

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2026-25-2-132-140>

УДК 624.131.552.4

Основные факторы, определяющие эффективность вертикальных барьеров для снижения вибраций, распространяющихся в грунтовой среде

Канд. техн. наук К. Э. Повколас¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. Устройство вертикального барьера на пути распространения поверхностных волн в грунте в виде открытой или заполненной различными материалами траншеи считается эффективным направлением виброизоляции от действия взрывных, сейсмических, промышленных и транспортных вибродинамических воздействий. В данной работе на основе метода конечных элементов выполнено численное моделирование распространения динамических волн в грунте с устройством вертикального волнового барьера на пути их распространения. Грунтовая среда рассматривалась как пространственный упругий инерционный массив с заданным демпфированием колебаний по теории Рэлея, ограниченный неотражающими границами. Динамическая нагрузка задавалась в виде синусоиды. Изучалось изменение параметров колебаний поверхности за барьером в зависимости от материала последнего. Результаты расчетов представлены в безразмерных величинах для геометрических параметров барьера и его динамических свойств. Выявлено, что основным параметром, определяющим эффективность виброизоляции, является динамический модуль упругости материала барьера. Его увеличение или уменьшение по отношению к модулю упругости грунта приводит к снижению колебаний за барьером в направлении распространения динамических волн в грунте. Получены формулы, описывающие относительное снижение колебаний грунта за барьером в зависимости от коэффициента относительного снижения динамического модуля упругости материала барьера. Наиболее эффективным вариантом является композитная конструкция, состоящая из чередующихся слоев материалов с наибольшим и наименьшим по отношению к окружающему грунту динамическими модулями упругости. Снижение амплитуд колебаний грунта за барьером для данной композитной конструкции достигает 87,7 % при глубине барьера, равной длине волны Рэлея.

Ключевые слова: грунтовая среда, вибрации, здания, сооружения, виброизоляция, вертикальный барьер

Для цитирования: Повколас, К. Э. Основные факторы, определяющие эффективность вертикальных барьеров для снижения вибраций, распространяющихся в грунтовой среде / К. Э. Повколас // *Наука и техника*. 2026. Т. 25, № 2. С. 132–140. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2026-25-2-132-140>

Main Factors Determining the Effectiveness of Vertical Barriers in Reducing Vibrations Propagating through the Soil

К. Е. Povkolas¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The installation of a vertical barrier in the path of surface wave propagation in soil, in the form of an open trench or a trench filled with various materials is considered an effective method of vibration isolation against explosive, seismic, industrial, and transportation-induced vibrational impacts. In this work, based on the finite element method, numerical

Адрес для переписки

Повколас Константин Эдуардович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 29 622-80-36
povkolas@bntu.by

Address for correspondence

Povkolas Konstantin E.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 29 622-80-36
povkolas@bntu.by

modeling of dynamic wave propagation in soil with a vertical wave barrier in their path was performed. The soil medium was considered as a spatial elastic inertial array with a specified damping of oscillations according to Rayleigh theory, limited by non-reflective boundaries. The dynamic load was applied in the form of a sinusoid. The change in surface vibration parameters behind the barrier was studied depending on the material of the latter. The calculation results are presented in dimensionless quantities for the geometric parameters of the barrier and its dynamic properties. It has been found that the main parameter of the barrier material determining the effectiveness of vibration isolation is the dynamic modulus of elasticity of the barrier material. Its increase or decrease in relation to the elastic modulus of the soil leads to a reduction in vibrations behind the barrier in the direction of propagation of dynamic waves in the soil. Formulas have been obtained describing the relative reduction of soil vibrations behind the barrier depending on the coefficient of relative reduction in the dynamic modulus of elasticity of the barrier material. The most effective option is a composite structure consisting of alternating layers of materials with the highest and lowest dynamic moduli of elasticity relative to the surrounding soil. The reduction of vibration amplitudes in the soil behind the barrier for this composite structure reaches 87.7 % at a barrier depth equal to the Rayleigh wave length.

Keywords: soil environment, vibrations, buildings, structures, vibration insulation, vertical barrier

For citation: Povkolos K. E. (2026) Main Factors Determining the Effectiveness of Vertical Barriers in Reducing Vibrations Propagating through the Soil. *Science and Technique*. 25 (2), 132–140 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2026-25-2-132-140>

Введение

Развитие транспортной инфраструктуры и промышленности приводит к росту интенсивности вибродинамических воздействий, распространяющихся в грунтовой среде. Значительный вклад вносит производство строительных работ (забивка и вибропогружение свай и шпунта, уплотнение грунтов) в условиях стесненной застройки. Вибрации оказывают негативное влияние на высокоточное оборудование, людей и конструкции зданий и сооружений, ускоряя процессы их физического износа и вызывая неравномерные осадки оснований фундаментов. Колебания распространяются в виде продольных, поперечных и поверхностных (Рэлея) волн, последние из которых обладают наибольшей кинетической энергией в приповерхностной зоне грунтового массива. Для уменьшения их влияния используют виброизоляцию источника, приемника колебаний или среды их распространения.

Перспективным направлением виброизоляции от действия взрывных, сейсмических, промышленных и транспортных вибродинамических воздействий является устройство барьера на пути распространения поверхностных волн в виде открытой или заполненной различными материалами траншеи.

