

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

Д-р техн. наук, профессор Кондратьева Л.Н.

Санкт-Петербург 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. Основные методы улучшения грунтов основания при строительстве на набухающих грунтах.....	13
1.1 Геотехнические проблемы при строительстве на набухающих грунтах	13
1.2 Обзор методов улучшения грунтов основания на глинистых набухающих грунтах.....	17
1.2.1 Химическая стабилизация	18
1.2.2 Механическое армирование	22
1.2.3 Комбинированные методы	26
1.2.4 Выводы по главе 1	28
ГЛАВА 2. АНАЛИЗ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАБУХАЮЩИХ ГРУНТОВ и климатических данных в Сирии- Материалы и методы исследования.....	30
2.1 Геотехнические характеристики исследуемых набухающих грунтов Сирий.....	30
2.1.1 Распространение набухающих глинистых грунтов и известняковых пород в Сирийской Арабской Республике.....	30
2.1.2 Отбор образцов грунта для дальнейшего исследования	34
2.1.3 Определение мощности зон набухания H_{sw} для отобранных образцов грунта	36
2.2 Климатические факторы набухания грунтов в Сирии.....	42
2.3 Материалы и методы исследования	44
2.3.1 Материалы исследования	44
2.3.2 Методы исследования	47
2.3.3 Выводы по главе 2	51
ГЛАВА 3. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	52
3.1 Характеристики уплотненного грунта.....	52

3.2	Параметры пластичности	56
3.3	Параметры набухания	66
3.4	Характеристики сдвиговой прочности.	77
3.1	Выводы по главе 3.....	89
ГЛАВА 4. Анализ метода усиления набухающих глинистых грунтов с использованием численного моделирования		93
4.1	Моделирование задачи исследования на основании полученных экспериментальных данных.....	93
4.1.1	Характеристики рассмотренных грунтов	93
4.1.2	Моделирование поведения оснований фундаментов	95
4.2	Результаты численных экспериментов: Оценка улучшения свойств оснований с применением разработанного метода.	99
4.2.1	Деформация естественного грунта.	99
4.2.2	Снижение деформации набухания до предельного подъёма.....	111
4.3	Метод усиления набухающих глинистых грунтов с применением добавок смесей полипропиленовых волокон и извести.	120
4.3.1	Прогноз необходимости улучшения грунта для обеспечения допустимых значений деформаций.	120
4.3.2	Определение необходимой толщины слоя улучшенного грунта.	123
4.3.3	Выводы по главе 4	128
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		129
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....		131
ПРИЛОЖЕНИЕ		143

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

В Сирийской Арабской Республике в рамках послевоенного восстановления ожидаются расширенные работы по строительству новых объектов и усилению гражданских и промышленных объектов, поврежденных в последствии военных действий. При этом необходимо учитывать широкое распространение набухающих грунтов, резкий переход от продолжительного сухого сезона в дождливый сезон и связанную с этим проблематичность строительства оснований и фундаментов зданий и сооружений на этих грунтах.

В связи с этим особое внимание уделяется совершенствованию методов улучшения набухающих грунтов и разработке рациональных и эффективных методов с учетом местных инженерно-геологических и климатических условий Сирийской Арабской Республики.

Поэтому тема исследования «Совершенствование метода улучшения набухающих грунтов оснований зданий и сооружений сирийской арабской республики» является актуальной.

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.

Проблемой набухающих грунтов в Сирии занимались многие сирийские исследователи такие как 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.

Анализ научных публикаций позволяет выделить следующие основные методы улучшения набухающих грунтов: химическая стабилизация, механическое армирование и комбинированные методы. Также для этой цели предусматривается предварительное увлажнение, замена грунта, контроль влажности и другие способы.

Для улучшения свойств набухающих грунтов методом химической стабилизации принимаются цемент, известь, золы, или другие компоненты. При механическом армировании используют геосинтетические материалы и волокна. Комбинированные же методы дают возможность повысить улучшения за счет синергетического эффекта.

Особое внимание уделилось анализу исследования методов улучшения набухающих с учетом местных особенностей. Рассматривались исследования, проведенные в Алжире, Бангладеш, Бразилии, Египте, Индии, Ираке, Испании, Канаде, Китае, Малайзии, Марокко, Омане, Пакистане, России, Саудовской Аравии, Сирии, Судане, Танзании, Турции, Франции и другие страны. Анализ этих исследований показал, что для улучшения набухающих грунтов исследовались разные материалы, такие как: 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 материалы.

Проведенный анализ показал, что одним из перспективных направлений научных исследований в данной области является совершенствование

комбинированных методов улучшения набухающих грунтов с учетом местных особенностей.

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.

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.

Целью 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:

Для выполнения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Обосновать необходимость исследования 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.

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 Иордания и Саудовская Аравия

Методология и методы исследования:

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 паспорту 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; использование 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: Проектная академия «KAZGOR», 22-23 мая 2025 года); 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 г.); 2-ая Международная научно-техническая конференция «Использование современных моделей в механике грунтов, геотехнических расчетах и фундаментостроении», посвященная памяти профессора Д.М. Шапиро. (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 Шокана Уалиханова, **Кокшетау, Казахстан**, 4 марта 2022 г. и другие.

Личный вклад автора 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 не-обходимую 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 147 страницах машинописного текста, содержит 46 рисунков и 32 таблиц. Список использованных источников состоит из 175 источников (из них 114 на иностранных языках)

Благодарность. Выражаю искреннюю благодарность своему научному руководителю, доктору PhD, профессору Л. Н. Кондратьевой. Её общее руководство и постоянное внимание к выполнению исследований, ценные советы, поддержка и помощь в написании работы были неоценимы.

Также я хочу выразить признательность члену-корреспонденту РААСН, заслуженному деятелю науки РФ, доктору технических наук, профессору Р. А. Мангушеву, доктору технических наук А. И. Осокину, заведующему кафедрой геотехники СПбГАСУ, кандидату технических наук В. М. Полунину и всем преподавателям и сотрудникам кафедры и руководству университета. Их регулярные обсуждения материалов диссертации и конструктивные замечания к работе внесли значительный вклад в её развитие.

ГЛАВА 1. ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ УЛУЧШЕНИЯ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЯ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ НА НАБУХАЮЩИХ ГРУНТАХ

1.1 Геотехнические проблемы при строительстве на набухающих грунтах

Строительство на набухающих грунтах представляет собой большую проблематичность для инженеров-геотехников во всём мире.

Набухающий грунт — это глинистый грунт, имеющий в условиях свободного набухания относительную деформацию набухания $\varepsilon_{sw} > 0,04$ или развивающий давление набухания в условиях ограниченного набухания, превышающее 0,01 МПа [8], [3]. Набухание — это свойство глинистого грунта увеличиваться в объёме при взаимодействии с водой или другой жидкостью [6], [55], [42].

Строительством зданий и сооружений на проблематичных глинистых грунтах занимались учёные: Абелев М. Ю. [11], [12], Герсеванов Н. М. [21], Далматов Б. И. [25], Дашко Р. Э [26], Маслов Н. Н. [38], Мангушев Р. А. [36], [37], Парамонов В. Н. [48], [49], Сергеев Е. М. [52], Стефанов Р.Е [58], Улицкий В. М., Шашкин А. Г., [35], Цытович Н. А. [64], [65], Осокин А.И [47], и многие другие.

Исследованию свойств набухающих глинистых грунтов и разработке методов их улучшения посвящены работы многих ученых: Габитов Ф.Г. [20], Голли О. Р [22], Кульчицкий Л.И. , Лапицкий С. А., Мустафаев А.А. [43], [42], Осипов В.И. , Передальский Л.В. , Снежкин, Б. А. [54], Соколов В.Н. [46], [45], Сорочан Е.А., Ким М. С. [56], [57], Тер-Мартirosян А.З., Тер-Мартirosян З.Г. [60], Усманов Р.М. [63], Усъяров О.Г. [33], Allman M.A. [105], Bell F. G. [93], Chen F.Н. [99], Cromko G.Y. [107], Day R.W. [101], Fityuş S.G., Holtz W. G. [109], Jahangir, E., Masrouri F., [136], Miller D.J. [134], и другие.

Однако если не учитывать особых свойств этих грунтов то это может привести к повреждению здания и сооружения [148], [151].

В работе [96] авторы на многочисленных повреждениях зданий и сооружений, построенных на набухающих грунтах в Америке. На подобных повреждениях в Индии и Бангладеш было указано в работах [88], [110] и [118].

ГОСТ 25100–2020 [6], классифицирует набухающие грунты в зависимости от степени набухания, как показано в таблице 1.1.

Таблица 1.1 - Классификация грунтов по степени набухания по ГОСТ 25100–2020

Разновидности глинистых грунтов	Относительная деформация набухания без нагрузки ε_{sw} , д.е.
Не набухающие	<0,04
Слабонабухающие	0,04 - 0,08
Средненабухающие	0,08 - 0,12
Сильнонабухающие	> 0,12

Сирийский арабский кодекс [9] классифицирует набухающие грунты в зависимости от влажности на границе текучести (W_L), как показано в таблице 1.2.

В научной литературе широко используется критерий пластичности для классификации набухающих грунтов. По многим научным публикациям набухающие грунты классифицируются по числу пластичности (IP) [109], [99], и другие [30].

Таблица 1.2 - Классификация грунтов по степени набухания по Сирийскому арабскому кодексу [9]

Потенциал набухаемости	влажности на границе текучести (WL)
Очень сильнонабухающий	>60
Сильнонабухающий	40-60
Средненабухающий	30-40
Слабонабухающий	<30

Согласно классификации W.G. Holtz и H.J. Gibbs [109], грунт с $I_p < 18$ классифицировался как слабонабухающий, от 15 до 28 - как средненабухающий, от 25 до 41 - как сильнонабухающий, а с $I_p > 35$ - как очень сильнонабухающий.

Ф.Н. Chen [99], предложил подобную классификацию: Если I_p от 0 до 15 - слабонабухающие, от 10 до 35 - средненабухающие, от 20 до 55 - сильнонабухающие и $I_p > 35$ - очень сильнонабухающие. Аналогичные

классификации были предложены R.B. Peck с соавторами в 1974 г. [140], M.W. O'Neill и N. Poormoayed в 1980 г. [139] [31].

Для наглядного сравнения критериев указанных классификаций они сведены в Таблицу 1.3.

Таблица 1.3 - Классификация набухающих грунтов по числу пластичности

Потенциал набухаемости	Число пластичности I_p , %			
	W.G. Holtz и H.J. Gibbs (1956) [109]	R.B. Peck с соавторами (1974) [140]	M.W. O'Neill и N. Poormoayed (1980) [139]	F.H. Chen (1988) [99]
Слабонабухающий	< 18	0-15	< 25	0-15
Средненабухающий	15-28	10-35	25-35	10-35
Сильнонабухающий	25-41	20-55	> 35	20-55
Очень сильнонабухающий	> 35	> 35	---	> 35

Ахмед, Муфида Мухаммед, в 1988 году изучила влияние нормальных сил набухания на рандбалку [17]. Она отметила, что в Сирии распространены монолитные конструкции, где рандбалки фундамента опираются прямо на грунт. Из-за этого в сезон дождей фундаменты, построенные в сухую погоду, могут сильно деформироваться от набухания грунта. Ахмед разработала метода расчета с использованием метода конечных элементов (МКЭ), которая была реализована в программе «Геомеханика» [62]. Этот метод позволяет определять нормальные силы набухания, действующие на рандбалки. По мнению авторов [135], [88], специфика набухающих грунтов повышает их деформативность и ухудшает прочностные характеристики. Поэтому перед началом крупных строительных работ на таком грунте его необходимо улучшить.

Наибольшую опасность представляют неравномерные деформации набухающих грунтов основания. В своих работах О. Р. Голли уделяла особое внимание неравномерности деформаций, возникающих из-за набухания, и дополнительным нагрузкам, которые они создают на конструкции. Она подчеркивала, что при определённых условиях это может привести к провалам грунта и, как следствие, к обрушению зданий [22] [30] [13].

Повреждения зданий и сооружений, вызванные деформацией набухающих грунтов, особенно заметны в зданиях с лёгкими конструкциями. Magdi M. E. Zumrawi et al. (2017) исследовали факторы, которые приводят к повреждениям зданий, построенных на набухающих грунтах в штате Хартум в Судане. Для анализа отобрали десять поврежденных зданий. Натурное обследование показало, что восемь из них имели серьезные разрушения в то время, как только два — незначительные. Наиболее частыми повреждениями стали трещины в стенах и полах, смещения фундамента, искривления и выгибы колонн, изгиб балок и плит [172].

Как указывают El Majid A. и соавторы, набухание грунта представляет особую опасность именно для легких зданий. Исследователи определили, что на интенсивность набухания влияет множество факторов, включая физические, химические, минералогические и структурные характеристики грунта. Основными определяющими параметрами оказались пластичность и содержание глины [125]. Похожие случаи повреждения малоэтажных домов в Индии из-за набухания грунта описаны в работе Selvamsagayaradja M. и др. (2023) [153]. Проблемам повреждения здания с лёгкими конструкциями посвящена статья Obda, O. и др. (2025) [137], где показаны фотографии разрушений, вызванных набухающими грунтами, и схема распределения усилий в основаниях зданий г. Мулай Якуб, Марокко.

Таким образом, набухающие грунты становятся причиной значительных повреждений строительных конструкций. Здания трескаются, дороги покрываются колеями, а подпорные сооружения разрушаются [53], [155]. Такие грунты встречаются почти в каждой стране мира и представляют собой серьезную проблему для инженеров-геотехников повсюду [169].

1.2 Обзор методов улучшения грунтов основания на глинистых набухающих грунтах

В научной литературе описано множество методов, которые можно использовать для укрепления набухающих грунтов. К таким методам относятся химические добавки, механическое армирование, предварительное увлажнение, замена грунта с контролем уплотнения, контроль влажности, и другие способы.

Е. А. Сорочан и М. С. Ким [56], [57], изучая влияние набухающего грунта на подпорные стенки, в своих лабораторных экспериментах показали, что частичное разуплотнение грунта позволяет снизить давление набухания [30].

Если слой набухающего грунта расположен непосредственно под фундаментом, его иногда удаляют и заменяют более качественным грунтом. При правильном уплотнении заменяющий слой будет лучше распределять нагрузки и уменьшать негативное воздействие набухания на фундамент. Этот метод описан в работах Murthy and Praveen et al. [132]. Однако сыпучий грунт, который чаще всего применяется из-за своей практичности, может способствовать более глубокому увлажнению набухающего грунта.

В работе Jeyaralan et al.[113], рекомендуется предварительное увлажнение набухающих грунтов. Однако в условиях климата Сирии, где сезон дождей резко сменяется засухой, этот метод может оказаться малоэффективным. Более того, периодическое увлажнение и высыхание может привести к разрушению структурных связей и снижению прочности грунта.

Одним из эффективных способов предотвращения набухания грунта является контроль уровня воды с помощью специальных устройств, непроницаемых барьер, а также эффективные дренажные системы и контроль за растительностью [107]. Однако в Сирии этот метод не получил широкого применения, поскольку нет гарантии, что контроль уровня воды будет осуществляться на протяжении всего периода эксплуатации.

1.2.1 Химическая стабилизация

Химическая стабилизация грунтов известью, цементом и золой-уносом может быть экономически выгодной альтернативой традиционным методам укрепления, особенно при наличии местных ресурсов и при правильном проектировании.

Известь - относительно дешева, особенно если добывается поблизости. Если смотреть с экономической точки зрения, то преимущественно уменьшает объем земляных работ за счёт возможности использовать местные слабые грунты, а также снижает затраты на вывоз и завоз материалов. Однако требует времени отверждения, что может задержать темп строительства. Цемент быстрее твердеет (набирает прочность), но по стоимости дороже извести и требует точного контроля влажности. Золой-уноса – бесплатна, но требует контроля содержания вредных веществ.

Известь представляет собой старейший традиционный стабилизатор, применяемый для укрепления грунтов. Обработка глинистых грунтов известью способна значительно улучшить многие геотехнические свойства. В частности, известь снижает число пластичности (I_p), улучшает обрабатываемость, повышает прочность и калифорнийский коэффициент несущей способности (CBR), а также устраняет практически все проблемы, связанные с набуханием [148] [30] [87].

Ученые провели множество исследований [84], [93], [106], [91], [74], посвященных стабилизации глинистых грунтов с помощью извести, рассмотрели оптимальные дозы извести, необходимые для максимальной модификации почвы. Так, F. G. Bell [93], определил, что оптимальная дозировка составляет от 1 до 3 % извести по массе. Дальнейшее увеличение содержания извести не влияет на число пластичности (I_p), но способствует повышению прочности. Однако в других источниках было предложено использовать известь в дозах от 0 до 9 % для стабилизации грунта [91], [109] [30].

При добавлении извести в глинистые грунты в присутствии воды происходит целый ряд химических реакций, которые улучшают свойства грунта. Эти реакции включают катионообмен, флокуляцию, карбонизацию и пуццолановую реакцию. Катионообмен представляет собой процесс, в ходе которого катионы, связанные со связной водой глинистых частиц, обмениваются на катионы кальция, содержащиеся в извести, таким образом улучшаются физические и химические свойства грунта. В результате катионного обмена и притяжения частицы глины притягиваются друг к другу, образуя хлопья. Этот процесс называется флокуляцией. Именно флокуляция играет ключевую роль в изменении инженерных свойств набухающих глинистых грунтов при их обработке известью [106]. Сирия богата известняком, общие запасы которого оцениваются примерно в 12 миллиардов кубометров [174], [175] [30].

В 1964 году исследование М. Mateos продемонстрировало, что использование золы-уноса приведет к формированию прочного каркаса в грунте [126].

Результаты экспериментального исследования, приведенные в работе [151] показали, что использование промышленных отходов привело к снижению деформаций набухания до предельного значения, допустимого по испанским нормам. В своей работе D. Sivakumar и соавторы установили, что использование золы-уноса укрепляет структуру грунта и при совместном использовании с известью, повышают прочность при сжатии на 40–60% [156]. S. Riaz (2014) и соавторы исследовали эффективность добавления цемента для улучшения глинистого грунта и установили, что добавление от 8% до 15% цемента приводит к увеличению прочностных характеристик грунта [167]. В своей работе Baloochi H. и др. (2020) подчеркнули экологические преимущества использования золы-уноса из бумажной промышленности [89].

Pratikso, Abdul Rochim и его коллеги (2023) изучили тройной состав: известь, цемент и золы-уноса. При добавлении 8% цемента прочность CBR увеличилась с 4,3% до 37,6%, а набухание уменьшилось в 5 раз [141].

В исследовании, проведенном Di Sante и другими учеными в 2025 году, изучалось влияние добавления золы-уноса и извести на глинистые грунты. Результаты показали, что известь активирует пуццолановую реакцию золы-уноса, способствуя улучшению структуры и повышению прочности [102]. Колумбийские ученые Y. Arias-Jaramillo и другие в 2023 году провели исследование, в котором рассматривались три стабилизатора: известь, цемент и смесь извести с золой-уносом. Последний вариант продемонстрировал наилучшие результаты: прочность достигала 10 МПа, были улучшены упругие свойства, а шероховатость дорожного покрытия снижена [85].

В 2014 г. M.M. Zumrawi с коллегой [173], провели лабораторное исследование, направленное на изучение влияния добавления золы, извести и их комбинаций на свойства набухающих грунтов земляного полотна в Судане. В ходе этого исследования были использованы различные концентрации извести (5 и 8%) и летучей золы (0; 5 и 10%). Результаты показали значительное увеличение прочности образцов после обработки этими материалами [31].

Naimul Haque Nayem и другие ученые в 2023 году изучали поведение набухающих грунтов. Добавление извести в количестве 6% и золы-уноса в размере 10% значительно снизило способность к набуханию на 50–68% и повысило модуль сдвига [133].

Исследование Zhuang, X. и других ученых, проведенное в 2025 году, показало, что добавление микрокремнезёма (Silica Fume) улучшает микроструктуру грунтов. Результаты показали увеличение модуля динамического сдвига и снижение деформаций при циклических нагрузках [171].

В исследовании Kawther Y. AL-Soudany [81], изучалось применение микрокремнезема для обработки набухающего грунта. Глинистый грунт был привезен из Аль-Нахравана в Багдаде. Изучение влияния микрокремнезема (3, 5 и 7% по весу) показало, что как предел текучести, так и число пластичности снижались с добавлением микрокремнезема, в то время как предел пластичности увеличивался с его добавлением.

В своей обзорной работе [83], опубликованной в 2025 году, Anggraini и другие авторы проанализировали более 150 исследований, посвящённых стабилизации глинистых грунтов. Они пришли к выводу, что известь и цемент вызывают химические реакции обмена и пуццолановые процессы, которые уменьшают пластичность и увеличивают плотность грунта. Однако использование золы-уноса в сочетании с этими материалами обеспечивает более высокую экономическую и экологическую эффективность.

Добавление 4–8% извести в высокопластичную глину способствует снижению индекса пластичности и повышению несущей способности, что подтверждается исследованиями, проведенными Gromko [107], O'Neill and Poormoayed [138], Bowels [95], Prusinski and Bhattacharja [142], Moayed et al. [130], Belabbaci et al. [92], AL-TAIE et al. [82], и Mahedi et al. [124].

Ibrahim M. Alkiki et al. [75], отметили, что обработка известью может эффективно уменьшить набухание глинистых грунтов в городе Мосул. Благодаря химическим реакциям и структурным изменениям, известь снижает набухание и повышает прочность грунта.

Almajed, A. [76], изучил стабилизацию набухающего грунта из глины Аль-Катиф с помощью двух комбинированных добавок: хлорида кальция и цемента. Добавление 4–8% хлорида кальция и 2% цемента значительно снижает потенциал набухания на 8–25% и давление набухания на 28–37,4%.

В исследовании, проведенном Al-Mukhtar M. et al. [78], в качестве глинистого грунта использовалась бентонитовая глина высокой пластичности. Результаты показали, что увеличение количества извести в грунте значительно снижает давление набухания. Давление набухания необработанного Имперсола составляло 1060 кПа, но после добавления 6% извести оно снизилось до 106 кПа через 1,5 часа и до 33 кПа через 7 дней. При добавлении 10% извести давление набухания быстро уменьшилось до нуля.

Muzahim Al-Mukhtar et al в работе [77], было отмечено, что добавление извести существенно снижает значения индекса пластичности (I_p). Дальнейшее увеличение

содержания извести свыше 4% практически не влияет на число пластичности. При добавлении 4% извести давление набухания значительно снижается со 150 кПа до 20 кПа и 15 кПа через 7 и 90 дней соответственно. Однако значения давления набухания для 10% извести аналогичны значениям, полученным при добавлении 4% извести.

В исследовании Sabah Benyahia et al [94], говорится, что стабилизация известью существенно влияет на многие свойства грунтов из Сержипи в Бразилии. Это происходит благодаря катионному обмену, который способствует агломерации и флокуляции грунта. Свободное набухание уменьшается с 20% до 1,85%, 1,0% и 0,5% при добавлении извести в количестве 3%, 6% и 9%, соответственно. Давление набухания также снижается с 200 кПа до 37 кПа, 32 кПа и 23 кПа при тех же концентрациях извести.

R. Daneshfar и J. Moghadasì в 2017 году проводили сравнительный анализ исследований в области набухания глин за последние 50 лет. Итогом такого анализа стало сопоставление различных стабилизаторов процесса набухания, т.е. химической обработки грунтов [100].

1.2.2 Механическое армирование

Механическое армирование грунта — это один из наиболее распространённых и эффективных способов повышения несущей способности и снижения деформаций оснований зданий и сооружений, особенно в условиях строительства на слабых грунтах. В современной геотехнической практике для армирования грунтов широко применяются геосинтетические материалы и волокна [170],[67], [28], [116], [59], [23], [66].

Геосинтетические материалы предоставляют эффективное решение для контроля набухаемости грунтов [154], [19], [40].

Экспериментальные исследования Hassan et al. [108], по изучению механического поведения различных типов геосинтетиков в связных грунтах с различными индексами пластичности показали, что эффективность армирования существенно зависит от типа грунта и вида геосинтетического материала.

В работах [154], [14], авторы обращают внимание на то, что использование геосинтетических материалов позволяет уменьшить деформацию земляного полотна на 30–40% по сравнению с грунтом без армирования, даже если не применяются химические стабилизаторы.

В исследовании Sharma Н. [154], было показано, что содержание геосинтетического материала в грунте и его расположение существенно влияют на способность грунта выдерживать нагрузки.

