ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ, МЕРЗЛОТОВЕДЕНИЕ И ГРУНТОВЕДЕНИЕ/ENGINEERING GEOLOGY, PERMAFROST AND SOIL SCIENCE

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.139.35

ИЗМЕНЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ КОНСИСТЕНЦИИ C_B ПЫЛЕВАТО-ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ ПОСЛЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Научная статья

Черемхина А.П.[1, *], Заводчикова М.Б.[2]
[1] ORCID : 0000-0003-2649-2819;
[2] ORCID : 0000-0002-0480-2866;
[1, 2] Санкт-Петербургский архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (cheremhina_1[at]mail.ru)

Аннотация

Грунт основания в процессе высокочастотного вибропогружения и извлечения шпунтовых свай претерпевает ряд изменений, в первую очередь они касаются изменения консистенции грунта. В некоторых случаях грунт после воздействия переходит в состояние близкое к тяжелой жидкости, при этом прочностные и деформационные характеристики грунтов критически снижаются, что приводит к дополнительным осадкам зданий, входящих в зону влияния.

Известно, что для анализа воздействия динамической нагрузки на грунт необходимо учитывать две группы факторов – первая, характеризующая состав и состояние грунта, вторая – параметры воздействия (частота, длительность, амплитуда и скорость).

В настоящих исследованиях частота (не более 50 Гц) и время (10 минут) – приняты за константы и сопоставимы с действием динамической нагрузки на грунты основания при погружении или извлечении одной шпунтовой сваи в условиях Санкт-Петербурга. Исследования основаны на изменении консистенции пылевато-глинистых грунтов после динамического воздействия в зависимости от типа и состояния грунта.

Целью данного исследования являлось изучение изменения показателя консистенции $C_в$ пылевато-глинистых грунтов после высокочастотного динамического воздействия. Данные изменения имеют прямую связь с параметрами физико-механических свойств, от последних в свою очередь зависит величина осадки зданий и сооружений.

В работе приведены результаты лабораторных исследований, выполненные авторами, по изменению $C_в$ суглинистых и супесчаных грунтов различной консистенции под воздействием динамической нагрузки, сопоставимой с динамическим воздействием от погружения-извлечения шпунтового ограждения котлована.

Ключевые слова: колебания грунта, шпунтовая свая, консистенция грунта, показатель консистенции, разжижение грунта, разупрочнение грунтов, тиксотропия, пенетрационные испытания грунтов.

VARIATION OF CONSISTENCY INDEX C_B OF DUSTY CLAY SOILS AFTER HIGH FREQUENCY DYNAMIC INFLUENCE

Research article

Cheremkhina A.P.[1, *], Zavodchikova M.B.[2]
[1] ORCID : 0000-0003-2649-2819;
[2] ORCID : 0000-0002-0480-2866;
[1, 2] St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint-Petersburg, Russian Federation

* Corresponding author (cheremhina_1[at]mail.ru)

Abstract

The subgrade soil undergoes a number of changes during high-frequency vibration loading and sheet pile extraction, most notably in the consistency of the soil. In some cases, after the impact, the soil changes to a state close to a heavy liquid, and the strength and deformation characteristics of soils are critically reduced, which leads to additional settlement of buildings within the influenced zone.

It is known that in order to analyse the impact of dynamic loading on the soil, two groups of factors should be taken into account – the first, characterizing the composition and condition of the soil, and the second – the impact parameters (frequency, duration, amplitude and velocity).

In the present studies, frequency (not more than 50 Hz) and time (10 minutes) are regarded as constants and are comparable to the effect of dynamic loading on the foundation soils during the sinking or extraction of a single sheet pile in the conditions of Saint Petersburg. The research is based on the change of consistency of dusty clay soils after dynamic action, depending on the type and condition of the soil.

The objective of this study was to examine the changes in the consistency index $C_в$ of dusty clayey soils after high-frequency dynamic impact. These changes have a direct relationship with the parameters of physical and mechanical properties, the latter in turn determine the amount of settlement of buildings and structures.

The work provides the results of laboratory studies carried out by the authors on the change of $C_в$ of loamy and sandy loam soils of different consistency under the influence of dynamic loading, comparable to the dynamic impact of sinking-extraction of sheet piling of the excavation.

Keywords: soil vibrations, sheet pile, soil consistency, consistency index, soil liquefaction, soil thinning, soil softening, thixotropy, soil penetration tests.

Введение

Процесс строительства в сложных геологических и гидрогеологических условиях Санкт-Петербурга сопряжен с целым спектром сложных вопросов, один из которых – это правильный выбор типа и метода погружения ограждающей конструкции котлована. Одним из самых распространённых решений в Санкт-Петербурге является металлический шпунт, погруженный методами статического вдавливания, высокочастотное погружения и динамической забивкой [1], [2]. Как известно, каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки. Так, применение технологии высокочастотного погружения или извлечения шпунтовых свай в условиях водонасыщенных структурно-неустойчивых грунтов неизбежно приводит к изменению структуры грунта в околосвайном пространстве.

