



CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 12, № 1, 2021

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2021.1.01

УДК 624.152.634.3

РЕЗУЛЬТАТЫ ВИБРОМОНИТОРИНГА ПРИ ВИБРОПОГРУЖЕНИИ И ВИБРОИЗВЛЕЧЕНИИ ШПУНТОВЫХ СВАЙ

И.К. Лобов, Д.В. Пеньков, В.М. Полунин

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 01.12.2020

Принята: 22.01.2021

Опубликована: 21.04.2021

Ключевые слова:

колебания грунта, основания и фундаменты, вибропогружение шпунтовых свай, виброизвлечение шпунтовых свай, шпунтовая свая.

АННОТАЦИЯ

Геология Санкт-Петербурга представлена большой толщей слабых структурно-неустойчивых грунтов. При виброизвлечении и вибропогружении шпунтовых свай в таких условиях требуется особо ответственный подход к прогнозированию возникающих эффектов, а также зоны их влияния на здания окружающей застройки. В связи с этим актуальна задача поиска и установления возможных закономерностей, описывающих эти процессы. Для выполнения поставленной задачи авторами была актуализирована карта инженерно-геологического районирования по Заварзину по результатам обработки более 50 отчетов инженерно-геологических изысканий с выделением грунтовых слоев, представляющих наибольшую опасность для высокочастотного вибрационного воздействия. Также было проанализировано более 70 отчетов по вибромониторингу вибропогружения и виброизвлечения шпунтовых свай в Санкт-Петербурге. Рассматривалось влияние на величину виброускорения таких факторов, как: геологические особенности площадки, расстояние до источника колебаний, характеристики вибропогружателя (рабочая частота, вынуждающая сила) и шпунтовой сваи (длина, форма профиля), место проведения измерений (на грунте или на элементе конструкции здания). Результатами работы явились графики, которые явно показывают наличие или отсутствие связи между исследуемыми параметрами. Причинами отсутствия зависимостей для некоторых из рассмотренных параметров могут являться факторы, наличие и влияние которых невозможно предсказать (возникновение больших сил трения в замках шпунтовых свай; наличие линз плотных грунтов или валунов при погружении свай; различные нарушения технологического режима). Также была установлена зона влияния высокочастотного динамического воздействия в 25 м, которая хорошо согласуется с результатами натурных наблюдений.

© ПНИПУ

© Лобов Иван Константинович – магистрант, e-mail: Loboffl@yandex.ru. ORCID: 0000-0001-7875-5479

Пеньков Даниил Валерьевич – студент, e-mail: danokp@mail.ru. ORCID: 0000-0002-5405-2071

Полунин Вячеслав Михайлович – аспирант, e-mail: n1ce2u@yandex.ru. ORCID: 0000-0001-7863-9654

Ivan K. Lobov – Master Student, e-mail: Loboffl@yandex.ru. ORCID: 0000-0001-7875-5479

Daniil V. Penkov – Student, e-mail: danokp@mail.ru. ORCID: 0000-0002-5405-2071

Viacheslav M. Polunin – Postgraduate Student, e-mail: n1ce2u@yandex.ru. ORCID: 0000-0001-7863-9654

RESULTS OF VIBRATION MONITORING OF VIBRO-DRIVING AND VIBRO-EXTRACTION OF SHEET PILES

I.K. Lobov, D.V. Penkov, V.M. Polunin

Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,
Saint-Petersburg, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 01.12.2020
Accepted: 22.01.2021
Published: 21.04.2021

Keywords:

ground vibrations, ground foundation, sheet pile driving, sheet pile extraction, sheet pile.

ABSTRACT

The geology of St. Petersburg is represented with a heavy layer of weak structurally unstable soils. Using of vibro-extraction and vibro-driving of sheet piles in such conditions requires a particularly responsible approach in order to predict the emerging dynamic effects and the zones of their influence on the surrounding buildings and structures. Therefore, the task of looking for possible patterns describing these processes is highly relevant. For this purpose, the authors have updated the map of engineering-geological zoning according to Zavarzin with use of more than 50 reports of engineering-geological surveys. On this map the sensitive to the high-frequency vibrations soil layers are identified. Also, more than 70 reports on vibration monitoring of vibration driving and vibration extraction of sheet piles in St. Petersburg have been analyzed. The influence on the value of vibration acceleration of the following factors has been investigated: the geological features of the site, the distance to the source of vibrations, the characteristics of the vibrating hammer (operating frequency, driving force) and sheet pile (length, cross section), the location of measurements (on the ground or on a structural element of the building). The result of the work is the diagrams that clearly show the presence or absence of a relationship between the studied parameters. The absence of dependencies for some of the investigated parameters may be caused by the factors which influence cannot be predicted. These factors are the occurrence of large friction forces in the joints of sheet piles; the presence of lenses of dense soils or boulders during sheet piles driving; violations of the technological process. The zone of the influence of high-frequency dynamic impact was identified as 25 meters, which is in good agreement with the results of in-situ monitoring.

© PNRPU

Введение

Вибрационные технологии – наиболее распространенный метод устройства ограждений котлованов из металлического шпунта. Критерием безопасности данной технологии, в рамках нормативных документов, является уровень динамического воздействия. Жесткие требования к уровню колебаний для зданий 3-й, 4-й категории технического состояния обусловлены, во-первых, состоянием их несущих конструкций; во-вторых, сложными инженерно-геологическими условиями, при этом преимущественное влияние на развитие дополнительных деформаций оказывает изменение свойств основания при действии внешних факторов.