В одном из первых исследований [1] проведена серия полевых экспериментов по оценке эффективности открытых траншей в качестве волновых барьеров для активной (при расположении барьера вблизи источника колебаний) и пассивной (при размещении барьера вблизи приемника колебаний) изоляции. По результа-

там исследований сделан вывод о том, что для снижения амплитуд вертикальных колебаний на 75 % минимальная глубина траншеи должна составлять: $0,6L_R$ (L_R – длина поверхностной волны Рэлея) – для активной изоляции; $1,33L_R$ – для пассивной изоляции. В работе [2] отмечается, что для достижения приемлемого уровня эффективности активной виброизоляции глубина и ширина барьера должны составлять соответственно $1,0L_R$ и $0,2L_R$. Натурное применение барьера для экранирования вибраций, вызванных движением поездов [3], показало, что глубина барьера $1,0L_R$ является достаточной для достижения наивысшего значения эффективности. Дальнейшее увеличение глубины не влияет на эффективность виброизоляции. В работе [4] отмечено, что оптимальная глубина барьера с геопеной составляет $1,0L_R$, ширина – $0,25L_R$ для одинарных стен, для двойных (расположенных последовательно друг за другом) соответственно $1,5L_R$ и $0,2L_R$. Двойные барьеры более эффективны, чем одинарные. В работе [5], основанной на численном моделировании динамических процессов, отмечается, что эффект виброизоляции начинается с относительной глубины траншеи, равной $0,6L_R$, и продолжает увеличиваться при превышении величины, равной $1,0L_R$. Открытые траншеи и траншеи, заполненные древесными опилками, демонстрируют примерно одинаковую эффективность виброизоляции. Траншеи из геопены и засыпанные стружкой из резиновых шин также демонстрируют одинаковую эффективность изоляции, которая достигает 65 %. В экспериментальном исследовании [6] отмечается,

что эффективность экранирования открытых и пенопластовых волновых барьеров была значительно выше, чем в заполненных водой траншеях. В [7] проведен полномасштабный полевой эксперимент по изучению эффективности траншеи, заполненной песчано-резиновой смесью, на основании которого для достижения снижения вибраций на 60–70 % рекомендована относительная глубина траншеи $1,5L_R$. Многие исследователи [8–14] рассматривали в качестве заполнения барьера древесные опилки. Они доказали, что опилки являются наиболее эффективным материалом для демпфирования поверхностных волн. В [15] рассматриваются барьеры в виде открытой траншеи с заполнением угольной золой, пенополистиролом и водой. Отмечено, что эффективность открытых траншей намного выше, чем всех заполненных.

Анализ результатов натурных и численных исследований позволяет сделать следующие выводы:

1) длина поверхностной волны L_R является основным параметром, относительно которого оценивают эффективность принятых геометрических размеров виброизоляционного барьера. Глубина барьера является главным фактором, определяющим эффективность виброизоляции. Ощутимый эффект виброизоляции в виде снижения амплитуд колебаний за барьером на 65–75 % достигается при его глубине $1,0L_R$;

2) наиболее эффективным вариантом барьера является открытая траншея. Затем следуют траншеи с заполнением различными легкосжимаемыми легкими материалами – древесными опилками, геопеной (пенополистиролом), измельченной резиновой стружкой и баллонами под давлением. Из дешевых доступных материалов наиболее эффективным являются древесные опилки.

В работе [16] выполнен сравнительный анализ эффективности барьера из соприкасающихся скважин, заполненных различными материалами (вода, геопена, резиновая крошка, древесные опилки, бетон) и обсаженных несколькими способами (стеклопластиковыми, стальными трубами, газонаполненными баллонами под давлением) с глубиной, равной $1,0L_R$. Снижение амплитуд вертикальных колебаний грунта за барьерами, заполненными данными матери-

алами, в направлении распространения волн достигает 80 % при их глубине, равной длине волны Рэлея. В результате численного моделирования выявлено, что способы виброизоляции в порядке возрастания их эффективности располагаются следующим образом:

- 1) заполнение скважин резиновой крошкой;
- 2) заполнение скважин геопеной;
- 3) обсадка скважин металлическими трубами;
- 4) обсадка скважин стеклопластиковыми трубами;
- 5) заполнение бетоном;
- 6) заливка водой;
- 7) заполнение скважин древесными опилками;
- 8) обсадка скважин газонаполненными баллонами под давлением;
- 9) отсутствие заполнения и обсадки скважин.

Широкое распространение наиболее эффективного варианта барьера в виде незаполненной траншеи ограничивается необходимостью обеспечения устойчивости ее стенок с увеличением ее глубины до приемлемой величины, равной $1,0L_R$. Этот вариант может рассматриваться лишь как временное решение вопросов виброизоляции, например при устройстве вблизи свайного поля из забивных свай или уплотнения грунта трамбовками. Глубина такой траншеи определяется связностью грунта. Заполнение траншеи обеспечивает такую устойчивость, но снижает эффективность виброизоляции. Приведенные исследования ограничиваются изучением эффективности применения отдельных материалов в качестве заполнения траншей. Между тем их динамические свойства (модуль упругости грунта E , удельные веса γ и коэффициенты Пуассона μ) могут широко варьироваться в пределах отдельно взятого материала.

Исходные данные.