Ravi et al. (2012) изучали, как различные виды геосинтетических материалов влияют на набухание глин. В эксперименте использовалась высокопластичная глина с индексом пластичности 43%. Результаты показали, что использование геомембраны позволило снизить набухание на 85% [145].

Исследование Tiwari et al. [163], подтвердило, что применение георешёток вместе с полипропиленовым волокном привело к увеличению прочности грунта и снижению его набухания при увлажнении.

Армирование грунтов волокнами представляет собой перспективный метод укрепления крупнозернистых грунтов [30]. А в работах Kumar et al. (2007), Tang et al. (2007), Attom et al. (2009), Twinkle et al. (2011) [164], [119], [161], [86] подтверждается эффективность армирования глинистых грунтов различными типами волокон для улучшения их прочности на сдвиг и пластичности.

В своей статье [80], Alshimaa Farghaly и другие ученые исследовали, как добавление гранитной крошки и полипропиленового волокна влияет на геотехнические свойства набухающего грунта, взятого из Каира, Египет. Результаты показали, что введение 30% гранитной крошки позволило значительно уменьшить индекс свободного набухания со 120% до 62%, увеличить сцепление с 46 кПа до 72 кПа и повысить угол внутреннего трения с $15,38^\circ$ до $24,23^\circ$.

Sellaf, H. и др. в статье [152], описали влияние добавления порошка из пластиковых и гранитных отходов на геотехнические характеристики набухающего грунта, взятого из Хашема, на северо-западе Алжира. Результаты экспериментов показали постепенное снижение пределов текучести, потенциалов набухания и давления набухания по мере увеличения пропорций пластикового и гранитного порошка.

Abdelkader H. A. M. и др. в статье [69], исследовали геотехнические свойства набухающего грунта, взятого из деревни Эль-Сальхей, Кена, Египет, стабилизированного отработанной гранитной пылью. Результаты экспериментов показали снижение числа пластичности с 21,44% до 12,9% и снижение интенсивности набухания до 30% при увеличении пропорций отработанной гранитной пылью до 30%.

В [41], А. В. Машенко и А. Б. Пономарев предлагают применять базальтовые, полипропиленовые и другие волокнистые материалы. Авторы отмечают, что волокна обладают высокой прочностью на разрыв и эффективно взаимодействуют с грунтом при сдвиговых нагрузках, что значительно улучшает прочностные характеристики армированного грунта. В исследовании А. И. Наumenko было выявлено, что случайное расположение волокон имеет преимущества по сравнению с равномерным распределением волокон [44]. Многие авторы подчёркивают экологическую безопасность использования полипропиленовых волокон [30] [31].

В 2025 году M. L. de J. Santos и M. D. T. Casagrande исследовали укрепления грунтовых дорог с помощью натуральных волокон асаи и кокоса и пришли к выводу что добавление этих волокон значительно улучшает характеристики глинистого грунта, позволяет использовать местные ресурсы и минимизировать негативное воздействие добавок на окружающую среду[150]. К такому выводу пришли также Mozumder et al. в 2025 году при исследовании влияние бамбукового волокна на механические свойства высокопластичных глинистых грунтов [131].

В работе [144], в результате испытаний было выявлено, что армирование волокнами значительно увеличивает прочность грунта при одноосном сжатии и снижает давление набухания.

В исследовании, проведенном A.S. Soğanç [157], была проведена серия экспериментов, направленных на изучение влияния полипропиленового волокна на характеристики набухания грунта в районе транспортного канала Апа-Хотамыш в Турции. По итогам исследования автор делает вывод, что метод стабилизации с использованием полипропиленового волокна представляет собой эффективный способ улучшения свойств грунта. Например, относительное набухание снизилось с 11,6% для неармированных образцов до 5,3% для образцов, армированных 1% волокна.

Иракские учёные Sarah A. Hussein и Haifaa A. Ali также исследовали влияние полипропиленового волокна на характеристики набухания грунта [111]. В результате они выяснили, что относительное набухание уменьшается с 13,47% до 2,81%, а давление набухания снижается с 245 кПа до 75 кПа при добавлении 2% полипропиленового волокна.

В 2017 году А.С. Гришин и А.Б. Пономарев провели исследование, посвященное оценке моделей расчета прочности фиброгрунта на сдвиг. Они выяснили, что модель Zornberg хорошо работает, когда содержание волокон не превышает 0,5% от общей массы грунта [24].

В 2016 году А.В. Мащенко и А.Б. Пономарев изучили влияние армирования фиброволокном на свойства глинистых грунтов в условиях сезонного промерзания и оттаивания. [41] [31].

Исследование, проведенное Ю.А. Тороповой в 2023 году, выявило, что при концентрации волокон свыше 0,5% возникают сложности с получением однородной смеси [61].

В 2023 году El Majid A. и его коллеги исследовали эффективность использования растительных волокон для уменьшения набухаемость грунта в Марокко [125]. Результаты показали, что использование растительных волокон не

только эффективно, но и является экономичным и экологичным решением проблемы набухания грунта.

Стоит отметить, что в области повышения устойчивости к набуханию проведено не так много исследований, которые сравнивали бы эффективность армирования волокнами с другими способами стабилизации.

1.2.3 Комбинированные методы

Рассмотренные методы химической стабилизации и методы механического армирования грунтов не всегда обеспечивают требуемую надёжность.

Сирийские исследователи Al-Swaidani и др. изучали влияние добавления натуральной пуццоланы на некоторые геотехнические свойства глинистых грунтов, стабилизированных известью [160]. Результаты испытаний показывают, что прочностные и пластичные свойства глинистых грунтов, обработанных известью, могут быть значительно улучшены при добавлении натурального пуццолана в качестве стабилизирующего агента.

Mohanad Sabri et al. в 2023 показал, что сочетание извести и кирпичной пыли снижает набухание грунта на 40–60 % за счёт образования кальциевых гидросиликатов. [146]. В исследовании Paidi Sridevi et al. в 2024, авторы пришли к выводу, что добавление золы-уносы и извести повышает прочность на сжатие на 35–50 % благодаря микроармированию частицами золы [158].

D. Baglari и S. K. Dash, 2013 показали, что армирование геосинтетикой с добавлением извести могут увеличить одноосное сжатие набухавшего грунта от 2.6 до 11.3 раза, в зависимости от комбинации [88].

В 2022 году Mei T. и коллеги провели исследование, в котором изучали влияние нанокремнезёма и полимеров на свойства набухающего грунта [128]. Они выяснили, что эти добавки способны снизить водопоглощение на 70% и повысить

прочность на 60%. Авторы считают, что преимущества этих методов заключаются в их экономичности и минимальном воздействии на окружающую среду.

В исследовании, проведённом Punthutaecha et al. в 2006 году [143], было доказано, что комбинация волокон и золы-уноса является более эффективным средством для контроля набухания.

В статье [120], индийские ученые показали результаты исследований свойств бентонита в сочетании с известью и фосфогипсом, армированными волокнами сизаля. Процентное содержание сизалевых волокон варьировалось от 0,5 до 2%. Результаты показали, что прочность бентонита на сжатие можно увеличить за счёт добавления извести, фосфогипса и сизалевых волокон. Наибольший прирост прочности при неограниченном сжатии был достигнут при использовании 8% извести, 8% фосфогипса и 1% сизалевых волокон.

В 2019 году Т.М. Ле и его коллеги провели комплексное исследование, посвящённое применению отходов водоочистной станции (известкового шлама) в сочетании с полипропиленовым волокном в каолининовой глине [121]. В процессе исследования к каолининовой глине добавляли различные количества волокна (0; 0,5; 1,0 и 1,5%) и известкового шлама (2; 4; 6 и 8%) к каолининовой глине в расчёте на сухой вес. Результаты показали, что с увеличением доли известкового шлама и времени, необходимого для отверждения смеси, прочность на одноосное сжатие возрастала.

Результаты экспериментов, проведенных в [88], свидетельствуют о том, что через 28 дней после отверждения набухающего грунта, содержащего 2, 4, 8, 12 или 16% извести, его прочность увеличивается в 2,5, 3,5, 8,4, 8,7 и 8,5 раза по сравнению с исходными показателями. Кроме того, если дополнительно использовать геосинтетическую арматуру, прочность обработанного известью грунта возрастает в 2,6, 3,8, 8,6, 9,5 и 11,3 раза соответственно.

Результаты проведённых в работе [97], испытаний показали, что добавление смеси полипропиленового волокна и извести вызывает полезные изменения в

прочности на одноосное сжатие, параметрах прочности на сдвиг и потенциале набухания глинистого грунта, использованного в этом исследовании.

В исследовании [110], авторы стремились улучшить геотехнические свойства набухающих грунтов, взятых в северо-восточной части Дакки, Бангладеш. Для этого они добавляли в грунт известь и полипропиленовые волокна. В состав грунта входило от 2,5% до 10% извести и 2% полипропиленового волокна. Результаты показали, что по сравнению с исходным образцом, свойства набухания стабилизированных образцов сначала снижались при содержании извести до 7,5%, а затем увеличивались.

Анализ результатов предыдущих исследований позволяет отметить, что синергетический эффект, которого позволяет комбинированный подход, даёт возможность решить несколько задач улучшения набухающих грунтов: снижение пластичности, уменьшения набухания, повышение прочности и другие.

1.2.4 Выводы по главе 1

- Развитие комбинированных методов, предусматривающих совмещения химического закрепления с механическим армированием грунта, является основным направлением научных исследований в области улучшения набухающих грунтов. Синергетический эффект от такого подхода повышает эффективность и рациональность комбинированного метода и позволяет одновременно решать вопросы снижения пластичности и деформируемости и повышения прочности.
- Проведённый анализ научной литературы показал актуальность вопроса совершенствования методов улучшения набухающих грунтов оснований зданий с учётом местных геотехнических и климатических особенности региона строительства.

- Есть основание предположить, что 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.

ГЛАВА 2. АНАЛИЗ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАБУХАЮЩИХ ГРУНТОВ И КЛИМАТИЧЕСКИХ ДАННЫХ В СИРИИ- МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В рамках данной главы особое внимание уделено выбору материалов для экспериментальных исследований и разработке программы лабораторных экспериментов, направленных на оценку эффективности использования предложенных комбинаций для улучшения набухающих глинистых грунтов, характерных для Сирии.

2.1 Геотехнические характеристики исследуемых набухающих грунтов Сирий

2.1.1 Распространение набухающих глинистых грунтов и известняковых пород в Сирийской Арабской Республике

Набухающие грунты представляют собой серьёзную проблему для инфраструктуры Сирийской Арабской Республики. Как показал G.W. Donalson в своём исследовании [103], опубликованном в 1969 году, набухающие грунты можно найти практически по всему миру. Они занимают около 2,42% площади суши на Земле.

В арабском мире исследования набухающих грунтов проводились в таких странах, как Алжир [152], Египет [80], [69], [72], Ирак [149], [81], [75], [111], Марокко [125], [137], Оман [79], Саудовская Аравия [76], и Судан [173], и других странах.

Кроме того, исследования были проведены и в других странах, включая Бангладеш [110], [118], Бразилию [122], Индию [120], Испанию [151], Канаду [105], Китай [171], Малайзию [117], Пакистан [167], [133], Танзанию [123], Турцию [157], и Францию [78], [77] и другие.

В Российской Федерации набухающие грунты так же широко распространены. Луценко Е.В. пишет, что их общая площадь составляет более 1,9 млн. км², или 11,3% от общей площади страны. К таким регионам относится юг Западной Сибири, часть Европейской равнины, Нижнее Поволжье, Закавказье, а также Курская, Белгородская, Омская и Новосибирские области [34]. В научной публикации, выпущенной в 2024 году, Зайцев А.В. описывает результаты сравнительных анализов методов по определению набухания в глинистых грунтах, которые залегают в г. Кемерово [27].

С другой стороны, в своей статье 2025 года [29]. Кильдеева Т.И., и соавторы, рассматривая процесс инвестиционно-строительного проектирования в регионах со сложными природными и климатическими условиями, указывают на тот факт, что набухающие грунты не имеют конкретных ареалов распространения, а их наличие на площадках строительства необходимо уточнять по результатам проведения инженерных изысканий.

По информации Главного геологического управления при Министерстве нефти Сирийской Арабской Республики, глинистые грунты широко распространены в различных регионах Сирии, залегая на разных геологических уровнях. Они встречаются преимущественно в провинциях Кунетра, Дер'а, Сувейда, Хама и Ал-Габ, а также на средиземноморском побережье, в центральном и северо-восточном регионах. На рисунке 2.1 представлена карта распространения набухающих грунтов в Сирии [71] [31].

В Сирии глинистые грунты занимают около 10,5% территории страны [32], [10], [51], [18], [71]. Хотя эта цифра может показаться небольшой по сравнению с общей площадью суши, она приобретает особую важность в контексте густонаселённых районов. Рисунок 2.2 представляет карту распределения зон

расселения в Сирии, составленную Абдуллой в 2012 году [201], [70]. На этой карте зелёным цветом обозначены зоны плотного расселения, с высокой плотностью населения и пригодностью территории для жизни и хозяйства.

Из этих карт видно, что набухающие грунты в Сирии сосредоточены в относительно густонаселённых областях. Во многих частях Сирии эти глинистые грунты стали причиной серьезного ущерба инфраструктуре, что подчеркивает необходимость их улучшения [10] [30].

Согласно информации, предоставленной Генеральной организацией по геологии при Министерстве нефти Сирийской Арабской Республики, в различных частях страны существуют карьеры по добыче известняка и доломитовой известняковой крошки. На рисунке 2-3 представлена карта, демонстрирующая распространение известняковых пород в Сирии [174].

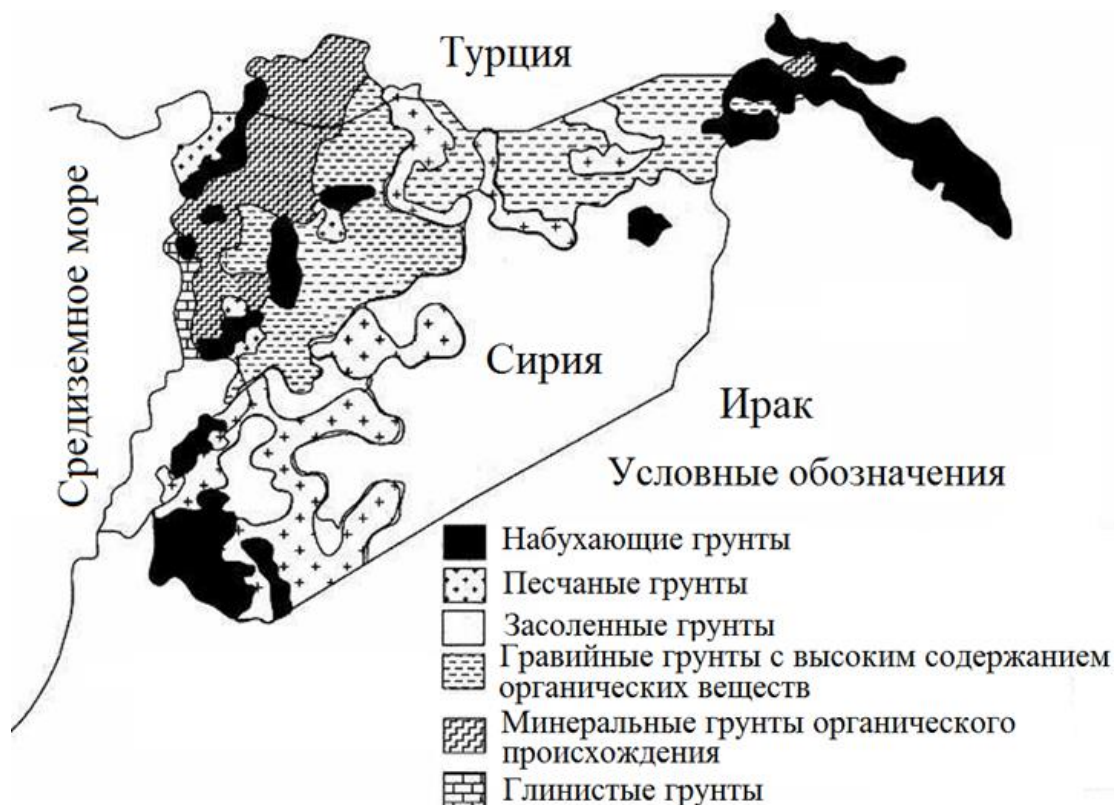


Рисунок 2.1 - Распространение набухающих грунтов в Сирии [71]

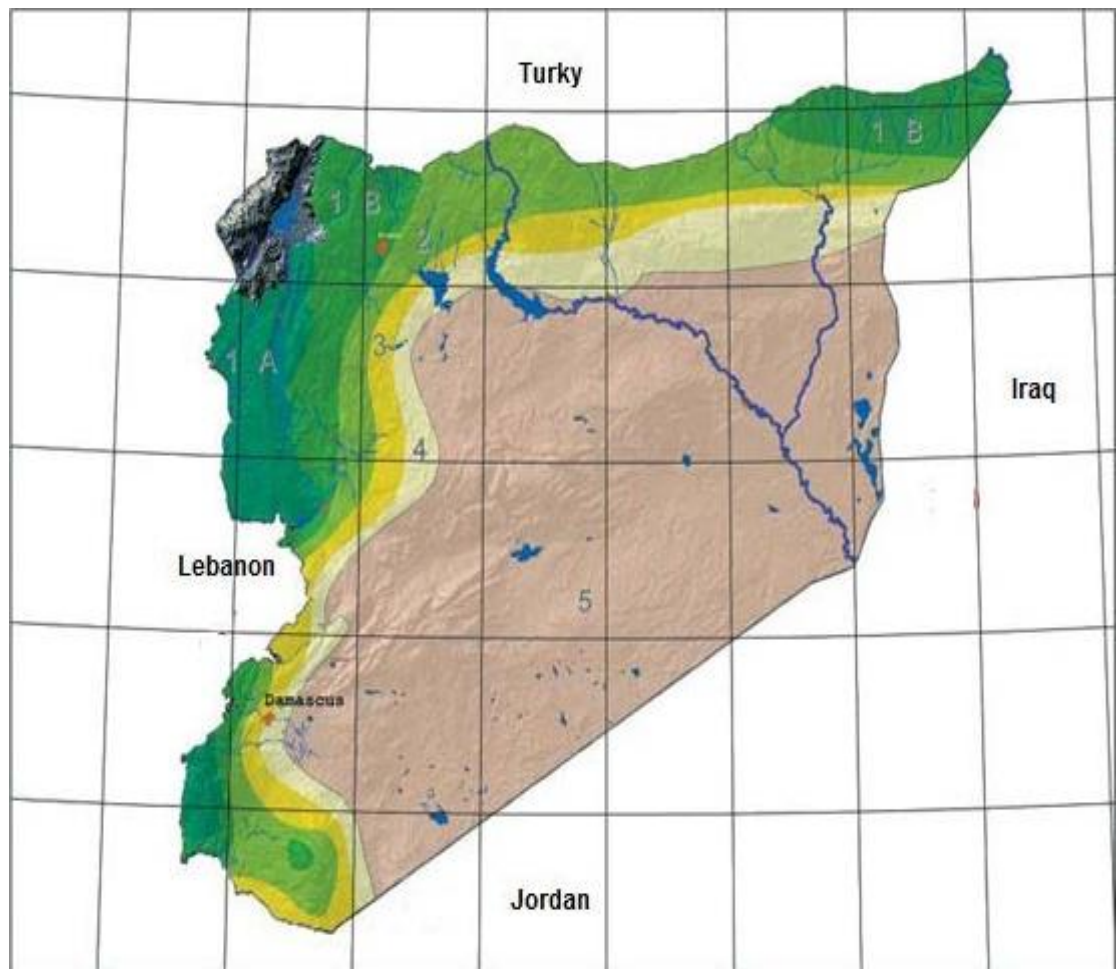


Рисунок 2.2 - Карта распределения зон расселения в Сирии [70]

Melhem M. (2014) [129] отмечает, что известняк широко распространен в Сирии, особенно на востоке, в центре и на севере, она так же отмечает, что геологические запасы неразработанного известняка оцениваются примерно в $12 \cdot 10^9 \text{ м}^3$, что делает его доступным и недорогим.

Анализ карт показывает, что в Сирии густонаселённые районы, где ведётся активное строительство, совпадают с территориями, где часто встречаются набухающие грунты. В этих же районах расположены карьеры по добыче известняка.

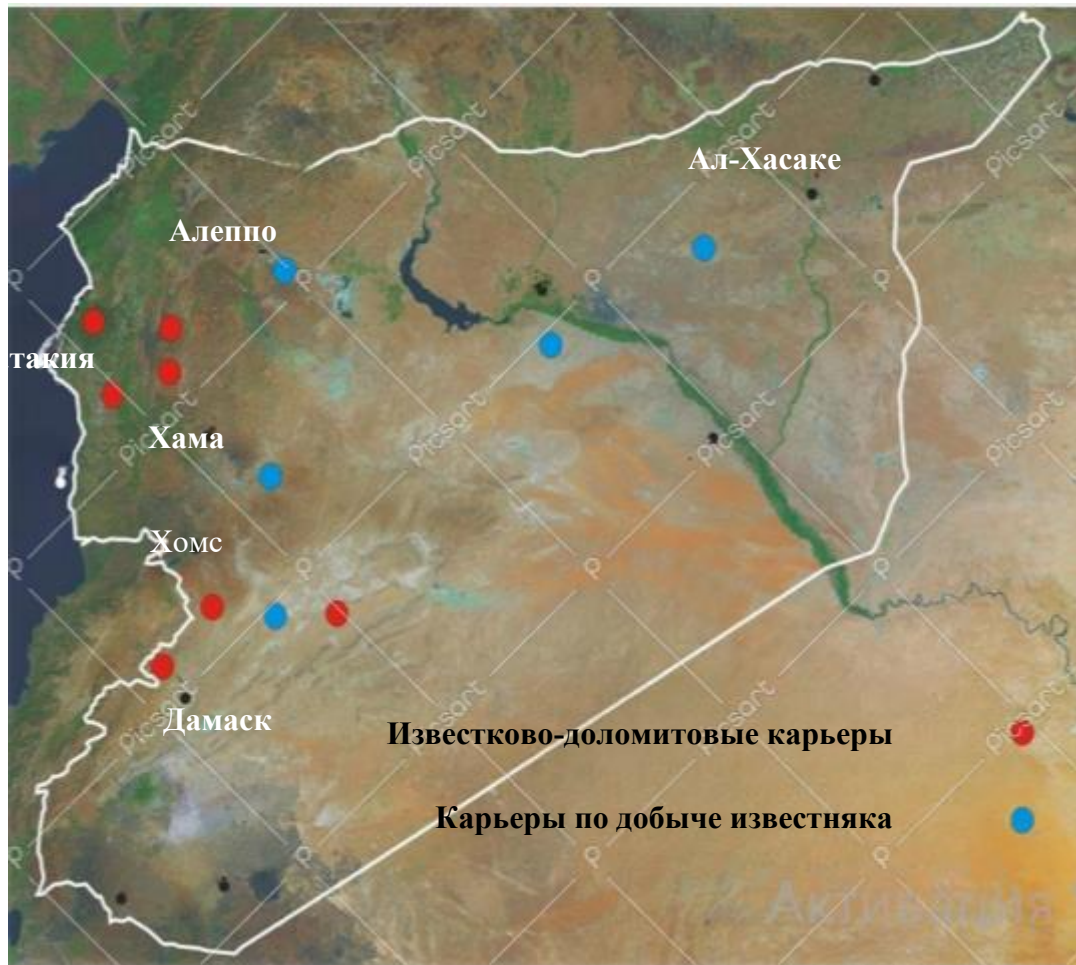


Рисунок 2.3 - Распространение известняковых пород в Сирии [129]

Близость карьеров к строительным площадкам делает использование извести для стабилизации набухающих грунтов экономически выгодным решением. Это позволяет значительно сократить транспортные расходы на доставку материала от карьера к месту строительства.

2.1.2 Отбор образцов грунта для дальнейшего исследования

Принятая в данном исследовании методология основана на сравнительном экспериментальном методе, включающем лабораторные эксперименты,

проведенные на необработанных и обработанных образцах, подвергнутых определенным параметрам, с последующим сравнением результатов для получения выводов.

Проведение исследований по улучшению набухающих грунтов требует формирования репрезентативной выборки, которая должна отражать весь спектр возможных инженерно-геологических условий. Отбор образцов должен обеспечить возможность изучения эффективности применения добавок в широком диапазоне проявления набухающих свойств. В данном разделе обоснованы критерии и представлены результаты формирования коллекции образцов для дальнейших экспериментальных исследований.