Особенностями строительства в г. Санкт-Петербурге являются сложные гидрогеологические условия [1–3]. В сжимаемой толще большинства зданий с фундаментами мелкого заложения находятся сильнодеформируемые водонасыщенные глинистые грунты [4]. Зачастую основанием для таких зданий служат водонасыщенные пески (m, l – IV), которые имеют высокие прочностные и деформационные свойства, но при внешнем технологическом воздействии могут менять свою структуру. Однако динамическое воздействие приводит не только к разжижению водонасыщенных песков, но и к разупрочнению глинистых, тиксотропных подстилающих слоев (lg-III). Физическое описание процессов изменения структуры грунта подробно представлено в [1, 5–8], графическое изображение этих процессов приведено авторами [5, 6].

Основная часть

На основании отчетов по вибромониторингу, выполненных организацией «ПКТИ» (Проектно-конструкторский технологический институт) под руководством Г.В. Левинтова, была сформирована обширная база данных, которая включила в себя более 340 точек измерений колебаний в процессе производства шпунтовых работ. Эта информация представляет интерес, поскольку позволяет провести анализ параметров, влияющих на уровень динамического воздействия на грунт (виброускорение a , м/с^2 ; величина виброскорости v , мм/с) при вибропогружении или виброизвлечении шпунтовых свай. Исследуемые параметры приведены ниже. Полная база данных представлена в [9].

Исследуемые параметры динамического воздействия

Площадка:

- местоположение объекта;
- геологические условия.

Процесс:

- вибропогружение;
- виброизвлечение.

Вибропогружатель:

- рабочая частота, Гц;
- вынуждающая сила, кН;
- масса погружателя, т.

Шпунтовая свая:

- профиль;
- изгибная жесткость, кН/м^4 ;
- длина свай, м.

Расстояние между источником колебаний и точкой измерения, м.

Колебания:

- $a_{\text{макс}}$, м/с^2 – максимальные виброускорения;
- $a_{\text{сред}}$, м/с^2 – средние виброускорения.

Объект измерений:

- грунт;
- конструкция здания.

Для разграничения объектов по географическому положению удобно привязать их к карте инженерно-геологического районирования. Такая карта по г. Санкт-Петербургу была составлена [1]. Мощности разных инженерно-геологических элементов были уточнены [2]. В данной работе при оценке влияния устройства траншейной «стены в грунте» на дополнительные деформации зданий окружающей застройки приведены характерные инженерно-геологические разрезы и физико-механические характеристики грунтов по каждому из районов. Авторами были уточнены верхние отложения, а именно озерно-морские (m, l) и озерно-ледниковые (lg), которые представлены песками разной плотности и крупности и глинистыми грунтами (суглинками и супесями) разной консистенции. На рис. 1 приведена карта районирования, где штриховкой обозначены районы по критерию «геологии». Контуром обозначены административные районы г. Санкт-Петербурга. Также на карте представлено количество объектов, по которым актуализировались инженерно-геологические разрезы (рис. 2), и количество точек вибромониторинга в каждом конкретном районе.

