

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ БАРЬЕРОВ ИЗ ГАЗОНАПОЛНЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ БАЛЛОНОВ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВИБРАЦИЙ В ГРУНТОВОЙ СРЕДЕ

К. Э. Повколас, кандидат технических наук

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь

Аннотация

Приводятся расчеты параметров вертикального виброизоляционного барьера из соприкасающихся скважин, обсаженных газонаполненными цилиндрическими баллонами под давлением. Барьер предназначен для снижения уровня колебаний грунта за ним, что уменьшает дополнительные динамические усилия в строительных конструкциях и исключает развитие дополнительных вибрационных осадков фундаментов. Моделирование осуществлялось методом конечных элементов. Грунтовая среда рассматривалась как пространственный упругий инерционный массив, ограниченный неотражающими границами. Изучалось изменение параметров колебаний поверхности за барьером в зависимости от изменения его геометрических параметров и частоты вынужденных колебаний источника. Достоверность применения метода конечных элементов для расчета динамических процессов в системе «источник колебаний – среда распространения – приемник колебаний» верифицирована на основании данных маломасштабных лабораторных опытов. Использование вертикального барьера эффективно при виброизоляции фундаментов строений от источников колебаний, расположенных как внутри промышленных цехов, так и вне их. Снижение амплитуд вертикальных колебаний поверхности грунта за барьером может достигать 90 %.

Ключевые слова: *вибрации, здания, сооружения, воздействия, виброизоляция, скорость колебаний.*

Abstract

K. E. Povkolos

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF THE USE OF VERTICAL BARRIERS FROM GAS-FILLED CYLINDRICAL CYLINDERS TO REDUCE VIBRATIONS IN THE SOIL ENVIRONMENT

The article presents calculations of the parameters of a vertical vibration isolation barrier from adjoining wells, cased with gas-filled cylindrical cylinders under pressure. The barrier is designed to reduce the level of ground vibrations behind it, which reduces additional dynamic forces in building structures and eliminates the development of additional vibrational settlements of foundations. Modeling was carried out by the finite element method. The ground medium was considered as a spatial elastic inertial array bounded by non-reflecting boundaries. The change in the parameters of surface oscillations behind the barrier was studied depending on the change in its geometric parameters and the frequency of forced oscillations of the source. The reliability of the application of the finite element method for calculating dynamic processes in the system "oscillation source – propagation medium – oscillation receiver" was confirmed by verification based on data from small-scale laboratory experiments. The use of a vertical barrier is effective in vibration isolation of building foundations from vibration sources located both inside and outside industrial workshops. The decrease in the amplitudes of vertical oscillations of the soil surface behind the barrier can reach 90 %.

Keywords: *vibrations, buildings, structures, impacts, vibration insulation, vibration speed.*

Введение

Развитие промышленности и транспортной инфраструктуры нередко приводит к увеличению вибродинамических воздействий на здания и сооружения, вызывая повреждения строительных конструкций. На опасность колебаний грунта, вызванных работой кузнечных молотов, забивкой свай впервые обратили внимание в начале XX века: в Санкт-Петербурге в период с 1911-го по 1927 г. отмечено резкое увеличение интенсивности развития сред-

негодовых осадок с 0,3 мм/год до 2,2 мм/год, а с 1927 г. по 1953 г. – для зданий, расположенных в пределах 30–35 м от транспортных магистралей [1].

В Беларуси с 2002 г. по 2013 г. увеличилось техногенное вибрационное загрязнение городов до 1,5 раза: от метрополитена на 41, автотранспорта на 44, трамваев на 21, промышленной вибрации на 11 % [2, 3]. Согласно опытным данным, полученным автором [4], даже на

значительном расстоянии от железной дороги (около 300 м), автомобильной дороги и линии метро (около 70 м) взаимное наложение вибраций от этих источников являются препятствием для установки прецизионного оборудования без специальных дорогостоящих мероприятий по виброизоляции.

