

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-1-46-57>

УДК 624.131.552

Методика расчета дополнительных динамических осадок оснований плитных фундаментов зданий и сооружений от вибраций, распространяющихся в грунтовой среде

Канд. техн. наук К. Э. Повколас¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Реферат. В статье приводится методика расчета дополнительных осадок плитных фундаментов существующих зданий и сооружений от вибродинамических воздействий, которые возникают при производстве различных строительных работ вблизи них (забивка свай, вибропогружение шпунтовых балок, уплотнение грунтов тяжелыми трамбовками и виброкатками), а также от промышленного оборудования и транспорта. Методика включает следующие основные этапы. При помощи метода конечных элементов, или измеренных существующих вибрационных полей, определяется распределение максимальных ускорений колебаний грунта под подошвой фундамента по глубине и выявляется зона, в которой они превышают критические ускорения, при которых начинают проявляться объемные и сдвиговые деформации грунта. Грунт в основании фундамента разбивается на элементарные слои толщиной не более 1/4 ширины фундамента. Далее, по известным виброкомпрессионным зависимостям (зависимость изменения коэффициента пористости e образцов грунта от ускорения их колебаний a), которые получают в лабораторных условиях, определяются осадки каждого слоя, суммирование которых дает полную величину дополнительной динамической осадки S_d . Если она в совокупности со статической осадкой $S_{ст}$ превышает предельные нормируемые величины осадок, предлагается использовать три способа уменьшения или устранения S_d – буроинъекционное упрочнение зоны развития дополнительных осадок, использование горизонтальной инерционной плиты или вертикального барьера из легкосжимаемых материалов на пути распространения колебаний, применение которых снижает интенсивность вибродинамических воздействий, передаваемых на рассматриваемые фундаменты.

Ключевые слова: вибродинамические воздействия, буроинъекционное упрочнение, сдвиговые деформации грунта, здания, сооружения, фундаменты, осадки

Для цитирования: Повколас, К. Э. Методика расчета дополнительных динамических осадок оснований плитных фундаментов зданий и сооружений от вибраций, распространяющихся в грунтовой среде / К. Э. Повколас // *Наука и техника*. 2024. Т. 23, № 1. С. 46–57. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-1-46-57>

Methodology for Calculating Additional Dynamic Settlements of the Bases of Slab Foundations of Buildings and Structures from Vibrations Propagating in the Soil Environment

К. Э. Povkolas¹⁾

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

Abstract. The paper provides a method for calculating additional settlements of slab foundations of existing buildings and structures from vibration-dynamic influences that arise during various construction works near them (driving piles, vibration driving of sheet piling beams, soil compaction with heavy rammers and vibrating hammers), as well as from industrial

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

equipment and transport. The technique includes the following main steps. Using the finite element method, or measured existing vibration fields, the distribution of the maximum accelerations of ground vibrations under the base of the foundation along the depth is determined and the zone in which they exceed the critical accelerations at which volumetric and shear deformations of the soil begin to appear is identified. The soil at the base of the foundation is divided into elementary layers with a thickness of no more than 1/4 of the width of the foundation. Further, according to the known vibration-compression dependencies (the dependence of the change in the porosity coefficient e of soil samples on the acceleration of their vibrations a), which are obtained in laboratory conditions, the settlements of each layer are determined, the summation of which gives the total value of the additional dynamic settlement S_d . If it, together with the static settlement $S_{ст}$, exceeds the maximum normalized settlement values, it is proposed to use three methods to reduce or eliminate S_d – drilling injection strengthening of the zone of development of additional settlements, the use of a horizontal inertial plate or a vertical barrier made of easily compressible materials in the path of vibration propagation, the use of which reduces the intensity of vibration-dynamic impacts transmitted to the foundations under consideration.

Keywords: vibration-dynamic influences, drilling injection, shear deformations of the soil, buildings, structures, foundations, settlements

For citation: Povkolas K. E. (2024) Methodology for Calculating Additional Dynamic Settlements of the Bases of Slab Foundations of Buildings and Structures from Vibrations Propagating in the Soil Environment. *Science and Technique*. 23 (1), 46–57. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-1-46-57> (in Russian)

Введение

На строительные конструкции зданий и сооружений наибольшее негативное влияние оказывают строительные работы в виде ударной забивки и вибропогружения свай и шпунта, уплотнения грунта тяжелыми трамбовками, а также рабочие процессы тяжелых промышленных установок (кузнечных молотов, штамповочных машин) и промышленные взрывы. Негативные последствия от воздействия указанных источников проявляются в течение относительно короткого промежутка времени, что позволяет их описать, провести качественный мониторинг и прогнозировать последствия. Иначе развиваются процессы при длительном действии вибраций меньшей интенсивности (железнодорожный и автомобильный транспорт, работа промышленных установок вращательного действия). В таких условиях они развиваются десятилетиями и проявляются в виде увеличения физического износа конструкций и виброползучести грунтов в основании фундаментов. К примеру, по данным многолетних геодезических наблюдений, осадки фундаментов несущих конструкций машинных залов ТЭС и АЭС, реакторных отделений АЭС, расположенных на осадочных четвертичных отложениях, никогда не затухают. Многочисленные случаи повреждения конструкций зданий и сооружений описаны и задокументированы в ряде работ [1–5].

В работе [3] отмечается: «повреждения зданий при забивке вблизи них свай связаны с развитием неравномерных дополнительных осадок, вызванных колебаниями грунта и зданий,

или с образованием выпора грунта»; «уменьшение влияния колебаний грунта на здания при забивке свай целиком зависит от уменьшения неравномерных дополнительных осадок зданий, вызываемых забивкой»; «результаты многофакторного анализа повреждений зданий, выполненного по натурным наблюдениям, подтверждаются данными расчета о превалирующем влиянии осадок здания на его повреждение при погружении свай или шпунта».

Достоверно можно утверждать, что основной причиной повреждения строительных конструкций при внешних вибродинамических воздействиях является дополнительная неравномерная осадка фундамента, приводящая к росту дополнительных напряжений в вышележащих конструкциях. Она развивается вследствие динамического уплотнения (изменения объема пор), выпора и (или) виброползучести (изменения физико-механических свойств) грунтов в основании фундаментов. Усиление наземных несущих конструкций при продолжающихся осадках основания в большинстве случаев не гарантирует их дальнейшую эксплуатационную надежность.

