

На правах рукописи



АВВАД Лана

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА
УЛУЧШЕНИЯ НАБУХАЮЩИХ ГРУНТОВ
ОСНОВАНИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ
СИРИЙСКОЙ АРАБСКОЙ РЕСПУБЛИКИ**

Специальность 2.1.2. Основания и фундаменты,
подземные сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2026

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

Научный руководитель: **Кондратьева Лидия Никитовна,**
доктор технических наук, профессор.

Официальные оппоненты: **Петряев Андрей Владимирович,**
доктор технических наук,
ФГБОУ ВО «Петербургский государственный
университет путей сообщения
Императора Александра I», кафедра «Строительство
дорог транспортного комплекса», старший научный
сотрудник, доцент;

Денисова Ольга Олеговна,
кандидат технических наук,
ООО «Бюро экспертизы и совершенствования
проектных решений Санкт-Петербург»,
заместитель директора по проектированию.

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ)**

Защита состоится «12» ноября 2026 года 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, ул. 2-я Красноармейская, д. 4, зал заседаний ученого совета (аудитория 220).

Тел.: (812) 316-58-73, rector@spbgasu.ru

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

Автореферат разослан «24» сентября 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



А.Н. Гайдо

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В Сирии (Сирийская Арабская Республика) ожидается начало работ по послевоенному восстановлению, поэтому реконструкция и строительство новых зданий и сооружений становятся национальной задачей. При этом необходимо учитывать инженерно-геологические условия страны, где часто приходится сталкиваться с вопросами проектирования и строительства оснований и фундаментов зданий и сооружений на набухающих грунтах.

При строительстве на подобных грунтах, необходимо учитывать проблематичность их свойств, а именно сезонные изменения объема, которые сопровождаются снижением прочностных характеристик. Несмотря на значительный прогресс в области проектирования на таких грунтах, строительство на набухающих грунтах по-прежнему сопряжено со многими трудностями. Они включают в себя учет местных условий, разработку новых технологий и материалов.

Таким образом, исследование влияния добавок полипропиленовых волокон и извести на свойства набухающих грунтов оснований зданий и сооружений Сирийской Арабской Республики является актуальной темой исследования.

Степень разработанности темы исследования. Исследованием свойств набухающих глинистых грунтов и разработкой методов их улучшения занимались многие ученые: Ананьев В.П., Габибов Ф.Г., Голли О.Р., Кульчицкий Л.И., Мустафаев А.А., Осипов В.И., Передальский Л.В., Соколов В.Н., Сорочан Е.А., Ким М. С., Тер-Мартirosян А.З., Тер-Мартirosян З.Г., Усъяров О.Г., Allman M.A., Bell F.G., Chen F.H., Cromko G.Y., Day R.W., Fityuş S.G., Holtz W.G., Jahangir E., Masrouri, Miller D.J., Nelson J.D., Nowamooz H., Smith D.W. и другие.

Исследованию характеристик набухающих глинистых грунтов в Сирии и разработке методов их улучшения посвятили свои работы Сирийские учёные: Абед А., Алафар Х. С., Аль-Абдулла А., Аль-Мансури А., Аль-Свайдани А., Альсусу М., Ахмед М. М., Ашрам М. Н., Коуса И., Мезиаб А., Омар М. Ш., Салим Б. и Хамуд И., и др.

В научной литературе описано множество методов укрепления набухающих грунтов. К таким методам относятся химическая стабилизация, механическое армирование, предварительное увлажнение, замена грунта с контролем уплотнения, контроль влажности и другие способы.

В современной геотехнической практике для армирования грунтов широко применяются геосинтетические материалы и волокна. Также применяется химическая стабилизация набухающих грунтов с использованием различных стабилизаторов, таких как зола, известь или цемент. Однако синергетический эффект, который позволяет комбинированный подход, даёт

возможность расширить область применения метода и адаптировать его под конкретные условия.

Обзор исследований набухающих грунтов, проводимых в таких странах, как Алжир, Бангладеш, Бразилия, Египет, Индия, Ирак, Испания, Канада, Китай, Малайзия, Марокко, Оман, Пакистан, Россия, Саудовская Аравия, Сирия, Судан, Танзания, Турция, Франция и другие показал, что для улучшения набухающих грунтов исследовались и другие материалы: золы-уноса рисовой шелухи, золы-уноса из бумажной промышленности; тройной состав: известь, цемент и золы-уноса; смесь извести с золой-уносом, микрокремнезём (Silica Fume); пуццолан, нанокальцинированная глина, наноизвесть, термически обработанная глина, гранитная крошка, порошок из пластиковых и гранитных отходов, отработанная гранитная пыль, кирпичная пыль, отходы водоочистной станции (известковый шлам), доменный шлак, растительные волокна (альфа, джута и сизаля) и другие.

Несмотря на наличие широкого спектра научных исследований, задача создания эффективных составов модифицированных добавок с учетом местных геотехнических особенностей набухающих грунтов и доступности сырьевых ресурсов остается перспективным направлением научных исследований и инженерных разработок.

Набухающие грунты в Сирии отличаются средней и высокой степенью набухания, а в некоторых случаях и очень высокой. Эти грунты распространены в основном в густонаселенных регионах, где ведется активное строительство. Близость карьеров по добыче известняка к строительным площадкам делает использование извести для стабилизации набухающих грунтов экономически выгодным. Для укрепления структуры и предотвращения хрупкости известкового грунта рассматривается возможность добавления полипропиленовых волокон (ППВ). Есть все основания предположить, что в результате взаимодействия добавок с грунтом создается композитная система с улучшенными структурно-механическими свойствами.

Цель исследования – совершенствование метода улучшения набухающих грунтов оснований зданий и сооружений Сирийской Арабской Республики для повышения несущей способности оснований зданий и сооружений и снижения их пластичности и набухаемости.

Задачи исследования:

1. Провести анализ существующих методов усиления оснований и фундаментов зданий и сооружений в условиях набухающих грунтов с целью оценки возможности применения смесей полипропиленовых волокон и извести для улучшения строительных свойств набухающих глинистых

грунтов, и необходимость совершенствования метода улучшения набухающих грунтов оснований зданий и сооружений Сирийской Арабской Республики.

2. Выполнить экспериментальные исследования влияния применения добавок на повышение несущей способности оснований зданий и сооружений, снижения их деформаций, характеристик пластичности, набухаемости и прочности набухающих глинистых грунтов.

3. Произвести оценку усиления набухающих глинистых грунтов на основании численного моделирования.

4. Разработать инженерный метод усиления оснований зданий и сооружений из набухающих глинистых грунтов с использованием композитных добавок на основе полипропиленовых волокон и извести.

Объект исследования – строительные свойства набухающих глинистых грунтов.

Предмет исследования – свойства набухающих грунтов, стабилизированных добавками полипропиленовых волокон и извести, в инженерно-геологических условиях Сирийской Арабской Республики.

