

На правах рукописи



Панкина Мария Вячеславовна

**НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРУЕМОЕ СОСТОЯНИЕ
ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ СВАЙ
В ПРОБИТЫХ СКВАЖИНАХ С УШИРЕНИЕМ**

Специальность 2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пенза – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства».

Научный руководитель: академик РААСН,
доктор технических наук, профессор
Ильичев Вячеслав Александрович
Официальные оппоненты: **Готман Альфред Леонидович**,
доктор технических наук, профессор,
НИИОСП им. Н.М. Герсевича
АО «НИЦ Строительство», г. Москва,
главный специалист экспертно-аналитического отдела;
Городнова Елена Владимировна,
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Петербургский
государственный университет путей
сообщения Императора Александра I»,
доцент кафедры «Строительство дорог
транспортного комплекса»;
Ведущая организация: **ФГАОУ ВО «Пермский национальный
исследовательский политехнический
университет»**

Защита диссертации состоится «21» октября 2025 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 главного корпуса). Тел./Факс: (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 официальном сайте:
<https://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/pankina-mariya-vyacheslavovna>

Автореферат разослан «19» июня 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.380.04
доктор технических наук, доцент



А. Н. Гайдо

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Одной из серьезных проблем современного фундаментостроения является выбор варианта фундамента при строительстве зданий высокой этажности, когда в пределах пятна застройки давление под проекцией здания превышает порядка 500,0 кПа, и производственных сооружений со значительными нагрузками на фундаменты. Важной мерой в достижении целей снижения сметной стоимости и сокращения сроков строительства с обеспечением достаточной надежности основания является тенденция создания и внедрения в практику строительства прогрессивных и экономичных конструкций свайных фундаментов. Если учесть, что для застройки отводятся все более неблагоприятные территории с позиции грунтовых условий, то довольно часто возникает необходимость применения свай, способных воспринимать значимые нагрузки порядка 1 000,0 кН и более.

В последние годы успешно развиваются технологии устройства набивных свай, сопровождающиеся не извлечением, а вытеснением грунта с формированием уплотненной околосвайной области. К их числу можно отнести сваи в пробитых скважинах с уширением. Устройство указанных свай включает пробивку скважины тяжелыми трамбовками с формированием уширения из щебня путем втрамбовывания последнего в забой скважины. Нагрузки от надземной части здания передаются сваей в пробитой скважине с уширением вначале на уплотненный слой грунта, а затем на грунты природного сложения. Особенностью сваи в пробитой скважине с уширением является уширенная пятая, обуславливающая повышение несущей способности сваи, и уплотненный малосжимаемый массив грунта под уширением, в котором реализуется значительная часть вертикальных напряжений, что способствует уменьшению расчетных осадок фундамента.

В широком диапазоне грунтовых условий рассматриваемые сваи конкурентоспособны по сравнению с традиционными забивными, буровыми и буронабивными сваями. Указанное подтверждает актуальность разработки методов расчета и проектирования, позволяющих повышать надежность применения свай в пробитых скважинах с уширением.

Степень разработанности темы исследования. В разное время развитию способов глубинного уплотнения основания и исследованию изменений напряженно-деформируемого состояния грунта при устройстве свайных фундаментов посвятили свои научно-исследовательские работы: А. А. Бартоломей, Б. В. Бахолдин, А. Н. Богомолов, Г. Г. Болдырев, Я. Д. Гильман, В. Н. Голубков, А. Л. Готман, Н. З. Готман, Б. И. Далматов, Е. К. Егоров, В. В. Знаменский, В. А. Ильичев, П. А. Коновалов, В. И. Крутов, В. Г. Когай, С. Г. Кушнер, А. А. Луга, В. В. Лушников, Р. А. Мангушев, Л. В. Нуждин, М. Л. Нуждин,

И. М. Омельчак, А. И. Осокин, В. П. Петрухин, А. И. Полищук, А. Б. Пономарев, Я. А. Пронозин, Е. А. Сорочан, А. З. Тер-Мартirosян, В. М. Улицкий, С. Б. Ухов, В. Г. Федоровский, О. А. Шулятьев, Н. Brandl, M. Bustamante, W. Cambefort, K. Elson, K. Fleming, A. Weltman и др.

Методы расчета осадок свай в нелинейной постановке и во времени с учетом реологии грунтов разрабатывались В. Г. Березанцевым, А. А. Григорян, Ю. К. Зарецким, Ю. И. Ковалевым, М. В. Мальшевым, Г. Г. Меергофом, Н. С. Никифоровой, Н. В. Орнатским, З. Г. Тер-Мартirosяном, Д. М. Шапиро, В. Bronse, E. E. Debeer, L. Decourt, J. B. Hansen, K. Terzaghi, A. S. Vesic и др. В работах перечисленных авторов рассматриваются различные схемы разрушения основания в предельном состоянии. Проблематикой методов расчета с учетом нелинейности является нахождение и математическое описание областей предельного равновесия и факторов разрушения основания.

Значительный вклад в развитие прогрессивного направления устройства фундаментов в вытрамбованных котлованах и в выштампованном ложе, фундаментов из набивных свай в пробитых и раскатанных скважинах внесли работы И. С. Арутюнова, Ю. Л. Винникова, Н. Л. Зоценко, В. С. Глухова, А. Л. Готмана, А. С. Ковалева, В. К. Когаля, В. И. Крутова, И. К. Попсуенко, А. Н. Саурин, Ю. М. Шеменкова.

Рассмотрены методы расчета свай переменного сечения по длине сечения. Их разработке посвящены научные исследования Б. В. Бахолдина, И. А. Бокова, В. Н. Голубкова, А. Л. Готмана, В. Г. Федоровского, В. М. Шаевича и др. Особенностью этих методов является учет нормального сопротивления грунта на боковой наклонной поверхности свай.

С 1990 года специалистами кафедры «Геотехника и дорожное строительство» Пензенского государственного университета архитектуры и строительства осуществляется научное сопровождение и практическое внедрение технологии устройства свай в пробитых скважинах с уширением. Накопленный значительный опыт, включающий результаты испытаний и практику строительства более чем на 500 объектах, свидетельствует о возможности применения свай в пробитых скважинах с уширением в широком диапазоне грунтовых условий, в водонасыщенных глинистых и песчаных грунтах. Максимальная нагрузка на сваю в реализованных проектах достигала 3 700,0 кН

Цель исследования: оценка напряженно-деформируемого состояния грунтового основания свай в пробитых скважинах с уширением и разработка метода расчета осадки с учетом уплотненной зоны грунта под уширением.

Задачи исследования:

1. Анализ технологических и конструктивных особенностей устройства сваи в пробитой скважине с уширением, определяющих напряженно-деформируемое состояние основания.

2. Экспериментальное исследование в лабораторных условиях взаимодействия модели сваи в пробитой скважине с уширением и грунтового снования.

3. Обоснование методик оценки несущей способности сваи в пробитой скважине с уширением с различными типами уширения с учетом результатов полевых испытаний.

4. Разработка метода аналитического расчета сваи в пробитой скважине с уширением с учетом нелинейной работы основания и реологических свойств грунта.

Объект исследования: грунтовое основание при устройстве свай в пробитых скважинах с уширением.

Предмет исследования: форма и размеры сваи в пробитой скважине с уширением; закономерности работы грунтового основания при различных видах устраиваемого уширения сваи в пробитой скважине с уширением и схемах расположения свай.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. По результатам модельных лабораторных испытаний дана качественная оценка характера формирования уширения сваи в пробитой скважине и уплотненной зоны грунта.

