

На правах рукописи



Полунин Вячеслав Михайлович

**ВЛИЯНИЕ ВИБРОПОГРУЖЕНИЯ
И ВИБРОИЗВЛЕЧЕНИЯ ШПУНТОВЫХ
СВАЙ НА ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ
ОСАДКИ ФУНДАМЕНТОВ ЗДАНИЙ
В ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ГРУНТАХ**

Специальность 2.1.2. Основания и фундаменты,
подземные сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный руководитель: Чл.-корр. РААСН,
доктор технических наук, профессор
Мангушев Рашид Абдуллович

Официальные оппоненты: **Тер-Мартirosян Армен Заверович**
доктор технических наук,
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский
Московский государственный строительный
университет» (НИУ МГСУ), кафедра механики
грунтов и геотехники, профессор;

Нуждин Леонид Викторович
кандидат технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный
архитектурно-строительный университет
(СибСтрин)», кафедра инженерной геологии,
оснований и фундаментов, профессор.

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Петербургский
государственный университет путей
сообщения Императора Александра I».**

Защита состоится «23» ноября 2022 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.380.04 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4. зал заседаний диссертационного совета (аудитория 220). Тел. 8 (812) 316-58-73; E-mail: rector@spbgasu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте: <https://dis.spbgasu.ru/specialty/personal/polunin-vyacheslav-mihaylovich>

Автореферат разослан «10» октября 2022 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



В. В. Конюшков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Для развития эффективной городской инфраструктуры мегаполиса необходимо активное освоение подземного пространства. Ограничение наземной площади приводит к размещению автопарковок и помещений административного назначения в подземных этажах. Зачастую, реализация подземных объемов происходит в условиях плотной городской застройки, где главным критерием безопасного строительства является сохранность зданий и сооружений, попадающих в зону влияния.

В качестве конструкции ограждения котлована наиболее часто используются металлические шпунтовые сваи различного профиля. Это обусловлено их экономической эффективностью, в сравнении с железобетонными элементами ограждениями котлованов, выполненных по методу «стена в грунте». Основными способами погружения свай являются: забивка, вибропогружение и статическое вдавливание. Применение низкочастотного динамического воздействия при забивке свай недопустимо в условиях плотной городской застройки из-за большой динамической нагрузки, возможного явления резонанса и большой зоны влияния. Погрузить шпунтовую сваю методом статического вдавливания при наличии большой толщи песков бывает затруднительно и более затратно в сравнении с вибропогружением свай. Высокочастотное безрезонансное вибропогружение является щадящей и экономически эффективной технологией, в сравнении с представленными ранее методами.

Основным критерием при выборе конструкции ограждения котлована является достаточность величины ее изгибной жесткости для восприятия горизонтального давления грунта с учетом нагрузки от фундаментов близрасположенных зданий. Для этого выполняется моделирование фактической геотехнической ситуаций с целью определить расчетные величины дополнительных деформаций зданий, попадающих в зону влияния от: 1) откопки котлована и освоения подземного пространства; 2) загрузки основания новым сооружением. В ходе данных расчетов не учитываются технологические особенности выбранных технологий, поскольку они считаются безопасными. Результаты натурных наблюдений за дополнительными деформациями зданий и сооружений в процессе вибропогружения и виброизвлечения шпунтовых свай показывают, что величина дополнительной осадки может достигать до 5 см. Это происходит за счет особенностей инженерно-геологических условий г. Санкт-Петербурга.

Геологическое напластование в центральной части города можно характеризовать наличием 2–5 м песчаных водонасыщенных грунтов разной крупности и плотности сложения, они же являются основанием для фундаментов исторических зданий. Далее идут слабые, водонасыщенные глинистые грунты, которые имеют мягко-пластичную, текуче-пластичную и текучую

консистенции и их мощности варьируется от 7–14 м. Процессы вибропогружения и виброизвлечения шпунтовых свай вызывают в этих грунтах динамические напряжения, которые приводят к развитию дополнительных деформаций, особенно в толще слабых водонасыщенных глинистых грунтов.

Поэтому учет дополнительных деформаций, вызванных вибропогружением и виброизвлечением шпунтовых свай является актуальной задачей. Разработка методики их учета позволит учитывать воздействие этих процессов на этапе проектирования.

Степень разработанности темы исследования.

Вопросам устройства ограждений котлованов из шпунтовых свай занимались многие исследователи, в том числе: Баркан Д.Д., Белов Г.А., Верстов В.В., Гайдо А.Н., Городнова Е.В., Никифорова Н.С., Пономарев А.Б., Филиппов Е.Н., Фрейдман Б.Г., Цейтлин М.Г., Гурский А.В., Конюшков В.В., Ланько С.В., Осокин А.И.,

Вопросами вибрационного погружения жестких элементов в водонасыщенные грунты занимались следующие исследователи: Баркан Д.Д., Савинов О.А., Ковалевский Е.Д., Каложнюк М.М., Рудь В.К., Ильичев В.А. В том числе зарубежные авторы: Woods R.D., Holeyman A.E., Ishihara K., Kramer S.L., Massarch K.R., Seed H.B., Richart F.E., Deckner F., Viking K. и др.

Работы, посвященные поведению водонасыщенных грунтов под динамическим воздействием выполнены учеными: Ершов В.А., Вознесенский Е.А., Мирсаяпов И.Т., Нуждин Л.В, Тер-Мартirosян З.Г., Тер-Мартirosян А.З., Соболев Е.С., Анжело Г.О., Королева И.В., Seed H.B., Месчан С.Р. и др.

Развитие расчетно-вычислительных программных комплексов с использованием метода конечных элементов позволяет моделировать поведение грунтов в сложных геотехнических ситуациях. Моделированием ограждающих конструкций и прогнозом дополнительных деформаций зданий и сооружений при откопке котлованов занимались - Готман Ю.А., Дьяконов И.П., Ильичев В.А., Колыбин И.В., Мангушев Р.А., Никифорова Н.С., Парамонов В.Н., Петрухин В.П., Пономарев А.Б., Сахаров И.И., Тер-Мартirosян З.Г., Шашкин А.Г., Шашкин К.Г., Шулятьев О.А., Улицкий В.М., Сапин Д.А. и др.

На сегодняшний день при выполнении геотехнического обоснования откопки котлована и нового строительства, не учитываются технологические осадки, вызванные процессами вибропогружения и виброизвлечения шпунтовых свай.

Цель исследования: оценка влияния процессов вибропогружения и виброизвлечения шпунтовых свай на дополнительные осадки зданий, попавших в зону влияния.

Задачи исследования:

Определить характер распространения колебаний в массиве грунта, в процессе высокочастотного вибропогружения и виброизвлечения шпунтовых

свай. Оценить величину активной зоны влияния такого динамического воздействия. Выявить преобладающий тип волны на поверхности и по глубине грунтового массива при вибропогружении и виброизвлечении шпунтовых свай.

Оценить влияние динамического воздействия, вызванного процессами вибропогружения и виброизвлечения шпунтовых свай на изменение прочностных и деформационных параметров грунта.

На основе исследований по задачам 1,2, разработать методику прогноза дополнительных осадок зданий, вызванных процессами вибропогружения и виброизвлечения шпунтовых свай.

Разработать рекомендации по технологии погружения и виброизвлечения шпунтовых свай, позволяющих снизить их влияние на дополнительные осадки соседних зданий и сооружений.