Реакция грунтов на динамическое воздействие зависит от типа и состояния грунта, для несвязных – уплотнение, для связных – частичное разупрочнение и полная потеря устойчивости, в результате развития таких процессов как, дилатансия и разжижение – плывунность и тиксотропия [3]. Так, грунт, находящийся непосредственно в контакте со сваей, претерпевает максимальное динамическое воздействие, приводящие к расструктуриванию грунта и соответственно к снижению показателей свойств. По мере удаления от источника нагрузки сдвиговые деформации уменьшаются.

Особенно это актуально, когда в зону влияния нового строительства попадают здания исторической застройки, основанием для которых является 2-5-метровая толща водонасыщенных песчаных грунтов и подстилаемая большой толщей, порядка 5-15 метров, слабых водонасыщенных глинистых грунтов от мягко-пластичной до текучей консистенции озерного, озерно-ледникового и морского генезиса. Реакция связных грунтов на внешнее динамическое воздействие в независимости от того, частичное это разуплотнение или полная потеря устойчивости, ведет к изменению состояния и консистенции грунта, снижению прочностных и деформационных параметров и как следствие к дополнительным осадкам зданий окружающей застройки [4], [5]. Зависимость изменения свойств грунта после воздействия динамической нагрузки и величиной осадки зданий окружающей застройки рассмотрена в работах [4], [6], [7], [8]. В статье [5] приведены результаты и показана тенденция к снижению параметров прочности грунтов после приложения динамической нагрузки и зависимость их изменения от времени воздействия, от типа и консистенции грунта. В работах [9], [10], [11], [12] описаны полевые эксперименты по исследованию поведения околосвайного пространства при динамическом воздействии, возникающем в процессе вибропогружения и извлечения шпунтовых свай в условиях слабых грунтов. В ходе экспериментов были получены траектории колебаний частиц грунта околосвайного пространства, показывающие его поведение под внешней динамической нагрузкой, и установлено значительное снижение прочностных свойств водонасыщенных песков в околосвайном пространстве после погружения/извлечения шпунтовой сваи [5].

Основные результаты

Для предварительной оценки влияния динамической нагрузки на величину осадки можно оценить изменение консистенции грунта, которая дает понимание о механических свойствах (табл. А2, А3, А4, А6 СП 22.13330.2016).

Также в работе [13] на основе результатов многолетних (2004-2014 гг.) лабораторных определений физико-механических свойств грунтов методом пенетрации, автором получены зависимости значений удельного сцепления и угла внутреннего трения от консистенции грунта естественного сложения и показателя текучести.

В работе [4] описана зависимость величины технологической осадки от величины снижения параметров свойств суглинистых грунтов после высокочастотного воздействия.

Изменение консистенции и параметров свойств грунта после динамического воздействия могут быть получены методом пенетрации в лабораторных и полевых условиях, последние по способу оценки показателей – на прямые и косвенные. Методом лабораторной пенетрации можно определить достаточно широкий спектр характеристик, например удельное сопротивление пенетрации R. Зная R, можно определить величину сцепления грунта c, угол внутреннего трения φ, сопротивление недренированному сдвигу cu [13]. Кроме того, пенетрационные испытания грунтов (конусом или крыльчатым зондом) дают возможность определения механических свойств текучих и текучепластичных глинистых грунтов без нарушения их исходного состояния

Исследованиями свойств грунтов методом пенетрации занимались Д.Ю. Здобин [13], [14], [15], [16], П.О. Бойченко [17], В.Ф. Разорёнов [18], Е.Н. Богданов [19], [20] и др. Так например, вопросом определения физических свойств дисперсных несвязных грунтов (песков) методом лабораторной пенетрации занимались Е.А. Шергина, М.А. Лаздовская [21], а современные исследования Д.Ю. Здобина [21], [22] определяют новый подход к взаимосвязи свойств грунта от его консистенции.

В современной практике консистенцию принято оценивать по показателю текучести I_L, он характеризует грунты в нарушенном сложении и поэтому не дает правильного представления об их состоянии в условиях естественного залегания [22]. К тому же метод подбора влажности по ГОСТ 5180 проводится вручную и требует хороших профессиональных навыков исполнителей, что также было отмечено в ряде работ [23]. Для более правильного суждения о консистенции грунтов в условиях массива П.О. Бойченко ввел еще один показатель, характеризующий консистенцию грунта ненарушенного сложения – показатель консистенции $C_{в.}$ Он включает в себя совокупность понятий – плотность, влажность и текстурно-структурные особенности органоминеральных и глинистых грунтов в природном сложении, что в условиях изменяющегося НДС массива после динамического воздействия более реалистично описывает процессы.

Определяется данный показатель при помощи конуса Бойченко методом лабораторной пенетрации (рис. 1).

