

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ДОНБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

*На правах рукописи*

**ЗБИЦКАЯ ВАЛЕНТИНА ВИКТОРОВНА**

**ОБОСНОВАНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ  
БУРОИНЪЕКЦИОННЫХ СВАЙ ПРИ УПРОЧНЕНИИ ГРУНТОВ  
ОСНОВАНИЯ ФУНДАМЕНТОВ**

Специальность

25.00.22 — Геотехнология (подземная, открытая и строительная)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Алчевск — 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Донбасский государственный технический университет».

Научный руководитель:	<b>Псюк Виктор Васильевич</b> , кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донбасский государственный технический университет», заведующий кафедрой промышленного строительства
Официальные оппоненты:	<b>Прокопов Альберт Юрьевич</b> , доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет», заведующий кафедрой инженерной геологии, оснований и фундаментов (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация) <b>Хамидуллина Наталья Викторовна</b> , кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения», доцент кафедры «Изыскания, проектирование и строительство железных дорог» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)
Ведущая организация:	федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова» (г. Новочеркасск, Российская Федерация)

Защита состоится «22» сентября 2023 года в 11<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 001.007.01 на базе ФГБОУ ВО «ДонГТУ» по адресу: г. Алчевск, пр. Ленина, 16 (главный корпус), конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «ДонГТУ» в читальном зале по адресу: г. Алчевск, ул. Ленинградская, 45-а, библиотека.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 001.007.01



канд. техн. наук, доц.  
Евгений Сергеевич Смекалин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В геотехническом строительстве очень часто приходится вести работы в сложных инженерно-геологических условиях. Это обусловлено залеганием слабоустойчивых, обводненных и специфических грунтов в основании. Наряду с этим, все чаще сталкиваются с проблемой реконструкции основания. Многочисленные научные исследования и практический опыт эксплуатации промышленных и гражданских объектов показали, что грунты оснований претерпевают сложные процессы во времени и подвержены изменениям свойств под влиянием различных геологических и техногенных факторов. Задача реконструкции оснований является сложной по двум причинам: каждый объект привязан к сугубо индивидуальным инженерно-геологическим условиям; существующие специальные способы формирования искусственных оснований не всегда соответствуют условиям строительства и дают положительный результат.

Для повышения прочности грунтов основания зданий и сооружений широко применяют различные методы закрепления. Практика показывает, что сегодня одним из перспективных направлений укрепления грунтов основания фундаментов является использование способа напорной инъекции раствором в режиме гидроразрыва. Данный способ базируется на устройстве буроинъекционных свай, имеет широкий диапазон использования по инженерно-геологическим условиям и позволяет достичь высокой степени укрепления грунта и увеличения технико-экономической эффективности работ в 2–3 раза.

### **Связь работы с научными программами, планами, темами.**

Диссертационная работа выполнена в соответствии с Государственной бюджетной программой по прикладным исследованиям и разработкам в высших учебных заведениях в рамках научно-исследовательской темы № 194Д «Разработка способов стабилизации аварийно-опасных участков грунтовой толщи при строительстве и эксплуатации промышленных и гидротехнических объектов» (№ ГР 0111U001744).

### **Степень разработанности научной проблемы.**

Технология сооружения буроинъекционных свай известна и хорошо отработана. Однако, постоянно растущие нагрузки, увеличение темпов строительства, снижение стоимости строительно-монтажных работ вызывают необходимость совершенствования и дальнейшего развития технологии сооружения, методики проектирования параметров и нормативных документов для расчета несущей способности буроинъекционных свай.

При проектировании упрочнения грунтов оснований фундаментов буроинъекционной технологией кроме технологических и геометрических параметров так же определяют несущую способность буроинъекционной сваи. Как известно, в инженерной практике расчет несущей способности свай по табличным данным используется, по большей части, для ее предварительной оценки, поскольку имеет объективные причины несоответствия фактической (реальной) величине. Однако, при отсутствии результатов статических испытаний, этот расчет остается определяющим для выбора параметров свай, и потому повышение его точности является актуальной задачей.

В общем случае несущую способность сваи, работающей на вдавливающую нагрузку, следует определять как сумму расчетных сопротивлений грунтов основания под нижним концом сваи и на ее боковой поверхности. При устройстве буроинъекционных свай, расчет по формулам из нормативных документов не может быть применен, так как они не учитывают конструктивные особенности сваи — цементные уширения.

Существенный вклад в исследования и разработку буро-инъекционных способов закрепления грунтов внесли следующие ученые Акопян В. Ф.; Галай Б. Ф.; Должиков П. Н.; Дыба В. П.; Ермолаев В. А.; Заславский Ю. З.; Кипко Э. Я.; Кузнецов М. В.; Полозов Ю. А.; Прокопов А. Ю.; Пронский Д. В.; Рябичев В. Д.; Сахаров И. И.; Скибин Г. М.; Спичак Ю. Н.; фирмы ООО «ГЕОТЕХНИКА»; «Soletanche» (Франция), «Симентейшн Компани» (Великобритания); компания «Родио» (Италия) и многие другие.

**Объектом исследования** является несущая способность буроинъекционной сваи в зависимости от свойств грунтов и конструктивных особенностей.

**Предметом исследования** являются параметры и закономерности формирования несущей способности буроинъекционной сваи в режиме гидроразрыва грунта.

**Цель исследования** — обоснование несущей способности буроинъекционных свай при упрочнении грунтов основания фундаментов.

В соответствии с целью были поставлены и решены следующие **основные задачи исследования:**

- выполнить анализ способов и методик проектирования упрочнения грунтов оснований;
- провести аналитические исследования свойств грунтов и несущей способности буроинъекционных свай;
- разработать методику лабораторного определения несущей способности буроинъекционных свай;

- провести натурные испытания несущей способности буроинъекционных свай;
- разработать методику проектирования параметров буроинъекционных свай и провести опытно-промышленные работы по упрочнению грунтов такими сваями.

**Научная новизна полученных результатов:**

- выявлены факторы влияния и установлена закономерность перехода системы «основание-фундамент» в аварийное состояние;
- получено новое выражение для расчета несущей способности буроинъекционной сваи;
- впервые разработана методика лабораторного определения несущей способности буроинъекционной сваи;
- установлена зависимость несущей способности буроинъекционной сваи от коэффициента постели цементного раствора;
- установлены закономерности деформирования буроинъекционных свай предложенной конструкции в натуральных условиях.

**Теоретическое и практическое значение полученных результатов.** Установлено влияние совместной работы трубы, цементных уширений и консолидированного грунта на несущую способность буроинъекционной сваи.

