УДК 624.1

DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-3-100-107

© В. М. Полунин, ассистент
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: n1ce2u@yandex.ru

© V. M. Polunin, assistant lecturer
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)
E-mail: n1ce2u@yandex.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗМЫКАНИЯ ШПУНТОВОЙ СТЕНКИ ПРИ ВИБРОИЗВЛЕЧЕНИИ ШПУНТОВЫХ СВАЙ

EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF THE SHEET PILE WALL BREAKING DURING VIBRATION EXTRACTION OF SHEET PILES

Статья содержит результаты оценки эффективности размыкания шпунтовой стенки при виброизвлечении шпунтовых свай. Проведены многочисленные измерения колебаний шпунтовой стенки, окружающего массива грунта, фундаментов примыкающего сооружения. Результаты наблюдений показали, что общий уровень динамического воздействия существенно снизился в сравнении с замкнутой стенкой. Определена зона распространения колебаний по замкнутой стенке. Приведены результаты численного моделирования. Выполнено сравнение колебаний здания для случаев неразомкнутой и разомкнутой стенки. Даны рекомендации по технологической последовательности извлечения шпунтовых свай.

Ключевые слова: виброизвлечение свай, полевые измерения, шпунтовые сваи, стенка из шпунтовых свай, модель прогнозирования, вибрации грунта, численное моделирование.

The article presents the results of evaluating the effectiveness of breaking the sheet pile wall during vibration extraction of sheet piles. There have been carried out numerous measurements of the sheet pile wall vibrations, surrounding soil massif, foundations of the adjoining structure. The observation results have shown that the overall level of dynamic impact has significantly decreased in comparison with the closed wall. The zone of propagation of vibrations along a closed wall has been determined. The results of numerical modeling are presented. Comparison of the building vibrations for the case of «non-open» and «open wall» are made. Recommendations are given on the technological sequence of sheet pile extraction.

Keywords: pile vibration extraction, field measurements, sheet piles, sheet piles wall, predictability model, soil vibration, computational modeling.

Одним из основных критериев оценки динамического воздействия является величина колебаний, которая может быть выражена через амплитуду A , мм; скорость v , мм/с; ускорение a , м/с². Данные величины регламентируются такими нормативными документами, как ТСН 50-302-2004, ГОСТ 52892-2007 «Вибрация и удар», ВСН 490-87. Предельно допустимые значения зависят от технического состояния конструкций зданий, попадающих в зону влияния, и грунтовых условий основания площадки строительства. В Санкт-Петербурге большинство зданий характеризуется ограниченно работоспособной категорией технического состояния, а основанием для таких сооружений служат озерно-морские (m, I IV) и озерно-ледниковые (lg III) отложения [1], пред-

ставленные водонасыщенными песками и текучими суглинками.

Предельно допустимая величина ускорения 0,15 м/с² обусловлена такими факторами, как влияние на грунтовое основание сооружения и на наземные конструкции здания. Например, для рыхлых водонасыщенных пылеватых песков величина 0,15 м/с² является критическим ускорением [2], при котором происходит его уплотнение. С точки зрения влияния на конструкции такой уровень колебаний может вызвать косметические повреждения, что особенно актуально для исторических зданий и объектов культурного наследия [3, 4]. Снижение уровня динамического воздействия [5, 6] при вибропогружении и виброизвлечении шпунтовых свай является

крайне актуальной задачей, особенно в условиях плотной городской застройки. Снизить суммарное динамическое влияние на окружающей массив грунта возможно при ограничении количества погружаемых или извлекаемых свай в смену и изменении технологической последовательности извлекаемых свай [7–9]. При последовательном извлечении шпунтовых свай из-за наличия сил трения в замках и возможных не окончательно срезанных сварных соединений между сваями в процессе виброизвлечения одной сваи колебания испытывает большая часть всей площади шпунтовой стенки.

На опытной площадке строительства была предложена щадящая методика извлечения шпунтовых свай. В ходе эксперимента была оценена эффективность постоянного размыкания шпунтовой стенки на общий уровень динамического воздействия.

Описание натурального эксперимента

Опытная площадка строительства расположена в Санкт-Петербурге, и ее геологические условия характерны для центральной части города.

Тип принятых для ограждения котлована шпунтовых свай — AZ36-700N Single, длина сваи 15 м. Виброизвлечение осуществлялось в непосредственной близости к объекту культур-

ного наследия с помощью высокочастотного и безрезонансного вибропогружателя ICE 20RF (рис. 1, б [10, 11]).

По результатам мониторинга и анализа предыдущих работ по вибропогружению шпунтовых свай для снижения суммарного динамического воздействия на здание и окружающий массив грунта было рекомендовано извлекать не более пяти шпунтовых свай в смену и выполнять это через каждые 6–8 м, чтобы разомкнуть шпунтовую стенку отдельными участками (рис. 2).