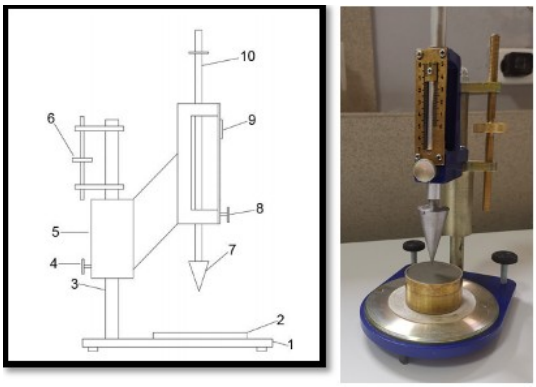

Рисунок 1 - Конус (пенетрометр) П.О. Бойченко. Общий вид
DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.139.35.1

Примечание: 1 – основание, 2 – рабочий столик, 3 – стойка, 4 – фиксирующий винт, 5 – подвижный корпус, 6 – установочный винт, 7 – конус, 8 – кнопка-фиксатор, 9 – шкала с нониусом, 10 – подвижный стержень с площадкой для груза. Источник [24]

Пенетрация относится к косвенным методам определения свойств грунтов по средствам внедрения в них наконечника на глубину, не превышающую высоту зонда. Методика испытаний прописана в рабочей инструкции РИ 06-2015 «Методы лабораторной пенетрации» [24], а также в ряде работ различных ученых [22].

В качестве результата опыта принимают среднее арифметическое глубины погружения конуса. Значение показателя консистенции грунта ненарушенного сложения C_B определяют согласно приложениям Б и В РИ 06-2016 (табл. 1).

Таблица 1 - Классификация грунтов по показателю консистенции

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.139.35.2

Глубина погружения конуса, h в мм	$C_в$	Консистенция
< 1,5	< -0,25	твердая
1,5 – 4,0	-0,25 – 0	полутвердая
4,0 – 7,4	0 – 0,25	тугопластичная
7,4 – 16,0	0,25 – 0,75	мягкопластичная
16,0 – 22,5	0,75 – 1,00	текучепластичная
> 22,5	> 1,00	текучая

Примечание: источник [24]

Значения показателя текучести грунтов нарушенного сложения I_L, как правило, отличаются от величин показателя их консистенции $C_в$ в ненарушенном сложении (табл. 2) [16].

Таблица 2 - Классификация состояния (консистенции) грунтов по показателям текучести I_L и консистенции $C_в$

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.139.35.3

Показатель текучести I_L	Показатель консистенции $C_в$	Консистенция грунта
< 0	< -0,25	Твердая
0 – 0,25	-0,25 – 0	Полутвердая
0,25 – 0,5	0 – 0,25	Тугопластичная
0,5 – 0,75	0,25 – 0,75	Мягкопластичная
0,75 – 1	0,75 – 1	Текучепластичная
> 1	> 1	текучая

Авторами были выполнены лабораторные исследования изменения показателя консистенции $C_в$ суглинистого и супесчаного грунта после динамического воздействия. Оценивалась консистенция грунтов до и после вибрационного

воздействия. Данные испытания позволяют оценить, как динамическая нагрузка влияет на изменение консистенции грунтов, а в последствии и на изменение параметров свойств, что имеет принципиальное значение в оценке величины технологической осадки зданий окружающей застройки.

В ходе лабораторных исследований были испытаны образцы ненарушенного сложения супеси пылеватой и суглинка. Образцы были отобраны с глубины до 20 метров с нескольких площадок Санкт-Петербурга. Основным критерием для отбора образцов стала различная влажность грунта естественного сложения. Всего было испытано 5 образцов – один образец супеси пылеватой и четыре образца суглинка. Влажность супеси составляла 22%, суглинков в диапазоне 24-35%. У каждого образца был определен показатель консистенции $C_в$ в зависимости от величины погружения конуса h без предварительного воздействия и после динамического воздействия на вибростолике в течение 10 минут при частоте около 50 Гц, данное воздействие соизмеримо с воздействием на грунт основания при вибропогружении /извлечении шпунтовой сваи в условиях Санкт-Петербурга (рис. 2).

В общей сложности у суглинков было проведено 120 измерения величины погружения конуса – 60 до воздействия и 60 после, у супеси – 32 измерения. Количество точек измерения соответствует п. 5.2.2.4 РИ 06-2016.

Рисунок 2 - Суглинистый грунт на вибростоле перед пенетрационным испытанием
DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.139.35.4

По результатам испытаний 3 образцов суглинка и 1 образца супеси были построены графики изменения консистенции грунта ненарушенного сложения $C_в$ до и после воздействия вибрации (рис. 3-6). Испытания 4-го образца суглинистого грунта с наибольшей влажностью показали постоянное плавное погружение конуса (более 5 секунд), в данном случае грунт считается структурно-неустойчивым и стандарт РИ 06-2016 на них не действует.

