

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-2-131-140>

УДК 624.159.1

## Оценка эффективности некоторых способов виброизоляции существующих зданий и сооружений от вибродинамических воздействий, распространяющихся в грунтовой среде

Канд. техн. наук К. Э. Повколас<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

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

**Реферат.** В статье приводятся расчеты различных конструктивных схем виброизоляции здания с железобетонным каркасом от источника вибродинамического воздействия, расположенного за его пределами. Отмечается, что в большинстве исследований в качестве критерия риска повреждения несущих строительных конструкций используют максимальную величину скорости вертикальных колебаний фундамента или грунта перед ним. Выделены основные факторы, определяющие риск повреждения конструкций, к которым относятся: инженерно-геологические условия грунта в основании фундаментов, подвергающихся воздействию, степень повреждения здания, тип и конструкция здания или сооружения, частота колебаний, продолжительность действия вибрации, расстояние до источника колебаний, вид источника колебаний, материал сооружения и тип фундамента. На основании анализа факторов, определяющих риск повреждения конструкций, выделены параметры здания или сооружения, наименее чувствительного к вибродинамическим воздействиям и обладающего большей эксплуатационной надежностью. Оно должно быть с каркасом из железобетона или стали, не иметь повреждений, располагаться на фундаментах из свай-стоек в прочных маловлажных крупных песках или твердых глинах. Предлагаемые конструктивные схемы виброизоляции в основном базируются на одном из механизмов демпфирования колебаний в грунтовой среде – рассеянии на неоднородностях. В качестве основного инструмента теоретических исследований использовался метод конечных элементов. Грунтовая среда рассматривалась как упругий инерционный массив, ограниченный неотражающими границами. Достоверность его применения для расчета развития динамических процессов в системе «источник колебаний – среда распространения – приемник колебаний» была подтверждена верификацией на основании данных маломасштабных лабораторных опытов. Использование метода конечных элементов позволяет учесть пространственную изменчивость грунтовых условий, свойства материалов, конструктивные особенности зданий и сооружений, величину, направление и точку приложения динамической нагрузки, а также осуществлять моделирование и оптимизацию различных схем виброзащиты. Рассмотрены семь вариантов виброизоляции: устройство инерционной плиты на поверхности грунтовой среды между источником колебаний и зданием, установка вертикального экрана из газонаполненных баллонов под давлением, комбинация указанных способов, устройство свайного поля в грунтовой среде, усиление столбчатых плитных фундаментов здания микросваями, устройство ребристой плиты на поверхности грунтовой среды между источником и приемником колебаний, устройство железобетонной обоймы вокруг фундамента-источника колебаний. Эффективность каждого способа виброизоляции оценивалась коэффициентом демпфирования  $K$ , параметром, показывающим, во сколько раз уменьшается скорость вертикальных колебаний фундамента здания. Среди указанных выше способов виброизоляции выделены два наиболее эффективных варианта в виде горизонтальной инерционной плиты из железобетона на поверхности грунтового массива (снижение скорости вертикальных колебаний в 4,5 раза) и вертикального барьера из газонаполненных баллонов под давлением (снижение скорости вертикальных колебаний в 3,32 раза).

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

**Для цитирования:** Повколас, К. Э. Оценка эффективности некоторых способов виброизоляции существующих зданий и сооружений от вибродинамических воздействий, распространяющихся в грунтовой среде / К. Э. Повколас // Наука и техника. 2023. Т. 22, № 2. С. 131–140. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-2-131-140>

### 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

## Evaluation of Effectiveness on Some Vibration Isolation Methods for Existing Buildings and Structures from Vibrodynamic Effects, Propagating in Soil Environment

K. E. Povkolas

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The paper presents calculations of various design schemes for vibration isolation of a building with a reinforced concrete frame from a source of vibrodynamic exposure located outside it. It is noted that in most studies, the maximum value of the velocity of vertical vibrations of the foundation or soil in front of it is used as a criterion for the risk of damage to load-bearing building structures. The main factors that determine the risk of damage to structures are identified. These include the engineering and geological conditions of the soil at the base of the affected foundations, the degree of damage to the building, the type and design of the building or structure, the vibration frequency, the duration of the vibration, the distance to the vibration source, the type of vibration source, the material of the structure and the type of foundation. Based on the analysis of factors that determine the risk of damage to structures, the parameters of a building or structure that are least sensitive to vibrodynamic effects and have greater operational reliability are identified. It should be with a frame made of reinforced concrete or steel, not damaged, located on foundations of pile-racks in strong, low-moisture coarse sands or hard clays. The proposed design schemes for vibration isolation are mainly based on one of the vibration damping mechanisms in the soil medium – scattering on inhomogeneities. The finite element method has been used as the main tool for theoretical research. The ground medium has been considered as an elastic inertial array bounded by non-reflecting boundaries. The reliability of its application for calculating the development of dynamic processes in the system “oscillation source – propagation medium – oscillation receiver” has been confirmed by verification based on data from small-scale laboratory experiments. The use of the finite element method (FEM) makes it possible to take into account the spatial variability of soil conditions, the properties of materials, the design features of buildings and structures, the magnitude, direction and point of application of the dynamic load, as well as to model and optimize various vibration protection schemes. Seven variants of vibration isolation have been considered: the device of an inertial slab on the surface of the soil medium between the vibration source and the building, the installation of a vertical screen from gas-filled cylinders under pressure, a combination of these methods, the installation of a pile field in the soil medium, the reinforcement of the columnar slab foundations of the building with micropiles, the installation of a ribbed slab on the surface soil environment between the source and receiver of oscillations, the device of a reinforced concrete cage around the foundation-source of oscillations. The effectiveness of each method of vibration isolation has been evaluated by the damping coefficient  $K$ , a parameter showing how many times the speed of vertical oscillations of the building foundation decreases. Among the above methods of vibration isolation, two most effective options have been identified: in the form of a horizontal inertial slab of reinforced concrete on the surface of a soil mass (4.5-fold reduction in the rate of vertical vibrations), and a vertical barrier made of pressurized gas-filled cylinders (reduction in the rate of vertical vibrations by 3.32 times).