При последовательном извлечении свай стенка будет испытывать постоянные колебания. Предыдущий опыт погружения трубошпунта [12] показал, что колебания вдоль шпунтовой стенки распространяются на величину $6-8d_{св}$. На основе данных наблюдений можно предположить движение зоны влияния в стенке (рис. 3).

Аналогично предполагается, что по методике постоянного размыкания шпунтовой стенки в первый день извлечения зона влияния также будет иметь радиус 6 м, но в колебаниях будут участвовать в два раза больше свай (рис. 4, А). Во вторую смену из-за размыкания стенки радиус зоны влияния снижается в два раза (рис. 4, Б). В последующие дни параметр зоны влияния бу-

Рис. 1. Профиль извлекаемых свай (а) и используемый вибропогружатель ICE 20RF (б)

Рис. 2. План опытной площадки и принципиальная схема извлечения свай

Рис. 3. Распространение зоны влияния в шпунтовой стенке при последовательном извлечении свай

дет снижаться линейно, до одной шпунтовой сваи (рис. 4, В).

Результаты численных расчетов

Для предварительной оценки также было выполнено численное моделирование процесса извлечения свай в программном комплексе Plaxis [13] (рис. 5, а). Математическая модель поведения грунта «упрочняющийся грунт» (Hardening Soil), тип поведения недренированный, по типу А. Нагрузка изменялась по синусоидальному закону,

где частота (Гц) соответствует частоте, полученной в ходе спектрального анализа. Амплитуда изменения нагрузки соответствует вынуждающей силе вибропогружателя. Статическая нагрузка извлечения принималась равной 150 кН. Шпунтовая стенка и сваи моделировались плоскими конечными элементами типа «плита».

Было рассмотрено три расчетных случая: рис. 5, б — последовательное извлечение, стенка замкнута; рис. 5, в — извлечение централь-

Рис. 4. Распространение зоны влияния в шпунтовой стенке при постоянном размыкании

Рис. 5. Результаты численного моделирования: а — численная модель; изополя ускорения в массиве грунта при: б — последовательном извлечении, стенка замкнута; в — извлечении центральной сваи при замкнутой стенке; г — извлечении одной сваи

ной сваи при замкнутой стенке; рис. 5, г — извлечение одной сваи. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что наибольшая зона влияния проявляется при последовательном извлечении и распространяется по всей стенке. Однако по результатам видно, что колебания

при замкнутой стенке распространяются по всей ее длине, а не на $6-8d_{св}$. Это обусловлено жесткими связями между шпунтовыми сваями в стенке. В действительности поведение соединений свай в замках имеет сложное поведение, близкое к поведению при скользящей заделке.

Методика и результаты натурных измерений колебаний

Оценить динамическое воздействие напругу можно посредством измерения колебаний грунта и конструкций, попадающих в зону влияния [14, 15]. Измерения производились двумя виброметрами, имеющими пять датчиков. Каждый из датчиков работает в одноканальном режиме. Расположение датчиков в плане приведено на рис. 6. Измерения колебаний проводились в вертикальном (ось Z) и горизонтальном направлении (ось Y). В продольном направлении (ось X) измерения не проводились.

Датчики устанавливались на шпунтовые сваи посредством магнитов и на грунте, на базе приборов. Расстояния L_1 , L_2 , L_3 между извлекаемой свайей и датчиком варьировались в диапазоне 0,6–14,5 м.

Анализ полученных результатов

Измеренные максимальные и среднеквадратичные ускорения колебаний стенки при извлечении свай приведены на рис. 7.

График ограничен значением 5 м/с^2 для наглядного отображения зоны влияния. Синим цветом отражены точки максимальных вибро-

Рис. 6. Схема положения датчиков в плане: а — стенка замкнута; б — стенка разомкнута

Рис. 7. Распределение измеренных колебаний в шпунтовой стенке

ускорений колебаний стенки. Оранжевым цветом приведены их средние значения.

Зона влияния выбрана согласно критерию $0,15 \text{ м/с}^2$ и изображена красным цветом. Согласно полученным результатам, колебания распространяются по стенке до 7 м, что соответствует предпосылкам по назначению технологической последовательности извлечения свай. При этом, если исходить из максимально полученных значений, расстояние увеличивается до 11,7 м.

Общие величины максимальных ускорений колебаний стенки и грунтового массива в случаях: 1 — стенка замкнута (синие точки); 2 — стенка разомкнута (красные точки), приведены на рис. 8. Добавлены кривые, описывающие колебания для случая 1 (синий) и случая 2 (красный). По правой вертикальной оси добавлено отношение колебаний, когда стенка замкнута, A_1 , к колебаниям, когда стенка разомкнута, A_2 .