Объект исследования: погружение и извлечение шпунтовых свай с помощью высокочастотной динамической нагрузки.

Предмет исследования: влияние процесса высокочастотного вибропогружения и виброизвлечения шпунтовых свай на дополнительную осадку соседних зданий.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. Разработана аналитическая и численная методика расчета осадки зданий, вызванной вибрированием шпунтовых свай, которая позволяет учесть действующие статические и динамические воздействия в массиве разнородных грунтов;

2. Обоснован схожий уровень динамического воздействия для процессов вибропогружения и виброизвлечения шпунтовых свай по результатам натуральных наблюдений за колебаниями грунтового массива для этих процессов;

3. Получены аналитические и экспериментальные зависимости относительных деформаций глинистых грунтов от времени при действии высокочастотных динамических нагрузок;

4. Обоснована технология виброизвлечения шпунтовых свай для уменьшения влияния этого процесса на дополнительные осадки соседних зданий.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в разработке принципов проектирования шпунтовых ограждений, выполненных методом вибропогружения при устройстве котлованов в условиях городской застройки и их последующего вибрационного извлечения. Предложенная методика расчета позволяет определить величину и характер распространения дополнительных деформаций от вибропогружения и извлечения шпунтовых свай для достоверного расчета дополнительной осадки, а также разработать комплекс мероприятий для снижения дополнительных технологических осадок соседних зданий при устройстве вблизи них котлована со шпунтовым ограждением, выполняемых указанным методом.

Результаты исследований, полученные при выполнении диссертационной работы, использованы:

– АО «Инвестиции. Инжиниринг. Строительство «IEC» (Санкт-Петербург) – «Выполнение геотехнической экспертизы подбора машин, механизмов и оборудования для погружения трубошпунта»;

– «ООО «ГЕОСТРОЙ» (Санкт-Петербург) – «Выполнение проекта ограждения котлована в условия слабых грунтов»;

– представлены в инновационном альбоме Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН) за 2021 г.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке и обосновании методике расчета, позволяющей прогнозировать дополнительные деформации в массиве грунта в зависимости от типа грунта и интенсивности динамической нагрузки.

Методология и методы исследований:

1. Анализ литературных источников о влиянии динамического воздействия и распространению колебаний в массиве грунтов основания.

2. Выполнение натурных и численных экспериментов для оценки распространения колебаний в массиве грунта при вибропогружении и извлечении шпунтовых свай.

3. Лабораторные и полевые исследования влияния динамического воздействия на изменение характеристик грунта.

4. Разработка замкнутого аналитического решения задачи о развитии дополнительных деформаций грунтов основания фундаментов зданий и сооружений, попавших в зону влияния в процессе динамического воздействия.

5. Сопоставление результатов расчетов дополнительной осадки зданий с данными натурных наблюдений от вибропогружения и извлечения шпунтовых свай.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработанная методика аналитического расчета дополнительных деформаций зданий соседней застройки, вызванных процессами вибропогружения и виброизвлечения шпунтовых свай в условиях слабых водонасыщенных грунтов.

2. Полученные величины колебаний на поверхности грунта в процессе вибропогружения и виброизвлечения шпунтовых свай. На основе натурных полевых экспериментов на опытных площадках строительства, уточненные зоны влияния и преобладающие типы волн на поверхности.

3. Результаты проведенных численных расчетов при моделировании процессов вибрирования шпунтовых свай для определения активной зоны влияния в толще слабых грунтов.

4. Полученные экспериментальные кривые виброползучести глинистого грунта мягко-пластичной консистенции и расчетные кривые вибропол-

зучести по результатам численных экспериментов. Уточненные величины динамической вязкости в зависимости от уровня динамических напряжений для глинистых и песчаных грунтов.

5. Сопоставление результатов численного и аналитического расчета дополнительной осадки зданий в процессе вибрирования шпунтовых свай с данными мониторинга на объектах г. Санкт-Петербурга.

Область исследования соответствует требованиям паспорту специальности 2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения, пункты: 6: Разработка новых методов расчёта, конструирования и устройства оснований, фундаментов и подземных сооружений при действии динамических и сейсмических нагрузок; 10: Разработка научных основ и ведущих принципов обеспечения безопасности нового строительства и реконструкции объектов в условиях сложившейся застройки, в том числе для исторических памятников, памятников архитектурного наследия и др.

Степень достоверности результатов исследований и выводов диссертационной работы подтверждаются применением основных положений и моделей механики грунтов, реологическими уравнениями виброползучести грунтов, механики деформируемого тела. Подтверждается хорошей сходимостью аналитического и численного решений с результатами натурных наблюдений на площадке строительства.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях: Научный семинар, посвящённый «110-летию со дня рождения Савинова Олега Александровича» (3–6 февраля 2020, ПГУПС, Санкт-Петербург); II Всероссийской конференции с международным участием «Фундаменты глубокого заложения и проблемы геотехники территорий» (26-28 мая 2021 г, ПНИПУ, Пермь); «74-ая научно-практическая студенческая конференция СПбГАСУ» (4–6 апреля, СПбГАСУ, Санкт-Петербург); Международной конференции «Современные теоретические и практические вопросы геотехники: новые материалы, конструкции, технологии и методики расчетов (GFAC 2021)» (27–29 октября, 2021, СПбГАСУ, Санкт-Петербург), на расширенном научном семинаре РОМГГиФ, 18 ноября 2021.

Личный вклад автора состоит в получении результатов, изложенных в диссертации, заключается в:

1. Обосновании процесса развития дополнительных деформаций в массиве грунта при вибропогружении и виброизвлечении шпунтовых свай.

2. Решении аналитической и численной задачи по определению дополнительной деформации соседних зданий при виброизвлечении и вибропогружении шпунтовых свай.

3. Обработке результатов вибромониторинга процессов вибропогружения и виброизвлечения на 61-м объекте с целью уточнения зоны влияния, частотных параметров вибропогружателей и профилей шпунтовых свай.

В сравнении динамического воздействия процессов вибропогружения и виброизвлечения шпунтовых свай.

4. Проведении полевых исследований методом статического зондирования грунтов основания, для оценки изменения прочностных и деформационных параметров грунта после динамического воздействия. Проведение лабораторных испытаний глинистого грунта на приборе динамического трехосного сжатия.

Публикации. Основные научные результаты диссертации опубликованы в 11 научных работах, в том числе 9 в рецензируемых изданиях из перечня, размещенного на официальном сайте ВАК.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 155 наименований и 3 приложений. Работа изложена на 166 страницах машинописного текста, содержит 121 рисунок, 16 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, ее научная новизна, цель исследования.

В первой главе приведены основные положения по вибрационному погружению и извлечению шпунтовых свай в условиях плотной городской застройки; особенности распространения волн в грунтах и грунтовых условиях г. Санкт-Петербурга; предложена расчетная схема для прогноза дополнительной осадки фундаментов.

Высокочастотное безрезонансное вибропогружение и виброизвлечение шпунтовых свай принято считать щадящей технологией. Однако, результаты наблюдений за дополнительными деформациями зданий окружающей застройки, попадающих в зону влияния динамического воздействия, показали, что деформации могут достигать 5 см (рис. 1).

