

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-4-286-293>

УДК 624. 131.552

Оценка эффективности применения горизонтальных инерционных барьеров для снижения вибраций, распространяющихся в грунтовой среде

Канд. техн. наук К. Э. Повколас¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. В статье приводятся расчеты колебаний грунтового массива при размещении на пути их распространения горизонтального инерционного барьера в виде прямоугольной бетонной плиты, заглубленной в грунт. Эффект демпфирования поверхностной волны при ее контакте с инерционной плитой связан с ее отражением, преломлением и частичным поглощением. Теоретические исследования проводили при помощи метода конечных элементов. Грунтовая среда рассматривалась как упругий инерционный массив, ограниченный неотражающими границами. Смоделированы различные варианты геометрии инерционной плиты и ее пространственного расположения на поверхности грунтовой среды между источником колебаний и рассматриваемой точкой за барьером. Эффективность каждого варианта виброизоляции количественно оценивали по величине, показывающей, во сколько раз уменьшается скорость вертикальных колебаний грунта за барьером по сравнению со свободным распространением поверхностных волн. Показано, что интенсивное снижение вертикальных перемещений происходит, начиная с боковой грани инерционной плиты. Здесь амплитуда вертикальных колебаний уменьшается в 9,8 раза для бетонной плиты длиной 15 м и в 4,2 раза для 3-метровой плиты. На расстоянии 22 м от точки приложения динамической нагрузки амплитуды уменьшаются в 5,48 и 2,95 раза соответственно для плит шириной 15 и 3 м. Данный способ снижения вибродинамических воздействий обладает простотой конструктивного исполнения и может быть использован в стесненных условиях городской застройки для защиты существующих и проектируемых зданий и сооружений.

Ключевые слова: вибрации, здания, сооружения, воздействия, инерционный барьер, скорость колебаний

Для цитирования: Повколас, К. Э. Оценка эффективности применения горизонтальных инерционных барьеров для снижения вибраций, распространяющихся в грунтовой среде / К. Э. Повколас // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 4. С. 286–293. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-4-286-293>

Evaluation of Effectiveness of Application of Horizontal Inertial Barriers to Reduce Vibrations Propagating in Ground Environment

K. E. Povkolas

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

Abstract. The paper presents calculations of vibrations of the soil mass when a horizontal inertial barrier in the form of a rectangular concrete slab buried in the ground is placed on the propagation path of vibrations. The damping effect of a surface wave upon its contact with an inertial plate is associated with its reflection, refraction and partial absorption. Theoretical studies have been carried out using the finite element method. The ground medium has been considered as an elastic inertial array bounded by non-reflecting boundaries. Various variants of the geometry of the inertial plate and its spatial arrangement on the surface of the soil medium between the vibration source and the considered point behind the barrier are modeled. The effectiveness of each variant of vibration isolation has been quantified by the value showing how many times the speed of vertical oscillations of the ground behind the barrier decreases compared to the free propagation of surface waves.

Адрес для переписки

Повколас Константин Эдуардович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/1,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-76-77
K_Povkolas@mail.ru

Address for correspondence

Povkolas Konstantin E.
Belarusian National Technical University
65/1, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-76-77
K_Povkolas@mail.ru

It is shown that an intensive decrease in vertical displacements occurs starting from the side face of the inertial plate. Here, the amplitude of vertical oscillations decreases by 9,8 times for a concrete slab 15 m long, and by 4,2 times for a 3-meter slab. At a distance of 22 m from the point of application of the dynamic load, the amplitudes decrease by factors of 5.48 and 2.95, respectively, for slabs of 15 and 3 m width. This method of reducing vibro-dynamic effects has a simple design and can be used in cramped conditions of urban development to protect existing and planned buildings and structures.

Keywords: vibrations, buildings, structures, impacts, inertial barrier, vibration speed

For citation: Povkolas K. E. (2023) Evaluation of Effectiveness of Application of Horizontal Inertial Barriers to Reduce Vibrations Propagating in Ground Environment. *Science and Technique*. 22 (4), 286–293. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-4-286-293> (in Russian)

Введение

Развитие промышленности и транспортной инфраструктуры сопровождается увеличением вибродинамических воздействий на конструкции зданий и сооружений, зачастую вызывая их повреждения. К примеру, согласно сведениям [1], вибрационное загрязнение городов в Республике Беларусь с 2002 по 2013 г. увеличилось до 1,5 раза: от метрополитена – на 41 %, автотранспорта – на 44, трамваев – на 21, промышленной вибрации – на 11 %. Можно предположить, что интенсивность вибродинамических воздействий в дальнейшем будет только нарастать. Этот факт подтверждают опытные данные, полученные автором [2]. Математическая модель определения физического состояния зданий и сооружений в целом в зависимости от уровня ускорений колебаний конструкций и продолжительности их действия получена И. А. Кудрявцевым [1]. Она нашла отражение в нормативном документе [3].

