

На правах рукописи



СЕМЁНОВ Иван Владимирович

**ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ОСАДОК
ФУНДАМЕНТОВ ПРИ ИХ УСИЛЕНИИ ИНЪЕКЦИОННЫМИ
СВАЯМИ ДЛЯ РЕКОНСТРУИРУЕМЫХ ЗДАНИЙ
В ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ**

Специальность 2.1.2. Основания и фундаменты,
подземные сооружения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина».

- Научный руководитель: **Полищук Анатолий Иванович**
доктор технических наук, профессор
- Официальные оппоненты: **Готман Альфред Леонидович**,
доктор технических наук, профессор,
НИИОСП им. Н.М. Герсеева
АО «НИЦ Строительство», г. Москва,
главный специалист экспертно-аналитического отдела;
- Осокин Анатолий Иванович**,
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ
ВО «Санкт-Петербургский
государственный архитектурно-строительный университет»,
заведующий кафедрой геотехники;
- Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Национальный
исследовательский Московский
государственный строительный
университет»**

Защита диссертации состоится «12» февраля 2026 г. в 14:00 на заседании Диссертационного совета 24.2.380.04 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, г. 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 сайте: <https://dis.spbgasu.ru/specialty/personal/semyonov-ivan-vladimirovich>.

Автореферат разослан «04» декабря 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.380.04
доктор технических наук, доцент



А. Н. Гайдо

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. При реконструкции зданий на фундаментах мелкого заложения довольно часто возникает необходимость их усиления. Одним из способов увеличения несущей способности фундаментов является изменение их схемы работы путем передачи части нагрузки от реконструируемого здания на инъекционные сваи. Образованный таким образом фундамент в здании *иногда называют комбинированным* (Петухов А. А., Филиппович А. А. и др., 2006–2014), который может быть отдельным (отдельно стоящим), ленточным или плитным. Под *инъекционными понимаются сваи*, которые формируются в предварительно подготовленных скважинах путем инъекции под давлением подвижной бетонной смеси с последующей опрессовкой системы «свая – грунт основания». При устройстве таких свай используются стальные перфорированные трубчатые инъекторы специальной конструкции, которые вдавливаются в грунт на заданную глубину. (Полищук А. И., Петухов А. А., Шалгинов Р. В. и др., 2006–2010). Если же скважина разбуривается с использованием шнекового или другого оборудования, то такие сваи называют *буроинъекционными* (например, конструкции «Titan» или «Атлант»). В диссертации отдельные результаты исследований относятся к оценке работы буроинъекционных свай, которые рассматривались как категория инъекционных. Это объясняется тем, что способ устройства ствола (тела) буроинъекционной сваи при прочих равных условиях аналогичен инъекционной свае.

К настоящему времени накоплен научно-практический опыт расчета, конструирования и устройства инъекционных свай для усиления фундаментов реконструируемых зданий. Выполнены исследования по оценке изменения свойств глинистых грунтов вокруг ствола инъекционных свай на этапе их устройства, предложены инженерные методы определения несущей способности одиночных инъекционных свай (в том числе конических), выявлены особенности перераспределения внешней нагрузки между элементами ленточного фундамента, усиливаемого инъекционными сваями. Однако до настоящего времени вопросы прогнозирования осадок усиливаемых фундаментов инъекционными сваями в глинистых грунтах исследованы пока недостаточно. Поэтому тема диссертационной работы является *актуальной*.

Степень разработанности темы. Вопросы усиления (проектирование и устройство) фундаментов мелкого заложения при помощи инъекционных свай для реконструируемых зданий исследовались как отечественными, так и зарубежными учеными: Бартоломей А. А., Бахолдин Б. В., Блащук Н. В., Богомоллов А. Н., Готман А. Л., Гусев Г. Н., Далматов Б. И., Джантимиров Х. А., Знаменский В. В., Коновалов П. А., Конюшков В. В., Мангушев Р. А., Мирошниченко Р. В., Мирсаяпов И. Т., Невзоров А. Л., Нуждин Л. В., Нуждин М. Л.,

Оржеховский Ю. Р., Осокин А. И., Парамонов В. Н., Петухов А. А., Полищук А. И., Пономарев А. Б., Пронозин Я. А., Самохвалов М. А., Сальный И. С., Тарасов А. А., Тер-Мартirosян А. З., Улицкий В. М., Федоровский В. Г., Филиппович А. А., Цытович Н. А., Шалгинов Р. В., Шашкин А. Г., Шулятьев О. А. и др. Анализ опубликованных статей указанных выше специалистов для условий реконструкции и восстановления зданий показывает, что в настоящее время накоплен практический опыт конструирования и устройства инъекционных свай для усиления фундаментов реконструируемых зданий. Выполнены исследования по определению несущей способности одиночных инъекционных свай в глинистых грунтах. Выявлены особенности перераспределения нагрузки между элементами ленточного фундамента, усиливаемого инъекционными сваями. Конструктивные решения и методы расчета осадок фундаментов, усиливаемых с применением инъекционных свай в глинистых грунтах, должного развития пока не получили.

Цель исследования заключалась в обосновании методов прогнозирования осадок усиливаемых фундаментов инъекционными сваями в условиях реконструкции зданий, обеспечивающих эффективное их применение в глинистых грунтах.

Задачи исследования:

1. Разработать и обосновать методику расчета системы одиночной инъекционной сваи («инъекционная свая – глинистый грунт») и отдельного фундамента, усиливаемого инъекционными сваями («фундамент – инъекционные сваи – глинистый грунт»).

2. Выполнить численное моделирование напряженно-деформированного состояния разработанных систем (одиночные инъекционные сваи и усиленные ими фундаменты мелкого заложения в разнотипных глинистых грунтах). Сопоставить результаты моделирования с данными натурных испытаний инъекционных свай.

3. Разработать метод к определению доли внешней нагрузки, перераспределяемой между элементами системы «подошва фундамента – инъекционные сваи».

4. Разработать методы расчета осадок одиночных инъекционных свай и осадок фундаментов мелкого заложения, усиливаемых инъекционными сваями в глинистых грунтах для условий реконструкции зданий.

5. Составить рекомендации по проектированию усиления фундаментов мелкого заложения (отдельных, ленточных) инъекционными сваями в глинистых грунтах и выполнить их практическую апробацию.

Объект исследования – инъекционная, буроинъекционная свая и усиливаемый фундамент с использованием таких свай в глинистых грунтах для реконструируемых зданий.

Предмет исследования – взаимодействие инъекционных, буроинъекционных свай и усиливаемого фундамента такими сваями с глинистым грунтом основания в условиях реконструкции зданий.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. Установлено **влияние геометрических параметров** системы «фундамент – инъекционные сваи – глинистый грунт» на перераспределение внешней нагрузки между его конструктивными элементами. Выявлено, что для квадратных в плане отдельных фундаментов (например, размером 1×1 м, 2×2 м и др.) изменение длины устраиваемых инъекционных свай от 3 до 9 м приводит к повышению доли внешних нагрузок, передаваемой на глинистый грунт основания сваями, с 23–52% до 59–82%.