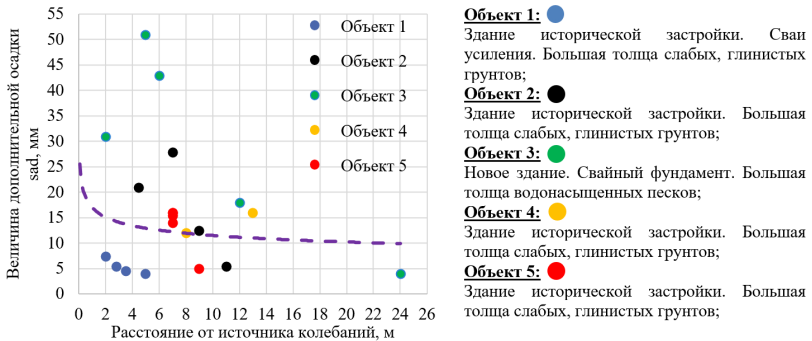


Рисунок 1 – Величины дополнительных осадок зданий с различным типом фундаментов в зависимости от расстояния до вибрируемой свай

Предполагается, что большие величины осадок развиваются в результате особенностей свойств слабых и тиксотропных грунтов основания территории центральной части г. Санкт-Петербурга. Наличие в верхней части напластования грунтов водонасыщенных песков различной крупности и плотности сложений, а, также, слабых озерно-морских (m,l-V) и озерно-ледниковых (lg-III) отложений, обладающих свойством тиксотропии – приводит к изменению свойств таких грунтов в процессе динамического воздействия. На основе карты инженерно-геологического районирования Л.Г. Заварзина и анализа отчетов инженерно-геологических изысканий (36 объектов) – были уточнены и построены характерные инженерно-геологические колонки для различных административных г. Санкт-Петербурга. Мощность водонасыщенных сильно-деформируемых грунтов варьируется в пределах 7–10 м.

Анализ нормативно-технической литературы показал несогласованность существующих нормативных документов по контролю динамического воздействия. Нет документа, учитывающего все факторы, влияющие на подбор критерия оценки вибрации. Регламентируются величины колебаний только фундаментов и конструкций зданий и сооружений, но не грунтов основания. Нет требования по положению датчиков на поверхности грунта или по глубине грунтового основания, направлению измеряемых колебаний. Особенно важно, что нет рекомендации по прогнозу дополнительных технологических осадок зданий от вибрационного погружения или извлечения шпунтовых свай. Существующие решения по расчету деформаций грунтового основания при действии внешних динамических нагрузок базируются на возможности песчаных грунтов уплотняться. Для глинистых грунтов отмечены только эмпирические зависимости.

По результатам анализа исследований по распространению колебаний в грунте при высокочастотном вибрировании шпунтовых свай отмечено, что возникают различные фронты распространения волн. На поверхности грунта возникают волны Рэлея – R. Согласно исследованию Richart они затухают на глубине, соответствующей 1–1,5 ее длины (рис. 2, а), что для геологических условий Санкт-Петербурга составляет примерно 3,5–5,0 м. Толща слабых водонасыщенных глинистых грунтов испытывает воздействие глубинных волн: продольных – P и поперечных – S. В работах F. Deckner представлены измерения колебаний по глубине. Отмечено, что в середине шпунтовой сваи, в зоне слабых грунтов – преобладает поперечной тип волны (рис. 2, б).

Поэтому, предлагается следующая расчетная схема (рис. 3). Предполагается, что в процессе вибрирования шпунтовых свай в грунте возникают: поверхностные волны Рэлея – R; за счет сил трения по боковой поверхности сваи возникает цилиндрический фронт, который описывается продольной волной – P и поперечной волной – S. Это приводит к возникновению динамических напряжений в толще слабого слоя грунта: $\sigma_{a,z}$, $\sigma_{a,x}$ – вертикальная

и горизонтальная составляющая. В следствии чего развиваются дополнительные деформации грунтового основания и зданий сооружений, попадающих в зону влияния.

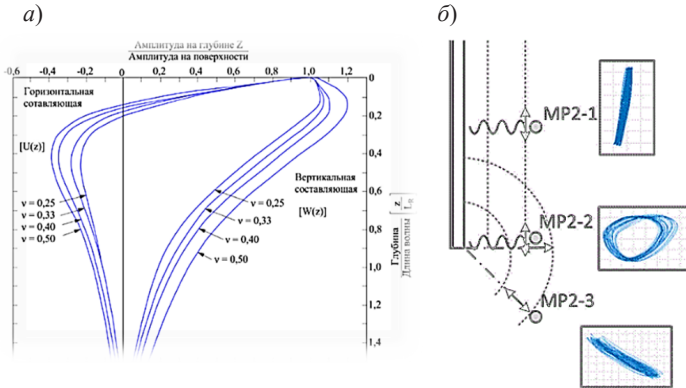


Рисунок 2 – а) Изменение амплитуды волны Рэлея с глубиной [Richart, F.E., 1970]; б) траектории колебаний точек грунта по глубине шпунтовой сваи [Deckner F.]

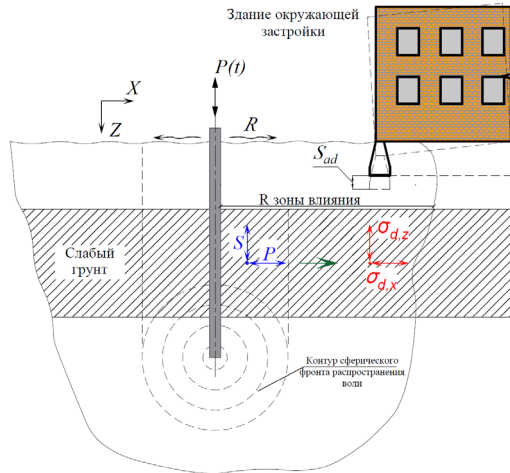


Рисунок 3 – Предлагаемая расчетная схема к прогнозу дополнительных деформаций, вызванных процессами вибрирования шпунтовых свай и ее описание

Дополнительные деформации можно определить с помощью уравнения виброползучести Д.Д. Баркана (1):

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

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; ω – циклическая частота, 1/с.

Во второй главе уточнены особенности распространения колебаний в массиве грунта при высокочастотном вибрировании шпунтовых свай.

Анализ отчетов вибромониторинга процессов динамического воздействия от вибропогружения и виброизвлечения шпунтовых свай позволил сопоставить уровень динамического воздействия в зависимости от расстояния до источника колебаний (рис. 4, а). Можно сделать вывод, что эти процессы имеют близкий уровень динамического воздействия, что обусловлено особенностями тиксотропии слоистых глинистых грунтов в г. Санкт-Петербурге. При долгом нахождении сваи в грунте зачастую проявляется эффект «засасывания» сваи, отмеченный А.И. Осокиным при оценке несущей способности буровых свай, в связи с чем, трение по боковой поверхности существенно увеличивается при виброизвлечении шпунтовых свай. Также, данные вибромониторинга позволили получить частотные характеристики вибропогружателей, для уточнения характера динамического воздействия, которое исследовалось в работе (рис. 4, б).