На основании комплексного анализа исходных характеристик набухающих грунтов для дальнейших исследований была сформирована репрезентативная выборка из четырех образцов из южно-западного, среднего, и северо-западного регионов Сирии. Критерием отбора послужили значения относительной деформации набухания (ε_{sw}), что позволило охватить широкий спектр интенсивности набухания — от умеренного до интенсивного.

Основные геотехнические свойства отобранных образцов набухающего глинистого грунта представлены в таблице 2.1. Созданная коллекция образцов охватывает различные категории набухающих грунтов по степени их деформационных свойств [31].

Отобранные образцы характеризуются следующими параметрами набухания:

- Значения относительной деформации набухания (ε_{sw}) варьируются 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.

2.1.3 Определение мощности зон набухания H_{sw} для отобранных образцов грунта

Расчет мощности глубины зоны набухания (H_{sw}) представляет собой важнейший этап проектирования фундаментов на набухающих грунтах.

Таблица 2.1 - 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
Давления набухания, P_{sw} , кПа	133	164	183	224
Сцепления, c , КПа	38	52	84	110
угол внутреннего трения, φ , (°)	19	13	16,2	8

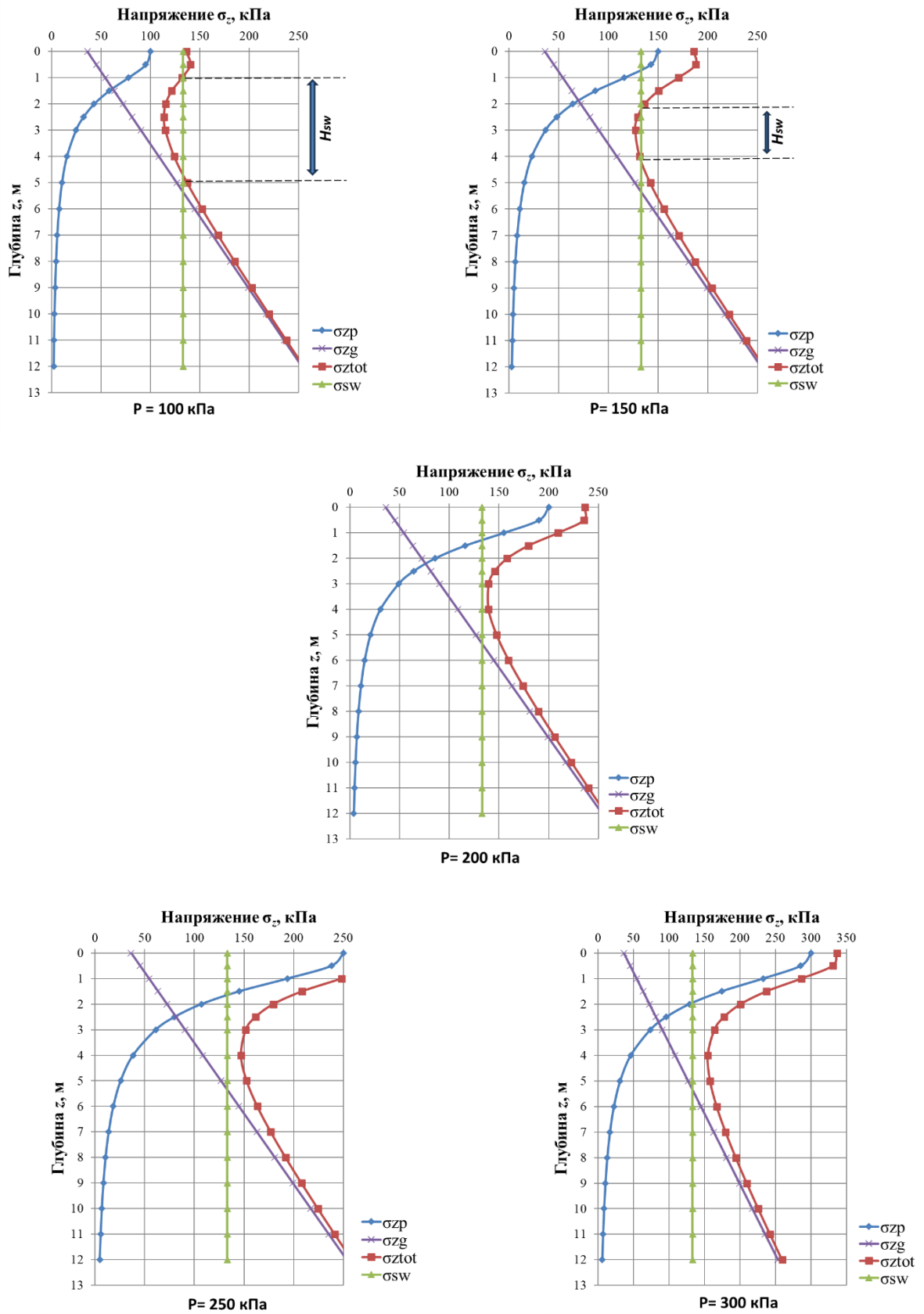


Рисунок 2.4-а - Графики определения зоны набухания для образца I, при пяти уровнях нагрузок на подошву фундамента

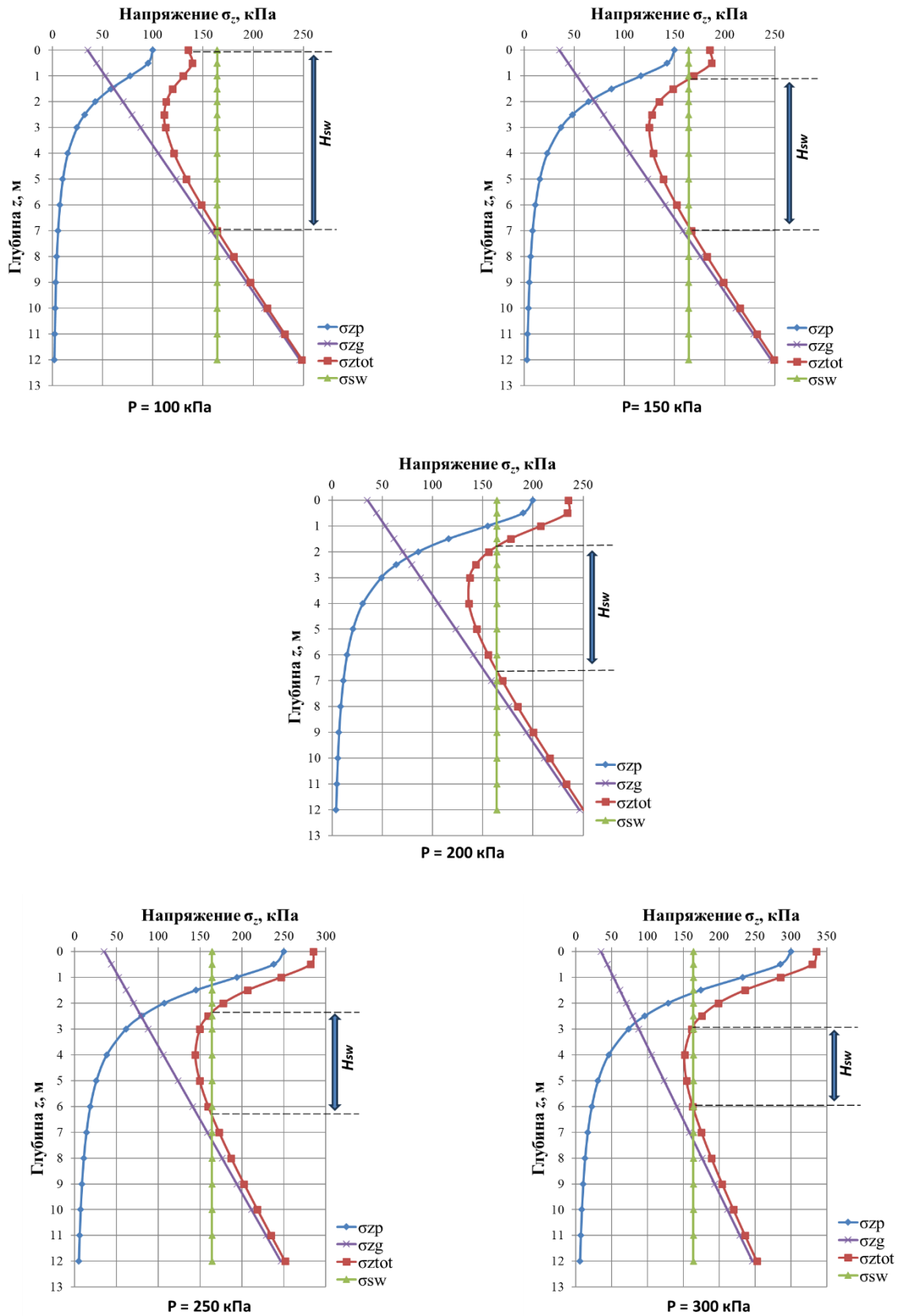


Рисунок 2.4-б - Графики определения зоны набухания для образца II, при пяти уровнях нагрузок на подошву фундамента

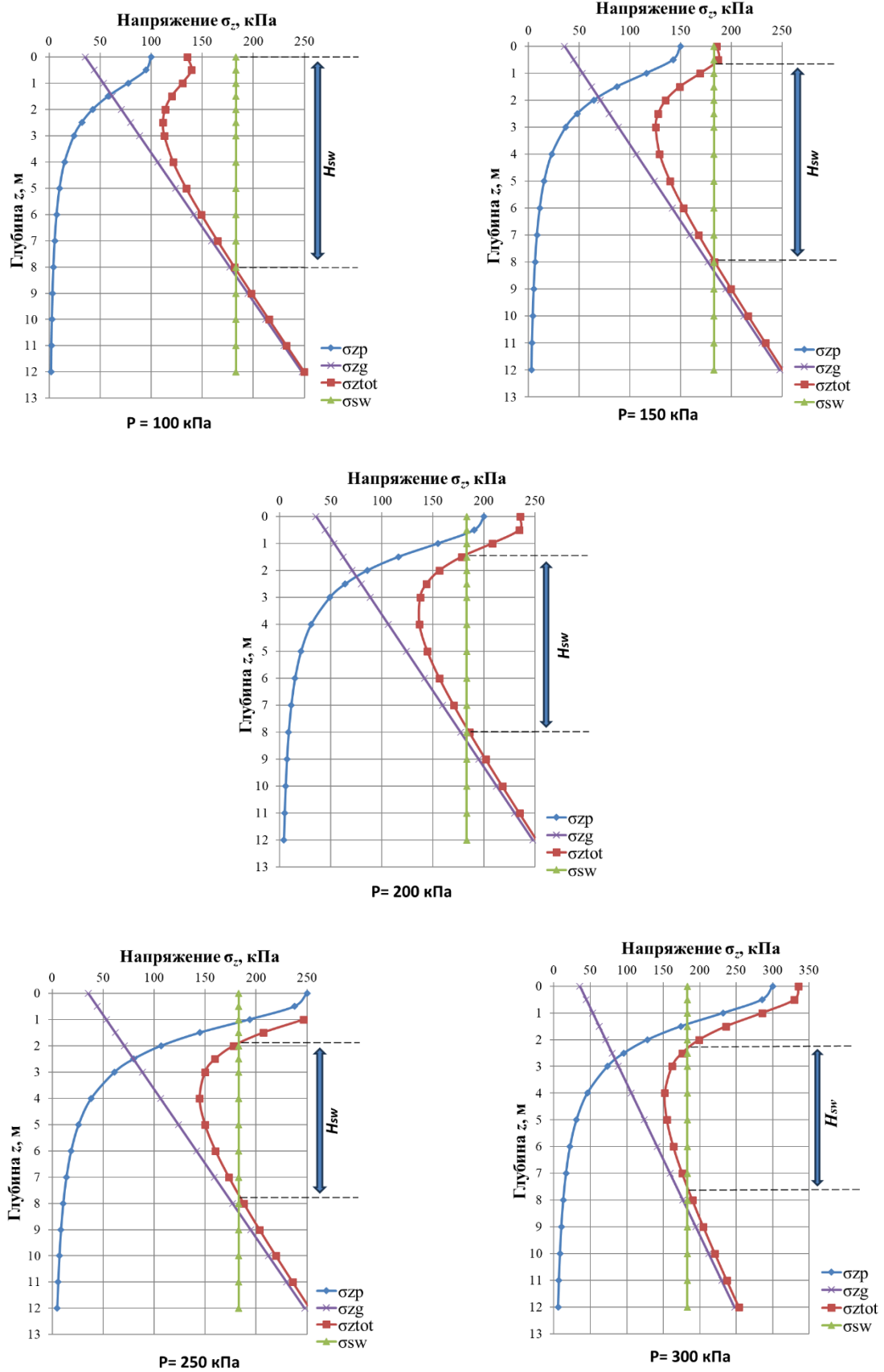


Рисунок 2.4-г - Графики определения зоны набухания для образца III, при пяти уровнях нагрузок на подошву фундамента

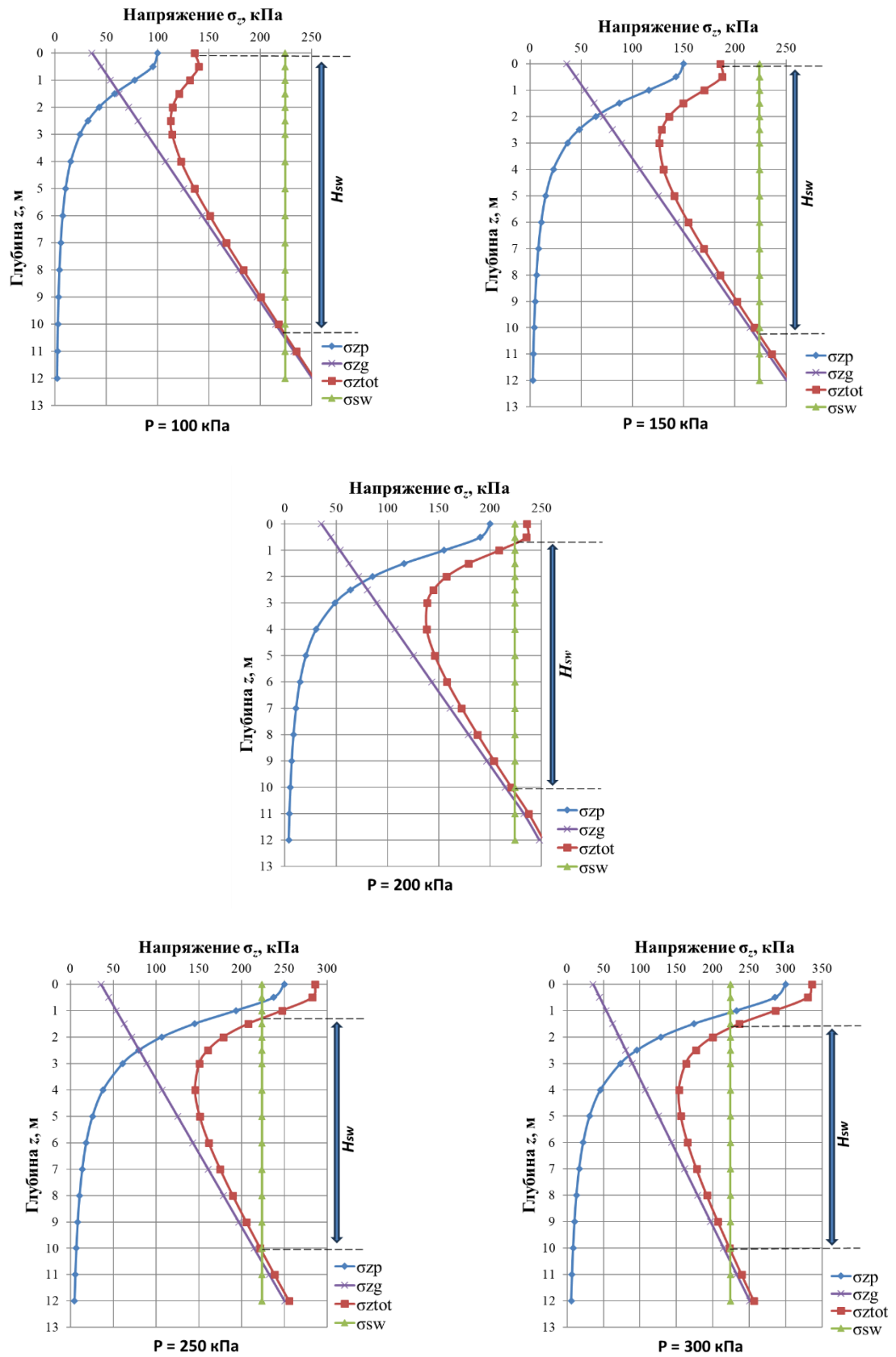


Рисунок 2.4-д - Графики определения зоны набухания для образца IV, при пяти уровнях нагрузок на подошву фундамента

Как следует из данных по экспериментальным свойствам глинистых грунтов Сирии, а также результатов моделирования деформаций оснований, выполненных авторами Аббуд Н. и др. [68], Аль-Абдулла А. [73], Ашрам М. Н. [18], Махер Ш. О. [39], Альсусу М. [16], Салим Б. [7],[50], Алафар Х. С. [15], принципиальные особенности поведения набухающих грунтов Сирии определяются факторами:

- характером и интенсивностью взаимодействия поверхностных слоев набухающего грунта с атмосферой, при этом взаимодействие происходит посредством теплопередачи и переноса влаги;
- взаимодействие поверхностных слоев набухающего грунта с атмосферой подавляется при использовании методов тепло- и гидро-изоляции поверхности раздела грунт-атмосфера;

Границы зоны набухания H_{sw} были определены в соответствии с требованиями пункта 6.2.14 СП 22.13330.2016 для двух расчетных случаев:

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

На рисунке 2.4 показаны графики, которые показывают зоны набухания для образцов I, II, III и IV при пяти уровнях нагрузок на подошву фундамента.

Полученные результаты этих расчетов будут использованы в качестве исходных данных для проведения численных экспериментов, которые будут рассмотрены в главе 4 данного исследования.

2.2 Климатические факторы набухания грунтов в Сирии

В Сирии, при строительстве зданий и инженерных сооружений на набухающих глинах, основной причиной деформаций зданий и инженерных сооружений становятся сезонные изменения температуры воздуха и количества осадков.

Таблица 2.2 - Среднесуточные температуры воздуха по месяцам

ГОРОД	МЕСЯЦЫ	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек
Дарья	Среднесуточная минимальная температура, (°C)	3,2	4,0	6,0	9,3	12,5	15,8	18,3	18,6	16,5	12,8	7,8	4,6
	Среднесуточная максимальная температура, (°C)	13,3	14,7	18,0	23,6	28,5	31,3	32,6	32,6	31,3	27,8	21,0	15,2
Хомс	Среднесуточная минимальная температура, (°C)	2,8	3,3	5,6	9,2	13	17,1	19,8	20,1	17,5	12,7	7	3,8
	Среднесуточная максимальная температура, (°C)	11,1	13,0	16,6	21,6	27,0	30,8	32,3	32,8	31,3	26,9	19,1	12,5
Латакия	Среднесуточная минимальная температура, (°C)	8,4	9,0	10,9	14,0	17,1	20,9	24,0	24,5	22,1	18,4	13,7	10,0
	Среднесуточная максимальная температура, (°C)	15,6	16,3	18,4	21,5	24,2	26,8	28,9	29,7	29,0	26,8	22,1	17,3
Халеб	Среднесуточная минимальная температура, (°C)	1,7	2,4	5,0	8,9	13,5	18,1	20,9	20,9	17,3	12,4	6,4	3,3
	Среднесуточная максимальная температура, (°C)	10,3	12,6	16,9	22,6	28,7	33,6	36,2	36,1	33,2	27,0	16,8	11,9

Согласно данным, предоставленным Всемирной метеорологической организации (World Meteorological Organization, WMO), в таблице 2.2 представлены среднесуточные температуры воздуха по месяцам в провинциях Дарья, Хомс, Латакия и Халеб. Кроме того, в таблице 2.3 отражены среднее количество осадков и число дней с осадками в этих же регионах по месяцам.

Таблица 2.3 - Среднее количество осадков и число дней с осадками по месяцам

ГОРОД	МЕСЯЦЫ	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек
Дарья	Среднее количество осадков , (мм)	60,9	49,4	42,3	15,2	3,4	1,0	0,0	0,0	0,4	9,4	22,9	45,9
	Среднее число дней с осадками , (Сутки)	10	11	7	4	1	0	0	0	0	2	5	8
Хомс	Среднее количество осадков , (мм)	95,1	76,5	56,4	33,3	13,0	2,6	0,2	0,0	2,4	21,1	48,1	80,7
	Среднее число дней с осадками , (Сутки)	13	15	10	6	3	0	0	0	1	4	7	11
Латакия	Среднее количество осадков , (мм)	162,6	99,8	90,6	44,2	21,0	4,5	0,9	4,5	7,8	67,1	95,2	160,7
	Среднее число дней с осадками , (Сутки)	13	17	11	7	4	1	0	1	2	6	8	13
Халеб	Среднее количество осадков , (мм)	60,3	52,0	46,1	33,6	17,9	2,3	0,1	0,3	2,2	19,2	35,2	59,6
	Среднее число дней с осадками , (Сутки)	13	14	10	7	4	1	0	0	1	4	7	11

Наиболее жаркие месяцы - это июнь-сентябрь, а самые холодные - с ноября по февраль. Абсолютный температурный максимум приходится на июль-август, а

минимум — на январь и февраль. Например, в Халебе в июле-августе температура составляет 36,2 и 36,1 °С соответственно, а в январе-феврале — всего лишь 1,7–2,4 °С (табл. 2.1).

Среднее число дней с осадками в месяц может варьироваться от 0 до 17 дней. В городах Дарья, Хомс, Латакия и Халеб в среднем выпадает 48, 70, 83 и 72 дня осадков в год, соответственно. Наибольшее число дней с осадками в периоде с декабря по май составляет 95,7, 92,9, 88,0, и 91,7% от числа дней с осадками в год. для каждого из этих городов соответственно. Таким образом, можно выделить два основных сезона: сезон дождей, который длится с ноября по май, и сухой сезон, который начинается в июне и заканчивается в октябре.

Погодно-климатические условия Сирии, характеризующиеся резкой сменой сезона дождей на засушливый, играют ключевую роль в процессе набухания зданий и сооружений, что может привести к их повреждениям.

2.3 Материалы и методы исследования

2.3.1 Материалы исследования

В качестве объектов исследования были выбраны образцы набухающих глинистых грунтов, которые были собраны на территории Сирийской Арабской Республики. Пробы были взяты на различных объектах, чтобы получить материал с ярко выраженными свойствами набухания.

Для оценки физических и механических свойств отобранных грунтов было проведено ряд стандартных лабораторных экспериментов. В ходе экспериментов были определены следующие характеристики грунтов: Влажность (W), Удельный

вес частиц грунта (γ_s), Удельный вес грунта (γ), Удельный вес сухого грунта (γ_d), Влажность на границе текучести (W_L), Влажность на границе раскатывания (W_P), Число пластичности (I_P), Показатель текучести (I_L), Относительная деформация набухания (ε_{sw}), Давления набухания (P_{sw}), Сцепления (c), и угол внутреннего трения (φ).

Образцы грунта: В экспериментах использовались четыре образца грунта, отобранные для исследования эффективности стабилизации набухающих глинистых грунтов, характерных для Сирии. Более подробно об этом можно узнать в разделе 2.1.2. Эти исследования направлены на разработку метода улучшения свойств грунтов оснований фундаментов зданий и сооружений. Результаты этих экспериментальных исследований для всех образцов, собранных из различных объектов Сирии были представлены в таблице 2.1.

Материалы для стабилизации: Материалами для стабилизации являются известь и полипропиленовые волокна. Материалы, которые использовались в экспериментах, представлены на рисунке 2.2

Основным вяжущим веществом, применяемым для стабилизации грунтов, являлась негашёная известь. Сырьё для её производства — известняк — было добыто из месторождений, расположенных в провинции Хама, Сирия.

Процесс приготовления извести включал стадию тонкого измельчения исходного известняка в шаровой мельнице. Эта операция была выполнена на цементном заводе в городе Адра, что позволило получить материал с требуемой дисперсностью.

Чтобы сохранить химическую активность полученного продукта, его немедленно упаковали в герметичные полимерные пакеты согласно требованиям ГОСТ 12071–2014 [2]. Это предотвратило карбонизацию и гидратацию извести под воздействием атмосферной влаги и обеспечило её сохранность для проведения исследований. Для определения состава и качества используемой извести был проведён химический анализ. Химический состав использованной в исследовании извести представлен в таблице 2.4.