Основным фактором, определяющим повреждение строительных конструкций зданий или сооружений, при действии вибраций является дополнительная неравномерная динамическая осадка фундаментов [4, 5]. Динамические нагрузки от работы промышленного оборудования, при забивке свай и вибропогружении шпунтов, передаваемые через грунтовую среду и фундамент на строительные конструкции, редко приводят к повреждению строительных конструкций, находящихся в исправном состоянии, если отсутствуют дополнительные неравномерные динамические осадки. Методика их расчета приведена в разработанном автором нормативном документе [6].

Целью работы является расчетное обоснование эффективности способа виброизоляции зданий и сооружений от вибродинамических воздействий, распространяющихся в грунтовой среде от точечных источников, путем устрой-

ства между источником и приемником колебаний горизонтального инерционного барьера в виде бетонной плиты. Для достижения поставленной цели решена следующая задача: выполнено численное 3D моделирование взаимодействия грунтовых волн с горизонтальным инерционным барьером при различных геометрических параметрах барьера и типах вибродинамических воздействий (импульсное и гармоническое вибрационное). Научная новизна работы заключается в оценке эффективности применения горизонтального барьера применительно к решению задач промышленной сейсмике (работе кузнечных молотов и штампов, машин с периодическими нагрузками) в части снижения вибрационных нагрузок на строительные конструкции прилегающих зданий и сооружений, инженерных коммуникаций.

Идея использовать горизонтальный кольцевой барьер вокруг застройки для защиты от сейсмических волн изложена в [7]. Она базируется на теореме П. Чандвика [8], согласно которой поверхностные волны, которые переносят большую часть сейсмической энергии, не могут распространяться, если поверхность полупространства заземлена. Это гипотеза была модифицирована [7, 9] в части размещения на поверхности грунта тонкого слоя с измененными физико-механическими свойствами. Практического применения в сейсмостойком строительстве она пока не нашла. В работе [9] на основании расчетов методом конечных элементов в плоской постановке сделан вывод об определяющем влиянии плотности, модуля упругости и геометрии барьера на эффективность его применения. С увеличением указанных параметров эффект демпфирования возрастает. В данной работе рассматривается возможность использования этого метода сейсмоизоляции применительно к промышленной сейсмике. В отличие от исследований [9] расчеты выпол-

нены в пространственной постановке с различными геометрическими параметрами барьера в виде бетонной плиты и частотным составом вынужденных колебаний от точечного источника на поверхности грунтового массива.

Результаты численного моделирования виброизоляции зданий и сооружений при помощи инерционных плит

С целью оценки эффективности данного способа виброзащиты зданий и сооружений от колебаний, распространяющихся в грунте, выполнен комплекс расчетов системы «источник колебаний – среда распространения – приемник колебаний» методом конечных элементов. Грунтовой массив моделировался как упругая инерционная среда с демпфированием колебаний по гипотезе Релея, поскольку амплитуда генерируемых колебаний мала и грунт не испытывает значительных пластических деформаций в грунтовой среде. Метод был верифицирован [2].

На рис. 1а приводится иллюстрация, поясняющая возможное применение барьера внутри производственного здания. Он может быть использован и вне здания для защиты от внешних колебаний. Расчетная конечно-элементная схема грунтового массива с расположенными на нем фундаментом под машину и инерционной плитой приводится на рис. 1б.

Расчетная схема (рис. 1б) представляет собой грунтовой массив размерами $50 \times 25 \times 19$ м, состоящий из 33040 конечных элементов, на

котором расположены бетонный фундамент мелкого заложения с размерами в плане $1,5 \times 1,5$ м и толщиной 1,0 м и инерционная плита, толщина T и ширина L которой варьировались. Длина барьера (размер, перпендикулярный направлению распространения продольной волны) принята равной 20 м. К центру фундамента прикладывали вертикально действующую динамическую нагрузку в виде синусоидального импульса, характерную для работы кузнечного молота с амплитудой 10 т продолжительностью $t = 0,01; 0,02; 0,04$ и $0,08$ с, а также в виде гармонического колебания 12,5; 25; 50 Гц. Рассматривался грунт с динамическим модулем упругости $E = 50$ МПа, коэффициентом Пуассона $\nu = 0,3$ и удельным весом 20 кН/м³. Расчет производится в ПК LIRA 10.8 с использованием расчетного комплекса «Динамика+». Время интегрирования 1 с. По результатам расчета выявлены зависимости перемещений, скорости и ускорения конструкций источника, инерционной плиты и поверхности грунта за ее пределами.