Рабочая гипотеза – применение смесей полипропиленовых волокон и извести улучшает характеристики пластичности, набухаемости и прочности грунтов оснований зданий и сооружений, возводимых на набухающих грунтах в Сирийской Арабской Республике.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. Выявлены закономерности влияния совместного введения полипропиленовых волокон и строительной извести на основные геотехнические характеристики набухающих грунтов (прочность, набухание, пластичность). Выявлен синергетический эффект от введения 0,35% полипропиленовых волокон и 5% строительной извести.

2. Получены эмпирические формулы для расчета необходимой мощности слоя грунта, модифицированного композитной добавкой, позволяющие оптимизировать проектные решения при строительстве на набухающих грунтах.

3. Усовершенствован инженерный метод расчета усиления оснований зданий и сооружений, заключающийся в новой на основе предложенной геотехнологии: предварительной оценке необходимости улучшения грунта согласно разработанной таблице; расчете необходимой толщины слоя модифицированного грунта по полученным формулам; введении добавок по разработанным рекомендациям для грунтовых условий Сирийской Арабской Республики.

Теоретическая значимость данной работы заключается в развитии теоретических знаний об улучшении прочностных и деформационных характеристик набухающих грунтов оснований зданий и сооружений и дополнении

существующих положений новыми представлениями о возможности управления их свойствами путем модифицирования комплексной добавкой на основе полипропиленовых волокон и строительной извести.

Практическая значимость диссертационной работы заключается:

- в разработанных рекомендациях для предварительной оценки эффективности улучшения грунта в зависимости от концентрации добавок, приложенной нагрузки и внешних факторов (инфильтрация влаги, экранирование поверхности);
- в обосновании и экспериментальной верификации подобранного состава комплексных добавок полипропиленовых волокон и строительной извести, обеспечивающего максимальное улучшение физико-механических свойств набухающих глинистых грунтов.
- Предложенный метод усиления оснований зданий и сооружений позволит повысить надежность и оптимизировать проектные решения при строительстве на набухающих грунтах в условиях Сирийской Арабской Республики, а также в других странах с похожей геологией, таких как Йордания и Саудовская Аравия

Методология и методы исследований:

1. Анализ литературных источников: изучены работы, посвященные методам укрепления грунтов оснований зданий и сооружений на набухающих глинистых грунтах.

2. Геологические и климатические данные: проанализировано распространение набухающих глинистых грунтов и известняковых пород в Сирийской Арабской Республике.

3. Лабораторные эксперименты: проведены лабораторные эксперименты по оценке эффективности стабилизации набухающих глинистых грунтов, характерных для Сирии, с использованием смеси извести и полипропиленовых волокон в качестве модифицирующих добавок.

4. Численные эксперименты: выполнены численные эксперименты, направленные на разработку оценки необходимости укрепления набухающего грунта и прогнозирования необходимой мощности слоя модифицированного грунта.

5. Инженерный метод: разработан инженерный метод усиления оснований зданий и сооружений из набухающих глинистых грунтов с использованием композитных добавок.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты экспериментальных исследований влияния различных сочетаний полипропиленовых волокон и извести на геотехнические свойства набухающих глинистых грунтов.

2. Оптимальное соотношение компонентов композиционных добавок для улучшения грунтов, используемых в качестве оснований зданий и сооружений, в инженерно-геологических условиях Сирийской Арабской Республики.

3. Результаты численных экспериментов, направленных на выявление общих закономерностей улучшения грунтов по разработанному методу.

4. Рекомендации по оценке необходимости улучшения грунта, представленные в виде таблиц, а также формулы для прогнозирования требуемой мощности модифицированного слоя грунта.

5. Разработанный и адаптированный для инженерно-геологических и климатических условий Сирии метод укрепления набухающих глинистых грунтов с использованием смесей полипропиленовых волокон и извести.

Область исследования соответствует требованиям паспорта специальности 2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения, пункт 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.)».

Степень достоверности результатов исследований и выводов, представленных в диссертации, подтверждаются использованием положений строительной механики, механики грунтов, теории пластичности, теории упругости и методов математического анализа. Кроме того, достоверность работы обеспечивается достаточным количеством лабораторных и численных экспериментов, проведенных на набухающих грунтах, отобранных в Сирии; использованием стандартных методик и нормативных документов при проведении всех этапов исследований, многоступенчатая статистическая обработка экспериментальных данных, включающая статистический анализ. Результаты статического анализа свидетельствуют о хорошей согласованности расчетных значений с результатами экспериментов и результатами численных экспериментов.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: 2-я Международная научно-практическая конференция по механике грунтов, геотехнике и фундаментостроению (GEOMOS26 - Интеллект на страже механической безопасности), (Москва, 2026 г.); 6-ая Международная конференция по ГИС и геоинформационному зонированию для смягчения последствий землетрясений (GIZ), (Алматы, Казахстан, с 28 по 30 августа 2025 года); 5-ая Международная научно-практическая конференция KAZGOR 2025, посвященной 95-летию зарождения проектного дела в Республике Казахстан, Алматы: 22-23 мая 2025 года, проектная академия «KAZGOR»); Международная научно-техническая конференция «Современные методы

проектирования подземного строительства и реконструкции оснований фундаментов (GFAC 2024)» (г. Санкт-Петербург, СПбГАСУ с 23 по 25 декабря 2024 г.); Всероссийская конференция с международным участием «Фундаменты глубокого заложения и проблемы геотехники территорий», посвященной 90-летию со дня рождения Бартоломея А. А. (Пермский национальный исследовательский политехнический университет с 29 по 31 мая 2024 г.) Пермь, Россия; Международная конференция "Satbayev International Conference 2024", посвященная 90-летию основания первого технического университета, Казахстан, Алматы, Satbayev University с 11–12 апреля 2024; 2-ая Международная научно-техническая конференция «Использование современных моделей в механике грунтов, геотехнических расчетах и фундаментах», посвященная памяти профессора Д.М. Шапира. (Воронежский государственный технический университет, 16–18 октября 2023 г.) Воронеж, Россия ; 17-ая Азиатская региональная конференция по механике грунтов и геотехнике (17ARC) (ISSMGE), (Астана, Казахстан, 14–18 августа 2023), доклад занял третье место среди стендовых докладов; Международный семинар по геотехнической инженерии для культурного наследия- Geo-SAKURA 2023 ATC19_2023_ (ISSMGE), (г. Нара, Япония, 15–16 апреля 2023 г.), Международная научно-практическая конференция «Наука и бизнес: инновации в производство», Кокшетауский Университет имени Уалиханова, Кокшетау, Казахстан, 4 марта 2022 г. и другие.

Личный вклад заключается в постановке цели и задач исследования; разработке методологии их решения, включающей проведение лабораторных и численных экспериментов с набухающими глинистыми грунтами; разработке алгоритма оценки необходимости улучшения грунта; разработке метода укрепления набухающих грунтов в условиях Сирийской Арабской Республики, учитывающего особенности местной геологии; решении серии задач для получения эмпирических формул, позволяющих рассчитать необходимую мощность модифицированного грунта в зависимости от его свойств, нагрузки на основание и эксплуатационных условий; верификации результатов путём сопоставления расчётных данных с результатами лабораторных и численных экспериментов.