В соответствии с разработанной методикой проектирования обособлены параметры грунтового основания фундаментов климатопавильона, аварийных больницы и дома, а также технологические схемы напорного нагнетания цементного раствора в грунт, что обеспечивает надежность строительства и эксплуатации здания, уменьшение количества свай в 3–4 раза. Разработаны «Рекомендации по ликвидации аварий жилых зданий и объектов социального назначения».

При выполнении исследований применялся комплексный **методический подход**: анализ литературных источников, аналитические исследования несущей способности буроинъекционных свай, экспериментальные исследования степени упрочнения грунта; натурные испытания несущей способности свай; статистический и корреляционно-регрессионный анализ результатов исследований и данных опытно-промышленных работ.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Переход системы «основание-фундамент» в предаварийное и аварийное состояние в процессе строительства и эксплуатации зданий наблюдается более чем на 80% обследованных объектах в Луганском регионе, что непосредственно связано с изменением консистенции и свойств грунтов и прогрессирует во времени при допусках ошибок

на стадии инженерно-геологического обоснования на 30%, на стадии эксплуатации объекта на 50%;

2. Несущая способность буроинъекционной сваи определяется совместной работой инъекционной трубы, цементных уширений и консолидированного грунта, причем коэффициент постели цементных уширений значением до 0,4 влияет на несущую способность сваи по степенной зависимости, что позволяет увеличить ее сопротивление деформациям в 4–6 раз;

3. Закономерность деформирования буроинъекционной сваи под влиянием вертикальных нагрузок в натуральных условиях (0,1–0,8 МПа) имеет линейный стационарный характер, при этом стабилизация деформаций наступает через 15–30 минут и не превышает 0,15%.

**Область исследования** соответствует пунктам 11 и 12 паспорта специальности 25.00.22 — Геотехнология (подземная, открытая и строительная).

**Обоснованность и достоверность научных результатов**, выводов и рекомендаций подтверждается использованием сертифицированных высокоточных лабораторных приборов, применением проверенных стандартных методик исследований и аналитических оценок, использованием классических законов механики грунтов, репрезентативным объемом фактических данных о свойствах буроинъекционных свай, удовлетворительной погрешностью результатов исследований (менее 16%), положительными результатами опытно-промышленных работ.

**Апробация результатов исследований.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и были одобрены на Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Совершенствование технологии строительства шахт и подземных сооружений» (г. Донецк, 2013–2014 г.); научно-технической конференции аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современной техники и технологии» (г. Алчевск, 2013 г.); I Международном научно-практическом конгрессе «Городская среда — XXI века. Архитектура. Строительство. Дизайн» (г. Киев, 2014 г.); IX Международной научно-практической конференции «Проблемы горного дела и экология горного производства» (г. Антрацит, 2014 г.); Международной научно-практической конференции «Строительство и архитектура — 2015» (г. Ростов-на-Дону, 2015 г.); Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы современной науки: взгляд молодых ученых» (г. Алчевск, 2020 г.); Научно-практической конференции «Методы компьютерного моделирования и расчета строительных конструкций зданий и сооружений с учетом сложных инженерно-геологических условий Донбасса» (г. Алчевск, 2020–

2022 г.); Юбилейной Международной научно-технической конференции «65-лет ДонГТИ. Наука и практика. Актуальные вопросы и инновации» (г. Алчевск, 2022 г.); научно-технических семинарах кафедр строительных конструкций ДонГТУ и строительства и архитектуры ЛГУ им. В. Даля (г. Алчевск, 2013–2022 гг.).

#### **Реализация выводов и рекомендаций работы.**

Выполнены опытно-промышленные работы при упрочнении основания плитного фундамента, строящегося климатопавильюна (г. Ялта), уплотнении грунтов вокруг свайных фундаментов аварийной больницы (г. Луганск), укрепления грунтов под ленточным фундаментом аварийного дома (г. Луганск).

**Личный вклад автора** заключается в формулировке идеи, цели, задач исследований, научных положений, выводов и рекомендаций, в выполнении аналитических исследований, в разработке программы и участия в лабораторных исследованиях, анализе экспериментальных данных, разработке методики расчета параметров буроинъекционной технологии упрочнения грунтов оснований и участия в опытно-промышленных работах.

**Публикации.** Основные научные и практические результаты диссертационной работы опубликованы в 14 научных работах, в их числе: 1 монография; 1 рекомендации; 5 работ опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях; 1 работа в профессиональных журналах и научных сборниках; 6 работ апробационного характера, докладов на научных конференциях и других научных публикаций.

**Структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 117 наименований на 14 страницах, содержит 58 рисунков, 31 таблицу, изложена на 166 страницах машинописного текста.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

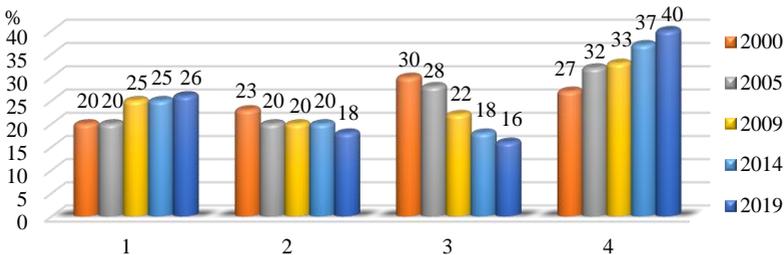
**Во введении** обоснованы актуальность темы исследования и степень ее разработанности; определены объект, предмет, цель, задачи и методика исследования; показана научная новизна, теоретическое и практическое значение полученных результатов; изложены положения, выносимые на защиту; представлены сведения об апробации результатов.

**Глава 1 «Анализ способов и методик проектирования упрочнения грунтов оснований»** содержит литературный обзор по теме диссертации. В данной главе представлены результаты анализа публикаций,

касающихся способов упрочнения неустойчивых грунтов оснований, который показал, что сегодня одним из наиболее перспективных являются способы, которые базируются на использовании буроинъекционных свай. Рассмотрено применение буроинъекционной технологии упрочнения грунтов основания, изучена модель процесса инъектирования грунта раствором, выполнен анализ существующей методики расчета параметров упрочнения грунтов оснований фундаментов, обоснована необходимость совершенствования и дальнейшего развития технологии сооружения, методики проектирования параметров и нормативных документов для расчета несущей способности буроинъекционных свай.