Таблица 2.4 - Химический состав извести

CaO, %	MgO, %	Fe ₂ O ₃ , %	SO ₄ , %
92,90	0,87	0,38	0,80

В качестве армирующего компонента были выбраны полипропиленовые волокна (ППВ). Этот материал был выбран благодаря своим свойствам:

Также в исследование были использованы полипропиленовые волокна. Выбор этого материала был обоснован на его свойства:

- высокая прочность на растяжение;
- не вступает в химические реакции;
- устойчивость к воздействию грунтовых вод;
- доступная стоимость.

В таблице 2.5 представлены основные физико-механические свойства используемых полипропиленовых волокон, включая их длину, диаметр, плотность и предел прочности на растяжение

Таблица 2.5 - Основные свойства полипропиленовых волокон

№ п/п	Характеристики ППВ	Величина
1	Влагопоглощение	0
2	Средняя длина волокна, мм	12
3	Средний диаметр волокна, мм	0,034
4	Цвет	Белый
5	Плотность, г/см ³	0,91
6	Содержание углерода, %	0,6 --- <i>min</i>
7	Предел прочности на растяжение, МПа	350
8	Удлинение при растяжении, %	15 --- <i>max</i>
9	Модуль упругости, МПа	3500
10	Химическая и коррозионная устойчивость	Высокая
11	Кислотостойкость	Высокая

2.3.2 Методы исследования

Цель экспериментальных исследований — выявить оптимальную комбинацию добавок, которая приведет к наибольшей эффективности в улучшении исследуемых набухающих грунтов.



Рисунок 2.5 - Материалы, используемые в экспериментах

Для этого была разработана программа лабораторных экспериментов, направленных на оценку эффективности использования предложенных комбинаций для улучшения набухающих глинистых грунтов, характерных для Сирии. Эта программа была разработана с учётом ранее проведённых исследований [93], [97], [91]. Подбор комбинаций для исследований исходил из выбора процентных содержаний извести и полипропиленовых волокон.

Таким образом, было запланировано сформировать 20 экспериментальных комбинаций. Перечень исследованных комбинаций представлен в таблице 2.6.

Таблица 2.6 - Комбинация добавок, использованных в исследовании

№ группы	Обозначение комбинации добавок	Содержание		
		природного грунта, %	известки, %	ППВ, %
1	И0-ППВ0	100,00	0	0
2	И0-ППВ0,05	99,95	0	0,05
3	И0-ППВ0,15	99,85	0	0,15
4	И0-ППВ0,25	99,75	0	0,25
5	И0-ППВ0,35	99,65	0	0,35
6	И2-ППВ0	98,00	2	0,00
7	И2-ППВ0,05	97,95	2	0,05
8	И2-ППВ0,15	97,85	2	0,15
9	И2-ППВ0,25	97,75	2	0,25
10	И2-ППВ0,35	97,65	2	0,35
11	И5-ППВ0	95,00	5	0,00
12	И5-ППВ0,05	94,95	5	0,05
13	И5-ППВ0,15	94,85	5	0,15
14	И5-ППВ0,25	94,75	5	0,25
15	И5-ППВ0,35	94,65	5	0,35
16	И8-ППВ0	92,00	8	0,00
17	И8-ППВ0,05	91,95	8	0,05
18	И8-ППВ0,15	91,85	8	0,15
19	И8-ППВ0,25	91,75	8	0,25
20	И8-ППВ0,35	91,65	8	0,35

Результаты экспериментальных исследований будут использованы в разработке метода улучшения набухающих грунтов, характерных для Сирийской Арабской Республики.

В рамках данного исследования разработана программа лабораторных экспериментов, направленных на оценку эффективности использования предложенных комбинаций для улучшения набухающих глинистых грунтов, характерных для Сирии.

Процесс включал последовательное выполнение операций по подготовке исходных компонентов, смешиванию, уплотнению и последующему твердению. Программа лабораторных экспериментов была разработана с учётом ранее проведённых исследований. Подбор комбинаций для исследований исходил из выбора процентных содержаний извести и полипропиленовых волокон:

- 4 уровня процентных содержаний извести (0%, 2%, 5%, 8% от массы сухого грунта).
- 5 уровней процентных содержаний полипропиленовых волокон (0%, 0.05%, 0.15%, 0.25%, 0.35% от массы сухого грунта).

И так, было запланировано сформировать 20 различных экспериментальных комбинаций.

Таким образом, разработанная программа включает исследования ряда различных комбинаций, что позволяет оценить эффективность каждого компонента отдельно и синергетический эффект совместного использования добавок разного процентного содержания.

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.

Подготовка исходных материалов и смешивание: Исходный глинистый грунт перед проведением опытов был высушен до постоянной массы в сушильном шкафу при температуре $105 \pm 5^\circ\text{C}$ в соответствии с ГОСТ 5180–2015 [1], «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик». Высушенный грунт был

измельчен и просеян через сито с размером ячейки 2 мм для устранения крупных включений и обеспечения гранулометрической однородности. Из всего спектра методов приготовления грунтовых смесей (барабанные смесители, механические мешалки) был выбран метод ручного смешивания в фарфоровых чашах. Данный выбор обусловлен необходимостью тщательного визуального контроля за равномерностью распределения коротких полимерных волокон в грунте, что трудно достижимо при использовании механизированных методов, при которых возможно образованию комков в грунте.

Процесс смешивания осуществлялся по трехстадийной методике, описанной в работах [115],[168]. Рассчитанная навеска высушенного грунта делилась на три равные части. Рассчитанная масса извести добавлялась к первой части и хорошо перемешивалась, а рассчитанная масса полипропиленовых волокон добавлялась ко второй части и хорошо перемешивалась. Затем эти две части постепенно добавились к третьей части и тщательно перемешивались до образования массы однородного состава.

Затем к этой сухой смеси добавлялось определённое количество дистиллированной воды, расчетное исходя из определённой ранее оптимальной влажности исследуемого грунта. Вода тщательно перемешивалась с грунтовой смесью для обеспечения равномерной влажности. После этого грунт уплотняли методом стандартного уплотнения по ГОСТу. В результате получили образцы цилиндрической формы с одинаковыми физическими характеристиками для каждой комбинации.

Полученные образцы заворачивались в тонкую полимерную пленку для сохранения влажности и положили для твердения в климатическую камеру с постоянной температурой 20 ± 1 °C и относительной влажностью воздуха $96 \pm 2\%$. По программе экспериментов периоды твердения составили 3, 7, 14, 21 и 28 суток.

2.3.3 Выводы по главе 2

- Набухающие грунты в Сирии распространяются в местах, где происходит активное строительство. При этом карты распространения набухающих грунтов и известняковых пород в Сирии показывает их близкого расположения. Это подчеркивает экономичность использования извести для улучшения свойств этих грунтов.
- В Сирии при строительстве зданий и инженерных сооружений на набухающих глинах основной причиной деформаций зданий и инженерных сооружений становятся сезонные изменения температуры воздуха, резкий переход от продолжительного сухого сезона в дождливый сезон и количества осадков.
- На основании исследования характеристик набухающих грунтов были отобраны 4 типа грунта, характерных для инженерно-геологических условий Сирии. Их число пластичности (IP) находились в диапазоне 34,5%–58,3%, относительная деформация набухания 9,8%-18,2% и давление набухания 133–224 кПа.

ГЛАВА 3. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.

В этой главе приводятся результаты экспериментальных исследований эффективности добавок извести и ППВ на улучшения характеристики набухающих грунтов. Анализ этих экспериментов позволил выявить зависимости исследуемых параметров грунтов от различных комбинаций добавок, а также от времени отверждения.

В следующих параграфах приводятся результаты исследования следующих характеристик:

- 1) Характеристики уплотненного грунта: максимальный удельный вес сухого грунта (γ_{dmax}) и оптимальная влажность (W_{opt}). Эти параметры будут использоваться при подготовке образцов грунтов для последующих испытаний, как описано в параграфе 2.3.2.
- 2) Параметры пластичности: влажность на границе текучести W_L , влажность на границе раскатывания W_P , число пластичности IP и степени набухания.
- 3) Параметры набухания: относительная деформация набухания ε_{sw} и давление набухания P_{sw} .
- 4) Характеристики сдвиговой прочности: угол внутреннего трения (φ) и удельное сцепление (c).

3.1 Характеристики уплотненного грунта.

В данном исследовании изучались изменения максимального удельного веса сухого грунта (γ_{dmax}) и оптимальной влажности (W_{opt}) при различных соотношениях извести и полипропиленового волокна.

В таблице 3.1 представлены экспериментальные результаты для всех исследуемых комбинации. А на рисунке 3.1 представлены диаграммы зависимости указанных параметров от различных составов извести и полипропиленовых волокон.

Анализ экспериментальных данных позволил выявить следующие закономерности:

1. При добавлении извести к глинистому грунту увеличивается оптимальная влажность и уменьшается максимальный удельный вес грунта. Такая тенденция наблюдается для всех 4 типов грунтов и согласуется с данными предыдущих исследований [93], [104], [166], [147], [112]. Данное явление можно объяснить тем, что удельный вес извести ниже, чем у грунта, а её водоудерживающая способность выше.

2. При добавлении полипропиленовых волокон (ППВ) было отмечено, что оптимальное содержание воды в набухающем грунте, стабилизированном известью, оставалось относительно постоянным при увеличении содержания ППВ, в то время как максимальный удельный вес сухого грунта (γ_{dmax}) постепенно уменьшался. 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 (W_{opt}) на 8,8–14,4% и снижению максимального удельного веса сухого грунта (γ_{dmax}) на 4,2–7,2% по сравнению с исходными значениями.

Таблица 3.1 - максимальный удельный вес сухого грунта (γ_{dmax}) и оптимальная влажность (W_{opt})

№ группы	Обозначение комбинации добавок	Грунт I		Грунт II		Грунт III		Грунт IV	
		максимальный удельный веса сухого грунта (γ_{dmax}), кНм ³	оптимальная влажность (W_{opt}), %	максимальный удельный веса сухого грунта (γ_{dmax}), кНм ³	оптимальная влажность (W_{opt}), %	максимальный удельный веса сухого грунта (γ_{dmax}), кНм ³	оптимальная влажность (W_{opt}), %	максимальный удельный веса сухого грунта (γ_{dmax}), кНм ³	оптимальная влажность (W_{opt}), %
1	И0-ППВ0	15,26	25,1	14,76	25,78	14,33	23,63	13,92	24,58
2	И0-ППВ0,05	15,28	25,14	14,71	25,79	14,35	23,65	13,9	24,55
3	И0-ППВ0,15	15,24	25,22	14,68	25,76	14,31	23,69	13,91	24,61
4	И0-ППВ0,25	15,2	25,18	14,62	25,84	14,28	23,66	13,88	24,6
5	И0-ППВ0,35	15,17	25,27	14,57	25,82	14,25	23,71	13,85	24,65
6	И2-ППВ0	14,89	25,89	14,32	26,7	14,12	24,52	13,53	25,85
7	И2-ППВ0,05	14,9	25,92	14,35	26,68	14,11	24,51	13,52	25,88
8	И2-ППВ0,15	14,85	26,05	14,28	26,75	14,08	24,55	13,52	25,89
9	И2-ППВ0,25	14,84	26,12	14,26	26,79	14,05	24,57	13,49	25,86
10	И2-ППВ0,35	14,82	26,09	14,22	26,84	14,02	24,59	13,46	25,92
11	И5-ППВ0	14,71	27,12	13,87	28,1	13,48	25,29	13,05	27,74
12	И5-ППВ0,05	14,7	27,16	13,85	28,08	13,45	25,31	13,09	27,72
13	И5-ППВ0,15	14,68	27,15	13,85	28,1	13,47	25,35	13,02	27,76
14	И5-ППВ0,25	14,65	27,22	13,81	28,11	13,42	25,32	12,94	27,79
15	И5-ППВ0,35	14,62	27,32	13,78	28,14	13,4	25,39	12,92	28,12
16	И8-ППВ0	14,43	28,66	13,61	29,41	13,09	26,22	12,68	29,26
17	И8-ППВ0,05	14,41	28,69	13,61	29,43	13,05	26,26	12,66	29,29
18	И8-ППВ0,15	14,4	28,56	13,58	29,39	13,07	26,24	12,65	29,32
19	И8-ППВ0,25	14,38	28,81	13,55	29,42	13,05	26,25	12,62	29,35
20	И8-ППВ0,35	14,34	28,92	13,53	29,4	12,99	26,28	12,58	29,38

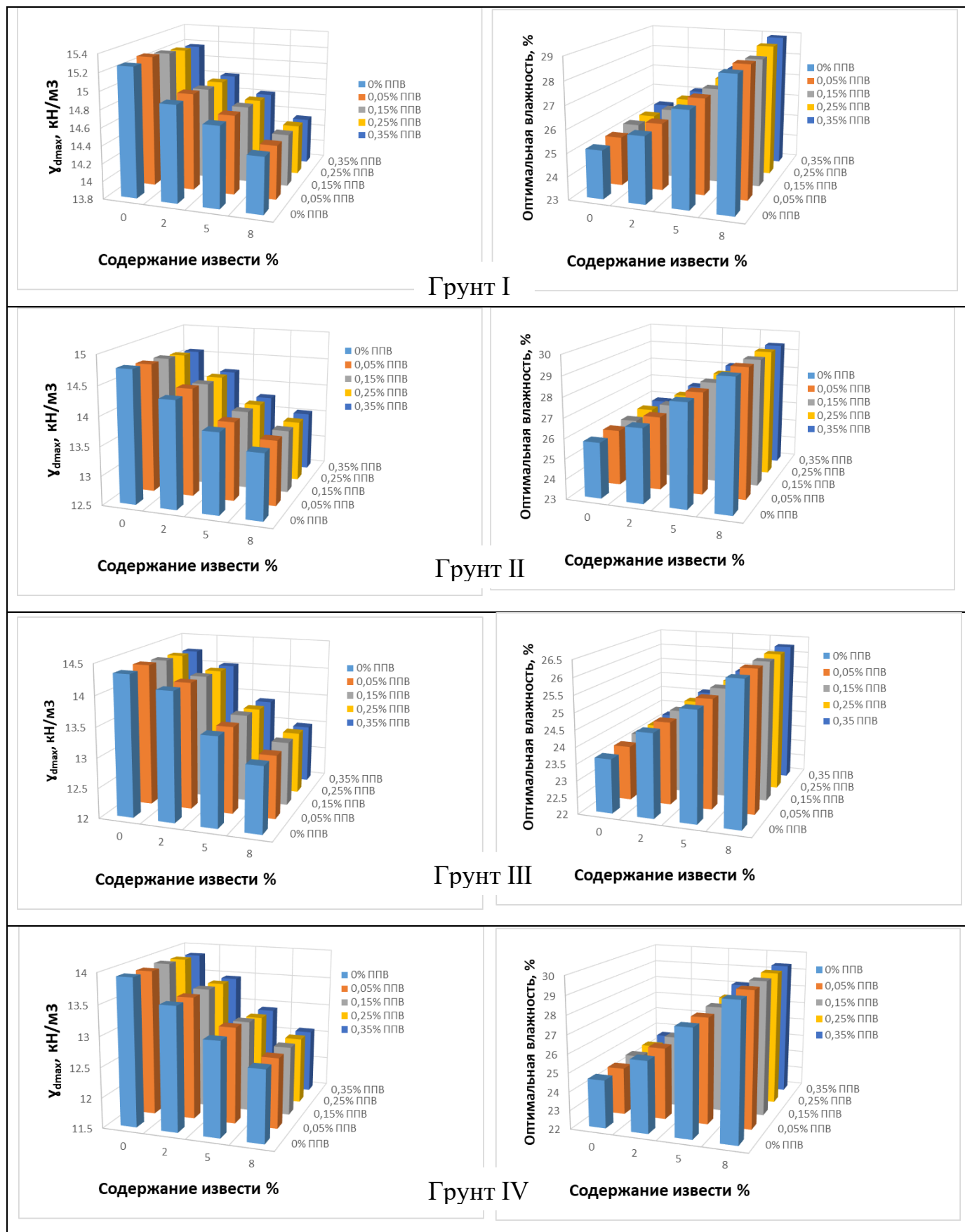


Рисунок 3.1- зависимость максимального удельного веса сухого грунта (γ_{dmax}) и оптимальной влажности (W_{opt}) от различных сочетаний извести и (ППВ)

3.2 Параметры пластичности

Программа экспериментов также включала исследование влияния изменения процентного содержания каждого компонента отдельно, и также синергетический эффект от их совместного применения. В частности изучалось изменения влажности на границе текучести (W_L), влажности на границе раскатывания (W_P) и число пластичности (I_P).

В процессе исследований было проведено 400 стандартных испытаний для каждого исследуемого параметра. Эксперименты проводились на 4 образца грунта с 20 различным содержанием добавок при 5 времён отверждения. Полученные результаты позволяли оценить эффективность разработанных композиций на снижение пластических свойств и, как следствие, улучшение геотехнических характеристик исследуемых грунтов. Ниже представлены результаты измерений, их анализ и графические зависимости.

В современной инженерно-геологической практике число пластичности (Plasticity Index, I_P) считается одним из ключевых критериев для классификации и оценки способности глинистых грунтов к набуханию. Подобные классификации рассматривались в главе 1. В данном исследовании классификация набухающих грунтов по числу пластичности была сделана в соответствии с работой W.G. Holtz и H.J. Gibbs [109].

Согласно экспериментальным данным, приведённым в главе 2, число пластичности для отобранных 4 типа грунтов варьируется от 34,5% до 58,3%. Таким образом, этих грунтов можно классифицировать как очень сильнонабухающих [109].

Влияния добавок извести и ППВ в разных комбинациях на влажности на границы текучести W_L и раскатывания W_P для 4 типов грунта представлены в виде 3D-диаграмм на рис. 3.2. А рисунок 3.3 представляет аналогичные 3D-диаграммы

числа пластичности I_p . Снижение индекса пластичности при добавлении извести и ППВ подтверждает эффективность применения этих добавок.

В качестве примера результаты экспериментов для грунта типа III представлены в таблице 3.2. При этом отрицательные значения (-) указывают на снижение показателей.

Исследование влияния времени отверждения на параметры пластичности вызывает особый интерес. [98], [90]. Полученные экспериментальные результаты по изменению индекса пластичности для всех четырех типов грунта и всех исследованных композиционных сочетаний, представлены в графической форме на рис. 3.4 и 3.5.

Анализ влияния комбинированных добавок на параметры пластичности:

1) Влияние извести

Анализ экспериментальных данных показал, что добавление извести значительно влияет на пластические свойства исследуемых грунтов. В частности, для композиции И8-ППВ0, содержащей 8% извести, были выявлены следующие изменения индекса пластичности (I_p):

- Грунт I: снижение I_p на 74,8% (с 34,5% до 8,7%)
- Грунт II: снижение I_p на 73,75% (с 40,0% до 10,5%)
- Грунт III: снижение I_p на 72,63% (с 48,6% до 13,3%)
- Грунт IV: снижение I_p на 69,81% (с 58,3% до 17,6%)

Согласно стандартной классификации [109], после обработки известью образцы грунтов I и II перешли в категорию слабонабухающих, а грунты III и IV — в категорию средненабухающих.

Снижение пластичности связано с комплексом физико-химических процессов, включающих катионный обмен, который приводит к флокуляции глинистых частиц, пуццолановые реакции, в результате которых образуются вторичные цементирующие соединения, а также структурные изменения, снижающие водопоглощение.

Таблица 3.2 - Свойства обработанных образцов грунта для грунта III

№ группы	Обозначение комбинации добавок	Предел текучести W_L , %		Предел раскатывания W_P , %		Число пластичности I_p , %		Потенциал набухаемости по классификации W.G. Holtz и H.J. Gibbs [109].
		значение	изменение, %	значение	изменение, %	значение	изменение, %	
1	И0-ППВ0	79,4	-	30,8	-	48,6	-	Очень сильнонабухающий
2	И0-ППВ0,05	76,4	-3,78	30,9	0,32	45,5	-6,38	Очень сильнонабухающий
3	И0-ППВ0,15	75,2	-5,29	31,7	2,92	43,5	-10,49	Очень сильнонабухающий
4	И0-ППВ0,25	74,7	-5,92	31,4	1,95	43,3	-10,91	Очень сильнонабухающий
5	И0-ППВ0,35	74,1	-6,68	31,7	2,92	42,4	-12,76	Очень сильнонабухающий
6	И2-ППВ0	60,2	-24,18	33,7	9,42	26,5	-45,47	Сильнонабухающий
7	И2-ППВ0,05	58,5	-26,32	34,1	10,71	24,4	-49,79	Средненабухающий
8	И2-ППВ0,15	56,3	-29,09	34,4	11,69	21,9	-54,94	Средненабухающий
9	И2-ППВ0,25	54,8	-30,98	35,1	13,96	19,7	-59,47	Средненабухающий
10	И2-ППВ0,35	53,8	-32,24	35,5	15,26	18,3	-62,35	Средненабухающий
11	И5-ППВ0	51,8	-34,76	36	16,88	15,8	-67,49	Средненабухающий
12	И5-ППВ0,05	51,2	-35,52	36,5	18,51	14,7	-69,75	Слабонабухающий
13	И5-ППВ0,15	49,5	-37,66	37	20,13	12,5	-74,28	Слабонабухающий
14	И5-ППВ0,25	47,2	-40,55	37,2	20,78	10,0	-79,42	Слабонабухающий
15	И5-ППВ0,35	46,1	-41,94	37,8	22,73	8,3	-82,92	Слабонабухающий
16	И8-ППВ0	50,9	-35,89	37,6	22,08	13,3	-72,63	Слабонабухающий
17	И8-ППВ0,05	49,7	-37,41	37,5	21,75	12,2	-74,90	Слабонабухающий
18	И8-ППВ0,15	48,5	-38,92	37,7	22,40	10,8	-77,78	Слабонабухающий
19	И8-ППВ0,25	47,6	-40,05	37,8	22,73	9,8	-79,84	Слабонабухающий
20	И8-ППВ0,35	47,3	-40,43	38,2	24,03	9,1	-81,28	Слабонабухающий