Изменения амплитуд вертикальных перемещений A с ростом расстояния от источника колебаний r при длительности импульса $t = 0,02$ с представлены на рис. 2а при различных длинах барьера L (размер барьера в направлении распространения продольной волны) и на рис. 2б при различных его толщинах T . Плиты располагаются начиная на расстоянии 5 м от точки приложения динамической нагрузки.

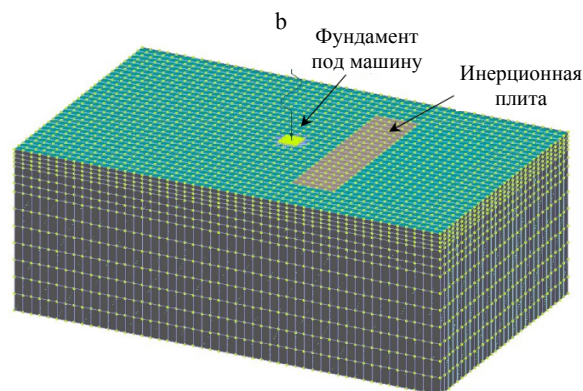
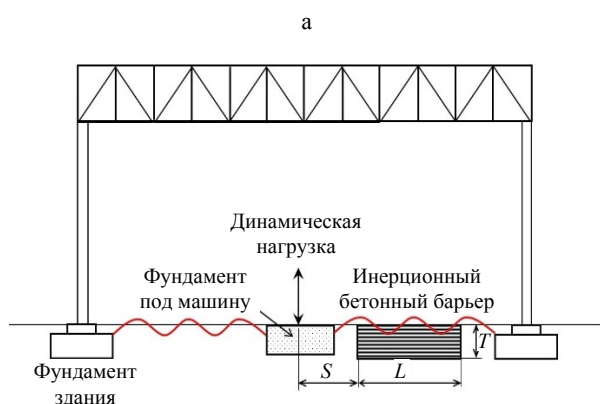


Рис. 1. Инерционный барьер для демпфирования колебаний, распространяющихся в грунте: а – схема возможного применения барьера; б – расчетная конечно-элементная схема

Fig. 1. Inertial barrier for damping vibrations propagating in the ground:

a – diagram of the possible application of the barrier; б – calculated finite element scheme

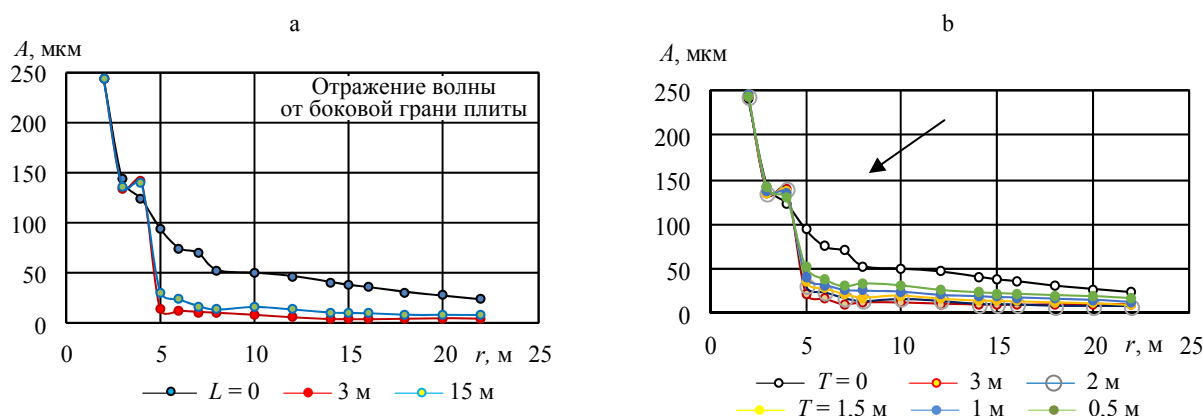


Рис. 2. Зависимость максимальной амплитуды A (мкм) колебаний от расстояния между источником и приемником колебаний r (м): а – при толщине бетонной плиты $T = 2$ м и длинах $L = 3$ и 15 м ($t = 0,02$ с), б – при различной толщине ($T = 3,0; 2,0; 1,5; 1,0; 0,5$ м) бетонной плиты длиной $L = 3$ м

Fig. 2. Dependence of the maximum amplitude A (μm) of oscillations on the distance between the source and receiver of oscillations r (m): а – at a concrete slab thickness $T = 2$ m and lengths $L = 3$ and 15 m ($t = 0.02$ s), б – at various thicknesses ($T = 3.0; 2.0; 1.5; 1.0; 0.5$ m) of a concrete slab with a length $L = 3$ m

Из представленных данных следует, что интенсивное снижение вертикальных перемещений происходит начиная с боковой грани инерционной плиты. Здесь амплитуда вертикальных колебаний уменьшается в 9,8 раза для бетонной плиты длиной 15 м и в 4,2 раза для 3-метровой плиты. На расстоянии 22 м от точки приложения динамической нагрузки амплитуды уменьшаются в 5,48 и 2,95 раза соответственно для плит длиной 15 и 3 м. Перед инерционной плитой происходит увеличение величин вертикальных колебаний, связанное с отражением волн от ее боковой грани.