Общий уровень колебаний снизился, при этом величина снижения меняется в зависимости от расстояния от извлекаемой сваи. Зеленая

линия отражает, во сколько раз колебания замкнутой стенки A_1 , м/с^2 , больше, чем разомкнутой A_2 , м/с^2 . При этом с увеличением расстояния данное отношение возрастает.

Отмеченное позволяет сделать вывод, что предложенная методика виброизвлечения шпунтовых свай значительно снижает активную зону. Малая разница в величинах ускорения на расстоянии до 2 м объясняется положением датчиков на примыкающих сваях к извлекаемой.

При мониторинге фундаментов примыкающего здания также наблюдается снижение их колебаний (рис. 9). Оранжевый график соответствует колебаниям фундамента в первые дни извлечения, когда стенка была замкнута. Синим цветом приведен график колебаний для разомкнутой стенки. Уровень колебаний фундаментов сооружения снизился в среднем в 3,7 раза.

Выводы

- Фактическая зона влияния от виброизвлечения свай при постоянном размыкании шпунтовой стенки составила 15 м. При размыкании

Рис. 8. Сопоставление результатов колебаний, когда шпунтовая стенка замкнута и разомкнута

Рис. 9. Сопоставление графиков ускорений колебаний фундамента при замкнутой и разомкнутой стенке (слева); сопоставление изменения зоны влияния (справа)

стенки на отдельные участки общий уровень колебаний снизился, активная зона влияния составила 5,5 м;

- численное моделирование качественно отражает зоны влияния при разных технологических последовательностях виброизвлечения свай;
- размыкание шпунтовой стенки на отдельные участки 6–8 м снижает общее динамическое воздействие в сравнении с последовательным извлечением свай. При этом шаг размыкания шпунтовой стенки рекомендуется принимать 6–8 м;
- для снижения уровня колебаний в замкнутой стенке рекомендуется срезать сварные соединения до начала работ по извлечению свай по всей стенке;
- при размыкании шпунтовой стенки извлечение первых свай (когда стенка еще замкнута) рекомендуется проводить статическими установками.

Библиографический список

1. Мангушев Р. А., Осокин А. И. Геотехника Санкт-Петербурга / под ред. Р. А. Мангушева. М.: АСВ, 2010. 264 с.
2. Еришов В. А. Динамические свойства песчаных грунтов и их учет в оценке устойчивости земляных сооружений: дис. ... д-ра техн. наук. Л., 1970. 180 с.
3. Маковская Н. А., Глоzman Л. М. Динамические исследования — обязательная составляющая геотехнического мониторинга // Реконструкция городов и геотехническое строительство. 2001. № 4. С. 94–100.

4. Глоzman Л. М. Динамический мониторинг при возведении фундаментов глубокого заложения в условиях Санкт-Петербурга // Реконструкция исторических городов и геотехническое строительство. 2003. Т. 2. С. 67–72.

5. Вознесенский Е. А. Динамическая неустойчивость грунтов. М.: URSS, 2019. 264 с.

6. Шапкин М. А. Вибродинамический мониторинг здания в режиме реального времени с функцией управления технологией ремонтно-строительных работ // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 12. С. 53–59.

7. Верстов В. В., Гайдо А. Н., Иванов Я. В. Технологии устройства ограждений котлованов в условиях городской застройки и акваторий / под ред. В. В. Верстова. СПб.: Лань, 2014. 366 с.

8. Баркан Д. Д. Виброметод в строительстве. М.: Госстройиздат, 1959. 315 с.

9. Савинов О. А., Лускин А. Я. Вибрационный метод погружения свай и его применение в строительстве. Л.; М.: Госстройиздат, 1960. 251 с.

10. Верстов В. В., Гайдо А. Н. Исследование сравнительной эффективности заглубления стального шпунта в плотный грунт различными погружающими машинами // Механизация строительства. 2013. № 2 (824). С. 44–49.

11. Верстов В. В., Белов Г. А. Совершенствование технологических решений по погружению и извлечению шпунта вибрационным методом // Вестник гражданских инженеров. 2007. № 4 (13). С. 38–44.

12. Мангушев Р. А., Гурский А. В., Полуниин В. М. Оценка динамического воздействия от вибропогружения шпунтовых свай на здания окружающей застройки в условиях слабых водонасыщенных грунтов //

Construction and Geotechnics. 2020. T. 11, № 3. C. 102–116. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.3.09.

13. Brinkgerve R. B. J. Plaxis: Finite Element Code for Soil and Rock Analyses. Balkema, 2006. Pp. 53–56.

14. 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. Issue 6. Pp. 2863–2878. DOI: 10.1016/j.soildyn.2017.01.039.