**Глава 2 «Аналитические исследования свойств грунтов и несущей способности буроинъекционных свай»** состоит из трех пунктов. В пункте **«2.1 Анализ изменения свойств грунтов при эксплуатации строительных объектов»** доказано, что разуплотненные грунты основания могут реконструироваться инъекционным способом, который обеспечивает уплотнение грунта и повышение его прочности за счет формирования искусственных жесткокристаллических межчастичных связей.

В пункте **«2.2 Исследования ошибок, влияющих на деформационные свойства грунтов в основаниях фундаментов»** выявлены факторы влияния и установлена закономерность перехода системы «основание-фундамент» в аварийное состояние. Установлено, что основными являются ошибки, допущенные на стадиях инженерно-геологического обоснования площадок строительства и эксплуатации систем «основание-фундамент» (рис. 1). Из приведенной диаграммы видно, что по состоянию на 2019 г., относительно 2000 г., соотношение долей допускаемых ошибок существенно изменилось (на стадии инженерно-геологического обоснования площадок строительства ошибки возросли на 30%; на стадии эксплуатации систем «основание-фундамент» — на 48%).



- 1 — при инженерно-геологическом обосновании площадок строительства;  
 2 — при проектировании оснований и фундаментов;  
 3 — при устройстве оснований и фундаментов;  
 4 — при эксплуатации систем «основание-фундамент»

Рисунок 1 — Диаграмма распределения ошибок

Переход объектов в предаварийное и аварийное состояние по причинам развития неравномерных осадочно-деформационных процессов в системе «основание-фундамент» (рис. 2) убедительно подтверждается техническим состоянием малоэтажных (до пяти этажей включительно) жилых домов.

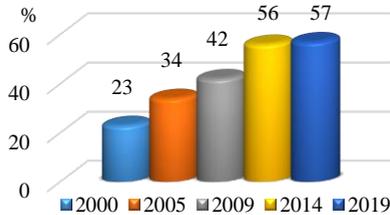


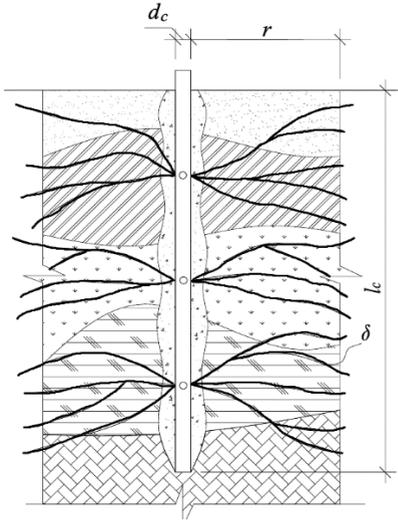
Рисунок 2 — Диаграмма перехода системы «основание-фундамент» малоэтажных домов в предаварийное и аварийное техническое состояние

Эксплуатационные ошибки главным образом связаны с изменениями состояния и характеристик грунтов в результате уменьшения или увеличения их естественной влажности.

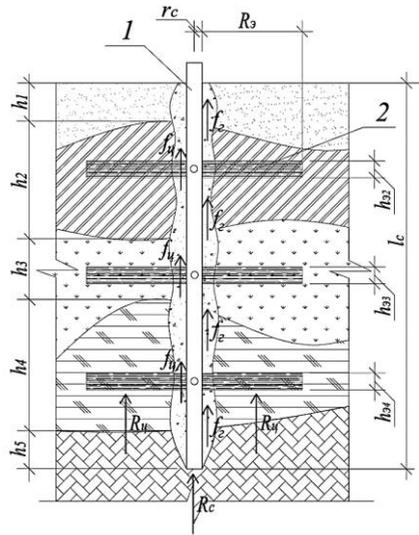
В пункте «2.3 Общая конструкция и анализ несущей способности буроинъекционной сваи» получено новое выражение для расчета несущей способности таких свай.

Буроинъекционная свая представляет собой установленную в грунт инъекционную трубу, через которую под давлением нагнетается цементный раствор. Напорная инъекция цементного раствора способствует формированию в грунте разнонаправленных каналов гидроразрыва. В результате чего в грунте образуется система из инъекционной трубы и цементных уширений. Эта система работает как единая. Основными параметрами буроинъекционной сваи являются: диаметр  $d_c$  и длина рабочей поверхности  $l_c$  инъекционной трубы; радиус распространения  $r$  и раскрытие  $\delta$  трещин гидроразрыва (рис. 3). Система полостей гидрорасчленения имеет хаотический характер, поэтому целесообразно в расчетах заменить раскрытие трещины  $\delta$  на эквивалентное раскрытие полости разрыва  $h_s$ , а радиус  $r$  распространения трещин гидроразрыва на эффективный радиус  $R_s$  (рис. 4).

Учитывая, что свая представляет собой систему из инъекционной трубы и цементных уширений (рис. 4), силы сопротивления под нижним концом — это сумма сил сопротивления под нижним концом сваи  $R_c$  и под цементными уширениями  $R_u$ . Силы сопротивления на боковой поверхности сваи — это сумма сил сопротивление грунта  $f_c$  и цементного раствора  $f_u$ .



$d_c$  и  $l_c$  — диаметр и длина рабочей поверхности инъекционной трубы;  
 $r$  и  $\delta$  — радиус распространения и раскрытие трещин гидроразрыва  
 Рисунок 3 — Основные параметры буроинъекционной сваи



1 — инъекционная труба;  
 2 — цементное уширение  
 Рисунок 4 — Расчетная схема буроинъекционной сваи

В результате выполненного аналитического исследования получено новое выражение для расчета несущей способности буроинъекционной сваи, которое учитывает ее конструктивные особенности, а именно: наличие цементных уширений и их совместную работу с инъекционной трубой и консолидированным грунтом

$$F_d = \gamma_c (R_c + R_{ц} + f_r + f_{ц}) = \gamma_c \cdot \gamma_{cR} \cdot R \cdot \pi (r_c^2 + k_n \cdot (R_э - r_c)^2) + \gamma_c \cdot u \cdot (\sum \gamma_{cf} \cdot f_{r_i} \cdot h_{r_i} \cdot k_{k_i} + \sum \gamma_{cf} \cdot f_{ц_i} \cdot h_{э_i}), \quad (1)$$

где  $\gamma_c$  — коэффициент условий работы сваи;  $\gamma_{cR}$ ,  $\gamma_{cf}$  — коэффициенты условий работы грунта, соответственно под нижним концом и на боковой поверхности сваи;  $R$  — расчетное сопротивление грунта под нижним концом сваи, кПа;  $r_c$  — радиус инъекционной трубы, м;  $R_э$  — эффективный радиус, м;  $k_n$  — коэффициент постели для инъекционного раствора;  $u$  — наружный периметр поперечного сечения сваи, м;  $f_{r_i}$  — расчетное сопротивление  $i$ -ого слоя грунта на боковой поверхности сваи, кПа;  $h_{r_i}$  — толщина  $i$ -ого слоя грунта, соприкасающегося с боковой поверхностью сваи, м;  $k_{k_i}$  — коэффициент консолидации  $i$ -ого слоя грунта;  $f_{ц_i}$  — расчетное сопротивление  $i$ -ого слоя цементного раствора на боковой поверхности сваи, кПа;

$h_{si}$  — эквивалентная полость раскрытия трещин гидроразрыва в  $i$ -том слое грунта, м.