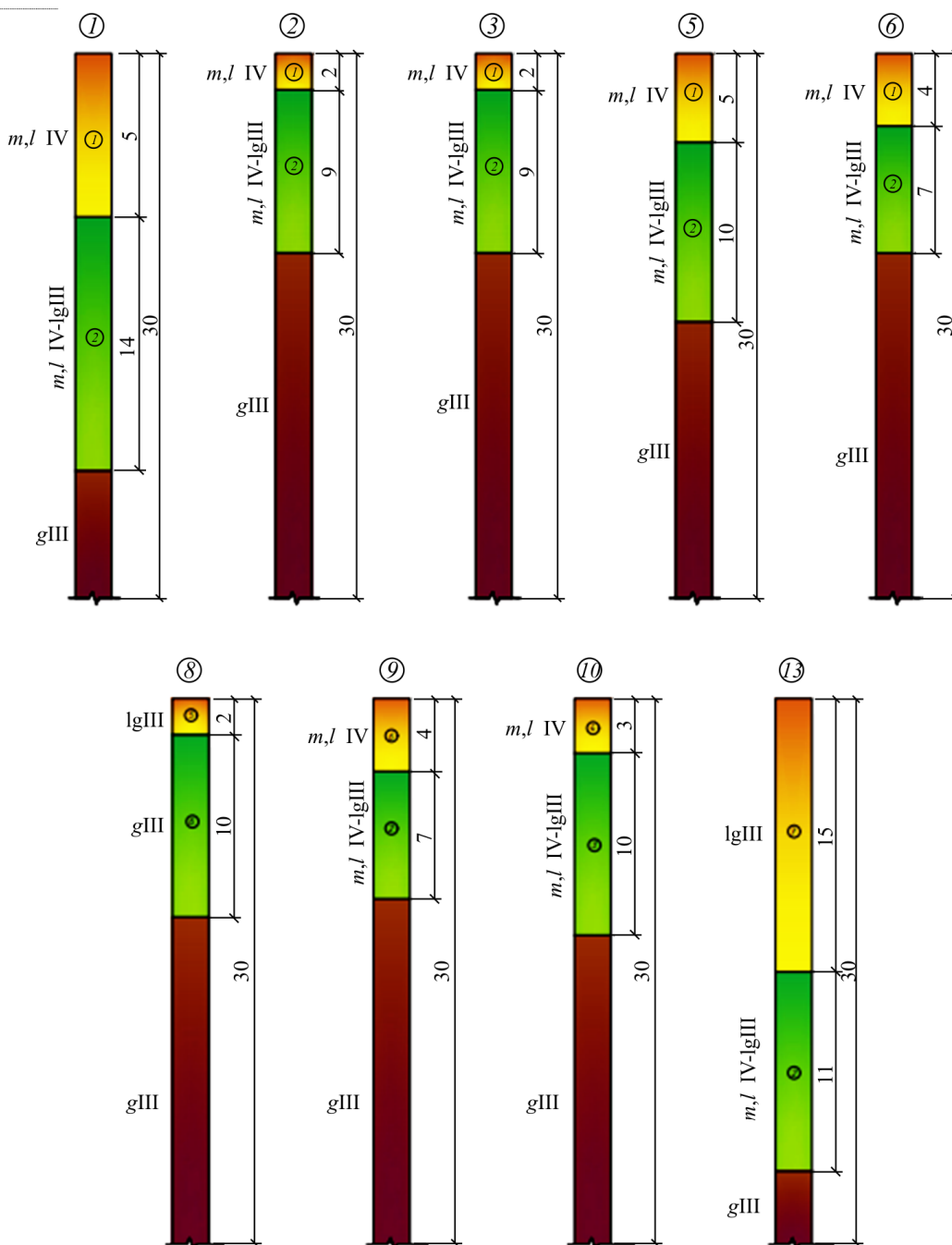


Рис. 1. Карта инженерно-геологического районирования по [1]
с привязкой количества объектов, по которым произведен анализ
Fig. 1. Map of geological-engineering zoning according to [1]
with reference to the number of analyzed objects

Большой объем данных относится к центральной части города, а именно к районам: Петроградский, Центральный, Василеостровский. Это связано с большим количеством памятников архитектуры и зданий исторической застройки, к которым предъявляются строгие требования как по деформациям, так и по уровню динамического воздействия. Следует отметить, что геологические условия также неблагоприятны. Верхняя толща грунтов представлена пылеватыми, водонасыщенными песками и текучими суглинками, которые существенно изменяют свою структуру в процессе динамического воздействия [19, 20].

Ниже представлены графики, на которых приводится сопоставление колебаний, измеренных на конструкции и грунте (рис. 3, 4), для погружения и извлечения свай соответственно. Измерения колебаний на конструкциях производились: на фундаментах зданий,

в местах оконных проемов, в местах опирания межэтажных перекрытий. Эти данные позволяют оценить влияние динамических процессов. На рис. 5 приведено сравнение уровня динамического воздействия для виброизвлечения и вибропогружения шпунтовых свай.



Примечание:

- ① ИГЗ-1 – пески пылеватые, средней плотности
- ② ИГЗ-2 – суглинки, супеси пылеватые, текучие, текучеспластичные
- ③ ИГЗ-3 – суглинки пылеватые, текучие
- ④ ИГЗ-4 – пески мелкие, средней плотности
- ⑤ ИГЗ-5 – пески крупные-пылеватые, плотные
- ⑥ ИГЗ-6 – пески пылеватые, рыхлые, средней плотности
- ⑦ ИГЗ-7 – пески пылеватые, плотные

Рис. 2. Уточненные инженерно-геологические разрезы по [1, 2]
 Fig. 2. Specified geological-engineering cross-section according to [1, 2]

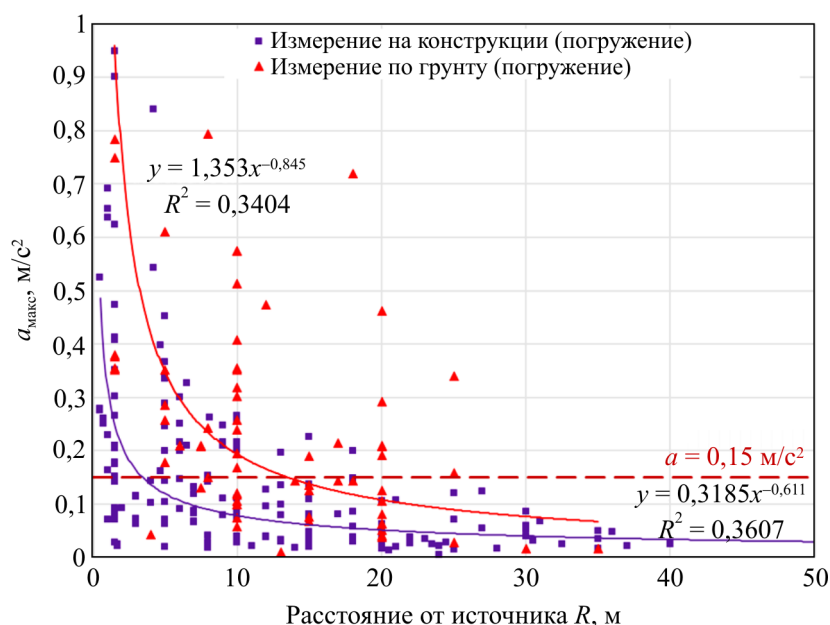


Рис. 3. Зависимость максимальных ускорений (a_{\max}) от расстояния до источника (R) при вибропогружении шпунтового элемента (значения приведены при измерении a_{\max} на конструктивных элементах здания и по грунту)

Fig. 3. Maximum vibration accelerations (a_{\max}) – distance from the source of vibration (R) diagram for vibropiling. The measurements have been taken on the surface of the structural elements and soil