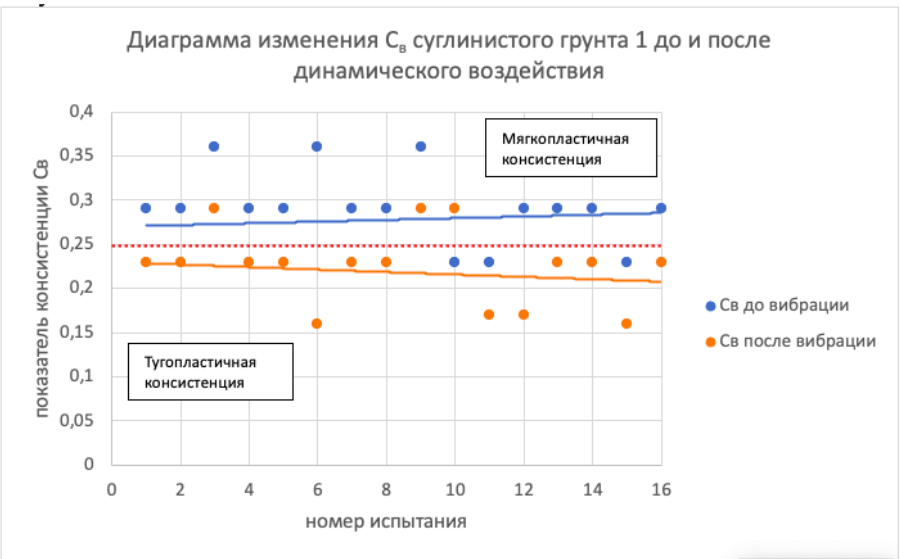

Рисунок 3 - Диаграмма изменения $C_в$ суглинистого грунта 1 до (16 испытаний) и после динамического воздействия (16 испытаний)
DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.139.35.5

Значения показателя консистенции $C_в$ образца «суглинок 1» до и после вибрации снизились со среднего значения 0,32 до значения 0,22, что говорит о переходе грунта из мягкопластичной в тугопластичную консистенцию. Однако, стоит отметить, что значение изменилось не значительно и в целом находится около значения перехода от мягкопластичной к тугопластичной.

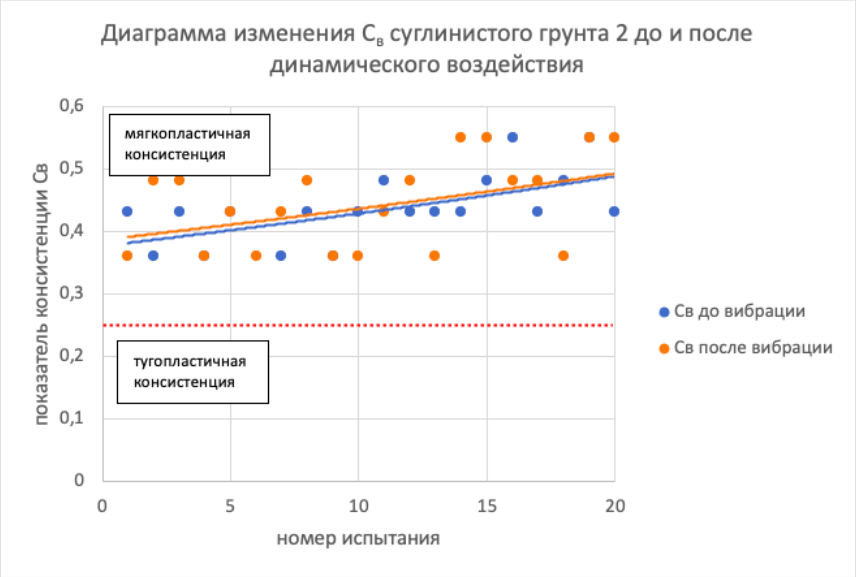

Рисунок 4 - Диаграмма изменения $C_в$ суглинистого грунта 2 до (20 испытаний) и после динамического воздействия (20 испытаний)

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.139.35.6

Показатель консистенции $C_в$ образца «суглинок 2» до и после вибрации находится в диапазоне 0,35-0,54, что характеризует консистенцию породы как мягкопластичную. В ходе исследования изменение консистенции после вибрационного воздействия зафиксировано не было.

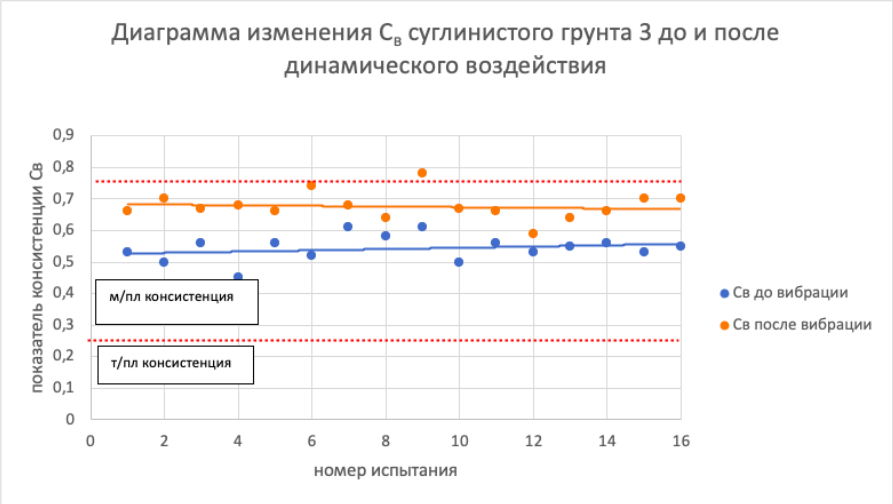

Рисунок 5 - Диаграмма изменения $C_в$ суглинистого грунта 3 до (16 испытаний и после динамического воздействия (16 испытаний)

