

УДК 624.159.1

DOI 10.52928/2070-1683-2023-34-2-32-37

МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ПРИ ВИБРОДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ, ПЕРЕДАВАЕМЫХ ЧЕРЕЗ ГРУНТОВУЮ СРЕДУ, И СПОСОБЫ ИХ УСТРАНЕНИЯ

канд. техн. наук, доц. К.Э. ПОВКОЛАС
(Белорусский национальный технический университет, Минск)
ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4852-7891>

Предложена методика определения возможности повреждения строительных конструкций зданий и сооружений в случае передачи вибродинамических воздействий на них через фундамент от внешних источников вибраций. Суть методики состоит в определении максимальной скорости колебаний фундамента и грунта перед ним методом конечных элементов с последующим сравнением полученной величины с лимитируемой скоростью колебаний. На основании этого сравнения рассмотрено 4 возможных варианта: повреждения отсутствуют, появляются малозначительные, значительные или критические дефекты. В 3-х последних случаях выполняются мероприятия по виброзащите строительных конструкций. Рассмотрено 3 варианта виброизоляции, позволяющих снизить скорость вертикальных колебаний более чем на 80%: устройство горизонтального инерционного барьера в виде заглубленной бетонной плиты; устройство вертикального барьера в виде соприкасающихся буровых скважин, заполненных легкосжимаемыми материалами или обсаженных газонаполненными баллонами под давлением; комбинация указанных способов. Показано, что применение указанных способов виброизоляции позволяет избежать повреждения строений в случае превышения предельной скорости колебаний.

Ключевые слова: вибродинамические воздействия, строительные конструкции, повреждения, расчет, виброизоляция.

Введение. Актуальность исследования заключается в необходимости прогнозирования повреждений строительных конструкций и осадок фундаментов при воздействии на них вибраций, передаваемых через грунтовую среду. Данные воздействия широко распространены вблизи промышленных объектов, линий транспортной инфраструктуры и площадок строительства. Негативное влияние вибраций на строительные конструкции зданий и сооружений выражается в нарушении их эксплуатационной надежности вследствие появления дефектов, а также в развитии дополнительных динамических осадок. Для долгосрочного количественного прогнозирования изменения эксплуатационной пригодности зданий или сооружений от действия ж/д транспорта можно использовать методику, разработанную профессором Кудрявцевым И.А. [1] на основании данных многолетних наблюдений. Влияние транспортной вибрации на строительные конструкции зданий и сооружений рассматривается в работе [2], забивки свай – в [3]. Значительное влияние оказывает работа промышленных установок¹. Автором проведен ряд собственных исследований, данные которых приведены в статье [4]. Их сравнение с результатами исследований влияния вибраций на здания и сооружения, проведенных в различных странах², позволило выявить стандарт Великобритании, совпадающий с результатами инструментальных измерений вибраций, выполненных автором. Данный стандарт позволяет выделить зоны вероятных повреждений строительных конструкций вблизи источника вибраций – малозначительных, значительных или критических.

Целью работы является разработка методики прогнозирования повреждений зданий и сооружений путем построения математической модели на основе метода конечных элементов. В случае, если выявлена возможность появления дефектов, предложить и рассчитать вариант виброизоляции грунтовой среды.

Для реализации предлагаемой методики необходимо решить следующие задачи, отражающие ход решения проблемы обеспечения эксплуатационной надежности строительных конструкций зданий и сооружений при вибродинамических нагрузках, передающихся на них через грунтовую среду:

- 1) выполнить численное моделирование процесса распространения поверхностных волн вокруг точечного источника гармонических колебаний;
- 2) сравнить расчетные величины скорости вертикальных колебаний фундамента и грунта перед ним с предельными параметрами для выбранного типа здания;
- 3) в случае превышения предельных параметров колебаний подобрать и рассчитать оптимальную конструктивную схему виброизоляции грунтовой среды (вертикальная стена в грунте, горизонтальный бетонный барьер или их комбинация).

Применение вертикального барьера с использованием горизонтальных газонаполненных баллонов под давлением, присоединенных к сборным железобетонным плитам, для виброизоляции строений рассмотрено в работах³ [5]. Технология их устройства предполагает применение широко распространенного метода «стена в грунте»,

¹ Берлинов М.В. Основы комплексной оценки динамической работы строительных конструкций при вибрационных воздействиях промышленного оборудования: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01. – М., 2005. – 302 л.