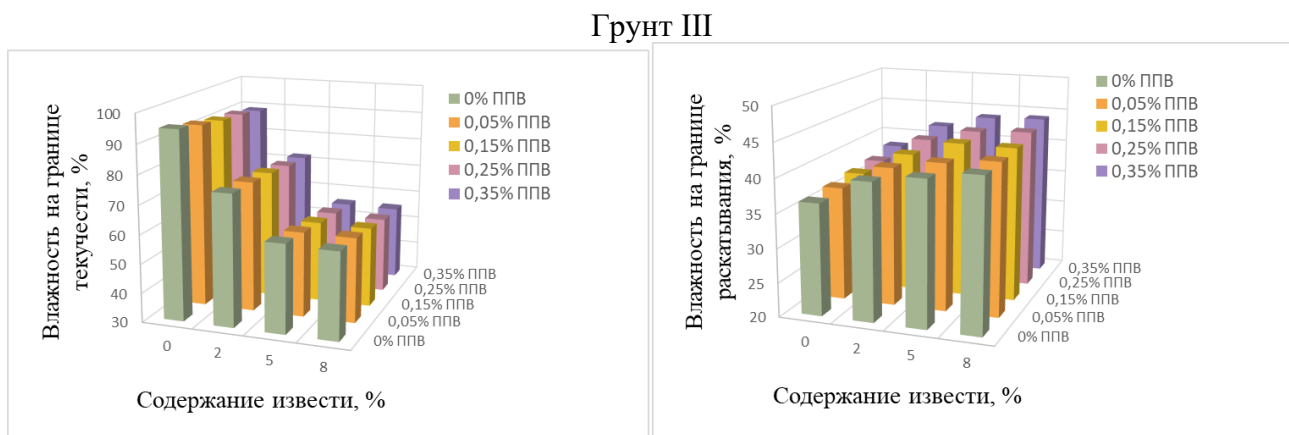
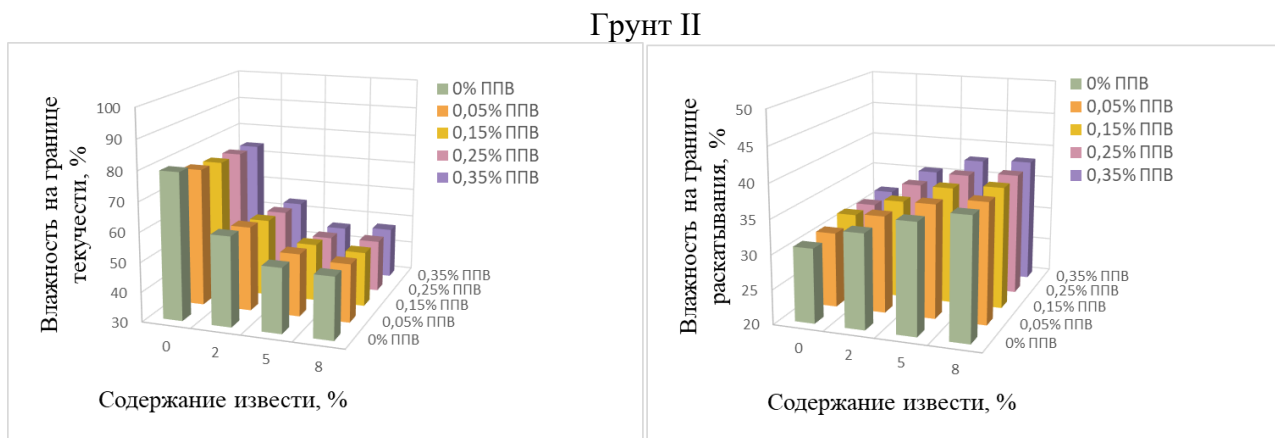
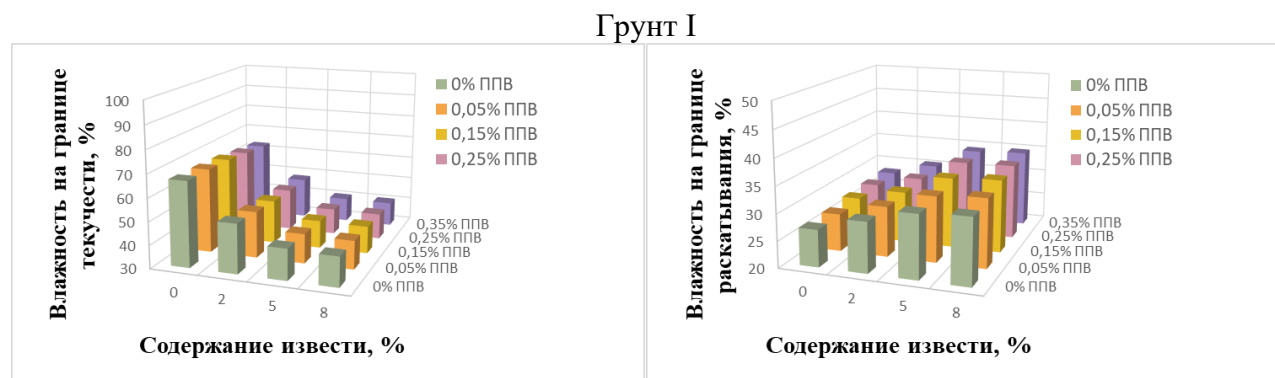
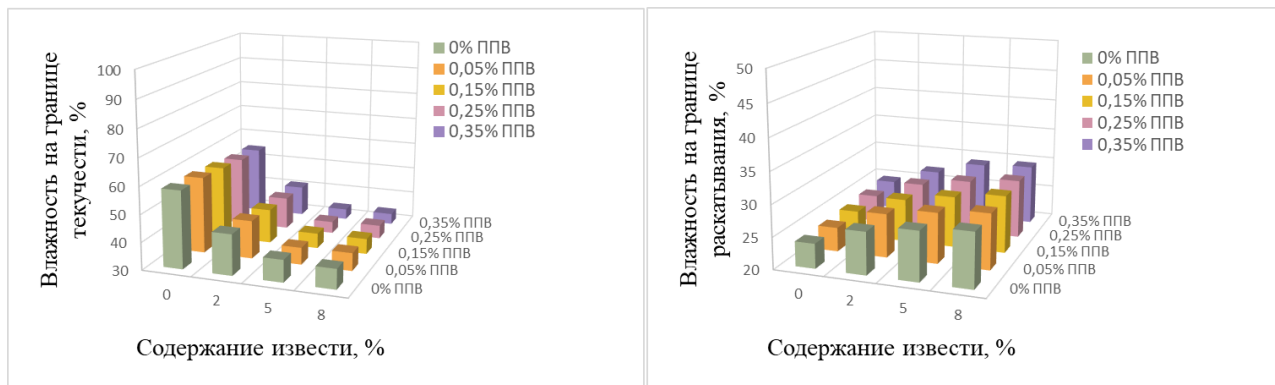


Рисунок 3.2 - зависимость влажности на границе текучести W_L и раскатывания W_P для четырёх типов грунтов от различных сочетаний извести и (ППВ)

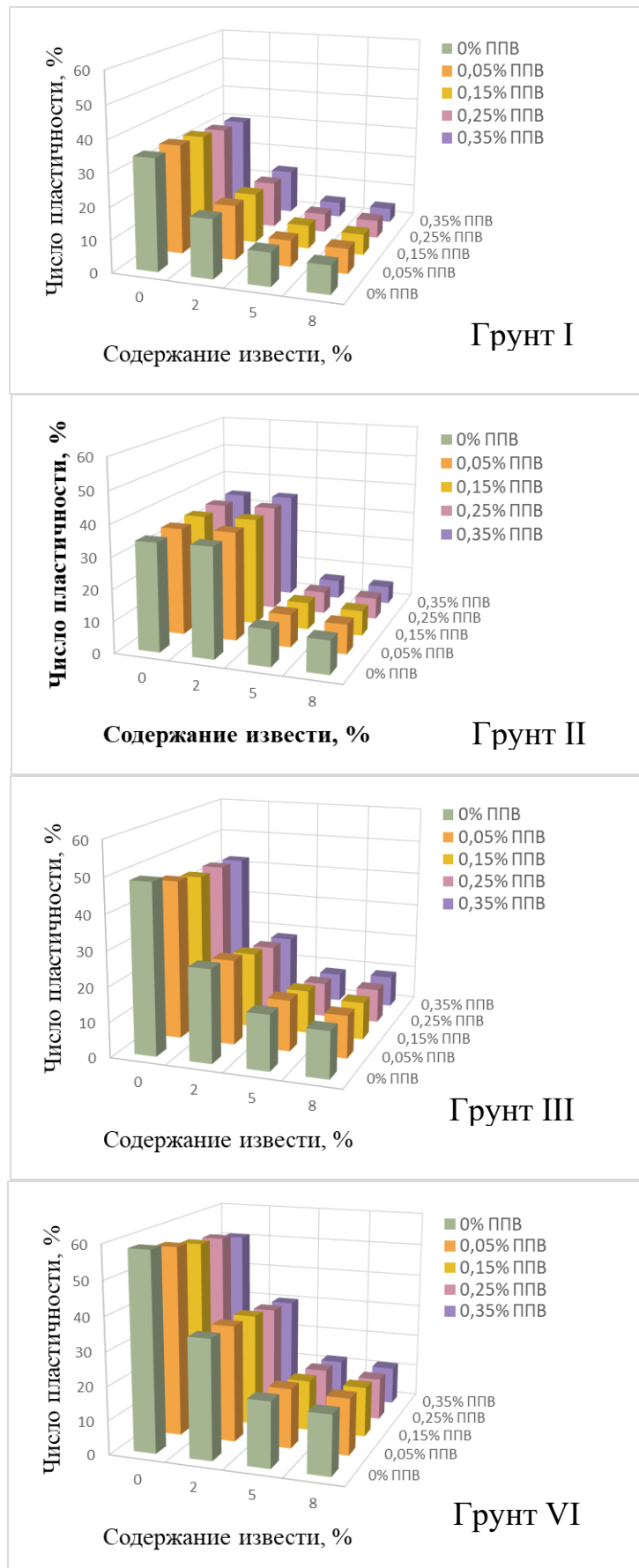
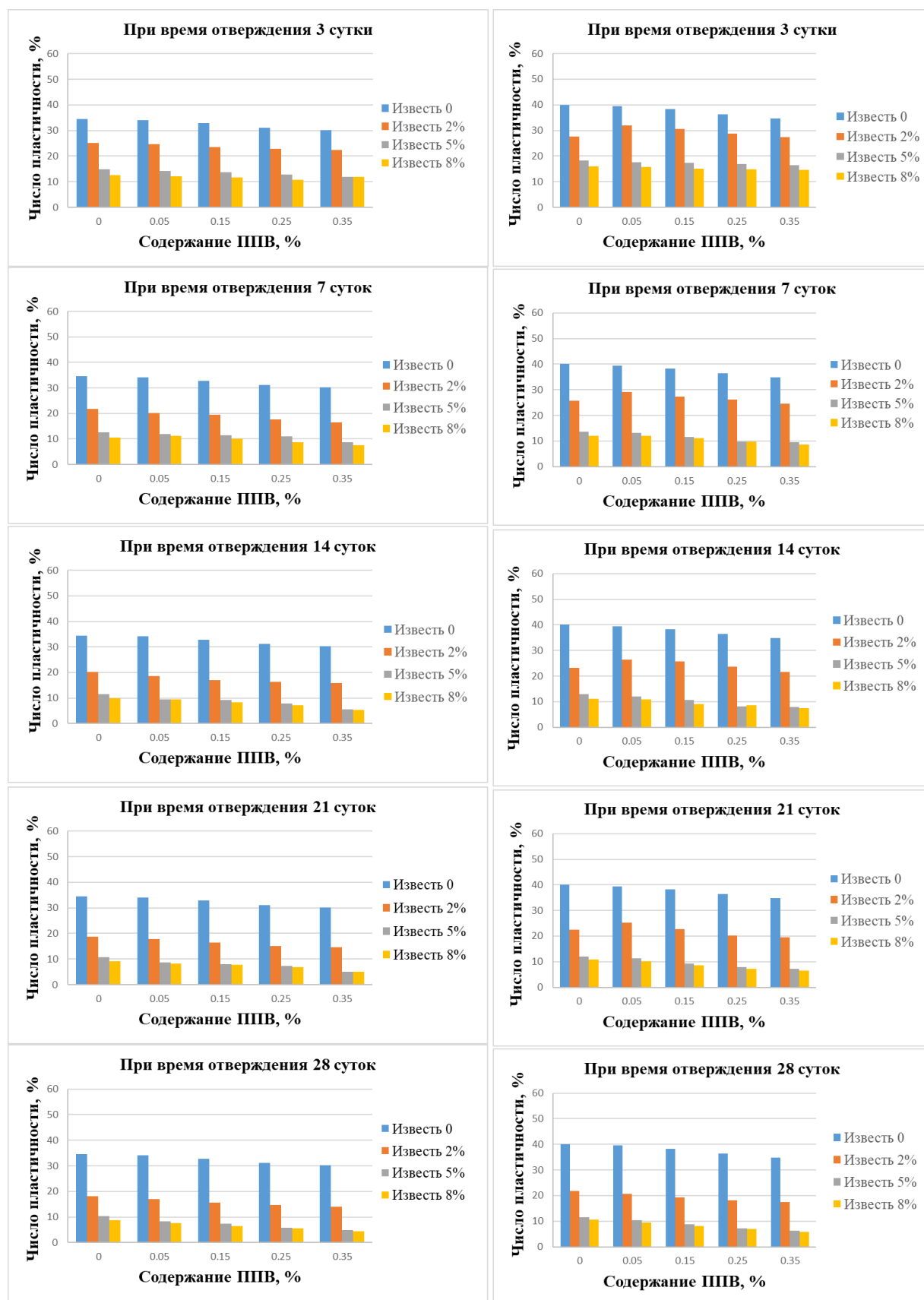


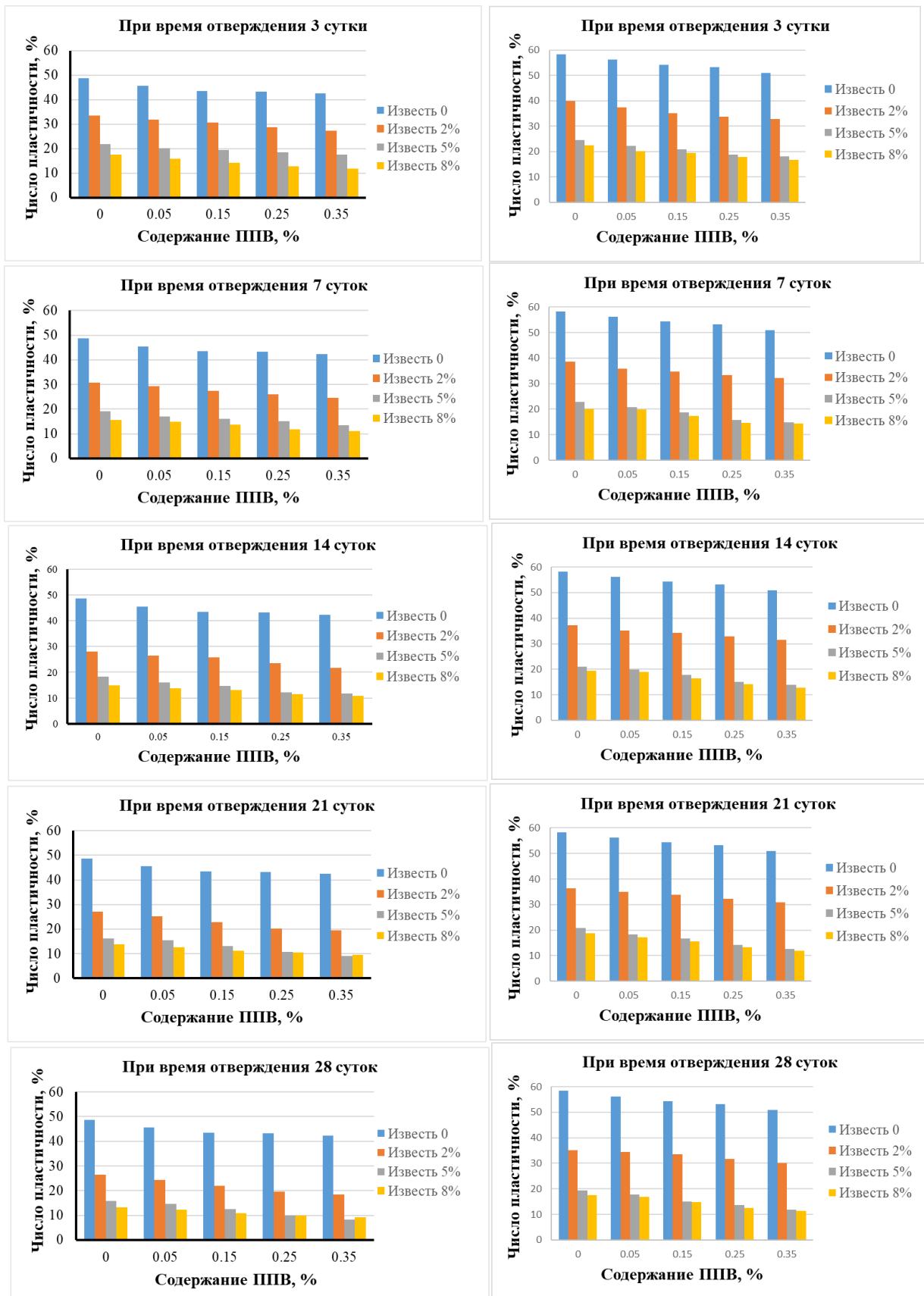
Рисунок 3.3 - зависимость числа пластичности I_p для четырёх типов грунтов от различных сочетаний извести и (ППВ)



Грунт I

Грунт II

Рисунок 3.4 - Графики влияния времени отверждения на число пластичности I_P для грунтов I и II от различных сочетаний извести и ППВ



Грунт III

Грунт IV

Рисунок 3.5 - Графики влияния времени отверждения на число пластичности I_p для грунтов III и IV от различных сочетаний извести и ППВ

Полученные результаты подтверждают результаты предыдущих исследований [78],[93], которые показали, что добавление извести значительно улучшает пластические свойства глинистых грунтов.

Таким образом, можно сделать вывод, что добавление извести является высокоэффективным способом снижения пластичности, что, в свою очередь, приводит к снижению набухаемости грунтов.

2) Влияние полипропиленовых волокон

Эксперименты по изучению влияния армирования полипропиленовыми волокнами (ППВ) на параметрах пластичности исследуемых грунтов показали незначительное снижение индекса пластичности (I_P).

Итак, при добавлении 0,35% ППВ без добавки извести (комбинация И0-ППВ0,35), снижение числа пластичности для всех 4-х типах грунта варьировалось от 12,6% до 13,0%, и грунты остались в категории очень сильнонабухающих согласно [109]. Эти результаты согласуются с выводами исследований [166],[119],[159].

Таким образом, можно заключить, что добавление ППВ без использования химических стабилизаторов оказывает лишь незначительное воздействие на пластичность набухающих грунтов. Хотя в результате армирования создается структурный каркас, сам по себе этот механизм не может существенно улучшить пластичность глинистых грунтов, что подтверждает необходимость комбинированного использования волокон с химическими стабилизаторами для достижения значительного улучшения свойств.

3) Синергетический эффект и оптимальные комбинации:

Результаты экспериментальных исследований показали, что композиция И5ППВ0,35 (5% извести и 0,35% полипропиленовых волокон) после 28 дней отверждения. В ходе исследования были выявлены следующие закономерности изменения характеристик:

1. Динамика пределов пластичности

Предел текучести (W_L) существенно снизился до следующих значений:

- Грунт I: 33,9% (уменьшение на 42,0%)
- Грунт II: 40,5% (уменьшение на 39,5%)
- Грунт III: 46,1% (уменьшение на 41,9%)
- Грунт IV: 55,7% (уменьшение на 41,18%)

Предел раскатывания (W_p), напротив, увеличился:

- Грунт I: 29,1% (рост на 22,0%)
- Грунт II: 34,3% (рост на 27,0%)
- Грунт III: 37,8% (рост на 22,7%)
- Грунт IV: 43,8% (рост на 20,3%)

2. Изменение числа пластичности

Число пластичности (I_p) демонстрирует значительное снижение:

- Грунт I: 4,8% (снижение на 86,1%)
- Грунт II: 6,2% (снижение на 84,5%)
- Грунт III: 8,3% (снижение на 82,9%)
- Грунт IV: 11,9% (снижение на 79,59%)

3. Анализ эффективности оптимальной и максимальной комбинации добавок

Сравнение числа пластичности (I_p) образцов с оптимальной (И5-ППВ0,35) и максимальной комбинацией добавок (И8-ППВ0,35) показано в таблице 3.3.

Таблица 3.3— Сравнительная эффективность комбинации

комбинация	Параметр	Грунт I	Грунт II	Грунт III	Грунт IV
И5-ППВ0,35	Снижение I_p , %	86,1	84,5	82,9	79,6
И8-ППВ0,35	Снижение I_p , %	87,0	85,5	81,3	80,5
Разность эффективности, %		0,9 %	1 %	1,6 %	0,9 %

Из таблицы 3.3 видно, что для всех типах исследуемых грунтов дополнительный эффект от увеличения содержания извести до 8% не превышает

1,6% по абсолютному значению и не приводит к существенному улучшению параметров пластичности.

На основании проведенного анализа установлено, что комбинация И5-ППВ0,35 является оптимальной для улучшения параметров пластичности исследуемых грунтов.

4) Влияние времени отверждения

Многие авторы отмечали важность определения зависимости числа пластичности (I_P) от времени отверждения грунта [303] [127].

В результате проведенных экспериментов выявлено постепенное снижение числа пластичности (I_P) с увеличением времени отверждения для всех комбинаций добавок.

Однако это снижение не было существенным для комбинации с добавкой только полипропиленовых волокон (рис. 3.4). Это подтверждает, что механизм действия ППВ в основном физический (армирующий).

Динамика изменения со временем числа пластичности для оптимальной комбинации (И5, ППВ 0,35) представлена в табл. 3.4 для 4-х типов грунта.

В таблице 3.4 представлена динамика изменения числа пластичности (%) при оптимальной комбинации (И5 ППВ 0,35) для всех исследуемых типов грунтов.

Анализ динамики изменения со временем числа пластичности (I_P) показал, что, наибольшее снижение числа пластичности наблюдается в течение 3–7 суток. После 14 суток скорость снижения значительно замедлилась, что соответствует более медленным пуццолановым реакциям.

Таблица 3.4 - динамика изменения числа пластичности (%) при оптимальной комбинации (И5 ППВ 0,35)

Срок отверждения, сутки	Снижение числа пластичности (I_P), %			
	Грунт I	Грунт II	Грунт III	Грунт IV
3	65,5	58,8	64,0	69,0
7	74,5	76,3	72,2	74,6
14	83,8	80,5	75,7	76,2
21	85,2	82,3	81,3	78,4
28	86,1	84,5	82,9	79,6

Из таблицы видно, что в первые 14 дней происходит значительное уменьшение числа пластичности.

3.3 Параметры набухания

Одной из основных целей улучшения набухающих грунтов является уменьшения их набухаемости и соответственно уменьшения давления набухания (P_{sw}) и относительной деформации набухания (ε_{sw}). [134], [99], [4], [6], [79].

Для оценки эффективности добавок извести и полипропиленовых волокон на набухаемость исследуемых грунтов исследовались изменения этих параметров набухания при изменении состава добавок. Все образцы были подготовлены с оптимальной влажностью и максимальным удельным весом сухого грунта, согласно требованиям ГОСТа. 22733–2016 [5]. Это обеспечило сопоставимость результатов испытания.

Анализ влияния комбинированных добавок на параметры набухания:

Эксперименты показали, что все исследуемые комбинации добавок, извести и полипропиленовых волокон, оказывают положительное влияние на параметры набухания грунтов (ε_{sw}) и P_{sw} .

Анализ результатов экспериментов позволил выявить эффективность различных комбинаций и закономерности изменения параметров набухания в зависимости от комбинации добавок и периодов отверждения. Это позволило установить оптимальную комбинацию добавок и рациональный период отверждения.

1) Влияние извести

Зависимости влияния известковых добавок на параметры набухания (ϵ_{sw}) и (P_{sw}) исследуемых 4 типов грунтов представлены в формате 3D-диаграмм на рисунке 3.6.

Эксперименты показали, что добавки 5% и 8% извести без добавки полипропиленовым волокном привели к значительному снижению давления набухания. После 28 дней отверждения это снижение составило:

- Грунт I: 74,4% и 78,2% (с 133 кПа до 34 кПа и 29 кПа соответственно)
- Грунт II: 62,2% и 68,3% (с 164 кПа до 62 кПа и 52 кПа)
- Грунт III: 56,8% и 61,2% (с 183 кПа до 79 кПа и 71 кПа)
- Грунт IV: 58,9% и 62,1% (с 224 кПа до 92 кПа и 85 кПа).

Можно отметить, что дальнейшее увеличение дозировки извести свыше 5% не привело к значительному повышению эффективности. Разница в снижении давления набухания между составами с 5% и 8% извести составляет всего 3,8–6,1% в зависимости от типа грунта.

Точно так же, добавление 5% и 8% извести без армирования полипропиленовым волокном значительно уменьшило относительную деформацию набухания. После 28 дней отверждения это снижение составило:

- Грунт I: 85,7% и 88,8% (с 9,8% до 1,4% и 1,1% соответственно)
- Грунт II: 83,2% и 85,6% (с 12,5% до 2,1% и 1,8%)
- Грунт III: 81,0% и 83,7% (с 15,3% до 2,9% и 2,5%)
- Грунт IV: 76,4% и 79,7% (с 18,2% до 4,3% и 3,7%)

Можно отметить, что увеличение дозировки извести свыше 5% не привело к значительному повышению эффективности. Разница в снижении относительного набухания между составами с 5% и 8% составляет всего 2,4–3,3% в зависимости от типа грунта. Это свидетельствует о том, что оптимальная дозировка извести была достигнута на уровне 5%, что объясняется полным протеканием катионного обмена и исчерпанием пуццоланового потенциала грунта.