2. По данным крупномасштабных натурных испытаний установлена необходимость уменьшения коэффициента надежности γ_n для определения расчетно-допускаемой нагрузки на сваю в пробитой скважине с уширением при оценке несущей способности расчетным методом.

3. Разработан и обоснован метод расчета осадки сваи в пробитой скважине с уширением с учетом нелинейности, способствующий повышению точности решения инженерных задач второй группы предельных состояний.

4. Обоснован прогноз осадки сваи в пробитой скважине с уширением во времени с учетом первичной и вторичной консолидаций грунта для обеспечения относительно равномерных осадок участков здания в процессе строительства.

5. На основании полевых экспериментов предложена и обоснована методика динамического контроля достижения сваей требуемой несущей способности, позволяющая регулировать объем и вид формируемого уширения.

Теоретическая значимость работы заключается в изложении новых научно обоснованных технологических решений и методики расчета перспективного типа свай в пробитых скважинах с уширением при строительстве объектов промышленного и гражданского назначения.

Практическая значимость диссертационной работы. Исследование напряженно-деформируемого состояния грунтового основания свай в пробитых скважинах с уширением позволяет:

- контролировать несущую способность сваи в пробитой скважине с уширением на этапе завершения формирования уширения;
- устраивать двухуровневое уширение с целью повышения несущей способности и уменьшения расчетных осадок сваи в пробитой скважине с уширением;
- наиболее достоверно прогнозировать развитие осадок с учетом нелинейности и во времени.

Результаты исследований реализованы при проектировании ряда объектов, в том числе: фундаментов силосов цементного завода в п. Комсомольском Чамзинского района респ. Мордовии; 16-этажного жилого дома по ул. Автостроителей в г. Тольятти; разноэтажного (от 9 до 23 этажей) жилого комплекса по ул. Молодогвардейской в г. Москве. Объем выполненных работ с применением указанных фундаментов составил более 110,0 млн руб. с экономическим эффектом порядка 21,0 млн руб.

Методология и методы исследований:

1. Обзор и анализ литературных и производственных данных по исследованию, проектированию и устройству свайных фундаментов в пробитых скважинах с уширением.
2. Численное моделирование напряженно-деформируемого состояния системы «свая – уширение – грунт».
3. Лабораторное испытание модели системы «свая в пробитой скважине с уширением – грунт».
4. Теоретическое исследование на основе аналитического решения расчета осадки сваи в пробитой скважине с уширением в зависимости от геометрических параметров фундамента и грунтовых условий.
5. Полевые исследования грунтового массива свай в пробитых скважинах с уширением методами статического испытания грунта сваями вертикальной вдавливающей нагрузкой, статического зондирования и геотехнического мониторинга.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты лабораторных и натурных экспериментов по устройству свай в пробитых скважинах с уширением и созданию уширения из жесткого грунтового материала установленной формы.
2. Результаты численного и аналитических исследований по выявлению закономерностей изменения деформационного состояния основания в зависимости от геометрических параметров сваи в пробитой скважине с уширением и при различных схемах расположения свай.

3. Способы уменьшения осадок свай путем создания многоуровневого уширения.

4. Методы расчета осадки свай в пробитых скважинах с уширением с учетом нелинейности и во времени.

Область исследований соответствует паспорту научной специальности 2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения по пункту 11 «Создание новых инженерных методов преобразования и улучшения грунтов оснований для повышения несущей способности оснований зданий и сооружений и снижения их деформаций (уплотнением, закреплением, армированием, замораживанием и др.); пункту 15 «Экспериментальные исследования, направленные на изучение процессов взаимодействия фундаментов и грунтового основания, с целью выявления новых особенностей такого взаимодействия, оценки эффективности новых конструкций фундаментов, обоснования расчетно-теоретических моделей грунтового основания и численных решений геотехнических задач».

Степень достоверности результатов исследования подтверждается применением основных положений механики грунтов, теории линейно деформируемой среды; обеспечивается данными значительного числа экспериментов, выполненных в лабораторных и полевых условиях, результатами мониторинга за техническим состоянием зданий и сооружений в процессе и после выполнения работ по устройству свай в пробитых скважинах с уширением, достаточной сходимостью результатов экспериментов и аналитических расчетов.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях и симпозиумах: заседание международной российско-американской рабочей группы РОМГГиФ и Геотехнического общества США ASCE G-I (г. Сан-Франциско, США, 2012); российская научно-техническая конференция «Инновационные конструкции и технологии в фундаментостроении и геотехнике» (г. Липецк, 2013); международная научно-техническая конференция «Современные теоретические и практические вопросы геотехники» (г. Санкт-Петербург, 2014, 2019, 2021, 2024); международная научно-практическая молодежная конференция по геотехнике GeoGames (г. Москва, 2016, 2019, г. Тюмень, 2018); всероссийская конференция с международным участием «Фундаменты глубокого заложения и проблемы геотехники территорий» (г. Пермь, 2021, 2024); IV международная научно-техническая конференция «Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении» (г. Новочеркасск, 2022).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач работы; выполнении, обработке и анализе результатов лабораторных и полевых

экспериментов, численных исследований по оценке напряженно-деформируемого состояния основания свай в пробитых скважинах с уширением; разработке и обосновании метода расчета осадки сваи в пробитых скважинах с уширением с учетом нелинейности и во времени; разработке методов уменьшения деформаций грунтового основания при совместной работе со сваями в пробитых скважинах с уширением .

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 12 научных работах, в том числе четыре статьи – в рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, одна статья – в рецензируемом научном издании, индексируемом в международной базе данных и системе цитирования Scopus.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (145 наименований) и шести приложений (15 страниц). Работа изложена на 192 страницах машинописного текста, содержит 72 рисунка и 18 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, изложены основные положения, выносимые на защиту, определен личный вклад соискателя и представлены сведения об апробации работы.

В первой главе приведен анализ применения свай в пробитых скважинах с уширением в практике современного строительства. Рассмотрены особенности конструктивного решения и методы расчета свай в пробитой скважине с уширением (СПСУ).

Исследования последних лет позволяют считать указанные фундаменты наиболее рациональным решением для широкого диапазона грунтовых условий и весьма различных конструкций зданий и сооружений. СПСУ выполняются по технологии удлиненных фундаментов в вытрамбованных котлованах (ФВК). Конструкции ФВК наиболее эффективны и рекомендуются к применению в макропористых просадочных и глинистых грунтах с показателем текучести $I_L \leq 0,5$. В рамках расширения области рационального применения ФВК специалистами Пензенского университета архитектуры и строительства началось внедрение СПСУ.

СПСУ выполняются без выемки грунта путем пробивки скважины инвентарной трамбовкой на необходимую глубину с одновременным погружением обсадной трубы (рисунок 1). Для повышения несущей способности фундамента в забой скважины засыпается порциями жесткий грунтовой материал (щебень, гравий), который втрамбовывается в грунт, формируя уширение проектного объема. Характерной особенностью СПСУ является

образование вокруг боковых граней фундамента и под уширением уплотненной зоны грунта с улучшенными строительными характеристиками. При втрамбовывании щебня в забой скважины формируется практически несжимаемое уширение, которое принимается за единое целое с бетонным стволом сваи.