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.139.35.7

Показатель консистенции $C_в$ образца «суглинок 3» после воздействия динамической нагрузкой показал повышение значения со среднего значения 0,53 до среднего значения 0,67.

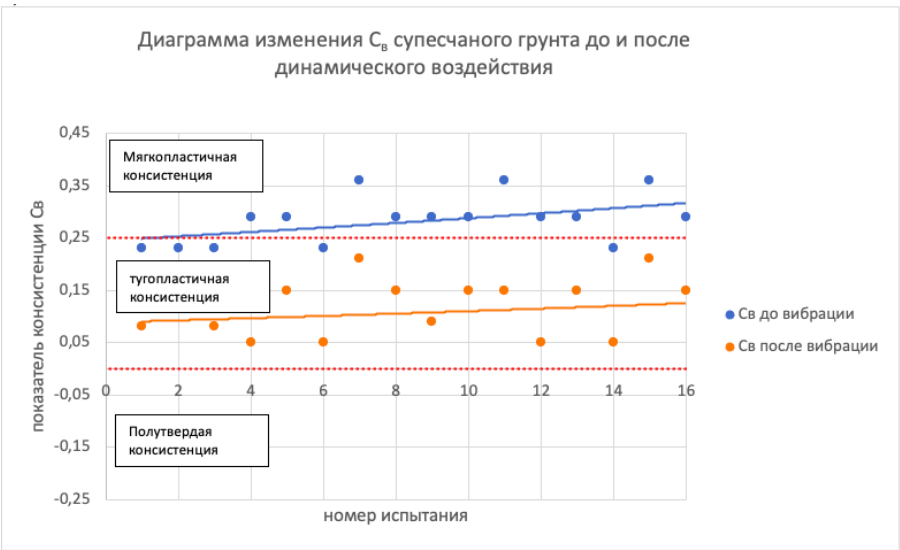

Рисунок 6 - Диаграмма изменения $C_в$ супесчаного грунта до (16 испытаний) и после динамического воздействия (16 испытаний)

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.139.35.8

Показатель консистенции $C_в$ супесчаного грунта после воздействия динамической нагрузкой показал существенное снижение своего значения, а консистенция грунта перешла из мягкопластичной в тугопластичную, по-видимому, за счет переупаковки частиц. Таким образом, чем больше в составе грунта песчаных частиц, тем больше они будут уплотняться в результате вибрационного воздействия, а следовательно, менять свою консистенцию.

Выводы

1. Исследования изменения показателя консистенции $C_в$ супесчаного грунта после 10-минутного воздействия динамической нагрузки показали изменение консистенции с мягкопластичной до тугопластичной, за счет переупаковки песчаных частиц;

2. Исследования по изменению показателя консистенции $C_в$ суглинка показали изменение в зависимости от консистенции грунта естественного сложения. Так, грунты с показателем консистенции равным 0,32 до воздействия вибрации – показали тенденцию к понижению показателя в среднем до 0,22 и переходу из мягкопластичной консистенции в тугопластичную. Суглинок с показателем консистенции $C_в$ 0,35-0,54, характеризующий породу как мягкопластичную, не показал каких-либо изменений $C_в$ после динамического воздействия. Грунты же с $C_в$ равным в среднем 0,53 до воздействия вибрации показали небольшое увеличение показателя консистенции до среднего значения 0,67, однако консистенция пород при этом не изменилась.

Вероятно, что у суглинистых грунтов с большим значением показателя консистенции $C_в$ до воздействия вибрации, появляется тенденция к переходу грунта из консистенции более твердой в менее после воздействия динамической нагрузки, и соответственно, тем больше вероятность появления таких процессов, как плывунность и тиксотропия.

Заключение

Пенетрационные исследования позволяют оценивать влияние динамической нагрузки на изменение консистенции грунта основания в полевых условиях непосредственно в момент погружения шпунтовых свай. По существу, это единственный объективный показатель природного состояния грунта при работе со слабыми водонасыщенными грунтами, т.е. с теми отложениями, которые могут менять (и меняют) свое исходное состояние при транспортировке образцов в стационарную грунтовую лабораторию [16].