² ГОСТ Р 52892–2007. Вибрация и удар. Вибрация зданий. Измерение вибрации и ее воздействие на конструкцию. – М.: Стандартинформ, 2008. – 16 с.

³ Massarch K.R. Ground Vibration Isolation Using Gas Cushions // International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Engineering and Soil Dynamics, USA, Luis, 11–15 March 1991. – USA, Missouri, Luis, 1991. – P. 1461–1470.

который требует наличия специализированного механизированного оборудования и значительной площади строительной площадки, а также сопровождается «мокрыми» процессами. Предлагаемый автором конструктивный вариант вертикального барьера выполняется из соприкасающихся вертикальных скважин, которые можно бурить при помощи малогабаритных станков и ручным буровым инструментом, что особенно важно в стесненных условиях городской застройки.

Идея использовать горизонтальный барьер на поверхности грунта для гашения поверхностных сейсмических волн в грунте приведена в работе [6]. Автором данной статьи рассмотрена объемная задача применительно к промышленной сейсмике для локальной виброизоляции отдельных строений и их частей от техногенных источников вибрации.

Применение данной методики рассмотрим на следующем примере. Вблизи одноэтажного однопролетного промышленного здания на расстоянии 9 м устанавливается фундамент под машину (к примеру, виброштамповочный стенд для изготовления строительных конструкций) с вертикальными гармоническими колебаниями частотой 25 Гц и амплитудой динамической нагрузки $P_0 = 100$ кН. Несущие конструкции – монолитные колонны 400×400 мм и железобетонная балка покрытия пролетом 12 м. Фундаменты под колонны – плитные столбчатые с размерами подошвы 2000×2000 мм толщиной 0,5 м. Высота до низа стропильной конструкции 6 м. Ограждающие конструкции – сэндвич-панели. Покрытие – профнастил по стальным прогонам. Взаимное расположение поперечной рамы промздания и источника вибродинамических воздействий представлено на рисунке 1.

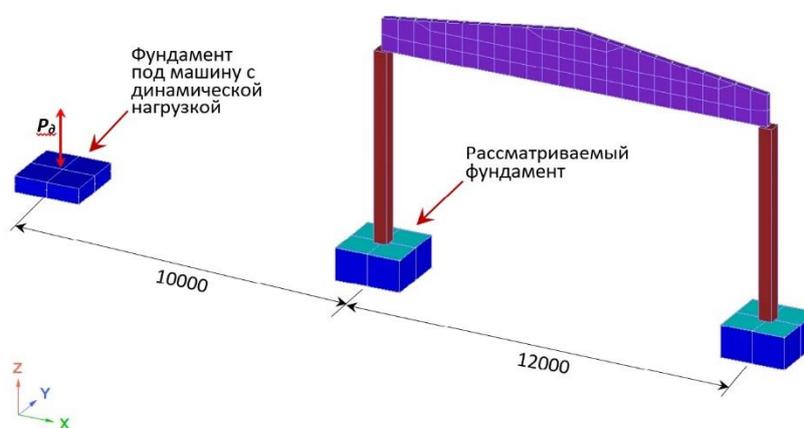


Рисунок 1. – Взаимное расположение здания и источника вибраций

Конечно-элементная схема смоделированного грунтового пространственного массива размерами 44×40 м высотой 23 м представлена на рисунке 2.

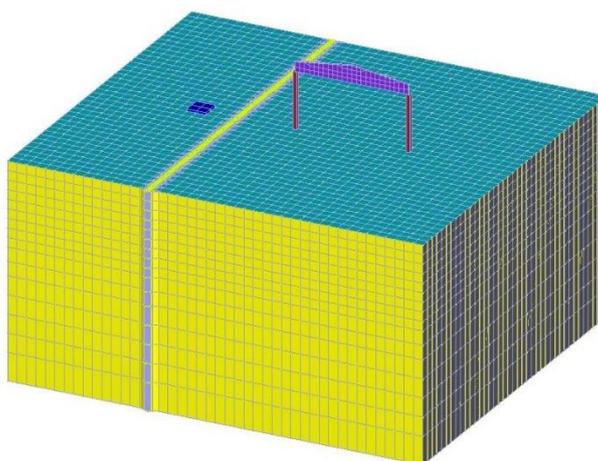


Рисунок 2. – Конечно-элементная схема грунтового пространственного массива

Расчет выполнялся в конечно-элементном расчетном комплексе Lira 10.8 с использованием элементов, моделирующих упругое инерционное полупространство. Общее количество конечных элементов составило 108 796, узлов – 85 269. Время интегрирования 0,5 с, шаг интегрирования 0,01 с. Для исключения отражения волны от боковых и нижней границ массива применялся оболочечный конечный элемент «неотражаемые границы».

