



УДК: 624.131.5

DOI: 10.48612/NewsKSUAE/75.1

EDN: AKEYKA

Исследование виброползучести песчаных грунтов при низкочастотных вибрационных воздействиях в приборе динамического трехосного сжатия

Р.А. Мангушев¹, А.В. Вагурина¹, К.В. Мchedlidze¹, К.А. Мальцева¹

¹Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация: *Постановка задачи.* Основания зданий и сооружений городской застройки практически постоянно подвергаются динамическим воздействиям от различных источников. Длительное динамическое нагружение приводит к развитию деформаций виброползучести или разжижению водонасыщенных песчаных грунтов, что может привести к потере устойчивости основания. *Цель работы* заключается в исследовании поведения песчаных грунтов под воздействием вибрационной нагрузки низкой частоты воздействия. *Задачами исследования* являются выполнение аналитического обзора литературы в рамках исследуемой тематики и экспериментальное подтверждение гипотезы о зависимости величины относительной деформации от количества циклов и частоты динамического воздействия. Лабораторные испытания проводились на приборе динамического трехосного сжатия в условиях закрытого дренажа.

Результаты исследования представлены в виде графиков зависимости осевых деформаций от времени действия динамической нагрузки и количества циклов. В ходе исследований было зафиксировано значительное снижение модуля деформации в процессе вибрирования.

Выводы. Полученные в ходе исследования результаты могут быть полезны при проектировании и при осуществлении выбора технологий производства работ нулевого цикла.

Ключевые слова: песчаные грунты, динамическое воздействие, частота, количество циклов, виброползучести, разжижение, уменьшенный модуль деформации

Для цитирования: Мангушев Р.А., Вагурина А.В., Мchedlidze К.В., Мальцева К.А. Исследование виброползучести песчаных грунтов при низкочастотных вибрационных воздействиях в приборе динамического трехосного сжатия // Известия КГАСУ, 2026, № 1 (75), с. 8-18, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/75.1, EDN: AKEYKA

Study of vibrocreep of sandy soils under low-frequency vibration effects in the device of dynamic triaxial compression

R.A. Mangushev¹, A.V. Vagurina¹, K.V. Mchedlidze¹, K.A. Maltseva¹

¹St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russian Federation

Abstract: *Problem statement.* The bases of structures of urban development are almost constantly exposed to dynamic loading from various sources. Long-term dynamic loading leads to the development of vibrocreep deformations or liquefaction of water-saturated sandy soils. As a result, there is a risk of base failure. *The purpose of the work* is to study the behavior of sandy soils under the influence of a low-frequency vibration load. *The tasks of the study* are to carry out the analytical review of the literature of the studied topic and experimental confirmation of the hypothesis about the dependence of the unit strain value on the number of cycles and the

frequency of dynamic loading. Laboratory tests were performed on a device of dynamic triaxial compression under conditions of closed drainage.

The results of the study are presented in the form of graphs of the dependence of axial deformations on the time of action of the dynamic load and the number of cycles. In the course of the research, a significant decrease in the modulus of deformation in the process of vibration was recorded.

Conclusions. The results obtained in the course of the study can be useful in the design and selection of technologies for the production of zero cycle construction works.

Keywords: sandy soils, dynamic loading, frequency, number of cycles, vibrocreep, liquefaction, reduced modulus of deformation

For citation: Mangushev R.A., Vagurina A.V., Mchedlidze K.V., Maltseva K.A. Study of vibrocreep of sandy soils under low-frequency vibration effects in the device of dynamic triaxial compression // News of KSUAE, 2026, № 1 (75), p. 8-18, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/75.1, EDN: AKEYKA

1. Введение

Динамическое воздействие на грунты основания зданий и сооружений оказывают разнообразные источники — транспорт, технологическое оборудование, сейсмика, взрывы и строительная техника. В зону влияния транспортного воздействия попадает значительная доля от зданий в городской черте, а также (и в особенности) расположенных в непосредственной близости от автомагистралей [1]. Согласно [2] частотный диапазон транспортного воздействия варьируется от 10 Гц (для движущихся автомобилей) до 70 Гц (для железнодорожного транспорта). Множество работ — начиная с 1755 года и, не теряя актуальности до нашего века, — посвящено сейсмике [3-5]. Сейсмические воздействия характеризуются высокими амплитудами колебаний и низкими частотами — в пределах 1-3 Гц [6, 7], что представляет собой потенциальную опасность латерального разжижения грунтового массива, сопровождаемую как значительными по величине вертикальными, так и горизонтальными смещениями массива грунта и приводящую к гибели людей, разрушению зданий и колоссальным экономическим потерям. Характер разрушения и масштабы последствий будут зависеть от характера сейсмического воздействия и конструкции фундаментов [8, 9]. Разработкой расчетов оснований и фундаментов под технологическое оборудование занимались великие советские и российские ученые [10-12]. Величина дополнительных деформаций основания [10, 11] и частота динамического воздействия [2] в значительной степени зависят от режима работы и вида промышленных машин и варьируются в широком диапазоне значений. В процессе производства строительных работ в зависимости от грунтовых условий могут применяться различные свайные технологии, оказывающие динамическое воздействие на основание — забивка свай [13], вибропогружение свай или шпунтового ограждения, камуфлетные взрывы. Основными факторами, определяющими величину технологических осадок, являются тип грунта, вибрационная нагрузка и расстояние до источника вибрации, а для безопасного производства работ необходимо учитывать накопление деформаций и применять разработанные методы прогноза и технические мероприятия [14-16]. Степень влияния динамического воздействия на грунтовое основание окружающей застройки также во многом определяется выбранной технологией устройства глубоких фундаментов [17]. Частота вибраций вызванных работой строительной техники варьируется в диапазоне от 1 до 40 Гц в зависимости от вида проводимых строительных работ и грунтовых условий. В условиях водонасыщенных грунтов Санкт-Петербурга, за исключением сейсмических и взрывных нагрузок, указанные источники оказывают практически постоянное воздействие на основание исторической застройки.