**Keywords:** vibrations, buildings, structures, impacts, vibration isolation, vibration rate

**For citation:** Povkolas K. E. (2023) Evaluation of Effectiveness on Some Vibration Isolation Methods for Existing Buildings and Structures from Vibrodynamic Effects, Propagating in Soil Environment. *Science and Technique*. 22 (2), 131–140. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-2-131-140> (in Russian)

### Введение

Рост и модернизация промышленности, развитие транспортной инфраструктуры зачастую приводят к увеличению вибродинамических воздействий на здания и сооружения, вызывая повреждения строительных конструкций. Впервые на опасность колебаний грунта, вызванных работой кузнечных молотов, забивкой свай, обратили внимание в начале прошлого века. Анализ материалов наблюдений за среднегодовыми осадками зданий в Санкт-Петербурге [1] в период с 1911 по 1953 г. выявил резкое (более чем в семь раз) их увеличение с 0,3 мм/год в 1911 г. до 2,2 мм/год в 1953 г. для зданий, расположенных в пределах 30–35 м от транспортных магистралей. Причиной, вызвавшей

нарастание среднегодовых осадок, явился рост интенсивности движения транспорта.

Согласно данным [2, 3], техногенное вибрационное загрязнение городов Республики 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%. Этот факт подтверждают опытные данные, полученные 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 является препятствием для установки прецизионного оборудования, в частности аппарата магниторезонансной терапии, без специальных мероприятий по виброизоляции. Очевидно, что интенсивность виб-

родинамических воздействий в дальнейшем будет только нарастать.

Случаи нарушения эксплуатационной пригодности зданий и сооружений при забивке свай, вибропогружении шпунта, работе штамповочных и кузнечных механизмов, устройстве и эксплуатации метро мелкого заложения, работе турбоагрегатов на ТЭС наблюдаются довольно часто [4–6]. Фактически осадки фундаментов зданий и сооружений не прекращаются даже при отсутствии вибродинамических воздействий на грунты основания. Колебания лишь ускоряют этот процесс. Поэтому прогнозирование уровня вибраций конструкций зданий и сооружений и оценка их последствий являются актуальными. Работы по созданию нормативных документов, регламентирующих влияние вибродинамических воздействий, велись в различных странах независимо друг от друга. В качестве основного критерия влияния вибраций в большинстве случаев принята пиковая величина скорости вертикальных колебаний фундамента или прилегающего к нему грунта. Наибольший вклад в вопросы исследования влияния вибраций на здания и сооружения от рельсового транспорта в Беларуси сделан И. А. Кудрявцевым [2]. В [1] рассматриваются вопросы влияния работы фундаментов под машины с динамическими нагрузками на прилегающие несущие конструкции. Влияние транспортной вибрации подробно рассматривается в [7]. К основным факторам, определяющим степень повреждения конструкций, относятся: интенсивность, частота и длительность воздействия, вероятность возникновения резонансных колебаний, категория грунтовых условий, степень повреждения здания, конструктивная схема здания и его функциональное назначение, вид источника вибрации и расстояние до сооружения. С момента выхода всех нормативных документов (30–40 лет назад) появились новые строительные материалы и технологии, что требует пересмотра и уточнения предельных параметров колебаний. В частности, в Беларуси стал широко применяться газосиликат в качестве материала для несущих (при малоэтажном строительстве) и ограждающих конструкций. Здания, выполненные с его использованием, отличаются очень высокой чувствительностью к воздействию вибраций. В данной работе преследовались цели:

- выявление нормативного документа, наиболее точно соответствующего опытным данным по измерению вибраций строительных конструкций, полученным автором на объектах в Республике Беларусь;

- выделение факторов, определяющих эксплуатационную надежность зданий и сооружений при вибродинамических воздействиях;

- оценка необходимости выполнения работ по виброизоляции.

- расчетное обоснование наиболее эффективных способов виброизоляции зданий и сооружений от вибродинамических воздействий, распространяющихся в грунтовой среде, путем численного моделирования динамических процессов методом конечных элементов (КЭ).