Публикации. По результатам диссертационных исследований опубликовано 10 научных работ, в том числе: 3 статьи – в изданиях, утвержденных перечнем ВАК РФ, и 1 статья – в издании, индексируемом международной базой данных Scopus.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и приложение. Работа изложена на 157 страницах машинописного текста, содержит 46 рисунков

и 32 таблиц. Список использованных источников состоит из 175 источников (из них 114 на иностранных языках)

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, её научная и практическая значимость, а также формулируются цель и задачи исследования.

В первой главе представлен обзор геотехнических проблем, с которыми сталкиваются строители, возводя здания и сооружения на набухающих грунтах. Рассмотрены основные методы укрепления грунтов, которые используются для строительства на таких основаниях. Особое внимание уделяется научным исследованиям, посвященным химической стабилизации, механическому армированию и комбинированным способам укрепления грунтов.

Исследования подтвердили, что химическая стабилизация набухающих грунтов с помощью различных добавок, таких как зола, известь и цемент, значительно снижает их склонность к набуханию. Для механического армирования грунта в практике строительства используются разнообразные геосинтетические материалы и различные типы волокон, что повышает несущую способность и снижает деформации оснований зданий и сооружений.

Однако наиболее перспективными представляются комбинированные подходы, в которых механическое воздействие служит основой для последующего химического закрепления. Такие комбинации открывают новые горизонты в области стабилизации и позволяют адаптировать её к конкретным условиям. Анализ предыдущих исследований показывает, что главное преимущество комбинированных методов — это их способность создавать синергетический эффект, когда совместное использование разных подходов даёт результат, который превосходит результат каждого метода по отдельности. Синергетический эффект позволяет одновременно решать несколько задач по улучшению состояния набухающих грунтов оснований зданий и сооружений: снижать их пластичность, повышать несущую способность и снижать их деформации набухания.

Мировая практика показывает, что исследования методов укрепления грунтов, особенно при строительстве на специфических набухающих грунтах, остаются актуальными. При этом важно учитывать местные геотехнические особенности таких грунтов.

Анализ научных исследований, посвящённых набухающим грунтам, даёт основания полагать, что использование смесей, состоящих из полипропиленовых волокон и извести может значительно улучшить пластичность, набухаемость и прочность оснований зданий и сооружений, возводимых на таких грунтах в Сирийской Арабской Республике.

Во второй главе рассматриваются инженерно-геологические особенности набухающих грунтов и климатические данные, характерные для Сирийской Арабской Республики. Также представлены материалы и методы, использованные в исследовании.

Набухающие грунты представляют собой серьезную угрозу для инфраструктуры Сирии. В этой главе приводятся сведения о распространении набухающих глинистых пород в стране, что позволяет глубже понять и оценить масштабы этой проблемы.

Согласно данным Главного геологического управления при Министерстве нефти Сирийской Арабской Республики, глинистые грунты широко распространены в различных частях страны, залегая на различных геологических уровнях. Они особенно часто встречаются в провинциях Кунейтра, Дер'а, Сувейда, Хама и Ал-Габ, а также на средиземноморском побережье, в центральном и северо-восточном регионах. В целом, глинистые грунты покрывают около 10,5% территории Сирии. Хотя эта доля может показаться небольшой по сравнению с общей площадью суши, она приобретает особое значение в контексте густонаселённых районов страны.

Также согласно информации главного геологического управления Сирийской Арабской Республики, в различных частях страны, особенно на востоке, в центре и на севере, имеются карьеры по добыче известняка и доломитовой известняковой крошки. Геологические запасы неразработанного известняка оцениваются примерно в $12 \cdot 10^9 \text{ м}^3$, что делает его доступным и недорогим.

В диссертации приведены три карты: распространения набухающих грунтов в Сирии; распределения зон расселения в Сирии; и залегания известняковых пород в Сирии. Анализ этих карт показывает, что густонаселённые районы, где ведётся активное строительство, совпадают с местами, где часто встречаются набухающие грунты. В этих же районах расположены карьеры по добыче известняка. Близость карьеров к строительным площадкам делает использование известняковой крошки для стабилизации набухающих грунтов экономически выгодным решением. Это позволяет значительно сократить транспортные расходы на доставку материала от карьера к месту строительства.

Анализ среднесуточных температур воздуха, среднего количества осадков и числа дней с осадками по месяцам в провинциях Дар'а, Хомс, Латакия и Халеб, по данным Всемирной метеорологической организации (WMO), показывает, что можно выделить два основных сезона: сезон дождей, который длится с ноября по май, и сухой сезон, начинающийся в июне и заканчивающийся в октябре. Погодные и климатические условия в Сирии, характеризующиеся резким переходом от сезона дождей к засухе

ливому периоду, играют ключевую роль в возникновении деформаций, вызванных набуханием грунтов. Эти деформации могут нанести ущерб зданиям и сооружениям, особенно если они построены на фундаментах мелкого заложения.

Отбор образцов грунта для дальнейшего исследования

В рамках исследования используется сравнительный экспериментальный метод. Он предполагает проведение лабораторных экспериментов на необработанных и обработанных образцах грунта, которые подвергаются определенным воздействиям. Полученные результаты сравниваются, и на их основе делаются выводы.

Для изучения эффективности применения добавок к набухающим грунтам необходимо сформировать репрезентативную выборку, которая должна отражать весь спектр возможных инженерно-геологических условий. Отбор образцов должен обеспечить возможность исследовать эффективность добавок в широком диапазоне набухающих свойств грунта. В этом разделе обосновываются критерии и представляются результаты формирования коллекции образцов для дальнейших экспериментов.

Для проведения дальнейших исследований была отобрана репрезентативная выборка из четырех образцов набухающих грунтов, которые были взяты из разных регионов Сирии: южно-западного, среднего и северо-западного. Основным критерием отбора послужили значения относительной деформации набухания (ϵ_{sw}), которые позволили охватить широкий диапазон интенсивности этого процесса — от умеренного до интенсивного.

Основные геотехнические свойства отобранных образцов набухающего глинистого грунта представлены в таблице 1. Созданная коллекция образцов охватывает различные категории набухающих грунтов с точки зрения их деформационных свойств.

Параметры набухания отобранных образцов следующие: относительная деформация набухания (ϵ_{sw}) варьируется от 9,8% для образца с умеренным набуханием до 18,2% для образца с интенсивным набуханием. Соответствующие значения давления набухания (P_{sw}) находятся в диапазоне от 133 кПа до 224 кПа. Число пластичности (I_p) — от 34,5% до 58,3%.

Для отобранных образцов грунтов были определены границы зоны набухания H_{sw} в соответствии с требованиями пункта 6.2.14 СП 22.13330.2016 для двух расчетных случаев:

- В случае инфильтрации влаги нижняя граница зоны набухания устанавливается на глубине, где суммарное вертикальное напряжение $\sigma_{z,tot}$ (рассчитанное в соответствии с пунктом 6.2.13 СП 22) равно давлению набухания P_{sw} .
- Если поверхность экранирована, нижняя граница принимается равной 5 метрам.