Как известно, вследствие вибрационного воздействия нарушается структура рыхлых несвязных грунтов. В допредельном состоянии в результате совместного статического и длительного динамического воздействия в песчаных грунтах происходит переупаковка частиц, как следствие, накапливаются вертикальные деформации, то есть наблюдается явление виброползучести [2]. Для водонасыщенных песчаных грунтов наличие вибрационного воздействия усугубляется возможностью перехода в разжиженное

состояние – то есть к практически полному исчезновению внутреннего трения на контакте песчаных частиц, как следствие – к почти полной потере прочности [10]. При виброразжижении рыхлый песчаный грунт стремится уменьшить занимаемый объем и «взвесить» частицы в воде, в результате чего исчезнут эффективные напряжения [3]. Таким образом, возникает необходимость экспериментального определения показателей виброползучести и разжижаемости грунтов основания, то есть его динамической устойчивости [18].

Вознесенский Е.А. подчеркивает низкую степень изученности в вопросах действия техногенных вибраций [18]. В [18] подчеркивается противоречие – в процессе изысканий следует определять преобладающие частоты колебаний грунтов, однако диапазон частот, в пределах которого вибрационное воздействие можно считать опасным в действующих нормативных документах не рассматривается.

В середине XX века Баркан Д.Д. предложил выражение (1), позволяющее прогнозировать развитие дополнительных относительных деформаций во времени [11]:

$$\varepsilon_d(t) = \frac{\sigma_0 + \sigma_a (\sin \omega t)}{\eta_0 \alpha} (1 - e^{-\alpha t}) \quad (1)$$

где σ_0 — величина статической составляющей напряжений, кПа; σ_a — амплитуда динамических напряжений, кПа; α — параметр реологического упрочнения; η_0 — динамическая вязкость грунта; t — время динамического воздействия, с.

Исследованием вязкости песчаных грунтов при динамическом воздействии с использованием прибора динамического трехосного сжатия в диапазоне частот от 5 до 100 Гц занимались З.Г. Тер-Мартirosян и А.З. Тер-Мартirosян [19]. Испытания [19] показали, что вязкость песков при динамическом нагружении в 100 раз меньше, чем при кинематическом воздействии, что говорит об изменении фазового состояния грунта при приложении динамической нагрузки. Динамическое воздействие способствует переходу песка в состояние плотной жидкости, вязкость которой снижается с возрастанием частоты вибрационного воздействия.

Потенциал разжижения грунтов можно оценить через величину фактора устойчивости [2]:

$$F_l = \frac{\tau_{av}}{\tau_N} \quad (2)$$

где F_l - потенциал разжижения грунта; τ_{av} — средние тангенциальные динамические напряжения; τ_N — критическое значение средних тангенциальных динамических напряжений, определяемое экспериментально.

Динамическое разжижение возможно в случае, когда фактор устойчивости превышает по величине единицу.

Таким образом, цель заключается в исследовании поведения песчаных грунтов под воздействием вибрационной нагрузки низкой частоты воздействия.

Задачи заключаются в выполнении аналитического обзора литературы в рамках исследуемой тематики и экспериментальном подтверждении гипотезы о зависимости величины относительной деформации от количества циклов и частоты динамического воздействия.

2. Материалы и методы

Лабораторные испытания и обработка полученных данных по определению величины относительных деформаций виброползучести проводились в приборе динамического трехосного сжатия для водонасыщенных образцов песков мелкого, средней крупности и крупного в соответствии с ГОСТ Р 563532022 «Грунты. Методы лабораторного определения динамических свойств дисперсных грунтов».

Для чистоты эксперимента пески были предварительно просеяны на ситах и подвержены отмучиванию. Образцы формовались в резиновой оболочке внутри разъемной обоймы методом послойного трамбования. Начальная плотность образцов фиксировалась и была приблизительно идентичной.

Образцы были подвержены предварительной консолидации в условиях открытого дренажа при вертикальном давлении $\sigma_1 = 120$ кПа и боковом давлении $\sigma_3 = 100$ кПа, девиатор напряжений $q = 20$ кПа. По достижении стабилизации деформаций образца, кран дренажа перекрывался и прикладывалась динамическая нагрузка заданной частоты при амплитуде динамического воздействия $A = 20$ кПа. Исследуемые частоты динамического воздействия варьировались в диапазоне от $f = 1$ до $f = 3$ Гц. Испытания завершались при условии достижения максимального количества циклов $N = 10000$, либо при разрушении (разжижении) песчаного образца.