Физико-механические свойства грунтового массива были приняты следующими:

- удельный вес грунта $\gamma = 20$ кН/м³;

- динамический модуль упругости $E_0 = 50$ МПа;
- коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$.

Результаты численного моделирования виброизоляции зданий и сооружений. По результатам расчета схемы без виброизоляции (см. рисунок 1) установлено, что максимальная величина скорости вертикальных колебаний фундамента 58,5 мм/с превышает предельную величину, при достижении которой возможно появление повреждений строительных конструкций. По нормативным документам⁴, принятым в ряде стран, это превышение составило: 17% для Великобритании, 216% для Германии, 146% для США, 292% для Норвегии.

С целью снижения вибродинамических воздействий было смоделировано 3 схемы виброизоляции грунтовой среды:

- устройство вертикального барьера глубиной 3 м в виде соприкасающихся буровых скважин диаметром 500 мм, обсаженных газонаполненными баллонами под давлением;
- устройство горизонтального инерционного барьера в виде заглубленной бетонной плиты шириной 5 м и глубиной 2 м между источником колебаний и поперечной рамой промздания;
- комбинация указанных схем.

Аналогичный подход в виброизоляции строительных конструкций можно использовать и при расположении технологического оборудования внутри промышленных зданий.

Геометрические параметры схемы виброизоляции с использованием вертикального барьера представлены на рисунке 3.

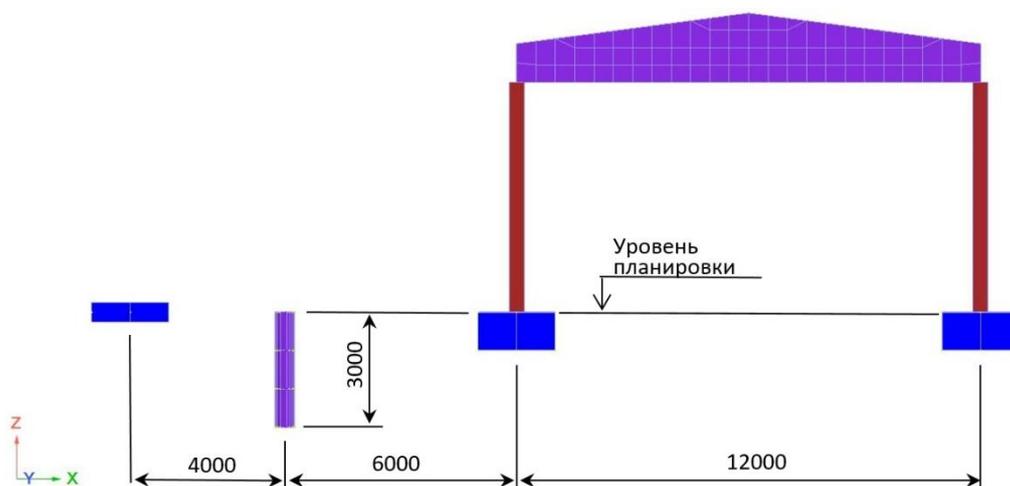


Рисунок 3. – Конечно-элементная схема с использованием вертикального барьера

При моделировании вертикального барьера скорость вертикальных колебаний фундамента составила 23,7 мм/с.

На рисунке 4 приведена расчетная схема виброизоляции с использованием горизонтального барьера.