**Глава 3 «Экспериментальные исследования работоспособности буринъекционных свай»** содержит результаты лабораторных и натурных исследований, а также их анализ, состоит из четырех пунктов.

В пункте **«3.1 Физическое моделирование работы буринъекционной сваи»** впервые разработана методика лабораторного определения несущей способности буринъекционной сваи и установлена зависимость несущей способности буринъекционной сваи от коэффициента постели цементного раствора.

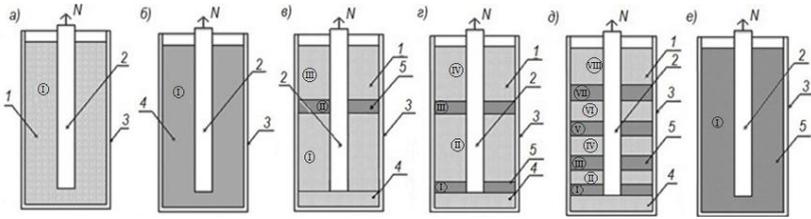
Сущность новой методики заключается в лабораторных испытаниях новых моделей (рис. 5) методом выдергивания с помощью прибора с высокой точностью — ИПМ-23; получении результатов исследований и их статистической обработке. Для проведения физического моделирования были соблюдены геометрическое и динамическое подобия. Коэффициент перехода от модели к натурным условиям — 156,25. Планирование эксперимента проводилось с учетом полного факторного анализа. Были учтены следующие факторы влияния: коэффициент постели цементного раствора и модуль деформации материала. Для исследования работы буринъекционной сваи применялись 6 видов моделей (рис. 5). Каждый вид изготовлялся и испытывался больше трех раз. Полученные результаты были статистически обработаны.

Непосредственно исследования проводились с помощью измерительного прибора ИПМ-23 — измеритель прочности металлов. С его помощью была обеспечена вертикальная выдергивающая нагрузка и зафиксированы показания в момент срыва сваи с устойчивого положения при помощи измерительного датчика. Данный прибор состоит из крепежного узла, нагружающей балки, индикатора нагрузки, подающего нагрузку механизма, электронной системы (рис. 6).

Для моделирования работы сваи в грунте были применены материалы: металлические трубки длиной 300 мм, диаметром 12 мм и толщиной стенки 2 мм; глинистый грунт естественной влажности; цемент марки ПЦ П/А-III-400; песок высушенный; цилиндрический резервуар. В металлической трубке для обеспечения жесткого сцепления с узлом крепления прибора ИПМ-23 был сконструирован узел крепления модели сваи с измерительным прибором. С помощью данного узла крепления было обеспечено жесткое и прочное соединение с нагружающей балкой.

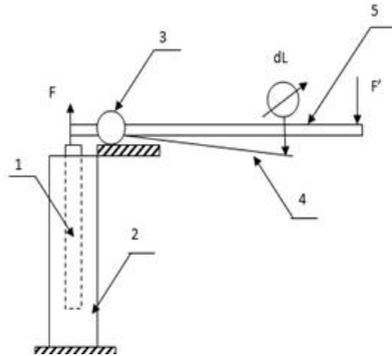
Используя статистически обработанные результаты исследований рассчитан коэффициент постели цементного раствора и несущая способность свай.

Коэффициент постели для инъекционного раствора



а–е — модели №№ 1–6 соответственно; N — выдергивающая сила;  
 1 — разуплотненный глинистый грунт; 2 — свая; 3 — резервуар;  
 4 — уплотненный глинистый грунт; 5 — цементно-песчаный раствор

Рисунок 5 — Схемы моделей буроинъекционных свай



1 — свая; 2 — резервуар; 3 — шарнир опирания;  
 4 — балка индикатора; 5 — нагружающая балка  
 Рисунок 6 — Схема работы прибора ИИМ-23

$$k_{\text{п}} = \frac{l_{\text{ц}}}{l}, \quad (2)$$

где  $l_{\text{ц}}$  — мощность слоев цементного раствора, мм;  $l$  — длина стержня, мм.

Максимальная нагрузка, которую может выдержать свая

$$F_{\text{max}} = \Delta l \cdot \pi \cdot d \cdot (k_{\text{п}} \cdot (E_{\text{ц}} - E_{\text{г}}) + E_{\text{г}}), \quad (3)$$

где  $\Delta l$  — абсолютная деформация, мм;  $k_{\text{п}}$  — коэффициент постели для инъекционного раствора;  $E_{\text{ц}}$  и  $E_{\text{г}}$  — модуль деформации цементного раствора и грунта, МПа.

По результатам проведенного исследования установлена нелинейная зависимость несущей способности сваи от коэффициента постели цементного раствора (рис. 7). Эта зависимость описывается полиномиальной функцией:  $y = 537 \cdot x^3 + 14 \cdot x^2 + 57 \cdot x$ . Коэффициент корреляции равен:  $R = 0,984$ .

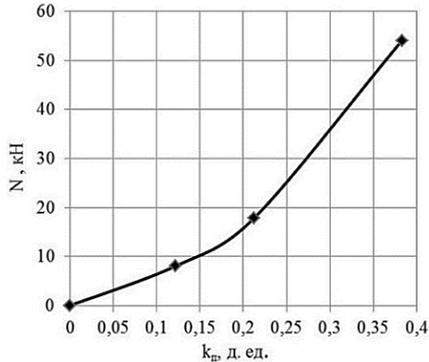


Рисунок 7 — График зависимости несущей способности сваи от коэффициента постели цементного раствора

При увеличении коэффициента постели цементного раствора с 0,122 до 0,212 и 0,383 несущая способность сваи увеличивается в 2,2 и 6,6 раза соответственно.