К основным факторам, определяющим влияние вибраций на повреждение конструкций и отраженным в нормативных документах ряда стран [6–9] и научных изданиях [3–5], относятся: инженерно-геологические условия, начальная степень повреждения здания, тип и конструкция здания или сооружения, величина скорости, ускорения и частоты колебаний, продолжительность действия вибрации, расстояние до источника колебаний, вид источника коле-

баний, материал сооружения и тип фундамента. Подробный анализ влияния указанных факторов приведен в работе [4].

Большинство прогнозных оценок [4, 8] повреждений строений основаны на опытных корреляционных зависимостях между пиковыми величинами скорости вертикальных колебаний фундамента или грунта перед ним. Так, при пиковых скоростях колебаний грунта до 2,5 мм/с динамические осадки отсутствуют, а при превышении 100 мм/с происходит разрушение строительных конструкций вследствие развития недопустимых осадок [5].

Влияние автомобильного и железнодорожного движения на амплитуду вибрации приведено в [2, 5, 10]. Пиковые скорости колебаний грунта, измеренные на расстоянии 3–6 м от автомобиля, зависят от массы (типа) автомобиля, его скорости и шероховатости дорожного покрытия (определяемой как отношение высоты выступов дороги к квадратному корню из расстояния между ними). Автобус (грузовой автомобиль) общей массой 10 т, движущийся со скоростью 65 км/ч по типичной городской дороге с шероховатостью 0,2, будет вызывать колебания поверхности 8 мм/с на расстоянии 3 м. Вибрация при движении поездов составит около 6,3 мм/с на расстоянии 15 м от пути. Метро генерировало амплитуду около 5 мм/с на расстоянии около 6 м по вертикали от туннеля (измерено на конструкции). То есть на указанных расстояниях действуют величины скоростей, при которых возможно проявление дополнительной динамической осадки.

Целью данной работы является разработка методики расчета дополнительной динамической осадки оснований плитных фундаментов зданий, сооружений и коммуникаций при действии вблизи них источника вибродинамического воздействия, генерирующего колебания в грунтовой среде, а также реализация технических решений по ее устранению или снижению.

К таким техническим решениям относятся устройство горизонтальной инерционной плиты и (или) вертикального волнового барьера, а также традиционное буроинъекционное упрочнение грунта в зоне развития дополнительной осадки под подошвой фундамента. Для дости-

жения указанной цели решены следующие задачи:

- изучены немногочисленные методы расчета динамических осадок фундаментов при внешних вибродинамических воздействиях, распространяющихся в грунтовой среде [5, 9, 11–15, 17], и сравнительный анализ [16] по методам [5, 11] с данными натурных измерений;

- при помощи метода конечных элементов на основе положений упругой инерционной среды смоделировано распределение параметров колебаний непосредственно под подошвой фундамента, которое значительно отличается от аналогичного при свободном их распространении;

- определена зона уплотнения путем сравнения параметров колебаний в активной толще грунта под подошвами существующих фундаментов с критическими значениями, при достижении которых развиваются объемные и сдвиговые деформации грунта;

- предложена методика расчета динамических осадок в виде их послойного суммирования по глубине в пределах зоны уплотнения;

- предложены эффективные способы исключения или уменьшения динамических осадок и интенсивности вибродинамического воздействия.

Среди рассмотренных автором методов выделим метод, предложенный G. Viring [17].

Метод основан на допущении о развитии динамических осадок фундамента в зоне превышения ускорениями колебаний грунта под его подошвой критических величин и уплотнении грунта в данной области до максимально возможной степени. Это предположение подтверждается данными лабораторных и полевых испытаний, выполненных проф. О. А. Савиновым [18] для оснований, находящихся в первой фазе деформирования (стадии уплотнения) за счет изменения объема пор. Следует отметить, что большинство оснований фундаментов зданий и сооружений, запроектированных по нормативным документам, находятся именно в условиях первой фазы деформирования. В 1960-е и 1970-е гг. метод использовался для расчета осадок фундаментов машин с динамическими нагрузками на песчаных основаниях.

Динамическую осадку фундамента вычисляем по формуле

$$S_{\max} = \sum_{i=1}^n h_i \frac{e_i - e_{\min,i}}{1 + e_i}, \quad (1)$$

где e_i – коэффициент пористости i -го слоя грунта под подошвой фундамента в естественных условиях; $e_{\min,i}$ – максимально достижимый коэффициент пористости i -го слоя грунта при максимальном уплотнении, может определяться для песков

$$e_{\min,i} = \frac{\gamma_s}{\gamma_{d,\max}} - 1,$$

γ_s – удельный вес частиц грунта; $\gamma_{d,\max}$ – то же сухого грунта в предельно плотном состоянии.

Зона развития осадок грунта («активная» толща), в пределах которой развивается дополнительная динамическая осадка, определяется превышением ускорения вибраций под подошвой фундамента под машины с динамической нагрузкой критического ускорения.

Глубина слоя «активной» толщи грунта H определяется по-разному. В [5] за величину H для песков принимается слой, в пределах которого возможно его виброуплотнение, ограниченный более прочной породой. В работах [1, 12, 15] нижняя граница H определяется также, как и для расчета статических осадок по методу послойного суммирования. В методе [11] рекомендуется ограничивать H глубиной, равной полутора длинам поверхностной (Релевской) волны. По мнению автора, ясный и обоснованный физический смысл имеет способ определения H , предложенный в [17].

Комплексная методика оценки эксплуатационной надежности зданий и сооружений

Предлагаемый автором метод расчета динамических осадок основан на изучении закономерностей процессов виброуплотнения песков. Результаты испытаний образцов песков на вибростенде представлены виброкомпрессионными кривыми, связывающими коэффициент пористости e с ускорением колебаний $a = A\omega^2$ (где A – амплитуда гармонических колебаний; ω – круговая (циклическая) частота колебаний) при

различных статических сжимающих напряжениях $\sigma_{ст}$. С ростом ускорения колебаний a коэффициент пористости e уменьшается. Каждой величине $\sigma_{ст}$ и начальному значению коэффициента пористости e_0 соответствует свое критическое ускорение колебаний $a_{кр}$ (горизонтальный участок зависимости $e = f(a)$, при превышении которого начинается уплотнение грунта до предельно плотного состояния с минимальной величиной коэффициента пористости e_{\min} . При этом, по данным [18], конечная величина e_{\min} не зависит от величин $\sigma_{ст}$ и e_0 . Критическое ускорение $a_{кр}$ возрастает с увеличением $\sigma_{ст}$ и уменьшением e_0 . Так же существенное влияние на $a_{кр}$ для песков оказывает влажность. Наибольшее значение $a_{кр}$ при равных условиях наблюдается у влажных песков, наименьшее – у маловлажных. В более широкой трактовке под критическим ускорением колебания грунта $a_{кр}$ понимается величина, при достижении которой начинают развиваться объемные и сдвиговые деформации [2]. В работе [1] под предельным (критическим) ускорением колебаний понимается величина, превышение которой приводит к необратимым деформациям (осадкам) грунта. Значения $a_{кр}$ приведены в таблицах приложения Д [8], полученных проф. И. А. Кудрявцевым [2] для различных видов грунтов и их состояния при действии техногенных вибраций (железнодорожный транспорт, метро, трамвай, автотранспорт, технологическое оборудование). Их величины варьируются в диапазоне: 0,06–0,29 м/с² – для песков; 0,06–0,68 м/с² – для пылеватоглинистых грунтов.