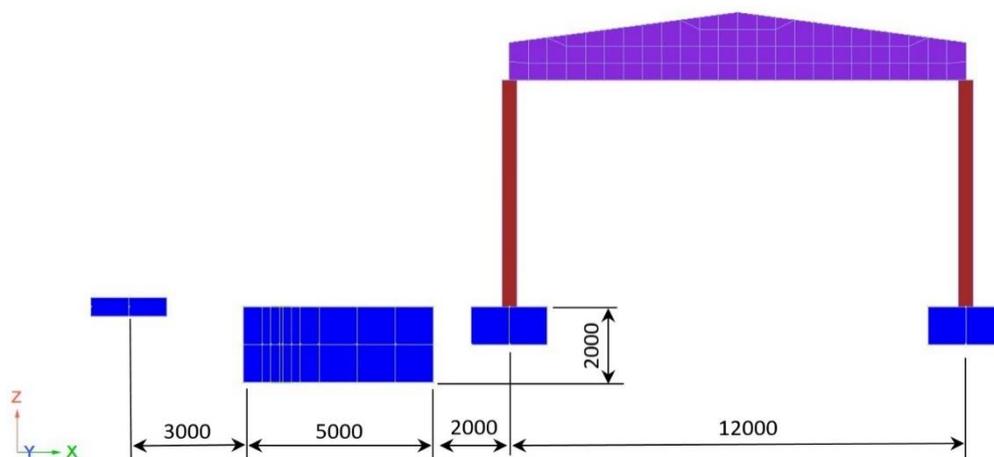


Рисунок 4. – Конечно-элементная схема с использованием горизонтального барьера

⁴ См. сноску 2.

По результатам расчета данного варианта виброизоляции скорость вертикальных колебаний фундамента составила 10,2 мм/с, что в 2,3 раза ниже, чем в случае применения вертикального барьера.

На рисунке 5 приведена комбинированная расчетная схема.

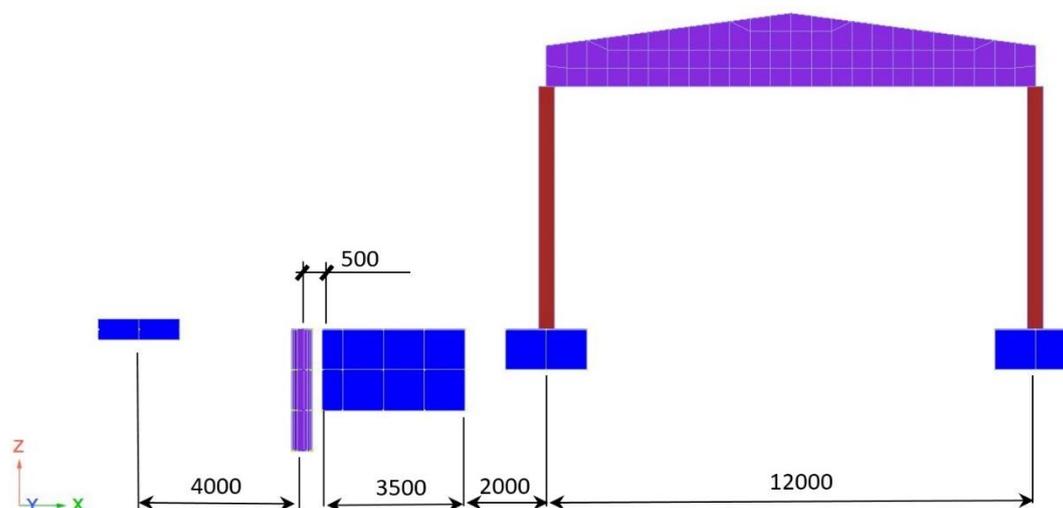


Рисунок 5. – Конечно-элементная схема с комбинацией вертикального и горизонтального барьеров

В этом случае скорость вертикальных колебаний существующего фундамента, наиболее близкого к источнику вибраций, составила 13,1 мм/с, что несколько больше, чем в варианте с горизонтальным инерционным барьером.

Все полученные данные сведены в таблицу 1.