Зависимость максимальной амплитуды A (мкм) вертикальных колебаний на расстоянии $r = 22$ м от источника вибродинамических воздействий (ВДВ) при различной толщине ($T = 3,0; 2,0; 1,5; 1,0; 0,5$ м) бетонных плит шириной $L = 3$ м с длиной импульса $t = 0,02$ с представлена на рис. 3.

Из приведенных на рис. 3 данных следует, что изменение как длины плиты L , так и ее толщины T приводит к значительному снижению амплитуды вертикальных колебаний. Причем в нашем случае наибольший эффект демпфирования проявляется при толщине $T = 2$ м. Поэтому в дальнейшем в расчетах принята эта величина.

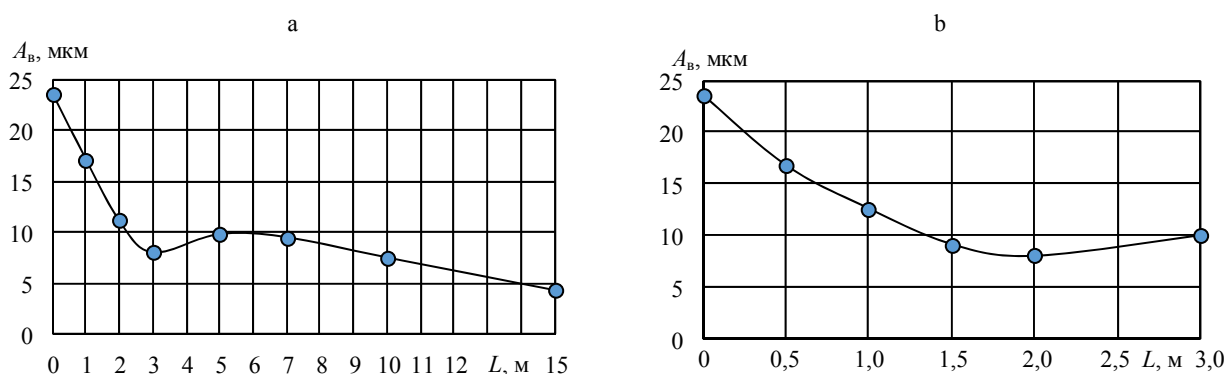


Рис. 3. Зависимость максимальной амплитуды A (мкм) колебаний на расстоянии 22 м от источника вибродинамических воздействий при различных длинах L (м) гравитационных бетонных плит при ее толщине $T = 2$ м (рис. 3а) и различных толщинах инерционных бетонных плит T при одинаковой длине $L = 3$ м (рис. 3б)

Fig. 3. Dependence of the maximum amplitude A (μm) of oscillations at a distance of 22 m from the source of vibrodynamical impacts at different lengths L (m) of gravitational concrete slabs with its thickness $T = 2$ m (Fig. 3a) and various thicknesses of inertial concrete slabs T with the same length $L = 3$ m (Fig. 3b)

Количественно передачу колебаний от грунта фундаменту можно охарактеризовать коэффициентом передачи колебаний K , определяемым по формуле

$$K = \frac{A_{f \max}}{A_{g \max}},$$

где $A_{f \max}$ – максимальное вертикальное перемещение фундамента по центру; $A_{g \max}$ – то же поверхности грунта при отсутствии фундамента.

Зависимости коэффициента передачи колебаний K от толщины гравитационных бетонных плит $T = 0,5; 1; 1,5; 2; 3$ м длиной $L = 3$ м и соответствующего статического давления по его подошве p , т/м^2 , приведены соответственно на рис. 4а и 4б.

Из представленных данных следует, что с увеличением толщины плиты и статического давления по ее подошве амплитуда колебаний значительно уменьшается. Игнорировать инерционность фундамента и вышележащих конструкций нельзя. Между тем в ряде ра-

бот [10–15] предполагается, что колебания фундамента и грунта перед ним равны. По данным [10], это предположение широко используется в практике расчетов на сейсмические воздействия. По мнению автора, это приводит к завышению динамических усилий, возникающих в наземных конструкциях и, как следствие, к увеличению расхода строительных материалов. Указанное предположение правомочно при небольших величинах статических давлений, передаваемых фундаментами на грунтовое основание.