Проанализировав полученные результаты, авторы пришли к выводу о необходимости проведения дополнительных исследований на суглинках с $C_в$ 0,6-0,7 и выше. Дальнейшие исследования более четко опишут влияние динамической нагрузки на грунт в зависимости от параметров воздействия (времени и частоты) и параметров самого грунта (тип, консистенция, влажность). Данная статья является вводной, основной целью которой являлось выявить тенденцию в изменении консистенции грунта в зависимости от его типа.

Для оценки влияния динамической нагрузки на величину осадки зданий окружающей застройки авторы планируют провести численное моделирование в ПК Plaxis 3D. Численный расчет будет проведен с учетом данных, полученных в ходе лабораторных исследований. Будет учтено изменение параметров прочностных и деформационных свойств грунтов при изменении консистенции в результате высокочастотного динамического воздействия.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Верстов В.В. Технологии устройства ограждений котлованов в условиях городской застройки и акваторий / В.В. Верстов, А.Н. Гайдо, Я.В. Иванов. — СПб.: Лань, 2014. — 366 с.
2. Верстов В.В. Совершенствование технологических решений по погружению и извлечению шпунта вибрационным методом / В.В. Верстов, Г.А. Белов // Вестник гражданских инженеров. — 2007. — № 4(13). — С. 38-44.
3. Строкова Л.А. Динамика грунтов / Л.А. Строкова. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2018. — 190 с.
4. Заводчикова М.Б. Дополнительные осадки зданий окружающей застройки при снижении параметров прочности грунта под воздействием динамической нагрузки / М.Б. Заводчикова, В.М. Полунин, А.П. Черемхина // Путевой навигатор. — 2023. — № 55(81). — С. 24-34.
5. Полунин В.М. Изменение прочностных параметров дисперсных грунтов после высокочастотного вибрирования / В.М. Полунин, А.П. Черемхина // Construction and Geotechnics. — 2021. — Т. 12. — № 1. — С. 46-56. — DOI: 10.15593/2224-9826/2021.1.04.
6. Полунин В.М. Прогноз дополнительных деформаций зданий и сооружений в процессе высокочастотного вибрирования шпунтовых свай / В.М. Полунин // Вестник гражданских инженеров. — 2022. — № 2. — С. 74-83.
7. Мангушев Р.А. Оценка влияния вдавливания шпунта на дополнительные осадки соседних зданий / Р.А. Мангушев, А.В. Гурский // Геотехника. — 2016. — № 2. — С. 34-41.
8. Мангушев Р.А. Учет влияния технологических осадок зданий окружающей застройки при устройстве шпунтовых ограждений соседних котлованов / Р.А. Мангушев, А.В. Гурский, В.М. Полунин // Жилищное строительство. — 2020. — № 9. — С. 9-19. — DOI: 10.31659/0044-4472-2020-9-9-19.
9. Василюк Л.В. Вибропогружение шпунта вблизи существующих зданий в грунтовых условиях Санкт-Петербурга / Л.В. Василюк // Инженерно-геотехнические изыскания, проектирование и строительство оснований, фундаментов и подземных сооружений. — СПб., 2017. — С. 307-316.
10. Deckner F. Instrumentation System for Ground Vibration Analysis during Sheet Pile Driving / F. Deckner, K. Viking, C. Guillemet [et al.] // Geotechnical Testing Journal. — 2015. — Vol. 38. — Iss. 6. — P. 893-905. — DOI: 10.1520/GTJ20140275.
11. Meijers P. The Raamsdonksveer Sheet Pile Test, Measured Surface Settlements during Vibratory Sheet Piling / P. Meijers, A.F. Tol // Proc. 14th Eur. Conf. Soil Mech. and Geotech. Eng. — Madrid, 2007. — P. 603-609.
12. Korff M. Mapping Liquefaction Based on CPT Data for Induced Seismicity in Groningen / M. Korff, P. Meijers, A. Wiersma [et al.] // Earthquake Geotechnical Engineering for Protection and Development of Environment and Constructions - Proceedings of the 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering. — 2015. — P. 3418-3425.
13. Здобин Д.Ю. Естественная прочность и деформируемость глинистых грунтов. Часть 2 / Д.Ю. Здобин // Инженерная геология. — 2015. — № 4. — С. 30-35.
14. Здобин Д.Ю. Естественная прочность и деформируемость глинистых грунтов. Часть 1 / Д.Ю. Здобин // Инженерная геология. — 2015. — № 3. — С. 12-21.
15. Здобин Д.Ю. Показатель текучести и консистенция – основные физико-химические показатели состояния грунтов / Д.Ю. Здобин, Л.К. Семенова // Инженерные изыскания. — 2013. — № 5. — С. 28-33.