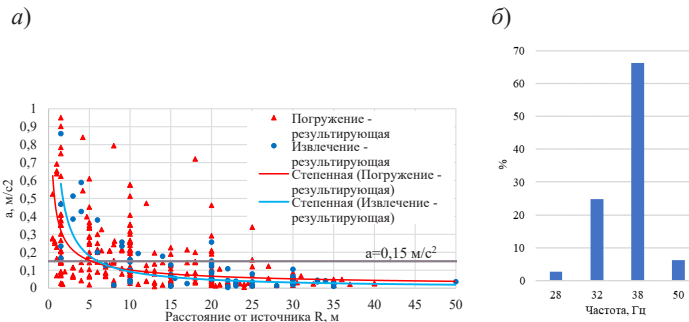


Рисунок 4 – а) сопоставление величин максимальных виброускорений в зависимости от расстояния до источника колебаний для процессов вибропогружения и виброизвлечения свай; б) распределение рабочих частот вибропогружателей

Натурные наблюдения за колебаниями грунтов были выполнены на одной из опытных площадок. Целью эксперимента являлось: 1) определить зону влияния; 2) определить траектории движения точек поверхности грунта; 3) получить экспериментальные осциллограммы скорости колебаний; 4) оценить эффективность размыкания шпунтовой стенки в процессе извлечения свай, в сравнении с последовательным извлечением.

Схема расположения датчиков, полученные траектории движения точек и характерная инженерно-геологическая колонка приведены на рисунке 5.

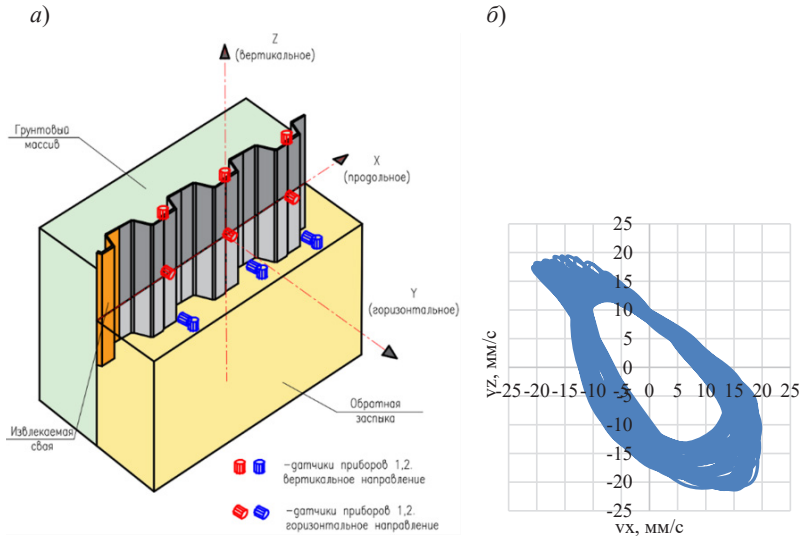


Рисунок 5 – а) Схема расположения датчиков в процессе виброизвлечения шпунтовых свай; б) траектория движения точки поверхности грунта на расстоянии 1,5 м (горизонтальные колебания ось – X; вертикальные ось – Y).

Полученные данные использовались для верификации численной модели. В качестве результатов численного расчета определялись: величины виброскорости и виброускорения грунта на различных расстояниях от вибрируемой сваи, зона влияния, траектории движения точек по глубине массива грунта. На рисунке 6, а приведено сопоставление расчетных и фактических осциллограмм виброскорости полученных на поверхности грунта на расстоянии 1,4 и 2,8 м. На рисунке 6, б приведены кривые затухания виброускорений грунта с расстоянием от источника колебаний. Красная кривая получена в ходе численного расчета в Plaxis, синие и зеленые точки – данные натурных наблюдений, которые получены разными виброметрами.

Удовлетворительная сходимость представленных ранее параметров позволяет, на основе результатов численной модели, уточнить распределение цилиндрического фронта распространения волн по глубине шпунтовой сваи (рисунок 6, в).

Максимальное значение виброскорости в толще слабого слоя грунта составило: 40,0 мм/с по оси Y, и 29,6 мм/с по оси Z. Величины виброскорости на глубине -7,5 м составили 10,0 мм/с по оси Y, и 49,8 мм/с по оси Z. Величина вертикальной составляющей виброскорости на глубине превышает величины, полученной на поверхности грунта, в ~ 2 раза. Такое соотношение справедливо для точек более удаленных от вибрируемой сваи. Зная уровень

виброскорости и виброускорения возможно определить величину нормальных динамических и касательных напряжений:

$$\sigma_a = \frac{\gamma_{gr}}{g} V_p v_z; \quad (2)$$

$$\tau_{\max} = \frac{a_{\max}}{g} \gamma_{gr} z r_d, \quad (3)$$

где, γ_{gr} – удельный вес грунта кН/м³; g – ускорение свободного падения м/с²; V_p – скорость распространения продольной волны, м/с; v_z – величина виброскорости грунта в измеряемой точке, м/с; a_{\max} – величина виброускорения грунта в измеряемой точке м/с²; r_d – коэффициент редукиции; z – глубина рассматриваемой точки, м.

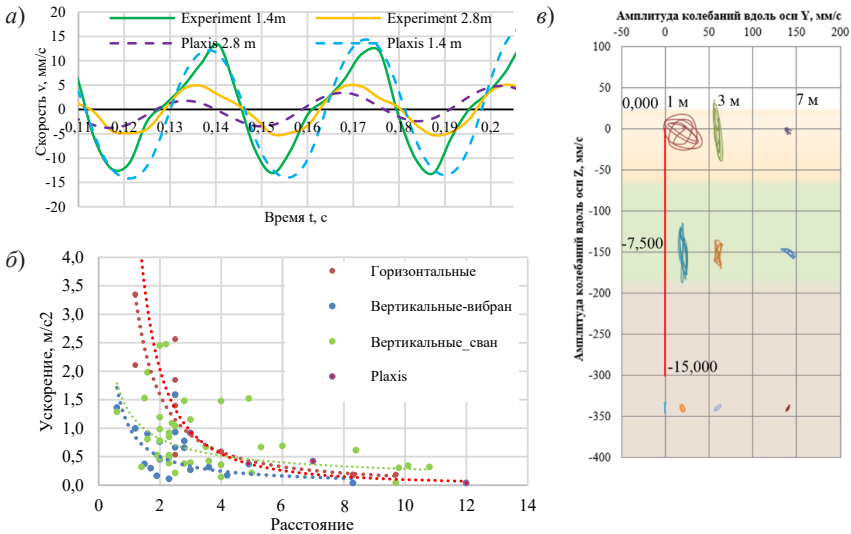


Рисунок 6 – а) сопоставление расчетных и фактических осциллограмм виброскорости; б) кривые затухания виброускорений грунта в зависимости от расстояния до источника колебаний по результатам численных расчетов и натуральных наблюдений; в) траектории движения точек на поверхности и в массиве грунта в процессе вибрирования шпунтовых свай

В третьей главе представлены результаты статического зондирования и лабораторных испытаний глинистого грунта в установке динамического трехосного сжатия для уточнения зависимости относительных деформаций во времени при виброползучести грунта.

Результаты статического зондирования грунтов основания «до», «после» вибрирования шпунтовых свай на трех различных площадках показали,

что параметр « q_c », для глинистых грунтов верхних отложений снижается до 70% на расстоянии 1 м; до 25% на расстоянии 4 м; практически не меняется на расстоянии 8 м.