В диссертации представлены графики, полученные в результате аналитических расчетов, которые демонстрируют зоны набухания для образцов I, II, III и IV при пяти уровнях нагрузок на подошву фундамента.

В экспериментах использовались два основных материала для стабилизации: известь и полипропиленовые волокна (рисунок 1). В качестве основного вяжущего вещества была выбрана негашёная известь. Сырьё для её производства – известняк, было добыто на месторождениях в провинции Хама, расположенной в Сирии.

Таблица 1 – Основные свойства изучаемых образцов глинистых грунтов

Характеристика грунта	Образец грунта			
	I	II	III	IV
Влажность, W , %	14,10	13,60	11,90	15,20
Удельный вес частиц грунта, γ_s , кН/м ³	27,10	27,00	26,90	26,80
Удельный вес грунта, γ , кН/м ³	18,10	17,60	17,70	17,90
Удельный вес сухого грунта, γ_d , кН/м ³	15,86	15,49	15,82	15,54
Влажность на границе текучести, W_L , %	58,40	67,00	79,40	94,7
Влажность на границе раскатывания, W_P , %	23,8	27,00	30,80	36,40
Число пластичности, I_P , %	34,5	40,00	48,60	58,30
Показатель текучести, I_L , %	-0,28	-0,34	-0,39	-0,24
Относительная деформация набухания, ε_{sw} , %	9,80	12,50	15,30	18,20
Давление набухания, P_{sw} , кПа	133	164	183	224
Сцепление, c , КПа	38	52	84	110
Угол внутреннего трения, φ , (°)	19	13	16,2	8

ППВ были выбраны в качестве армирующего компонента. Этот материал обладает уникальными свойствами: высокой прочностью на растяжение, химической инертностью в щелочной среде, устойчивостью к коррозии и воздействию грунтовой влаги, а также доступностью по цене. Эти качества делают ППВ перспективным материалом для стабилизации грунтов.

В диссертации приведены химический состав извести и основные физико-механические характеристики используемых полипропиленовых волокон, такие как длина, диаметр, плотность и предел прочности на растяжение.



Рисунок 1 – Материалы, используемые в экспериментах

В рамках данного исследования разработана и реализована программа лабораторных экспериментов, направленных на оценку эффективности стабилизации набухающих глинистых грунтов, характерных для Сирии. Эксперименты проводились по требованиям нормативной литературы с использованием образцов грунта, содержащих различные добавки.

Для комплексного изучения воздействия извести и полипропиленовых волокон (ППВ) создана матрица из 20 смесей опытных композиций. Номенклатура образцов включала:

- Контрольный образец: грунт без модифицирующих добавок.
- Серия 1 (влияние ППВ): четыре состава с различной концентрацией ППВ (0,05%, 0,15%, 0,25%, 0,35%) при отсутствии извести.
- Серия 2 (влияние извести): три состава с различным содержанием извести (2%, 5%, 8%) при нулевой концентрации ППВ.
- Серия 3 (комбинированное воздействие): двенадцать составов, представляющих собой все возможные комбинации четырех дозировок извести (0%, 2%, 5%, 8%) и пяти концентраций ППВ (0%, 0,05%, 0,15%,

0,25%, 0,35%), за исключением контрольного образца и уже учтенных составов в сериях 1 и 2.

Смеси приготовлены с заданной оптимальной влажностью (W_{opt}) и максимальной плотностью сухого грунта (ρ_{dmax}) с применением уплотнителя Проктора по ГОСТ Р 70456–2022. Методика позволила получить цилиндрические образцы одинаковых размеров с заданными физическими характеристиками.

Перед испытаниями образцы были выдержаны в климатической камере в течение 3, 7, 14, 21 и 28 суток. Это дало возможность проследить динамику изменения прочностных и деформационных свойств грунта, а также оценить, как его свойства стабилизируются с течением времени.

Для каждой из сравниваемых комбинации формовалось не менее трёх образцов, что обеспечивало статистическую достоверность полученных данных и позволяло оценить вариацию полученных показателей в зависимости от состава и содержания модифицирующих добавок. Коэффициенты вариации по всем сериям испытаний не превышают 3,95%, что подтверждает достоверность полученных данных и свидетельствует о высокой повторяемости результатов.

В третьей главе представлены результаты лабораторных исследований влияния комбинированных добавок извести и ППВ на основные характеристики глинистого набухающего грунта. Эти исследования позволили оценить эффективность использования модификаторов и выявить закономерности изменения свойств грунта в зависимости от дозировки и времени отверждения.

В исследовании основное внимание уделяется следующим группам свойств:

1) Характеристики уплотненного грунта: Представлены результаты определения максимального удельного веса сухого грунта (γ_{dmax}) и оптимальной влажности (W_{opt}) для 20 опытных композитов, изготовленных из четырех типов грунтов. Эти параметры имеют важное значение для понимания структурных изменений, происходящих в грунте под воздействием добавок, и будут использованы при подготовке образцов грунта для последующих испытаний.

В качестве примера на рисунке 2 изображена 3D-диаграмма зависимости максимального удельного веса сухого грунта (γ_{dmax}) и оптимальной влажности (W_{opt}) от различных сочетаний извести и ППВ для грунта III.

Анализ результатов экспериментов позволил выявить следующие закономерности:

1. Добавление извести к четырем различным типам грунта способствует увеличению оптимальной влажности и снижению максимального удельного веса сухого грунта. Данное явление можно объяснить тем, что

удельный вес извести ниже, чем у грунта, а её водоудерживающая способность выше.

2. При добавлении ППВ оптимальное содержание воды (W_{opt}) в набухающем грунте, стабилизированном известью, остаётся относительно постоянным с увеличением количества ППВ. В то же время максимальный удельный вес сухого грунта (γ_{dmax}) постепенно уменьшается. Однако в целом эти изменения были незначительными. Это может быть связано с относительно низким содержанием ППВ, которые добавлялись в смесь. Кроме того, упругие свойства ППВ позволяют им поглощать часть энергии уплотнения, что затрудняет процесс уплотнения смеси.

3. Использование извести и ППВ в сочетании дает синергетический эффект, снижая максимальную плотность сухого грунта и увеличивая его оптимальную влажность. Например, применение комбинации И5-ППВ0,35 способствовало повышению оптимальной влажности (γ_{dmax}) на 8,8–14,4% и снижению максимального удельного веса сухого грунта (W_{opt}) на 4,2–7,2% по сравнению с исходными значениями.

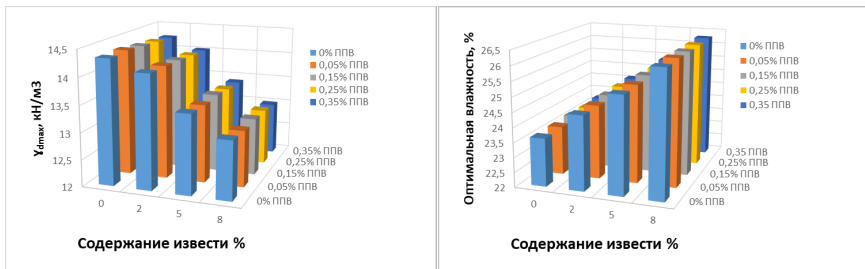


Рисунок 2 – Зависимость максимального удельного веса сухого грунта (γ_{dmax}) и оптимальной влажности (W_{opt}) от различных сочетаний извести и ППВ для грунта III

2) Параметры пластичности: Представлены результаты эксперимента, целью которого было установить количественные взаимосвязи между дозами компонентов смеси (известь и ППВ) и основными параметрами пластичности: влажностью на границе текучести (W_L), влажностью на границе раскатывания (W_P) и числом пластичности (I_P).