Экспериментальная зависимость относительного критического ускорения колебаний $w_{кр}$ (в долях от ускорения силы тяжести $g = 9,82$ м/с²) от статического давления $\sigma_{ст}$, по данным [18], для среднего песка представлена на рис. 1.

На основании анализа литературных источников и собственных исследований автора, к основным факторам, определяющим развитие динамических осадок в первой фазе напряженно-деформированного состояния (стадии уплотнения), относятся:

- ускорение колебаний грунта a ;
- статическое давление $\sigma_{ст}$ на рассматриваемый элемент грунта, величина которого определяет критическое ускорение колебаний;

- начальная (природная) плотность грунта ρ и его влажность W ;
- плотность грунта в предельно уплотненном состоянии $\rho_{d,max}$;
- массы фундамента, грунтов оснований и вышележащих строительных конструкций.

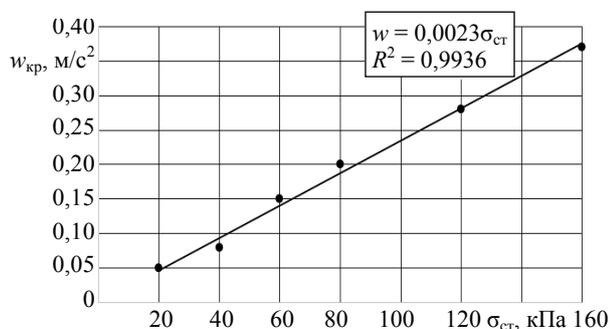


Рис. 1. Зависимость относительного критического ускорения колебаний $w_{кр}$ (в долях от ускорения силы тяжести $g = 9,82 \text{ м/с}^2$) от статического давления $\sigma_{ст}$, по данным [18], для среднего песка

Fig. 1. Dependence of relative critical acceleration of oscillations $w_{кр}$ (in fractions of the acceleration of gravity $g = 9.82 \text{ m/s}^2$) on static pressure $\sigma_{ст}$ according to data from [18] for medium sand

Эти факторы учитываются в предлагаемой комплексной методике оценки эксплуатационной надежности зданий и сооружений, которая включает следующие положения:

- 1) построение математической модели системы «источник колебаний – грунтовая среда – строение» на основании метода конечных элементов и положений теории упругого инерционного полупространства;
- 2) определение статических и динамических параметров элементов системы (смещений, скоростей, ускорений, напряжений, изгибающих моментов, продольных и поперечных сил);
- 3) определение на основании опытных или справочных данных зависимости $a_{кр} = f(\sigma_{ст})$ (рис. 1);
- 4) построение зависимостей вертикальных статических напряжений $\sigma_{ст}$ от глубины z под подошвой фундамента и $a_{кр} = f(z)$;
- 5) определение зоны динамического уплотнения грунта H под подошвой фундамента, нижняя граница которой определяется точкой пересечения кривых $a_{max} = f(z)$ и $a_{кр} = f(z)$;
- 6) расчет максимальных суммарных (статических и динамических) осадок фундаментов;

7) сравнение полученных данных с лимитируемыми параметрами:

- а) максимальной осадки S_{max} и относительной разности осадок $\Delta S/\Delta L$ с предельными величинами по [7];
- б) суммарного дополнительного давления (статического и динамического) σ_{Σ} под подошвой фундамента с расчетным сопротивлением грунта R по [6];
- в) пиковых величин скоростей вертикальных колебаний фундаментов с предельными значениями, анализ которых для различных стран приведен в [4] и в нормативных документах Республики Беларусь [6, 7, 9];

г) суммарных (статических и дополнительных динамических) усилий, возникающих также от неравномерных осадок, в строительных конструкциях с их несущей способностью;

д) параметров колебаний наземных строительных конструкций с лимитируемыми величинами, например по немецкому стандарту DIN4150 или по шкале, предложенной специалистами США [19] на основании анализа литературных источников;

8) приблизительную прогнозную оценку степени физического износа зданий и сооружений, связанную с действием вибрации, по [2];

9) исключение или уменьшение (при необходимости) динамической осадки фундаментов за счет буроинъекционного упрочнения грунтов в их основании, или путем снижения вибраций за счет виброизоляции грунтовой среды с устройством горизонтального и (или) вертикального барьера, эффективность которых рассмотрена в работах [20, 21].

Основные положения данной методики, учитывающей инерционность строительных конструкций, грунтов оснований фундаментов и изменчивость критических ускорений колебаний грунта по глубине под подошвой фундамента, в части расчета дополнительной динамической осадки, рассмотрим на следующем примере.

Вблизи одноэтажного однопролетного промышленного здания (на расстоянии 10 м) устанавливается фундамент под машину (к примеру, виброштампочный стенд для изготовления строительных конструкций) с вертикальными гармоническими колебаниями часто-

той 25 Гц и амплитудой динамической нагрузки $P_d = 500$ 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 и глубиной заложения 1500 мм. Высота до низа стропильной конструкции 6 м. Ограждающие конструкции – сэндвич-панели. Покрытие – профнастил по стальным прогонам.

Расчет выполнен в конечно-элементном расчетном комплексе Liga 10.8 с использованием элементов, моделирующих упругое инерционное полупространство. Общее количество конечных элементов составило 64470. Время интегрирования 0,6 с. Для исключения отражения волн от боковых и нижней границ массива применялся конечный элемент «неотражаемые границы». Конечно-элементная схема смоделированного грунтового пространственного массива размерами 32×40 м высотой 21 м представлена на рис. 2а, а взаимное расположение фундамента под машину и средней поперечной рамы промздания – на рис. 2б.