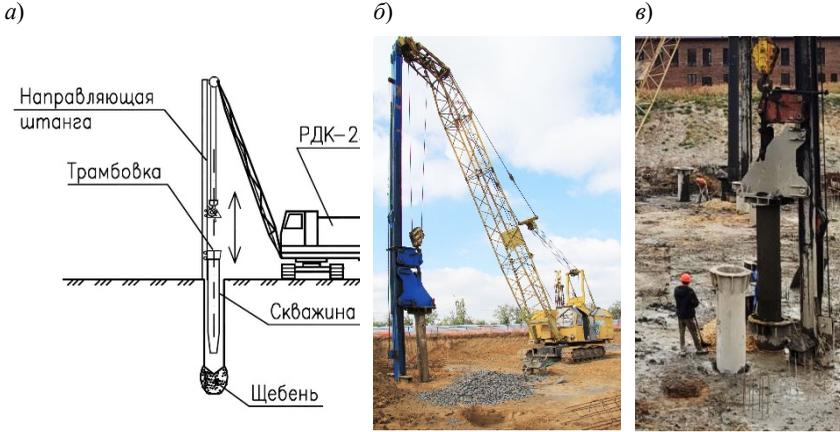


Рисунок 1 – Устройство сваи в пробитой скважине с уширением:

а – принципиальная схема; б – без обсадной трубы; в – с обсадной трубой

Расчетная несущая способность СПСУ определяется как сумма несущих способностей грунтового основания под нижней частью F_{dR} и вдоль боковой поверхности F_{df} сваи:

$$F_d = F_{dR} + F_{df}, \quad (1)$$

Несущая способность под нижней частью СПСУ принимается наименьшей из расчетов несущей способности жесткого материала уширения F_{dR1} , уплотненного грунта под уширением F_{dR2} или грунта естественного сложения, подстилающего уплотненную область грунта F_{dR3} (рисунок 2):

$$F_{dR1} = \gamma_c \gamma'_{cR} R_{щ} A, \quad (2)$$

$$F_{dR2} = \gamma_c \gamma''_{cR} R_{упл} A_y, \quad (3)$$

$$F_{dR3} = \gamma_c \gamma'''_{cR} R A_{упл}, \quad (4)$$

где $\gamma_c, \gamma'_{cR}, \gamma''_{cR}, \gamma'''_{cR}$ – коэффициенты условий работы сваи в грунте; $A, A_y, A_{упл}$ – площади поперечных сечений соответственно сваи, уширения из щебня и уплотненной области грунта, м²; $R_{щ}$ – расчетное сопротивление щебня, кПа; $R_{упл}$ – расчетное сопротивление уплотненного грунта под уширением, кПа, которое находится как для забивной сваи по таблице СП 24.13330.2021 «Свайные фундаменты» в зависимости от показателя текучести I_L глинистого грунта или крупности песка и глубины заложения

пяты уширения; R – расчетное сопротивление грунта природного сложения, подстилающего уплотненную зону, определяемое как для основания фундаментов мелкого заложения по СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений» в зависимости от прочностных характеристик грунта. Формулы для определения размеров уширения и уплотненной области грунта приведены в диссертации (параграф 1.3).

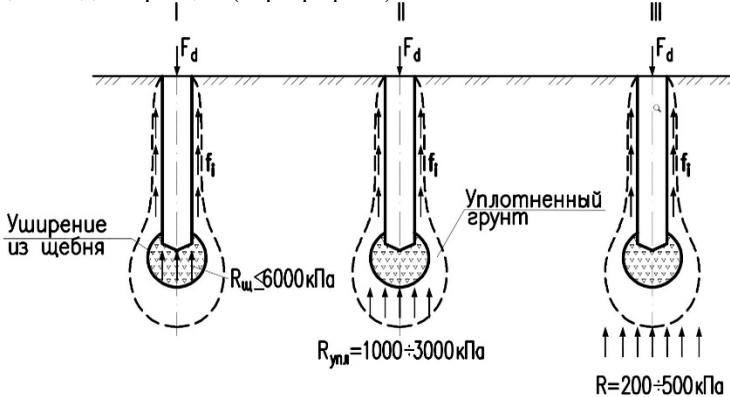


Рисунок 2 – Расчетная схема сваи в пробитой скважине с уширением:
 I – по материалу (щебню); II – по уплотненному слою;
 III – по грунту естественного сложения

Ударная технология устройства СПСУ и формирование уплотненной околосвайной зоны грунта позволяют при определении несущей способности сваи использовать таблицы СП 24.13330.2021 как для висячих свай, устраиваемых без выемки грунта. СПСУ обладают достаточно высокой несущей способностью: если в большинстве случаев забивные призматические сваи имеют несущую способность 500,0–700,0 кН, то несущая способность вышеуказанных свай составляет 2000,0–3000,0 кН.

Во второй главе представлены результаты лабораторного, полевого, аналитического и численного экспериментов, определяющих взаимодействие СПСУ с основанием. Исследования проводились для глинистого грунта с показателем текучести $I_L = 0,4–0,5$ характерного для региона Поволжья.

Лабораторный лотковый эксперимент. Целью выполнения эксперимента являлось определение качественного характера кинематических перемещений в грунтовом основании при изменении напряжено-деформированного состояния системы «тело сваи – уширение из жесткого материала – грунтовое основание» при устройстве СПСУ (рисунок 3). По результатам испытания определены форма и размеры устраиваемого уширения относи-

тельно тела сваи, выделена уплотненная зона грунта. По изолиниям перемещений подтверждается, что за несущую способность СПСУ следует считать преимущественно несущую способность уплотненного грунта под уширением и в меньшей степени сопротивление грунта вдоль боковой поверхности сваи.

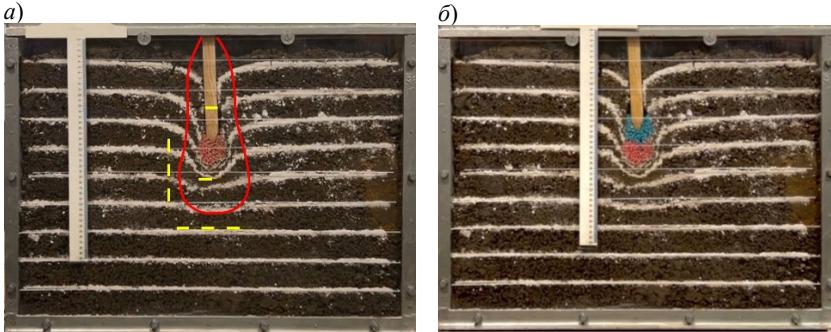


Рисунок 3 – Результаты лабораторного эксперимента: *а* – формирование уширения из жесткого материала; *б* – формирование двухуровневого уширения

Для уточнения фактических характеристик уплотненного грунта под уширением СПСУ проведены *полевые исследования грунта методом статического зондирования* после устройства сваи на площадке строительства складского цеха по ул. Новозаводской в Автозаводском районе г Тольятти. Диаметр зоны уплотнения определяется зондированием в двух направлениях по схеме рисунка 4. Данные получены в результате погружения зонда диаметром 36,0 мм через два отверстия диаметрами 90,0 мм, пробуренных в центре уширения из щебня (рисунок 5*а*), и в шести точках вдоль сваи и уширения (рисунок 5*б*).

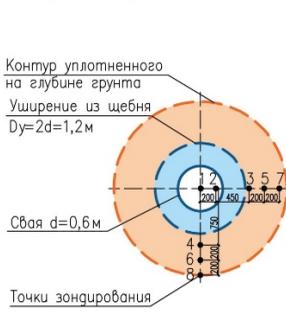


Рисунок 4 – Схема точек зондирования



Рисунок 5 – Фотофиксация зондирования грунта *а* – под уширением; *б* – вдоль сваи и уширения

По данным рисунка 6 выделены размеры уплотненной зоны по оси симметрии уширения на глубину порядка $h_y = 1,8D_y$, и по ширине порядка $D_{упл} = 2D_y$. Сопротивление уплотненного грунта под конусом зонда изменяется от 4200,0 до 6200,0 кПа, модуль деформации грунта – порядка 28,0–32,0 МПа. Указанное позволяет скорректировать расчетную схему СПСУ.