### **Обзор методов нормирования и способов ограничения вибрационных воздействий на строительные конструкции зданий и сооружений**

Нормативный документ, действующий в Беларуси [8], определяет безопасное расстояние от источника до приемника колебаний (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 штампов. Нарушение эксплуатационной пригодности прилегающих зданий и сооружений может проявляться внезапно – в доли секунды. В этой работе систематизированы данные по оценке влияния вибраций на здания и сооружения, принятые в различных странах в качестве нормативных документов, включая результаты исследований автора [4], с выделением границ и зон, соответствующих наиболее вероятностному проявлению различных форм нарушения эксплуатационной пригодности конструкций. По результатам анализа опытных данных [4], нормативно-справочной литературы [8–11] и различных [1, 2, 5–7, 12] исследований выделены следующие зоны:

- нормальной и безопасной эксплуатации конструкций;

– возможного появления малозначительных (легких) дефектов конструкций и развития объемных и сдвиговых деформаций в грунтах оснований;

– проявления значительных (умеренных) дефектов конструкций и осадок фундаментов;

– появления серьезных критических (тяжелых) дефектов конструкций, недопустимых осадок фундаментов с нарушением эксплуатационной пригодности и вероятным разрушением конструкций.

Такой комплексный подход позволяет четко определить риски, на которые может пойти проектировщик, прогнозируя негативное воздействие вибраций от источника воздействия. Ограничение вибрационного воздействия, согласно указанным критериям, позволяет полностью исключить повреждение строительных конструкций.

Оценку воздействия вибрации на конструкцию необходимо выполнять для определения возможных негативных последствий в виде повреждений конструкции, способных снизить ее эксплуатационную надежность. В случае, если это воздействие неизбежно, необходимо разработать комплекс мероприятий по виброизоляции и усилению несущих конструкции или оснований фундаментов.

Все известные способы нормирования параметров колебаний (пиковые величины амплитуд, скоростей и ускорений) конструкций можно разделить на следующие группы:

1) ограничение по динамическим прогибам (амплитудам колебаний) покрытий и перекрытий [11];

2) общее ограничение вибраций строительных конструкций [13];

3) ограничение по скорости вертикальных колебаний фундаментов [6, 8, 10];

4) ограничение по горизонтальным колебаниям стен [10];

5) ограничение по допустимым напряжениям в перекрытиях и покрытиях [10];

6) ограничение по развитию сдвиговых и объемных деформаций грунтов [2, 8];

7) ограничение по давлению под подошвой фундамента [1, 9].

Автором выполнен сравнительный анализ данных по нормированию вибраций конструкций зданий (сооружений) [6, 8, 10–13] и собственных опытных данных [4] по оценке воздействия вибраций от различных машин и ме-

ханизмов на строительные конструкции. Наибольшее совпадение результатов натурных исследований [4] отмечается с данными национального стандарта Великобритании [10]. При расстояниях от ближайшего фундамента до источника колебаний более 21 м повреждений не наблюдалось. Данное расстояние можно считать безопасным. Актуальна и оценка физиологического воздействия вибраций на людей, а также механическое воздействие на прецизионные устройства. Следует отметить, что при забивке свай расстояния до здания (сооружения), на которых выполняются санитарные нормы Республики Беларусь, более чем в 2,5 раза превышают расстояния, при которых могут проявляться повреждения строительных конструкций. В случае превышения фактических или расчетных нормируемых параметров вибрации несущих конструкций как существующих, так и проектируемых зданий и сооружений требуется их виброизоляция.

К основным факторам, определяющим риск повреждения конструкций, можно отнести такие, как:

1) инженерно-геологические условия грунта в основании фундаментов, подвергающихся воздействию. Этот фактор учтен в нормах, действующих в Беларуси и Норвегии. Различие в предельных параметрах колебаний составляет 3–7 раз соответственно для наиболее и наименее благоприятных грунтовых условий. Наиболее чувствительными к воздействию вибраций являются водонасыщенные малопрочные мелкие пески и супесь с показателем текучести 0,9 и более;

2) степень повреждения здания. Учитывается в нормах Республики Беларусь, Польши и Чехии. Разница в предельных параметрах колебаний для зданий без повреждений и имеющих серьезные дефекты составляет от 2 до 2,5 раза;

3) тип и конструкция здания или сооружения. Учитывается в нормах Республики Беларусь, Польши и Чехии, Германии, Британии и Норвегии. Отличие предельных параметров для наименее и наиболее чувствительной к вибрациям конструктивной схемы и типа здания или сооружения составляет 3,4–6 раз;

4) частота колебаний. Учитывается в нормах Польши, Чехии, США, Великобритании и Германии. При изменении частоты колебаний от 1 до 100 Гц предельная скорость колебаний изменяется в 1,6–50 раз. Наименьшее воздей-

стве на сооружение оказывают высокочастотные вибрации;