Грунт представляет собой маловлажный средний песок средней плотности со следующими физико-механическими свойствами: удельный вес грунта $\gamma = 16,74$ кН/м³; удельный вес сухого грунта $\gamma_d = 16,35$ кН/м³; удельный вес сухого грунта в предельно плотном состоянии $\gamma_{dmax} = 17,1$ кН/м³; удельный вес частиц грунта $\gamma_s = 26,8$ кН/м³; коэффициент пористости в природном сложении $e = 0,65$; коэффици-

ент пористости в предельно плотном состоянии $e_{min} = 0,567$; динамический модуль упругости $E_d = 150$ МПа; модуль общей деформации $E_o = 30$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$; угол внутреннего трения $\varphi = 38^\circ$; удельное сцепление $c = 1$ кПа. Все характеристики назначались по справочным данным для песчаных грунтов четвертичных отложений.

На рис. 3 представлена расчетная зависимость распределения максимальных ускорений колебаний a_{max} по глубине z под подошвой фундамента (график 1) и без фундамента в грунтовой среде (график 2).

На рис. 4, 5 приводятся расчетные графики распределения ускорений колебаний от расстояния z от подошвы столбчатых фундаментов по глубине, расположенных соответственно на расстояниях 10 и 22 м от точки приложения динамической нагрузки (1 – максимальное ускорение колебаний $a_{max} = f(z)$; 2 – критическое ускорение колебаний $a_{кр} = f(z)$).

Из представленных данных следует, что при прохождении поверхностной волны под подошвой фундамента происходит ее искажение за счет влияния массы фундамента и вышележащих наземных конструкций (кривая 1 на рис. 3–5). При этом пиковая величина максимальных вертикальных ускорений колебаний расположена на глубинах 3,5 и 0,5 м от подошвы фундамента соответственно для расстояний от источника колебаний до фундаментов 10 и 22 м.

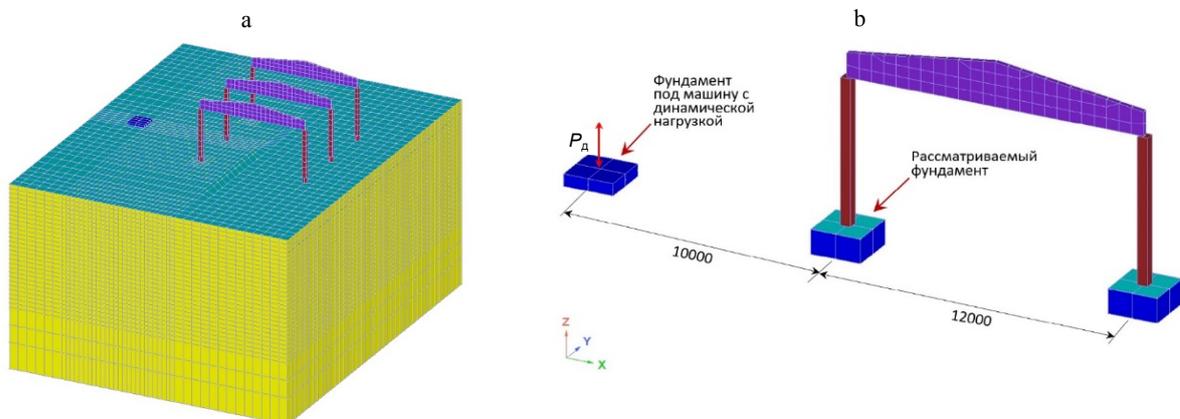


Рис. 2. Расчетная схема: а – конечно-элементная схема грунтового пространственного массива и конструкций промздания (выделены поперечные рамы каркаса); б – взаимное расположение поперечной рамы здания и источника вибраций

Fig. 2. Design diagram: a – finite element diagram of a soil spatial mass and industrial building structures (transverse frames of framework are highlighted); b – relative position of the transverse frame of the building and the source of vibration

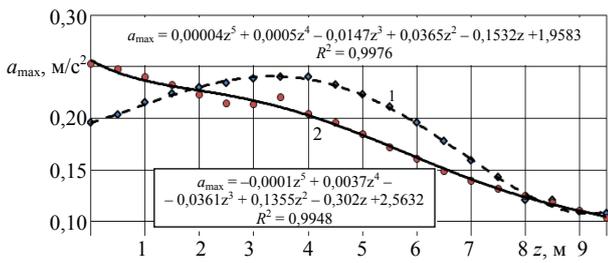


Рис. 3. Зависимость распределения максимальных ускорений колебаний a_{\max} по глубине z под подошвой фундамента (график 1) и без фундамента в грунтовой среде (график 2)

Fig. 3. Dependence of the distribution of maximum oscillation accelerations a_{\max} over depth z under the base of the foundation (graph 1) and without a foundation in the soil environment (graph 2)

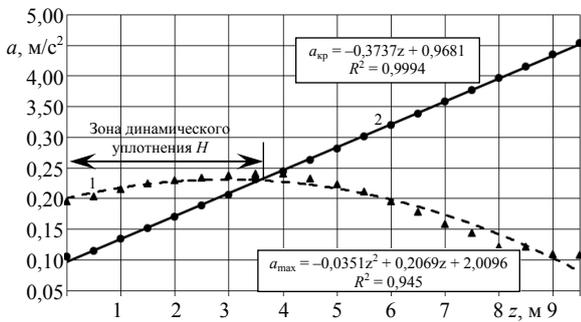


Рис. 4. Зависимости ускорений колебаний a от расстояния z от подошвы столбчатого фундамента по глубине грунта, расположенного на расстоянии 10 м от точки приложения динамической нагрузки:

- 1 – максимальное ускорение колебаний $a_{\max} = f(z)$;
- 2 – критическое ускорение колебаний $a_{\text{кр}} = f(z)$

Fig. 4. Dependences of vibration accelerations a on the distance z from the base of a columnar foundation along the depth of the soil, located at a distance of 10 m from the point of application of the dynamic load:

- 1 – maximum vibration acceleration $a_{\max} = f(z)$,
- 2 – critical vibration acceleration $a_{\text{кр}} = f(z)$

Наиболее известна следующая экспоненциальная зависимость, предложенная R. Woods [22], которую применяют при оценке колебаний фундаментов от вибраций, передаваемых через грунт:

$$w = w_0 e^{-\beta h}, \quad (2)$$

где w – ускорение колебаний на глубине h от поверхности грунта; w_0 – то же основания на поверхности грунта; β – коэффициент, величина которого для песков составляет 0,07–0,10 м^{-1} .