2. Разработан **метод определения** значений доли внешней нагрузки, передаваемой на основные конструктивные элементы усиливаемого отдельного фундамента в глинистых грунтах. Метод основан на использовании эмпирического подхода, который позволяет вычислять давление по подошве отдельного фундамента, усиливаемого инъекционными сваями, после реконструкции здания при известных величинах давления по подошве фундамента до реконструкции здания и геометрических параметров усиливаемого фундамента.

3. Предложен **инженерный метод расчета** конечных осадок одиночных инъекционных свай в глинистом грунте, который учитывает линейную и нелинейную зависимости перемещения (осадки) сваи от прикладываемой внешней нагрузки, а также особенности способа устройства инъекционных свай.

4. Обоснован **инженерный метод расчета** конечных осадок усиливаемых фундаментов мелкого заложения (отдельных, ленточных) с применением инъекционных свай в глинистом грунте, который учитывает влияние конструктивных параметров и физико-механических свойств основания в околосвайном пространстве на их работу в условиях эксплуатации реконструируемого здания.

Теоретическая, практическая значимость работы и ее использование. *Теоретическая значимость* работы заключается в обосновании методики расчета системы «инъекционные сваи – глинистый грунт» в составе усиливаемых фундаментов; в разработке инженерного метода расчета их осадок для реконструируемых зданий.

Практическая значимость работы заключается в разработке инженерных методов расчета осадок и рекомендаций по проектированию усиления фундаментов инъекционными, буроинъекционными сваями в глинистых грунтах, которые использованы:

– при подготовке документации «Обследование зданий при разработке проектно-сметной документации на реконструкцию объектов биофабрики

федерального казенного предприятия «Армавирская биологическая фабрика». Здание клиники №5» (авторы: Семёнов И. В. и др.; г. Краснодар, ООО «БауПроект», 2023);

– при подготовке монографии «Усиление фундаментов инъекционными сваями при реконструкции зданий» (Семёнов И. В. и др.; М., Издательство АСВ, 2023, 212 с.) для специалистов проектных и строительных организаций;

– при подготовке научно-практического пособия «Фундаменты мелкого заложения для многоэтажных зданий» (Семёнов И. В. и др.; М., Издательство АСВ, 2019. – 214 с.) и использования его материалов предприятием ООО «БауПроект» в 2019–2024 гг.;

– в учебном процессе кафедры оснований и фундаментов Кубанского ГАУ (подготовка ВКР студентами-магистрантами по направлению подготовки 08.04.01 «Строительство»; чтение лекций по дисциплине «Проектирование оснований и фундаментов реконструируемых зданий» и «Основания и фундаменты сооружений»);

– при подаче заявок на получение грантов в конкурсах научных проектов различных уровней, в том числе губернаторский конкурс молодых инновационных проектов «Премия IQ года» (2019, лауреат – Семёнов И. В., 2-е место).

Методология и методы исследований. Теоретические методы исследований заключались в выполнении численного моделирования работы инъекционных свай и фундаментов, усиливаемых инъекционными сваями, в глинистых грунтах различной разновидности. Разрабатывались инженерный метод расчета осадок одиночных инъекционных свай и метод прогнозирования осадок фундаментов, усиливаемых инъекционными сваями, в глинистых грунтах для реконструируемых зданий. В рамках экспериментальных методов исследований анализировались результаты испытаний натуральных одиночных инъекционных свай в глинистых грунтах, а также данные о мониторинге осадок усиливаемых фундаментов буроинъекционными сваями. Результаты теоретических исследований сопоставлялись с экспериментальными данными.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика и результаты компьютерного моделирования работы инъекционных одиночных свай и отдельных усиливаемых фундаментов инъекционными сваями в глинистых грунтах.

2. Инженерный метод расчета конечных осадок одиночных инъекционных свай в глинистых грунтах.

3. Инженерный метод расчета конечных осадок усиливаемых фундаментов инъекционными сваями в глинистых грунтах для реконструируемых зданий.

4. Рекомендации по проектированию усиливаемых фундаментов инъекционными сваями в глинистых грунтах для реконструируемых зданий.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертация соответствует п. 7 паспорта научной специальности 2.1.2 – Основания и фундаменты, подземные сооружения.

Степень достоверности результатов исследований подтверждена использованием современных представлений о механике грунтов и численном моделировании. В работе использованы сертифицированные и верифицированные программные продукты, реализующие метод конечных элементов (МКЭ), а также известные методы математической обработки полученных результатов. Результаты теоретических исследований сопоставлялись с экспериментальными данными.

Апробация результатов исследования. Основные положения диссертации доложены и обсуждены на 11 российских и международных конференциях различного уровня, проводившихся в городах: Воронеж (2019); Кисловодск (2019); Краснодар (2015–2025); Новочеркасск (2018, 2022); Пермь (2024); Тюмень (2018).

Публикации. Основные материалы диссертационных исследований опубликованы в 2 монографиях, 1 справочнике геотехника, 1 научно-практическом пособии, 24 научных статьях и 4 патентах РФ на изобретения. Из числа опубликованных статей 5 – в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 6 – в источниках, индексируемых международными базами данных Scopus и Web of Science.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена общая характеристика работы. Обоснована актуальность темы диссертационной работы с учетом сведений об инъекционных сваях и их использовании для усиления фундаментов. Определены цель, задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Представлена достоверность полученных результатов исследований, а также положения, выносимые на защиту.

В первом разделе представлена информация о существующих методах расчета и конструировании усиливаемых фундаментов мелкого заложения инъекционными, буроинъекционными сваями в условиях реконструкции зданий. Вначале представлен обзор конструктивных решений рассматриваемых свай, далее приведены наиболее распространенные способы их устройства путем подачи в скважины мелкозернистого бетона под давлением (Готман А. Л., 2012, 2016; Пронозин Я. А., 2012–2017; Богомолов В. А., 1992–1995; Лушников В. В., 1991–1996; Улицкий В. М., 2007; Мангушев Р. А., 2010–2018; Чернявский Д. А., 2019–2021; Петухов А. А., 2006–2024; Шалгинов Р. В., 2010; Тарасов А. А., 2013; Полищук А. И.,

2005–2024; Пономарев А. Б., 2010–2018; Филиппович А. А., 2014; Нуждин Л. В., 1998–2021; Нуждин М. Л., 2018–2024; Сахаров И. И., 2004–2010 и др.). Приведены данные о результатах натуральных испытаний инъекционных свай для оценки их несущей способности и осадок, которые выполнялись в Томске и Кемерово (Петухов А. А. и др., 2003–2006, 2014–2023 гг.) в глинистых грунтах. Рассмотрены вопросы совместной работы свай и грунтов основания, а также работы свай при их использовании для усиления фундаментов мелкого заложения в условиях реконструкции зданий. Выполнен обзор методов расчета усиливаемых фундаментов.