5) продолжительность действия вибрации. Учитывается в нормах Польши, Чехии, Великобритании и Германии. Разница между непостоянной и постоянной вибрацией составляет 1,6–3,2 раза;

6) расстояние до источника колебаний. Косвенно учитывается нормами Республики Беларусь в виде ограничения расстояний, в пределах которых рекомендуется измерять вибрации на предмет соответствия предельным параметрам. В нормах Норвегии при расстояниях более 5 м вводится понижающая поправка к предельной скорости колебаний, равная 0,5 при расстояниях более 200 м;

7) характер источника колебаний. Учитывается в нормах Республики Беларусь и Норвегии. Наибольшее воздействие оказывают взрывные работы, ударная забивка свай и шпунтовых свай, снос сооружений, движение машин во время строительных работ;

8) материал сооружения. Учитывается только в нормах Норвегии. Отличие в предельных параметрах для зданий, выполненных из железобетона и поризованных бетонных блоков автоклавного твердения и других аналогичных материалов, достигает 60 %;

9) тип фундамента. Учитывается только в нормах Норвегии. Отличие в предельных параметрах для фундаментов зданий в виде свай-стоек и ленточных и столбчатых фундаментов составляет 30 %.

На основании анализа факторов, определяющих риск повреждения конструкций, определены параметры здания или сооружения, наименее чувствительного к вибродинамическим воздействиям и обладающего соответственно большей эксплуатационной надежностью. Оно должно быть с каркасом из железобетона или стали, не иметь повреждений, с фундаментами из свай-стоек и располагаться на прочных маловлажных крупных песках или прочных глинах.

При передаче колебаний через грунтовую среду для виброизоляции наземных несущих конструкций чаще применяют устройство вертикальных волновых барьеров и виброизоляторов, встроенных в конструкцию плитного, ленточного или столбчатого фундамента. Последние могут выполняться в виде виброопор или вибропрокладок. Согласно данным [14], впер-

вые в г. Минске виброизоляция с использованием виброопор применена при строительстве здания инженерного корпуса Минского метрополитена, находящегося вблизи тоннелей метро. Она выполнена с использованием резины, что позволило снизить уровень вибрации на 8 дБ в октавной полосе со среднегеометрической частотой 63 Гц при движении состава метро. Существенного снижения уровня вибрации в здании в октавной полосе со среднегеометрической частотой 31,5 Гц не произошло. В дальнейшем при возведении зданий по ул. Энгельса, 25, 27, кинотеатра «Беларусь» по ул. Романовская Слобода, 28, концертного зала детской филармонии на площади Свободы в г. Минске были использованы более эффективные полиуретановые виброопоры.

Исследования эффективности вертикальных барьеров из газонаполненных подушек в грунтовой среде начали проводиться в 80-е гг. прошлого столетия [15, 16]. На первых немногочисленных 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 [15], что панели с газовыми подушками могут прослужить более 20 лет. 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.

При анализе виброизоляционной эффективности барьеров используют [15, 16] понятия сопротивления среды  $Z$  (в нашем случае – грунта и барьера) и коэффициента передачи энергии  $E_n$  через барьер.

Сопротивление  $Z$  определяется по формуле

$$Z = c\rho,$$

где  $c$  – скорость распространения продольных волн;  $\rho$  – 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/м<sup>3</sup>, в отличие от 15–21,5 кН/м<sup>3</sup> у осадочных 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. Вычислим

$$E_n = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2},$$

где  $Z_1$  и  $Z_2$  – сопротивление грунта и барьера соответственно.

Если  $Z_1 = Z_2$ , то изоляционный эффект отсутствует.

В качестве заполнения волнового барьера также используют геопену (геополистирол) [17, 18], которая на 98 % состоит из воздуха, но при этом обладает прочностью и жесткостью, достаточными для восприятия давления грунта на глубине до 25–30 м. Согласно экспериментальным данным [17, 18], эффективность (снижение уровня вибраций) при оптимизации параметров достигает 78 % при частоте вынужденных колебаний 50 Гц. Эффективным является также устройство 2-рядных волновых барьеров.

Идея использовать горизонтальный кольцевой барьер вокруг застройки для защиты от сейсмических волн изложена в [19]. Практического применения она не нашла.

Указанные способы виброизоляции имеют как достоинства, так и недостатки. К достоинствам виброопор относится возможность их демонтажа и замены в ходе эксплуатации здания в случае ухудшения эксплуатационных свойств или необходимости изменения параметров колебания здания. Недостатком является то, что их применение требует повышения жесткости фундаментных конструкций, а соответственно и увеличения расхода материалов. Пересадка существующего здания или сооружения на виброопоры является технически сложной, зачастую неосуществимой задачей. К достоинствам волнового барьера относится возможность его устройства вблизи существующего здания или сооружения, не затрагивая их функциональность, к недостаткам – необходимость перекладки подземных коммуникаций (при их наличии). Волновые барьеры выполня-

ются методом «стена в грунте». Данный метод, по мнению автора, является трудоемким, дорогостоящим, сопровождается «мокрыми» процессами и ограничен в применении в стесненных условиях городской застройки. Автором предлагается использовать отсечную конструкцию, в которой газовые баллоны соответствующей формы погружаются в вертикальные соприкасающиеся скважины. Бурение последних возможно малогабаритными станками в стесненных условиях. Скважины также могут заполняться геопеной.