В пункте «3.2 Инженерно-геологические условия и методика проведения натуральных испытаний» приведены данные инженерно-геологических изысканий в месте устройства свайного основания для натуральных испытаний, схема расположения свай и посадка фундамента здания на геологическом разрезе, конструкция испытательной буроинъекционной сваи, схемы испытания сваи на вертикальную и горизонтальную нагрузки. Фундамент здания — монолитный железобетонный ростверк толщиной 1,2 м на буроинъекционных сваях длиной 5,4 м, которые погружены вертикально. В конструктивном отношении сваи представляет собой металлические перфорированные трубы диаметром 89 мм с толщиной стенки 10 мм.

Для проведения испытаний на вертикальную нагрузку было разработано и собрано специальное приспособление, состоящее из двух гидродомкратов ДГ-200, ферм Ф1 (передающей выдергивающую нагрузку) и Ф2 (опорных), четырех анкерных свай, прогибомеров 6 ПАО-ЛИСИ. Параллельно с испытанием сваи на вдавливающую нагрузку контролировали перемещения анкерных свай на выдергивающую нагрузку.

Для проведения испытаний на горизонтальную нагрузку на четыре анкерные сваи установлен упор (центральная ферма установки для испытания сваи на вдавливание). К оголовку сваи приварена пластина, центрально передающая горизонтальную нагрузку. Между упором и оголовком установлен гидродомкрат ДГ-50. В процессе испытания с помощью прогибомеров 6 ПАО-ЛИСИ контролировали горизонтальные

перемещения оголовка сваи в двух уровнях: по высоте: в уровне приложения нагрузки и в уровне грунта основания.

При испытаниях нагрузку прикладывали ступенями (300–400 кН при проведении испытаний на вертикальную нагрузку и 46,5 кН — на горизонтальную). На каждой ступени нагружения проводили выдержку при постоянной нагрузке до стабилизации деформаций, но не менее 60 мин. Отсчеты по прогибомерам считывали сразу после приложения нагрузки и последовательно через каждые 15 мин. выдержки.

В процессе испытаний контролировали усилие в домкрате по манометру и перемещения испытываемой и анкерных свай относительно поверхности грунта по двум прогибомерам. Результаты комплексного испытания свай задокументированы в таблицах и представлены в виде графиков зависимости перемещения свай от нагрузки.

В пункте «3.3 Результаты натуральных испытаний буроинъекционных свай» установлены закономерности деформирования буроинъекционных свай предложенной конструкции в натуральных условиях.

При проведении испытания свай №№ 1 и 2 на вдавливание была достигнута испытательная нагрузка 2196 кН, при этом вертикальные перемещения свай составили 7,04 и 3,09 мм соответственно. После разгрузки остаточные перемещения свай составили 2,0 и 0,64 мм соответственно (рис. 8–11).

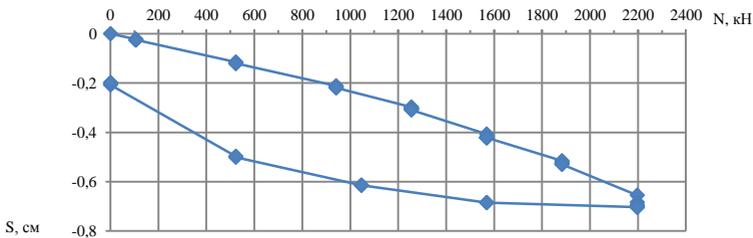


Рисунок 8 — Зависимость осадки сваи № 1 от вдавливающей нагрузки

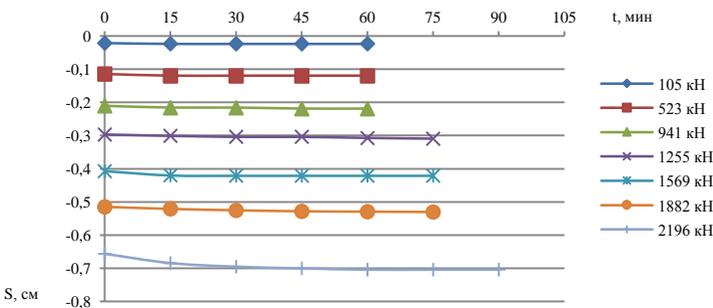


Рисунок 9 — Зависимость нарастания осадки сваи № 1 от времени

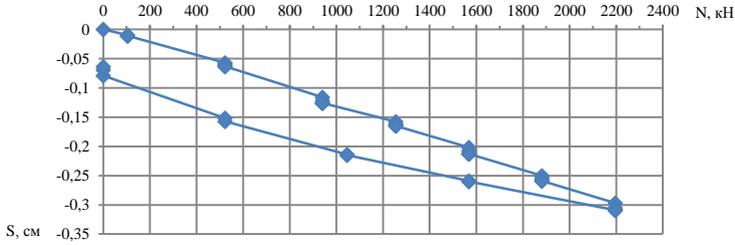


Рисунок 10 — Зависимость осадки сваи № 2 от вдавливающей нагрузки

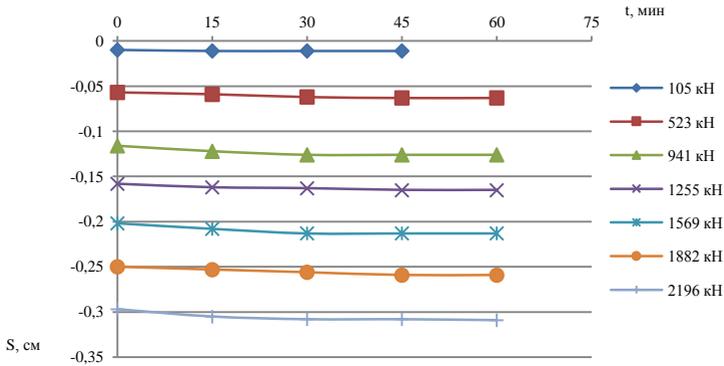


Рисунок 11 — Зависимость нарастания осадки сваи № 2 от времени

В соответствии с разработанной методикой выполнены испытания двух свай на вертикальное выдергивание. Расчетная испытательная нагрузка при вертикальном выдергивании на анкерные сваи (№№ 5 и 9) достигла 549 кН. При этом максимальные перемещения анкерных свай составили 2,15 и 1,81 мм соответственно (рис. 12–15).