Фотографические снимки песчаного образца средней крупности, загруженного в прибор динамического трехосного сжатия и того же образца, подверженного разжижению, приведены на рис. 1.

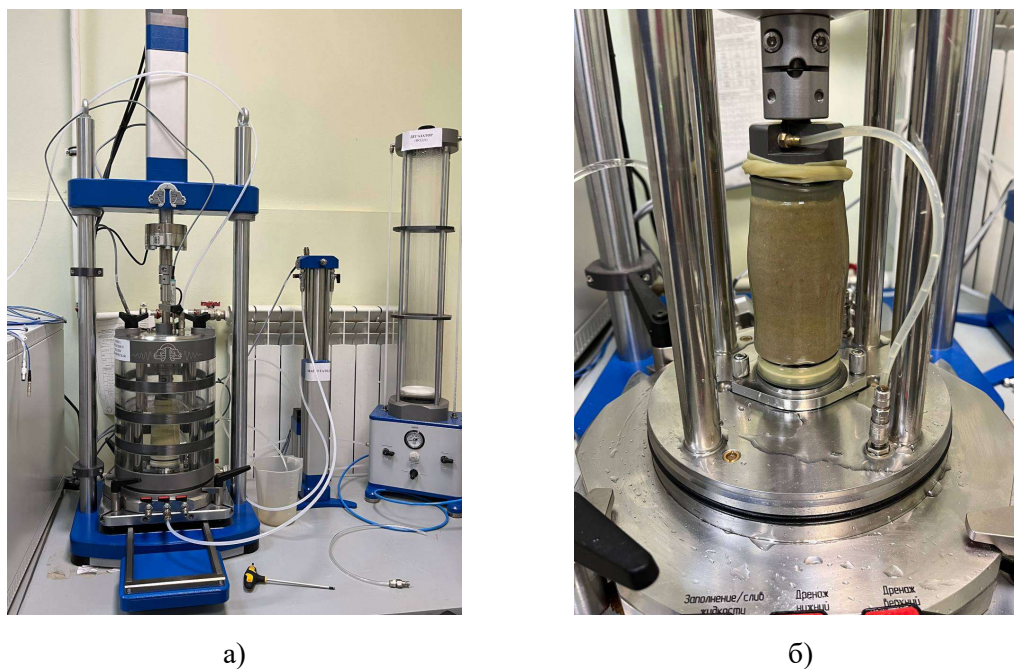


Рис. 1. Испытание песчаного образца в приборе динамического трехосного сжатия – а) образец в динамической камере до начала испытания; б) образец, подверженный разжижению (иллюстрация авторов)

Fig. 1. Testing a sand specimen in a dynamic triaxial compression device: a - the sample in the dynamic chamber before performing an experiment; b – the sample after liquefaction (illustration by the authors)

3. Результаты и обсуждение

В ходе лабораторных испытаний песчаных образцов были получены графические зависимости прироста относительных деформаций от количества циклов нагружения динамического нагружения (рис. 2). Характерно, что для всех рассмотренных фракций угол наклона прямой снижается с ростом частоты динамического воздействия.

О развитии относительных деформаций виброползучести во времени можно судить по экспериментально полученным зависимостям, представленным на рис. 3.

В результате лабораторных испытаний для образцов песков крупного, средней крупности и мелкого при частоте вибрационного воздействия $f = 1; 2$ Гц для всех случаев было достигнуто разжижение. Как известно, разжижение песчаного грунта может произойти вследствие соблюдения одного из условий:

1. Достижение величиной относительного порового давления значения:

$$PPR = \frac{u}{\sigma_m} = 1. \text{ Данный случай не соответствует полученным результатам, так как}$$

максимальное полученное значение относительного порового давления составило $PPR = 0,81$ (значение получено для песка крупного при частоте динамического воздействия $f = 1$ Гц).

2. Прохождение траектории эффективных напряжений через точку начала координат, чего также не произошло.

3. По достижении осевой деформацией величины $\varepsilon_d = 5\%$. Указанное условие было соблюдено для песков крупного, средней крупности и мелкого при частотах динамического воздействия $f = 1; 2$ Гц.

Для песков всех рассмотренных фракций, подверженных вибрированию при частоте $f = 3$ Гц при количестве циклов $N = 10000$ ни одно из указанных условий не было соблюдено, следовательно, разжижения грунта не произошло.