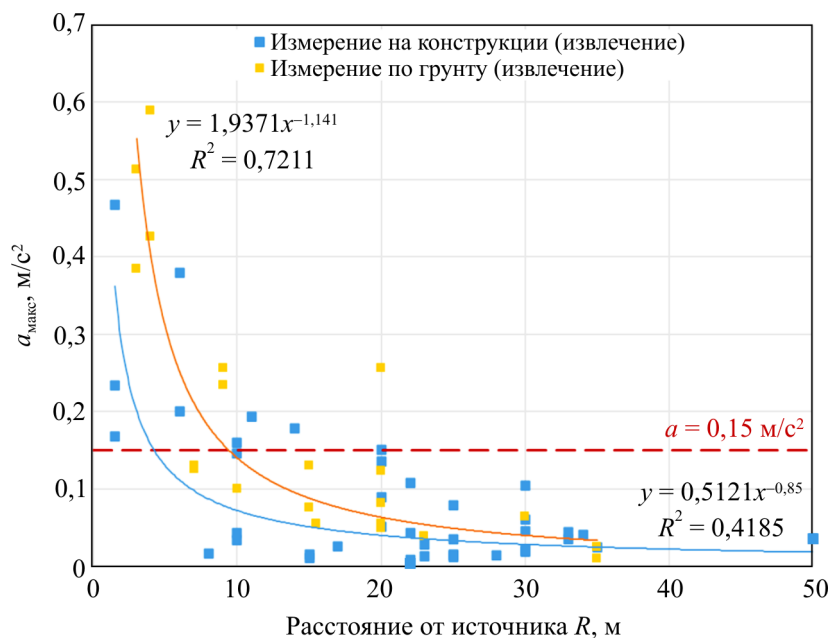


Рис. 4. Зависимость максимальных ускорений (a_{\max}) от расстояния до источника (R) при виброизвлечении шпунтового элемента (значения приведены при измерении a_{\max} на конструктивных элементах здания и по грунту)

Fig. 4. Maximum vibration accelerations (a_{\max}) – distance from the source of vibration (R) diagram for vibro-extraction of sheet pile. The measurements have been taken on the surface of the structural elements and soil

Кривые (рис. 3) имеют схожий характер, но отличаются количественно. В ходе анализа принимались общие данные, без учета длины и профиля шпунта, типа вибропогружателя и особенностей геологических условий. Несмотря на это, отмечено, что виброускорения грунта больше, чем виброускорения конструкций, хотя в данных присутствует существенный разброс. Это согласуется результатами, приведенными в [10–13]. Разница между величиной виброускорения на грунте и конструкции снижается с расстоянием от источника колебаний. Аналогичная картина наблюдается и для виброизвлечения шпунта (см. рис. 4).

На рис. 5 приведено сопоставление общих ускорений вибропогружения и виброизвлечения шпунтовых свай. Результирующие кривые этих процессов имеют высокую схожимость между собой как по характеру кривой, так и по численным значениям. Это обусловлено особенностями тиксотропии глинистых грунтов в г. Санкт-Петербурге. Если в процессе вибропогружения сваи энергия вибропогружателя расходуется на преодоление сил трения по боковой поверхности и сил лобового сопротивления, то при виброизвлечении остается только составляющая сил трения [21–23]. Но при долгом нахождении сваи в грунте зачастую проявляется эффект «засасывания» сваи, в связи с чем трение по боковой поверхности существенно увеличивается [6].

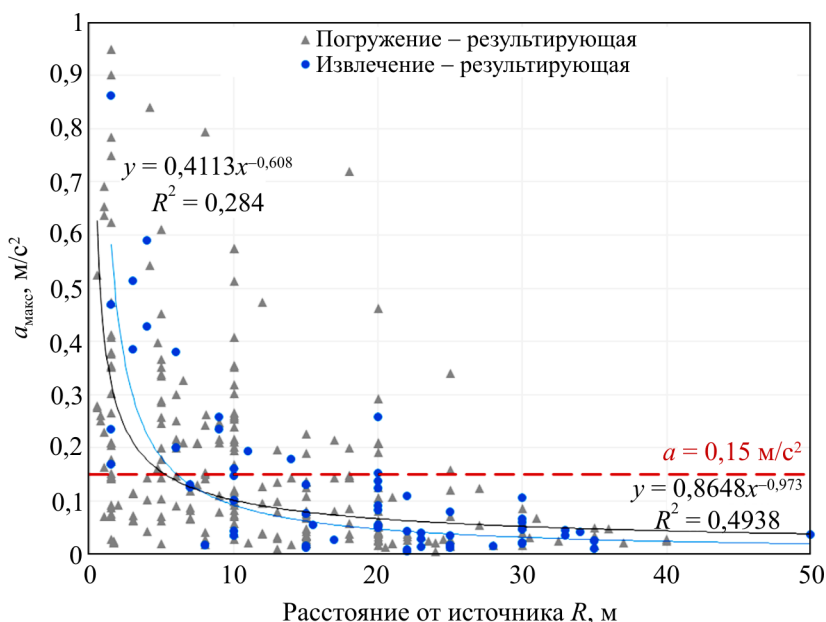


Рис. 5. Результирующие зависимости максимальных ускорений (a_{\max}) от расстояния до источника (R) при виброизвлечении и вибропогружении шпунтового элемента
Fig. 5. Maximum vibration accelerations (a_{\max}) – distance from the source of vibration (R) resulting diagram for vibropiling and vibro-extraction of sheeting pile

Согласно нормативным документам¹, активная зона влияния составляет 20–25 м. Анализ приведенных графиков (см. рис. 3) позволяет также установить активную зону влияния радиусом 20 м, где ускорения больше $0,15 \text{ м/с}^2$.

На рис. 6 приведена установленная между максимальными и средними ускорениями линейная связь, согласно которой максимальные ускорения больше в 2,24 раза средних значений. Поскольку эти величины связаны друг с другом линейно, зависимость средних ускорений от расстояния до источника будет иметь тот же вид, что и для максимальных, однако зона

¹ ВСН 490–87. Проектирование и устройство свайных фундаментов и шпунтовых ограждений в условиях реконструкции промышленных предприятий и городской застройки. М: Минмонтажспецстрой СССР, 1988. 29 с.