16. Здобин Д.Ю. О консистенции грунтов естественного сложения / Д.Ю. Здобин // Сергеевские чтения. — 2015. — Т. 17. — С. 554-561.
17. Бойченко П.О. Определение пределов пластичности и консистенции глинистых грунтов / П.О. Бойченко. — Л.: Изд-во ЛГУ, 1964. — 47 с.
18. Разоренов В.Ф. Пенетрационные испытания грунтов / В.Ф. Разоренов. — М.: Стройиздат, 1968. — 182 с.
19. Богданов Е.Н. О механических свойствах глинистых грунтов / Е.Н. Богданов // Грунтоведение. — 2012. — № 1. — С. 62-70.
20. Богданов Е.Н. О пенетрационных испытаниях глинистых грунтов / Е.Н. Богданов // Грунтоведение. — 2013. — № 1. — С. 24-33.
21. Шергина Е.А. Определение физических свойств песчаных грунтов методом лабораторной пенетрации / Е.А. Шергина, М.А. Лаздовская, Д.Ю. Здобина // Грунтоведение. — 2018. — № 1. — С. 19-26.
22. Здобин Д.Ю. О консистенции грунтов естественного сложения / Д.Ю. Здобин // Сергеевские чтения. — 2015. — Т. 17. — С. 554-561.
23. Денисенко В.В. Анализ методов определения пределов пластичности грунта / В.В. Денисенко, П.А. Лященко // Научные труды КубГТ. — 2015. — № 10. — С. 340-356.
24. РИ 06-2015. Грунты. Методы лабораторной пенетрации. — Введ. 2015-12-23. — СПб.: Трест ГРИИ, 2015. — 18 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Verstov V.V. Tehnologii ustrojstva ograzhdenij kotlovanov v uslovijah gorodskoj zastrojki i akvatorij [Technologies of Excavation Pit Fencing in Urban and Water Area Conditions] / V.V. Verstov, A.N. Gaido, Y.V. Ivanov. — SPb.: Lan, 2014. — 366 p. [in Russian]
2. Verstov V.V. Sovershenstvovanie tehnologicheskih reshenij po pogruzheniju i izvlecheniju shpunta vibracionnym metodom [Improvement of Technological Solutions for Borehole Submergence and Extraction by Vibrating Method] / V.V. Verstov, G.A. Belov // Vestnik grazhdanskih inzhenerov [Bulletin of Civil Engineers]. — 2007. — № 4(13). — P. 38-44. [in Russian]
3. Strokova L.A. Dinamika gruntov [Dynamics of Soils] / L.A. Strokova. — Tomsk: Tomsk Polytechnic University Publishing House, 2018. — 190 p. [in Russian]
4. Zavodchikova M.B. Dopolnitel'nye osadki zdanij okruzhajushhej zastrojki pri snizhenii parametrov prochnosti grunta pod vozdejstviem dinamicheskoj nagruzki [Additional Precipitation of the Buildings of the Surrounding Development at the Decrease of the Ground Strength Parameters under the Effect of Dynamic Loading] / M.B. Zavodchikova, V.M. Polunin, A.P. Cheremkhina // Putevoj navigator [Travelling Navigator]. — 2023. — № 55(81). — P. 24-34. [in Russian]
5. Polunin V.M. Izmenenie prochnostnyh parametrov dispersnyh gruntov posle vysokochastotnogo vibrirovanija [Changes in Strength Parameters of Dispersed Soils after High Frequency Vibrating] / V.M. Polunin, A.P. Cheremkhina // Construction and Geotechnics. — 2021. — Vol. 12. — № 1. — P. 46-56. — DOI: 10.15593/2224-9826/2021.1.04. [in Russian]
6. Polunin V.M. Prognoz dopolnitel'nyh deformacij zdanij i sooruzhenij v processe vysokochastotnogo vibrirovanija shpuntovyh svaj [Prediction of Additional Deformations of Buildings and Structures in the Process of High-Frequency Vibration of Sheet Piles] / V.M. Polunin // Vestnik grazhdanskih inzhenerov [Bulletin of Civil Engineers]. — 2022. — № 2. — P. 74-83. [in Russian]
7. Mangushev R.A. Ocenka vlijanija vdavlivanija shpunta na dopolnitel'nye osadki sosednih zdanij [An Estimation of the Influence of Shpunt Indentation on Additional Precipitation of Neighbouring Buildings] / R.A. Mangushev, A.V. Gurskiy // Geotehnika [Geotechnical Engineering]. — 2016. — № 2. — P. 34-41. [in Russian]
8. Mangushev R.A. Uchet vlijanija tehnologicheskih osadok zdanij okruzhajushhej zastrojki pri ustrojstve shpuntovyh ograzhdenij sosednih kotlovanov [Taking into Account the Influence of the Technological Settlements of the Surrounding Buildings at the Sheet Pile Fencing of the Neighbouring Pits] / R.A. Mangushev, A.V. Gurskiy, V.M. Polunin // Zhilishhnoe stroitel'stvo [Residential Construction]. — 2020. — № 9. — P. 9-19. — DOI: 10.31659/0044-4472-2020-9-9-19. [in Russian]