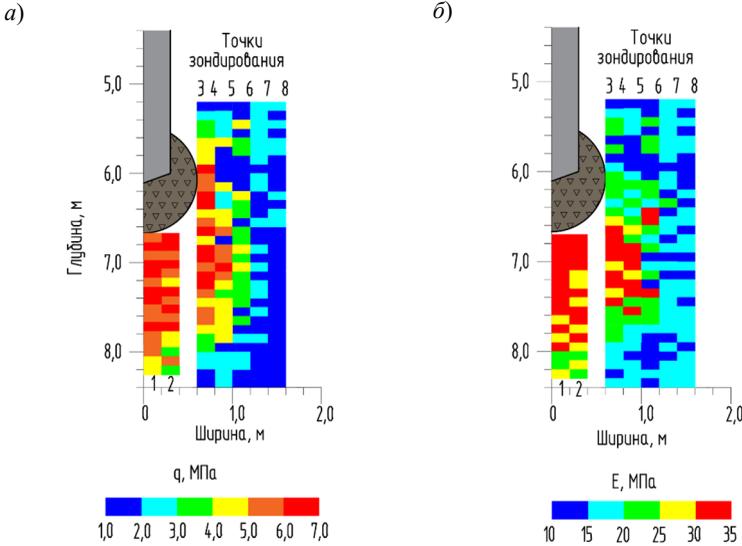


Рисунок 6 – Диаграмма распределения значений: *а* – удельного сопротивления грунта под конусом зонда q_s ; *б* – модуля деформации E грунта

В процессе натуральных исследований отрабатывались вопросы технологии устройства свай. Согласно ГОСТ 5686-2020 «Грунты. Методы полевых испытаний сваями» несущая способность сваи при нагружении статической нагрузкой зависит от точки срыва сваи или величины предельно-допускаемой осадки проектируемого объекта. Последняя, в свою очередь, зависит от конструктивных особенностей здания или сооружения. Известно, что согласно СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений» допускаемые осадки изменяются в диапазоне от 100,0 до 180,0 мм.

По результатам проведения *статических испытаний грунта* вертикальной вдавливающей нагрузкой (рисунок 7) определена несущая способность двух опытных СПСУ. По графикам (рисунок 8) сваи могут иметь несколько значений несущих способностей. К примеру, для СПСУ-1 при $S_{ил1} = 100,0$ мм $S = 100 \cdot 0,2 = 20,0$ мм $\rightarrow F_1 = 1\,200,0$ кН, а при $S_{ил2} = 180,0$ мм $S = 180 \cdot 0,2 = 36,0$ мм $\rightarrow F_2 = 1\,500,0$ кН. В данных исследованиях несущая способность принималась в зависимости от точки срыва сваи.



Рисунок 7 – Фрагмент статических испытаний СПСУ

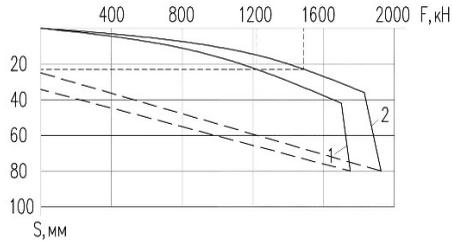


Рисунок 8 – Зависимость осадки сваи от нагрузки $S=f(F)$:
1 – свая СПСУ-1; 2 – свая СПСУ-2

По результатам статических испытаний еще девяти свай на четырех объектах строительства отмечается разница несущей способности свай в пробитой скважине с уширением по сравнению с расчетными значениями в пределах 18,0–24,0 %, что свидетельствует о наличии запаса прочности. Указанный запас еще значительнее, если учесть, что при проектировании вводится понятие расчетно-допускаемой нагрузки, получаемой с учетом различных коэффициентов надежности γ_n для разных методов определения несущей способности свай. С учетом анализа данных исследований предлагается снизить коэффициент надежности при определении расчетно-допускаемой нагрузки на СПСУ по расчетному методу с 1,4 до 1,3.

Для подтверждения проектной несущей способности СПСУ на площадке рекомендуется осуществлять динамический контроль на этапе завершения формирования уширения каждой сваи. Указанное выполняется путем сбрасывания трамбовки с заданной высоты и определения «отказа» сваи с помощью отказомера или нивелира. По результатам при необходимости корректируется объем уширения с учетом расчетного «отказа», определяемого из выражения, полученного при модернизации формулы Н. М. Герсееванова для определения несущей способности по результатам динамических испытаний свай применительно к условиям технологии устройства и характерным особенностям СПСУ:

$$S_k = \frac{E_d}{F_{dR} \left(\frac{E_d}{\eta A_{mp}} + 1 \right)}, \quad (5)$$

где F_{dR} – проектная несущая способность сваи, кН; η – коэффициент, учитывающий нелинейную зависимость несущей способности от «отказа», кН/м²; A_{mp} – площадь поперечного сечения трамбовки, м²; E_d – расчетная энергия удара трамбовки, кДж.

Численное моделирование напряженно-деформируемого состояния системы «свая – уширение из щебня – уплотненный грунт – основание естественного сложения» в программном комплексе *Plaxis 2D* выполнено с учетом результатов статического зондирования. При сравнении результатов численного моделирования и статических испытаний отмечается значительная разность кривых зависимостей осадки от нагрузки, что объясняется трудностями моделирования уплотненного грунта с улучшенными характеристиками (рисунок 9). Несущая способность численной модели СПСУ меньше реального значения в 1,2 раза, расчетно-допускаемая нагрузка на сваю – в 1,45 раза.

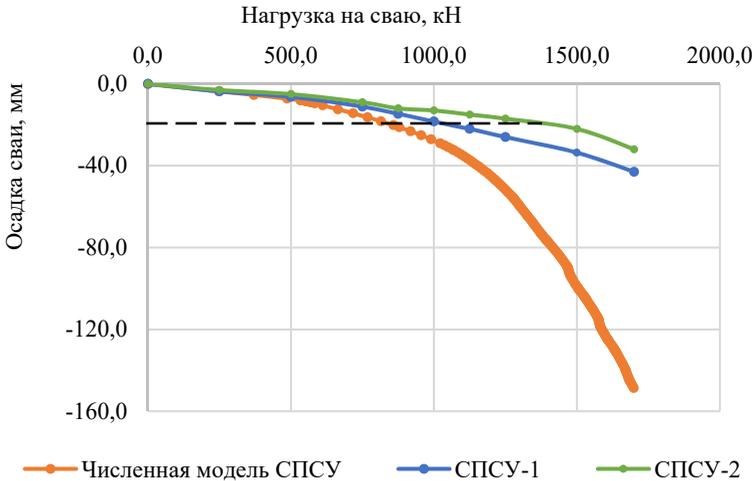


Рисунок 9 – График зависимости осадки СПСУ от нагрузки при численном моделировании и в ходе статических испытаний

Исследование позволило судить о перемещениях массива под торцом СПСУ, выявить зоны развития пластических деформаций с учетом роста нагрузки на фундамент (рисунок 10). Отмечается, что при нагрузке, соответствующей несущей способности, полученной по результатам статических испытаний, пластические точки развиваются в контуре уплотненной зоны (рисунок 10б), что стоит учитывать при расчете по второй группе предельных деформаций и рассчитывать осадку с учетом нелинейности.