15. Deckner F., Viking K., Guillemet C., Hintze S. Instrumentation system for ground vibration analysis during sheet pile driving // *Geotechnical Testing Journal*. 2015. Vol. 38. Issue 6. Pp. 893–905. DOI: 10.1520/GTJ20140275.

References

1. Mangushev R. A., Osokin A. I. *Geotekhnika Sankt-Peterburga* [Geotechnics in St. Petersburg]. Ed. by Mangushev R. A. Moscow, ASV Publ., 2010, 264 p.

2. Ershov V. A. *Dinamicheskie svoystva peschanykh gruntov i ikh uchet v otsenke ustoychivosti zemlyanykh sooruzheniy. Diss. dokt. tekhn. nauk* [Dynamic properties of sandy soils and their consideration in the assessment of the stability of earthworks. Dr. Sci. Tech. diss.]. Leningrad, 1970, 180 p.

3. Makovskaya N. A., Glozman L. M. *Dinamicheskie issledovaniya — obyazatel'naya sostavlyayushchaya geotekhnicheskogo monitoringa* [Dynamic research as a mandatory component of geotechnical monitoring]. *Rekonstruktsiya gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo — Urban Reconstruction and Geotechnical Construction*, 2001, no. 4, pp. 94–100.

4. Glozman L. M. *Dinamicheskiy monitoring pri vozvedenii fundamentov glubokogo zalozheniya v usloviyakh Sankt-Peterburga* [Dynamic monitoring in the construction of deep foundations in the conditions of St. Petersburg]. *Rekonstruktsiya gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo — Urban Reconstruction and Geotechnical Construction*, 2003, no. 2, pp. 67–72.

5. Voznesenskiy E. A. *Dinamicheskaya neustoychivost' gruntov* [Dynamic instability of soils]. Moscow, URSS Publ., 2019, 264 p.

6. Shashkin M. A. *Vibrodinamicheskiy monitoring zdaniya v rezhime real'nogo vremeni s funktsiey upravleniya tekhnologiyey remontno-stroitel'nykh rabot* [Vibration dynamic monitoring of buildings in real-time mode with the function of controlling the technology of repair and construction works]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe*

stroitel'stvo — Industrial and civil engineering, 2017, no. 12, pp. 53–59.

7. Verstov V. V., Gaydo A. N., Ivanov Ya. V. *Tekhnologii ustroystva ograzhdeniy kotlovanov v usloviyakh gorodskoy zastroyki i akvatoriy* [Technologies for the construction of pit fences in urban development and water areas]. Ed. by Verstov V. V. St. Petersburg, Lan' Publ., 2014, 366 p.

8. Barkan D. D. *Vibrometod v stroitel'stve* [Vibration method in construction]. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1959, 315 p.

9. Savinov O. A., Luskin A. Ya. *Vibratsionniy metod pogruzheniya svay i ego primenenie v stroitel'stve* [Vibration method of pile driving and its application in construction]. Leningrad, Moscow, Gosstroyizdat, 1960, 251 p.

10. Verstov V. V., Gaydo A. N. *Issledovanie sravnitel'noy effektivnosti zaglubleniya stal'nogo shpunta v plotniy grunt razlichnymi pogruzhayushchimi mashinami* [Investigation of the comparative efficiency of steel sheet pile driving into dense soil by various pile driving machines]. *Mekhanizatsiya stroitel'stva — Mechanization of construction*, 2013, no. 2 (824), pp. 44–49.

11. Verstov V. V., Belov G. A. *Sovershenstvovanie tekhnologicheskikh resheniy po pogruzheniyu i izvlecheniyu shpunta vibratsionnym metodom* [Improvement of technological solutions for driving and extraction of sheet piles by vibration method]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov — Bulletin of Civil Engineers*, 2007, no. 4 (13), pp. 38–44.

12. Mangushev R. A., Gurskiy A. V., Polunin V. M. *Otsenka dinamicheskogo vozdeystviya ot vibropogruzheniya shpuntovykh svay na zdaniya okruzhayushchey zastroyki v usloviyakh slabyykh vodonasyshchennykh gruntov* [Assessment of the dynamic impact of vibration loading of sheet piles on the buildings of the surrounding development in conditions of weak water-saturated soil]. *Construction and Geotechnics*, 2020, vol. 11, no. 3, pp. 102–116. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.3.09.

13. Brinkgerve R. B. J. Plaxis: Finite element code for soil and rock analyses. Balkema Publ., 2006, pp. 53–56.

14. 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, iss. 6, pp. 2863–2878. DOI: 10.1016/j.soildyn.2017.01.039.

15. Deckner F., Viking K., Guillemet C., Hintze S. Instrumentation system for ground vibration analysis during sheet pile driving. *Geotechnical Testing Journal*, 2015, vol. 38, iss. 6, pp. 893–905. DOI: 10.1520/GTJ20140275.