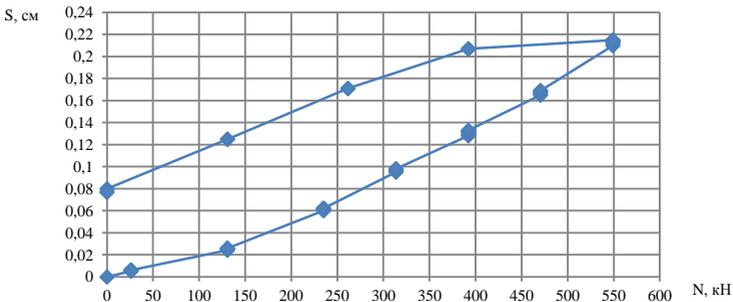


Рисунок 12 — Зависимость вертикального перемещения сваи № 5 от выдергивающей нагрузки

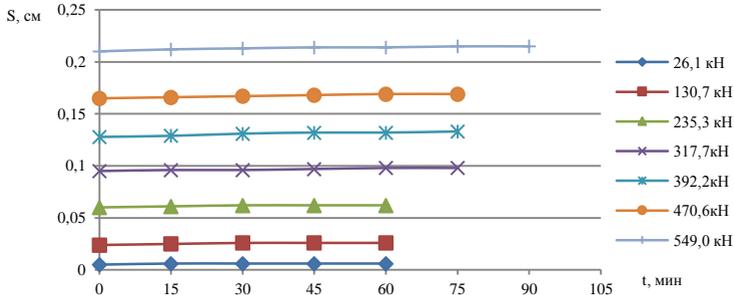


Рисунок 13 — Зависимость вертикального перемещения сваи № 5 от времени

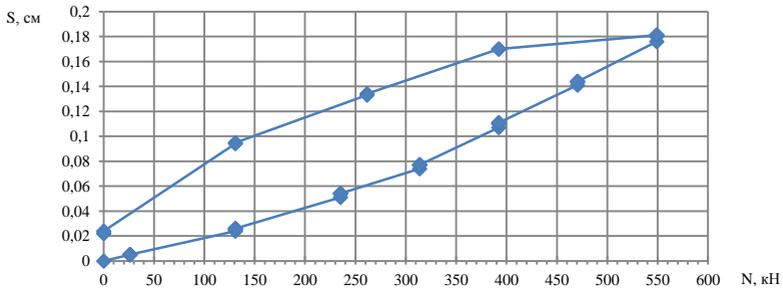


Рисунок 14 — Зависимость вертикального перемещения сваи № 9 от выдергивающей нагрузки

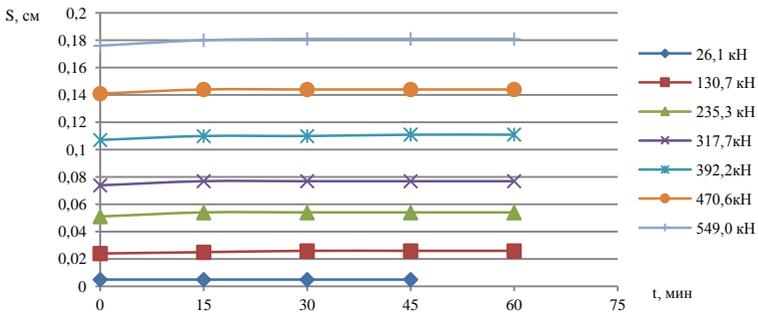


Рисунок 15 — Зависимость вертикального перемещения сваи № 9 от времени

Так как при проведении испытаний на вертикальную нагрузку не было достигнуто предельного состояния ни грунтового основания, ни испытываемых свай, то было принято решение испытать сваю № 2 на горизонтальную нагрузку.

До уровня нагружения 155 кН горизонтальные перемещения оголовка сваи носили практически линейный характер. Последующее увеличение нагрузки привело к заметному росту пластических деформаций грунта. Испытания были прекращены при величине горизонтальной нагрузки 232,5 кН, когда горизонтальные перемещения оголовка сваи в уровне грунта превысили 4 см (рис. 16–17).

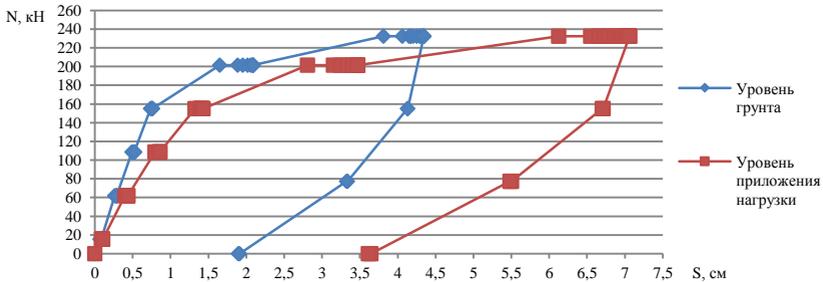


Рисунок 16 — Зависимость перемещения сваи № 2 от горизонтальной нагрузки

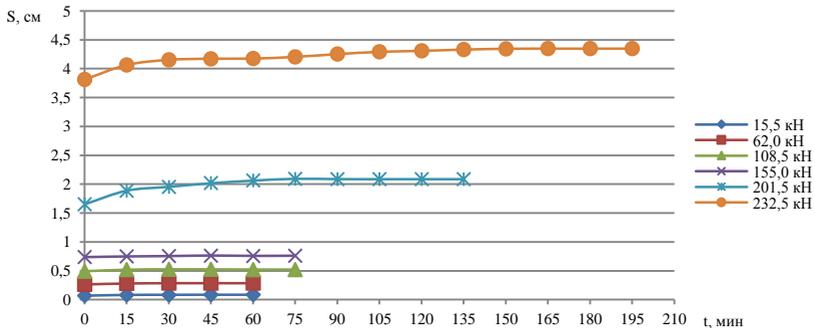


Рисунок 17 — Зависимость нарастания горизонтального перемещения сваи № 2 во времени

Натурными испытаниями доказано, что допустимая нагрузка на сваю с учетом коэффициента надежности: при вдавливающей нагрузке — 1830 кН (деформации не превысили 7 мм); при выдергивающей нагрузке — 458 кН (деформации не превысили 1 мм); при испытаниях на горизонтальную нагрузку — 168 кН.

В пункте «3.4 Анализ результатов по несущей способности буровишечных свай» выполнена оценка погрешностей результатов исследований. Каждый из использованных методов определения несущей способности не является абсолютно точным.

Относительные погрешности методов натуральных, лабораторных и аналитических испытаний буроинъекционных свай составляют 5%, 12% и 18% соответственно, что удовлетворяет требованиям технических расчетов и измерений и не превышают относительной погрешности в 20%.