Таблица 1. – Сравнение предельных величин вертикальных скоростей колебаний фундамента промышленного здания по нормам⁵ ряда стран с результатами расчетов

Страна	Предельные величины скорости вертикальных колебаний фундаментов промзданий, принятые в нормах ⁶ стран для частоты вынужденных колебаний 25 Гц, мм/с	Величина скорости вертикальных колебаний фундамента моделируемого промздания, мм/с (разница в % с предельными величинами)			
		Без виброизоляции	Вертикальный барьер	Горизонтальный инерционный барьер	Комбинация вертикального и горизонтального барьеров
Великобритания	50	58,5 (+17)	23,7 (-52,6)	10,2 (-79,6)	13,1 (-73,8)
Германия	27	58,5 (+216)	23,7 (-12,2)	10,2 (-62,2)	13,1 (-51,5)
США	40	58,5 (+146)	23,7 (-40,75)	10,2 (-74,5)	13,1 (-67,25)
Норвегия	20	58,5 (+292)	23,7 (+15,6)	10,2 (-49)	13,1 (-34,5)

Из представленных в таблице данных следует, что применение всех рассматриваемых схем виброизоляции приводит к значительному снижению скорости колебания столбчатого фундамента под колонну поперечной рамы промздания до безопасных величин, за исключением варианта использования вертикального 3-х метрового барьера в случае сравнения с нормами Норвегии. Здесь превышение составило 15,6%.

Для достижения положительного эффекта расчетная схема вертикального барьера была скорректирована. На 11-м участке вертикального барьера, по 5,5 м в стороны от линии, соединяющей источник вибраций и фундамент-приемник колебаний, глубина вертикального барьера была увеличена с 3-х до 6 м (рисунок 6).

Величина скорости вертикальных колебаний фундамента моделируемого промздания при этом составила 9,94 мм/с и позволила снизить скорость колебаний на 80,12%, 63,19%, 75,15% и 50,3% соответственно по нормам Великобритании, Германии, США и Норвегии, практически исключив вероятность повреждения строения.

⁵ См. сноску 2.

⁶ См. сноску 2.

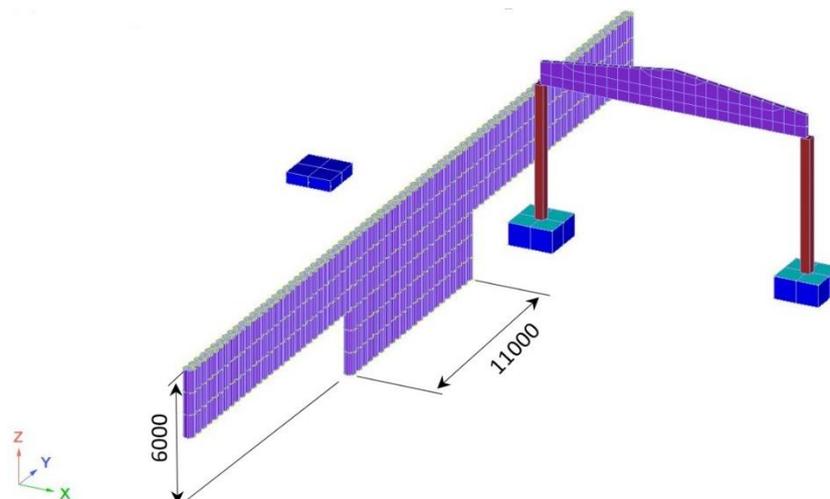


Рисунок 6. – Конечно-элементная схема с вертикальным барьером переменной глубины

Для количественной оценки передачи колебаний от грунта фундаменту введем понятие коэффициента передачи K , который определяется по формуле:

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

где $A_{f\max}$ – максимальное вертикальное перемещение фундамента;

$A_{g\max}$ – максимальное вертикальное перемещение поверхности грунта при отсутствии фундамента, на месте его последующего размещения.

Коэффициент K является важной характеристикой для прогнозирования колебаний фундамента проектируемого здания в случае, когда известна карта вибрационных полей в пятне застройки.

Величина коэффициента передачи колебаний K по данным расчета составила:

- 0,9 при отсутствии виброизоляции;
- 0,84 при использовании вертикального барьера глубиной 3 м;
- 0,9 при применении горизонтального барьера шириной 5 м;
- 0,97 при комбинации вертикального и горизонтального барьеров;
- 0,91 при увеличенной до 6 м глубине вертикального барьера.

Несомненным достоинством вертикального барьера из соприкасающихся буровых скважин, заполненных геопеной или баллонами под давлением, является возможность его устройства с использованием малогабаритных станков в стесненных условиях, в том числе и внутри здания. Его можно выполнять в непосредственной близости от изолируемого фундамента, установив давления в баллонах равными действующим горизонтальным напряжениям в грунте. Изготовление горизонтального инерционного барьера в виде заглубленной бетонной плиты, которая, хотя и проста в изготовлении, требует определенного пространства, значительного расхода бетона и объема механизированных земляных работ.