Для достижения этой цели в ходе эксперимента было проведено 400 стандартных испытаний для каждого из этих параметров. Эксперименты проводились на четырёх образцах грунта с 20 различными концентрациями добавок и пяти периодах отверждения. Полученные результаты позволили оценить эффективность разработанных композиций в снижении пластических свойств грунтов, что, в свою очередь, способствует улучшению их геотехнических характеристик.

В качестве примера на рисунке 3 показаны 3D-диаграммы зависимости влажности на границе текучести (W_L), влажности на границе раскатывания (W_P) и числа пластичности (I_P) для грунта III от содержания извести.

Анализ результатов экспериментов позволил выявить следующие закономерности:

1. Смесь извести и полипропиленового волокна значительно снижает предел текучести и повышает предел раскатывания, что, приводит к уменьшению индекса пластичности. Эта комбинация позволяет эффективно преобразовать все грунты I-IV в категорию слабонабухающих, что достигается благодаря одновременной химической и структурной стабилизации.

2. Оптимальной для стабилизации исследуемых грунтов оказалась комбинация И5-ППВ0,35. Благодаря этому сочетанию удалось значительно снизить показатель пластичности (I_P) для грунтов I, II, III и IV типов на 86,1%, 84,5%, 82,9% и 79,6% соответственно.

3. Для достижения максимального эффекта снижения пластичности необходимо обеспечить полный 28-суточный период отверждения. Однако заметное улучшение свойств наблюдается уже в первые 14 суток.

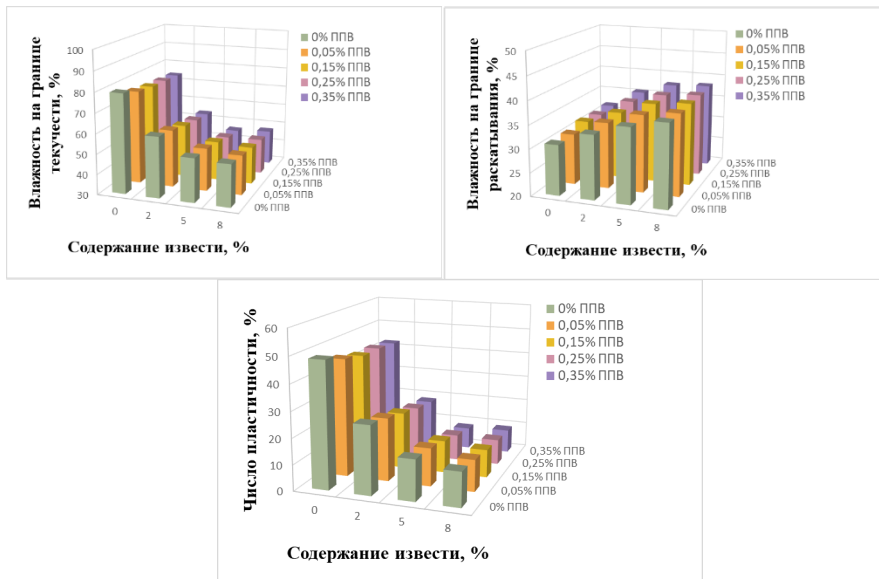


Рисунок 3 – зависимость влажности на границы текучести и раскатывания (W_L, W_P) и числа пластичности (I_P) для грунта III от содержания извести и ППВ

3) Параметры набухания: оценка эффективности стабилизации набухающих грунтов требует комплексного анализа давления набухания (P_{sw})

и относительной деформации набухания (ϵ_{sw}). Эффективность стабилизации оценивалась в зависимости от состава композиции и периода отверждения. Эксперименты показали значительное влияние комбинированных добавок на характеристики набухания грунтов.

В качестве примера показан грунт III после 28 дней отверждения. На рисунке 4 представлены диаграммы, которые показывают зависимость давления набухания (P_{sw}) и относительной деформации набухания (ϵ_{sw}) от известковых добавок и ППВ.

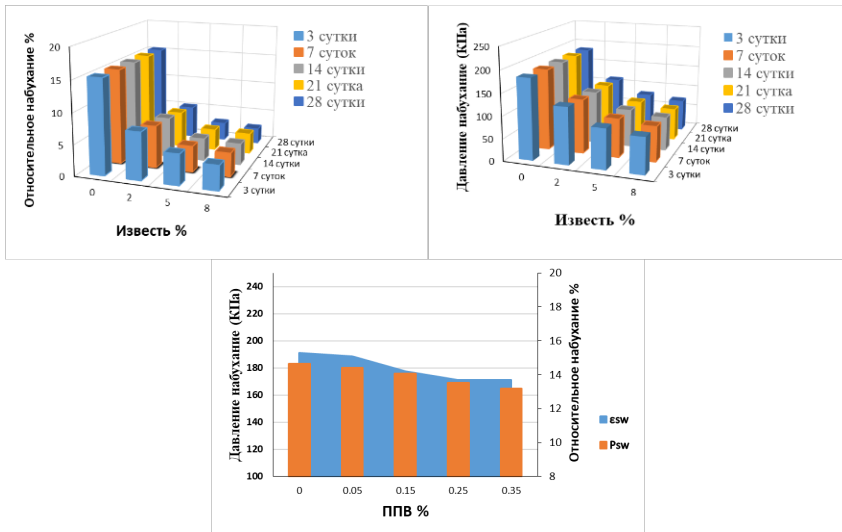


Рисунок 4 – Зависимости влияния извести и ППВ на параметры набухания грунта III

Все результаты исследования представлены в виде таблиц и 3D-диаграмм в диссертации. Анализ этих результатов позволил сделать несколько выводов:

1. Увеличение дозировки извести свыше 5% без армирования не приводит к значительному повышению эффективности. Разница в снижении давления набухания между составами с 5% и 8% извести составляет всего 3,8–6,1%, а разница в снижении относительного набухания составляет всего 2,4–3,3% в зависимости от типа грунта.

2. Армирование полипропиленовым волокном без известковых добавок оказывает умеренное, но статистически значимое снижение параметров набухания грунтов. При максимальной концентрации волокон 0,35%

отмечено снижение давления набухания для разных грунтов на 9,8–13% и относительного набухания на 10,2–11,2% соответственно.

3. Степень снижения давления набухания и относительного набухания существенно зависит от исходного содержания извести в грунте. Однако при всех концентрациях извести отмечается плавное уменьшение этих параметров с увеличением количества ППВ. Армированный волокнами известковый грунт начинает вести себя как композитный материал, в котором волокна, обладающие высокой прочностью на растяжение, обеспечивают грунту повышенную устойчивость к набуханию.