Постановка задач исследования

Цель данной работы – выявление свойств материала барьера, определяющих эффективность его применения путем математического моделирования на основе метода конечных элементов.

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

– выполнено численное моделирование методом конечных элементов вертикальных барьеров из различных материалов и конструкций, выделены наиболее эффективные варианты исполнения;

– выявлены основные параметры материала и конструкции барьера, определяющие его виброизоляционную эффективность.

Расчет выполнен в конечно-элементном расчетном комплексе Lira 10.10 с использованием элементов, моделирующих упругое инерционное полупространство. Общее количество конечных элементов составило 64470. Время интегрирования 3 с. Шаг интегрирования 0,001 с. Для исключения отражения волн от боковых и нижней границ массива применялся конечный элемент «неотражаемые границы». Конечно-элементная схема грунтового пространственного массива размерами 32×40 м высотой 21 м представлена на рис. 1а. Источник колебаний – фундамент под машину с вертикальными гармоническими колебаниями с частотой 25 Гц и амплитудой динамической нагрузки $P_d = 500$ кН. Схемы взаимного расположения источника вибрации, поперечной рамы и виброзащитного экрана даны на рис. 1б. Расстояние от точки приложения нагрузки принято равным $R = 3$ м,

глубина барьера $H = 5,57$ м ($1,0L_R$), ширина барьера L принята непрерывной по ширине расчетной схемы, толщина барьера 0,5 м.

Моделируемый грунт представляет собой маловлажный песок средней плотности со следующими физико-механическими свойствами: удельный вес грунта $\gamma = 16,74$ кН/м³; динамический модуль упругости $E_d = 100$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$.

Верификация математической модели

Скорости распространения продольных v_p , поперечных v_s волн в грунтовой среде определяются по общеизвестным формулам теории упругости:

$$v_p = \frac{E_o(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}; \quad (1)$$

$$v_s = \frac{E}{\rho \cdot 2(1+\mu)}, \quad (2)$$

где ρ – плотность грунта, кН·с²/м⁴; ее определяют по формуле

$$\rho = \frac{\gamma}{g}; \quad (3)$$

γ – удельный вес грунта, кН/м³; g – ускорение свободного падения, м/с².

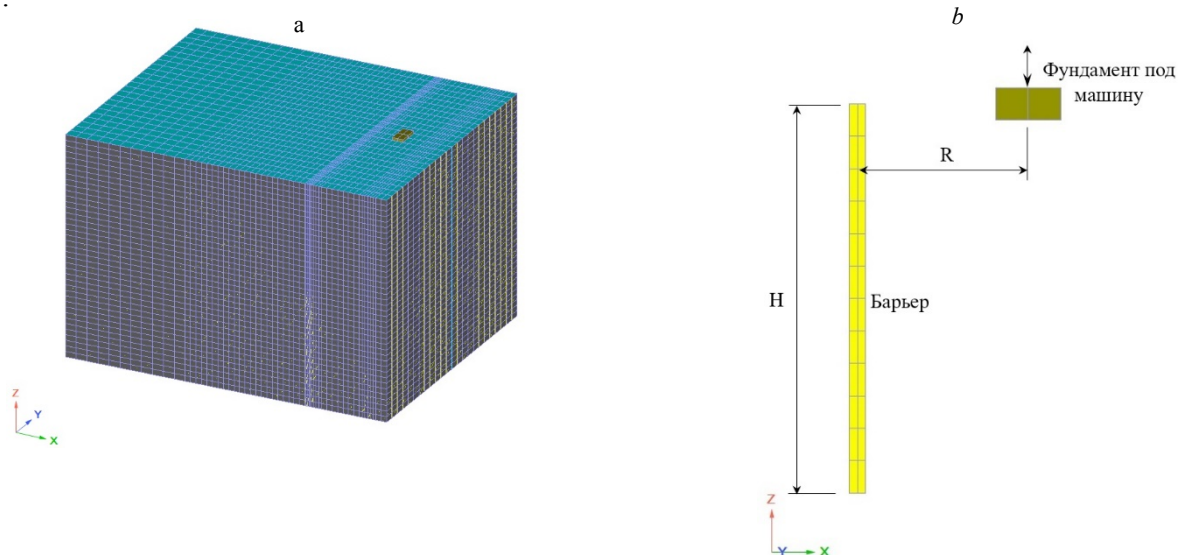


Рис. 1. Расчетная схема: а – конечно-элементная схема грунтового пространственного массива; б – взаимное расположение источника вибрации и виброзащитного барьера

Fig. 1. Calculation scheme: a – finite element scheme of the soil spatial array; б – mutual arrangement of the vibration source and the vibration protection barrier

Скорость волны Рэлея v_R определяем по приближенной формуле Бергманна–Викторова

$$v_R = \frac{0,87 + 1,12\mu}{1 + \mu} v_s \quad (4)$$

Длины волн L рассчитаем по формуле

$$L = \frac{v}{f}, \quad (5)$$

где f – техническая частота вынужденных колебаний, Гц.

Скорости распространения волн в грунте составили: продольной $v_p = 281$ м/с, поперечной $v_s = 150,2$ м/с, волны Рэлея $v_R = 139,34$ м/с. Соответствующие им длины волн: продольной $L_p = 11,24$ м, поперечной $L_s = 6,01$ м, поверхностной (Рэлея) $L_R = 5,57$ м. Коэффициент относительного демпфирования ξ принят равным 0,05.