Проведенный анализ показывает, что в последние годы накоплен существенный научно-практический опыт оценки работы свай, устраиваемых путем подачи в скважины мелкозернистого бетона под давлением и применяемых для усиления фундаментов реконструируемых зданий. Однако вопросы расчета осадок одиночных инъекционных свай и усиливаемых при помощи них фундаментов должного развития пока не получили. На основе анализа и обобщения полученных данных были **сформулированы цель и задачи** диссертационной работы.

Во втором разделе рассматриваются вопросы взаимодействия инъекционных свай с глинистым грунтом основания, установленные по результатам численных исследований. Автором для численного моделирования работы свай были подготовлены их модели (системы), устраиваемые путем инъекции мелкозернистого бетона, а также модели (системы) фундаментов, усиливаемых инъекционными сваями, работа которых моделировалась при нагружении. Устройство одиночных инъекционных свай предполагалось поэтапно. Вначале вдавливался иньектор в глинистый грунт, а затем через иньектор подавалась подвижная бетонная смесь под давлением $p_{и} = 500\text{--}900$ кПа с последующей опрессовкой скважины (рис. 1; Томск, ТГАСУ, 2003–2009).

В разделе указана методика численного моделирования работы одиночной инъекционной сваи и отдельно стоящего фундамента, усиливаемого такими сваями, в ПК *Midax GTS* (рис. 2). Грунтовые условия при численных исследованиях были представлены глинистыми грунтами различного состояния и разновидности: суглинки мягко-текучепластичные, супеси пластичные и текучие ($\gamma = 18\text{--}20$ кН/м³; $e = 0,6\text{--}1,0$; $E = 4\text{--}10$ МПа; $c = 14\text{--}20$ кПа; $\varphi = 16\text{--}22$ град). В качестве критерия пластичности грунта применялась модель Кулона-Мора.

Автором при исследовании работы инъекционной сваи была использована расчетная система, представляющая собой правильную четырехугольную призму (массив глинистого грунта), внутри которой размещено тело инъекционной сваи в форме цилиндра (рис. 2, а, в).

В работе применялись следующие геометрические параметры одиночной сваи и массива грунта: длина свай $L_{св} = 3, 6$ и 9 м, ее диаметр $d_{св} = 250, 300$ и 350 мм; расчетный массив однородного глинистого грунта высотой $H = 3L_{св}$, радиус массива $r = 5d_{св}, r = 10d_{св}, r = 15d_{св}, r = 20d_{св}$. Тело сваи выполнялось из мелкозернистого бетона класса В20. В качестве критерия прочности мелкозернистого бетона была принята линейно-упругая модель (модель *Elastic*). Графически инъекционные сваи задавались объемными элементами.

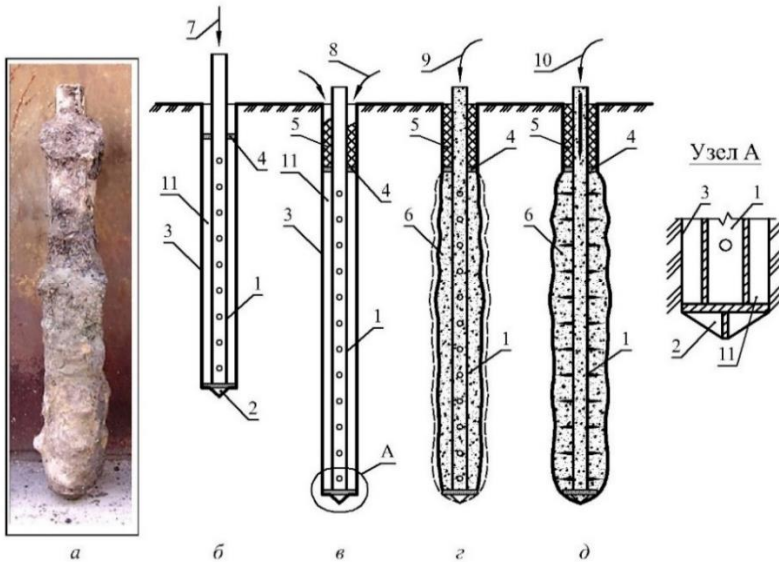


Рис. 1. Схема устройства инъекционных свай (по данным Семёнова И. В.):
 а – общий вид инъекционной сваи после экскавации (результаты исследований Петухова А. А. и др.); б – вдавливание стального перфорированного иньектора;
 в – тампонирувание затрубного пространства иньектора; г – нагнетание в скважину через отверстия иньектора подвижной бетонной смеси; д – опрессовка скважины; 1 – стальной перфорированный иньектор; 2 – конусный наконечник с уширением; 3 – стенка скважины; 4 – верхнее «запорное» кольцо; 5 – тампонаж из цементно-песчаного раствора; 6 – тело инъекционной сваи; 7 – направление вдавливания иньектора; 8 – направление тампонирувания затрубного пространства иньектора; 9 – направление нагнетания подвижной бетонной смеси в скважину; 10 – опрессовка скважины; 11 – воздушный зазор между стенкой скважины и иньектором

В рассматриваемом разделе расчетная система отдельного усиливаемого фундамента представлена в виде правильной четырехугольной

призмы, в центре верхней части которой размещено тело отдельного фундамента, усиленного четырьмя инъекционными сваями (рис. 2, б, з). Исследования проводились при ширине подошвы фундамента 1; 1,5 и 2 м. На этапе исследований, до реконструкции здания, включение инъекционных свай в работу производилось при достижении давления, соответствующего величине расчетного сопротивления грунта основания R ($p_\phi = R$). Сопряжение свай с плитной частью фундамента задавалось жестким (СП 24.13330.2021).