### Результаты численного моделирования некоторых способов виброизоляции зданий и сооружений

Для выявления наиболее эффективного конструктивного способа виброзащиты зданий и сооружений от колебаний, распространяющихся в грунте, выполнен комплекс расчетов системы «источник колебаний – среда распространения – приемник колебаний» методом конечных элементов при помощи расчетного комплекса «Лири 9.6». 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]. За основу была принята предварительная оценка возможности установки кузнечного молота вблизи существующего здания при модернизации производства промышленного предприятия. Основной упор во всех рассмотренных конструктивных решениях сделан на преобразовании среды распространения колебаний (грунтового массива). Основным механизмом демпфирования колебаний – рассеяние на искусственных неоднородностях грунтовой среды.

Вблизи 3-этажного здания на расстоянии 14,4 м планируется установить кузнечный молот марки М4140. Несущие конструкции – монолитные колонны 300×300 мм и монолитные диски перекрытия и покрытия толщиной 200 мм. Фундаменты под колонны – плитные столбчатые с размерами подошвы 1000×1000 мм. Ограждающие конструкции – кирпичные стены.

Взаимное расположение здания и массивного железобетонного фундамента под молот размерами в плане 2×2 м высотой 2 м представлено на рис. 1.

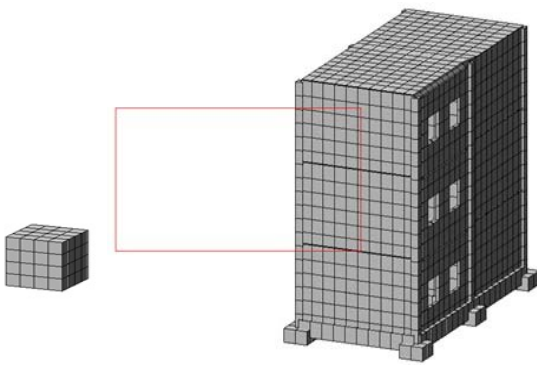


Рис. 1. Взаимное расположение здания и железобетонного фундамента под молот

Fig. 1. Mutual location of building and reinforced concrete foundation under the hammer

Конечно-элементная схема смоделированного грунтового пространственного массива размерами  $83,5 \times 83,5$  м высотой 31,5 м представлена на рис. 2. Конечно-элементная сеть была сгущена в зоне, прилегающей к взаимодействующим фундаментам, с целью получения более точных результатов. Общее количество конечных элементов составило 61856, узлов – 56516, решаемых уравнений – 161178. Время интегрирования 0,55 с, шаг интегрирования 0,01 с. На узлы боковой и нижней плоскостей накладывались связи по направлениям, перпендикулярным поверхностям. Длительность импульса динамической нагрузки и размеры конечно-элементного массива подобраны таким образом, чтобы не происходило отражения волны от боковых и нижней границ массива.

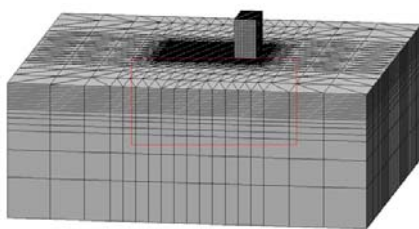


Рис. 2. Конечно-элементная схема грунтового пространственного массива

Fig. 2. Finite element scheme of soil spatial array

Всего смоделировано восемь расчетных схем:

- 1) свободное распространение колебаний между источником и приемником колебаний;
- 2) усиление фундаментов существующего здания буроинъекционными сваями диаметром 150 мм глубиной 15,5 м (четыре сваи на каждый из шести фундаментов);

3) установка виброзащитного вертикального экрана толщиной 0,63 м и глубиной 15,5 м из газонаполненных баллонов под давлением;

4) устройство горизонтальной бетонной плиты толщиной 1,5 м между фундаментами под молот и здание;

5) комбинация схем № 3 и 4;

6) устройство свайного поля с расстоянием между сваями 1 м объединенной плитой толщиной 0,5 м между взаимодействующими фундаментами;

7) устройство ребристого фундамента с толщиной горизонтальной плиты 0,5 м, глубиной вертикальных бетонных траншей 2 м и расстоянием между ними 1,5 м при толщине ребер 1 м;

8) устройство железобетонной обоймы вокруг фундамента с динамической нагрузкой.

Для оценки эффективности виброизоляции введем коэффициент демпфирования  $K$ . Он показывает, во сколько раз уменьшается пиковая величина скорости вертикальных колебаний фундамента-приемника колебаний или грунта перед ним при устройстве виброизоляции грунтовой среды. Предельная скорость вертикальных колебаний фундамента или поверхности прилегающего к нему грунта является нормируемым параметром в Великобритании, ФРГ, Беларуси, США, Польше, Чехии и Норвегии [8, 10].