Также, для учета динамического воздействия на грунт основания при расчете деформаций можно использовать уменьшенный модуль деформации (4) или коэффициент виброползучести грунта (5):

$$E_{red} = \frac{E}{1 + \left(\frac{E\varepsilon_d}{\beta\sigma_z} \right)}; \quad (4)$$

$$K_{ВП} = \frac{\Delta\varepsilon_c}{\Delta\varepsilon_c + \Delta\varepsilon_d}, \quad (5)$$

где, E – Величина модуля деформации при статических нагрузках, кПа; ε_d – величина относительных деформаций при динамическом воздействии д.ед; β – коэффициент бокового расширения; σ_z – величина статического, природного напряжения, кПа; $\Delta\varepsilon_c$ – приращение относительных деформаций при статическом нагружении; $\Delta\varepsilon_d$ – приращение относительных деформаций при динамическом нагружении.

Для уточнения этих параметров необходимо определить величину деформаций грунта в процессе динамического нагружения. В качестве исходных параметров для моделирования динамической нагрузки используется: частота динамического воздействия, Гц; амплитуда динамических напряжений, кПа, которую можно определить по формуле 2.

Для определения параметров уравнения 1, для водонасыщенных глинистых грунтов, в наших испытаниях были приняты следующие параметры эксперимента: вертикальные напряжения $\sigma_1 = 110$ кПа; горизонтальные напряжения $\sigma_3 = 100$ кПа, что соответствует бытовому давлению грунта для озерно-морских и озерно-ледниковых отложения. Динамические напряжения $\sigma_a = 24$ и 12 кПа. Частота динамического воздействия $f = 38$ Гц. Время вибрирования образцов $t = 900$ с. За критерий разрушения принята величина относительных деформаций образца $\varepsilon = 15\%$. Динамические напряжения соответствуют колебаниям грунта на расстоянии 1,4, 2,8 м от вибрируемой сваи. Образы глинистого грунта мягко-пластичной консистенции «до» и «после» испытания приведены на рисунке 7.

Для оценки относительных деформаций глинистых грунтов при других уровнях динамических напряжений лабораторный эксперимент был смоделирован численно. Верификация результатов выполнена сравнением лабораторных данных, с полученными результатами по численной модели (рис. 8).

По результатам лабораторных испытаний возможно определить параметры динамической вязкости η_0 и реологического упрочнения α . Кривая вибро-

ползучести глинистого грунта мягко-пластичной консистенции, полученная в ходе лабораторного эксперимента и по уравнению 1 приведена на рисунке 9.

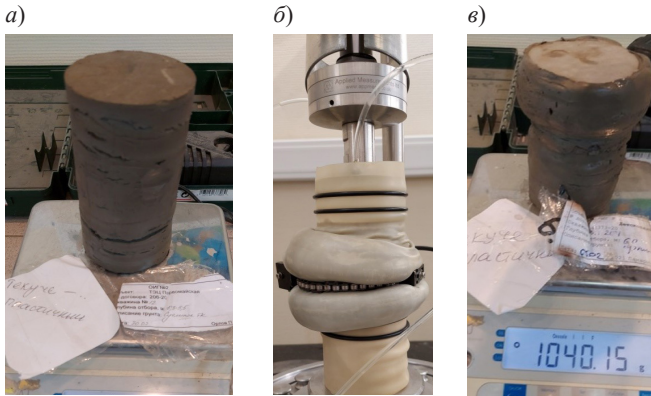


Рисунок 7 – Образцы глинистого грунта различной консистенции «до» и «после» испытания: а) образец текуче-пластичной консистенции до испытания б) образец текуче-пластичной консистенции после испытания на динамическую нагрузку 24 кПа; в) образец текуче-пластичной консистенции после испытания на динамическую нагрузку 12 кПа.

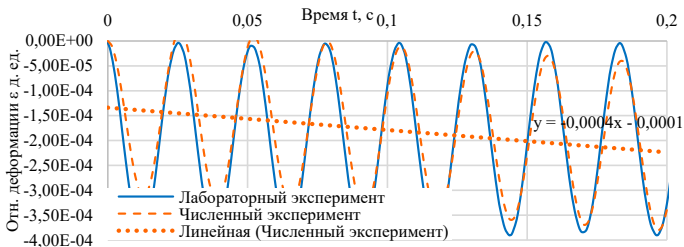


Рисунок 8 – Сопоставление результатов лабораторного и численного эксперимента: амплитуда относительных деформаций в зависимости от времени.

Аналогичные численные эксперименты были проведены для грунтов текучей ($I_L > 1$), текуче-пластичной ($I_L = 0,75 - 1$) и мягко-пластичной консистенций ($I_L = 0,5 - 1$). Статические величины напряжений приняты аналогичны лабораторным испытаниям, динамические напряжения задавались в диапазоне от 0,2 кПа до 24 кПа. На основе численных экспериментов, была получена зависимость динамической вязкости от динамических напряжений для глинистых грунтов (6). Кривые зависимости динамической вязкости от динамических напряжений приведены на рисунке 10. В таблице 1 сведены параметры A, B .

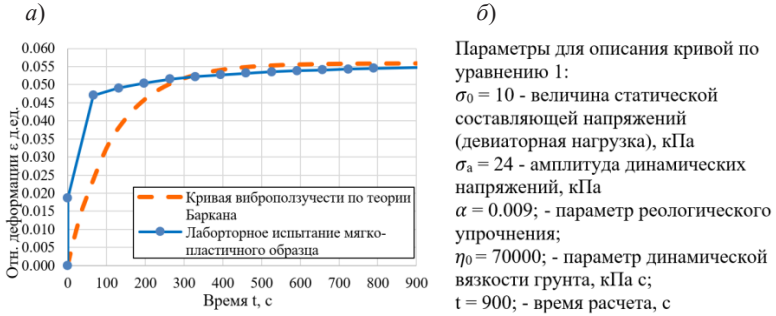


Рисунок 9 – а) Кривая виброползучести глинистого грунта мягко-пластичной консистенции при динамических напряжениях 24 кПа (лабораторная и по уравнению 5); б) Параметры грунта для описания уравнения виброползучести по теории Баркана

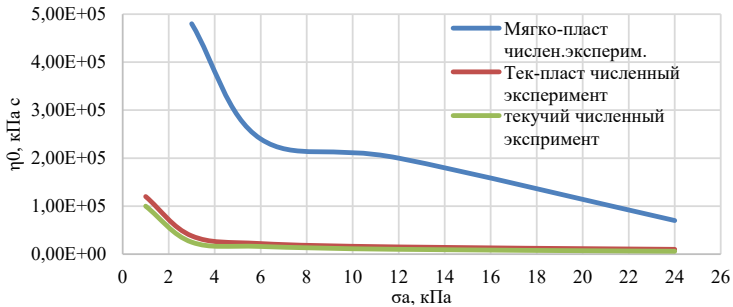


Рисунок 10 – Зависимость динамической вязкости от динамических напряжений для глинистых грунтов различной консистенции.

$$\eta_0(\sigma_a) = A\sigma_a^{-B}, \quad (6)$$

где, η_0 – параметр динамической вязкости грунта, кПа с; σ_a – амплитуда динамических напряжений, кПа; A, B – безразмерные параметры, зависят от типа грунта.