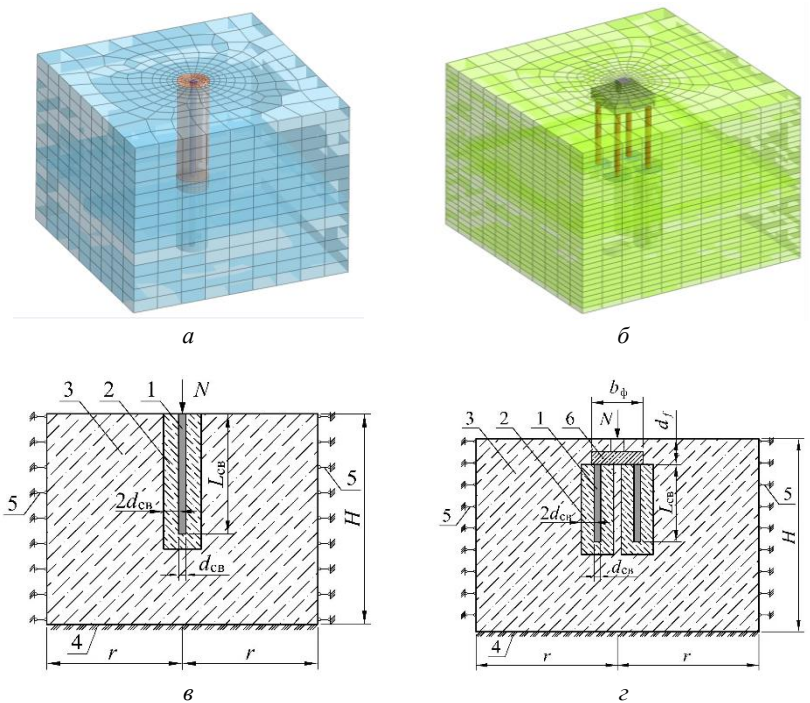


Рис. 2. Моделирование в ПК *Midas GTS*: а, в – соответственно общий вид расчетной системы и расчетная схема одиночной инъекционной сваи; б, г – то же для усиливаемого фундамента; 1 – инъекционная свая; 2 – уплотненный грунт (в пределах $2d_{св}$ от ствола сваи); 3 – массив грунта (мягкопластичный суглинок); 4 – жесткое закрепление (исключаются все перемещения); 5 – шарнирное сопряжение (по боковой поверхности возможны вертикальные перемещения); б – отдельный фундамент мелкого заложения; $L_{св}$ – длина сваи; $d_{св}$ – диаметр сваи; H – высота массива грунта; r – половина ширины основания массива грунта; b_ϕ – ширина отдельного фундамента мелкого заложения; d_f – глубина заложения подошвы отдельного фундамента мелкого заложения

В результате численного моделирования работы одиночной инъекционной сваи и отдельного фундамента, усиленного инъекционными сваями, в глинистых грунтах были получены изополю вертикальных перемещений (осадок) в ПК *Midas GTS* (рис. 3).

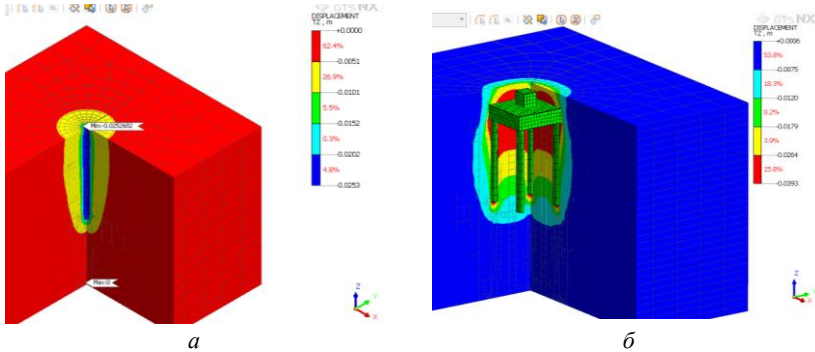


Рис. 3. Результаты расчета осадок (изополю вертикальных перемещений) в ПК *Midas GTS*: *а* – одиночной инъекционной сваи; *б* – фундамента, усиленного инъекционными сваями

Анализ работы инъекционных свай выполнен путем сопоставления графиков зависимости осадок от прикладываемых вертикальных нагрузок, которые получены по результатам численного моделирования и испытаний (нагружения) натуральных одиночных свай статической вдавливающей нагрузкой. Инъекционные натурные сваи устраивались на строительных площадках г. Томска (ул. Белинского, площадь Соляная) длиной 4,5–4,6 м и диаметром 220–250 мм. Грунтовые условия характеризовались наличием в основании глинистых грунтов из супесей пластичных, текучих; суглинков тугопластичных, текучепластичных (авторы испытаний Петухов А. А. и др., 2005–2006). В исследованиях соискателя по работе инъекционных свай использовались данные о грунтовых условиях и характеристиках грунтов, которые были получены по данным изысканий и контрольных исследований. Обобщение этих данных показывает, что разница между результатами моделирования (расчета) осадок свай и данными их натуральных испытаний, при одной и той же внешней нагрузке в рассматриваемом диапазоне нагружения 100–150 кН, не превышает 3–5 мм. При этом качественный характер графиков численного моделирования и натуральных испытаний инъекционных свай сохраняется (рис. 4).

Работа буроижекционных свай оценивалась путем сопоставления графиков осадок, полученных по результатам численного моделирования и нагружения натуральных одиночных свай статической вдавливающей

нагрузкой. Численное моделирование нагружения буроинъекционных свай выполнялось по аналогии с нагружением инъекционных свай с использованием ПК *Midas GTS*. Сопоставление результатов численного моделирования выполнялось с данными испытаний буроинъекционных натурных одиночных свай, устраиваемых на площадке г. Санкт-Петербурга (ул. Ленсовета, Московский район; ЗАО «Проектно-конструкторско-технологический институт», 2005). В экспериментах использовались буроинъекционные сваи длиной 8 м и диаметром 250 мм, устроенные в глинистых грунтах (супеси пластичные, суглинки тугопластичные) согласно данным ПК «Универсал» (2003). Было установлено, что разница осадок натурной буроинъекционной сваи в диапазоне нагружения от 0 до 200 кН составила 1,0–2,3 мм. Следовательно, принятая конечно-элементная система соответствует реальной работе свай, устраиваемых путем инъекции мелкозернистого бетона в глинистые грунты. Таким образом, программный комплекс *Midas GTS* может быть использован для выполнения поставленных в работе задач.