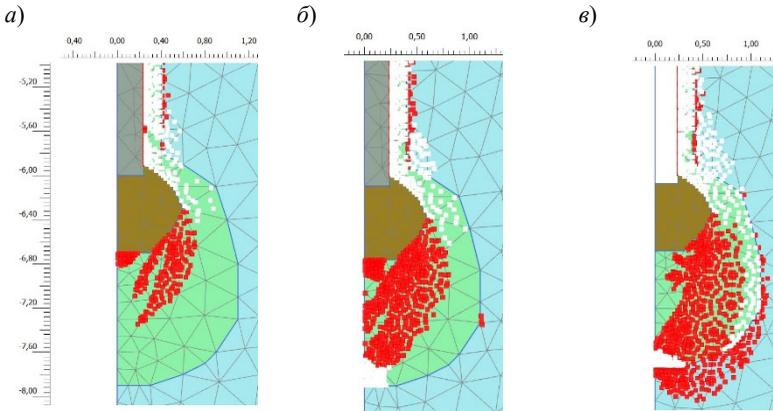


Рисунок 10 – Точки пластических деформаций основания СПСУ при нагрузке, равной значению несущей способности по результатам: *а* – численного моделирования; *б* – натурального статического испытания сваи; *в* – в точке срыва при статическом испытании

Выполнено сравнение работы сваи в пробитой скважине при наличии уширения из щебня и без него (рисунок 11). Срыв сваи без уширения произошел при нагрузке в 4,0 раза меньше несущей способности сваи с уширением по графику, что объясняется различием в 4,0 раза площади опирания торца сваи на грунт.

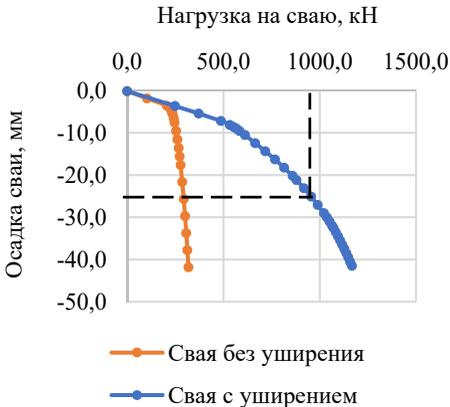


Рисунок 11 – График зависимости осадки сваи в пробитой скважине от нагрузки без уширения и при наличии уширения из щебня

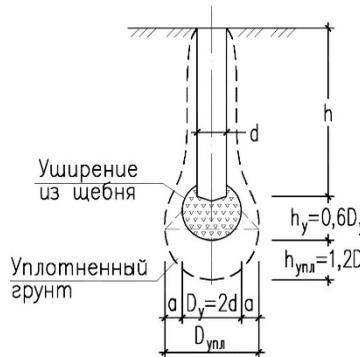


Рисунок 12 – Модернизированная схема расчета осадки свай СПСУ

Аналитические исследования вклада уширения в работу СПСУ по сравнению с боковой поверхностью сваи выявили зависимости осадки сваи от геометрических размеров уширения из жесткого материала и уплотненной зоны грунта. Разработаны рекомендации по выбору свай по длине, объемам втрамбованного щебня с учетом размеров устраиваемого уширения и уплотненной зоны грунта. На рисунке 12 представлена оптимизированная расчетная схема СПСУ.

В третьей главе изложены результаты аналитического исследования деформации грунтового основания СПСУ в зависимости от различных параметров и методы по уменьшению осадки сваи.

Для СПСУ характерно превышение площади сечения уширения в 3,0–5,0 раз по сравнению с площадью сечения ствола сваи, а также значительное расчетное давление порядка 1500,0–3000,0 кПа на грунтовое основание под подошвой уширения. Указанное обуславливает необходимость расчета осадки одиночной сваи и изучение деформаций грунта с учетом взаимовлияния свай. Выполнены расчеты ряда из трех свай ленточного свайного фундамента (рисунок 13). В настоящее время нормы ограничивают минимально допустимое расстояние между осями свай с условием от $3d$ до $6d$ (d – диаметр сваи). Для СПСУ указанный предел требует корректировки, так как значительная площадь уширения при расчете по деформациям дает существенный прирост осадки с учетом взаимовлияния. Расчеты показали, что с увеличением расстояния между сваями до $5d$ величина осадки с учетом влияния соседних свай стремится к осадке одиночной сваи, что в практических расчетах позволяет не учитывать взаимовлияние. Результаты сочетания параметров расстояния между осями свай и разница между глубиной заложения подошвы уширения позволили минимизировать различие осадок свай (рисунок 14) фундамента осадочного шва в практике реального проектирования объекта «Многоквартирный жилой дом переменной этажности в квартале 71 Центрального района г. Тольятти».

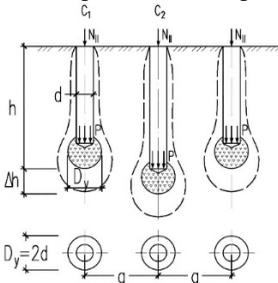


Рисунок 13 – Схема расчета осадки ряда свай

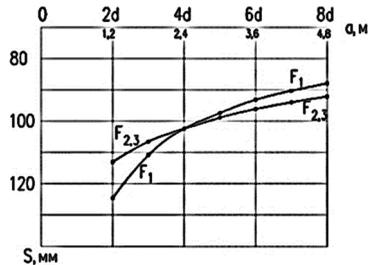


Рисунок 14 – Зависимость взаимовлияния на осадку от расстояния a при $\Delta h=2,0$ м:
 F_1 – средняя свая; $F_{2,3}$ – крайние сваи

На следующем этапе исследовалась деформация основания группы свай. На принципиальной схеме свайного поля, объединенного сплошной плитой, выделено три характерных сваи, осадки которых испытывают влияние различного количества соседних свай (рисунок 15). На осадку центральной сваи СПСУ-1 главным образом влияют восемь соседних свай, расположенных вокруг указанной. На осадку сваи СПСУ-2 – пять соседних свай, входящих в контур ростверка. Осадку сваи СПСУ-3 зависит от трех соседних свай.

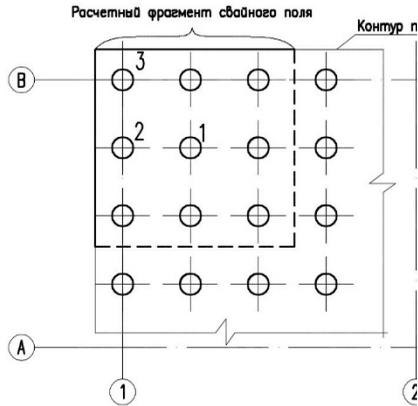


Рисунок 15 – Схема фрагмента свайного поля с характерным расположением свай

Получены следующие результаты расчетов осадки свай с учетом взаимовлияния: влияние соседних свай на СПСУ-1 превысило осадку одиночной сваи в 2,2 раза, на СПСУ-2 – в 1,7 раза, на СПСУ-3 – в 1,4 раза. Относительная разность осадок ($\Delta = \Delta S/L$) между СПСУ-1 и СПСУ-2 составила 0,014, что больше допустимого значения $\Delta_u = 0,003$ в 4,8 раза. Соответственно, $\Delta_{1-3} = 0,0017$ больше Δ_u в 5,6 раз. Потенциальное стремление к неравномерным деформациям обуславливает возникновение в ростверке существенных дополнительных усилий в виде изгибающих моментов и поперечных сил, что следует учитывать в расчетах. В случае применения СПСУ можно варьировать величину площади уширения, что меняет давление P под уширением и влияет на толщину активной зоны сжатия. Указанное позволяет регулировать расчетные осадки СПСУ. В практических расчетах по мере определения осадок каждой сваи с учетом взаимовлияния соседних рекомендуется задаваться соответствующими жесткостями основания свай и с учетом последних выполнять расчеты плитного ростверка и конструирование с обеспечением требуемого армирования.