влияния будет почти в 2 раза меньше (10–12 м). Оценивать же зону влияния по суммарному динамическому воздействию корректнее по средним ускорениям, так как они отражают уровень воздействия в процессе всего времени производства работ, а максимальные ускорения имеют скачкообразный характер и соответствуют пикам в определенный момент времени.

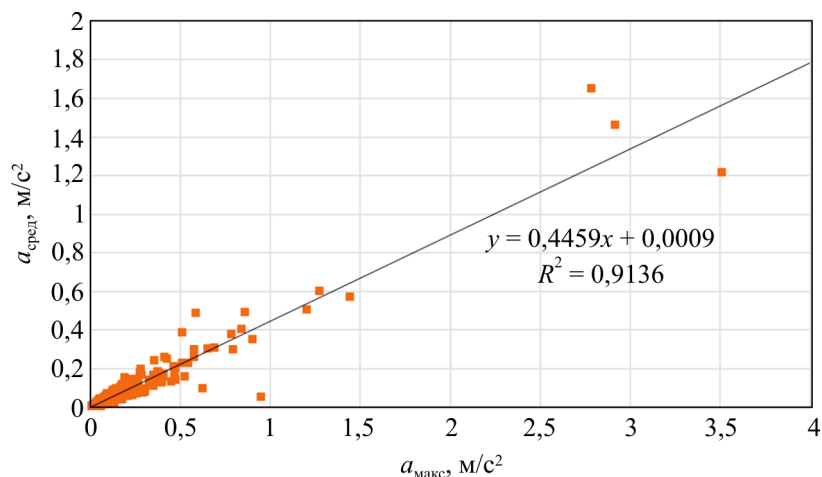


Рис. 6. Связь максимальных ускорений (a_{\max}) со средними ($a_{\text{сред}}$)
 Fig. 6. Maximum vibration accelerations (a_{\max}) – medium vibration accelerations (a_{med}) diagram

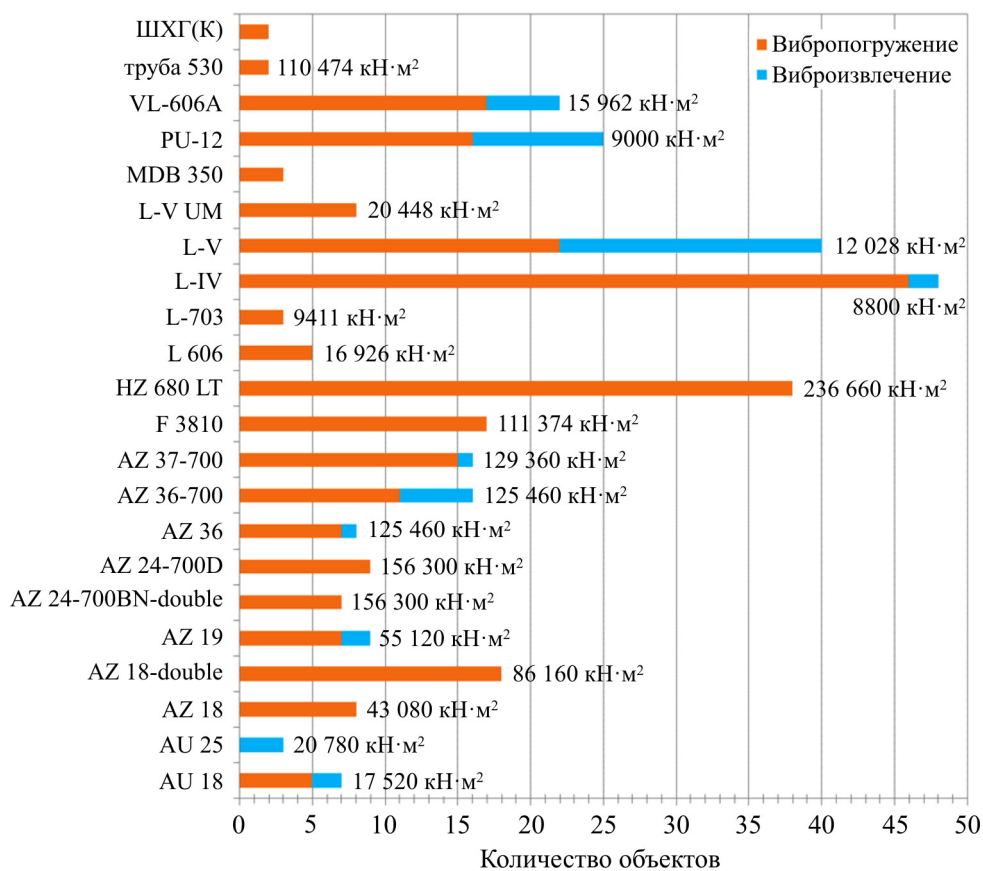


Рис. 7. Распространенность видов шпунтового профиля в обрабатываемых данных с указанием изгибной жесткости одного шпунтового элемента
 Fig. 7. Types of sheeting piles from analyzed data with the indication of their bending stiffnesses

Оценка влияния параметра жесткости шпунтовых свай и их длины на величину колебаний также представляет интерес [14–16]. На рис. 7 представлено, насколько часто в обрабатываемой выборке встречается каждый вид шпунтового профиля (с делением на вибропогружение и виброизвлечение и указанием изгибной жесткости одного шпунтового элемента). Наиболее часто используемым профилем являются шпунтовые сваи Ларсен (L-IV, L-V); Арселор (AZ, HZ); Vitkovice Steel (VL-606a).