4. Композиция И5-ППВ0,35 обладает максимальной технико-экономической эффективностью. Она обеспечивает значительное снижение параметров набухания (P_{sw} до 91%, ε_{sw} до 95%) при оптимальном расходе материалов. Это свидетельствует о том, что дозировка извести на уровне 5% гарантирует полное протекание катионного обмена и полное использование пуццоланового потенциала грунта.

5. Эффективность стабилизации оказалась обратно пропорциональной их исходным значениям. Хотя для всех типов исследованных грунтов наблюдалось значительное уменьшение набухания, грунты с более высокими начальными показателями, такие как грунты III и IV типов, продемонстрировали меньший процент снижения. Например, при времени отверждения 14 суток относительное набухание (ε_{sw}) для грунтов I, II, III и IV типов снизилось на 92,9, 87,2, 81,7 и 77,5%, а давление набухания (P_{sw}) уменьшилось на 87,2, 73,8, 57,4 и 62,9% , соответственно.

6. Для достижения максимального эффекта от использования оптимальной композиции И5ППВ0,35 необходимо выдержать полный 28-дневный период отверждения. Однако значительное улучшение свойств до 80–90% от максимального эффекта наблюдается уже в первые 14 суток.

3) Характеристики сдвиговой прочности: Анализ результатов исследования показал, что добавление извести в грунт без добавления полипропиленовых волокон приводит к увеличению угла внутреннего трения (φ) на 62,31–95,06%. Наиболее заметный рост наблюдается при увеличении концентрации извести с 2% до 5%. Дальнейшее повышение концентрации до 8% приводит к незначительному увеличению угла трения (1–3%).

Удельное сцепление (C) изменяется нелинейно. После 28 дней набора прочности оно резко возрастает, достигая максимума на 136,45–154,62% при концентрации извести в 5%. Однако при увеличении дозировки до 8% сцепление начинает снижаться. Избыток извести (8%) нарушает структуру грунта и уменьшает эффективность цементирующих соединений. Диаграммы, иллюстрирующие влияние извести на параметры C и φ , представлены на рисунке 5.

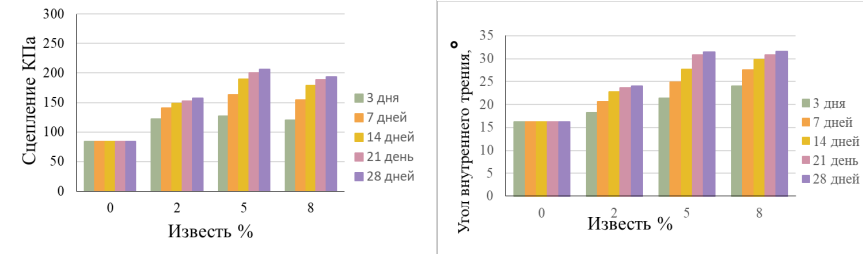


Рисунок 5 – Влияние содержания извести на удельное сцепление C и угол внутреннего трения φ для грунта III

Исследование воздействия ППВ на прочность грунта без добавления извести показало, что угол внутреннего трения и удельное сцепление постепенно возрастают. Максимальный прирост в процентах наблюдался при концентрации волокон 0,35% и составил от 35,00 до 41,54% для угла внутреннего трения и от 20,82 до 28,42% для удельного сцепления. Важно отметить, что при более высоких концентрациях волокон (0,25–0,35%) интенсивность роста несколько снижается. Зависимости прочностных характеристик от содержания ППВ представлены на рисунке 6.

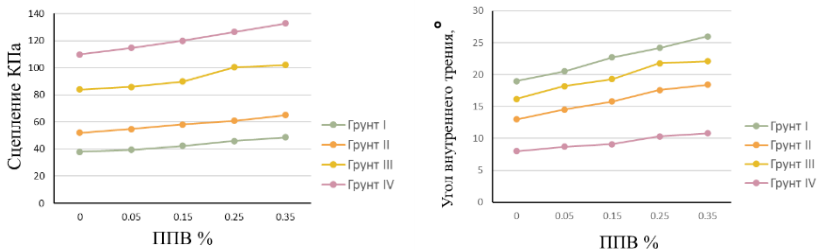
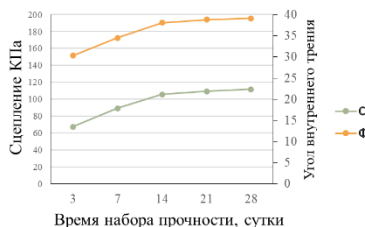


Рисунок 6 – Влияние содержания ППВ на удельное сцепление C и угол внутреннего трения φ

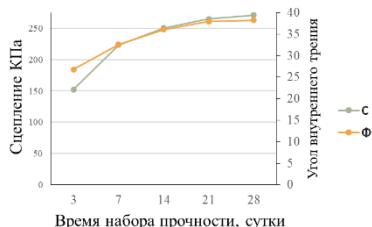
Экспериментальное исследование выявило, что сочетание извести и ППВ оказывает значительное влияние на прочность грунта при сдвиге. Обнаружено, что изменение процентного содержания этих компонентов существенно влияет на величину удельного сцепления (C) и угла внутреннего трения (φ). Эта зависимость прослеживается на всех этапах набора прочности грунта.

Увеличение содержания извести приводит к первоначальному увеличению прочности, за которым следует небольшое снижение. Максимальный прирост прочности наблюдается при содержании извести 5% и ППВ

0,35%. В этом случае увеличение удельного сцепления (C) составляет от 179,47 до 237,69%, а увеличение угла внутреннего трения (ϕ) – от 106,32 до 135,19% по сравнению с контрольными образцами без добавок (И0-ППВ0). Графики влияния времени затвердевания на характеристики сдвиговой прочности грунтов I и III для оптимальной комбинации И5-ППВ0.35, представлены на рисунке 7.



Грунт I



Грунт III

Рисунок 7 – Влияние времени затвердевания на удельное сцепление C и угол внутреннего трения ϕ для оптимальной комбинации И5-ППВ0.35

Все изученные грунты демонстрируют значительное улучшение свойств в течение первых 14 дней. Затем темпы улучшения замедляются. Увеличение времени отверждения до 28 дней, не приводит к значительному улучшению. Таким образом, 14 дней можно считать достаточным периодом для набора прочности.

В четвёртой главе представлены результаты численных исследований, на основе которых разработан метод усиления набухающих глинистых грунтов с применением добавок смесей полипропиленовых волокон и извести.

Моделирование задачи исследования на основе полученных экспериментальных результатов: в данном разделе представлены результаты разработки и верификации численной модели, предназначенной для описания поведения фундаментов, установленных на улучшенных набухающих грунтах. Модель создана в программном комплексе Plaxis 2D на основе результатов, полученных в ходе лабораторных испытаний, описанных в главе 3 диссертации. В таблице 2 представлены геотехнические характеристики улучшенного грунта, использованные в численных экспериментах. Выбор плоской деформации обусловлен тем, что нагрузка рассматривается в одной плоскости, перпендикулярной продольной оси здания. Это делает за-

дачу корректной для двумерной аппроксимации. Конечно-элементное моделирование исследуемого грунта было выполнено с использованием модели Mohr Coulomb (MC), адаптированной к особенностям глинистого грунта, учётом давления набухания, и введением относительной деформации набухания как внешнего воздействия.