Данная формула не учитывает массы строительных конструкций. Многие исследователи [1, 5, 11, 12, 18, 23–27] исходят из предположения равенства параметров колебаний фундамента и грунта на поверхности при его свободном распространении (без наличия фундамента).

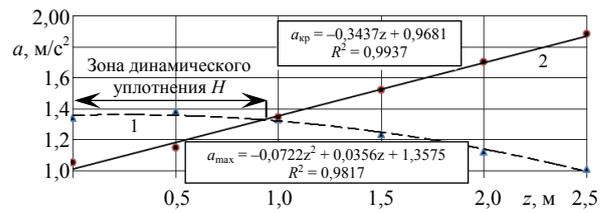


Рис. 5. Зависимости ускорений колебаний от расстояния z от подошвы столбчатого фундамента по глубине грунта, расположенного на расстоянии 22 м от точки приложения динамической нагрузки: 1 – максимальное ускорение колебаний $a_{\max} = f(z)$; 2 – критическое ускорение колебаний $a_{\text{кр}} = f(z)$

Fig. 5. Dependences of vibration accelerations a on the distance z from the base of a columnar foundation along the depth of the soil, located at a distance of 22 m from the point of application of the dynamic load:

- 1 – maximum vibration acceleration $a_{\max} = f(z)$;
- 2 – critical vibration acceleration $a_{\text{кр}} = f(z)$

Это допущение принято также в действующем нормативном документе РФ [28], что очевидно приводит к значительному увеличению расхода строительных материалов на повышение сейсмостойкости зданий и сооружений. Зависимость коэффициента передачи колебаний фундаменту от статического давления по его подошве более подробно рассмотрена в работе [20].

Зона динамического уплотнения грунта H составила 3,6 и 0,92 м для плитных столбчатых фундаментов, расположенных соответственно на расстояниях 10 и 22 м от источника колебаний. Дополнительные вертикальные динамические осадки, рассчитанные по формуле (1), составили соответственно 181 и 46,3 мм. Статическая осадка каждого из фундаментов, определенная методом конечных элементов, незначительна и составила 5,2 мм. Если рассматривать поперечную раму как здание с гибкой конструктивной схемой, то максимальная допустимая осадка фундаментов по [7] составляет 200 мм, а допустимая относительная разница осадок двух фундаментов поперечной рамы 0,006. В нашем случае суммарная максимальная осадка 186,2 мм, что несколько меньше максимально допустимой, а относительная разница осадок 0,01123, что гораздо больше допустимой (предельной) величины.

На рис. 6 показан фрагмент изополей распределения вертикальных нормальных динамических напряжений $\sigma_{\text{дин}}$ ($\text{т}/\text{м}^2$) через 0,34 с после приложения динамической нагрузки под подошвой столбчатого фундамента размерами в плане 2×2 м с глубиной заложения 1,5 м.

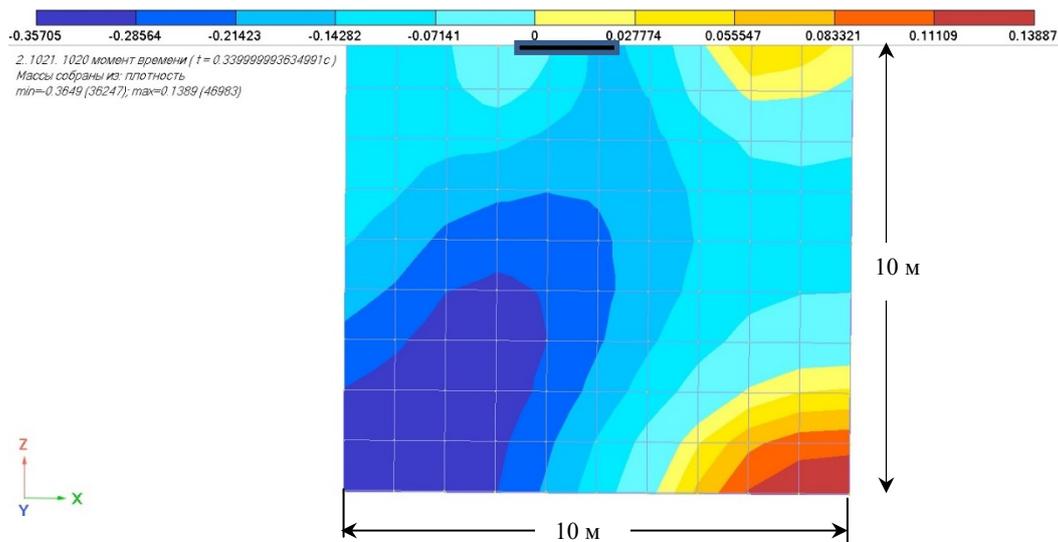


Рис. 6. Изополя вертикальных динамических напряжений $\sigma_{\text{дин}}$ (т/м^2) через 0,34 с после приложения динамической нагрузки под подошвой столбчатого фундамента размерами в плане 2×2 м с глубиной заложения 1,5 м

Fig. 6. Isofields of vertical dynamic stresses σ_{dyn} (t/m^2) after 0.34 sec. after applying a dynamic load under the base of a columnar foundation with in plan dimensions of 2×2 m and a depth of 1.5 m

Этот момент времени соответствует максимальному динамическому давлению по подошве фундамента. Среднее динамическое давление по подошве фундамента при этом составляет 4,1 % от действующих суммарных (статических и динамических) давлений, максимальное – 11,36 %. Давление под подошвой фундамента гораздо ниже расчетного сопротивления грунта R , определенного по формуле [6]. Взаимодействие основания и фундамента соответствует первой фазе напряженно-деформированного состояния (стадии уплотнения), по Н. М. Герсеванову.

Для уменьшения влияния динамических воздействий целесообразно использовать виброотсечные конструкции в виде вертикального волнового и (или) горизонтального инерционного барьеров. Их эффективность рассматривается в работах [20, 21].

В рассмотренном примере разница осадок фундаментов превышает предельную, а суммарная максимальная осадка фундамента, расположенного на расстоянии 10 м от источника, близка к допустимой величине.