В продолжение исследования свай разной длины по предложению автора запроектирован *разноуровневый фундамент* под силосы цементного завода ОАО «Мордовцемент» (рисунок 16). Свайное поле состоит из кустов по девять одинаковых свай двух видов – длиной по 5,0 м и 8,0 м. Кусты расположены в шахматном порядке с целью уменьшения осадки от взаимного влияния. Среднее давление под подошвой условного фундамента порядка 500,0 кПа.

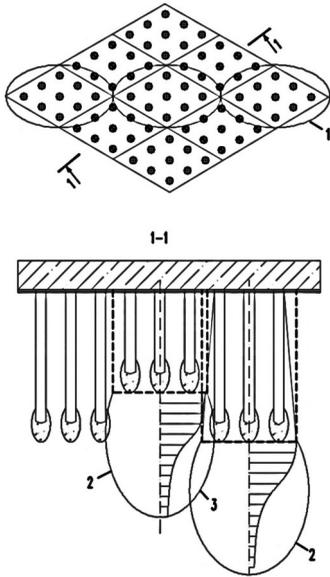


Рисунок 16 – Фрагмент схемы разноуровневых кустов СПСУ

Исследование осадки с учетом взаимовлияния разноуровневых кустов свай показывает, что влияние кустов свай одинаковой длины, расположенных по диагонали, быстро затухает в силу удаленности друг от друга, а влияние разноуровневых кустов свай незначительно при выбранном сочетании свай 5,0 м и 8,0 м (рисунок 17). Неравномерность осадок компенсирует заданный коэффициент жесткости при расчете монолитного ростверка.

Все известные методы устройства уширения с использованием щебня предусматривают создание уширения в одном уровне. Автором разработаны рекомендации по проектированию и методика расчета осадки при условии, что создается не одно, а *несколько уровней уширения* (рисунок 3б, рисунок 18). Указанное позволяет увеличить толщину высокомодульной активной зоны сжатия грунтового основания. Формирование уширения в трех уровнях достигается за счет того, что при пробивке скважины первый уровень уширения формируется ниже проектной отметки торца свай. После этого отметка засыпки щебня поднимается на заданный уровень и втрамбовывается щебень для второго уровня. Из графика (рисунок 19) следует, что осадка при одном кольце уширения значительно превышает

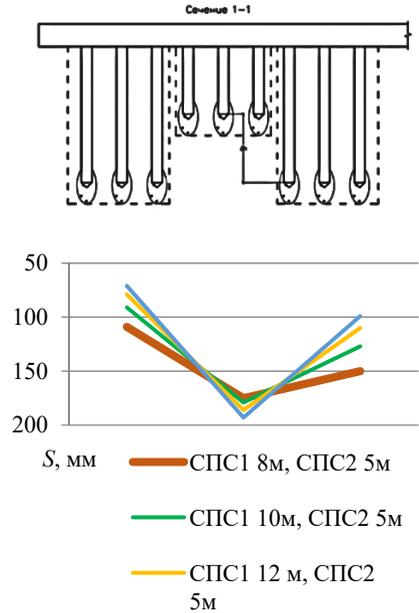


Рисунок 17 – Зависимость осадки разноуровневых кустов свай от разницы длины СПСУ

в большинстве случаев при определении осадок свай в пробитых скважинах с уширением имеет место условие $R_y < P < P_u \frac{\gamma_c}{\gamma_n}$. Здесь расчетное сопротивление R_y уплотненного основания под уширением определяется с учетом улучшенных характеристик грунта вследствие уплотнения. Предельное сопротивление уплотненного грунтового основания P_u и коэффициенты надежности γ_c и γ_n принимают согласно СП 22.13330.2016. Из известных способов определения осадок в нелинейной стадии работы грунта автором выделены три наиболее достоверных: методы Орнатского Н. В., Малышева М. В. и по рекомендациям СП 23.13330.2018 «Основания гидротехнических сооружений».

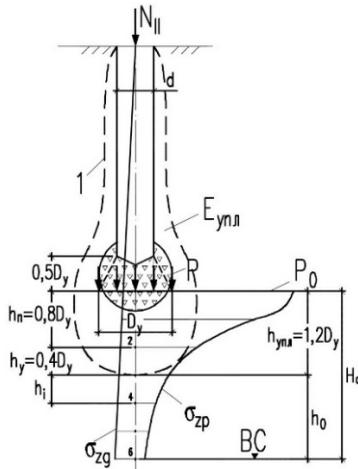


Рисунок 20 – Расчетная схема для определения осадки свай с учетом нелинейности: 1 – граница зоны уплотненного грунта

В целом при оценке деформации активной зоны сжатия грунтового основания СПСУ следует учитывать нелинейные деформации пластических зон грунтового основания под уширением, а также линейные деформации в пределах уплотненного основания и грунта природного сложения в пределах активной зоны сжатия основания. Автором предложена расчетная схема (рисунок 20) для определения осадки СПСУ с учетом нелинейных деформаций уплотненного грунтового основания $h_{упл}$ в пределах пластической области h_n , деформации основания с учетом эффекта уплотнения слоя толщиной h_y и сжатия слоя грунта h_0 естественного сложения в пределах активной зоны сжатия H_a . В указанной расчетной схеме принято, что предельное сопротивление P_u грунтового основания СПСУ соответствует развитию зон предельного равновесия (пластических зон) грунта на глубину $h_n = 0,8D_y$. Общая толщина уплотненного слоя составляет $h_{упл} = 1,2D_y$,

в пределах которого следует учитывать увеличение модуля деформации за счет эффекта уплотнения. Последний проявляется вследствие втрамбовывания щебня при формировании уширения. Ниже располагается слой грунта естественного сложения h_0 до нижней границы сжимаемой толщи BC .

В основе вышеуказанного метода Малышева М. В. лежит известная формула по определению коэффициента нелинейности K_n . Учитывая, что зоны предельного равновесия (пластические зоны) при условии $P = P_u$ развиваются на глубину не более $h_n < D_y$, осадку с учетом нелинейности предлагается определять из модернизированной формулы Малышева М. В с учетом уширения:

$$S = S_R K_n + S_a, \quad (6)$$

где S_R – осадка от давления $P = R$ в пределах развития пластических зон толщиной h_n ; S_a – осадка от давления $P = R$, определяемая как деформации активной зоны сжатия уплотненного слоя толщиной $h_y = 0,4D_y$ с учетом модуля деформации уплотненного грунта и основания естественного сложения h_0 . Формула для определения коэффициента нелинейности K_n приведена в диссертации (параграф 3.1). Учет нелинейности ведет к увеличению расчетной осадки СПСУ в 1,3–1,6 раза и позволяет наиболее достоверно оценить деформации грунтового основания, повышая надежность расчетов.