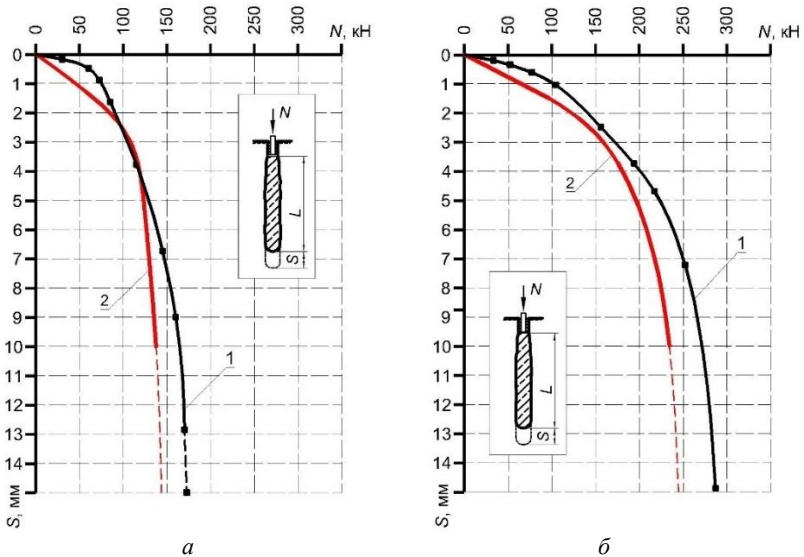


Рис. 4. Графики зависимости осадки одиночной инъекционной сваи S от приложенной внешней нагрузки N : a – инъекционная свая марки СИ-2 на площадке 1 (длина сваи $L_{св} = 4,6$ м; средний диаметр сваи $d_{св} = 250$ мм; г. Томск, ул. Беллинского, 32); b – инъекционная свая марки СИ-19 на площадке 2 (длина сваи $L_{св} = 4,5$ м; средний диаметр сваи $d_{св} = 220$ мм; г. Томск, пл. Соляной); 1 – данные испытаний натурных свай (исполнители А. А. Петухов и др. 2005–2006); 2 – результаты расчета при помощи ПК *Midas GTS*

В третьем разделе приведены результаты численных исследований влияния геометрических параметров системы отдельного усиливаемого фундамента мелкого заложения инъекционными сваями в глинистом грунте на перераспределение внешней нагрузки между его основными конструктивными элементами. Анализ графиков (рис. 5) показывает, что значения расчетных осадок фундамента мелкого заложения без его усиления, значительно больше прогнозируемых осадок для фундамента с усилением инъекционными сваями.

На основе результатов компьютерного моделирования (ПК *Midas GTS*) выявлено перераспределение внешней нагрузки между конструктивными элементами отдельного усиливаемого фундамента инъекционными сваями. Установлено, что увеличение длины инъекционных свай $L_{св}$ приводит к увеличению доли внешней нагрузки, передаваемой на сваи ($D_{св}$). При этом доля внешней нагрузки, которая передается на плитную часть существующего отдельного фундамента ($D_{п}$), уменьшается (рис. 6).

Предложен метод определения значений доли внешней нагрузки, передаваемой на элементы отдельного (отдельно стоящего) усиливаемого фундамента инъекционными сваями в глинистых грунтах. Метод учитывает геометрические параметры рассматриваемого фундамента при заданных параметрах грунтов основания. При этом используется величина давления $p_{ус}$ по подошве фундамента после его усиления инъекционными сваями. Указанный параметр определяется из выражения, полученного в результате численных расчетов:

$$p_{ус} = a_1 p_{\phi}^2 + a_2 p_{\phi} + a_3, \quad (1)$$

где a_1, a_2, a_3 – параметры аппроксимации, полученные на основе метода наименьших квадратов и принимаемые в зависимости от ширины подошвы b_{ϕ} отдельного фундамента и длины инъекционных свай $L_{св}$ (приведены в диссертации).

Доли внешней нагрузки, передаваемые на плитную часть ($D_{п}$) и инъекционные сваи ($D_{св}$) отдельного фундамента, определяются по формулам:

$$D_{п} = \frac{p_{ус} \cdot 100 \%}{p_{\phi}}; \quad (2)$$

$$D_{св} = 100 \% - D_{п}. \quad (3)$$

В четвертом разделе приводится информация о методах расчета осадки одиночной сваи и для усиливаемого фундамента мелкого заложения (отдельного и ленточного).

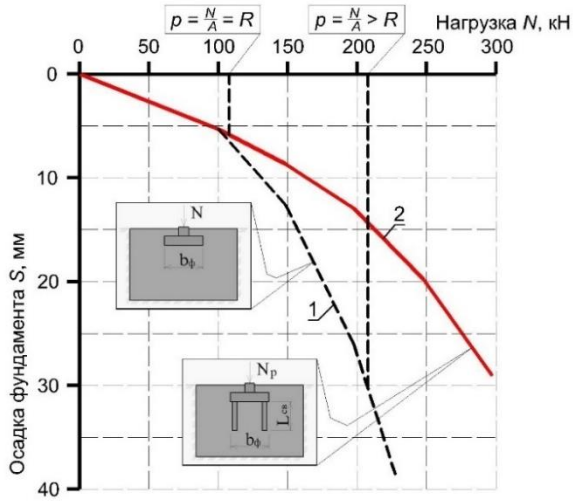


Рис. 5. Графики зависимостей осадок S отдельного фундамента от внешней вертикальной нагрузки N в условиях реконструкции здания: 1 – до усиления фундамента; 2 – после усиления сваями; N – нагрузка на фундамент до усиления; N_p – нагрузка на фундамент после усиления

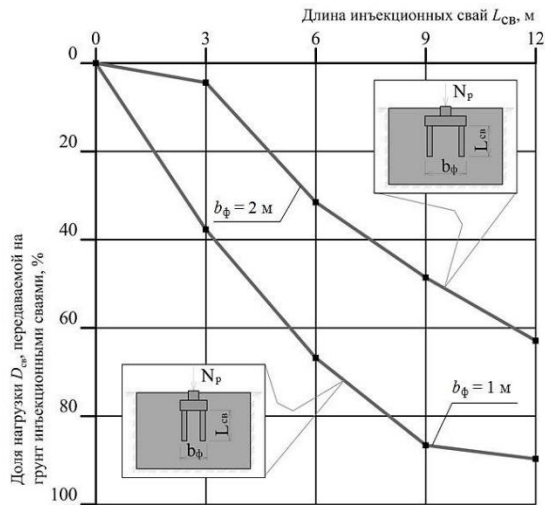


Рис. 6. Графики зависимости доли внешней нагрузки $D_{св}$, на инъекционные сваи при их различной длине (нагрузка N_p эквивалентна давлению 100 кПа, распределенному по площади элементов усиливаемого фундамента)

Расчет осадки одиночной сваи S_o . Для расчета осадки одиночной инъекционной сваи использовалось предложение о раздельной работе ее боковой поверхности и нижнего конца. При этом работа сваи рассматривается поэтапно в процессе ее нагружения (рис. 7). Осадка инъекционной сваи на первом этапе S_1 определяется из условия (Randolph M. F., 1978; Тер-Мартirosян З. Г., 2015):

$$S_1 = \frac{N_f}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot G} \cdot \ln \left(\frac{r_m}{r_0} \right), \quad (4)$$

где N_f – часть внешней нагрузки, передаваемой на околосвайный массив грунта боковой поверхностью инъекционной сваи, кН; r_0 – радиус инъекционной сваи, м; L – длина инъекционной сваи, м; r_m – горизонтальное расстояние от вертикальной оси сваи z до границы, где вертикальные перемещения грунта w равны нулю (радиус влияния), $r_m = 6 \dots 10 \cdot r_0$, м; G – модуль сдвига околосвайного грунта.