Можно предположить, что интенсивность вибраций в дальнейшем будет только нарастать. Нарушения эксплуатационной пригодности конструкций зданий и сооружений при забивке свай, вибропогружении шпунта, работе кузнечных механизмов и турбоагрегатов на ТЭС наблюдаются и по сей день [5–7]. Нормативный документ, действующий в Беларуси [8], регламентирует безопасное расстояние от источника до приемника колебаний в 25–30 м в зависимости от конструктивной схемы здания, грунтовых условий, источника воздействия и степени повреждения конструкций. При меньшем расстоянии необходимо осуществлять инструментальный контроль, включающий измерение вибраций и обследование здания (сооружения). Наибольшую опасность представляют забивка свай, вибропогружение и виброизвлечение шпунта, промышленные взрывы, работа кузнечных молотов и копров. При их работе нарушение эксплуатационной пригодности прилегающих строений может проявиться в доли секунды. Расчет дополнительных динамических осадок фундаментов от забивки свай и вибропогружении шпунта приводится в разработанном автором нормативном документе [9].

Следует отметить, что при забивке свай расстояния до здания (сооружения), на которых выполняются санитарные нормы, установленные в Республике Беларусь, более чем в 2,5 раза превышают допустимые по повреждениям строительных конструкций. Для виброизоляции строений и инженерных коммуникаций от колебаний, распространяющихся в грунтовой среде, с середины прошлого века были предприняты попытки устройства вертикальных виброволновых барьеров. Первые исследования были проведены с открытыми траншеями. Ход опытов показал, что их применение ограничено глубиной их вскрытия, которое определяется устойчивостью грунта и не превышает нескольких метров.

Первые исследования эффективности вертикальных барьеров из газонаполненных подушек в грунтовой среде начали проводиться в 1980-х гг. [10, 11]. На первых опытных объектах удалось добиться снижения уровня колебаний изолируемых зданий и сооружений на 50–80 %, если глубина экрана хотя бы приблизительно равнялась длине рэлеевской (поверхностной) волны. Полевые и лабораторные опыты показали, что панели с газовыми подушками могут прослужить более 20 лет [10].

В последних конструктивных решениях вертикальный волновой барьер представлял собой железобетонную панель, к которой крепились горизонтальные цилиндрические баллоны диаметром 150–200 мм с оболочками из прочных полимерных многослойных пластиков под давлением, равным бытовому, от грунта на соответствующей глубине. Траншеи, в которые погружались виброизоляционные пакеты, выполнялись методом «стена в грунте» под защитой бентонитовой суспензии с последующим заполнением цементно-бентонитовым раствором. Пример использования горизонтальных газонаполненных баллонов, соединенных с элементами бетонных панелей и погружаемых в траншею под защитой бентонитовой суспензии, представлен на рис. 1. Эта конструкция широко используется в странах Евросоюза и одновременно выполняет функции виброизоляции строений и противофильтрационных диафрагм в водохозяйственном строительстве.



Рис. 1. Устройство виброзащитного и противофильтрационного барьера из газонаполненных баллонов, погружаемых в траншею, выполненную методом «стена в грунте»

Основная часть

При анализе виброизоляционной эффективности барьеров используют понятия сопротивления среды Z (в нашем случае – грунта и барьера) и коэффициента передачи энергии E_n через барьер [10, 11].

Сопротивление Z определяется по формуле

$$Z = c \cdot \rho,$$

где c – скорость распространения продольных волн; ρ – плотность материала.

Цель использования барьера с газовыми подушками – резкое изменение сопротивления в грунтовой среде. Удельный вес воздуха при температуре 5 °С равен 12,7 Н/м³ в отличие от 15–21,5 кН/м³ у осадочных горных пород. Соответственно, даже при одинаковой скорости распространения продольных волн сжатия-растяжения сопротивление барьера в 1181–1693 раза меньше сопротивления грунтовой среды. Кроме того, воздух не передает сдвиговые напряжения:

$$E_n = \frac{4 \cdot Z_1 \cdot Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2},$$

где Z_1 и Z_2 – сопротивления грунта и барьера соответственно; если $Z_1 = Z_2$, то изоляционный эффект отсутствует.