Учет осадок во времени для СПСУ достаточно актуален, так как при давлении под уширением порядка 1 000,0–2 000,0 кПа активная зона сжатия, к примеру, для диаметра уширения $D_y = 1,2$ м составляет 4,0–6,0 м. Осадку происходит в результате объемного сжатия основания и деформаций сдвига скелета грунта по мере образования зон предельного равновесия. Общая осадка складывается из осадки вследствие фильтрационной консолидации $S_v(t)$ и ползучести скелета при сдвиге $S_\gamma(t)$:

$$S(t) = S_v(t) + S_\gamma(t). \quad (7)$$

Автор предлагает расчет первичной консолидации грунтового основания СПСУ выполнять с использованием комбинированной расчетной схемы (рисунок 20) грунтового основания в виде линейно деформируемого полупространства и в нелинейной постановке, в целом определяя конечную осадку методом послойного суммирования. Алгоритм расчета осадки во времени с учетом первичной консолидации апробирован на примере суглинка с показателем текучести $I_L = 0,4$ для двух случаев: при давлении под уширением на уплотненный слой грунта $P = 1\,000,0$ кПа и $P = 2\,000,0$ кПа. Принятые характеристики грунтов для обоих случаев приведены в таблице 1. Слой 1 до характерной точки 1 – с учетом пластических деформаций в пределах слоя толщиной $h_1 = 0,4D_y = 0,4$ м, модуль деформации принят с учетом нелинейности; слой 2 (точки 1–3) – уплотненный линейно-

деформируемый суглинок с толщиной слоя $h_2 = 0,8$ м, модуль деформации принят с учетом уплотнения; слой 3 – грунт природного сложения толщиной $h_3 = 2,0$ м в пределах точек 3–8.

Таблица 1 – Характеристики слоев грунта

Слой	Коэффициент пористости	Коэффициент фильтрации	Модуль деформации с учетом нелинейности	Коэффициент бокового расширения	Коэффициент относительной сжимаемости	Коэффициент консолидации
	e_0	k_f	E_n	β	m_v	C_{v1}
	д. ед.	м/сут	МПа		м ² /кН	м ² /сут
1	0,7	$0,6 \cdot 10^{-5}$	30,0	0,62	0,000035	0,17
2	0,6	$0,6 \cdot 10^{-5}$	20,0	0,5	0,00004	0,15
3	0,72	$1,5 \cdot 10^{-5}$	10,0	0,4	0,00007	0,21

Определено время осадки сваи t для различных стадий работы последней с учетом процесса фильтрационной консолидации (рисунок 21). Стабилизация деформаций грунтового основания СПСУ при давлении $P = 2\,000,0$ кПа происходит в относительно короткий период порядка 80,0 суток, что на практике должно соответствовать периоду возведения строительных конструкций надземной части здания. Расчет осадки во времени позволяет регулировать сроки ведения строительных мероприятий с учетом условий обеспечения относительно равномерных осадок всех участков здания.

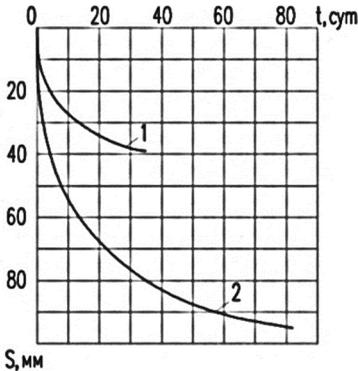


Рисунок 21 – Зависимость осадки S (мм) от времени t (сут) с учетом первичной консолидации при давлении под уширением сваи:
1 – $P = 1\,000,0$ кПа;
2 – $P = 2\,000,0$ кПа

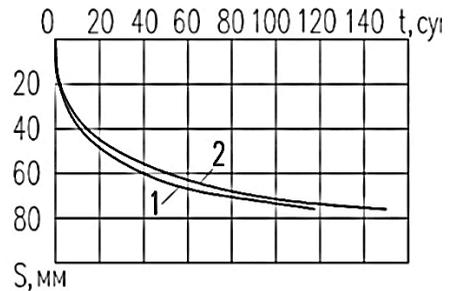


Рисунок 22 – График осадки во времени с учетом: 1 – первичной (фильтрационной) консолидации; 2 – вторичной консолидации (ползучести скелета грунта)

В глинистых грунтах тугопластичной и твердой консистенции добавляется процесс ползучести грунтового основания, обусловленный степенью водонасыщения грунтов и малой скоростью фильтрации воды. Указанное тем существеннее влияет на развитие осадок во времени, чем больше давление на грунт. Продолжительность деформаций грунтового основания СПСУ с учетом вторичной консолидации грунта составляет 150,0 суток, что существенно превышает период стабилизации деформаций с учетом только первичной консолидации (рисунок 22). Весьма значительное влияние на время стабилизации осадок СПСУ оказывает толщина h активной зоны сжатия. Последняя зависит от ряда факторов, таких, как давление P под подошвой уширения, диаметр уширения и модуль деформации грунтового основания. В рамках данного исследования толщина активной зоны сжатия грунта при расчете осадок СПСУ изменялась в диапазоне $h_a = 2,8-4,0$ м. Зависимость $t = f(h_a)$ носит криволинейный характер изменения приращения t по мере увеличения толщины h_a активной зоны сжатия. Следует отметить, что при увеличении h_a на 1,2 м время уплотнения грунтового основания СПСУ увеличивается с 45,0 до 92,0 суток, что весьма существенно.

В четвертой главе приведена апробация результатов научных исследований на примере ряда объектов. При проектировании, исходя из конструктивных особенностей объектов и грунтовых условий площадок строительства, оптимизировались варианты свай в пробитых скважинах с уширением (СПСУ).

Для уменьшения осадок в фундаментах под силосы цементного завода ОАО «Мордовцемент» применялись СПСУ длиной 5,0 и 8,0 м с разноуровневым расположением уширений (рисунок 16), что позволило уменьшить расчетную осадку в 1,8 раза. Общее количество свай составило 816 шт. Суммарная расчетная нагрузка на свайное поле порядка 1 750 000,0 кН.

При устройстве фундаментов жилого комплекса по ул. Молодогвардейской в г. Москве с целью обеспечения требования по допустимым деформациям основания СПСУ выполнялись с многоуровневым уширением (рисунок 18). По мере завершения формирования указанного уширения выполнялся динамический контроль каждой из 760 свай.

Фундаменты жилого дома в г. Тольятти запроектированы на свайных фундаментах (рисунок 13) с разной глубиной заложения подошвы уширения из условия работы СПСУ как одиночных свай. Исследование взаимовлияния свай на осадки за счет соответствующего расположения последних в плане позволило уменьшить расчетные осадки до допустимых значений с учетом конструктивных особенностей надфундаментной части объекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Многолетний опыт использования свай в пробитых скважинах с уширением подтверждает, что сваи с эффектом глубинного уплотнения грунта следует отнести к одним из перспективных видов свай, применение которых можно рекомендовать в широком диапазоне грунтовых условий, в том числе при строительстве на лессовых просадочных и насыпных грунтах. Сравнительный анализ данных натурных испытаний свай и расчетов сваи в пробитой скважине с уширением указывает на различие значений несущих способностей в пределах 18,0–24,0 % и существенное занижение расчетных осадок. Указанное свидетельствует о необходимости совершенствования расчетных методов.

2. По результатам анализа технологических и конструктивных особенностей устройства сваи в пробитой скважине с уширением установлено, что вклад уширения в общую несущую способность сваи является определяющим в обеспечении надежной работы фундамента. Последнее обусловлено повышением расчетного сопротивления в результате образования уплотненного слоя грунта под уширением и значительной площадью уширения. Даны рекомендации по выбору свай по длине с учетом размеров устраиваемого уширения и уплотнённой зоны грунта. В целом технология устройства сваи в пробитой скважине с уширением позволяет варьировать за счет диаметра уширения не только несущую способность сваи, но и осадку последней. Выявлены закономерности развития осадки сваи в пробитой скважине с уширением в зависимости от параметров уширения и уплотненной зоны грунта.