Диапазон изменений радиуса влияния r_m установлен с учетом результатов теоретических и экспериментальных исследований Тер-Мартirosяна З. Г., Чинь Туан Вьет (2015), Полищука А. И., Петухова А. А. (2006) и др., а также данным автора по численному моделированию работы инъекционных свай в глинистых грунтах.

При аналитических расчетах на первом этапе (0б) учитывается напряжение обжатия инъекционной сваи $\sigma_r^{\text{обж}}$ в грунте, которое обусловлено действием давления инъекции $p_u = 500\text{--}900$ кПа при ее устройстве (рис. 7, а). После завершения инъекции бетона происходит снижение напряжения $\sigma_r^{\text{обж}}$ в течение определенного промежутка времени до значений примерно $\sigma_r^{\text{обж}} = 50\text{--}100$ кПа (Петухов А. И., 2006).

Приращение осадки инъекционной сваи ΔS , обусловленное действием внешней нагрузки ΔN на втором этапе нагружения (участок графика bc , рис. 7, б), определяется на основе выражения, преобразованного Максимовым для расчета осадок свай (Максимов Ф. А. и др., 2018). С учетом этого, формула для определения осадки одиночной инъекционной сваи имеет вид:

$$S_o = S_1 + \Delta S = S_1 + S_1 \frac{\Delta N \cdot (N_n - N_R) - N_R \cdot (\Delta N - N_R)}{N_R \cdot (N_n - \Delta N)}, \quad (5)$$

где S_o , N_R и N_n – часть внешней нагрузки в конце соответственно первого и второго этапа нагружения инъекционной сваи, кН; ΔN – приращение нагрузки на инъекционную сваю на втором этапе ее нагружения (рис. 7, б).

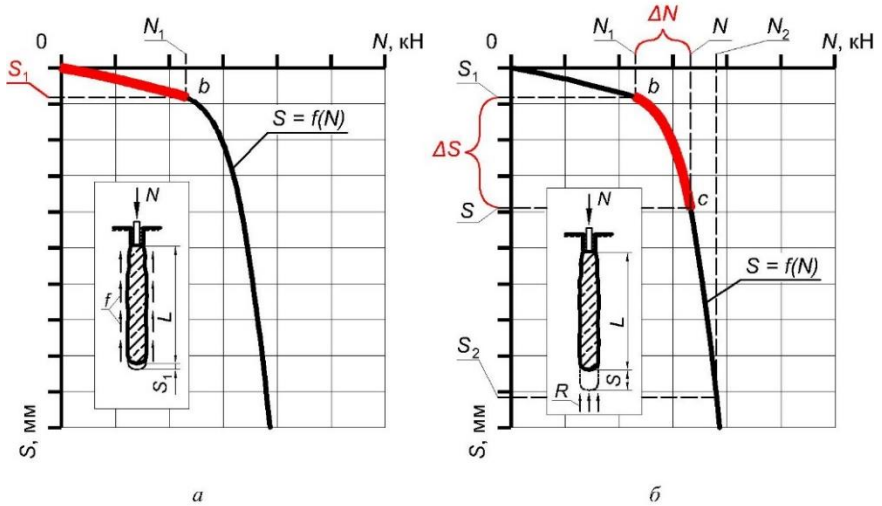


Рис. 7. Зависимость осадки инъекционной сваи S от действующей на нее внешней вдавливающей нагрузки N : a – первый этап нагружения инъекционной сваи (линейный рост осадки); b – второй этап нагружения инъекционной сваи (нелинейный рост осадки)

Расчет осадки фундамента, усиленного инъекционными сваями
 $S_{рек}$. Расчет выполнялся на этапе проектирования усиления фундамента (отдельного, ленточного) реконструируемого здания в глинистом грунте по формуле:

$$S_{рек} = S_o \cdot k_n + S_\phi \cdot (k_d - 1), \quad (6)$$

где S_o – конечная осадка одиночной инъекционной сваи, определяемая по условию (5) мм; S_ϕ – расчетная осадка существующего фундамента мелкого заложения до реконструкции здания, мм; k_d , k_n – безразмерные коэффициенты ($k_d = 1,01-1,13$, $k_n = 0,93-0,98$).

Коэффициент k_d учитывает дополнительные перемещения (осадки) грунта под подошвой существующего фундамента мелкого заложения в связи с уменьшением его опорной площади за счет устройства отверстий в плитной части для инъекционных свай. Размеры этих отверстий влияют на развитие расчетной осадки S_ϕ фундамента. Значения коэффициентов k_d устанавливаются по результатам аналитических исследований.

Коэффициент k_n учитывает изменение напряженного-деформированного состояния основания под подошвой фундамента и улучшение его свойств в пределах глубины $(0,5-1,0)b$ (b – ширина подошвы фундамента).

Значения коэффициентов k_n устанавливаются также аналитически. Методики определения коэффициентов k_d и k_n приведены в параграфе 4.2 диссертации.

Для определения нагрузок (доли нагрузок) в расчетах осадок отдельных фундаментов с инъекционными сваями используются условия (1)–(3) автореферата. При расчетах осадок ленточных фундаментов, усиливаемых инъекционными сваями, нагрузки на сваи определяются с учетом данных Филиппович А. А. (2014), приведенных в технической литературе и диссертации автора.

Для обоснования инженерного метода расчета осадок усиливаемых фундаментов в глинистом грунте были использованы данные геотехнического мониторинга, который проводился в 2016 г. (ООО «ГЕОФОНД+», г. Тюмень). Мониторинг был организован на объекте «Третья городская больница горздравоотдела» (г. Тюмень, ул. Дaudельная, 1, литера А). Рассматриваемое здание является двухэтажным, кирпичным, с несущими продольными и поперечными стенами. Ленточные фундаменты здания усиливались буроинъекционными сваями длиной 5 м и диаметром 250 мм. Основание фундаментов сложено глинистыми грунтами (суглинки тугопластичные, мягкопластичные, текучепластичные). Наблюдение за осадками фундаментов осуществлялось при помощи 29 геодезических марок, которые были установлены в уровне отметок верха цоколя здания. В результате сравнения расчетных осадок ленточного фундамента на участке по оси 4, А-Д после его усиления буроинъекционными сваями с данными геодезических наблюдений за их вертикальным перемещением установлена сходимость порядка 20–27 % (табл. 1, рис. 8). Полученные результаты позволяют говорить о применимости инженерного метода расчета осадок фундаментов в практике проектирования фундаментов реконструируемых зданий и сооружений.