9. Vasiljuk L.V. Vibropogruzhenie shpunta vblizi sushhestvujushhih zdanij v gruntovyh uslovijah Sankt-Peterburga [Vibratory Loading of a Shaft near the Existing Buildings in the Ground Conditions of Saint-Petersburg] / L.V. Vasilyuk // Inzhenerno-geotehnicheskie izyskanija, proektirovanie i stroitel'stvo osnovanij, fundamentov i podzemnyh sooruzhenij [Engineering Geotechnical Surveys, Design and Construction of Bases, Foundations and Underground Structures]. — SPb., 2017. — P. 307-316. [in Russian]
10. Deckner F. Instrumentation System for Ground Vibration Analysis during Sheet Pile Driving / F. Deckner, K. Viking, C. Guillemet [et al.] // Geotechnical Testing Journal. — 2015. — Vol. 38. — Iss. 6. — P. 893-905. — DOI: 10.1520/GTJ20140275.
11. Meijers P. The Raamsdonksveer Sheet Pile Test, Measured Surface Settlements during Vibratory Sheet Piling / P. Meijers, A.F. Tol // Proc. 14th Eur. Conf. Soil Mech. and Geotech. Eng. — Madrid, 2007. — P. 603-609.
12. Korff M. Mapping Liquefaction Based on CPT Data for Induced Seismicity in Groningen / M. Korff, P. Meijers, A. Wiersma [et al.] // Earthquake Geotechnical Engineering for Protection and Development of Environment and Constructions - Proceedings of the 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering. — 2015. — P. 3418-3425.
13. Zdobin D.Ju. Estestvennaja prochnost' i deformiruemost' glinistyh gruntov. Chast' 2 [Natural Durability and Deformability of Clayey Soils. Part 2] / D.Yu. Zdobin // Inzhenernaja geologija [Engineering Geology]. — 2015. — № 4. — P. 30-35. [in Russian]
14. Zdobin D.Ju. Estestvennaja prochnost' i deformiruemost' glinistyh gruntov. Chast' 1 [Natural Durability and Deformability of Clayey Soils. Part 1] / D.Yu. Zdobin // Inzhenernaja geologija [Engineering Geology]. — 2015. — № 3. — P. 12-21. [in Russian]
15. Zdobin D.Ju. Pokazatel' tekuchesti i konsistencija – osnovnye fizi- ko-himicheskie pokazateli sostojanija gruntov [Fluidity Index and Consistency – the Main Physical and Chemical Indicators of Soil Condition] / D.Yu. Zdobin, L.K. Semenova // Inzhenernye izyskanija [Engineering Surveys]. — 2013. — № 5. — P. 28-33. [in Russian]
16. Zdobin D.Ju. O konsistencii gruntov estestvennogo slozhenija [About Consistency of Soils of Natural Composition] / D.Yu. Zdobuin // Sergeevskie chtenija [Sergeev Readings]. — 2015. — Vol. 17. — P. 554-561. [in Russian]
17. Bojchenko P.O. Opredelenie predelov plastichnosti i konsistencii glinistyh gruntov [Determination of Plasticity Limits and Consistency of Clayey Soils] / P.O. Boychenko. — L.: Publishing House of LSU, 1964. — 47 p. [in Russian]
18. Razorenov V.F. Penetracionnye ispytanija gruntov [Penetration Testing of Soils] / V.F. Razorenov. — M.: Stroĭizdat, 1968. — 182 p. [in Russian]
19. Bogdanov E.N. O mehanicheskih svojstvah glinistyh gruntov [On Mechanical Properties of Clayey Soils] / E.N. Bogdanov // Gruntovedenie [Soil Studies]. — 2012. — № 1. — P. 62-70. [in Russian]
20. Bogdanov E.N. O penetracionnyh ispytanijah glinistyh gruntov [On Penetration Tests of Clayey Soils] / E.N. Bogdanov // Gruntovedenie [Soil Studies]. — 2013. — № 1. — P. 24-33. [in Russian]
21. Shergina E.A. Opredelenie fizicheskih svojstv peschanyh gruntov metodom laboratornoj penetracii [Determination of Physical Properties of Sandy Soils by the Method of Laboratory Penetration] / E.A. Shergina, M.A. Lazdovskaya, D.Yu. Zdobina // Gruntovedenie [Soil Studies]. — 2018. — № 1. — P. 19-26. [in Russian]
22. Zdobin D.Ju. O konsistencii gruntov estestvennogo slozhenija [About Consistency of Soils of Natural Composition] / D.Yu. Zdobin // Sergeevskie chtenija [Sergeev Readings]. — 2015. — Vol. 17. — P. 554-561. [in Russian]

23. Denisenko V.V. Analiz metodov opredelenija predelov plastichnosti grunta [An Analysis of Methods for Determining the Limits of Soil Plasticity] / V.V. Denisenko, P.A. Lyashchenko // Nauchnye trudy KubGT [Scientific Proceedings of KubST]. — 2015. — № 10. — P. 340-356. [in Russian]

24. RI 06-2015. Grunty. Metody laboratornoj penetracii [Soils. Methods of Laboratory Penetration]. — Introduced 2015-12-23. — SPb.: Trust GRII, 2015. — 18 p. [in Russian]