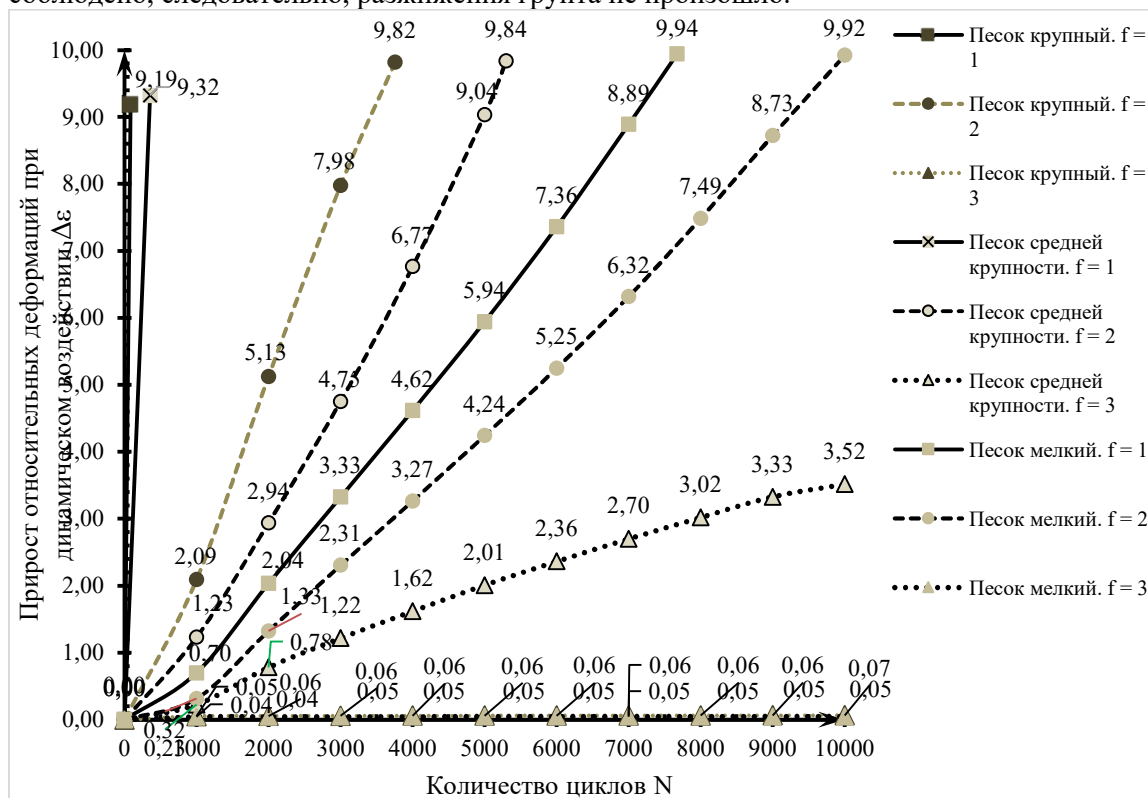


Рис. 2. Прирост относительных деформаций с ростом количества циклов (иллюстрация авторов)
Fig. 2. The increase in unit strains due to the increase in the number of cycles (illustration by the authors)

Данные, представленные на рисунке 2 могут быть сопоставлены с результатами исследований Мирсаяпова И.Т. и Королевой И.В., которые проводились для образцов песчаного грунта в водонасыщенном состоянии в условиях циклического трехосного сжатия. В их работах графически зафиксировано возрастание объемных деформаций образца грунта по мере увеличения числа циклов загрузки [20], что согласуется с результатами, представленными в данной статье.

Построение кривых виброползучести (рис. 3) позволяет прогнозировать снижение модуля деформации вследствие динамического воздействия путем введения аппроксимирующей функции вида $\varepsilon d = a \cdot \ln t + b$, где a и b – эмпирические параметры. Уменьшенный модуль деформации может быть определен:

$$E_{red} = \frac{E}{1 + \frac{E \varepsilon_d}{\beta \sigma_z}} \quad (2)$$

где E – модуль деформации, МПа, определяемый в соответствии с ГОСТ 12248.3; $\beta = 0,8$ – безразмерный коэффициент в соответствии с СП 22.13330.2016 (5.16); σ_z – статическое вертикальное напряжение.