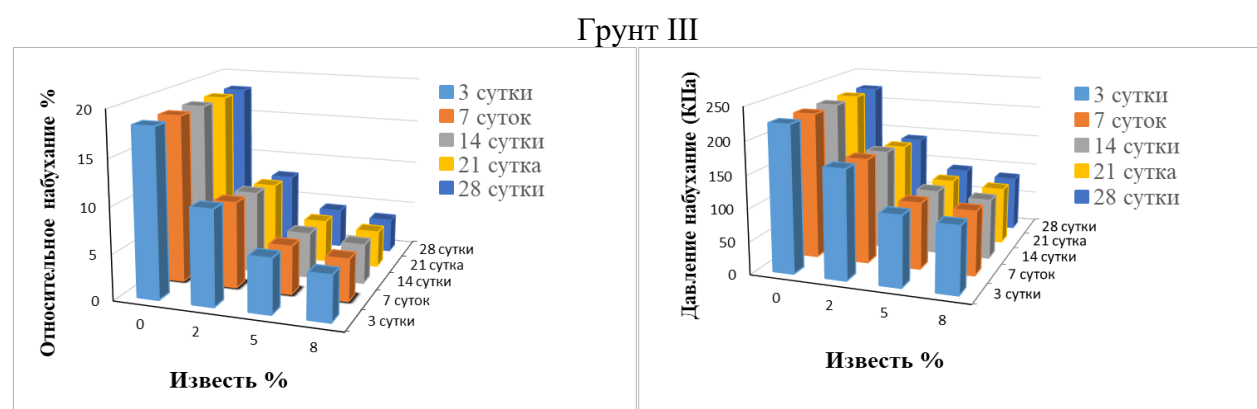
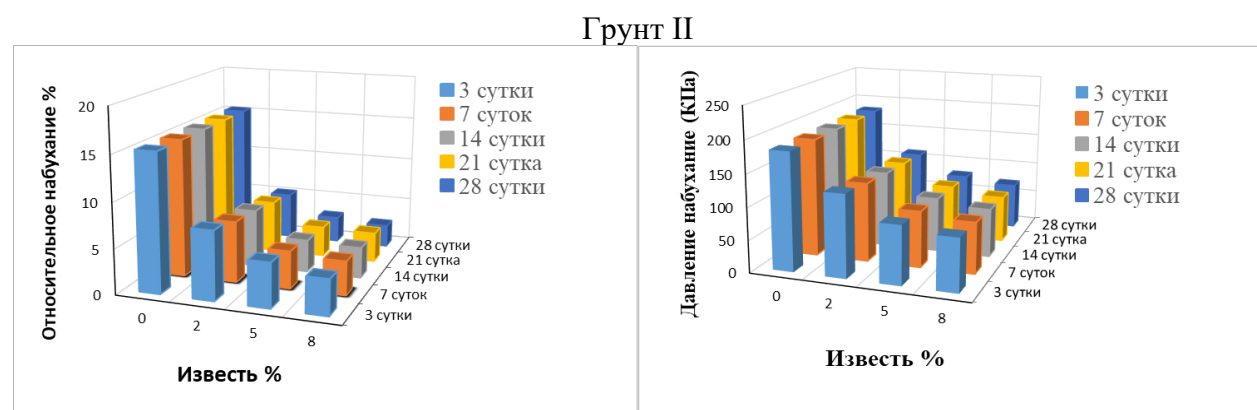
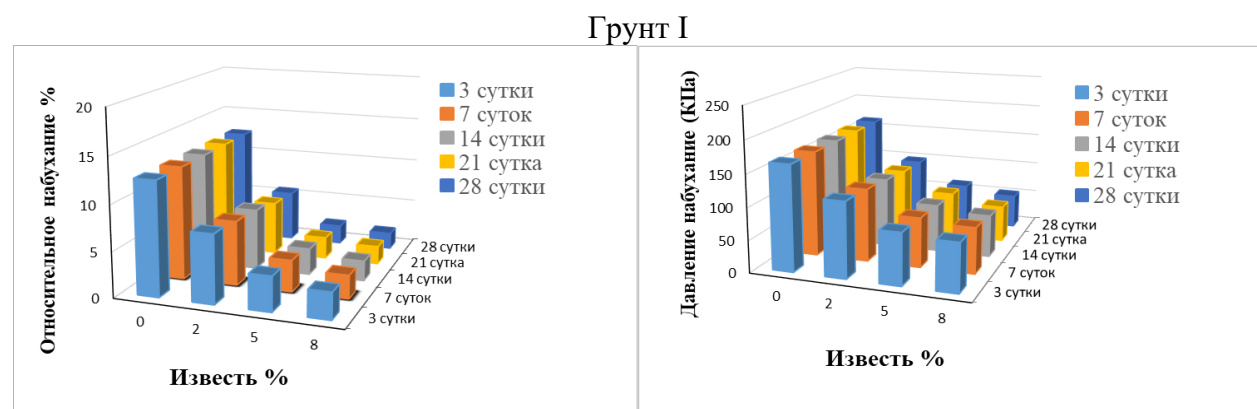
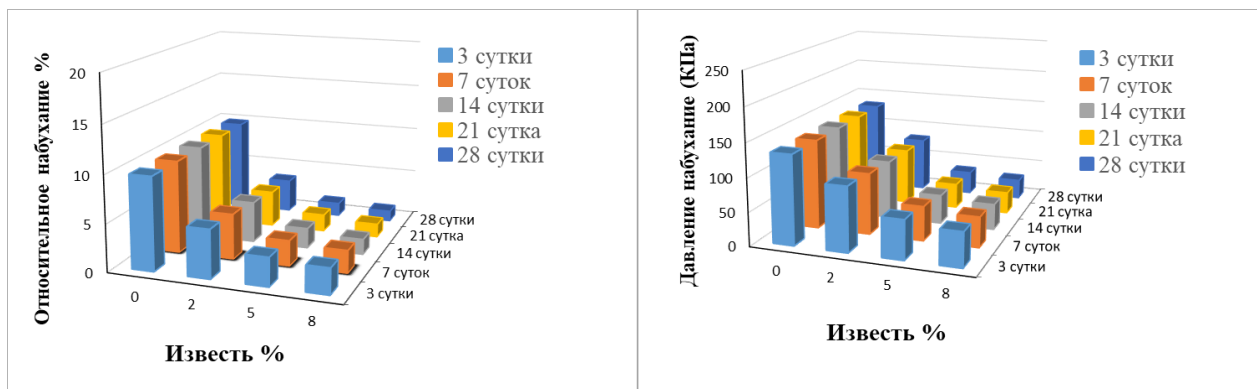


Рис. 3.6 - Зависимости влияния известковых добавок на параметры набухания исследуемых грунтов

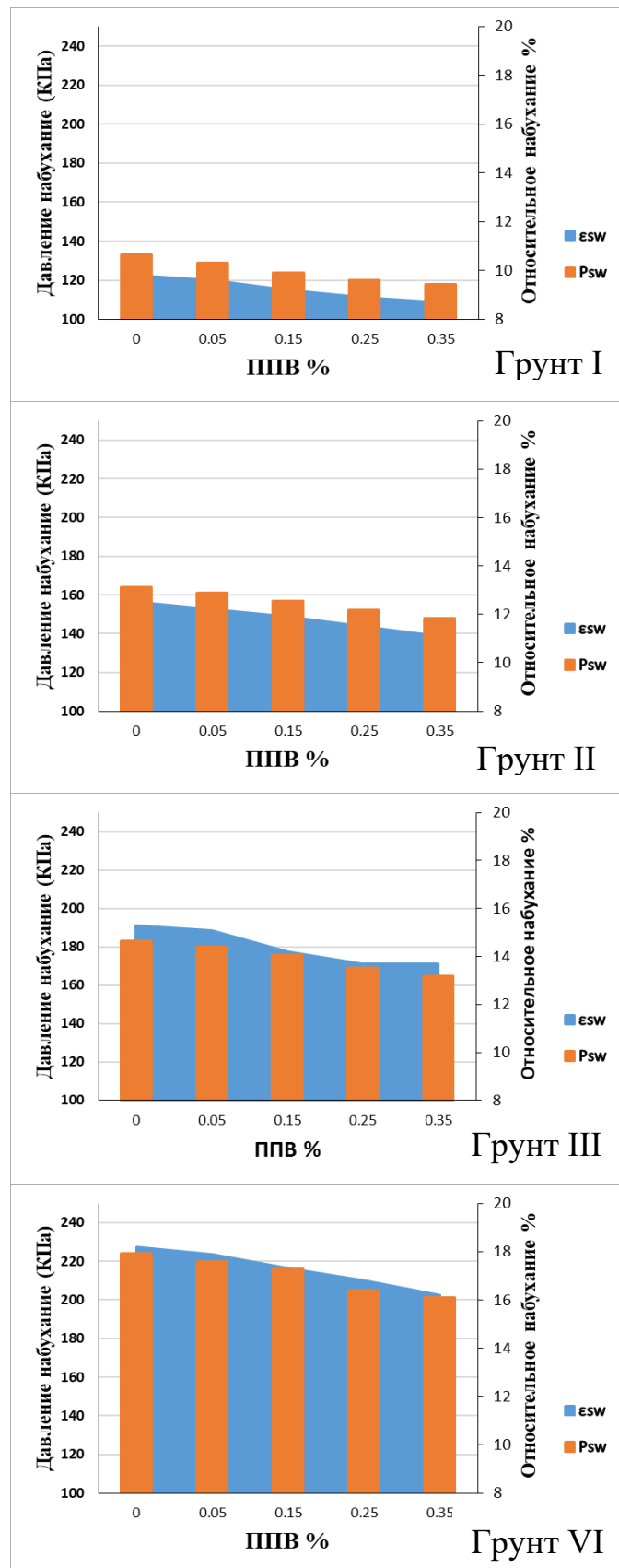


Рис. 3.7 - зависимости влияния добавления полипропиленовых волокон на параметры набухания исследуемых грунтов

2) Влияние полипропиленовых волокон

Проведенные исследования демонстрируют, что армирование полипропиленовыми волокнами (ППВ) без добавления извести оказывает умеренное, но статистически значимое влияние на снижение параметров набухания грунтов. При максимальной исследуемой концентрации волокон 0,35% (состав ИО-ППВ0,35) установлены следующие изменения параметров набухания:

Снижение давления набухания (P_{sw}):

- Грунт I: на 11,3% (с 133 кПа до 118 кПа)
- Грунт II: на 13,0% (с 183 кПа до 165 кПа)
- Грунт III: на 9,8% (с 164 кПа до 148 кПа)
- Грунт IV: на 10,3% (с 224 кПа до 201 кПа)

Снижение относительного набухания (ε_{sw}):

- Грунт I: на 11,2% (с 9,8% до 8,7%)
- Грунт II: на 10,2% (с 12,5% до 11,1%)
- Грунт III: на 10,4% (с 15,3% до 13,7%)
- Грунт IV: на 11,0% (с 18,2% до 16,2%)

Таким образом установлено, что увеличение количества волокон приводит к относительно небольшому снижению давления набухания и относительной деформации набухания, что свидетельствует о преимущественно механическом характере действия дисперсного армирования. Волокна создают пространственный каркас, который ограничивает развитие деформаций, но не влияют на физико-химическую природу глинистых минералов, ответственных за процессы набухания.

Этот механизм существенно отличается от химической стабилизации с помощью извести, что объясняет ограниченную эффективность ППВ при использовании в качестве самостоятельной добавки для уменьшения параметров набухания грунтов.

3) Синергетический эффект и оптимальные комбинации:

Анализ зависимости давления набухания и относительного набухания от концентрации полипропиленового волокна (ППВ) при фиксированных дозировках извести (2%, 5% и 8%) (Рисунок 3.8) выявил ярко выраженный синергетический эффект, а именно:

- Эффективность снижения давления набухания и относительного набухания существенно зависит от начального содержания извести.
- При всех концентрациях извести наблюдается постепенное снижение давления набухания и относительного набухания с увеличением количества ППВ.

Армированный волокнами известковый грунт начинает вести себя как композитный материал, в котором волокна, обладающие относительно высокой прочностью на растяжение, обеспечивают грунту большую устойчивость к набуханию при растяжении [31].

Сравнительный анализ деформационных характеристик образцов с оптимальной (И5-ППВ0,35) и максимальной (И8-ППВ0,35) концентрациями добавок как показано в таблице 3.5, позволил выявить, что комбинация И5-ППВ0,35 является наиболее эффективной по нескольким причинам:

1. Дальнейшее увеличение содержания извести до 8% не приводит к статистически значимому улучшению деформационных характеристик.
2. Разница в эффективности между составами не превышает 3,83% для P_{sw} и 3,06% для ε_{sw} .
3. Для грунта III наблюдается даже некоторое снижение эффективности по параметру ε_{sw} (на 1,31%)

Таким образом, композиция И5-ППВ0,35 демонстрирует максимальную технико-экономическую эффективность, обеспечивая значительное снижение параметров набухания (P_{sw} до 91%, ε_{sw} до 95%) при оптимальном расходе материалов. Дальнейшее увеличение дозировки извести не является целесообразным с практической точки зрения.

Таблица 3.5 - Сравнительная эффективность по параметрам набухания (P_{sw} , ε_{sw})

Параметр		комбинация	Грунт	Грунт	Грунт	Грунт
			I	II	III	IV
P_{sw}	Снижение* $P_{sw},\%$	И5-ППВ0,35	90,98	77,44	60,66	65,18
	Снижение* $P_{sw},\%$	И8-ППВ0,35	91,73	78,66	64,48	66,52
	Разность эффективности, %		0,75	1,22	3,83	1,34
ε_{sw}	Снижение* $\varepsilon_{sw},\%$	И5-ППВ0,35	95,92	90,40	86,27	80,22
	Снижение* $\varepsilon_{sw},\%$	И8-ППВ0,35	96,94	91,20	84,97	81,32
	Разность эффективности, %		1,02	0,80	1,31	1,10

* Снижения показания после отверждения в течение 28 дней

4) Влияние времени отверждения

Динамика изменения относительного набухания и давление набухания с увеличением срока твердения для оптимальной комбинации (И5ППВ0,35), представлены в таблицах 3.6 и 3.7.

Таблица 3.6— Динамика изменения относительного набухания (%) с увеличением срока твердения для оптимальной комбинации (И5ППВ0,35)

Срок отверждения, сутки	Снижение относительного набухания (ε_{sw}), %			
	Грунт I	Грунт II	Грунт III	Грунт IV
3	75,5	82,4	76,5	69,2
7	84,7	84,8	79,7	73,1
14	92,9	87,2	81,7	77,5
21	94,9	88,8	85,0	79,1
28	95,9	90,4	86,3	80,2

Таблица 3.7— Динамика изменения давления набухания (%) с увеличением срока твердения для оптимальной комбинации (И5ППВ0,35)

Срок отверждения, сутки	Снижение давления набухания (P_{sw}), %			
	Грунт I	Грунт II	Грунт III	Грунт IV
3	73,7	61,6	54,1	58,5
7	81,2	68,3	55,7	60,7
14	87,2	73,8	57,4	62,9
21	89,5	75,6	59,0	64,3
28	91,0	77,4	60,7	65,2

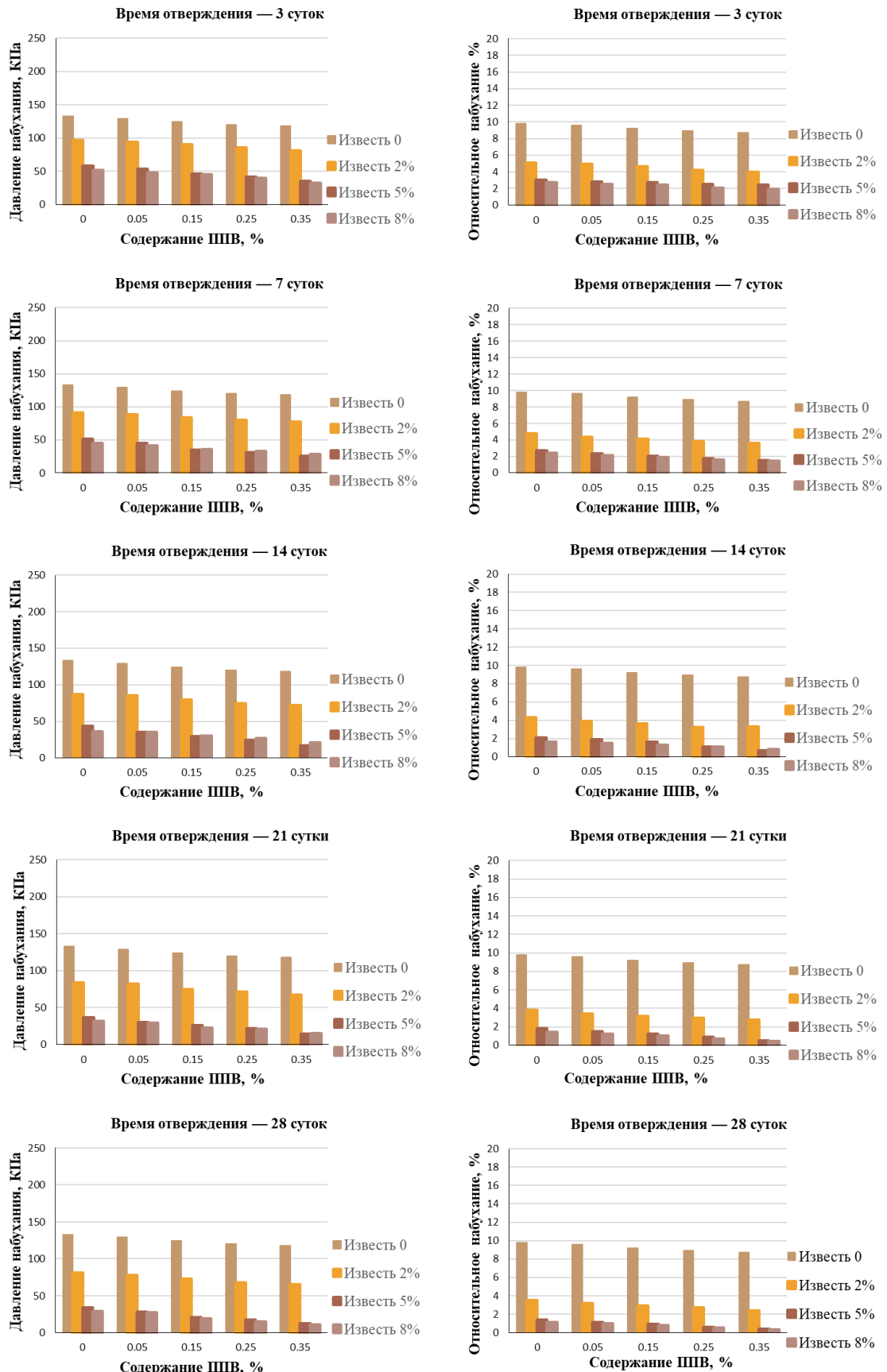


Рис. 3.8.a - Влияние добавок на относительную набухаемость и давление набухания грунта при разных периодах отверждения для грунта I

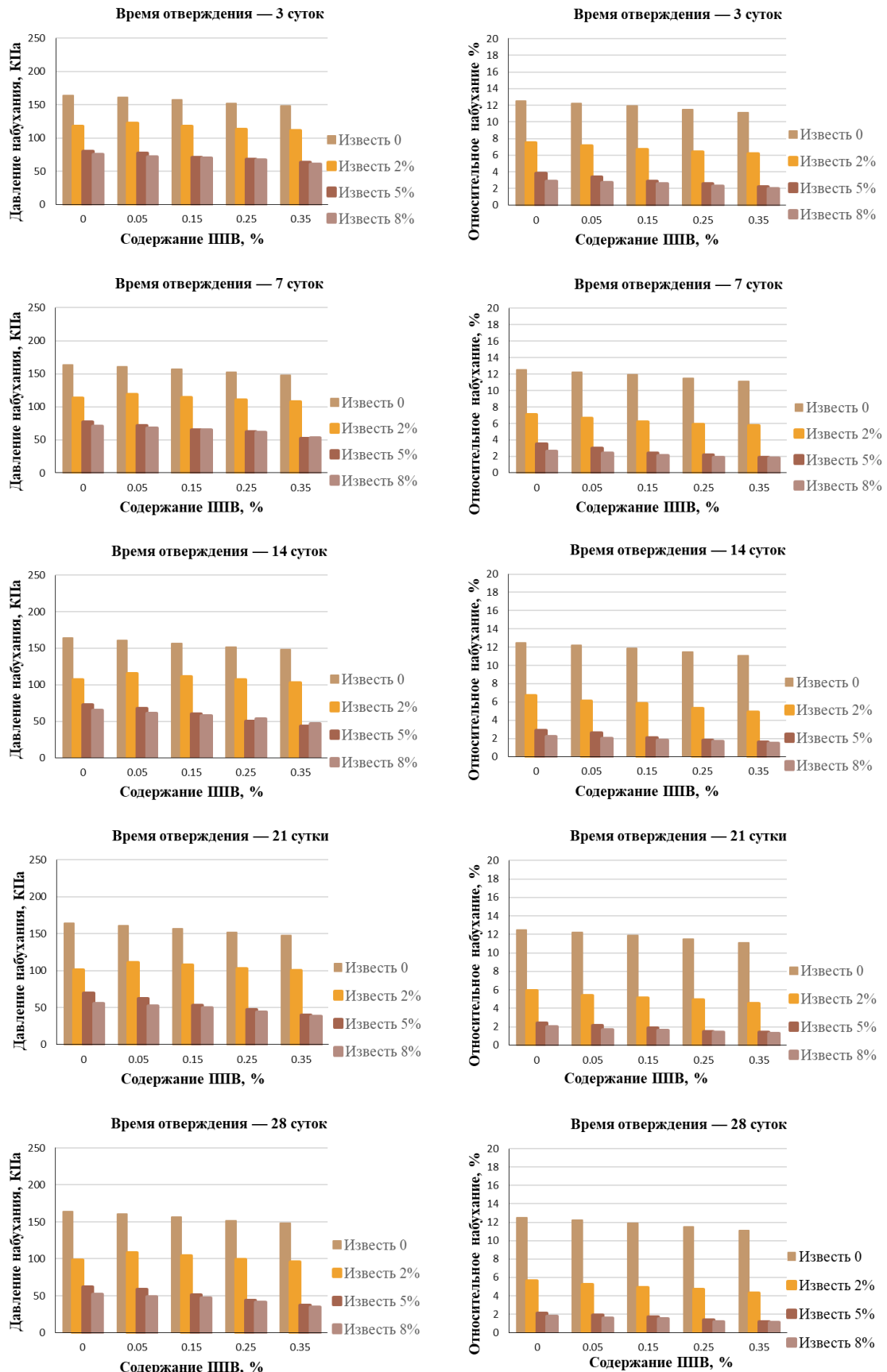


Рис. 3.8.6 - Влияние добавок на относительную набухаемость и давление набухания грунта при разных периодах отверждения для грунта II

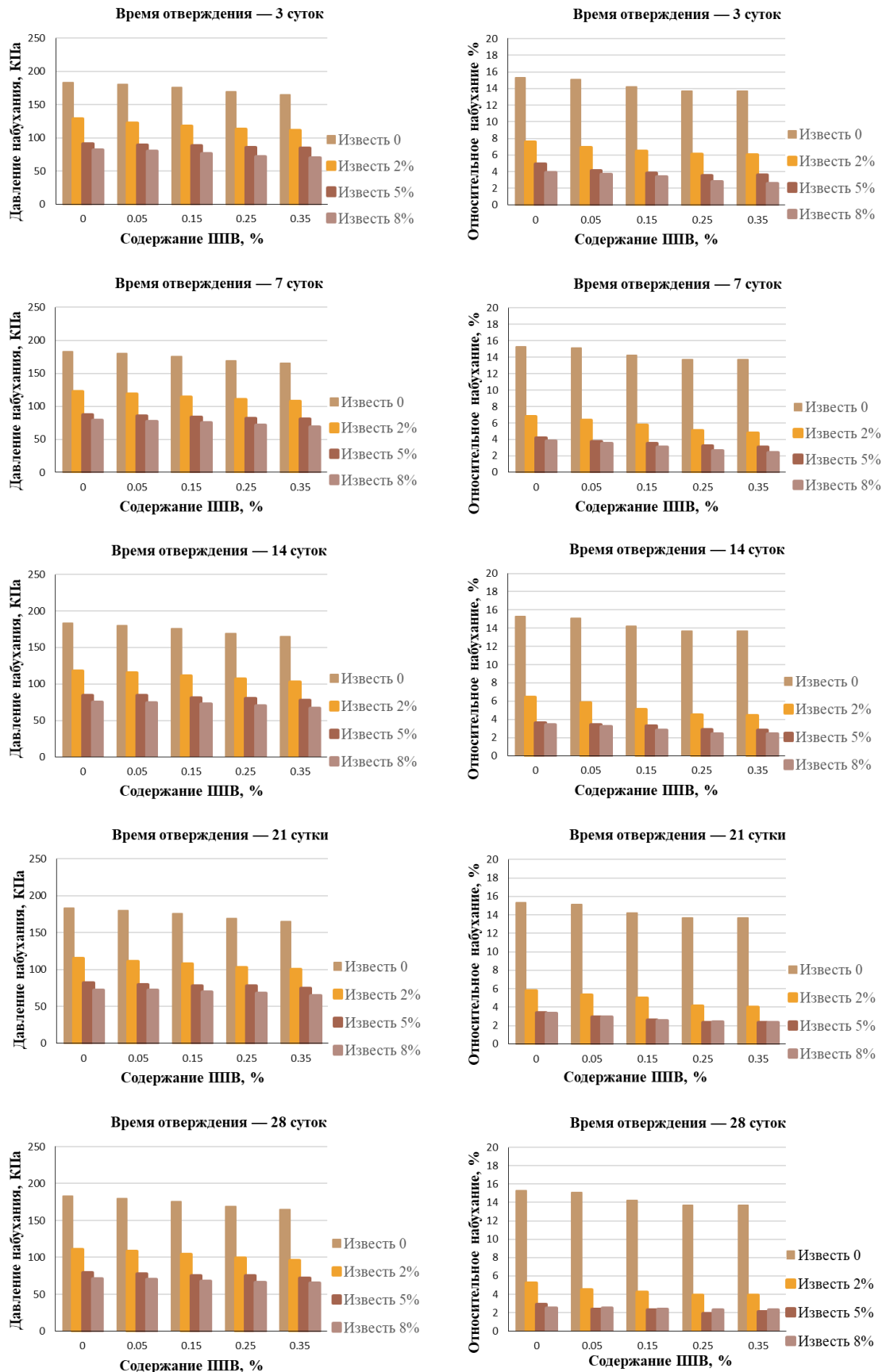


Рис. 3.8.в - Влияние добавок на относительную набухаемость и давление набухания грунта при разных периодах отверждения для грунта III