Таблица 2 – Геотехнические показатели улучшенного грунта, использованные в численных экспериментах

Показатель	Образец I	Образец II	Образец III	Образец IV
Относительная деформация набухания, %	0,40	1,20	2,10	3,60
Давление набухания, кПа	12	37	72	87
Сцепление, кПа	112	183	271,1	344
Угол внутреннего трения, °	29	22	38,2	14

Расчётная схема имела симметричную форму, глубина расчётной области достигала 12 метров. В центре массива находилась жёсткая фундаментная плита размером 3х2 м., заглублённая на 2 м. ниже нулевой отметки. В расчётах использовалась осевая симметрия для снижения времени вычислений.

Проведены численные эксперименты, направленные на изучение особенностей поведения набухающих оснований. Исследование было разделено на четыре группы в зависимости основных параметров:

1. Грунтовые условия: рассматривались четыре типа набухающих глин: I, II, III и IV.

2. Нагрузка: выбрано пять уровней внешнего давления, которые отражают различные эксплуатационные ситуации. Эти уровни давления составили 100, 150, 200, 250 и 300 кПа.

3. Гидрологический режим: исследованы два варианта: свободное увлажнение и экранирование поверхности.

4. Вариант усиления основания: исследовались два расчетных случая:

- основание из естественного грунта: для оценки деформаций массива грунта.
- основание с частичной заменой грунта: для определения необходимой глубины усиления.

В общей сложности было проведено 80 численных исследований, которые охватили возможные комбинации указанных выбранных параметров.

На рисунке 8 показаны результаты численного эксперимента для образца IV при давлении 100 и 250 кПа в условиях инфильтрации влаги и экранирования поверхности при частичном улучшении. Здесь представлены графики деформации поверхности и изополя перемещений грунта, полученные при минимальном частичном улучшении, которое позволило снизить деформации подъёма до предельного значения – $\delta \leq 25$ мм.

Анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы:

1. В естественных условиях все исследуемые грунты демонстрируют значительные вертикальные деформации при набухании, что превышает предельные значения, регламентируемые нормативными документами.

2. Подъем возрастает с увеличением относительной деформации набухания (ε_{sw}) и давления набухания (P_{sw}) и уменьшается с ростом внешней нагрузки (P). При небольших значениях ε_{sw} и P_{sw} , но высоких значениях P , возможна осадка.

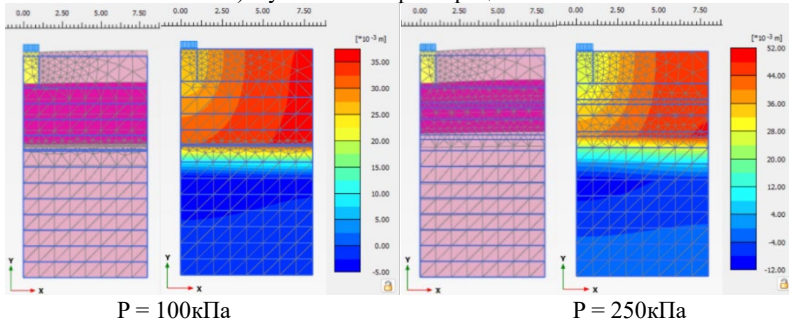
3. Мощность слоя замены грунта определяется несколькими факторами:

- Свойства грунта: чем выше параметры набухания (ε_{sw} , P_{sw}), тем более глубокий слой замены грунта требуется.
- Эксплуатационные условия: наличие инфильтрации влаги требует более мощного слоя улучшенного грунта по сравнению с режимом экранирования поверхности.
- Конструктивный фактор: рост внешней нагрузки на фундамент снижает требуемую глубину замены грунта.

Критериальная оценка необходимости улучшения грунта для обеспечения значений деформаций, не превышающих предельных. Для этого важно начать с оценки деформации основания под рассматриваемым фундаментом, учитывая характеристики грунта и предполагаемую нагрузку. Такой прогноз позволит понять, требуется ли улучшение грунта, и затем определить оптимальную толщину слоя, который необходимо улучшить. На рисунке 9 представлены графические зависимости деформации фундамента от относительного набухания грунта.

На основе анализа результатов численных экспериментов были разработаны рекомендации в виде таблицы для предварительного прогнозирования необходимости улучшения грунта в условиях инфильтрации влаги в грунт (процесс просачивания атмосферных осадков и поверхностных вод в горные породы по капиллярным порам и трещинам) и экранирования поверхности грунта (таблица 3).

а) в условиях инфильтрации влаги



б) при экранировании поверхности

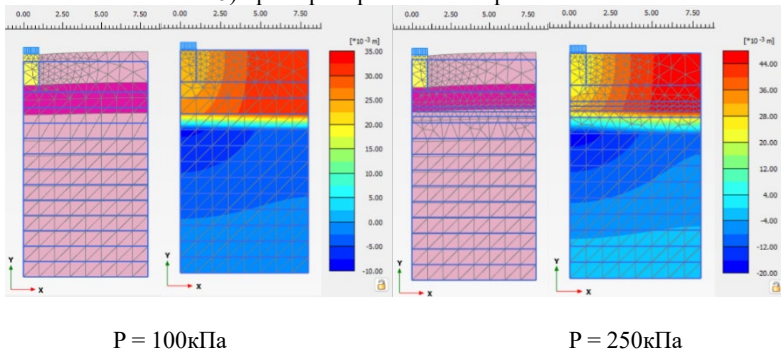


Рисунок 8 – Деформация грунта образца IV, при частичном улучшении: слева – деформации поверхности; справа – изополя перемещений грунта: естественный грунт, улучшенный грунт

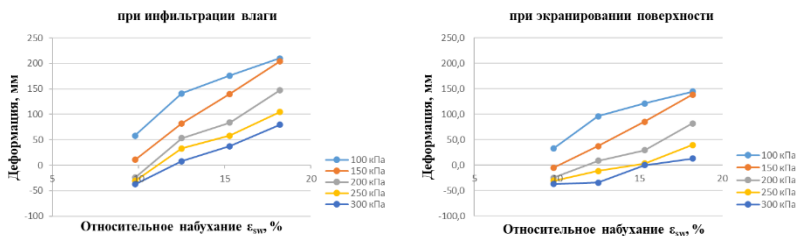


Рисунок 9 – Графики зависимости деформации фундамента от относительного набухания грунта

Таблица 3 – Рекомендации к выбору улучшения грунта для снижения деформации набухания до предельного подъёма

а) в условиях инфильтрации влаги в грунт					
Относительное набухание ε_{sw} , %	Давление P , кПа				
	100	150	200	250	300
10,0	✓	X	X	X	X
12,5	✓	✓	✓	✓	X
15,0	✓	✓	✓	✓	✓
18,0	✓	✓	✓	✓	✓
б) при экранировании поверхности грунта					
Относительное набухание ε_{sw} , %	Давление P , кПа				
	100	150	200	250	300
10,0	✓	X	X	X	X
12,5	✓	✓	X	X	X
15,0	✓	✓	✓	X	X
18,0	✓	✓	✓	✓	X

Примечание. Знак «✓» обозначает, что требуется улучшение грунта, а знак «X» — что в этом нет необходимости.