Для устранения недопустимых динамических осадок существующих фундаментов также рекомендуется использовать буринъекционное упрочнение грунтов в их основании за счет инъекции цементного раствора под давлением

через трубки в затампированных цементным раствором или сухим песком скважинах. При этом необходимо учитывать особенности этого процесса в различных грунтах, обнаруженные автором на основании вскрытий корней буринъекционных анкеров на объектах строительства Минского метрополитена. Двухэтапная инъекция цементного раствора с водоцементным отношением В/Ц = 0,5–0,6 выполнялась в корневую зону грунтового анкера под давлением до 2,5 МПа после набора прочности цементным камнем обоймы. Дальнейшие испытания и освидетельствования корней пробных анкеров, выполненные автором, выявили недостатки данной конструкции. Ни в песках, ни в пылевато-глинистых грунтах не происходит пропитка цементным раствором прилегающего грунта. Эффект инъекции обусловлен только опрессовкой прилегающего грунта. Характерные поперечные сечения корня, сформированные в различных грунтах, приведены на рис. 7. При устройстве наклонных скважин в песчаных грунтах основные инъекционные уширения формируются над обоймой (рис. 7а, б). Тяга корня зачастую контактирует с грунтом. В твердых, полутвердых и тугопластичных суглинках и твердых супесях удастся сформировать цементную обойму, но последующая инъекция раствора в основном объеме идет на со-

здание «радиальных шипов» (рис. 7с), которые обламываются при нагружении анкера. В мягко- и текучепластичных суглинках и пластичных супесях происходит оплывание скважины (рис. 7d). Для формирования требуемой геометрии корня анкера использована конструкция буроинъекционного анкера по а. с. № 1392203 [29], с инъекцией в геотек-

стильную оболочку. Независимо от вида грунта, при наличии геотекстильной оболочки, весь объем инъекционного раствора идет на формирование корня (рис. 1е).

На рис. 8 приведены фотографии вскрытых поперечных сечений корней анкеров, сформированных в песках средней плотности от первоначального диаметра скважины, равного 114 мм.

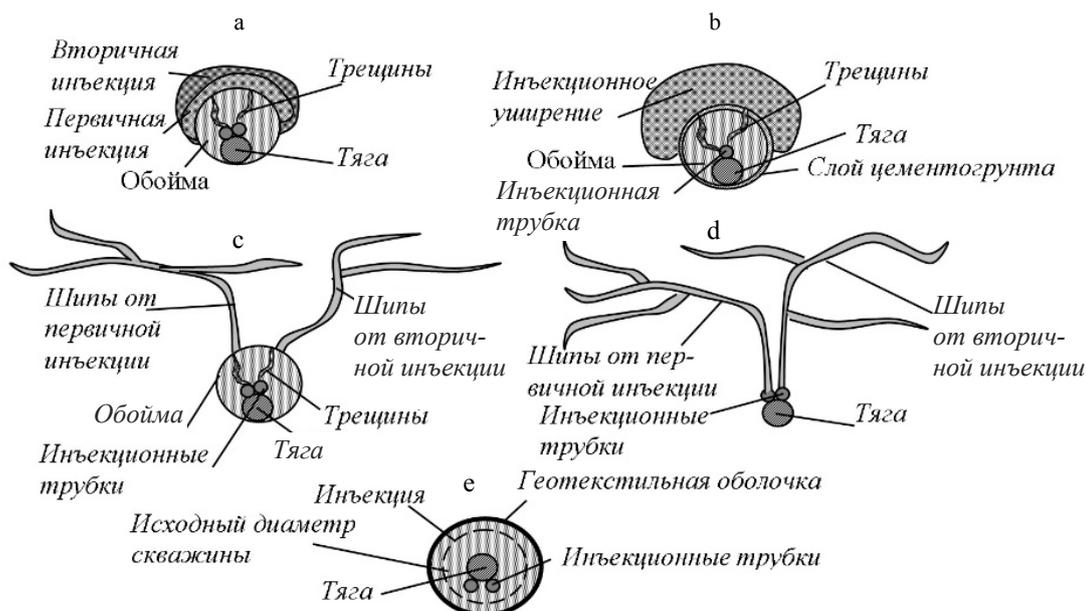


Рис. 7. Характерные поперечные сечения корней анкеров с одним стержнем и инъекцией посредством двух трубок с перфорацией: а – в песках плотных и средней плотности при инъекции по всей длине корня через отверстия в трубках, перекрытых резиновыми манжетами; б – так же, при выходе раствора через одно отверстие в инъекционной трубке и формировании местного уширения; с – в твердых, полутвердых и тугопластичных суглинках и твердых супесях; д – в мягко- и текучепластичных суглинках и пластичных супесях; е – независимо от вида грунта при наличии геотекстильной оболочки

Fig. 7. Typical cross-sections of the roots of anchors with one rod and injection through two perforated tubes: а – in dense and medium-density sands with injection along the entire length of the root through holes in tubes covered with rubber cuffs; б – also, when the solution exits through one hole in the injection tube and local broadening is formed; с – in hard, semi-solid and highly plastic loams and hard sandy loams; д – in soft-plastic and fluid-plastic loams and plastic sandy loams; е – regardless of the type of soil in the pre-sence of a geotextile shell



Рис. 8. Фотографии вскрытых поперечных сечений корней анкеров, сформированных в песках средней плотности в геотекстильной оболочке

Fig. 8. Photographs of exposed cross-sections of anchor roots formed in medium-density sands in a geotextile shell

Анкеры этой конструкции были впервые применены в г. Минске на станции метро «Спортивная» и используются по настоящее время. За счет применения геотекстильной оболочки удалось добиться снижения расхода цементного раствора приблизительно в два раза и значительного (в 1,4–10 раз) увеличения несущей способности анкеров в различных грунтах. Соответствующий эффект достигается и при использовании технологии буроинъекционного упрочнения для усиления оснований фундаментов. Необходимо учитывать, что следствием упрочнения является повышение жесткости основания, которое может увеличить параметры колебаний строительных конструкций. В этой связи следует оценивать физиологический аспект воздействия вибраций, который в данной статье не рассматривается. По данным автора, расстояния от источника вибраций, на которых выполняются санитарные нормы колебаний конструкций, приблизительно в три раза выше, чем соответствующие расстояния, при которых возникает риск повреждений строительных конструкций. Этот факт подтверждается данными исследований вибрации элементов зданий, расположенных вблизи линий Минского метрополитена неглубокого заложения. Параметры колебаний конструкций зданий, при которых происходят их повреждение, значительно превышают предельные величины по санитарным нормам и правилам [30].

Остальные положения приведенной методики в рамках данной статьи не рассматривались.

ВЫВОДЫ

1. Предложена комплексная методика оценки эксплуатационной надежности зданий и сооружений при вибродинамических воздействиях, распространяющихся в грунтовой среде.