Таблица 1 – Параметры A, B для формулы 6

	Мягко-пласт.	Тек-пласт.	Текучий
A	$15 \cdot 10^5$	$4.47 \cdot 10^5$	$1.44 \cdot 10^5$
B	1	1,5	1,1

В четвертой главе представлена разработанная методика прогноза дополнительных деформаций, вызванных процессами вибрирования шпунтовых свай и сопоставлены результаты расчетов с данными натурных наблюдений.

Относительные деформации виброползучести вызванные процессами вибрирования свай возможно прогнозировать по формуле (1). В качестве допущения принимается, что динамическая вязкость грунта и параметр реологического упрочнения одинаковы для относительных и сдвиговых деформаций. В таком случае их можно учесть с помощью упругопластической модели Тимошенко (7):

$$\gamma(t) = \int_0^t \frac{\tau_0 + \tau_a(\sin \omega t)}{\eta_0 \alpha^{at}} \frac{(\sigma_0 + \sigma_a(\sin \omega t)) \cdot \operatorname{tg} \varphi + c}{(\sigma_0 + \sigma_a(\sin \omega t)) \cdot \operatorname{tg} \varphi + c - \tau_0 + \tau_a(\sin \omega t)} dt, \quad (7)$$

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; τ_0 – величина статических касательных напряжений, кПа; τ_a – величина динамических касательных напряжений, кПа; φ – угол внутреннего трения грунта, °; c – удельное сцепление грунта, кПа; ω – циклическая частота, 1/с.

Напряжения от внешней статической нагрузки определялись по формулам Колосова Г.В.¹ от полосовой равномерно-распределённой нагрузки (8, 9) для вертикальных нормальных и касательных составляющих соответственно:

$$\sigma_0 = \frac{p}{\pi} \left(\operatorname{arctg} \frac{0,5b - x}{z} + \operatorname{arctg} \frac{0,5b + x}{z} \right) - \frac{bp}{\pi} \frac{z(x^2 - z^2 - 0,25b^2)}{(x^2 - z^2 - 0,25b^2)^2 + x^2 b^2}; \quad (8)$$

$$\tau_0 = \frac{2bp}{\pi} \frac{xz^2}{(x^2 + z^2 - 0,25b^2)^2 + z^2 b^2}, \quad (9)$$

где p – давление под подошвой ближайшего фундамента (принимается с учетом природных напряжений в уровне подошвы фундамента), кПа; b – ширина подошвы фундамента.

Величина динамических нормальных и касательных напряжений определяется по формулам 2, 3, в зависимости от полученных в процессе вибромониторинга значений виброскорости и виброускорений частиц грунта. Поскольку амплитуды колебаний на глубине больше, чем на поверхности, величина виброскорости принимается с учетом коэффициента $k = 2$. Скорость волн определялась с помощью динамического модуля упругости грунта, который получен в ходе испытаний, приведенных в главе 3. По формуле 6, определяется величина динамической вязкости. Параметр реологического упрочнения принимается: для песчаных грунтов $\alpha \approx 0,017$; для глинистых $\alpha \approx 0,009$. Для учета сдвиговых деформаций в общий вклад относительных вертикальных, использована зависимость (10):

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_z(t) + \frac{\sqrt{3}}{2} \gamma(t). \quad (10)$$

¹ Задача Г.В. Колосова о напряжениях в точке упруго полупространства от равномерно распределённой нагрузке

Для расчета конечной величины осадки основания фундамента выражение 10 необходимо проинтегрировать по длине шпунтовой сваи (11):

$$s(t) = \int_0^L \varepsilon(t) dz, \quad (11)$$

где, $s(t)$ – конечная осадка, вызванная погружением сваи, м; L – длина шпунтовой сваи, м.

С целью проверки разработанной методики расчета на опытной площадке (см. глава 2) было выполнено виброизвлечение шпунтовых свай корытообразного профиля длиной 15 м. В ходе работ были получены величины виброскорости и виброускорений грунта и конструкции фундамента. В ходе спектрального анализа была определена фактическая частота работы вибропогружателя – 29 Гц.

Уровень грунтовых вод на площадке строительства зафиксирован на отметке – 1 м. Характеристики грунта приведены в таблице 2.

Таблица 2– Параметры грунтов опытной площадки

№ ИГЭ	Геологический индекс	h , м	γ , кН/м ³	e	IL	φ , °	c , кПа	E , МПа
3-Песок мелкий, средн. Плот.	ml, IV	4,9	19,7	0,6	–	30	3	12
4-Суглинки текуче-пластичные	ml, IV	2,8	19,4	0,8	0,92	8	5	6
5-Суглинки текучие, ленточные	lg-III	2,2	18	1,1	1,1	6	5	4
6-Суглинки текуче-пластичные слоистые	lg-III	1,9	19,2	0,84	0,88	7	6	7
7-Супеси пластичные	g-III	3,2	21,8	0,4	0,41	17	27	11

В процессе виброизвлечения шпунтовых свай производился мониторинг деформаций соседнего здания, попадающего в активную зону влияния. Фундаменты здания имеют переменную ширину подошвы фундамента $b = 0,9–1,2$ м, глубина заложения фундамента $d = 2$ м. Давление по подошве фундамента 239 кПа. Дополнительная осадка фундамента для 3-этажной части здания составила по данным мониторинга составила: 1,4–2,1 см. Результаты аналитического расчета приведены на рисунке 11. Время расчета было принято равным 900 с; задача решалась в плоской постановке.

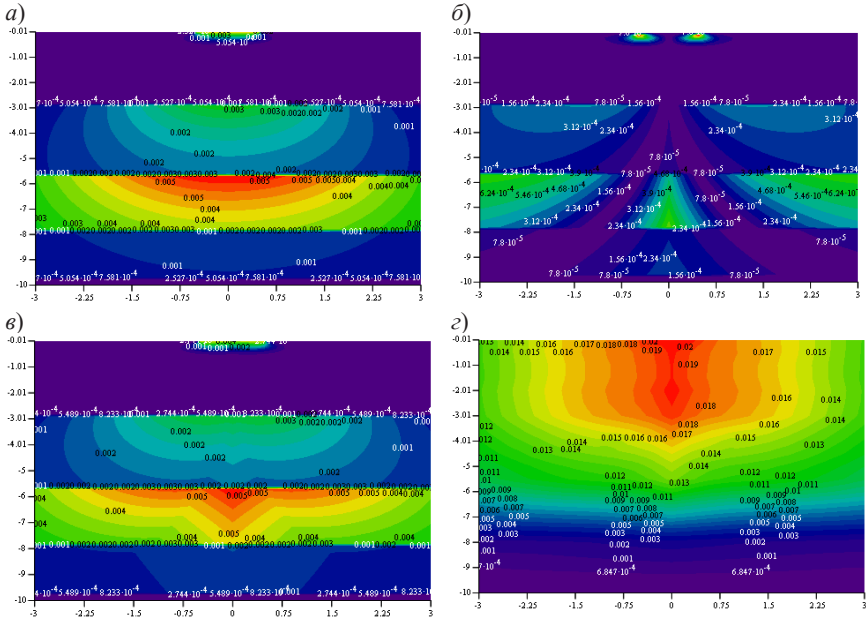


Рисунок 11 – а) изополя расчетных относительных вертикальных деформаций основания; б) изополя расчетных сдвиговых деформаций основания; в) изополя расчетных суммарных относительных деформаций основания, полученных по формуле (10); г) величина расчетной дополнительной осадки фундамента в ходе виброизвлечения шпунтовых свай, м

Прогнозировать величину дополнительной осадки от вибрирования шпунтовых свай возможно в численной постановке. В процессе вибрирования шпунтовой сваи в околосвайном пространстве происходит существенное изменение деформационных и прочностных характеристик грунтов. Если рассмотреть эту задачу как статическую и учесть зоны грунта с пониженными значением модуля деформации, можно получить величину конечной дополнительной осадки.