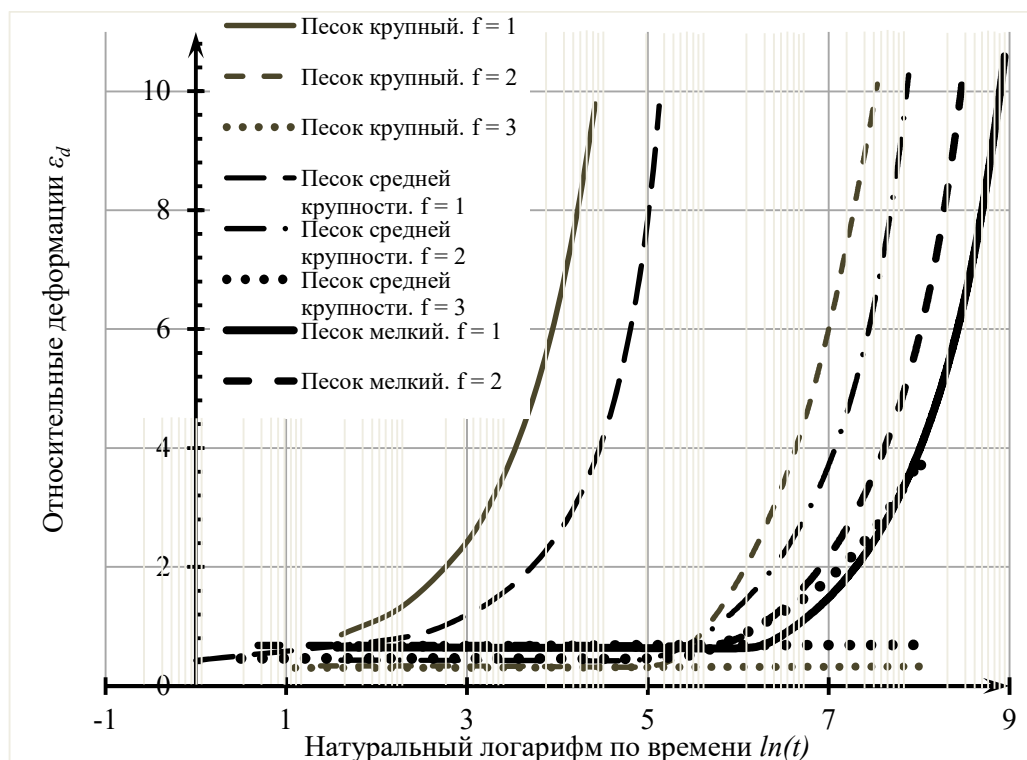


Рис. 3. Развитие деформаций виброползучести во времени (иллюстрация авторов)

Fig.3. The dependence of vibrocreep deformations on time (illustration by the authors)

Значения модулей деформации при нагружении в статическом и динамическом режимах определены и сведены в табл. 1. В процессе вибрирования при частотах $f = 1, 2$ Гц модуль деформации испытуемых песчаных образцов снизился на 65-78% для всех рассмотренных фракций. В то время как при вибрировании при частоте $f = 3$ Гц снижение модуля деформации было менее значительно - на 11-12% для песков крупного и мелкого и на 52% для песка средней крупности.

Таблица 1

Значения и степень снижения модуля деформации песков крупного, средней крупности и мелкого до и после вибрирования при различных частотах

Крупность песка	E , МПа	E_{red} , МПа		
		$f = 1$ Гц	$f = 2$ Гц	$f = 3$ Гц
Песок мелкий	19	7	6	16
		↓ на 65%	↓ на 66%	↓ на 12%
Песок средней крупности	28	7	7	13
		↓ на 73%	↓ на 73%	↓ на 52%
Песок крупный	35	8	8	31
		↓ на 78%	↓ на 78%	↓ на 11%

С целью наглядного отображения закономерности изменения модуля деформации при различных частотах результаты представлены в виде графической зависимости (рис. 4).

В зарубежной литературе вопросу разжижения песчаных грунтов также уделяется значительное внимание. В работах [26;27] показано, что ключевым параметром, определяющим начало разжижения, является не столько амплитуда циклических напряжений, сколько их частотный состав и количество циклов, особенно в диапазоне низких частот (0.5–5 Гц), что полностью согласуется с задачами настоящего исследования. Авторами [29] на основе серии испытаний в приборе динамического трехосного сжатия было получено, что при невысоком уровне девиатора напряжений (15–25 кПа) накопление порового давления происходит нелинейно: критическая стадия наступает после прохождения 60–80% от общего числа циклов до разжижения. Кроме того, в работе [27]

упоминается, что обычные критерии разжижения ($\varepsilon_d = 5\%$ или $PPR = 1,0$) не всегда достигаются одновременно, и для прогноза деформаций виброползучести следует использовать комбинированные критерии. Таким образом, проведенный анализ подтверждает необходимость дальнейших экспериментальных исследований в области низкочастотных воздействий.

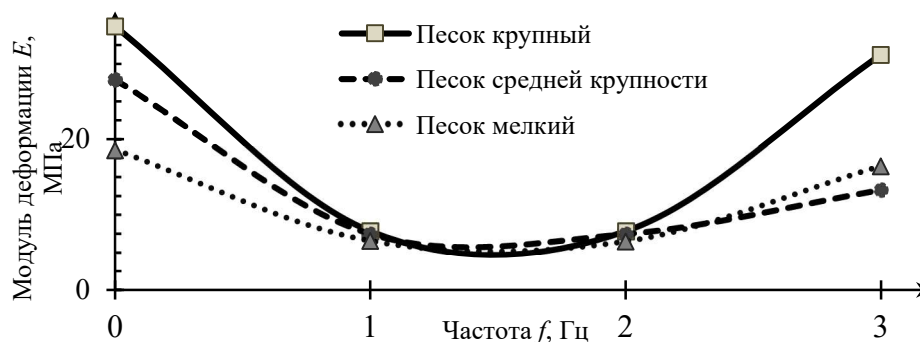


Рис. 4. Значения модуля деформации для песков крупного, средней крупности и мелкого при различных значениях частоты (иллюстрация авторов)

Fig. 4. Values of the deformation modulus for sandy soils of coarse, medium and fine particle size at different values of frequency (illustration by the authors)

В перспективе полученные зависимости могут быть использованы при решении задач о степени влияния технологического воздействия на дополнительные осадки зданий окружающей застройки, вызванные вибрированием, например при вибропогружении шпунта или свай [16], работе стационарного оборудования [12], движении транспорта [1] или при сейсмических расчетах [21,22,23].