В качестве заполнения барьера часто используют геопену (геополистирол), которая на 98 % состоит из воздуха, но при этом обладает прочностью и жесткостью, достаточной для восприятия давления грунта на глубинах до 25–30 м [12, 13]. Согласно экспериментальным данным снижение уровня вибраций достигает 78 % при частоте вынужденных колебаний в 50 Гц. Эффективным считается также устройство двухрядных барьеров [12, 13].

Указанные способы виброизоляции имеют как достоинства, так и недостатки. К достоинствам волнового барьера относится возможность его устройства вблизи существующего здания или сооружения, не затрагивая их функциональность, а к недостаткам – необходимость перекладки подземных коммуникаций (при их наличии). Глубокие волновые барьеры выполняются методом «стена в грунте». Полагаем, что данный метод весьма трудоемкий и дорогостоящий, сопровождается «мокрыми» процессами и ограничен в применении в стесненных условиях городской застройки. Предлагаем использовать отсечную конструкцию, в которой газовые цилиндрические баллоны соответствующей формы погружаются в вертикальные соприкасающиеся скважины, бурение которых возможно малогабаритными станками в стесненных условиях. Скважины также могут заполняться геопеной. Данная конструкция может также применяться как противофильтрационная диафрагма в водохозяйственном строительстве.

Целью работы является расчетное обоснование эффективности виброизоляции зданий и сооружений от вибродинамических воздействий, распространяющихся в грунтовой среде, путем устройства стены из соприкасающихся скважин диаметром 500 мм, обсаженных цилиндрическими баллонами под давлением. Пример устройства барьера в промышленном здании приведена на рис. 2. Он может также использоваться для виброзащиты фундамента от внешних колебаний. При этом давление в баллонах принято равным боковому давлению грунта на соответствующей глубине, что позволяет располагать барьер вплотную к существующим фундаментам.

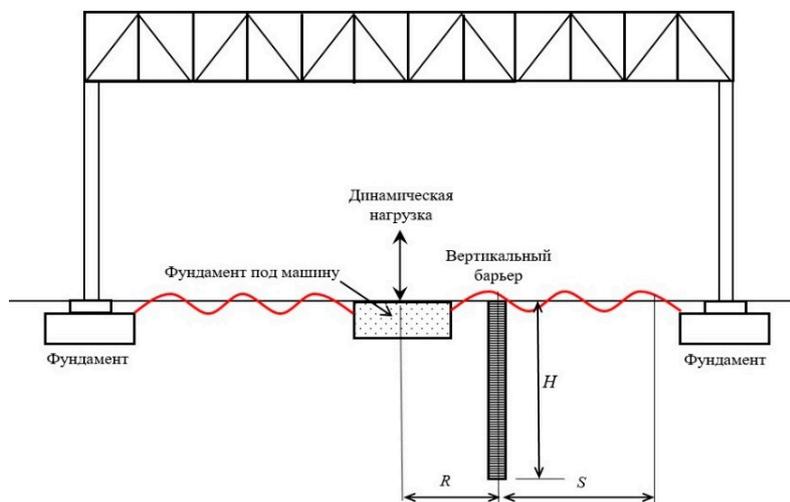


Рис. 2. Схема расположения волнового барьера в промышленном здании

Для достижения указанной цели выполнен комплекс расчетов системы «источник колебаний – среда распространения – приемник колебаний» без барьера и с вброволновым барьером методом конечных элементов. Грунтовый массив моделировался как упругая инерционная среда, поскольку амплитуда генерируемых колебаний мала и грунт не испытывает значительных пластических деформаций в грунтовой среде. Данный метод верифицирован [4]. Боковые и нижняя границы грунтового массива смоделированы так, что динамические усилия не отражаются.

Для оценки возможности повреждения зданий или сооружений полученные данные затем сравниваются с предельной скоростью вертикальных колебаний фундамента или поверхности прилегающего к нему грунта, которая является нормируемым параметром в Ве-

ликобритании, ФРГ, Беларуси, США, Польши, Чехии и Норвегии [4, 8, 9, 14].

С целью моделирования вибродинамических процессов смоделирован грунтовый массив размерами 54 × 40 м высотой 23 м (рис. 3).