В таком случае, околосвайное пространство можно описать двумя принципиальными зонами: зона 1 – грунт переходит в состояние тяжелой вязкой жидкости; зона 2 – в грунте происходит снижение модуля деформации (рис. 12, а). Если построить кривую затухания колебаний в зависимости от расстояния до вибрируемой сваи (пример – рис. 6, б), можно спрогнозировать активную зону изменения модуля деформации грунта в околосвайном пространстве (рис. 12, б). На рисунке 12, в, представлен график изменения модуля деформации по глубине в зоне фундамента.

Минимальный радиус зоны 1 – Rl можно принять равным $d_{ce} + 0,1$ м по всей длине сваи. В толще слабых водонасыщенных глинистых грунтов он существенно

увеличивается (красная зона рисунка 12, б) и определяется: $d_{св} + Rl$. Остальное пространство моделируется с пониженным модулем деформации ($K_{вп} \approx 0,8$). Под фундаментами существующего здания, на расстоянии ширины подошвы фундамента модуль деформации грунта принимается понижать согласно аналитическому расчету и формулам (1), (4) или (5), с учетом действия статических напряжений от внешней нагрузки, передаваемой от фундамента (рис. 12, в).

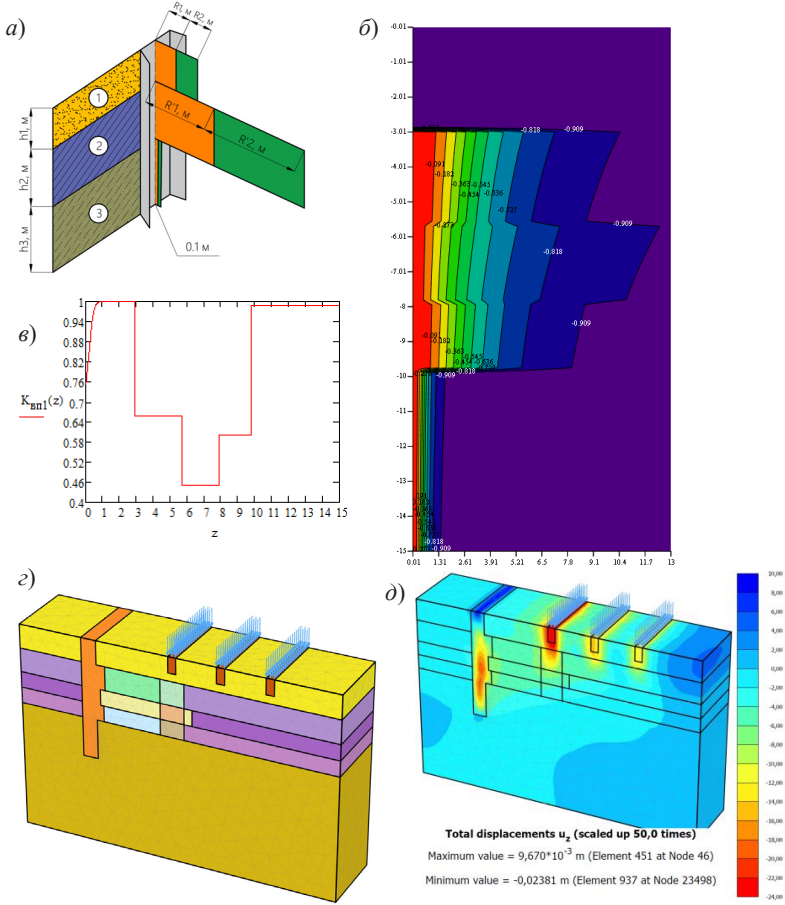
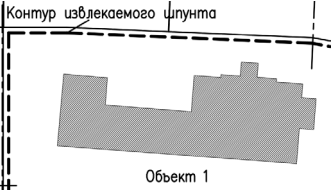

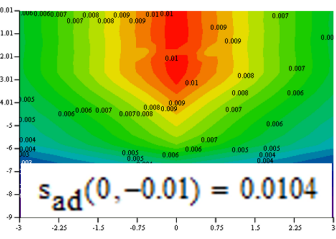
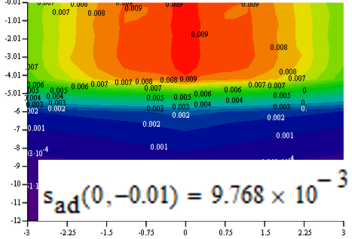
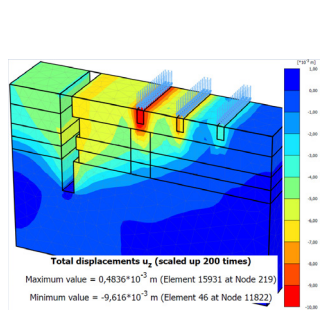
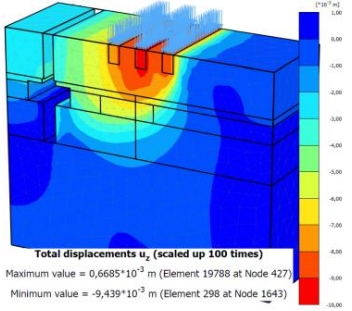

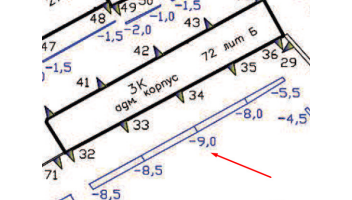


Рисунок 12 – а) Предлагаемая расчетная схема к прогнозу дополнительных деформаций в процессе виброизвлечения шпунтовых свай в численной постановке; б) изополя величины $K_{вп}$ по длине сваи (ось Y) и в зависимости от расстояния до сваи (ось X); в) Величина коэффициента виброползучести под фундаментом, полученная в ходе аналитического расчета; г) Расчетная схема для прогноза дополнительной осадки в численной постановке; д) Изополя дополнительной осадки фундамента

В таблице 3 приведены сопоставления результатов дополнительных деформаций фундаментов здания в процессе вибропогружения и виброизвлечения свай по предложенным методикам с данными натурных наблюдений.

Таблица 3– Сравнение результатов расчётов по разработанным методикам оценки дополнительной осадки зданий в процессе виброизвлечения шпунтовых свай на опытной площадке строительства

	Объект 1. 1-этажная часть здания. Расстояние до извлекаемых свай ~ 9 м	Объект 2а. 3-этажное здание. Расстояние до извлекаемых свай ~ 8 м
Ситуационный план		
Аналитический расчет		
Численный расчет		
Мониторинг		

Результаты апробированы на 3-х площадках строительства на 7 различных зданиях. Площадки характеризовались различными инженерно-геологическими условиями, различным расстоянием до вибрируемых свай и различным уровнем динамического воздействия на грунты основания. Получена хорошая сходимость между результатами натурных наблюдений и по данным, полученным по предлагаемым расчетным методикам. Максимальная разница составила 25% для аналитического решения и 24 % для решения задачи с помощью численного моделирования.