Распределение максимальных вертикальных амплитуд перемещений A по глубине z на расстоянии 22 м от источника ВДВ при наличии фундамента и свободном их распространении показано на рис. 5.

Из приведенных данных следует, что амплитуда максимальных вертикальных колебаний фундамента значительно ниже (в 3,7 раза), чем при его отсутствии в той же точке. Искажение формы зависимости $A = f(z)$ происходит до глубины, равной $3L$, где L – ширина фундамента.

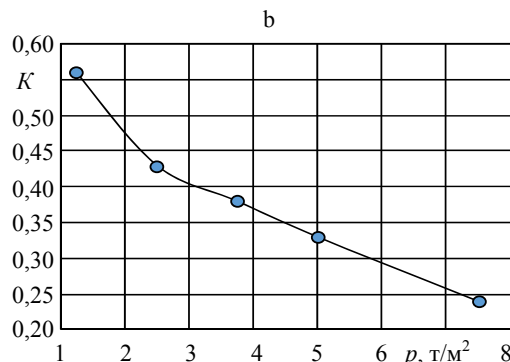
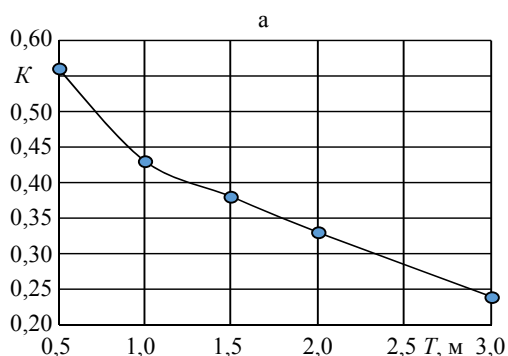


Рис. 4. Зависимости коэффициента передачи колебаний K от толщины инерционных бетонных плит длиной $L = 3$ м (рис. 4а) и соответствующего статического давления по его подошве p , т/м^2 (рис. 4б)

Fig. 4. Dependences of the vibration transmission coefficient K on the thickness of inertial concrete slabs with a length $L = 3$ m (Fig. 4a) and the corresponding static pressure along its sole p , т/м^2 (Fig. 4b).

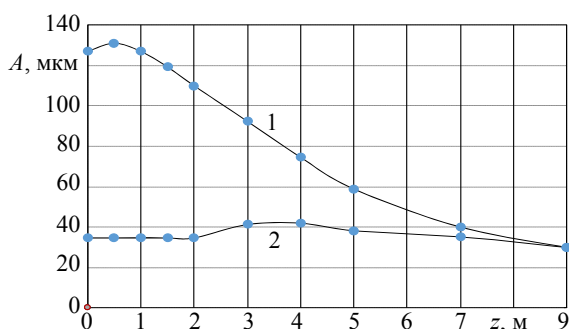


Рис. 5. Распределение вертикальных амплитуд перемещений A по глубине z от поверхности полупространства на расстоянии 22 м от источника воздействий без фундамента (1) и под ленточным фундаментом (2) шириной 3 м и глубиной заложения 2 м
Fig. 5. Distribution of vertical amplitudes of displacements A along the depth z from the surface of the half-space at a distance of 22 m from the source of impacts without foundation (1) and under a strip foundation (2) 3 m wide and 2 m deep

Игнорировать данный факт при оценке несущей способности конструкций зданий и сооружений нельзя. Для оценки относительного снижения колебаний грунта при наличии барьера по сравнению со свободным распространением колебаний в рассматриваемой точке (в нашем случае 22 м от источника колебаний) воспользуемся безразмерной величиной относительного снижения колебаний a , определяемой по формуле

$$a = \frac{A_{rs}}{A_r},$$

где A_{rs} – максимальная амплитуда колебаний грунта за горизонтальным инерционным барьером на расстоянии 22 м от источника колебаний; A_r – то же при отсутствии инерционного барьера на расстоянии 22 м от источника колебаний.

Величина относительного расстояния l определяется по формуле

$$l = \frac{L}{L_R},$$

где L – ширина инерционного барьера; L_R – длина поверхностной волны.

Были рассмотрены два типа динамических нагрузок – импульсное воздействие и установившиеся гармонические колебания. Длина поверхностной волны L_R составила 3,43 м при импульсном воздействии и 1,87, 3,64, 7,28 м

соответственно при частотах 50, 25 и 12,5 Гц. При определении длины волны период колебаний определялся по частоте собственных колебаний фундамента – источника ВДВ, для гармонических – по частоте вынужденных колебаний.

Зависимость $a = f(l)$ представлены на рис. 6а для импульсных и на рис. 6б для гармонических синусоидальных нагрузок.