Конечно-элементная сеть была сгущена в зоне расположения вброволнового барьера для получения более точных результатов. Общее количество конечных элементов составило 110 142, узлов – 85 864; время интегрирования – 1 сек., шаг интегрирования 0,01 сек.

На рис. 4 представлены графики зависимости максимальных вертикальных колебаний поверхности грунтового массива A_B при различных расстояниях S от оси барьера до рассматриваемой точки, частоте вынужденных колебаний $n = 50$ Гц, расстоянии от оси барьера до источника вибродинамических воздействий $R = 7$ м и длины барьера $L = 40$ м.

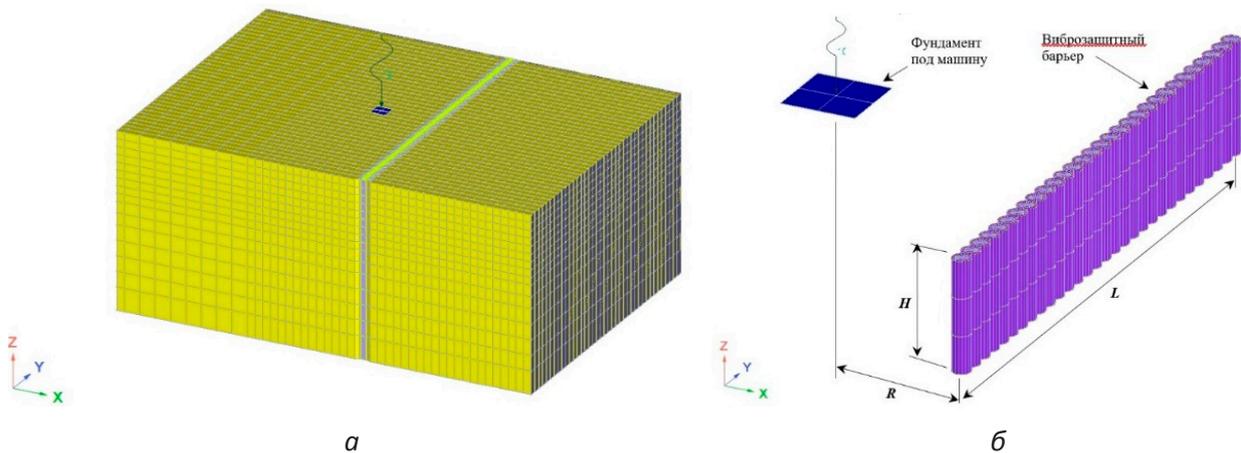


Рис. 3. Конечно-элементная схема грунтового пространственного массива:
 а – модель грунтового массива;
 б – взаимное положение фундамента под машину и виброзащитного барьера

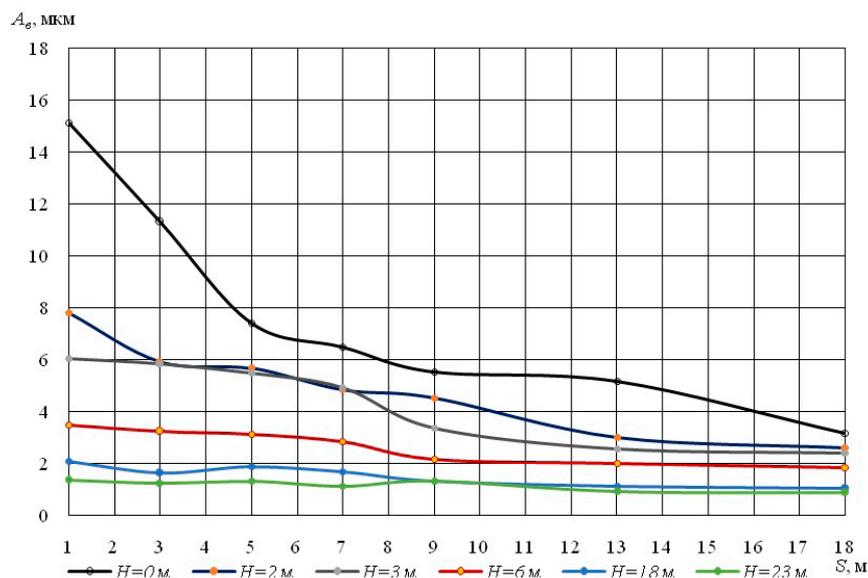


Рис. 4. Зависимость амплитуды вертикальных колебаний поверхности грунтового массива A_B от расстояния S

Данные на рис. 4 показывают что с увеличением глубины барьера H амплитуда вертикальных колебаний A_B за барьером снижается. При увеличении глубины барьера более 18 м существенного снижения амплитуд колебаний не наблюдается.