Согласно результатам расчетов, пиковая величина скорости колебаний  $v_{\text{пик}}$  фундамента существующего здания, наиболее близкого к источнику вибродинамических воздействий, составит: 12,69 мм/с – при свободном распространении колебаний; 9,69 – при усилении фундамента буроинъекционными сваями (схема виброизоляции № 2); 3,82 – при устройстве вертикального волнового барьера из газонаполненных баллонов под давлением (схема виброизоляции № 3); 2,82 – при устройстве горизонтальной бетонной плиты толщиной 1,5 м между фундаментами под молот и здание (схема виброизоляции № 4); 2,86 – при комбинации схем № 3 и 4 (схема виброизоляции № 5); 6,01 – при устройстве свайного поля с расстоянием между сваями 1 м объединенной плитой толщиной 0,5 м между взаимодействующими фундаментами (схема виброизоляции № 6); 5,02 – при устройстве ребристой плиты толщиной 0,5 м и глубиной вертикальных бетонных траншей 2 м с расстоянием между ними 1,5 м при толщине ребер 1 м (схема виброизоляции № 7); 3,82 – при устройстве железобетонной обоймы вокруг фундамента (схема виброизоляции № 8).

ции № 7); 7,98 мм/с – при устройстве железобетонной обоймы вокруг фундамента с динамической нагрузкой (схема виброизоляции № 8).

Схемы виброизоляции и результаты расчетов представлены в табл. 1. Эти данные целесообразно использовать для предварительной оценки эффективности той или иной схемы виброизоляции. Они получены при равных инженерно-геологических условиях и постоянстве параметров источника и приемника колебаний. Поверочными расчетами различных схем виброизоляции установлено, что при изменении грунтовых условий и параметров динамического воздействия величина коэффициента демпфирования  $K$  практически не изменяется.

Усиление фундамента существующего здания буроинъекционными сваями диаметром 150 мм глубиной 15,5 м не приводит к существенному снижению колебаний (31 %), но исключает развитие дополнительной неравномерной динамической осадки основания – одного из основных факторов, определяющих степень повреждения конструкций здания или сооружения. Устройство железобетонной обоймы толщиной 0,5 м вокруг фундамента с динамической нагрузкой снижает колебания на 60,15 % (в 2,51 раза). Данная обойма может устраиваться из соприкасающихся буронабивных свай, объединенных ростверком, что позволяет выполнять ее, не останавливая технологический процесс.

Наиболее эффективным мероприятием по снижению вибродинамических воздействий из рассмотренных вариантов при прочих равных условиях является устройство горизонтальной бетонной плиты толщиной 1,5 м между фундаментами под молот и здание. Величина скорости колебаний фундамента снизилась в 4,5 раза. Эффект достигается гашением поверхностной волны массой бетонной плиты за счет ее отражения и преломления. Вторым по эффективности самостоятельным конструктивным решением является установка виброзащитного вертикального экрана толщиной 0,63 м и глубиной 15,5 м из газонаполненных баллонов под давлением. Величина скорости колебаний снизилась в 3,32 раза. Эффект достигается гашением энергии продольных и поперечных волн за счет их рассеяния и поглощения. Задачи по снижению колебаний фундаментов здания до

безопасного уровня (5 мм/с) обеспечивают схемы виброизоляции № 3, 4 и 5. Наиболее простой в реализации из них является схема виброизоляции № 4, она же и наименее трудоемкая. С целью экономии цемента гравитационную плиту целесообразно выполнять из смеси крупного заполнителя в виде валунов или глыб из магматических горных пород с высоким удельным весом (2700–3000 кг/м<sup>3</sup>) и связующим из цементогрунта – смеси песка с цементом.

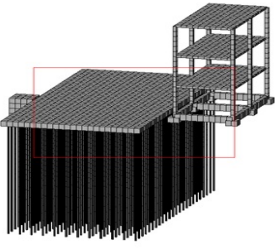
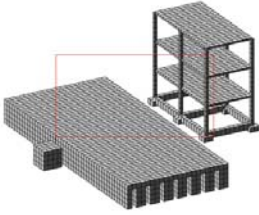
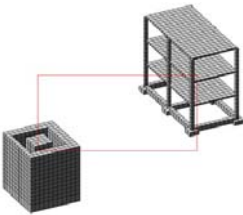
Таблица 1

**Зависимость коэффициента демпфирования  $K$  от конструктивного решения виброизоляции**  
**Dependence of damping effect of  $K$ -oscillations on design solution of vibration isolation**

Номер расчетной схемы виброизоляции (конструктивное решение виброизоляции)	Краткое описание схемы виброизоляции	Коэффициент демпфирования $K$
1	2	3
№ 2 	Усиление фундамента существующего здания буроинъекционными сваями диаметром 150 мм глубиной 15,5 м (четыре сваи на каждый из шести фундаментов)	<b>1,31</b>
№ 3 	Установка виброзащитного вертикального экрана толщиной 0,63 м и глубиной 15,5 м из газонаполненных баллонов под давлением	<b>3,32</b>
№ 4 	Устройство горизонтальной бетонной плиты толщиной 1,5 м между фундаментами под молот и здание	<b>4,50</b>
№ 5 	Комбинация схем № 2 и 3	<b>4,43</b>