В настоящее время отечественными и зарубежными учеными исследуются методы по ликвидации негативных последствий от динамического воздействия на грунт. В частности, Шарафутдиновым Р.Ф. [24, 25] предложена методика увеличения динамической устойчивости песчаных грунтов мелких и средней крупности на 20-60% за счет пропитки грунта 5% коллоидным кремнеземом. Отмечается, что использование кремнезема в больших концентрациях (10-15%) менее эффективно и дает меньший относительный прирост динамической прочности [24]. Нуждин М.Л. [12] в ходе лабораторных и полевых экспериментов доказал, что высоконапорное инъецирование цементно-песчаного раствора под подошву свайного ростверка снижает амплитуду колебаний фундамента в 1,8–2,6 раза. В статье [21] предложен метод усиления песчаных оснований путем создания песчано-резиновой смеси методом перемешивания резиновой крошки с песком в различных соотношениях. Авторы обосновывают увеличение динамической прочности и динамического модуля сдвига серией лабораторных испытаний в условиях динамического трехосного сжатия и резонансной колонки.

4. Заключение

По результатам лабораторных испытаний поведения песчаных грунтов при динамическом нагружении низкой интенсивности можно сделать следующие выводы:

1. Для песков крупного, средней крупности и мелкого прослеживается закономерность: чем ниже частота динамического воздействия, тем меньшее количество циклов требуется для разжижения образца.

2. Во всех рассмотренных случаях (для песков крупных, средней крупности и мелких) разжижение песчаных образцов произошло при частоте динамического воздействия $f = 1; 2$ Гц. Разжижение было зафиксировано по критерию достижения осевых деформаций величины $\varepsilon_d = 5\%$. Критерий достижения величины относительного порового

давления $PPR = \frac{u}{\sigma_m} = 1$ и критерий прохождения траектории эффективных напряжений

через начало координат не были зафиксированы.

3. Динамическое нагружение при частоте $f = 1; 2$ Гц снижает модуль деформации песчаного грунта не менее, чем в три раза. Стоит отметить, что для песков

средней крупности снижение модуля деформации было более значительным, чем для песков мелких и менее значительным, чем для песков крупных. При частоте динамического воздействия $f = 3$ Гц снижение было менее значительным и зависимости от диаметра частиц не прослеживалось.

4. Полученные в рамках исследования результаты могут быть использованы как плацдарм для дальнейших исследований по снижению рисков динамического разжижения песчаных оснований, а также для прогноза возникновения дополнительных деформаций виброползучести в процессе проектирования.

Список литературы / References

1. Пономарев А. Б., Шутова О. А. Проблемы исследования вибрации фундаментов зданий, вызываемой движением автотранспорта // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. 2020. № 3(46). С. 26-28. EDN ACDDNO.
Ponomarev A.B., Shutova O.A. Problems of studying vibration of building foundations caused by vehicle traffic // Natural and Technogenic Risks. Safety of Structures. 2020. No. 3(46). P. 26–28. EDN ACDDNO.]
2. Вознесенский Е.А. Поведение грунтов при динамических нагрузках. М.: Изд-во МГУ, 1997. 286 с.
Voznesensky E.A. Soil behavior under dynamic loads / Moscow: MSU Publishing, 1997. 286 p.
3. Ишихара К. Поведение грунтов при землетрясениях / пер. с англ. СПб.: Недра, 2006. 384 с.
Ishihara, K. Soil behavior during earthquakes / transl. from English. St. Petersburg: Nedra, 2006. 384 p.
4. Hu H., Chen D., Liu Y., Liu Y., Tang R. Uncertainty qualification in seismic analysis of concrete dams based on model order reduction accelerated stochastic SBFEM // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2024. Vol. 181. Article 108683. DOI: 10.1016/j.soildyn.2024.108683.
5. Белаш Т. А., Бубис А. А., Смирнова Л. Н., Ставницер Л. Р. Использование принципа сейсмоизоляции в конструкциях сейсмозащиты зданий на многолетнемёрзлых грунтах // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2022. № 5. С. 23–30. DOI: 10.37153/2618-9283-2022-5-23-30. EDN OTUIPK.
Belash T.A., Bubis A. A., Smirnova L. N., Stavnitser L. R. Use of the seismic isolation principle in earthquake protection structures of buildings on permafrost soils // Earthquake Engineering. Safety of Structures. 2022. No. 5. P. 23–30. DOI: 10.37153/2618-9283-2022-5-23-30. EDN OTUIPK.
6. Qu Y., Chen D., Liu L., Ooi E. T., Eisenträger S., Song C. A direct time-domain procedure for the seismic analysis of dam-foundation-reservoir systems using the scaled boundary finite element method // Computers and Geotechnics. 2021. Vol. 138. Article 104364. DOI: 10.1016/j.compgeo.2021.104364.
7. Минасян А. А., Шуклина М. Л., Ставницер Л. Р. Спектры энергии и мощности как критерии интенсивности техногенных, динамических и сейсмических воздействий // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2022. № 6. С. 8-17. DOI: 10.37153/2618-9283-2022-6-8-17. EDN CJGXFP.
Minasyan A.A., Shuklina M.L., Stavnitser L.R. Energy and power spectra as criteria for the intensity of technogenic, dynamic and seismic impacts // Earthquake Engineering. Safety of Structures. 2022. No. 6. P. 8–17. DOI: 10.37153/2618-9283-2022-6-8-17. EDN CJGXFP.
8. Chen D., Pan Z., Zhao Y. Seismic damage characteristics of high arch dams under oblique incidence of SV waves // Engineering Failure Analysis. 2023. Vol. 152. Article 107445. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2023.107445.
9. Der-Wen Chang, Hsu L., Shih-Hao Cheng, Louis Ge, Zhussupbekov A., Wong R. K.-N. Damage measures of low-rise building foundations on layered sands due to earthquake impacts // 2026 Japanese Geotechnical Society Special Publication 12(5):151-156. DOI:10.3208/jgssp.PS-TC305-001
10. Савинов О.А. Современные конструкции фундаментов под машины и их расчет. Л.: Машиностроение, 1979. 320 с.