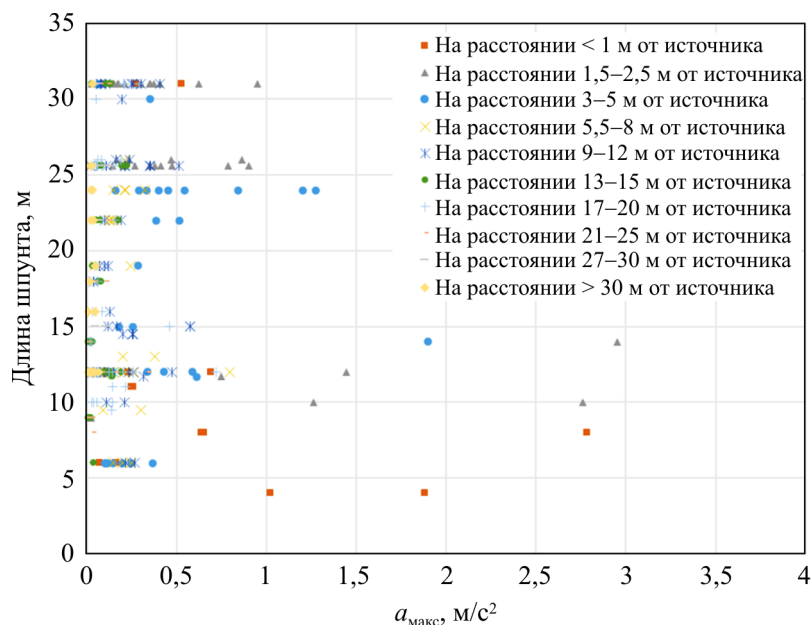


Рис. 8. Анализ влияния длины шпунта на максимальные ускорения (a_{\max})
Fig. 8. The analysis of dependence between sheeting pile's length and maximum vibration accelerations (a_{\max})

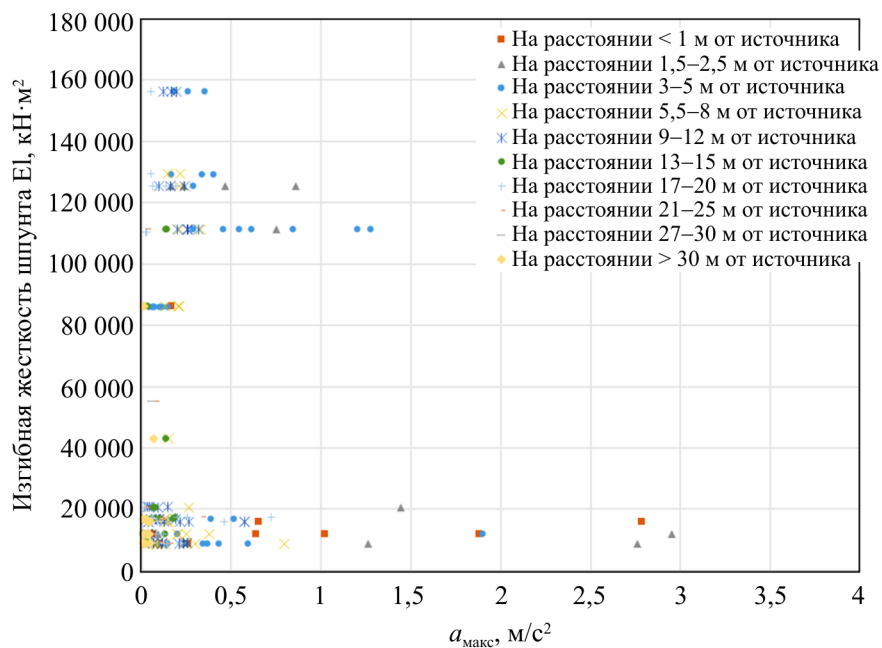


Рис. 9. Анализ влияния изгибной жесткости шпунта на максимальные ускорения (a_{\max})
Fig. 9. The analysis of dependence between sheeting pile's bending stiffness and maximum vibration accelerations (a_{\max})

В связи с этим авторами также был произведен анализ влияния параметров шпунта (его длины (рис. 8) и изгибной жесткости (рис. 9)) на максимальные ускорения. Обработываемые данные были разбиты на группы в зависимости от расстояния до источника (с шагом 1–5 м), чтобы исключить влияние этого фактора на величину ускорения. Рис. 8, 9 представляют собой поля точек, которые показывают, что жесткость и длина шпунта не влияют на величину виброускорения напрямую. Для определения зависимости влияния жесткости шпунтовых свай и их длины на величину виброускорения требуется ввести дополнительные переменные, характеризующие в полной мере инженерно-геологические условия, технологию производства работ и другие факторы.

Заключение

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Вибропогружение и виброизвлечение шпунтовых свай представляет собой сложный технологический процесс. Можно выделить постоянные параметры, такие как: профиль, длина шпунтовой сваи; рабочая частота вибропогружателя; расстояние от источника колебаний. К непостоянным можно отнести: возможность возникновения больших сил трения в замках шпунтовых свай; наличие линз плотных грунтов или валунов при погружении свай; различные нарушения технологического режима. Вышеперечисленное существенно затрудняет многофакторный анализ данных вибромониторинга, поскольку нет возможности учесть непостоянные факторы.

2. В ходе анализа получено, что ускорения на грунте превышают значения ускорений, измеренных на конструкциях зданий. Данный факт согласуется с требованиями ВСН 490–87.

3. Уровни динамического воздействия при вибропогружении и виброизвлечении шпунтовых свай схожи между собой.

4. Активная зона влияния составляет порядка 20 м. Однако она получена по максимальным значениям виброускорений. Если оценивать средние значения, которые более точно отражают суммарный уровень динамического воздействия, данный параметр можно сократить до 10–12 м.

5. Не удалось выявить прямой зависимости между величиной виброускорений и параметрами шпунтовых свай (изгибной жесткости и длины). Это связано с невозможностью учета непостоянных факторов, которые приведены в п. 1 выводов.