Окончание табл. 1  
End of Table 1

1	2	3
<p>№ 6</p> 	<p>Устройство свайного поля с расстоянием между сваями 1 м объединенной плитой толщиной 0,5 м между взаимодействующими фундаментами</p>	<p>2,11</p>
<p>№ 7</p> 	<p>Устройство ребристого фундамента с толщиной плиты 0,5 м, глубиной вертикальных бетонных траншей 2 м с расстоянием между ними 1,5 м при толщине ребер 1 м</p>	<p>2,53</p>
<p>№ 8</p> 	<p>Устройство железобетонной обоймы вокруг фундамента с динамической нагрузкой</p>	<p>1,59</p>

Замена материала гравитационной плиты (бетона) на цементогрунт значительно снижает ее стоимость [4] при сохранении эффективности. К примеру, стоимость материалов при использовании цементогрунта (с содержанием цемента 4,5 % от массы заполнителя) уменьшается на 57,5 % по сравнению с бетоном класса С12/15. Для реализации схем виброизоляции № 4–7 необходимо определенное расстояние между источником и приемником колебаний, что ограничивает их применение в стесненных условиях застройки.

## ВЫВОДЫ

1 К основным факторам, определяющим условия и степень повреждения зданий или сооружений при вибродинамических воздействиях, передаваемых через грунтовую среду, относятся инженерно-геологические условия грунта в основании фундаментов, расстояние от источника колебаний, тип и конструктивная схема строений, имеющиеся повреждения, частотный состав вынужденных колебаний, вид воздействия и материал строений.

2. Все рассмотренные схемы виброизоляции зданий от внешних вибродинамических воздействий, передаваемых через грунтовую среду, основанные на ее преобразовании, в различной степени снижают уровень колебаний конструкции здания. Наиболее эффективными из них являются вертикальный барьер из газонаполненных баллонов под давлением и горизонтальный инерционный барьер в виде бетонной плиты.

## ЛИТЕРАТУРА

- Савинов, О. А. Современные конструкции фундаментов под машины и их расчет / О. А. Савинов. 2-е изд. Л.: Стройиздат, 1979. 200 с.
- Кудрявцев, И. А. Влияние вибрации на основания и сооружения / И. А. Кудрявцев. Гомель: БелГУТ, 1999. 247 с.
- Кравцов, В. Н. Осадки оснований плитных фундаментов при длительном воздействии на них динамических нагрузок малой интенсивности / В. Н. Кравцов, П. В. Лапатын // Геотехника Беларуси: Наука и практика: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 23–25 октября 2013 г. / Белорус. национ. техн. ун-т; редкол. М. И. Никитенко [и др.]. Минск, 2013. С. 150–157.
- 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.
- 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.
- Калюжнюк, М. М. Сваебойные работы при реконструкции (Влияние колебаний на здания и сооружения) / М. М. Калюжнюк, В. К. Рудь. Л.: Стройиздат, 1989. 160 с.
- Экспериментальная динамика сооружений. Мониторинг транспортной вибрации / Е. К. Борисов [и др.]. Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2007. 128 с.
- 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.
- 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.
- Вибрация и удар. Вибрация зданий. Измерение вибрации и ее воздействие на конструкцию: ГОСТ Р 52892–2007. Введ. 27.12.07. М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии: ОАЛ «Научно-исследовательский центр контроля и диагностики технических систем», 2007. 16 с.
- Инструкция по расчету перекрытий промышленных зданий, воспринимающих динамические нагрузки / ЦНИИСК им. Кучеренко. М.: Стройиздат, 1967. 57 с.

12. Чернов, Ю. Т. Вибрации строительных конструкций / Ю. Т. Чернов. М.: Издательство Ассоциация строительных вузов, 2006. 288 с.
13. Reiher, H. Die Empfindlichkeit des Menschen Gegen Erschütterungen / H. Reiher, F. J. Meister // *Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesense*. 1931. Vol. 2, No 11. P. 381–386. <https://doi.org/10.1007/bf02578773>.
14. Виброизоляция зданий, расположенных в технической зоне метрополитена неглубокого заложения / Ю. В. Василевич [и др.] // *Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт*. – 2016. № 1. С. 295–297.
15. Массарч, К. Р. Виброизоляция с использованием газонаполненных подушек / К. Р. Массарч // *Развитие городов и геотехническое строительство*. 2006. № 10. С. 176–191.
16. Massarch, K. R. Ground Vibration Isolation Using Gas Cushions / K. R. Massarch // *International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Engineering and Soil Dynamics, USA, Luis, 11–15 March 1991 / USA, Missouri, Luis, 1991*. P. 1461–1470.
17. Ashref, Alzawi. Full Scale Experimental Study on Vibration Scattering Using Open and In-filled (Geofoam) Wave Barriers / Ashref Alzawi, M. Hesham El Naggar // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2011. Vol. 31, No 3. P. 306–317. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2010.08.010>.
18. 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. P. 106416. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106416>.
19. Кузнецов, С. В. Горизонтальные сейсмические барьеры для защиты от сейсмических волн / Кузнецов С. В., Нафасов А. Э. // *Вестник МГСУ*. 2010. Вып. 4. С. 131–134.
- Поступила 09.08.2022  
Подписана в печать 11.10.2022  
Опубликована онлайн 31.03.2023