- Savinov O.A. Modern designs of foundations for machines and their calculation / O.A. Savinov. Leningrad: Mashinostroenie, 1979. 320 p.
11. Баркан Д.Д. Динамика оснований и фундаментов. М.: Стройвоенмориздат, 1948. — 411 с.
Barkan, D.D. Dynamics of bases and foundations. Moscow: Stroyvoenmorizdat, 1948. 411 p.
12. Нуждин М. Л., Нуждин Л. В. Снижение колебаний свайных фундаментов под машины с динамическими нагрузками методом высоконапорного группового инъецирования // Construction and Geotechnics. 2020. Т. 11. № 1. С. 41–52. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.1.04.
Nuzhdin M.L., Nuzhdin L.V. Reduction of vibrations of the pile foundations for machines under dynamic loads by high-pressure group injection method // Construction and Geotechnics. 2020. Vol. 11, No. 1. P. 41–52. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.1.04.
13. Mukhanov D., Zhussupbekov A., Kaliakin V.N. Vibration Monitoring of Driven Piles at a Construction Site in Kazakhstan // Proceedings of ICOVP & WMVC 2025. 2026. P. 47–55. DOI: 10.1007/978-3-032-11549-2_5.
14. Полунин В.М. Влияние вибропогружения и виброизвлечения шпунтовых свай на дополнительные осадки фундаментов зданий в водонасыщенных грунтах // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2022. № 3. С. 45–56.
Polunin V.M. Influence of vibratory driving and extraction of sheet piles on additional settlements of building foundations in water-saturated soils // Bulletin of PNIPU. Construction and Architecture. 2022. No. 3. P. 45–56.
15. Мангушев Р.А., Гурский А.В., Полунин В.М. Учет влияния технологических осадок зданий окружающей застройки при устройстве шпунтовых ограждений соседних котлованов // Жилищное строительство. 2020. № 9. С. 9–19. DOI: 10.31659/0044-4472-2020-9-9-19
Mangushev R.A., Gursky A.V., Polunin V.M. Accounting for the influence of technological settlements of surrounding buildings during the installation of sheet pile enclosures for adjacent pits // Housing Construction. 2020. No. 9. P. 9–19. DOI: 10.31659/0044-4472-2020-9-9-19.
16. Полунин В.М. Прогноз дополнительных деформаций зданий и сооружений в процессе высокочастотного вибрирования шпунтовых свай // Вестник гражданских инженеров. 2022. № 2. С. 74–82. DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-2-74-82
Polunin V.M. Prediction of additional deformations of buildings and structures during high-frequency vibration of sheet piles // Bulletin of Civil Engineers. 2022. No. 2. P. 74–82. DOI: 10.23968/1999-5571-2022-19-2-74-82.
17. Фёдоров В. С., Купчикова Н. В. Технологии устройства концевых уширений набивных и готовых свай и их влияние на формообразование конструкций фундамента // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2019. № 1(27). С. 40–56.
Fedorov V.S., Kupchikova N.V. Technologies of end widening of stuffed and ready piles and their influence on the shaping of foundation structures // Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region. 2019. No. 1(27). P. 40–56.
18. Капустин В.В., Владов М.Л., Волков В.А., Вознесенский Е.А. Методические вопросы измерения вибраций для оценки их воздействия на массивы грунтов // Грунтоведение. 2021. № 1. С. 65–77. DOI: 10.31857/SG20210105.
Kapustin V.V., Vladov M.L., Volkov V.A., Voznesensky E.A. Methodological issues of vibration measurement for assessing their impact on soil masses // Soil Science. 2021. No. 1. P. 65–77. DOI: 10.31857/SG20210105.
19. Тер-Мартirosян З. Г., Шебуняев А. Н., Демин И. Е. Влияние напряженного состояния песчаного грунта на интенсивность виброползучести // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2023. № 1(43). С. 10–14. DOI: 10.52684/2312-3702-2023-43-1-10-14. — EDN LAZLHJ.
Ter-Martirosyan Z.G., Shebunyaev A.N., Demin I.E. Influence of the stress state of sandy soil on the intensity of vibrocreep // Engineering and Construction Bulletin of the Caspian