Для оценки снижения колебаний грунта при наличии барьера по сравнению со свободным распространением колебаний воспользуемся безразмерной величиной относительно снижения колебаний $a(S)$, определяемой как отношение амплитуды вертикальных колебаний поверхности грунта при наличии барьера к аналогичной амплитуде при отсутствии барьера в той же точке. Снижение относительной амплитуды вертикальных колебаний грунта за барьером можно описать следующей экспоненциальной зависимостью:

$$a(S) = a_1 \cdot e^{-nS};$$

где n – коэффициент ($n = 0,027$ при $H = 23$ м; $n = 0,042$ при $H = 18$ м; $n = 0,041$ при $H = 6$ м; $n = 0,064$ при H , равной 2 и 3 м; $n = 0,083$ при отсутствии барьера);

S – расстояние от оси барьера до рассматриваемой точки в направлении распространения колебаний;

a_1 – относительная амплитуда вертикальных колебаний на поверхности грунтового массива на расстоянии $S = 1$ м, определяемая по формуле:

$$a_1 = \frac{A_{B61}}{A_{B6}},$$

где A_{B61} – максимальная амплитуда вертикальных колебаний поверхности грунта на расстоянии $S = 1$ м при наличии барьера;

A_{B6} – максимальная амплитуда вертикальных колебаний поверхности грунта на расстоянии $S = 1$ м при отсутствии барьера.

Величина $a_1 = 1,0$ при отсутствии барьера; $a_1 = 0,573$ при $H = 2$ м; $a_1 = 0,509$ при $H = 3$ м; $a_1 = 0,269$ при $H = 6$ м; $a_1 = 0,155$ при $H = 18$ м; $a_1 = 0,106$ при $H = 23$ м.

На рис. 5 показаны зависимости максимальных вертикальных амплитуд колебаний грунта за барьером A_B в зависимости от его длины L при глубине $H = 3$ м. Из представленных данных следует, что увеличение длины барьера L при фиксированной глубине H приводит к различному снижению амплитуд колебаний на различных расстояниях за барьером. На рис. 6 – зависимость относительной амплитуды максимальных вертикальных колебаний поверхности грунта a за барьером от его глубины H : относительная амплитуда максимальных вертикальных колебаний поверхности грунта a за барьером уменьшается с ростом глубины барьера H . Наибольший эффект демпфирования наблюдается непосредственно за барьером при $H = 23$ м.