## REFERENCES

1. Savinov O. A. (1979) *Modern Designs of Foundations for Machines and Their Calculation*. 2<sup>nd</sup> ed. Leningrad, Stroiizdat Publ. 200 (in Russian).
2. Kudryavtsev I. A. (1999) *Impact of Vibration on Foundations and Structures*. Gomel, Belarusian State University of Transport. 247 (in Russian).
3. Kravtsov V. N., Lapatin P. V. (2013) Settlement of Slab Foundation Base under Prolonged Exposure to Dynamic Loads of Low Intensity. *Geotekhnika Belarusi: Nauka i Praktika: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., Minsk, 23–25 Oktjabrya 2013 g.* [Geotechnics of Belarus: Science and Practice: Proceedings of International Scientific and Technical Conference, Minsk, October 23–25, 2013]. Minsk, Belarusian National Technical University, 150–157 (in Russian).
4. Povkolas K. E. (Theme Leader) (2018) *Development of Ways to Improve Operational Reliability and Durability of Structures of Buildings and Facilities During Reconstruction and Modernization of Production, Accompanied by Intense Vibrodynamic Effects*: Research Report No GR 20160898. Minsk, Belarusian National Technical University. 82 (in Russian).
5. Berlinov M. V. (2005) *Fundamentals of Comprehensive Assessment of Dynamic Operation of Building Structures under Vibration Effects of Industrial Equipment*. Moscow (in Russian).
6. Kalyuzhnyuk M. M., Rud V. K. (1989) *Piling Works During Reconstruction (Effect of Vibrations on Buildings and Structures)*. Leningrad, Stroiizdat Publ. 160 (in Russian).
7. Borisov E. K., Alimov S. G., Usov A. G., Lysak L. G., Krylova T. V., Stepanova E. A. (2007) *Experimental Dynamics of Structures. Transport Vibration Monitoring*. Petropavlovsk-Kamchatsky, Kamchatka State Technical University. 128 (in Russian).
8. ТКР [Technical Code of Common Practice] 45-5.01-67–2007. *Bases and Foundations, Engineering Surveys. Slab Foundations. Design Rules*. Minsk, Republican Unitary Enterprise “Stroitekhnorm”, 2007. 136 (in Russian).
9. 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, Republican Unitary Enterprise “Stroitekhnorm”, 2012. 114 (in Russian).
10. State Standard P 52892–2007. *Vibration and Shock. Building Vibration. Vibration Measurement and its Effect on the Structure*. Moscow, Federal Agency for Technical Regulation and Metrology: Publishing House of OJSC “Scientific Research Center for Control and Diagnostics of Technical Systems”, 2007. 16 (in Russian).
11. Central Research Institute of Building Structures Named after Kucherenko (1967) *Instructions for the Calculation of Floors of Industrial Buildings that Perceive Dynamic Loads*. Moscow, Stroiizdat Publ. 57 (in Russian).
12. Chernov Yu. T. (2006) *Vibrations of Building Structures*. Moscow, Publishing House of Association of Construction Universities. 288 (in Russian).
13. Reiher H., Meister F. J. (1931) Die Empfindlichkeit des Menschen gegen Erschütterungen. *Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesense*, 2 (11), 381–386. <https://doi.org/10.1007/bf02578773/>.
14. Vasilevich Yu. V., Kirilenko A. T., Neumerzhitskii V. V., Neumerzhitskaya E. Yu. (2016) Vibration Isolation of Buildings Located in the Technical Zone of a Shallow Subway. *Vestnik Belorusskogo Gosudarstvennogo Universiteta Transporta: Nauka i Transport* [Bulletin of Belarusian State University of Transport: Science and Transport], (1), 295–297 (in Russian).
15. Massarch K. R. (2006) Vibration Isolation Using Gas-Filled Cushions. *Razvitie Gorodov i Geotekhnicheskoe Stroitelstvo* [Urban Development and Geotechnical Construction], (10), 176–191 (in Russian).
16. Massarch K. R. (1991) 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, 1461–1470.
17. Ashref Alzawi, M. Hesham El Naggar (2011) Full Scale Experimental Study on Vibration Scattering Using Open and In-Filled (Geofoam) Wave Barriers. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31 (3), 306–317. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2010.08.010>.
18. Naghizadehrokni 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>.
19. Kuznetsov S. V., Nafasov A. E. (2010) Horizontal Seismic Barriers for Protection Against Seismic Waves. *Vestnik MGSU*, (4), 131–134 (in Russian).

Received: 09.08.2022

Accepted: 11.10.2022

Published online: 31.03.2023