Заключение. На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. Предложена методика прогнозирования повреждений конструкций зданий и сооружений при вибродинамических воздействиях, передаваемых через грунтовую среду. Разработаны способы виброизоляции, позволяющие обеспечить эксплуатационную надежность строений.

2. Наиболее эффективными техническими решениями, обеспечивающими снижение уровня колебаний до допустимого, являются вертикальный барьер из соприкасающихся скважин, обсаженных газонаполненными баллонами под давлением, и горизонтальный барьер в виде заглубленной в грунт бетонной плиты. Их использование позволяет достичь снижения скорости вертикальных колебаний фундамента-приемника колебаний не менее чем на 80%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудрявцев И.А. Влияние вибрации на основания и сооружения. – Гомель: БелГУТ, 1999. – 247 с.
2. Экспериментальная динамика сооружений. Мониторинг транспортной вибрации: моногр. / Е.К. Борисов, С.Г. Алимов, А.Г. Усов и др. – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2007. – 128 с.
3. Калюжнюк М.М., Рудь В.К. Сваебойные работы при реконструкции. Влияние колебаний на здания и сооружения. – Л.: Стройиздат, 1989. – 160 с.

4. Повколас К.Э. Влияние вибродинамических воздействий на здания и сооружения // Эксперт: теория и практика. Сер. Стр-во и архитектура. – 2023. – № 1 (20). – С. 111–115. DOI: 10.51608/26867818_2023_1_111.
5. Массарч 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.

REFERENCES

1. Kudryavtsev, I.A. (1999). *Vliyanie vibratsii na osnovaniya i sooruzheniya*. Gomel: BelGUT. (In Russ.).
2. Borisov, E.K., Alimov, S.G., Usov, A.G., Lysak, L.G., Krylova, T.V. & Stepanova, E.A. (2007). *Eksperimental'naya dinamika sooruzhenii. Monitoring transportnoi vibratsii: monogr.* Petropavlovsk-Kamchatskii: KamchatGTU. (In Russ.).
3. Kalyuzhnyuk, M.M. & Rud', V.K. (1989). *Svaeboinye raboty pri rekonstruktsii. Vliyanie kolebaniy na zdaniya i sooruzheniya*. Leningrad: Stroiizdat. (In Russ.).
4. Povkolas, K.E. (2023). Vliyanie vibrodinamicheskikh vozdeystviy na zdaniya i sooruzheniya [Influence of vibrodynamic effects on buildings and structures]. *Ekspert: teoriya i praktika. Ser. Str-vo i arkhitektura [Expert: theory and practice]*, 1(20), 111–115. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.51608/26867818_2023_1_111.
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.).

Поступила 21.05.2023

METHOD FOR PREDICTION OF DAMAGE TO BUILDING STRUCTURES OF BUILDINGS AND STRUCTURES UNDER VIBRODYNAMIC IMPACTS TRANSMITTED THROUGH THE GROUND ENVIRONMENT, AND WAYS TO ELIMINATE THEM

K. POVKOLAS

(Belarusian National Technical University, Minsk)

A method for determining the possibility of damage to the building structures of buildings and structures in the case of transmission of vibrodynamic effects on them through the foundation from external vibration sources is proposed. The essence of the technique is to determine the maximum vibration speed of the foundation and the soil in front of it by the finite element method, followed by a comparison of the obtained value with the limited vibration speed. Based on this comparison, 4 possible options are considered: there are no damages, minor, significant or critical defects appear. In the last 3 cases, measures are taken to protect building structures from vibration. 3 variants of vibration isolation are considered, which allow to reduce the rate of vertical oscillations by more than 80%: installation of a horizontal inertial barrier in the form of a deepened concrete slab; installation of a vertical barrier in the form of adjoining boreholes filled with easily compressible materials or cased with gas-filled cylinders under pressure; a combination of these methods. It is shown that the use of these methods of vibration isolation makes it possible to avoid damage to buildings in case of exceeding the limiting speed of vibrations.

Keywords: *vibrodynamic effects, building structures, damage, calculation, vibration isolation.*