**Глава 4 «Методика проектирования и опытно-промышленные работы по упрочнению грунтов буроинъекционными сваями»** состоит из пяти пунктов. В пункте **«4.1 Методика проектирования параметров буроинъекционных свай»** для практической реализации способа укрепления грунтов оснований фундаментов буроинъекционными сваями предложена методика проектирования включающая основные параметры их устройства. В соответствии с этой методикой расчет предусматривает поэтапное определения следующих параметров: давление нагнетания раствора; расстояние между скважинами; объем нагнетаемого раствора; максимально допустимое давление нагнетания; несущая способность буроинъекционной сваи по новой формуле.

В пункте **«4.2 Технологическая схема упрочнения оснований буроинъекционными сваями»** разработаны технологические схемы приготовления и нагнетания цементного, цементно-силикатного и глиноцементного тампонажных растворов.

В пункте **«4.3 Расчет параметров и технология укрепления грунтов при строительстве климатопавильона»** приведены общая характеристика грунтов; расчет параметров и технология укрепления грунтов основания фундамента буроинъекционными сваями. В основании плитного фундамента климатопавильона залегают слабые известняки с красно-коричневым суглинистым заполнителем в полутвердом состоянии мощностью 5 м. Для упрочнения этого основания принято инъектирование грунта цементным раствором через 36 скважин глубиной 3–5,5 м. Несущая способность этих свай по расчету равна 960 кН. Испытания двух свай показали, что их несущая способность составляет 1000–1050 кН и грунты закреплены до расчетных параметров. На буроинъекционные сваи установлен железобетонный плитный фундамент и выполнено строительство здания климатопавильона.

В пункте **«4.4 Укрепление разуплотненных грунтов основания свайных фундаментов больницы»** изложены результаты укрепления разуплотненных грунтов с помощью сооружения буроинъекционных свай. Всего принято 24 скважины, которые бурились через существующий ростверк и располагались между сваями. Несущая способность буроинъекционных свай по расчету равна 910 кН. В результате устройства свай средняя несущая способность каждой составила 700–820 кН. Это позволило успешно выполнить ремонт здания и дополнительно надстроить два этажа.

В пункте «**4.5 Упрочнение грунтов при реконструкции основания фундамента аварийного дома**» приведены инженерно-геологические условия, расчет технологических параметров и технология производства работ при упрочнении грунтов буроинъекционными сваями.

Для выполнения инъекционных работ по упрочнения грунтов при реконструкции основания фундамента аварийного дома № 29 по ул. Шевченко г. Луганска было пробурено 25 наклонных скважин глубиной 6 м каждая.

В результате устройства буроинъекционных свай нагрузка от надземной части здания передалась на установленные сваи и упрочненные грунты; деформационный процесс в основании сооружения и в строительных конструкциях стабилизировался, что позволило выполнить ремонт дома без отселения жильцов.

В пункте «**4.6 Оценка сравнительной экономической эффективности применения способа напорной инъекции раствора в режиме гидроразрыва**» определен экономический эффект от применения данного способа для упрочнения грунтов при реконструкции основания фундамента аварийного дома. Экономический эффект составил больше 1 млн. руб., при этом экономия на одном погонном метре достигает 7 тыс. руб.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Из множества специальных способов упрочнения слабых грунтов наиболее эффективно применение цементации в режиме гидрорасчленения грунта, что позволяет существенно изменить несущую способность грунтов основания фундамента;

2. Переход системы «основание-фундамент» в предаварийное и аварийное состояние наблюдается более чем на 80% обследованных объектах в Луганском регионе, что непосредственно связано с изменением консистенции и свойств грунтов и прогрессирует во времени на стадии инженерно-геологического обоснования и эксплуатации объекта;

3. Предложена конструкция и получено новое выражение для расчета несущей способности буроинъекционных свай с учетом совместной работы трубы, цементных уширений и консолидированного грунта;

4. Расчеты показали, что несущая способность сваи в основном определяется взаимодействием сваи с цементными уширениями. Таким образом, несущая способность буроинъекционной сваи выше в 4–5 раз по сравнению с буронабивной, а радиус действия сваи  $R$ , позволяет сократить количество свай под зданием в 3–4 раза;

5. Разработана новая методика определения несущей способности буронагнетательных свай с помощью лабораторных испытаний модели методом выдергивания;

6. В результате физического моделирования работы буронагнетательной сваи установлена степенная зависимость несущей способности сваи от коэффициента постели цементного раствора. При увеличении коэффициента постели цементного раствора с 0,122 до 0,212 и 0,383 несущая способность сваи увеличивается в 2,2 и 6,6 раза соответственно, что соответствует строительным требованиям;

7. Натурными испытаниями доказано, что несущая способность свай при вдавливающей нагрузке составляет 1830 кН, а деформации не превысили 7 мм. При выдергивающей нагрузке несущая способность сваи составила 458 кН, а перемещение не более 1 мм. При испытаниях на горизонтальную нагрузку несущая способность сваи составила 168 кН;

8. В соответствии с разработанной методикой проектирования обоснованы параметры грунтового основания фундаментов климатопавильона, аварийных больницы и дома, а также технологические схемы напорного нагнетания цементного раствора в грунт, что обеспечивает надежность строительства и эксплуатации здания, уменьшение количества свай в 3–4 раза и экономию на одном погонном метре упрочнения до 7 тыс. руб. Положительные результаты опытно-промышленных работ доказали высокую эффективность технологии буронагнетательного усиления оснований фундаментов различных конструкций в сложных инженерно-геологических условиях.

**Практические рекомендации.** Применение разработанной методики расчета параметров сооружения буронагнетательных свай при упрочнении грунтов оснований фундаментов обеспечит эффективность, надежность и безопасность при строительстве и реконструкции зданий.

**Перспективы дальнейших исследований.** Повышение точности расчета несущей способности буронагнетательной сваи, применение ресурсосберегающих инъекционных растворов, более детальное изучение расчетного сопротивления инъекционного раствора на боковой поверхности сваи.

### **Список работ, опубликованных автором по теме диссертации**

#### ***Монографии, брошюры, учебники и учебные пособия***

1. Збицкая, В. В. Буронагнетательная технология упрочнения оснований фундаментов: монография / П. Н. Должиков, В. В. Збицкая. — Ростов н/Д. : ДГТУ-принт, 2019. —174 с.

2. Рекомендации по ликвидации аварий жилых зданий и объектов социального назначения / Куркин Н. П. [и др]. — Донецк : Норд-пресс, 2014. — 52 с.

***Статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК при МОН Луганской Народной Республики***

3. Збицкая, В. В. Физическое моделирование работы буроинъекционной сваи в разуплотненных грунтах / П. Н. Должиков, В. В. Збицкая. // Сб. науч. трудов ДонГТУ. — Алчевск, 2013. — № 41. — С. 190–195.