Определение необходимой мощности слоя улучшенного грунта. Результаты численного расчета представлены на рисунке 10. Сплошные линии показывают зависимость необходимой толщины слоя улучшенного грунта от коэффициента относительного набухания грунта при различных уровнях давления. Пунктирные линии отображают расчётные кривые, которые были построены на основе эмпирических формул (1), (2).

На основе результатов численного моделирования были получены две эмпирические зависимости, которые можно использовать для прогнозирования мощности слоя $\hat{H}$, (см) улучшенного грунтового слоя в рамках двух различных расчетных схем:

1) для условий инфильтрации влаги в грунтовый массив

$$\hat{H} = 82,1 \varepsilon_{sw} (1 - 0,028 \varepsilon_{sw}) - 0,46P - 295,7; \quad (1)$$

2) для условий экранирования поверхности грунта

$$\hat{H} = 20 \varepsilon_{sw} (1 - 0,02 \varepsilon_{sw}) - 0,3P. \quad (2)$$

Чтобы провести проверку моделей, был проведен комплексный статистический анализ коэффициента детерминации (R^2) и средней абсолютной процентной ошибки ($MAPE$).

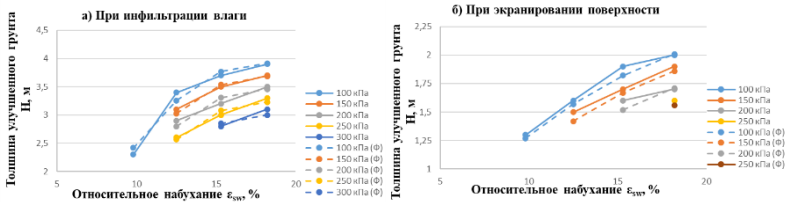


Рисунок 10 – Графики зависимости необходимой толщины улучшенного грунтового слоя от относительного набухания грунта

По уравнению (1) были получены следующие результаты: $R^2 = 0,963$, а $MAPE = 2,338\%$. Для уравнения (2) показатели составили $R^2 = 0,944$ и $MAPE = 2,442\%$.

Результаты свидетельствуют о том, что обе модели обладают высокой прогностической способностью и могут быть использованы для инженерных расчетов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Экспериментально доказано, что сочетание извести и полипропиленовых волокон оказывает синергетическое действие, способствуя снижению пластичности, набухаемости и увеличению прочности грунтов оснований зданий и сооружений, возводимых на набухающих глинистых грунтах Сирийской Арабской Республики.

2. Разработан инженерный метод усиления набухающих глинистых грунтов оснований с использованием композитных добавок на основе полипропиленовых волокон и извести.

3. Получены эмпирические зависимости для определения мощности слоя модифицированного грунта.

4. Установлено, что оптимальной комбинацией для улучшения набухающих глинистых грунтов является смесь, состоящая из 5% извести и 0,35% полипропиленовых волокон.

5. Выявлено, что улучшение свойств грунтов на 85-90% происходит в течение первых 14 дней. Можно принять, что это достаточный период для набора прочности улучшенного грунта.

6. Разработаны рекомендации в табличной форме для предварительного прогнозирования необходимости улучшения грунта.

7. Результаты исследования могут быть использованы для восстановительных строительных работ в Сирии, а также в других регионах с похожими геологическими условиями.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, индексируемых в ВАК:

1. Кондратьева Л. Н., Аввад Л. Влияние добавления извести и полипропиленовых волокон на повышение прочностных характеристик оснований зданий и сооружений в условиях набухающих грунтов Сирии // Геотехника. 2024. № 4 (XVI). С. 58–74.

2. Кондратьева Л. Н., Аввад Л. Укрепление набухающих грунтов при строительстве фундаментов зданий и сооружений в геологических условиях Сирии. // Строительная механика и конструкции. 2025. № 3 (46). С. 119–130.

3. Аввад Л. Влияние смесей полипропиленовых волокон с известью на геотехнические свойства набухающих грунтов в геологических условиях Сирии. // Инновации и инвестиции. 2025. № 5. С. 806–810

Публикации в изданиях, индексируемых в Scopus:

4. Awwad L. The effect of lime additives on the improvement of swelling soils in geotechnical conditions of Syrian Arab Republic // Smart Geotechnics for Smart Societies. CRC Press, 2023. pp. 758-763.

Публикации в других изданиях:

5. Кондратьева, Л. Н. Улучшение набухающих грунтов в геотехнических условиях Сирии с использованием известковых добавок и полипропиленовых волокон / Л. Н. Кондратьева, Л. Аввад // Современные методы проектирования, подземного строительства и реконструкции оснований и фундаментов (GFAC 2024) – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2024. – С. 109–110.

6. Кондратьева, Л. Н. Улучшение набухающих грунтов в инженерно-геологических условиях Сирии / Л. Н. Кондратьева, Аввад Лана // Использование современных моделей в механике грунтов, геотехнических расчетах и фундаментостроении : Материалы 2-й международной научно-технической конференции памяти профессора Д. М. Шапиро, Воронеж, 16–18 октября 2023 года. – Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2023. – С. 140–142.

7. Kondratyeva L., Awwad L., 2023. Ground improvement with Lime Stabilization for conservation of the Ottoman monument in Syria // Proceedings of International Workshop on Geotechnical Engineering for Cultural Heritage,

ATC19,2023, Geo-SAKURA, Japanese Geotechnical Society, Nara, Japan, April 15-16, 2023.

8. Awwad L., Kondratyeva L.N. (2025) Improvement of expansive soil in geotechnical conditions of Syria by using lime and polypropylene fiber additives // Proceedings of V International Research and Practice Conference dedicated to the 95-th anniversary of the design business origin in the Republic of Kazakhstan. Almaty. «KAZGOR», 2025. pp. 83–88.

9. Awwad L., Kondratyeva L.N. (2025) Effect of polypropylene fiber and lime additives on enhancing the properties of swelling soils as foundation Soils of buildings and structures in Syria. // Proceedings of VI International Conference on GIS and Geoinformation Zoning for Disaster Mitigation (GIZ2025). Almaty, Kazakhstan, 2025. pp. 354–355.

10. Awwad L., Kondratyeva L.N. (2026) Stabilization of Syrian Expansive Soils: A Synergistic Approach with Lime and Polypropylene Fibers // Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference on Soil Mechanics, Geotechnics and Foundation Engineering. GEOMOS26. Intelligence on guard of mechanical safety. Moscow: Издательство: НИИОСП им. Н.М. Герсенова АО «НИЦ «Строительство», 2026. Рр. 1042–1045.

Компьютерная верстка *В. С. Весниной*

Подписано к печати 04.09.2026. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,5. Тираж 100 экз. Заказ 92.

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