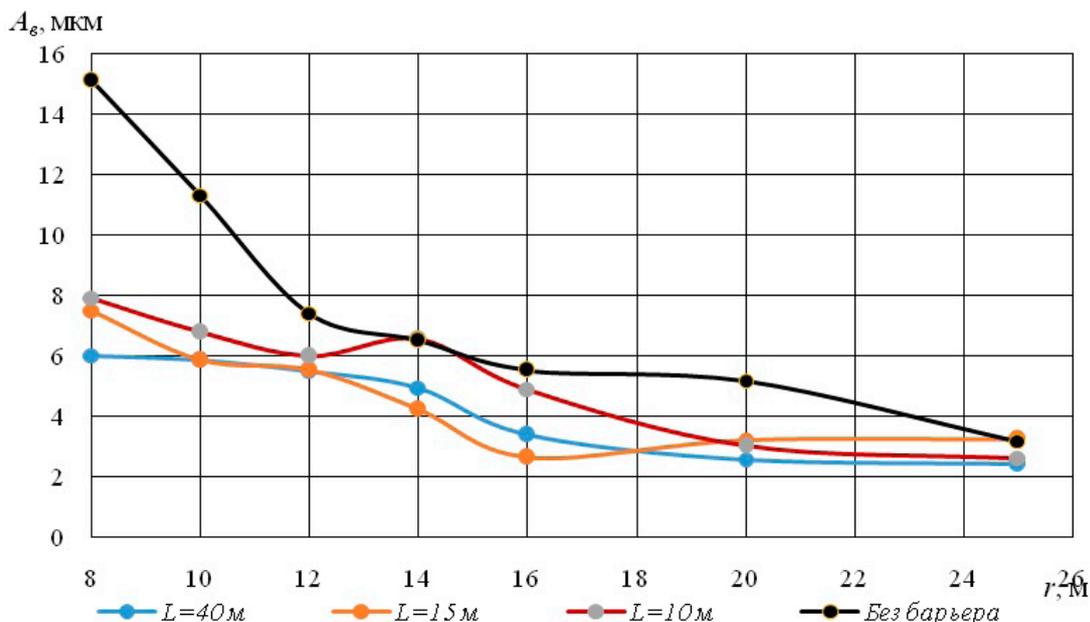


Рис. 5. Зависимость максимальной амплитуды вертикальных колебаний A_B от расстояния до источника колебаний при расположении барьера на расстоянии $R = 7$ м при различной ширине траншеи L (м) и ее глубине $H = 3$ м

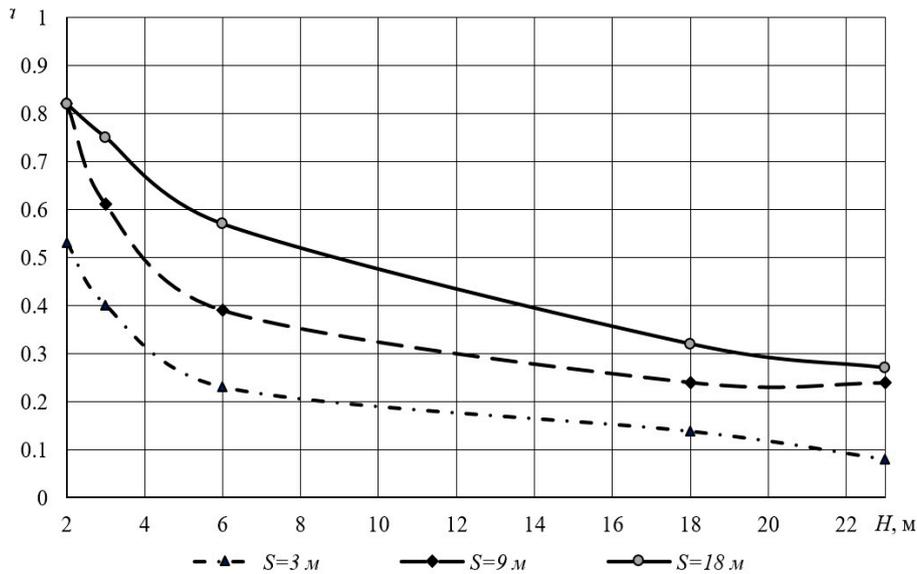


Рис. 6. Зависимость относительной амплитуды колебаний a от глубины барьера H на различных расстояниях за подпорной стенкой S

Зависимость относительного снижения вертикальных колебаний a от глубина барьера H можно описать следующей степенной функцией:

$$a(H) = a_2 \cdot H^{-k},$$

где k – коэффициент ($k = 0,463$ при $S = 18$ м; $k = 0,508$ при $S = 9$ м; $k = 0,706$ при $S = 3$);

a_2 – относительная амплитуда вертикальных колебаний на поверхности грунтового массива, определяемая по формуле:

$$a_2 = \frac{A_{B62}}{A_{B6}},$$

где A_{B6} – максимальная амплитуда вертикальных колебаний поверхности грунта при $H = 2$ м.

Выводы

Использование вертикального виброволнового барьера, выполненного из вертикальных соприкасающихся скважин, обсаженных газонаполненными цилиндрическими баллонами под давлением, является эффективным

Величина $a_2 = 1,211$ при $S = 18$ м, $a_2 = 1,082$ при $S = 9$ м, $a_2 = 0,862$ при $S = 3$ м.