Таблица 4 Сопоставление результатов расчета с данными натурных наблюдений

№ Объекта	Мониторинг, мм	Аналитический расчет, мм	Численный расчет, мм	Разница «Аналитический расчет», %	Разница «Численный расчет», %
1а	7,5–12,5	10	9,6	20	4
1б	13,5–21	21	23,8	0	13
2а	5,5–9	9,8	9,4	8	4
2б	9–9,5	8,5	8,6	11	1
2в	5–7,5	9,4	8,6	25	9
3а	15–16	18	14,2	13	21
3б	10–12	10	12,4	17	24

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе многочисленных геодезических наблюдений и мониторинга строящихся и соседних с ними зданий установлено, что вибропогружение и виброизвлечение шпунтовых свай не всегда является безопасной технологией – дополнительная технологическая осадка соседних зданий в условиях большой толщи слабых глинистых грунтов может достигать 5 и более см.

2. На основе натурных наблюдений за колебаниями грунта, конструкциями фундаментов соседних зданий было отмечено, что процесс вибропогружения и виброизвлечения шпунтовых свай имеет одинаковый порядок уровня динамических воздействий.

3. Данные колебаний грунта в вертикальном и горизонтальном направлении околосвайного пространства на опытной площадке строительства позволили верифицировать численную модель для прогноза распространения колебаний грунта. В ходе вибромониторинга получено опытным путем, что колебания в толще слабых грунтов имеют большие значения (в 2 раза), чем на поверхности основания. На основе этих исследований предложена

расчетная схема оценки дополнительных деформаций фундаментов соседних зданий в процессе вибропогружения/виброизвлечения шпунтовых свай.

4. В ходе лабораторных испытаний водонасыщенных глинистых грунтов на установке динамического трехосного сжатия получена кривая виброползучести глинистого грунта мягко-пластичной консистенции. Определены следующие параметры грунта: динамическая вязкость и параметр реологического упрочнения для описания уравнения виброползучести по теории Баркана Д.Д. В ходе численных экспериментов оценены эти параметры для грунтов текучей и текуче-пластичной консистенции. Установлено, что динамическая вязкость грунта зависит от интенсивности динамических напряжений. Предложена зависимость динамической вязкости от динамических напряжений для слабых водонасыщенных глинистых грунтов.

5. Полученные зависимости позволяют прогнозировать зоны изменения модуля деформации грунта в околошпунтовом пространстве. Установлено, что на расстоянии $1-3d_{св}$, зона 1, грунт переходит в состояние тяжелой вязкой жидкости ($K_{вн} = 0,01-0,1$). В зоне 2, где коэффициент виброползучести $K_{вн} \approx 0,8$, может распространяться на значительно большие расстояния 12–20 м. Используя эти данные можно в численной постановке прогнозировать дополнительные осадки, за счет задания зон грунтов с пониженными характеристиками в расчетной численной модели.

6. Используя уравнение виброползучести на основе теории Баркана Д.Д. и упругопластической модели Тимошенко С.П., можно определить величины относительных и сдвиговых деформаций в грунтовом основании, в зависимости от инженерно-геологических условий, действующих статических напряжений и интенсивности динамических напряжений (величины амплитуды виброскорости и виброускорения грунта) и определить конечную величину дополнительной осадки фундамента, вызванную вибропогружением/виброизвлечением шпунтовых свай.

7. Предложенные в работе методики в аналитической и численной постановке по расчету дополнительной осадки фундаментов, вызванной процессами вибропогружения и виброизвлечения шпунтовых свай имеют высокую сходимость и подтверждаются данными натурных наблюдений за осадками зданий окружающей застройки.

8. Разработаны рекомендации по снижению динамического воздействия в процессе виброизвлечения шпунтовых свай. Предложено производить размыкание шпунтовой стенки на отдельных участках (6–8 м), что снижает общее динамическое воздействие в сравнении с последовательным извлечением шпунтовых свай.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, включенных в перечень ВАК:

1. Мангушев Р.А. Численное моделирование ситуации возникновения дополнительных деформаций основания фундаментов объекта нового строительства при виброизвлечении шпунтовых свай / Р.А. Мангушев, **В.М. Полуниин** // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. – 2020. – № 4(47). – С. 36–39.

2. Мангушев Р.А. Учет влияния технологических осадок зданий окружающей застройки при устройстве шпунтовых ограждений соседних котлованов / Р.А. Мангушев, А.В. Гурский, **В.М. Полуниин** // Жилищное строительство. – 2020. – № 9. С. 9–19.

3. Мангушев Р.А. Оценка динамического воздействия от вибропогружения шпунтовых свай на здания окружающей застройки в условиях слабых водонасыщенных грунтов/ Р.А. Мангушев, А.В. Гурский, **В.М. Полуниин** // Construction and Geotechnics. – 2020. – № 3. – С. 102–116.

4. **Полуниин В.М.** Результаты вибромониторинга при вибропогружении и виброизвлечении шпунтовых свай/ В.М. Полуниин, И.К. Лобов, Д.В. Пеньков // Construction and Geotechnics. – 2021. – № 1. – С. 5–12.

5. **Полуниин В.М.** Изменение прочностных параметров дисперсных грунтов после высокочастотного вибрирования/ В.М. Полуниин, А.П. Черемхина // Construction and Geotechnics. – 2021. – № 1. – С. 46–56.

6. **Полуниин В.М.** Численное моделирование процесса высокочастотного виброизвлечения шпунтовых свай в условиях водонасыщенных пылевато-песчаных и пылевато-глинистых грунтов / В.М. Полуниин, И.К. Лобов, А.В. Гурский // Вестник гражданских инженеров. – 2021. – № 2(85). – С. 94–101.

7. **Полуниин В.М.** Экспериментальная оценка эффективности размыкания шпунтовой стенки при виброизвлечении шпунтовых свай / В.М. Полуниин // Вестник гражданских инженеров. – 2021. – № 3(86). – С. 100–107.

8. Мангушев Р.А., Деформации виброползучести водонасыщенных грунтов в процессе высокочастотного динамического воздействия/ И.П. Дьяконов, **В.М. Полуниин**, М.Р. Горкина //Жилищное строительство. – 2022. – № 3. – С. 45–55.

9. **Полуниин В.М.** Прогноз дополнительных деформаций зданий и сооружений в процессе высокочастотного вибрирования шпунтовых свай / Полуниин В.М. // Вестник гражданских инженеров. – №. 2 – 2022. С. 74–82.

Публикации в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования Scopus и Web of Science

10. Бояринцев А.В. Влияние вибропогружение шпунта на ранее выполненные буронабивные сваи / Бояринцев А.В., Мангушев Р.А., Зайцев М.А., Зуев И.Н., **Полуниин В.М.** // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2021. – № 5. – С. 14–21.

Статьи в других печатных изданиях

11. Mangushev R.A. Influence predicting of vibro-immersion and vibration removal of sheet piles on additional deformations of new construction object (Оценка влияния вибропогружения и виброизвлечения шпунтовых свай на дополнительные осадки объекта нового строительства) / Nikitina N.S., **Polunin V.M.** // Reconstruction and Restoration of Architectural Heritage, London: CRC Press, 2020

Компьютерная верстка *М. В. Смирновой*

Подписано к печати 20.09.2022. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,5. Тираж 120 экз. Заказ 104.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А.