На рис. 2 показан фрагмент вступления волнового «пакета» в виде вертикальных перемещений поверхности грунтового массива на расстоянии 10 м от источника колебаний при их беспрепятственном распространении в грунтовой среде.

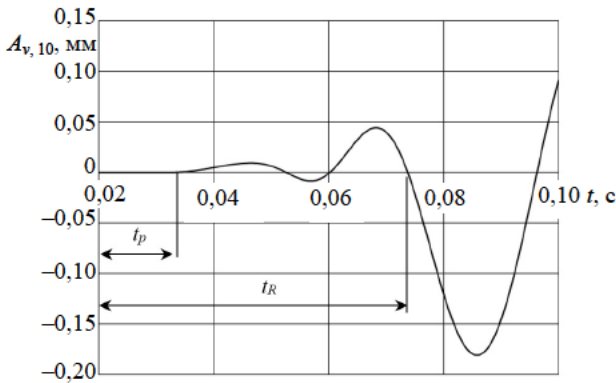


Рис. 2. Зависимость вертикального перемещения $A_{v,10}$ от времени t на расстоянии 10 м от точки приложения динамической нагрузки (начальный фрагмент волнового «пакета») и моменты вступления продольной и волны Рэлея

Fig. 2. Dependence of vertical displacement $A_{v,10}$ on time t at a distance of 10 m from the point of application of the dynamic load (initial fragment of the wave packet) and the moments of arrival of the longitudinal and Rayleigh waves

Моменты вступления продольной и волны Рэлея на расстоянии 10 м, вычисленные через скорости распространения волн по формулам (1)–(4), соответственно составили: $t_p =$

$= 0,0356$ с, $t_R = 0,0718$ с (рис. 2). Из представленных данных следует, что результаты, полученные методом конечных элементов, в точности совпадают с расчетами по формулами теории упругости.

Анализ результатов расчета на основе безразмерных параметров

Для оценки относительного снижения колебания и использования полученных зависимостей в практических расчетах целесообразно перейти к безразмерным параметрам, описывающим закономерности снижения колебаний при прохождении волн через барьер. В соответствии с π -теоремой теории размерности [17] механизм взаимодействия динамических волн с барьером можно описать безразмерными относительными значениями его физических и геометрических характеристик.

Для определения относительного снижения средней величины максимальных вертикальных амплитуд смещений A_B поверхности грунтового грунта за барьером введем коэффициент относительного снижения амплитуды $A_{отн}$, который определяется по формуле

$$A_{отн} = \frac{A_{after}}{A_{before}}, \quad (6)$$

где A_{before} и A_{after} – средняя величина максимальных амплитуд вертикальных колебаний A_B поверхности грунта за барьером соответственно до и после его устройства.

Для оценки влияния каждого из свойств материала барьера (E_b, γ_b, μ_b) на коэффициент относительного снижения амплитуды $A_{отн}$ приравняем абсолютные величины модуля упругости грунта $E_g = 100$ МПа, удельного веса $\gamma_g = 16,47$ кН/м³ и коэффициента Пуассона $\mu_g = 0,3$ грунта к относительной величине, равной 1,0, и введем безразмерные коэффициенты относительного изменения этой величины $E_{отн}, \gamma_{отн}$ и $\mu_{отн}$ у барьера (E_b, γ_b, μ_b) по отношению к аналогичным для материала грунта (E_g, γ_g, μ_g).

Расчеты выполнены при различных величинах указанных коэффициентов с неизменными геометрическими параметрами барьера, расчетной схемы и параметрами грунта, т. е. варьировался каждый из указанных параметров барьера при неизменности остальных. Коэффициент $A_{отн}$ определялся в диапазоне от $0,1L_R$

до $3,23L_R$ от оси барьера в направлении распространения поверхностных волн от источника колебаний.

На рис. 3 приводится зависимость коэффициента $A_{отн}$ от коэффициента относительного изменения модуля упругости материала барьера $E_{отн}$.

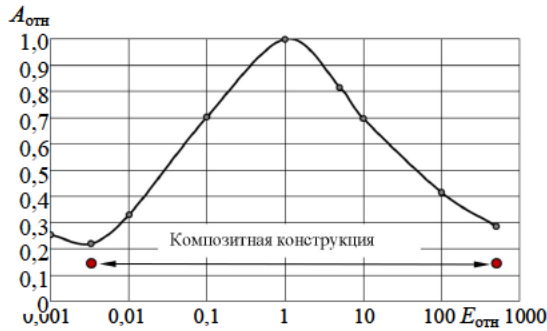


Рис. 3. График зависимости $A_{отн} = f(E_{отн})$ (отдельными точками выделено снижение коэффициента $A_{отн}$ при использовании композитной конструкции, состоящей из чередующихся слоев двух материалов с низким и высоким модулями упругости)

Fig. 3. Graph of the dependence $A_{отн} = f(E_{отн})$ (individual points highlight the decrease in the coefficient $A_{отн}$ when using a composite structure consisting of alternating layers of two materials with low and high elastic moduli)

