Infill Trenches in Mitigating Ground-Borne Vibrations / T. Bose, D. Choudhury, J. Sprengel et al. // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. – 2018. – № 144(8). DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001915.

REFERENCES

1. Povkolas, K.E. (2024). Metodika rascheta dopolnitel'nykh dinamicheskikh osadok osnovanii plitnykh fundamentov zdaniy i sooruzhenii ot vibratsii, rasprostranyayushchikhsya v gruntovoi srede [Methodology for Calculating Additional Dynamic Settlements of the Bases of Slab Foundations of Buildings and Structures from Vibrations Propagating in the Soil Environment]. *Nauka i tekhnika [Science & Technique]*, 23(1), 46–57. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.21122/2227-1031-2024-23-1-46-57.
2. Alzawi, A. & Hesham El Naggat, M. (2011). Full Scale Experimental Study on Vibration Scattering Using Open and In-filled (Geofoam) Wave Barriers. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(3), 306–317. DOI: 10.1016/j.soildyn.2010.08.010.
3. Naghizadehroki, M., Ziegler, M. & Sprengel, J. (2020). A full Experimental and Numerical Modelling of the Practicability of thin Foam Barrier as Vibration Reduction Measure. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, (139). DOI: 10.1016/j.soildyn.2020.106416.
4. Tandon, K., Kumar, D., Ayothiraman, R., Manna, B., & Ramana, G.V. (2023). Numerical evaluation of tire chips-filled trench barriers for effective vibration isolation. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 42(1), 325–344. DOI: 10.1177/14613484221118998.
5. Massarch, K.R. (2006). Vibroizolyatsiya s ispol'zovaniem gazonapolnennykh podushek. *Razvitie gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo*, (10), 176–191. (In Russ.).
6. Kuznetsov, S.V. & Nafasov, A.E. (2010). Gorizontallye seismicheskie bar'ery dlya zashchity ot seismicheskikh voln [Horizontal seismic barriers for protection from seismic waves]. *Vestn. MGSU [Vestnik MGSU]*, (4), 131–134. (In Russ., abstr. in Engl.).
7. Woods, R.D. (1968). Screening of surface waves in soils. *J. Soil Mech. Found. Div., ASCE*, (94), 951–977.
8. Bose, T., Choudhury, D., Sprengel, J. & Ziegler, M. (2018). Efficiency of Open and Infill Trenches in Mitigating Ground-Borne Vibrations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 144(8). DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001915.

Поступила 05.11.2024

**ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF THE VERTICAL BARRIER DESIGN
IN THE FORM OF AN OPEN TRENCH WITH FASTENING OF WALLS
TO REDUCE VIBRATIONS PROPAGATION IN THE GROUND ENVIRONMENT**

K. POVKOLAS, O. SHAULOUSKAYA
(Belarusian National Technical University, Minsk)

The article considers the efficiency of using an open trench without filling, 1 m wide, with fastening of its walls for damping vibrations propagating in the soil environment from a point source of vibrodynamic effects. A mathematical model is formed based on the finite element method. For equal physical and mechanical properties of the soil, 3 calculation schemes are modeled: in the form of free propagation of vibrations in the soil environment without obstacles, in the form of an open trench with fastening of its walls by 2 clamped retaining slab walls and with additional fastening in the form of inclined anchor piles for a greater trench depth. According to the calculation results, it was revealed that the device of an open trench in the path of wave propagation with fastening of its walls ensures a decrease in the values of vertical amplitudes of soil surface vibrations behind it at a distance equal to two lengths of the surface wave. The greatest decrease in vibration amplitudes is noted directly behind the open trench at a distance equal to 15–30% of the length of the surface wave. It reaches 43% for the option of fastening the trench walls with vertical clamped retaining structures and 73% for the option of fastening the walls of an open trench of greater depth with additional inclined anchor piles.

Keywords: vibrodynamic effects, soil environment, barrier, trench, vibration isolation, calculation, finite elements.