2. Выявлены основные факторы, определяющие условия повреждения зданий или сооружений при вибродинамических воздействиях, передаваемых через грунтовую среду. Предложена методика расчета динамических осадков фундаментов зданий и сооружений, которая учитывает влияние массы строительных конструкций и изменчивость критических ускорений колебаний грунта под подошвой фундамента.

3. Для устранения или снижения недопустимых дополнительных динамических осадков при внешних вибродинамических воздействиях, передаваемых через грунт, рекомендуется использовать вертикальный, горизонтальный инерционный барьеры, буроинъекционное упрочнение грунтов оснований или их комбинацию.

ЛИТЕРАТУРА

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. В. Берлинов. М., 2005. 302 л.
2. Кудрявцев, И. А. Влияние вибрации на нижнее строение рельсового пути, здания и сооружения: автореф. дис. ... д-ра. техн. наук: 05.22.06 / И. А. Кудрявцев; БелГУТ. М., 1995. 43 л.
3. Калюжнюк, М. М. Сваебойные работы при реконструкции (Влияние колебаний на здания и сооружения) / М. М. Калюжнюк, В. К. Рудь. Л.: Стройиздат, 1989. 160 с.
4. Повколос, К. Э. Влияние вибродинамических воздействий на здания и сооружения // Эксперт: теория и практика. 2023. № 1 (20). С. 111–115. https://doi.org/10.51608/26867818_2023_1_111.
5. Drabkin, S. Estimation Settlement of Sand Caused by Construction Vibration / S. Drabkin, H. Lacy, D. S. Kim // Journal of Geotechnical Engineering. 1996. Vol. 122, No 11. P. 920–928. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9410\(1996\)122:11\(920\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9410(1996)122:11(920)).
6. Фундаменты плитные. Правила проектирования: ТКП 45-5.01-67-2007. Введ. 2.04.07. Минск: РУП «Стройтехнорм», 2007. 136 с.
7. Строительные нормы. Общие положения по проектированию оснований и фундаментов зданий и сооружений: СП 5.01.01-2023. Введ. 27.02.23. Минск: РУП «Стройтехнорм», 2023. 150 с.
8. 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.
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. Экспериментальная динамика сооружений. Мониторинг транспортной вибрации / Е. К. Борисов [и др.]; Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2007. 128 с.
11. Massarsch, K. R. Settlements and Damage Caused by Construction Induced Vibrations / K. R. Massarsch // Proc. International Workshop Wave 2000, Bochum, Germany 13–15 December 2000. P. 299–315.
12. Ter-Martirosyan, A. Z. Settlement of a Foundation on an Unsaturated Sandy Base Taking Vibrocreep Into Account /

- A. Z. Ter-Martirosyan, A. N. Shebunyaev, E. S. Sobolev // *Axioms*. 2023. Vol. 12, No 6. P. 594. <https://doi.org/10.3390/axioms12060594>.
13. Исмагилова, З. Ф. Исследование осадки фундаментов в глинистых грунтах при динамической нагрузке: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02 / З. Ф. Исмагилова; УГНТУ. Уфа, 2006. 21 с.
 14. 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. нац. техн. ун-т; редкол. М. И. Никитенко [и др.]. Минск, 2013. С. 150–157.
 15. Соболев, Е. С. Ползучесть и виброползучесть песчаных грунтов оснований зданий и сооружений: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02 / Е. С. Соболев. М., 2014. 150 с.
 16. Abate, G. Settlement of Sand Caused By Vertical Vibrations: Experimental Versus Numerical Results [Electronic Resource] / G. Abate, M. R. Massimino, M. Maugeri // 5th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, January 2011, 10–13 Santiago, Chile. Mode of access: <https://www.issmge.org/uploads/publications/59/67/7.6.SOSAB.pdf>.
 17. Vering, G. The Vibrational Behavior of Soil in Relation to its Properties [Electronic Resource] // *Comp. rend. 5. Congr. Internat. Mechanic Sole et Trav. Fondat. Paris, 1961*. Mode of access: https://www.issmge.org/uploads/publications/1/40/1961_01_0092.pdf.
 18. Савинов О. А. Современные конструкции фундаментов под машины и их расчет. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Стройиздат. Ленингр. отд-ние, 1979. 200 с.
 19. Чернов, Ю.Т. Вибрации строительных конструкций / Ю. Т. Чернов. М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2006. 288 с.
 20. 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>.
 21. Повколас, К. Э. Оценка эффективности применения вертикальных барьеров из газонаполненных цилиндрических баллонов под давлением для снижения вибраций, распространяющихся в грунтовой среде / К. Э. Повколас // *Мелиорация*. 2022. № 4 (102). С. 31–37.
 22. Woods, R. D. Energy-Attenuation relationships from construction vibrations / R. D. Woods, L. P. Jedgele // *ASCE Symp. on Vibration Problems in Geotech. Eng. New York: ASCE, 1985*. P. 229–246.
 23. Баркан, Д. Д. Динамика оснований и фундаментов / Д. Д. Баркан. Л.: Стройвоенмориздат, 1948. 459 с.
 24. 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.
 25. Свинкин, М. П. Прогнозирование колебаний грунта при вибрациях фундаментов машин / М. П. Свинкин // *Динамика сооружений*. Киев: Будівельник, 1973. С. 34–37.
 26. 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.
 27. Томсон, О. И. Колебания каркасов промышленных зданий / О. И. Томсон // *Колебания зданий и сооружений: сб. статей*. М.: Госстройиздат, 1963. С. 56–71.
 28. *Строительство в сейсмических районах: СП 14.13330.2018. Введ. 25.12.18*. М.: Стандартинформ, 2018. 114 с.
 29. Никитенко, М. И. Бурионъекционные анкеры и сваи при строительстве и реконструкции зданий и сооружений / М. И. Никитенко. Минск: БНТУ, 2007. 580 с.
 30. 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.