Из представленных на рис. 3 данных следует, что как увеличение, так и уменьшение модуля упругости материала барьера от исходной относительной величины 1,0, соответствующей динамическому модулю упругости грунта $E_g = 100$ МПа, приводит к уменьшению параметров колебаний грунта за барьером. При увеличении модуля упругости барьера в 500 раз, что соответствует параметрам бетона класса по прочности С80/95, средняя амплитуда вертикальных перемещений поверхности грунта за барьером уменьшается в 3,5 раза. При уменьшении модуля упругости барьера в 303 раза, что соответствует параметрам древесных опилок, средняя амплитуда вертикальных перемещений поверхности грунта за барьером уменьшается в 4,55 раза. Их совместное использование в равных долях в материале барьера толщиной $t = 0,5$ м ($t_1 = 0,125$ м (бетон); $t_2 = 0,125$ м (древесные опилки); $t_3 = 0,125$ м (бетон); $t_4 = 0,125$ м (древесные опилки)) приводит к снижению средней амплитуды вертикальных перемещений поверхности грунта за барьером в 6,9 раза (на 85,4 %). На рис. 3 отдельными точками выделено снижение коэф-

фициента $A_{отн}$ при использовании данной композитной конструкции. При этом наибольшее снижение амплитуд вертикальных перемещений в 7,75–8,13 раза достигается на расстояниях $(0,27–0,63)L_R$ от оси барьера.

График на рис. 3 можно описать следующими зависимостями:

– для восходящей ветви в диапазоне $E_{отн}$ от 0,001 до 1

$$A_{отн} = -0,1191 \ln(E_{отн}) + 0,9662 \quad (7)$$

при коэффициенте достоверности аппроксимации $R^2 = 0,9441$;

– для нисходящей ветви в диапазоне $E_{отн}$ от 1 до 500

$$A_{отн} = -0,118 \ln(E_{отн}) + 0,9897 \quad (8)$$

при коэффициенте достоверности аппроксимации $R^2 = 0,9922$.

Формулы (8) и (9) можно использовать в практических расчетах при подборе материала виброизоляционного барьера глубиной $H = 1,0L_R$ на расстояниях в плане от $0,1L_R$ до $3,23L_R$ от оси барьера в направлении распространения поверхностных волн от источника колебаний.

Выявленная закономерность зависимости $A_{отн} = f(E_{отн})$ является ключевой в понимании механизма повышения эффективности виброизоляции при помощи барьера и открывает широкие возможности для дальнейшей оптимизации материала его заполнения и конструкции, включая композитные комбинации. Следует отметить, что аналогичный принцип демпфирования высококинетических локальных динамических воздействий с использованием слоистой композитной конструкции начал ранее использоваться в разработках космической и военной промышленности.

Для наглядного представления снижения уровня колебаний за барьером в зависимости от величин коэффициента $E_{отн}$ введем коэффициент относительного изменения амплитуды максимальных вертикальных колебаний поверхности массива $A_б$ от начальной величины A_0 , которая определялась на расстоянии $r = 0,1L_R$ от оси барьера в направлении распространения поверхностных волн. Начальная пороговая величина $A_0 = 526$ мкм соответствует свободному распространению колебаний без барьера на этом расстоянии:

$$A_6 = \frac{A(r)_{alter}}{A_0}; \quad (9)$$

$$r_6 = \frac{r}{L_R}, \quad (10)$$

где $A(r)_{alter}$ – максимальная амплитуда вертикальных колебаний поверхности грунта за барьером на расстоянии r ; r – расстояние, отсчитываемое с расстояния $0,1L_R$ от оси барьера

в направлении распространения поверхностной волны.

Зависимости $A_6 = f(r_6)$ представлены на рис. 4 и рис. 5 соответственно при уменьшении и увеличении $E_{отн}$.

Из представленных на рис. 4 и 5 данных следует, что происходит существенное уменьшение амплитуд вертикальных колебаний грунта за барьером как при уменьшении, так и при увеличении модуля упругости барьера по сравнению с модулем упругости грунта.

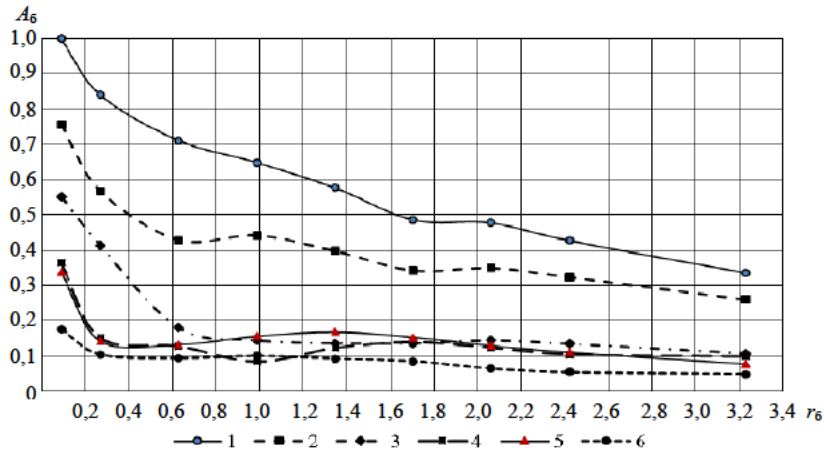


Рис. 4. Зависимости $A_6 = f(r_6)$ с коэффициентом относительного изменения модуля упругости барьера $E_{отн}$, равным: для графика 1 – 1,00 (когда $E_g = E_6$); для графика 2 – 0,10; для графика 3 – 0,010; для графика 4 – 0,033; для графика 5 – 0,001; для графика 6 – для композитной конструкции, состоящей из чередующихся слоев двух материалов с низким ($E_{отн} = 0,0033$) и высоким ($E_{отн} = 500$) модулями упругости