Из представленных на рис. 6а данных следует, что с увеличением частоты вынужденных колебаний происходит снижение эффекта демпфирования. Например, если при длине плиты $L = 3$ м и частоте 25 Гц снижение составляет 82,3 %, то при частоте 50 Гц уже 68 %. В целом при увеличении длины барьера эффект демпфирования повышается. Наибольший эффект демпфирования колебания 86,7 % отмечается у барьера с $L = 15$ м, $T = 2$ м при частоте вынужденных колебаний 12,5 Гц.

Из представленных на рис. 6б данных следует, что с увеличением длительности импульса силы происходит значительное снижение эффекта демпфирования. Например, если при длине плиты $L = 3$ м и $t = 0,01$ с снижение составляет 67,5 %, то при $t = 0,08$ с уже 30 %. В целом при увеличении длины барьера эффект демпфирования повышается. При уменьшении длительности импульса ниже 0,02 с эффект демпфирования практически не изменяется.

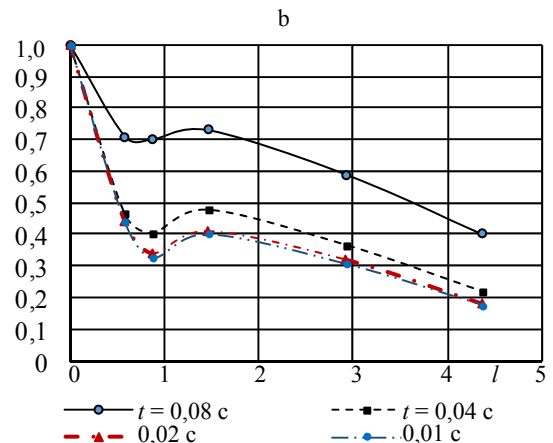
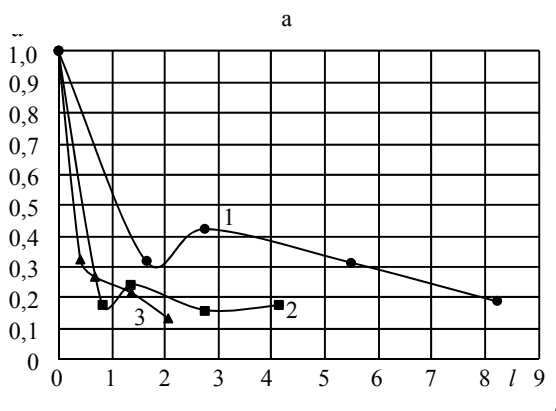


Рис. 6. Зависимость относительной амплитуды вертикальных колебаний a от относительного расстояния l :
а – 1 – при частоте $n = 50$ Гц; 2 – 25; 3 – 12,5 Гц;

б – при импульсном воздействии с различной величиной длительности t импульса

Fig. 6. Dependence of the relative amplitude of the vertical a on the relative distance l :

а – 1 – at a frequency of $n = 50$ Hz; 2 – 25; 3 – 12.5 Hz;

б – under pulse action with different values of pulse duration t

При изменении жесткости плиты (за счет ступенчатого уменьшения ее толщины T с 3 м в начале до 0,5 м в конце, считая от поверхности грунта, в направлении распространения колебаний) длиной $L = 10$ м при частоте вынужденных колебаний $n = 12,5$ Гц амплитуда вертикальных колебаний поверхности на расстоянии 22 м от источника ВДВ снизилась на 18,5 %. Объем бетона в плите уменьшился на 55 %. Таким образом, данный метод обладает большим потенциалом для дальнейшего совершенствования.

Для оценки применимости полученных данных к другим грунтовым условиям проведена серия аналогичных расчетов для грунтов с динамическими модулями упругости E , равными 100, 150, 200 и 250 МПа. Рассматривались вертикальные колебания поверхности грунта на 5 м за отсечной конструкцией шириной 3 м. Данные представлены на рис. 7.

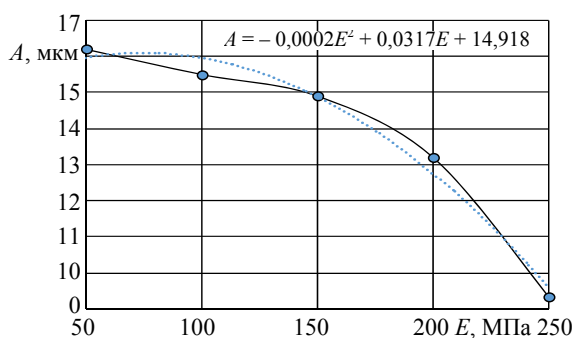


Рис. 7. Зависимость амплитуды вертикальных колебаний грунта A , мкм, от динамического модуля упругости E , МПа, на расстоянии 5 м от барьера шириной 3 м при вынужденной частоте колебаний $n = 25$ Гц

Fig. 7. Dependence of the amplitude of vertical oscillations of the soil A , μm , on the dynamic modulus of elasticity E , MPa, at a distance of 5 m from a barrier 3 m wide at a forced oscillation frequency $n = 25$ Hz

Из представленных данных следует, что с увеличением динамического модуля упругости среды E амплитуда вертикальных колебаний поверхности грунта значительно уменьшается. При увеличении модуля E в пять раз амплитуда A уменьшилась в 1,74 раза. Это связано с повышением сейсмической жесткости среды. Закономерности в демпфировании колебаний инерционной плитой не изменяются.