Величина относительной амплитуды максимальных вертикальных колебаний поверхности грунта a за барьером зависит также от частоты вынужденных колебаний n источника. С увеличением частоты вынужденных колебаний n относительная амплитуда вертикальных колебаний грунта за барьером a в целом увеличивается, то есть эффект демпфирования снижается. Например, при $H = 3$ м и частоте колебаний 50 Гц $a = 0,56$; при $n = 25$ Гц $a = 0,31$; при $n = 12,5$ Гц $a = 0,28$ на расстоянии $S = 9$ м.

конструктивным решением для демпфирования колебаний, распространяющихся в грунтовой среде. Снижение параметров колебаний грунта за барьером, в направлении виброизолируемого объекта, может достигать 90 %.

Библиографический список

1. Савинов, О. А. Современные конструкции фундаментов под машины и их расчет / О. А. Савинов. – 2-е изд. – Л. : Стройиздат, 1979. – 200 с.
2. Кудрявцев, И. А. Влияние вибрации на основания и сооружения / И. А. Кудрявцев. – Гомель : БелГУТ, 1999. – 247 с.
3. Кравцов, В. Н. Осадки оснований плитных фундаментов при длительном воздействии на них динамических нагрузок малой интенсивности / В. Н. Кравцов, П. В. Лапатин // Геотехника Беларуси: наука и практика : материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 60-летию кафедры оснований, фундаментов и инженерной геологии и 90-летию со дня рождения

проф. Ю. А. Соболевского, Минск, 23–25 окт. 2013 г. : в 2 ч. / Белорус. нац. техн. ун-т.; ред.: М. И. Никитенко, Д. Ю. Соболевский, Т. М. Уласик. – Минск : БНТУ, 2013. – Ч. 1. – С. 150–157.

4. Разработка способов повышения эксплуатационной надежности и долговечности конструкций зданий и сооружений при реконструкции и модернизации производства, сопровождающегося интенсивными вибродинамическими воздействиями : отчет о НИР (заключ.) / Белорус. нац. техн. ун-т ; рук. К. Э. Повколос. – Минск, 2018. – 82 с. – № ГР 20160898.

5. 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. – Москва, 2005. – 302 л.

6. Экспериментальная динамика сооружений. Мониторинг транспортной вибрации / Е. К. Борисов, С. Г. Алимов, А. Г. Усов [и др.]. – Петропавловск-Камчатский : КамчатГТУ, 2007. – 128 с.

7. Калюжнюк, М. М. Сваебойные работы при реконструкции (влияние колебаний на здания и сооружения) / М. М. Калюжнюк, В. К. Рудь. – Л. : Стройиздат, 1989. – 161 с.

8. Основания и фундаменты, инженерные изыскания. Фундаменты плитные. Правила проектирования : ТКП 45-5.01-67-2007. – Введ. 2.04.07. – Минск : РУП «Стройтехнорм», 2007. – 136 с.

9. 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. – 114 с.

10. Массарч, К. Р. Виброизоляция с использованием газонаполненных подушек / К. Р. Массарч // Развитие городов и геотехн. строительство. – 2006. – № 10. – С. 176–191.

11. Massarch, K. R. Ground Vibration Isolation using gas cushions / K. R. Massarch // 2nd Intern. conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics. – USA, University of Missouri – Rolla, 13 Mar. 1991. – P. 1461–1470.

12. Alzawi, A. Full scale experimental study on vibration scattering using open and in-filled (geofoam) wave barriers / A. Alzawi, M. H. El Naggar // Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Mar. 2011. – Vol. 31, iss. 3. – P. 306–317. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2010.08.010>

13. 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, Dec. 2020. – Vol. 139. – P. 106416. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106416>

14. Вибрация и удар. Вибрация зданий. Измерение вибрации и ее воздействие на конструкцию : ГОСТ Р 52892–2007. – Введ. 27.12.07. – Москва : Федер. агентство по техн. регулированию и метрологии, ОАЛ «Научно-исследовательский центр контроля и диагностики технических систем», 2007. – 16 с.

Поступила 25 ноября 2022 г.