Поступила 12.09.2023

Подписана к печати 14.11.2023

Опубликована онлайн 31.01.2024

REFERENCES

1. Berlinov M. V. (2005) *Fundamentals of a Comprehensive Assessment of the Dynamic Operation of Building Structures under Vibration Effects of Industrial Equipment*. Minsk. 302 (in Russian).
2. Kudryavtsev I. A. (1995) Influence of Vibration on Lower Structure of Rail Track, Buildings and Structures. Minsk. 43 (in Russian).
3. Kalyuzhnyuk M. M., Rud V. K. (1989) *Piling Works during Reconstruction (Effect of Vibrations on Buildings and Structures)*. Leningrad, Stroyizdat Publ. 160 (in Russian).
4. Povkolas K. E. (2023) Influence of Vibration-Dynamic Impact on Buildings and Structures. *Ekspert: Teoriya i Praktika = Expert: Theory and Practice*, (1), 111–115. https://doi.org/10.51608/26867818_2023_1_111.
5. Drabkin S., Lacy H., Kim D. S. (1996) Estimation Settlement of Sand Caused by Construction Vibration. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122 (11), 920–928. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9410\(1996\)122:11\(920\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9410(1996)122:11(920))
6. ТКР [Technical Code of Common Practice] 45-5.01-67–2007. *Slab Foundations. Design Rules*. Minsk, Republican Unitary Enterprise “Stroytekhnorm”, 2007. 136 (in Russian).
7. СП [Construction Rules] 5.01.01–2023. *Building Codes. General Provisions for the Design of Foundations and Foundations of Buildings and Structures*. Minsk, Republican Unitary Enterprise “Stroytekhnorm”, 2023. 150 (in Russian).
8. State Standard P 52892–2007. *Vibration and Shock. Building Vibration. Vibration Measurement and Its Impact on the Structure*. Moscow, Federal Agency for Technical Regulation and Metrology: Research Center for Control and Diagnostics of Technical Systems, 2007. 16 (in Russian).
9. ТКР [Technical Code of Common Practice] 45-5.01-264–2012. *Bases and Foundations of Buildings and Structures. Foundations under Vibration-Dynamic Influences. Design*

- Rules. Minsk, Republican Unitary Enterprise “Stroytekhnorm”, 2012. 114 (in Russian).
10. 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, Publishing House of Kamchatka State Technical University. 128 (in Russian).
 11. Massarsch K. R. (2000). Settlements and Damage Caused by Construction Induced Vibrations. *Proc. International Workshop Wave 2000, Bochum, Germany 13–15 December 2000*, pp. 299–315.
 12. Ter-Martirosyan A. Z., Shebunyaev A. N., Sobolev E. S. (2023) Settlement of a Foundation on an Unsaturated Sandy Base Taking Vibrocreep Into Account. *Axioms*, 12 (6), 594. <https://doi.org/10.3390/axioms12060594>.
 13. Ismagilova Z. F. (2006) *Study of Foundation Settlement in Clayey Soils under Dynamic Load*. Ufa. 21 (in Russian).
 14. Kravtsov V. N., Lapatin P. V. (2013) Settlement of the Bases of Slab Foundations under Long-Term Exposure to Low Intensity Dynamic Loads. *Geotekhnika Belarusi: Nauka i Praktika: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. konf., Minsk, 23–25 Oktyabrya 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).
 15. Sobolev E. S. (2014) *Creep and Vibration Creep of Sandy Soils at the Bases of Buildings and Structures*. Minsk. 150 (in Russian).
 16. Abate G., Massimino M. R., Maugeri M. (2011) Settlement of Sand Caused by Vertical Vibrations: Experimental versus Numerical Results. *5th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, January 2011, 10–13 Santiago, Chile*. Available at: <https://www.issmge.org/uploads/publications/59/67/7.6.SOSAB.pdf>.
 17. Vering G. (1961) The Vibrational Behavior of Soil in Relation to its Properties. *Comp. Rend. 5. Congr. Internat. Mechanic Sole et Trav. Fondat.* Paris, 1961. Available at: https://www.issmge.org/uploads/publications/1/40/1961_01_0092.pdf.
 18. Savinov O. A. (1979) *Modern Designs of Foundations for Machines and Their Calculation*. 2nd ed. Leningrad, Stroyizdat Publ., Leningrad Branch. 200 (in Russian).
 19. Chernov Yu. T. (2006) *Vibrations of Building Structures*. Moscow, Publishing House of Association of Construction Universities. 288 (in Russian).
 20. Povkolas K. E. (2023) Evaluation of Effectiveness of Application of Horizontal Inertial Barriers to Reduce Vibrations Propagating in Ground Environment. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 22 (4), 286–293. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-4-286-293> (in Russian).
 21. Povkolas K. E. (2022) Evaluation of the Effectiveness of Using Vertical Barriers Made of Gas-Filled Cylindrical Cylinders under Pressure to Reduce Vibrations Propagating in the Soil Environment. *Melioratsiya* [Melioration], (4), 31–37 (in Russian).
 22. Woods R. D., Jedele L. P. (1985) Energy-Attenuation Relationships From Construction Vibrations. *ASCE Symp. on Vibration Problems in Geotech. Eng.* New York, ASCE, 229–246.
 23. Barkan D. D. (1948) *Dynamics of Bases and Foundations*. Leningrad, Stroyvoenmorizdat Publ. 459 (in Russian).
 24. Seymov V. M., Shevchenko V. D. (1977) Vibrations of Round Die under Seismic Influences. *Dinamika Osnovaniy, Fundamentov i Podzemnykh Sooruzheniy: Materialy 4-i Vsesoyuzn. Konf. 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).
 25. Svinkin M. P. (1973) Prediction of Ground Vibrations during Machine Foundation Vibrations. *Dinamika Sooruzheniy* [Dynamics of structures]. Kiev, Budivelnik Publ., 34–37 (in Russian).
 26. Taranov V. G. (1977) Methods for Experimental Determination of the Dynamic Characteristics of the Foundations of Vibration Receivers. *Dinamika Osnovaniy, Fundamentov i Podzemnykh Sooruzheniy: Materialy 4-i Vsesoyuzn. Konf. 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).
 27. Tomson O. I. (1963) Vibrations of Frames of Industrial Buildings. *Kolebaniya Zdanii i Sooruzheniy: Sb. Statei* [Vibrations of Buildings and Structures: Collected Papers]. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 56–71 (in Russian).
 28. SP [Construction Rules] 14.13330.2018. *Construction in Seismic Areas*. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 114 (in Russian).
 29. Nikitenko M. I. (2007) *Drilled Injection Anchors and Piles in the Construction and Reconstruction of Buildings and Structures*. Minsk, Belarusian National Technical University. 580 (in Russian).
 30. Vasilevich Yu. V., Kirilenko A. T., Neumerzhitskii V. V., Neumerzhitskaya E. Yu. (2016) Vibration Insulation of Buildings Located in the Shallow Technical Zone of the Metro. *Vestnik Belorusskogo Gosudarstvennogo Universiteta Transporta: Nauka i Transport = Bulletin of BSUT: Science and Transport*, (1), 295–297 (in Russian).

Received: 12.09.2023

Accepted: 14.11.2023

Published online: 31.01.2024