Fig. 4. Dependencies $A_6 = f(r_6)$ with the relative change coefficient of the barrier's elastic modulus $E_{отн}$, equal to: for graph 1 – 1.0 (when $E_g = E_6$); for graph 2 – 0.100; for graph 3 – 0.010; for graph 4 – 0.033; for graph 5 – 0.001; for graph 6 – for a composite structure consisting of alternating layers of two materials with low ($E_{отн} = 0,0033$) and high ($E_{отн} = 500$) elastic moduli

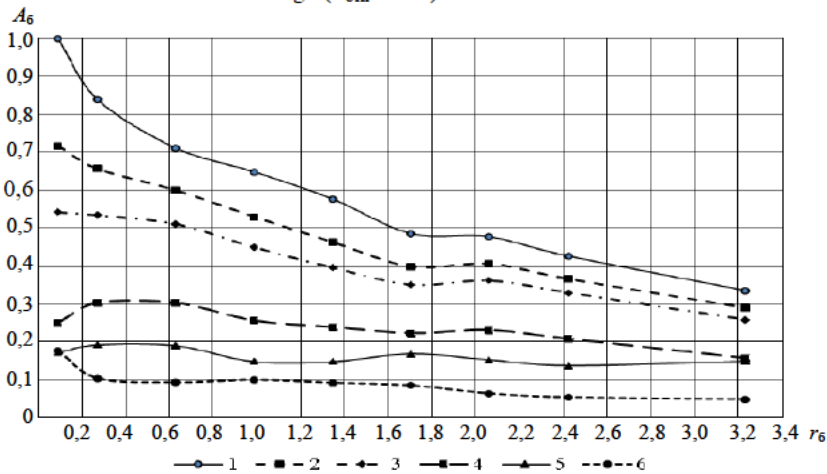


Рис. 5. Зависимости $A_6 = f(r_6)$ с коэффициентом относительного изменения модуля упругости барьера $E_{отн}$, равным: для графика 1 – 1,0 (когда $E_g = E_6$); для графика 2 – 5; для графика 3 – 10; для графика 4 – 100; для графика 5 – 500; для графика 6 – для композитной конструкции, состоящей из чередующихся слоев двух материалов с низким ($E_{отн} = 0,0033$) и высоким ($E_{отн} = 500$) модулями упругости

Fig. 5. Dependencies $A_6 = f(r_6)$ with the coefficient of relative change of the barrier's elastic modulus $E_{отн}$, equal to: for graph 1 – 1.0 (when $E_g = E_6$); for graph 2 – 5; for graph 3 – 10; for graph 4 – 100; for graph 5 – 500; for graph 6 – for a composite structure consisting of alternating layers of two materials with low ($E_{отн} = 0,0033$) and high ($E_{отн} = 500$) elastic moduli

На рис. 6 представлена зависимость относительного изменения средних значений максимальных амплитуд колебаний грунта за барьером $A_{отн}$ в зависимости от коэффициента относительного изменения удельного веса материала барьера по отношению к материалу прилегающего грунта $\gamma_{отн}$.

Из представленных на рис. 6 данных следует, что при снижении удельного веса материала барьера в 167 раз амплитуда средних величин максимальных амплитуд колебаний грунта за барьером $A_{отн}$ уменьшается на 6,6 %, при увеличении в 3 раза – уменьшается на 1,95 %. Таким образом, изменение плотности материала барьера в диапазоне свойств применяемых материалов не оказывает существенного влияния на эффективность виброизоляции.

При изменении коэффициента Пуассона материала барьера μ_6 от исходной величины $\mu_6 = 0,3$ для грунта в 30 раз $A_{отн}$ уменьшается на 0,008 %, при увеличении μ_6 в 1,3 раза – $A_{отн}$ уменьшается на 0,032 %. Таким образом, изменение μ_6 материала барьера также не оказывает существенного влияния на эффективность виброизоляции.

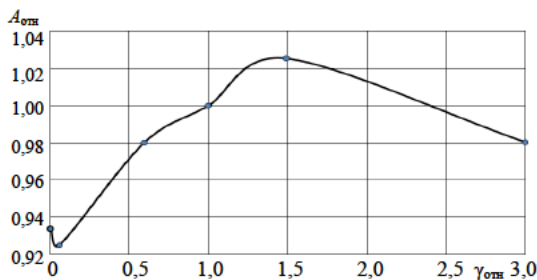


Рис. 6. Зависимость $A_{отн} = f(\gamma_{отн})$

Fig. 6. Dependence $A_{отн} = f(\gamma_{отн})$

ВЫВОДЫ

1. Основной характеристикой, определяющей виброизоляционную эффективность вертикальных барьеров в грунте, является динамический модуль упругости материала последнего. Его увеличение или уменьшение по отношению к динамическому модулю упругости окружающего грунта приводит к снижению колебаний за барьером в направлении распространения поверхностных волн в грунте.