Обобщение полученных в работе данных позволило разработать рекомендации по проектированию усиливаемых инъекционными сваями фундаментов (отдельных, ленточных) для реконструируемых зданий. Практическое применение результатов проведенных исследований было осуществлено на объекте: «Обследование зданий при разработке проектно-сметной документации на реконструкцию объектов биофабрики федерального казенного предприятия «Армавирская биологическая фабрика». Здание клиники №5» (авторы: Семёнов И. В. и др.; г. Краснодар, ООО «БауПроект», 2023).

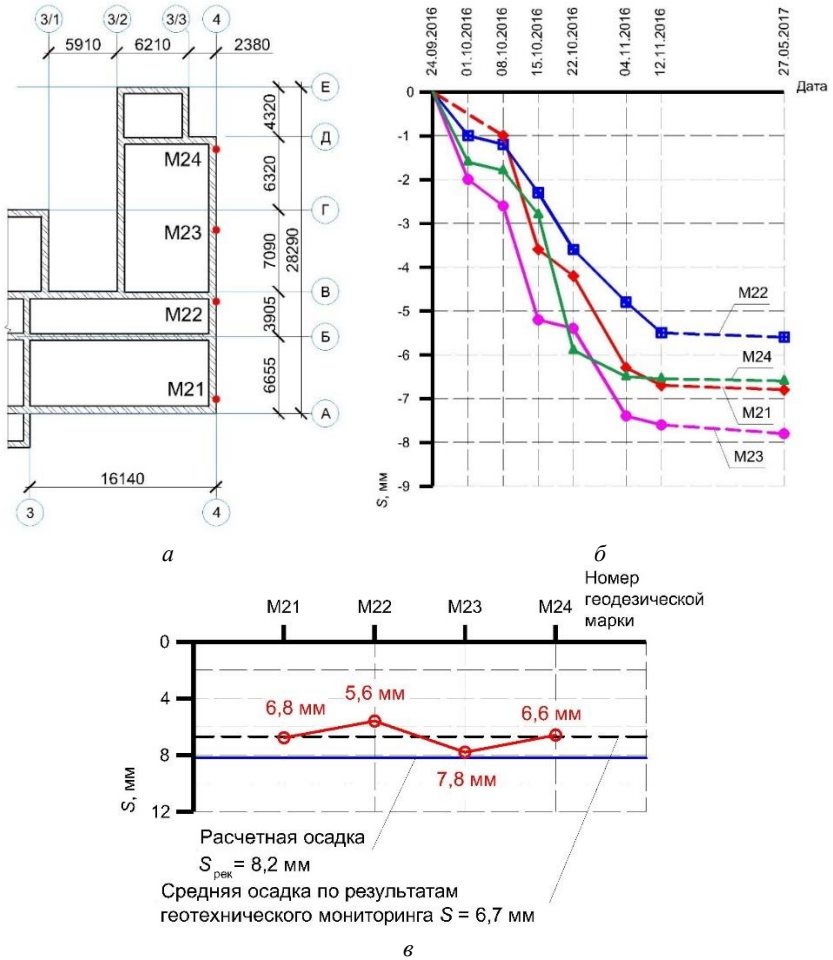


Рис. 8. Сопоставление данных инструментального наблюдения за осадками фундамента (S , мм) по оси 4, А-Д объекта «Третья городская больница горздравоотдела», г. Тюмень, ул. Даудельная, 1, литера А (27.05.2017 г.; ООО «ГЕОФОНД+», г. Тюмень) с результатами расчета ($S_{\text{рек}}$, мм) по предлагаемому методу: а – схема расположения геодезических марок на плане здания; б – графики наблюдения за вертикальными перемещениями (осадками) геодезических марок M21, M22, M23, M24; в – результаты сопоставления расчетной осадки с данными инструментального наблюдения

Таблица 1 – Сопоставление результатов расчета осадок фундамента после его усиления сваями с данными мониторинга на участке по оси 4, А-Д

Номер марки	Вертикальные перемещения фундамента, усиленного буроинъекционными сваями, по данным мониторинга (данные на 27.05.2017)		Результаты расчета по предлагаемому инженерному методу, мм
	Осадка на участках расположения марок, мм	Средняя осадка на участке 4, А-Д, мм	
M21	6,8	6,7	8,2
M22	5,6		
M23	7,8		
M24	6,6		

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнено обоснование методики расчета системы «инъекционные сваи – глинистый грунт» в составе усиливаемых фундаментов с применением программного комплекса *Midas GTS*. В результате сопоставления численных исследований работы инъекционных свай с данными полевых испытаний установлено, что максимальная разница между осадками при одной и той же внешней нагрузке в рассматриваемом диапазоне нагружения составляет не более 3–5 мм (10–15 %).

2. В результате численных исследований работы одиночных инъекционных свай и свай в составе усиливаемых фундаментов мелкого заложения выявлено, что для квадратных в плане отдельных фундаментов (например, с размерами 1x1 м, 2x2 м и др.) изменение длины устраиваемых свай от 3 до 9 м приводит к повышению доли внешних нагрузок, передаваемой на грунт основания сваями, с 23–52 % до 59–82 % соответственно.

3. Разработан метод определения доли (части) внешней нагрузки, распределяемой в системе реконструируемого здания между элементами усиливаемого фундамента. В основе метода лежит величина давления по подошве фундамента после его усиления инъекционными сваями с учетом геометрических параметров рассматриваемого фундамента при заданных параметрах грунтов основания.

4. Обоснован инженерный метод расчета конечных осадок одиночных инъекционных свай и фундаментов мелкого заложения (отдельных, ленточных), усиливаемых инъекционными сваями в глинистом грунте. Метод учитывает влияние конструктивных параметров свай и физико-механических свойств основания в околосвайном пространстве на их работу в условиях эксплуатации реконструируемого здания. В работе инъекционных свай также учитывается линейная и нелинейная зависимость их перемещения (осадки) S от прикладываемой внешней нагрузки N .

5. Составлены рекомендации по проектированию усиления фундаментов мелкого заложения (отдельных, ленточных) инъекционными сваями в глинистых грунтах. Область применения распространяется на инъекционные сваи длиной 3–12 м, диаметром 200–350 мм, в глинистых грунтах различной консистенции, которые используются для усиления фундаментов мелкого заложения с опорной площадью до 6,5 м² в условиях реконструкции здания.

6. Определены основные направления дальнейших исследований по совершенствованию способов усиления фундаментов сваями, устраиваемых при помощи инъекции (подачи под давлением) мелкозернистого бетона (инъекционных, буроинъекционных). Предложен способ усиления фундамента мелкого заложения буроинъекционными коническими сваями, который подтвержден патентами РФ на изобретения (№ 2672698, № 2672699, 2017 г.).