4. Збицкая, В. В. Аналитическое исследование несущей способности буроинъекционной сваи / П. Н. Должиков, В. В. Збицкая. // Сб. науч. трудов ДонГТУ. — Алчевск, 2014. — № 1 (42). — С. 117–121.

5. Збицкая, В. В. Анализ ошибок, влияющих на несущую способность системы «основание-фундамент» / П. Н. Должиков, В. В. Збицкая. // Изв. ТулГУ. Науки о Земле. — 2016. — № 2. — С. 134–141.

6. Збицкая, В. В. Анализ показателей несущей способности буроинъекционных свай, полученных различными методами / В. В. Збицкая, В. В. Псюк. // Сб. науч. тр. ДонГТИ. Вып. 22 (65) — Алчевск : ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ», 2021. — С. 66–73.

7. Збицкая, В. В. Обоснование применения буроинъекционной технологии при упрочнении грунтов оснований эксплуатируемых строительных объектов / В. В. Збицкая, В. В. Псюк. // Сб. науч. тр. ДонГТИ. Вып. 28 (71) — Алчевск : ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ», 2022. — С. 113–118.

***Статьи в профессиональных журналах и научных сборниках***

8. Збицкая, В. В. О несущей способности буроинъекционных свай при реконструкции аварийных зданий / П. Н. Должиков, В. В. Збицкая. // Проблемы развития городской среды : Науч.-техн. сб. — К.:НАУ, 2014. — Вып.2 (12) — С. 135–142.

***Публикации апробационного характера, доклады на научных конференциях и другие научные публикации***

9. Збицкая, В. В. К вопросу усиления основания фундаментов аварийных зданий буроинъекционными сваями / В. В. Збицкая. // Совершенствование технологии строительства шахт и подземных сооружений : материалы междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов, посвященной 90-летию горного факультета ДонНТУ (04–05 апреля 2013 г.). Вып.19. — Донецк : «Норд-Пресс», 2013. — С. 47–49.

10. Збицкая, В. В. Анализ несущей способности буроинъекционных свай в разуплотненных грунтах / П. Н. Должиков, В. В. Збицкая. // Городская среда–XXI века. Архитектура. Строительство. Дизайн : сб. тез. докл. I междунар. науч.-практ. конгр. (10–14 февраля 2014 г.) — К. : НАУ, 2014. — С. 169–171.

11. Збицкая, В. В. Реконструкция фундамента жилого дома способом устройства буро-инъекционных свай / П. Н. Должиков, В. В. Збицкая, К. К. Кириак. // Проблемы горного дела и экологии горного производства : материалы IX междунар. науч.-практ. конф. (24–25 апреля 2014 г., г. Антрацит). — Донецк : Донбасс, 2014. — С. 67–71.

12. Збицкая, В. В. Совершенствование методики проектирования параметров буроинъекционных свай / П. Н. Должиков, В. В. Збицкая. // Строительство и архитектура–2015 : материалы междунар. науч.-практ. конф. ФГБОУ ВПО «Ростовский государственный строительный университет», Союз строителей южного федерального округа, Ассоциация строителей Дона (26–27 ноября 2015 г.). Том. I. — Ростов н/Д. : РГСУ, 2015. — С. 366–368.

13. Збицкая, В. В. Определение показателей несущей способности буро-инъекционных свай различными методами / В. В. Збицкая, В. В. Псюк. // Актуальные проблемы современной науки: взгляд молодых ученых : сб. тез. докл. междунар. науч.-практ. конф. (19 марта 2020 г.). — Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2020. — С. 77–78.

14. Збицкая, В. В. Аналитические исследования свойств грунтов и несущей способности буроинъекционных свай / В. В. Збицкая. // 65 лет ДонГТИ. Наука и практика. Актуальные вопросы и инновации : сб. тез. докл. юбил. междунар. науч.-техн. конф. (13–14 октября 2022 г.). Часть 2. — Алчевск : ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ», 2022. — С. 169–171.

## АННОТАЦИЯ

**Збицкая В. В. Обоснование несущей способности буроинъекционных свай при упрочнении грунтов основания фундаментов. — Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 25.00.22 — Геотехнология (подземная, открытая и строительная) — ФГБОУ ВО «Донбасский государственный технический университет». — Алчевск, 2023.

В диссертационной работе изложены результаты аналитического исследования свойств грунтов и получено новое выражение для расчета несущей способности буроинъекционных свай; установлено влияния совместной работы трубы, цементных уширений и консолидированного

грунта на несущую способность. Разработана методика лабораторного определения несущей способности буроинъекционных свай, экспериментально установлена зависимость несущей способности от коэффициента постели инъекционного раствора. Установлены закономерности деформирования буроинъекционных свай предложенной конструкции в натуральных условиях. В соответствии с разработанной методикой проектирования обоснованы параметры грунтового основания фундаментов климатопавильона, аварийных больницы и дома, а также технологические схемы напорного нагнетания цементного раствора в грунт, что обеспечивает надежность строительства и эксплуатации здания, уменьшение количества свай в 3–4 раза. Результаты исследований изложены в 15 научных работах.

**Ключевые слова:** упрочнение грунтов, буроинъекционные сваи, несущая способность, консолидация, коэффициент постели инъекционного раствора, цементные уширения.

## ANNOTATION

**Zbitskaya V. V. Justification of the bearing capacity of drilling-injection piles when strengthening the soils of the bases of foundations.** — The manuscript.

Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 25.00.22 — Geotechnology (underground, indoor and construction) — FSBEI HE «Donbass State Technical University». — Alchevsk, 2023.

In the dissertation work, the results of an analytical research of soil properties are presented and a new expression for calculating the bearing capacity of drilling-injection piles is justified; the influence of joint work of pipes, cement broadening and consolidated soil on the bearing capacity is established. A method of laboratory determination of the bearing capacity of drilling-injection piles has been developed, the dependence of the bearing capacity on the coefficient of subgrade of the injection mortar has been experimentally established. The regularities of deformation of the drilling-injection piles of the proposed construction under field conditions are established. In accordance with the developed design methodology, the parameters of the soil bases of the climate pavilion foundations, emergency hospitals and houses, as well as technological schemes of pressure injection of cement mortar into the soil, which ensures the reliability of the construction and operation of the building and a reduction in the number of piles by 3–4 times, are justified. The results of the research are presented in 15 scientific papers.

**Keywords:** soil hardening, drilling-injection piles, bearing capacity, consolidation, coefficient of subgrade of injection mortar, cement broadening.