ВЫВОДЫ

1. Выявлены основные параметры горизонтального инерционного барьера, определяющие

эффект демпфирования колебаний, распространяющихся в грунтовой среде от внешних источников вибродинамических воздействий.

2. Использование горизонтального инерционного барьера в виде бетонной плиты, как способа виброизоляции зданий и сооружений от распространяющихся в грунте поверхностных волн, является эффективным техническим решением. Снижение вертикальных амплитуд колебаний поверхности грунта за барьером может достигать 87 % при гармонических колебаниях и 82 % при импульсных воздействиях. При этом барьер прост в изготовлении и не требует значительных трудозатрат.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудрявцев, И. А. Влияние вибрации на основания и сооружения / И. А. Кудрявцев. Гомель: БелГУТ, 1999. 247 с.
2. Разработка способов повышения эксплуатационной надежности и долговечности конструкций зданий и сооружений при реконструкции и модернизации производства, сопровождающегося интенсивными вибродинамическими воздействиями: отчет о НИР (заключ.) / Белорусский национальный технический университет; рук. темы К. Э. Повколос. Минск, 2018. 82 с. № ГР 20160898.
3. Здания и сооружения. Оценка степени физического износа: ТКП 45-1.04-119-2008. Введ. 29.10.08. Минск: РУП «Стройтехнорм», 2009. 136 с.
4. Мангушев, Р. А. Оценка динамического воздействия от вибропогружения шпунтовых свай на здания окружающей застройки в условиях слабых водонасыщенных грунтов / Р. А. Мангушев, А. В. Гурский, В. М. Полунин // Construction and Geotechnics. 2020. Т. 11, № 3. С. 102–116. <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2020.3.09>.
5. Калюжнюк, М. М. Сваебойные работы при реконструкции (Влияние колебаний на здания и сооружения) / М. М. Калюжнюк, В. К. Рудь. Л.: Стройиздат, 1989. 160 с.
6. Основания и фундаменты зданий и сооружений. Фундаменты при вибродинамических воздействиях. Правила проектирования: ТКП 45-5.01-264-2012. Введ. 28.05.12. Минск: РУП «Стройтехнорм», 2012. 43 с.
7. Кузнецов, С. В. Горизонтальные сейсмические барьеры для защиты от сейсмических волн / С. В. Кузнецов, А. Э. Нафасов // Вестник МГСУ. 2010. Вып. 4. С. 131–134.
8. Chadwick, P. Foundations of the Theory of Surface Waves in Anisotropic Elastic Materials / P. Chadwick, G. D. Smith // Adv. Appl. Mech. 1977. Vol. 17. P. 303–376. [https://doi.org/10.1016/s0065-2156\(08\)70223-0](https://doi.org/10.1016/s0065-2156(08)70223-0).
9. Нафасов, А. Э. Сейсмические барьеры, для защиты уникальных и исторических зданий и сооружений: автореф. дис. ... к-та. техн. наук: 05.23.17 / А. Э. Нафасов; МГСУ. М., 2012. 20 с.
10. Берлинов, М. В. Основы комплексной оценки динамической работы строительных конструкций при вибрационных воздействиях промышленного оборудования:

дис. ... д-ра. техн. наук: 05.23.01 / М. В. Берлинов. М., 2005. 302 л.