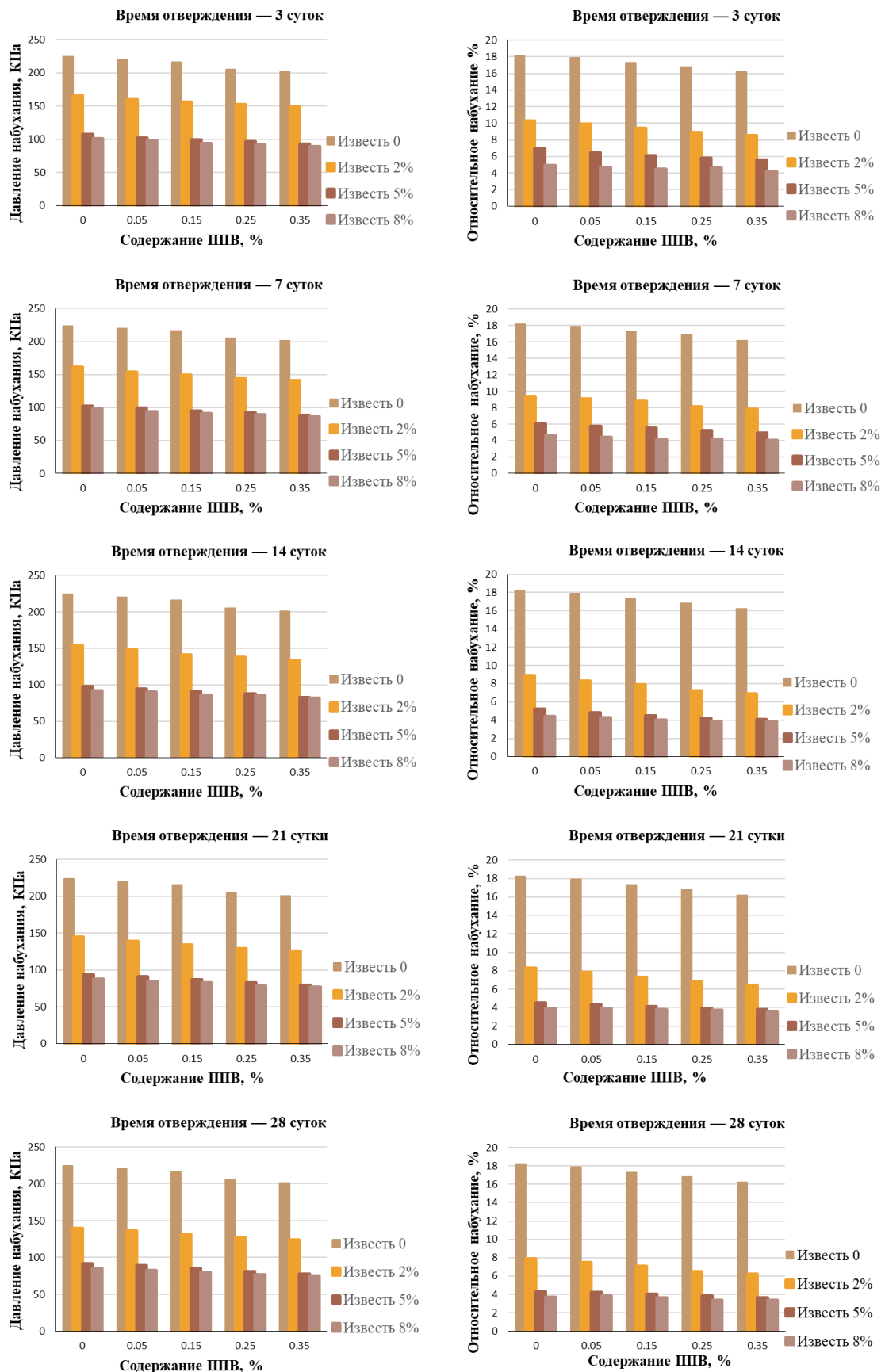


Рис. 3.8.г - Влияние добавок на относительную набухаемость и давление набухания грунта при разных периодах отверждения для грунта VI

Изучение динамики изменения деформационных свойств стабилизированных грунтов с течением времени является одним из ключевых факторов, позволяющих оценить долговечность и эффективность используемых методов стабилизации. На рисунке 3.8 представлено влияние добавок на относительную набухаемость и давление набухания грунта для грунтов, при разных периодах отверждения.

Анализ данных показал, что относительная деформация набухания (ε_{sw}) и давление набухания (P_{sw}) для всех типов грунтов значительно и стабильно снижаются с увеличением времени отверждения с 3 до 28 суток. Однако можно отметить, что наиболее интенсивное снижение обоих параметров наблюдается в период от 3 до 14 суток. Это связано с быстрыми процессами катионного обмена и флокуляции.

3.4 Характеристики сдвиговой прочности.

1) Влияние извести.

Результаты экспериментального исследования показали, что добавление только извести без армирования волокнами дает положительный эффект. В таблицах 3.8 и 3.9 показана динамика изменений угла внутреннего трения (φ) и удельное сцепление (C) при различном содержании извести после 28-дневного периода твердения. На рисунке 3.9 также представлены графики влияния содержания извести на удельное сцепление и угол внутреннего трения.

Анализ результатов исследования показывает, что добавление одной только извести, без добавления полипропиленовых волокон, ко всем исследованным типам грунта приводит к увеличению угла внутреннего трения в диапазоне от 62,31% до 95,06%. Наибольшее увеличение наблюдалось при повышении содержания извести с 2% до 5%. Увеличение же содержания извести с 5% до 8% дало незначительное увеличение, которое не перевесило 3%.

Таблица 3.8 - Динамика изменения угла внутреннего трения φ (%) для различных процентных содержаний извести после 28-дневного периода твердения.

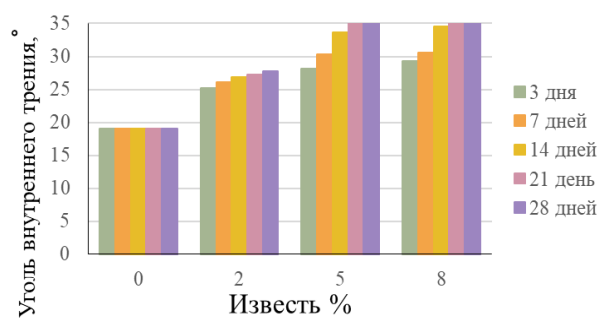
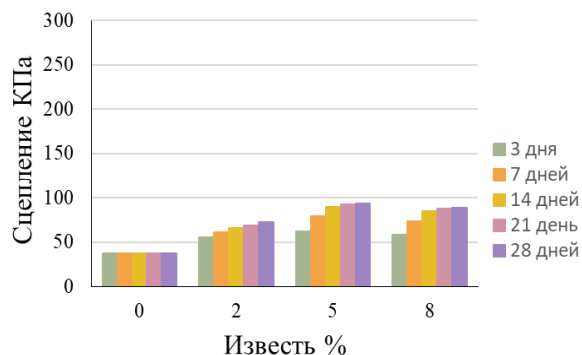
Обозначение комбинации добавок	Увеличение угла внутреннего трения φ , %			
	Грунт I	Грунт II	Грунт III	Грунт IV
И2-ППВ0	45,79	40,77	48,15	42,50
И5-ППВ0	85,79	61,54	94,44	68,75
И8-ППВ0	86,84	62,31	95,06	71,25

Таблица 3.9 - Динамика изменения удельного сцепления C (%) для различных процентных содержаний извести после 28-дневного периода твердения.

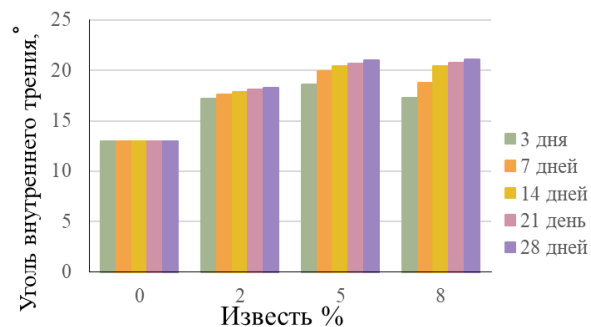
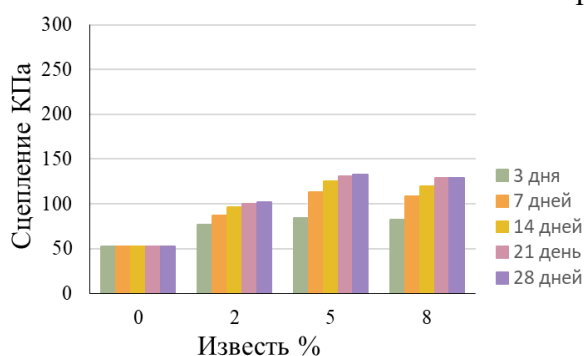
Обозначение комбинации добавок	Увеличение удельного сцепления C , %			
	Грунт I	Грунт II	Грунт III	Грунт IV
И2-ППВ0	91,84	95,19	87,14	103,82
И5-ППВ0	147,63	154,62	145,00	136,45
И8-ППВ0	134,74	148,27	130,12	129,64

Результаты исследования показывают другой характер изменения, при котором можно заметить нелинейное изменение удельного сцепления (C): сначала интенсивно увеличивается, достигая максимума на 136,45–154,62% при 5% содержании извести. А за тем, при увеличении процентного содержания извести до 8%, сцепление снижается до 129,64–148,27% (при 28-суточном твердении).

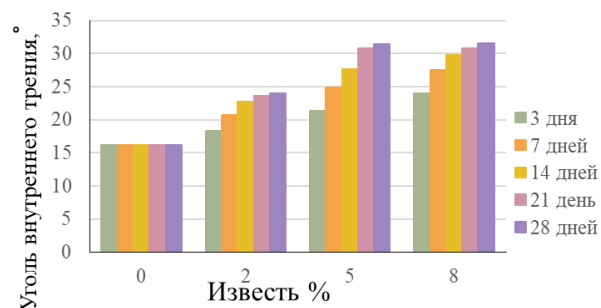
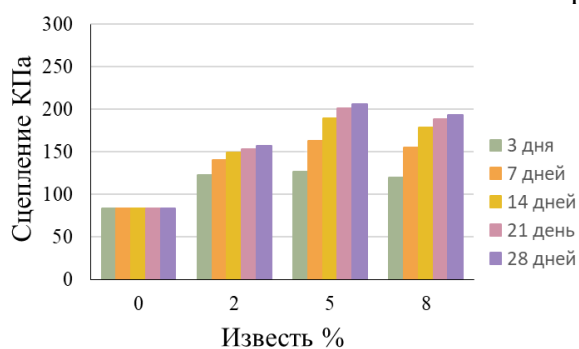
Анализ экспериментальных результатов показал, что оптимальное содержание извести для достижения максимального эффекта составляет 5%. Увеличение же содержания извести приводило к снижению удельного сцепления грунта.



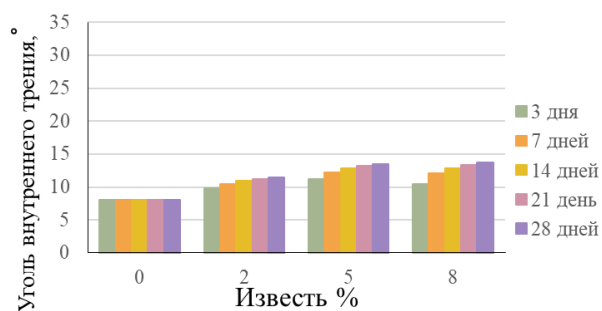
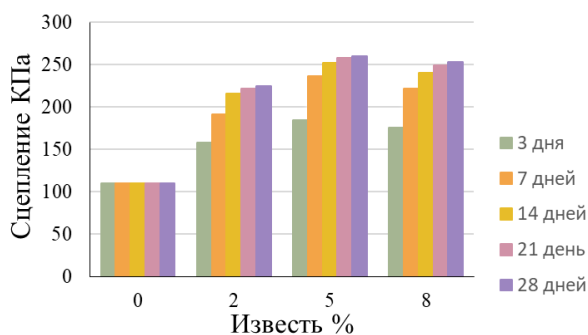
Грунт I



Грунт II



Грунт III



Грунт IV

Рис. 3.9 - Графики влияния содержания извести на удельное сцепление (C) и угол внутреннего трения (ϕ)

2) Влияние полипропиленовых волокон.

Динамика изменения процентного отношения угла внутреннего трения φ (%) для различных процентных содержаний полипропиленовых волокон представлена в таблицах 3.10 и 3.11. В этих таблицах увеличение процентного отношения угла внутреннего трения φ дано в процентном соотношении к углам внутреннего трения контрольных образцов без добавок.

Таблица 3.10— Динамика изменения процентного отношения угла внутреннего трения φ (%) для различных концентраций полипропиленовых волокон

Обозначение комбинации добавок	Увеличение процентного отношения угла внутреннего трения φ , %			
	Грунт I	Грунт II	Грунт III	Грунт IV
И0-ППВ0,05	7,89	11,54	12,35	8,75
И0-ППВ0,15	19,47	21,54	19,14	13,75
И0-ППВ0,25	27,37	35,38	34,57	28,75
И0-ППВ0,35	36,84	41,54	36,42	35

Таблица 3.11— Динамика изменения удельного сцепления C (%) для различных концентраций полипропиленовых волокон.

Обозначение комбинации добавок	Увеличение процентного отношения удельного сцепления C , %			
	Грунт I	Грунт II	Грунт III	Грунт IV
И0-ППВ0,05	3,68	5,38	2,38	4,36
И0-ППВ0,15	11,84	11,73	7,14	9,18
И0-ППВ0,25	20,79	17,12	19,52	15,18
И0-ППВ0,35	28,42	25,19	21,55	20,82

Графики влияния содержания волокон на удельное сцепление C и угол внутреннего трения φ представлены на рисунке 3.10.

Анализ результатов, представленных в таблице 3.10, показывает увеличение угла внутреннего трения (φ) с увеличением процентного содержания полипропиленовых волокон от 0,05% до 0,35%. Максимальное увеличение процентного отношения угла внутреннего трения наблюдался при концентрации волокон 0,35% и составляет 35,0–41,5% в зависимости от типа грунта.

Подобная картина наблюдалась при использовании влияния добавки ППВ на удельное сцепление. При увеличении процентного содержания ППВ до 0,35% удельное сцепление (C) увеличилось на 20,82–28,42% в зависимости от типа

грунта. Можно заметить некоторое снижение интенсивности увеличения (C) при увеличении процентного содержания ППВ от 0,25 до 0,35%.

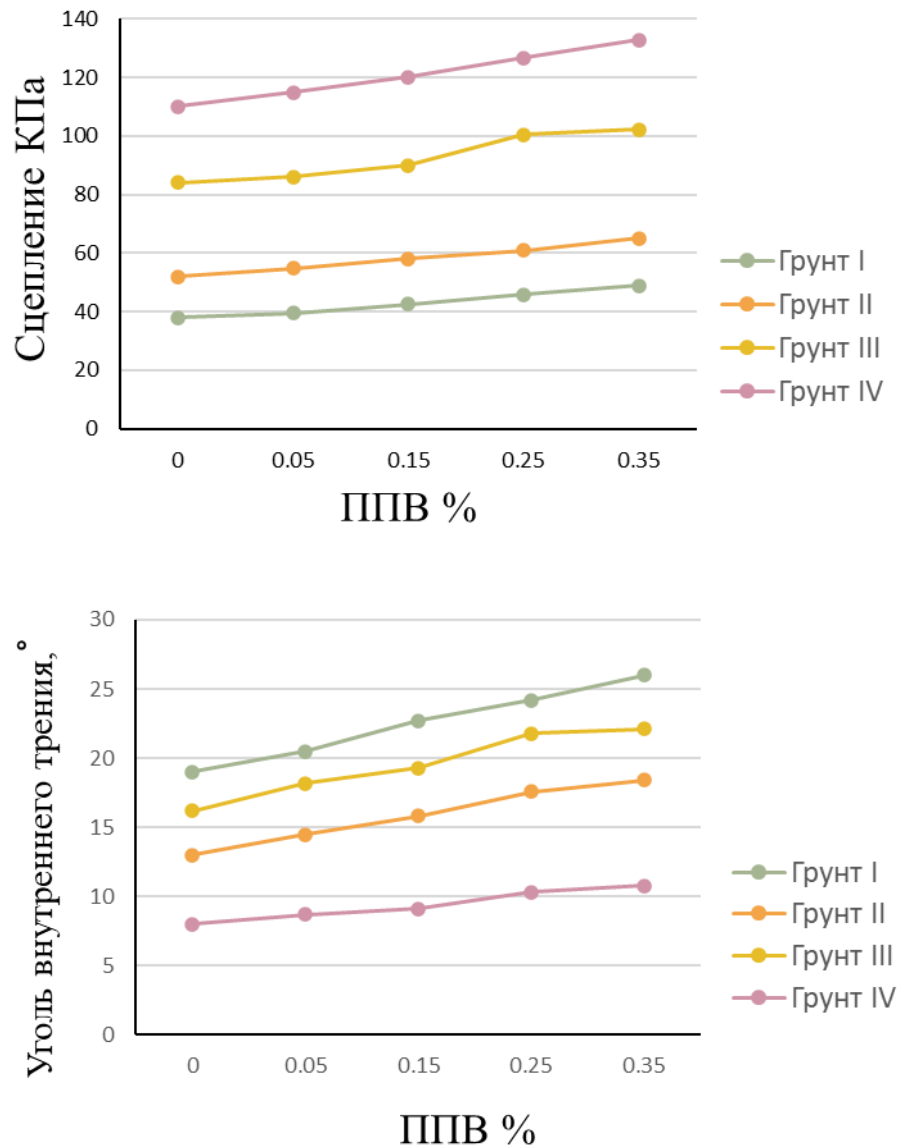


Рис. 3.10 - Влияние содержания волокон на удельное сцепление C и угол внутреннего трения φ

3) Синергетический эффект и оптимальные комбинации:

В таблицах 3.12 и 3.13 представлены процентные изменения угла внутреннего трения (φ) и удельного сцепления (C) после 28-суточного твердения. Результаты приводятся для 4 типах грунтов и для различных комбинаций. При этом исключаются те комбинации, которые содержат только одного компонента, так как

в данном разделе изучается синергетический эффект от совместного добавления извести и полипропиленовых волокон на прочности грунта.

Таблица 3.12 - Динамика изменения угла внутреннего трения φ (%) для различных комбинаций после 28-дневного набора прочности.

Обозначение комбинации добавок	Увеличение угла внутреннего трения φ , %			
	Грунт I	Грунт II	Грунт III	Грунт IV
И0-ППВ0	-	-	-	-
И2-ППВ0,05	53,68	43,08	61,11	43,75
И2-ППВ0,15	67,37	45,38	88,89	48,75
И2-ППВ0,25	74,74	46,92	93,83	53,75
И2-ППВ0,35	80,53	50,00	98,77	60,00
И5-ППВ0,05	94,21	62,31	101,85	68,75
И5-ППВ0,15	97,37	64,62	119,14	72,50
И5-ППВ0,25	102,11	67,69	132,72	73,75
И5-ППВ0,35	105,79	70,77	135,80	78,75
И8-ППВ0,05	96,32	62,31	108,02	72,50
И8-ППВ0,15	98,42	63,85	122,22	72,50
И8-ППВ0,25	101,05	65,38	133,95	73,75
И8-ППВ0,35	106,32	68,46	135,19	77,50

Анализ данных в таблице 3.12 показывает увеличения угла внутреннего трения (φ) для оптимальной комбинации И5-ППВ0,35 по сравнению с контрольными образцами И0-ППВ0 на 105,8, 70,8, 135,8 и 78,8%, для грунтов I, II, III и IV соответственно.

В то же время анализ данных таблицы 3.12 показывает увеличение удельного сцепления (C) для оптимальной комбинации И5-ППВ0,35 по сравнению с контрольными образцами И0-ППВ0 на 194,5, 251,5, 222,7 и 212,4% для грунтов I, II, III и IV соответственно.

На рисунке 3.11 показаны графики изменения параметров сдвиговой прочности (φ) и (C) в зависимости от изменения процентного содержания полипропиленовых волокон в известковой глине.

Анализ диаграмм позволяет выявить устойчивую тенденцию: для всех изученных содержаний извести наблюдается увеличение как сцепления (C), так и угла внутреннего трения (φ) с ростом процентного содержания ППВ.

Таблица 3.13— Динамика изменения удельного сцепления C (%) для различных концентраций извести после 28-дневного набора прочности.

Обозначение комбинации добавок	Увеличение угла внутреннего трения φ , %			
	Грунт I	Грунт II	Грунт III	Грунт IV
И0-ППВ0	-	-	-	-
И2-ППВ0,05	96,84	96,92	90,95	108,82
И2-ППВ0,15	106,58	105,96	98,10	113,82
И2-ППВ0,25	113,42	114,62	118,81	122,36
И2-ППВ0,35	121,58	124,42	128,81	128,55
И5-ППВ0,05	156,84	177,88	167,62	154,18
И5-ППВ0,15	167,89	203,65	184,76	174,45
И5-ППВ0,25	176,84	230,19	212,38	199,55
И5-ППВ0,35	194,47	251,54	222,74	212,45
И8-ППВ0,05	142,89	166,92	152,98	145,73
И8-ППВ0,15	158,16	188,27	175,95	162,36
И8-ППВ0,25	170,53	216,15	190,12	185,27
И8-ППВ0,35	179,47	237,69	196,31	200,82

Исходя из этого, можно сделать вывод, что сочетание И5 и ППВ-0,35 является оптимальным по нескольким важным критериям:

1. Обеспечивает наибольший прирост угла внутреннего трения и удельного сцепления.
2. Характеризуется ярко выраженным синергетическим эффектом, возникающим при совместном использовании компонентов.
3. Соответствует принципу технико-экономической эффективности.
4. Является оптимальной для всех исследованных типов грунтов.

Положительное влияние полипропиленовых волокон (ППВ) на прочностные свойства обусловлено формированием композитного материала «известковая глина -волокно», в котором волокна, обладающие высокой прочностью на растяжение, выполняют функцию армирующего элемента.