Библиографический список

1. Заварзин Л.Г. Разработка методики инженерно-геологического картирования применительно к Ленинграду: отчет по научно-исследовательской госбюджетной теме (Н-13)/18/ЛИСИ. – Л., 1975.

2. Сапин Д.А. Технологические осадки фундаментов зданий при устройстве траншейной «стены в грунте»: дис. ... канд. наук. – СПб., 2016. – 177 с.

3. Василюк Л.В. Вибропогружение шпунта вблизи существующих зданий в грунтовых условиях Санкт-Петербурга // Инженерно-геотехнические изыскания, проектирование и строительство оснований, фундаментов и подземных сооружений: сб. тр. Всерос. науч.-техн. конф. по геотехнике; СПбГАСУ. – СПб., 2017. – С. 307–315.

4. Мангушев Р.А., Осокин А.И. Геотехника Санкт-Петербурга: монография. – М.: Изд-во АСВ, 2010. – 264 с.
5. Ершов В.А. Динамические свойства песчаных грунтов и их учет в оценке устойчивости земляных сооружений: дис. ... д-ра техн. наук. — Л., 1970. – 180 с.
6. Осипов В.И., Соколов В.Н., Румянцева Н.А. Микроструктура глинистых пород. – М.: Недра, 1989. – С. 77–81.
7. Kramer S.L., *Geotechnical earthquake engineering*. – Prentice Hall, 1996. – P. 529–539.
8. Mapping liquefaction based on CPT data for induced seismicity in Groningen. *Earthquake Geotechnical Engineering for Protection and Development of Environment and Constructions* / M. Korff, P. Meijers, A. Wiersma, F. Kloosterman // *Proceedings of the 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*. – 2015. – P. 3418–3425.
9. Lobov I., Penkov D., Polunin V. Vibromonitoring sheet piles driving (Saint-Petersburg). – URL: https://www.researchgate.net/publication/346400117_Vibromonitoring_of_sheet_piles_driving_Saint-Petersburg (дата обращения: 26.11.2020).
10. Whenham V., Holeyman A., Load Transfers During Vibratory Driving // *Geotechnical and Geological Engineering*. – 2012. – Vol. 30. – P. 1119–1135. DOI: 10.1007/s10706-012-9527-0
11. Deckner F., Viking K., Hintze S. Aspects of ground vibrations due to pile and sheet pile driving // *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. – 2015. – Vol. 20. – P. 11161–11176.
12. Deckner F., Viking K., Hintze S. Wave Patterns in the Ground: Case Studies Related to Vibratory Sheet Pile Driving // *Geotechnical and Geological Engineering*. – 2017. – Vol. 35. – P. 2863–2878. DOI: 10.1016/j.soildyn.2017.01.039
13. Brząkała W., Baca M. The measurement and control of building vibrations in course of sheet pile wall and Franki pile driving // 17th Int. Multidisciplinary Scientific GeoConference, SGEM 2017 Science and technologies in geology, exploration and mining. – 2017. – Vol. 12. – P. 929–936.
14. Instrumentation system for ground vibration analysis during sheet pile driving / F. Deckner, K. Viking, C. Guillemet, S. Hintze // *Geotechnical Testing Journal*. – 2015. – Vol. 38. – P. 893–905. DOI: 10.1520/GTJ20140275
15. Meijers P., Tol A.F. The Raamsdonksveer sheet pile test, measured surface settlements during vibratory sheet piling // *Proc. 14th Eur. Conf. Soil Mech. and Geotech. Eng.* – Madrid, 2007. – P. 603–609.
16. Grizi A., Zekkos A., Woods R. Ground Vibration Measurements near Impact Pile Driving // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. – 2016. – Vol. 142. – P. 4016035. DOI:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001499
17. Вознесенский Е.А. Землетрясения и динамика грунтов // *Соросовский образовательный журнал*. – 1998. – № 2. – С. 101–108.
18. Ковалевский Е.Д. Результаты наблюдений за колебаниями песчаного грунта и осадками зданий при забивке шпунта // *Механика грунтов, основания и фундаменты: научн. конф. ЛИСИ*. – Л., 1967. – С. 34–38.
19. Effects of OCR on monotonic and cyclic behavior of reconstituted Shanghai silty clay / J. Qian, S. Li, J. Zhang, J. Jiang, Q. Wang // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2019. – No. (118). – P. 111–119. DOI:10.1016/j.soildyn2018.12.010
20. Denies N., Holeyman A. Shear strength degradation of vibrated dry sand // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2017. – Vol. 95. – P. 106–117. DOI: 10.1007/s10706-017-0285-x
21. Basha A., Elsiragy M. Effect of Sheet Pile Driving on Geotechnical Behavior of Adjacent Building in Sand: Numerical Study // *Civil Engineering Journal*. – 2019. – Vol. 5. – P. 1726–1737. DOI:10.28991/cej-2019-03091366

22. Petřík T., Hrubešová E., Lednická M. A comparison of numerical models results with in-situ measurement of ground vibrations caused by sheet pile driving // *Acta Geodynamica et Geomaterialia*. – 2012. – Vol. 9. – P. 165–171.

23. Zhang Z. Reduction of Ground Vibrations. *Rock Fracture and Blasting*. – 2016. – P. 459–482. DOI: 10.1016/B978-0-12-802688-5.00024-5

References

1. Zavarzin L.G., Razrabotka metodiki inzhenerno-geologicheskogo kartirovaniya primenitel'no k Leningradu: otchet po nauchno-issledovatel'skoj gosbjudzhetnoj teme (N-13)/18/LISI. [Development of a methodology for engineering and geological mapping of Leningrad: report on research state budgetary theme (N-13) / 18 / LISI]. Leningrad, 1975.