11. Баркан, Д. Д. Динамика оснований и фундаментов / Д. Д. Баркан. Л.: Стройвоенмориздат, 1948. 459 с.
12. Сеймов, В. М. Колебания круглого штампа при сейсмических воздействиях / В. М. Сеймов, В. Д. Шевченко // Динамика оснований, фундаментов и подземных сооружений: Материалы 4-й Всесоюз. конф. по динамике грунтов. Ташкент: Фан, 1977. С. 38–42.
13. Свинкин, М. П. Прогнозирование колебаний грунта при вибрациях фундаментов машин / М. П. Свинкин // Динамика сооружений. Киев: Будівельник, 1973. С. 34–37.
14. Таранов, В. Г. Методики экспериментального определения динамических характеристик основания фундаментов приемников колебаний / В. Г. Таранов // Динамика оснований, фундаментов и подземных сооружений: Материалы 4-й Всесоюз. конф. по динамике грунтов. Ташкент: Фан, 1977. С. 125–128.
15. Томсон, О. И. Колебания каркасов промышленных зданий / О. И. Томсон // Колебания зданий и сооружений: сб. статей. М.: Госстройиздат, 1963. С. 56–71.
5. Kalyuzhnyuk M. M., Rud V. K. (1989) *Piling Works During Reconstruction (Effect of Vibrations on Buildings and Structures)*. Leningrad, Stroyizdat Publ. 160 (in Russian).
6. ТКР [Technical Code of Common Practice] 45-5.01-264–2012. *Bases and Foundations of Buildings and Structures. Foundations under Vibrodynamic Effects. Design Rules*. Minsk, Stroytekhnorm Publ., 2012. 43 (in Russian).
7. Kuznetsov S. V., Nafasov A. E. (2010) Horizontal Seismic Barriers for Protection Against Seismic Waves. *Vestnik MGSU*, (4), 131–134 (in Russian).
8. Chadwick P., Smith G. D. (1977) Foundations of the Theory of Surface Waves in Anisotropic Elastic Materials. *Advances in Applied Mechanics*, 17, 303–376. [https://doi.org/10.1016/s0065-2156\(08\)70223-0](https://doi.org/10.1016/s0065-2156(08)70223-0).
9. Nafasov A. E. (2012) *Seismic Barriers to Protect Unique and Historic Buildings and Structures*. Moscow: Moscow State University of Civil Engineering. 20 (in Russian).
10. Berlinov M. V. (2005) *Fundamentals of a Comprehensive Assessment of the Dynamic Operation of Building Structures under Vibration Effects of Industrial Equipment*. Moscow. 302 (in Russian).
11. Barkan D. D. (1948) *Dynamics of bases and Foundations*. Leningrad, Stroyvoenmorizdat Publ. 459 (in Russian).
12. Seymov V. M., Shevchenko V. D. (1977) Oscillations of a Round Stamp under Seismic Effects. *Dinamika Osnovanii, Fundamentov i Podzemnykh So-Oruzhenii. Materialy 4 Vsesoyuznoi Konferentsii po Dinamike Gruntov* [Dynamics of Bases, Foundations and Underground Structures. Proceedings of the 4th All-Union Conference on Soil Dynamics]. Tashkent: Fan Publ., 38–42 (in Russian).
13. Svinkin M. P. (1973) Prediction of Ground Vibrations During Vibrations of Machine Foundations. *Building Dynamics*. Kyiv, Budivelnik Publ., 34–37 (in Russian).
14. Taranov V. G. (1977) Methods for Experimental Determination of the Dynamic Characteristics of the Base of the Foundations of Vibration Receivers. *Dinamika Osnovanii, Fundamentov i Podzemnykh So-Oruzhenii. Materialy 4 Vsesoyuznoi Konferentsii po Dinamike Gruntov* [Dynamics of Bases, Foundations and Underground Structures. Proceedings of the 4th All-Union Conference on Soil Dynamics]. Tashkent: Fan Publ., 125–128 (in Russian).
15. Tomson O. I. (1963) Vibrations of Frames of Industrial Buildings. *Kolebaniya Zdanii i Sooruzhenii: Sb. Statei* [Vibrations of Buildings and Structures. Collection of Articles]. Moscow: Gosstroizdat Publ., 56–71 (in Russian).

Поступила 10.02.2023

Подписана к печати 11.04.2023

Опубликована онлайн 31.07.2023

REFERENCES

1. Kudryavtsev I. A. (1999) *Effect of Vibration on Ground Beds and Structures*. Gomel, Belarusian State University of Transport. 247 p. (in Russian).
 2. Povkolas K. E. (2018) *Development of Ways to Improve Operational Reliability and Durability of Building Structures and Facilities During Reconstruction and Modernization of Production, Accompanied by Intense Vibrodynamic Effects*: Research Report (Conclusion) No GR 20160898. Minsk, Belarusian National Technical University. 82 (in Russian).
 3. ТКР [Technical Code of Common Practice] 45-1.04-119–2008. *Buildings and Construction. Assessment of the Degree of Physical Wear*. Minsk, Stroyizdat Publ., 2009. 136 (in Russian).
 4. Mangushev R. A., Gursky A. V., Polunin V. M. (2020) Evaluation of the Dynamic Impact From Vibration Driving of Sheet piles on the Buildings of Context Area in Conditions of Weak Water-Saturated Soils. *Construction and Geotechnics*, 11 (3), 102–116. <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2020.3.09> (in Russian).
- Received: 10.02.2023
Accepted: 11.04.2023
Published online: 31.07.2023