- Region. 2023. No. 1(43). P. 10–14. DOI: 10.52684/2312-3702-2023-43-1-10-14. EDN LAZLHJ.
20. Мирсаяпов И. Т., Шараф Х. М. А. Несущая способность и осадки глинистых оснований при блочных циклических нагрузках // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19, № 5. С. 789–799. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.789-799. EDN KEKBGI.
Mirsayapov I.T., Sharaf H.M.A. Bearing capacity and settlements of clay foundations under block cyclic loading // Bulletin of MGSU. 2024. Vol. 19, No. 5. P. 789–799. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.789-799. EDN KEKBGI.
21. Jianfeng Li, Jie Cui, Yi Shan, Yadong Li, Bo Ju. Dynamic Shear Modulus and Damping Ratio of Sand–Rubber Mixtures under Large Strain Range // Materials. 2020. Vol. 13, No. 18. Article 4017. DOI: 10.3390/ma13184017.
22. Chen H., Ma Q. Dynamic response analysis of layered saturated frozen soil foundation under harmonic loading // Engineering Mechanics. 2026. Vol. 43. No. 4. P. 81–94. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2023.09.0647.
23. Hu H., Chen D. Uncertainty qualification in evaluating dynamic and static stress intensity factors using SBFEM based on model order reduction // Engineering Fracture Mechanics. 2023. Vol. 289. Article 109349. DOI: 10.1016/j.engfractmech.2023.109349.
24. Шарафутдинов Р. Ф., Кузнецова Д. П. Коллоидный кремнезем как материал для повышения устойчивости песчаных грунтов к динамическим нагрузкам // Строительные технологии и материалы. 2023. № 3. С. 58–60.
Sharafutdinov R.F., Kuznetsova D.P. Colloidal silica as a material for increasing the resistance of sandy soils to dynamic loads // Construction Technologies and Materials. 2023. No. 3. P. 58–60.
25. Шарафутдинов Р. Ф. Нормативное обеспечение определения параметров моделей нелинейного механического поведения грунтов с упрочнением // Construction and Geotechnics. 2023. Т. 14. № 1. С. 29–42. DOI: 10.15593/2224-9826/2023.1.03.
Sharafutdinov R.F. Regulatory provisions for determining parameters of nonlinear mechanical behavior in hardening soil models // Construction and Geotechnics. 2023. Vol. 14, No. 1. P. 29–42. DOI: 10.15593/2224-9826/2023.1.03.
26. Kumar A., Singh B. Effect of low-frequency cyclic loading on liquefaction potential of sandy soils // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2023. Vol. 165. Article 107689. DOI: 10.1016/j.soildyn.2022.107689.
27. Park S.S., Kim Y. H. Combined criteria for liquefaction initiation of granular soils under low-amplitude cyclic stresses // Engineering Geology. 2024. Vol. 320. Article 107112.
28. Wang Y., Zhao X. Frequency-dependent pore pressure accumulation in saturated sands under undrained cyclic triaxial tests // Geotechnique. 2024. Vol. 74. No. 2. P. 145–158.
29. Chen L., Zhang J., Li H. Non-linear evolution of excess pore water pressure during cyclic loading of sands // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2022. Vol. 148, No. 6. Article 04022031.

Информация об авторах

Мангушев Рашид Абдуллович, член-корреспондент РААСН, заслуженный деятель науки Российской Федерации, заслуженный работник высшего образования РФ, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Email: geotechnica@spbgasu.ru, ORCID: 0000-0003-1077-0562

Вагурина Александра Викторовна, инженер, ассистент, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Email: alexandra.vagurina@yandex.ru, ORCID: 0009-0000-7293-1494

Мchedлидзе Константин Вахтангович, заведующий учебной лабораторией, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Email: costya.mchedlidze@yandex.ru, ORCID: 0009-0002-0108-670X

Мальцева Ксения Андреевна, аспирант, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
Email: ksenia2300@mail.ru, ORCID 0009-0004-8511-9242

Information about the authors

Rashid A. Mangushev, Corresponding Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Honored Scientist of the Russian Federation, Honored Worker of Higher Education of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, Professor, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russian Federation
Email: geotechnica@spbgasu.ru, ORCID: 0000-0003-1077-0562

Alexandra V. Vagurina, Engineer, Assistant, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russian Federation
Email: alexandra.vagurina@yandex.ru, ORCID: 0009-0000-7293-1494

Konstantin V. Mchedlidze, Head of the Educational Laboratory, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russian Federation
Email: costya.mchedlidze@yandex.ru, ORCID: 0009-0002-0108-670X

Ksenia A. Maltseva, Post-graduate Student, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russian Federation
Email: ksenia2300@mail.ru, ORCID 0009-0004-8511-9242

Дата поступления: 30.04.2025

Дата принятия: 28.04.2026