2. Наибольший эффект достигается при использовании барьера из многослойной композитной конструкции с чередующимися материалами с наибольшим и наименьшим достижимыми динамическими модулями упругости в пределах свойств материалов, которые могут использоваться на практике. Снижение амплитуд вертикальных колебаний грунта за барьером в направлении распространения поверх-

ностных волн для данной композитной конструкции достигает 87,7 % при глубине барьера, равной длине волны Рэлея.

3. Полученные зависимости относительного снижения средних величин максимальных амплитуд колебаний поверхности грунта $A_{отн}$ за барьером от коэффициента относительного изменения модуля упругости материала барьера $E_{отн}$ можно использовать в практических расчетах для выбора его материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Woods, R. D. Screening of Surface Waves in Soils / R. D. Woods // Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. 1968. Vol. 94, No 4. P. 951–980. <https://doi.org/10.1061/jsfeaq.0001180>
2. Naghizadehrokni, M. A Full Experimental and Numerical Modelling of the Practicability of Thin Foam Barrier as Vibration Reduction Measure / M. Naghizadehrokni, M. Ziegler, J. Sprengel // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2020. Vol. 139. Art. 106416. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106416>
3. Pu, X. Feasibility of Ambient Vibration Screening by Periodic Geofom-Filled Trenches / X. Pu, Z. Shi, H. Xiang // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2018. Vol. 104. P. 228–235. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.10.022>
4. Naghizadehrokni, M. Effect of Different Configurations of a Geofom-Filled Barrier in Vibration Scattering and Its Optimization by Genetic Algorithm / M. Naghizadehrokni, M. Ziegler // XI International Conference on Structural Dynamics Athens, Greece, 23–26 November 2020. P. 4069–4084. <https://doi.org/10.47964/1120.9333.18611>
5. 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, No 1. P. 325–344. <https://doi.org/10.1177/14613484221118998>
6. Ulgen, D. Screening Effectiveness of Open and In-Filled Wave Barriers: a Full-Scale Experimental Study / D. Ulgen, O. Toygar // Construction Building Mater. 2016. Vol. 86. P. 12–20. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.098>
7. Mahdavisefat, E. Heshmati. “Full-Scale Experimental Study on Screening Effectiveness of SRM-Filled Trench Barriers” / E. Mahdavisefat, H. Salehzadeh, A. A. Heshmati // Geotechnique. 2018. Vol. 68, No 10. P. 869–882. <https://doi.org/10.1680/jgeot.17.p.007>
8. Boominathan, A. Dynamic Behavior of Laterally Loaded Model Piles in Clay / A. Boominathan, R. Ayothiraman // Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering. 2005. Vol. 158, No 4. P. 207–215. <https://doi.org/10.1680/geng.2005.158.4.207>
9. Boominathan, A. Measurement and Analysis of Horizontal Vibration Response of Pile Foundations / A. Boominathan, R. Ayothiraman // Shocks and Vibration. 2007. Vol. 14, No 2. P. 89–106. <https://doi.org/10.1155/2007/869184>
10. Chandrasekaran, S. Experimental Investigations on the Behavior of Pile Groups in Clay under Lateral Cyclic Loading / S. Chandrasekaran, A. Boominathan, G. Dodagoudar // Geotechnical and Geological Engineering. 2010. Vol. 28, No 5. P. 603–617. <https://doi.org/10.1007/s10706-010-9318-4>
11. Experimental Studies on Dynamic Response of a Block Foundation on Sand Reinforced with Geogrid / S. Clement, R. Sahu, R. Ayothiraman, G. V. Ramana // Proceedings of Geosynthetics, 2015 February 15–18, Portland, Oregon. Portland, 2015. P. 15–18.