3. По результатам модельных лабораторных испытаний дана качественная оценка характера взаимодействия сваи в пробитой скважине с уширением и грунтового основания. Показаны этапы формирования уплотненной зоны грунта, одно- и двухуровневого уширения сваи в пробитой скважине с уширением. Обоснована расчетная схема сваи по деформациям грунтового основания с выделением пластических зон с учетом эффекта уплотнения и сжатия грунта естественного сложения в пределах нижней границы сжимаемой толщи. На основании картины характера разрушения грунтового основания под уширением для повышения надежности рекомендуется выполнять расчеты осадки в нелинейной постановке. Уточнены размеры уплотненной зоны грунта по результатам натурного испытания статическим зондированием.

4. Сравнение расчетных данных с результатами натурных испытаний позволило рекомендовать уменьшение коэффициента надежности γ_n до 1,3 для определения расчетно-допускаемой нагрузки на СПСУ при оценке несущей способности расчетным методом. Сопоставление результатов стати-

ческих и динамических испытаний положено в основу метода динамического контроля при устройстве каждой сваи на этапе завершения формирования уширения. сваи в пробитой скважине с уширением являются весьма ответственными конструкциями, так как в проектах несущая способность свай составляет порядка 1000,0–3000,0 кН. Предложена и обоснована методика достижения сваей требуемой несущей способности путем изменения объема щебня по результатам динамического контроля «отказа» каждой сваи.

5. На основании аналитических и экспериментальных исследований предложены инженерные методы уменьшения осадки СПСУ. Разработан метод расчета сваи в пробитой скважине с двух- и трехуровневым уширением. Подобный прием позволяет увеличить допускаемые нагрузки на сваи и толщину высокомодульной активной зоны сжатия грунтового основания. Разработаны рекомендации применения кустов со сваями разной длины. Увеличение разности длин свай до $4-5d$ ведет к тому, что осадка с учетом влияния соседних свай стремится к осадке одиночной сваи, т.к. напряжения под сваями меньшей длины затухают до возникновения напряжений под подошвой условного фундамента, состоящего из свай большей длины. Последнее практически позволяет не учитывать взаимовлияние при дальнейших расчетах. Осадка фундаментов различной длины на 25–40% меньше, чем в случаях проектирования одноуровневого фундамента, что в целом удовлетворяет требованиям расчета основания по деформациям в случаях значительной действующей нагрузки. В проекте разность осадок должна учитываться при назначении жесткости грунтового основания с учетом совместной работы ростверка и свай.

6. Разработан и обоснован метод аналитического расчета сваи в пробитой скважине с уширением с учетом нелинейной работы основания, который позволяет более достоверно определять деформации грунтового основания и способствует повышению надежности проектных решений. Предложена расчетная схема осадки сваи в пробитой скважине с уширением, где нелинейную деформацию грунта следует учитывать в пределах развития зон предельного равновесия (пластических зон). Предложен метод расчета осадок с учетом первичной и вторичной консолидаций. По результатам сравнения скорости протекания осадок во времени для грунтовых оснований естественного сложения и уплотненных установлено, что различие скорости осадок в несколько раз может привести к превышению допустимых разностей осадок. Поэтому при необходимости применения в пределах одного объекта разного типа свай в пробитых скважинах с уширением проектирование должно сопровождаться расчетом осадок во времени.

7. Выполненные исследования в рамках данной диссертации следует продолжить в направлении изучения взаимовлияния свай в пробитых скважинах с уширением в составе свайного поля и совершенствования технологии устройства двухуровневого уширения в водонасыщенных пылевато-глинистых грунтах. Формирование уширения, вытянутого по высоте, позволяет оказывать значительное влияние на расчетную осадку сваи, уменьшая значение последней. Важным вопросом исследований является определение реологических свойств грунта в пределах уплотненной зоны под уширением сваи.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в журналах, включенных в перечень ВАК

1. Глухов, В. С. Исследование влияния уширения свай в пробитых скважинах на осадку / В. С. Глухов, О. В. Хрянина, **М. В. Глухова (Панкина)** // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2011. – № 5–2(38). – С. 351а–354.
2. **Глухова (Панкина), М. В.** Исследование влияния плиты ростверка на осадку свай с уширением / М. В. Глухова (Панкина), В. С. Глухов, Ю. С. Галова // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2011. – № 5–2(38). – С. 360–363.
3. Глухов, В. С. Нелинейные деформации уплотненного грунтового основания под уширением свай в пробитых скважинах / В. С. Глухов, **М. В. Панкина** // Construction and Geotechnics. – 2023. – Т. 14, № 1. – С. 19–28.
4. **Панкина, М. В.** Осадки свай в пробитых скважинах с уширением с учетом фильтрационной консолидации / М. В. Панкина // Construction and Geotechnics. – 2024. – Т. 15, № 4. – С. 36–45.

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

5. Glukhov, V. S. Calculation of widened pile settlement with regard to nonlinearity / V. S. Glukhov, **M. V. Glukhova (Pankina)** // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – P. 012056. – DOI 10.1088/1742-6596/1928/1/012056.

Статьи в других печатных изданиях

6. Глухов, В. С. Выравнивание осадок свай с учетом взаимовлияния / В. С. Глухов, **М. В. Глухова (Панкина)**, Т. А. Исаева // Актуальные проблемы современного фундаментостроения с учетом энергосберегающих технологий: материалы IV международной научно-практической конференции. – Пенза: ПГУАС, 2014. – С. 32–37.
7. Глухов, В. С. Свайно-плитные фундаменты на комбинированном основании / В. С. Глухов, О. В. Хрянина, **М. В. Глухова (Панкина)** // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2014. – № 2. – С. 229–237.

8. Глухов, В. С. Деформации во времени уплотненной зоны основания свай с уширением / В. С. Глухов, **М. В. Глухова (Панкина)** // Актуальные проблемы современного фундаментостроения с учетом энергосберегающих технологий: материалы VI Всероссийской научно-практической конференции. – Пенза: ПГУАС, 2015. – С. 17–24.

9. Глухов, В. С. Исследование взаимовлияния свай с уширением на осадки / В. С. Глухов, **М. В. Глухова (Панкина)** // Вопросы проектирования и устройства надземных и подземных конструкций зданий и сооружений: Межвузовский тематический сборник трудов. – Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2018. – С. 104–109.

10. **Глухова (Панкина), М. В.** Пути оптимизации осадки свай в пробитых скважинах с уширением с учетом взаимовлияния / М. В. Глухова (Панкина), В. С. Глухов / IV Международная научно-практическая молодежная конференция по геотехнике: сборник материалов. – Тюмень: ТИУ, 2018. – С. 22–26.

11. **Глухова (Панкина), М. В.** Учет нелинейной деформации грунта при осадке свай в пробитых скважинах с уширением / М. В. Глухова (Панкина), В. С. Глухов // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. – 2019. – № 4(11). – С. 45–52.

12. Глухов, В.С. Формирование околосвайного грунтового основания / В.С. Глухов, **М.В. Панкина**, Ю.С. Вишнякова // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – №4(57). – С. 122–126.

Компьютерная верстка *В. С. Весниной*

Подписано к печати 29.05.2025. Формат 60×84 $\frac{1}{16}$. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,5. Тираж 120 экз. Заказ 63.

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