2. Sapin D.A., Tekhnologicheskkiye osadki fundamentov zdaniy pri ustroystve transheyroy «steny v grunte». [Technological settlements of building foundations during the construction of a trench "slurry wall"]. Ph. D. thesis. Saint Petersburg, 2016, 177 p.

3. Vasilyuk L.V. Vibropogruzheniye shpunta vblizi sushchestvuyushchikh zdaniy v gruntovykh usloviyakh Sankt-Peterburga. [Vibration immersion of sheet piling near existing buildings in soil conditions of St. Petersburg]. Inzhenerno-geotekhnicheskkiye izyskaniya, proyektirovaniye i stroitel'stvo osnovaniy, fundamentov i podzemnykh sooruzheniy: sb. tr. Vseros. nauch.-tekhn. konf. po geotekhnike, 2017, Saint Petersburg, pp.307-315.

4. Mangushev R. A., Osokin A.I. Getotekhnika Sankt-Peterburga [Geotechnics of Saint Petersburg] Monograph. – M.: ACB, 2010. – 264 p.

5. Yershov, V.A. Dinamicheskkiye svoystva peschanykh gruntov i ikh uchet v otsenke ustoychivosti zemlyanykh sooruzheniy. [Dynamic properties of sandy soils and their consideration in assessing the stability of earth structures]. Doctor's degree dissertation, Leningrad, 1970, p. 180.

6. Osipov V.I., Sokolov V.N., Rumjanceva N.A. Mikrostruktura glinistyyh porod. [Microstructure of clays]. Moscow, Nedra, 1989, pp. 77-81.

7. S. L. Kramer, *Geotechnical earthquake engineering*, Prentice Hall, 1996, pp. 529-539.

8. Korff, M., Meijers, P., Wiersma, A., Kloosterman, F., Mapping liquefaction based on CPT data for induced seismicity in Groningen. *Earthquake Geotechnical Engineering for Protection and Development of Environment and Constructions- Proceedings of the 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, 2015, pp. 3418-3425.

9. Lobov, I., Penkov, D., Polunin, V. Vibromonitoring sheet piles driving (Saint-Petersburg). [Online]. available at: https://www.researchgate.net/publication/346400117_Vibromonitoring_of_sheet_piles_driving_Saint-Petersburg (reference date: 26.11.2020).

10. Whenham, V., Holeyman, A., Load Transfers During Vibratory Driving. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2012, Vol. 30, pp. 1119-1135. DOI: 10.1007/s10706-012-9527-0.

11. Deckner, F., Viking, K., Hintze, S Aspects of ground vibrations due to pile and sheet pile driving. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, Vol. 20, pp. 11161-11176.

12. Deckner, F., Viking, K. & Hintze, S. Wave Patterns in the Ground: Case Studies Related to Vibratory Sheet Pile Driving. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2017, Vol. 35, pp. 2863-2878. DOI: 10.1016/j.soildyn.2017.01.039.

13. W. Brząkała, and M. Baca, "The measurement and control of building vibrations in course of sheet pile wall and Franki pile driving", 17th Int. Multidisciplinary Scientific

GeoConference, SGEM 2017 Science and technologies in geology, exploration and mining, vol. 12, pp. 929-936, 2017.

14. Deckner, F., Viking, K., Guillemet, C., Hintze, S. Instrumentation system for ground vibration analysis during sheet pile driving. *Geotechnical Testing Journal*, 2015, Vol. 38, pp. 893-905. DOI: 10.1520/GTJ20140275.

15. Meijers, P., Tol, A.F., The Raamsdonksveer sheet pile test, measured surface settlements during vibratory sheet piling // Proc. 14th Eur. Conf. Soil Mech. and Geotech. Eng. Madrid 2007, pp. 603-609.

16. Grizi, A., Zekkos, A., Woods, R. Ground Vibration Measurements near Impact Pile Driving. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2016. 142. pp. 4016035. DOI:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001499.

17. Voznesenskiy Ye.A. Zemletryaseniya i dinamika gruntov. [Earthquakes and soil dynamics]. *Sorosovskiy obrazovatel'nyy zhurnal*, 1998, no.2, pp. 101–108.

18. Kovalevskiy Ye.D. Rezul'taty nablyudeniy za kolebaniyami peschanogo grunta i osadkami zdaniy pri zabivke shpunta. [Results of observations of vibrations of sandy soil and precipitation of buildings during sheet piling]. «Mekhanika gruntov, osnovaniya i fundamenty». Nauchn. Konf., Leningrad, 1967, pp. 34-38.

19. Qian J., Li S., Zhang J., Jiang J., Wang Q. Effects of OCR on monotonic and cyclic behavior of reconstituted Shanghai silty clay // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2019. No. (118). Pp. 111–119. DOI:10.1016/j.soildyn2018.12.010.

20. Denies, N., Holeyman, A., Shear strength degradation of vibrated dry sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2017, Vol. 95, pp. 106-117. DOI: 10.1007/s10706-017-0285-x.

21. Basha, A., Elsiragy, M. Effect of Sheet Pile Driving on Geotechnical Behavior of Adjacent Building in Sand: Numerical Study. *Civil Engineering Journal*. 2019. 5. pp. 1726–1737. DOI:10.28991/cej-2019-03091366.

22. Petřík, T., Hrubešová, E., Lednická, M. A comparison of numerical models results with in-situ measurement of ground vibrations caused by sheet pile driving. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*. 2012. 9. pp. 165–171.

23. Zhang, Z. Reduction of Ground Vibrations. *Rock Fracture and Blasting* 2016. pp. 459–482. DOI: 10.1016/B978-0-12-802688-5.00024-5.