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Монографии:

1. Полищук, А. И. Усиление фундаментов инъекционными сваями в условиях реконструкции зданий : монография / А. И. Полищук, А. А. Петухов, **И. В. Семёнов**; под ред. А. И. Полищука. – Краснодар : КубГАУ, 2022. – 240 с. – 70 экз. – ISBN 978-5-907597-32-7. – Текст : непосредственный.

2. Полищук, А. И. Усиление фундаментов инъекционными сваями при реконструкции зданий : монография / А. И. Полищук, А. А. Петухов, **И. В. Семёнов**; под ред. д-ра техн. наук, профессора А. И. Полищука // 2-е изд., доп. – М.: Изд-во АСВ, 2023. – 212 с. – 100 экз. – ISBN 978-5-4323-0490-2. – Текст : непосредственный.

Статьи в журналах, включенных в перечень ВАК:

3. Полищук, А. И. Инженерный метод расчета осадки инъекционной сваи в глинистом грунте / А. И. Полищук, **И. В. Семёнов** // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2019. – №5. – С.23–28. – Текст : непосредственный.

4. Полищук, А. И. Проектирование усиления фундаментов реконструируемых, восстанавливаемых зданий с использованием свай / А. И. Полищук, **И. В. Семёнов** // Construction and Geotechnics. – 2020. – Т. 11, № 4. – С. 33–45. – DOI 10.15593/2224-9826/2020.4.03. – Текст : непосредственный.

5. Strengthening of the Foundations of Renovated Buildings With Injection Piles / A. I. Polishchuk, N. S. Nikitina, A. A. Petukhov, **I. V. Semyonov** // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2021. –

Vol. 17, № 1. – P. 75–86. – DOI 10.22337/2587-9618-2021-17-1-75-86. – Текст : электронный.

6. Полищук, А. И. Расчет осадки комбинированного фундамента для реконструируемого здания в глинистых грунтах / А. И. Полищук, **И. В. Семёнов** // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2022. – №6. – С.7–11. – Текст : непосредственный.

7. Design of foundation strengthening with piles for the reconstruction of buildings on clay soils / A. I. Polishchuk, N. S. Nikitina, A. A. Petukhov, **I. V. Semyonov** // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2025. – Vol. 21, No. 1. – P. 222-232. – DOI 10.22337/2587-9618-2025-21-1-222-232. – Текст : электронный.

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

8. Polishchuk, A. I. Method justification for calculating the final setting of injection pile in clay soil / A. I. Polishchuk, **I. V. Semenov**, F. A. Maksimov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – № 698. – P. 022011. – DOI 10.1088/1757-899X/698/2/022011. – Текст : электронный.

9. Polishchuk, A. I. Main reasons for strengthening foundations and base soil stabilizations of used buildings / A. I. Polishchuk, **I. V. Semyonov**, V. A. Demchenko // Journal of Physics: Conference Series : 2, Perm, 26–28 мая 2021 года. – Perm, 2021. – P. 012029. – DOI 10.1088/1742-6596/1928/1/012029. – Текст : электронный.

Статьи в других печатных изданиях:

10. **Семёнов, И. В.** Исследование работы отдельных фундаментов реконструируемых зданий при их усилении инъекционными сваями в глинистых грунтах / **И. В. Семёнов** // Научное обеспечение агропромышленного комплекса : сборник статей по материалам 72-й научно-практической конференции преподавателей по итогам НИР за 2016 г., Краснодар, 29 марта 2017 года. – Краснодар : Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2017. – С. 68-69. – Текст : непосредственный.

11. **Семёнов, И. В.** Этапы проектирования усиления отдельного фундамента при помощи инъекционных свай / **И. В. Семёнов** // Актуальные вопросы строительства: конструкции, технологии, экономика : Сборник статей по материалам конференции архитектурно-строительного факультета, Краснодар, 17 февраля 2021 года. – Краснодар : Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2021. – С. 94-97. – Текст : непосредственный.

12. **Семёнов, И. В.** Результаты исследований работы фундаментов при усилении их инъекционными сваями в глинистых грунтах / **И. В. Семёнов** // Современные вопросы геотехники : Сборник научных статей по ма-

териалам конференции, посвященной 75-летию профессора А. И. Полищука, Краснодар, 28 июля 2024 года. – Краснодар : Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина, 2024. – С. 204-210. – Текст : непосредственный.

13. **Семёнов, И. В.** Рекомендации по проектированию комбинированных отдельных фундаментов в глинистых грунтах при реконструкции зданий / **И. В. Семёнов** // Современные векторы развития науки : Сборник статей по материалам ежегодной научно-практической конференции преподавателей по итогам НИР за 2023 год, Краснодар, 06 февраля 2024 года. – Краснодар : Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, 2024. – С. 135-137. – Текст : непосредственный.

14. **Семёнов, И. В.** Результаты исследования работы комбинированных фундаментов в глинистых грунтах / **И. В. Семёнов** // Современные векторы развития архитектуры и строительства : Сборник статей по материалам конференции, посвященной 50-летию архитектурно-строительного факультета, Краснодар, 28 марта 2024 года. – Краснодар : Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, 2024. – С. 114-116. – Текст : непосредственный.

В других печатных изданиях опубликовано 12 научных работ.

Патенты РФ на изобретения:

15. Патент № 2514261 С1 Российская Федерация, МПК E02D 5/54. Бурионъекционная свая с локальными уширениями : Заявка № 2012148645/03 ; заявл. 15.11.12 ; опубл. 27.04.14 / Чернявский Д. А., Ещенко О. Ю., **Семёнов И. В.**; заявитель КубГАУ. – 4 с. – Текст : непосредственный.

16. Патент № 2524077 С1 Российская Федерация, МПК E 02 D 5/46. Бурионъекционная свая с наклонными локальными уширениями. Заявка № 2013101331/03 ; заявл. 10.01.13 ; опубл. 27.07.14 / Чернявский Д. А., Ещенко О. Ю., **Семёнов И. В.**; заявитель КубГАУ. – 4 с. – Текст : непосредственный.

17. Патент № 2672698 С1 Российская Федерация, МПК E 02 D 27/08. Устройство для изготовления бурионъекционной конической сваи. Заявка № 2017140017 ; заявл. 16.11.2017 ; опубл. 19.11.2018 / Полищук А. И., Чернявский Д. А., **Семёнов И. В.**; заявитель КубГАУ. – 4 с. – Текст : непосредственный.

18. Патент № 2672699 С1 Российская Федерация, МПК E 02 D 27/08. Способ усиления фундамента мелкого заложения. Заявка № 2017140161 ; заявл. 17.11.2017 ; опубл. 19.11.2018 / **Семёнов И. В.**; заявитель КубГАУ. – 4 с. – Текст : непосредственный.

Компьютерная верстка *В. С. Весниной*

Подписано к печати 02.12.2025. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,3. Тираж 120 экз. Заказ 137.

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