12. Kanaujia, V. K. Influence of Superstructure Flexibility on Seismic Response Pile Foundation in Sand / V. K. Kanaujia, R. Ayothiraman, V. A. Matsagar // *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisboa, Portugal 2012 Sep.* P. 24–28.
13. Stokoe, K. H. In Situ Shear Wave Velocity by Cross-Hole Method / K. H. Stokoe, R. D. Woods // *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division.* 1972. Vol. 98, No 5. P. 443–460. <https://doi.org/10.1061/jsfeaq.0001747>
14. Srinivasulu P. Dynamic Experiments of Model Piles – A Laboratory Study / P. Srinivasulu, N. Gopalakrishnan, K. Satish // *Proceedings of 6th International Conference and Exhibition on Piling and Deep Foundations.* Conferences and Exhibitions Pvt. Ltd., Bombay, 1996. P. 3.11.1–3.11.8.
15. Use of In-Filled Trenches to Screen Ground Vibration due to Impact Pile Driving: Experimental and Numerical Study / P. Jayawardana, R. Achuhan, G. H. De Silva, D. P. Thambiratnam // *Heliyon.* 2018. Vol. 4, No 8. P. e 00726. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00726>
16. Повколос, К. Э. Сравнительный анализ эффективности применения вертикальных барьеров из различных материалов для снижения вибраций, распространяющихся в грунтовой среде / К. Э. Повколос, А. А. Аль-Робай // *Инновационные технологии и конструкции в гидротехническом, энергетическом и воднотранспортном строительстве: материалы 2-й Междунар. молодежного науч.-практ. конф. в рамках Междунар. молодежного форума «Креатив и инновации 2023»*, 30 нояб. 2023 г. Минск: БНТУ, 2023. С. 29–34. URL: <https://rep.bntu.by/handle/data/141548>
17. Сапарлиев, Х. М. Математические модели сплошного барьера / Х. М. Сапарлиев // *Новое слово в науке и практике: гипотезы и апробация результатов исследований.* 2016. № 22. С. 104–111.
7. Mahdavisefat E., Salehzadeh H., Heshmati A. A. (2018) Full-Scale Experimental Study on Screening Effectiveness of SRM-Filled Trench Barriers. *Geotechnique*, 68 (10), 869–882. <https://doi.org/10.1680/jgeot.17.p.007>
8. Boominathan A., Ayothiraman R. (2005) Dynamic Behavior of Laterally Loaded Model Piles in Clay. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering*, 158 (4), 207–215. <https://doi.org/10.1680/geng.2005.158.4.207>
9. Boominathan A., Ayothiraman R. (2007) Measurement and Analysis of Horizontal Vibration Response of Pile Foundations. *Shocks and Vibration*, 14 (2), 89–106. <https://doi.org/10.1155/2007/869184>
10. Chandrasekaran S., Boominathan A., Dodagoudar G. (2010) Experimental Investigations on the Behavior of Pile Groups in Clay under Lateral Cyclic Loading. *Geotechnical and Geological Engineering*, 28 (5), 603–617. <https://doi.org/10.1007/s10706-010-9318-4>
11. Clement S., Sahu R., Ayothiraman R., Ramana G. V. (2015) Experimental Studies on Dynamic Response of a Block Foundation on Sand Reinforced with Geogrid. *Proceedings of Geosynthetics, 2015 February 15–18, Portland, Oregon.* Portland, 15–18.
12. Kanaujia V. K., Ayothiraman R., Matsagar V. A. (2012) Influence of Superstructure Flexibility on Seismic Response Pile Foundation in Sand. *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisboa, Portugal 2012 Sep.*, 24–28.
13. Stokoe K. H., Woods R. D. (1972) In Situ Shear Wave Velocity by Cross-Hole Method. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 98 (5), 443–460. <https://doi.org/10.1061/jsfeaq.0001747>
14. Srinivasulu P., Gopalakrishnan N., Satish K. (1996) Dynamic Experiments of Model Piles – A Laboratory Study. *Proceedings of 6th International Conference and Exhibition on Piling and Deep Foundations.* Conferences and Exhibitions Pvt. Ltd., Bombay, 3.11.1–3.11.8.
15. Jayawardana P., Achuhan R., De Silva G. H. M. J., Thambiratnam D. P. (2018) Use of In-Filled Trenches to Screen Ground Vibration due to Impact Pile Driving: Experimental and Numerical Study. *Heliyon*, 4 (8), e00726. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00726>
16. Povkolas K. E., Al-Robai A. A. (2023) Comparative Analysis of the Effectiveness of Using Vertical Barriers Made of Various Materials to Reduce Vibrations Propagating in the Soil Medium. *Innovatsionnye Tekhnologii i Konstruktsii v Gidrotekhnicheskoy, Energeticheskoy i Vodnotransportnoy Stroitel'stve: Materialy 2-i Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf. v Ramkakh Mezhdunar. Molo-dezhnogo Forumy «Kreativ i Innovatsii 2023»*, 30 Noyab. 2023 g. [Proceedings of the 2nd International Remote Scientific and Practical Conference “Innovative Technologies and Structures in Hydraulic, Energy, and Water Transport Construction” within the framework of the International Youth Forum “Creativity and Innovation 2023”, November 30, 2023]. Minsk, BNTU, 29–34. Available at: <https://rep.bntu.by/handle/data/141548> (in Russian).
17. Saparliyev Kh. M. (2016) Mathematical Models of a Continuous Barrier. *Novoe Slovo v Nauke i Praktike: Gipotezy i Aprobatsiya Rezul'tatov Issledovaniy* [New Word in Science and Practice: Hypotheses and Testing of Research Results], (22), 104–111 (in Russian).

Received: 17.12.2025

Accepted: 26.02.2026

Published online: 31.03.2026

REFERENCES

1. Woods R. D. (1968) Screening of Surface Wave in Soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 94 (4), 951–979. <https://doi.org/10.1061/jsfeaq.0001180>
2. Naghizadehroknj 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, 106416. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106416>
3. Pu X., Shi Z., Xiang H. (2018) Feasibility of Ambient Vibration Screening by Periodic Geofoam-Filled Trenches. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 104, 228–235. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.10.022>
4. Naghizadehroknj M., Ziegler M. (2020) Effect of Different Configurations of a Geofoam-Filled Barrier in Vibration Scattering and Its Optimization by Genetic Algorithm Eurodyn. *XI International Conference on Structural Dynamics Athens, Greece, 23–26 November 2020*, 4069–4084 <https://doi.org/10.47964/1120.9333.18611>
5. Tandon K., Kumar D., Ayothiraman R., Manna B., Ramana G. (2022) 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. <https://doi.org/10.1177/14613484221118998>
6. Ulgen D., Toygar O (2015) Screening Effectiveness of Open and In-Filled Wave Barriers: A Full-Scale Experimental Study. *Construction and Building Materials*, 86, 12–20. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.098>