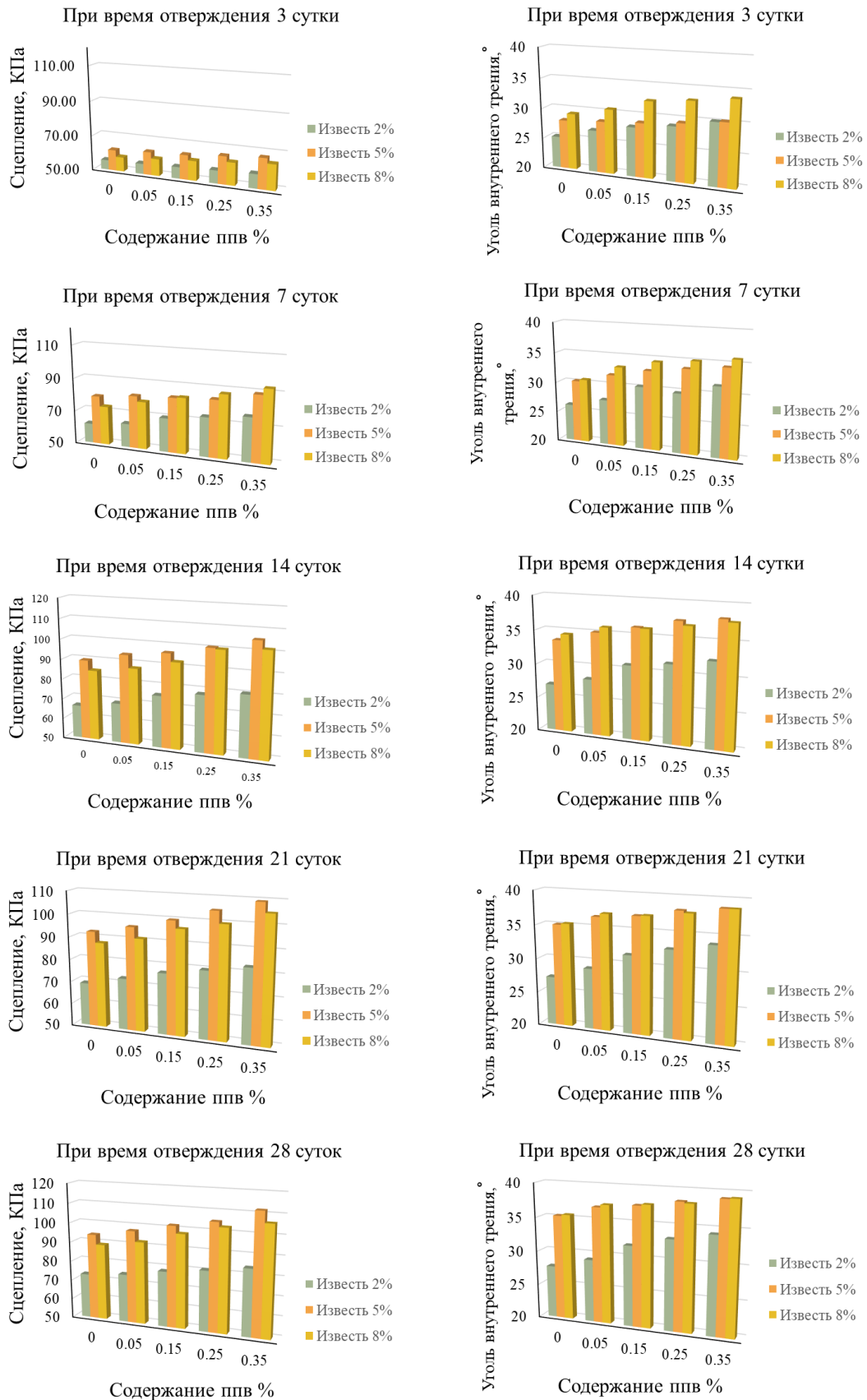


Рис. 3.11-а - Влияние содержания волокон в известковой глине на удельное сцепление C и угол внутреннего трения φ для образца I

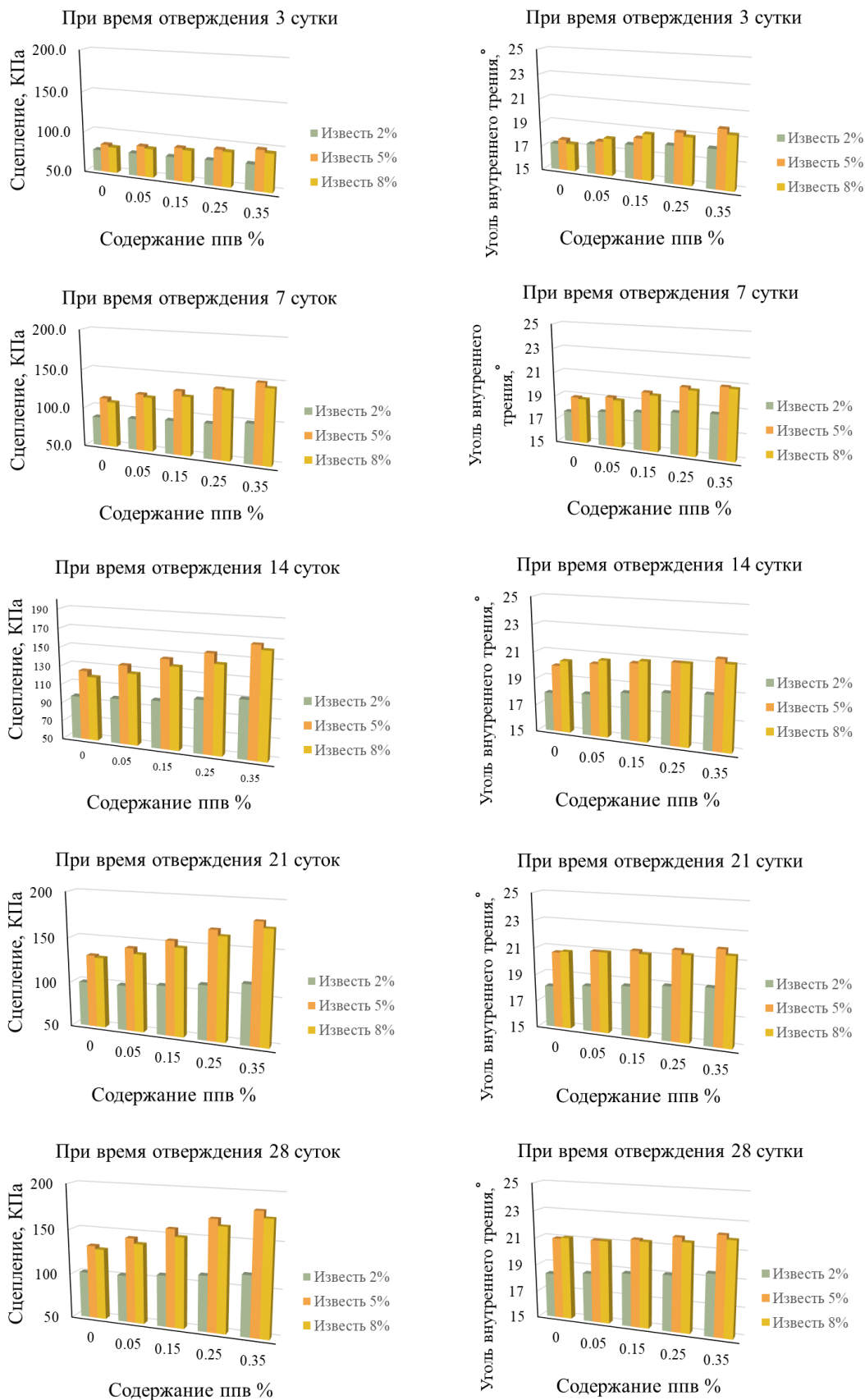


Рис. 3.11-б - Влияние содержания волокон в известковой глине на удельное сцепление C и угол внутреннего трения φ для образца II

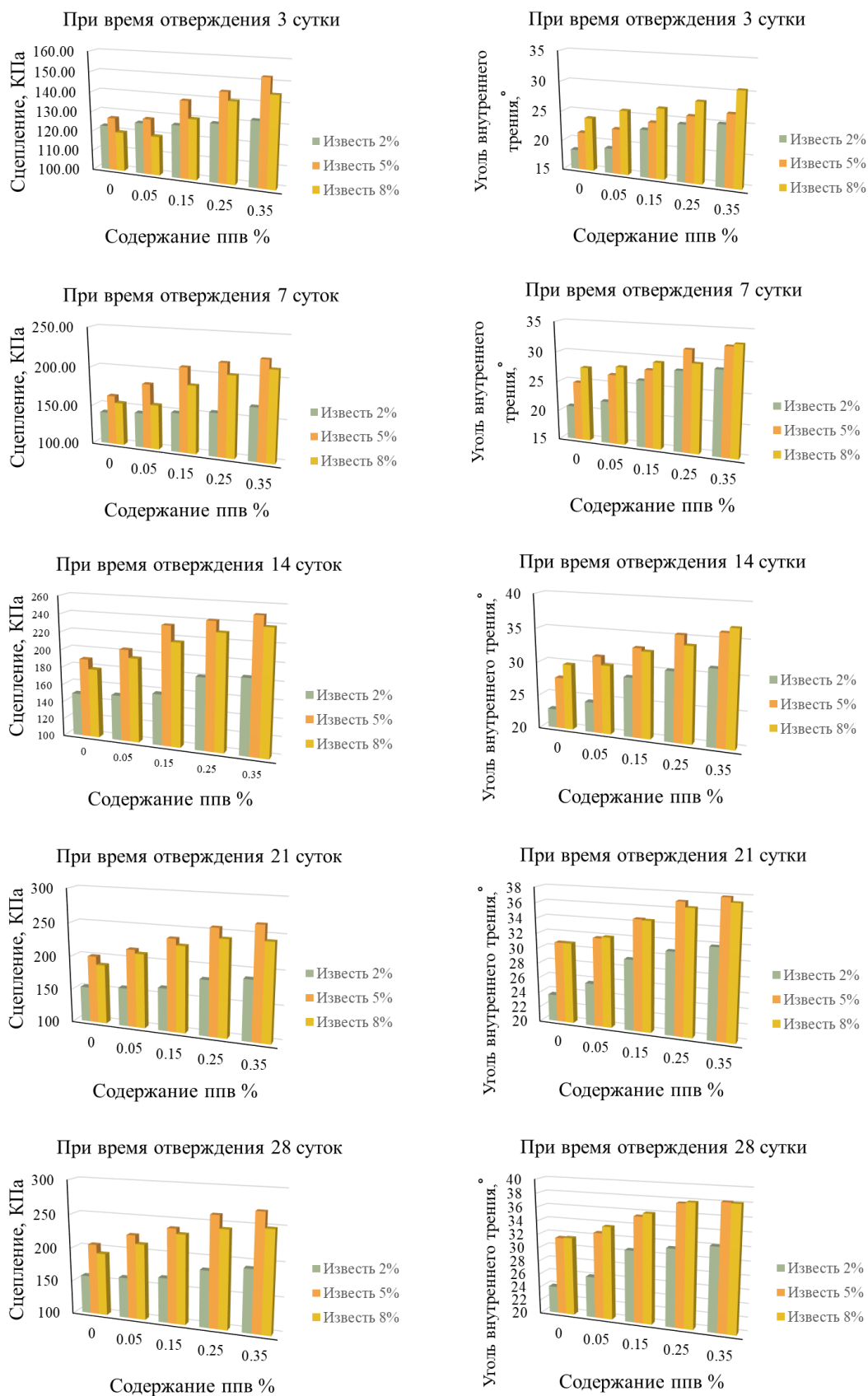


Рис. 3.11-в - Влияние содержания волокон в известковой глине на удельное сцепление C и угол внутреннего трения φ для образца III

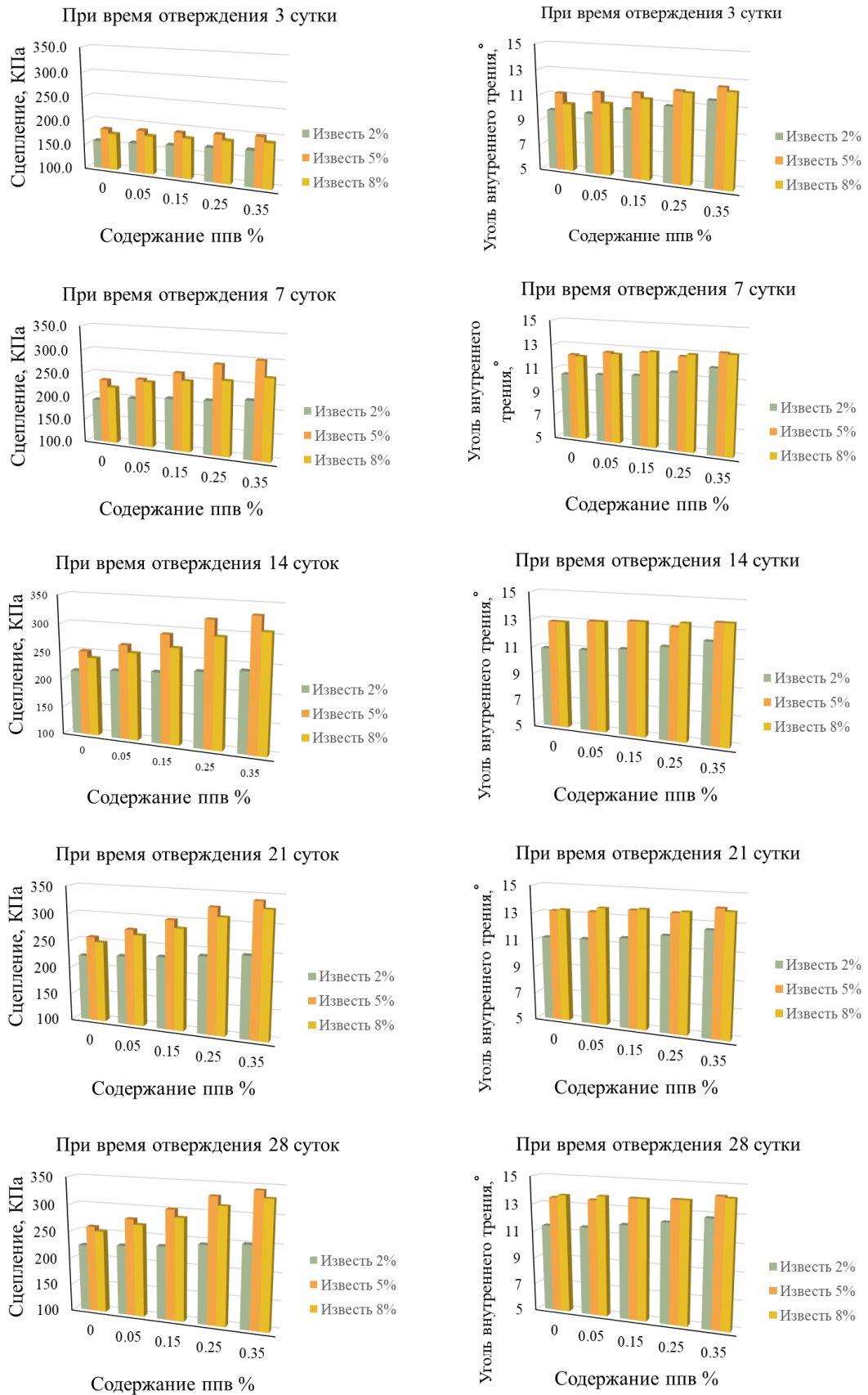


Рис. 3.11-г - Влияние содержания волокон в известковой глине на удельное сцепление C и угол внутреннего трения φ для образца IV

Упрочнение происходит за счет двух основных механизмов: волокна принимают на себя сдвигающие усилия, что затрудняет развитие деформаций сдвига; и удельное сцепления C между частицами грунта увеличивается из-за повышения контактного трения между ними, что делает грунт более устойчивым к сдвигу. Это явление, известное как композитное сцепление, обеспечивает дополнительное сопротивление сдвигу.

4) Влияние периода отверждения

С увеличением времени твердения в образцах, модифицированных смесью извести и ППВ, наблюдается заметный рост прочностных характеристик, что согласуется с результатами предыдущих исследований [112],[162],[75]. Это свидетельствует о том, что процессы структурообразования протекают в течение длительного времени.

Например, для грунта III, оптимальной комбинации И5ППВ0,35, при увеличении времени твердения с 3 до 28 суток угол внутреннего трения (φ) для этой композиции возрастает в 1,25 раза — с $30,5^\circ$ до $38,1^\circ$. Удельное сцепление (C), при этом, увеличивается более значительно — в 1,72 раза, с 144,8 кПа до 248,9 кПа. Такая же тенденция наблюдается для всех исследуемых грунтов. Динамика изменения угла внутреннего трения φ и удельного сцепления C с увеличением срока твердения для оптимальной комбинации (И5ППВ0,35) в процентном отношении к первоначальным данным представлена в таблицах 3.14 и 3.15.

Все исследованные грунты демонстрируют стремительный рост прочности в течение первых 14 суток. Затем темпы увеличиваются медленнее, и к 28 суткам прочность достигает стабильного уровня. Увеличение времени отверждения до 28 суток не приводит к значительному увеличению прочности — обычно не более 5-10% от достигнутого на 14-е сутки.

С экономической и технологической точек зрения 14 суток можно считать достаточным сроком для достижения эксплуатационной прочности.

Таблица 3.14— Динамика изменения угла внутреннего трения φ (%) с увеличением срока твердения для оптимальной комбинации (И5ППВ0,35)

Срок отверждения, сутки	Рост угла внутреннего трения φ , %			
	Грунт I	Грунт II	Грунт III	Грунт IV
3	59,5	52,3	65,4	57,5
7	81,6	60,8	101,2	65,0
14	100,5	65,4	122,8	70,0
21	104,2	68,5	134,0	76,3
28	105,8	70,8	135,8	78,8

Таблица 3.15— Динамика изменения удельного сцепления C (%) с увеличением срока твердения для оптимальной комбинации (И5ППВ0,35)

Срок отверждения, сутки	Рост удельного сцепления C , %			
	Грунт I	Грунт II	Грунт III	Грунт IV
3	77,4	90,8	81,4	82,9
7	134,7	188,1	166,1	174,0
14	178,2	220,0	198,1	202,3
21	187,9	246,7	215,4	209,9
28	194,5	251,5	222,7	212,5

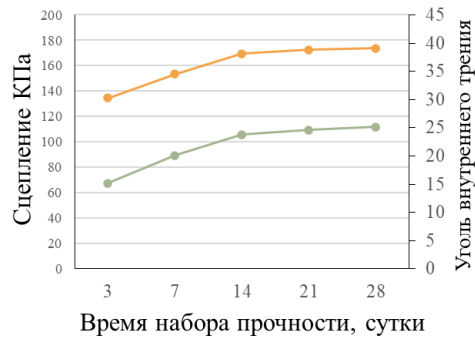
Примечательно, что сцепление растёт гораздо быстрее, чем угол трения (в трёх из четырёх случаев значения превышают 200%). Ускоренный рост сцепления обусловлен комбинированным воздействием армирования волокнами и химическим твердением известкового вяжущего.

Грунты по-разному реагируют на механизм укрепления, что указывает на то, что механизм взаимодействия, вяжущего с грунтом, зависит от его гранулометрического, минерального и химического состава.

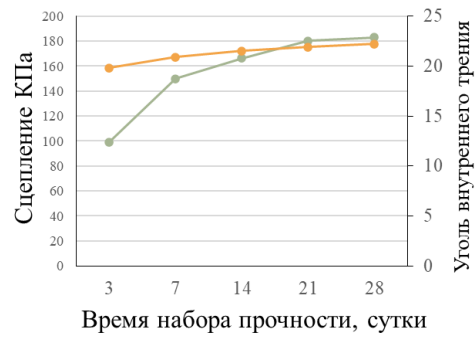
3.1 Выводы по главе 3

В этой главе представлены результаты экспериментальных исследований. Анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы:

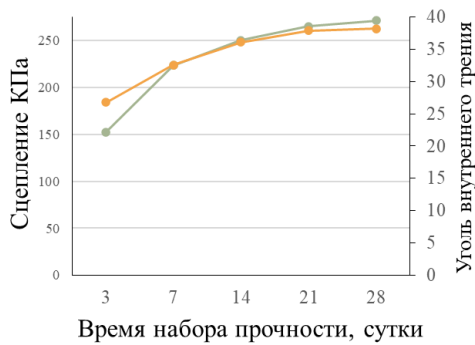
90



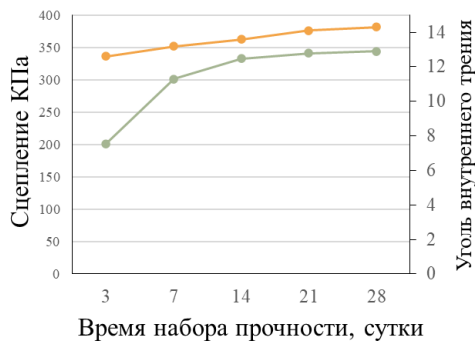
а) Грунт I



б) Грунт II



с) Грунт III



д) Грунт IV

Рис. 3.12 - Влияние времени затвердевания на удельное сцепление C и угол внутреннего трения ϕ

1. Установлено, что комбинация И5-ППВ0,35 является оптимальным по всем рассматриваемым критериям и подходит для всех типов набухающих грунтов в Сирии, исследованных в рамках данной работы.
2. Применение оптимальной комбинации привело к увеличению 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 для оптимальной комбинации. Это Снижение можно объяснить уменьшением средней удельной массы твердых веществ в смеси грунта, извести и волокна.
3. Сочетание извести и полипропиленовых волокон создает синергетический эффект. Благодаря этому, используя оптимальную комбинацию, удалось значительно снизить показатель пластичности IP для грунтов I, II, III и IV типов на 86,1%, 84,5%, 82,9% и 79,6% соответственно. В результате все типы грунтов I–IV переходили в категорию слабонабухающих.
4. Эффективность стабилизации, то есть способность снижать параметры набухаемости, оказалась обратно пропорциональной исходным значениям этих параметров. Хотя для всех типов исследованных грунтов наблюдалось значительное уменьшение набухания, грунты с более высокими начальными показателями, такие как грунты III и IV, 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% соответственно. Давление набухания P_{sw} уменьшилось на 87,2, 73,8, 57,4 и 62,9% для грунтов I, II, III и IV типов.
5. Исследование показало, что добавление полипропиленовых волокон и извести существенно влияет на прочность грунта при сдвиге. Увеличение содержания извести приводит к первоначальному повышению, за которым следует небольшое снижение параметров прочности. 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).

6. Все исследованные грунты демонстрируют значительное улучшение свойств в течение первых 14 дней. После этого темпы улучшения замедляются. Увеличение времени отверждения до 28 дней не приводит к значительному дальнейшему улучшению. Поэтому 14 суток можно считать достаточным периодом для набора прочности.
7. Полученные результаты были использованы для разработки метода укрепления набухающих глинистых грунтов с применением смесей полипропиленовых волокон и извести в геологических условиях Сирии.

ГЛАВА 4. АНАЛИЗ МЕТОДА УСИЛЕНИЯ НАБУХАЮЩИХ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

4.1 Моделирование задачи исследования на основании полученных экспериментальных данных.

4.1.1 Характеристики рассмотренных грунтов

Для количественной оценки инженерных свойств глинистых грунтов, склонных к набуханию, были отобраны четыре характерных образца из потенциально проблемных участков в Сирии. В численном моделировании использовались результаты лабораторных экспериментов образцов природного грунта, представленных в главах 2 и 3.

В таблице 4.1 приведены основные характеристики грунтов, которые использовались в качестве исходных данных в этом исследовании.

Таблица 4.1 - Геотехнические характеристики образцов природного грунта.

Характеристика	Образец I	Образец II	Образец III	Образец IV
Относительная деформация набухания, %	9,80	12,50	15,30	18,20
Давление набухания, кПа	133	164	183	224
Сцепление, кПа	38	52	84	110
Угол внутреннего трения, °	19	13	16,2	8

В главе 3 представлены результаты экспериментов на 4 образцах грунта, которые показали изменения характеристик улучшенных грунтов. В результате добавления полипропиленовых волокон и извести в разных концентрациях

наблюдалось уменьшение набухаемости грунтов и увеличение их прочности. В численном моделировании в качестве исходных данных улучшенного грунта использовались характеристики грунта, полученных для оптимальной комбинации И5ППВ0,35. Эти характеристики приведены в таблице 4.2. Эти данные были получены в ходе экспериментальных исследований, описанных в главе 3.

Таблица 4.2 - Геотехнические характеристики образцов улучшенного грунта

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

Численное моделирование позволило оценить, как это отражается на поведении фундамента при увлажнении грунта, что будет представлено в следующем разделе.

В 1964 году Van der Merwe [165], отметил, что набухание не происходит равномерно по всей глубине грунта из-за уменьшения содержания влаги и других факторов. Учитывая этот факт, в расчётах применены коэффициенты $F(z)$, которые отражают снижение относительной деформации набухания с глубиной. Коэффициенты $F(z)$ были определены на основе эмпирического метода, предложенного Van der Merwe [165], и адаптированного Jones (2017) [114]. В таблице 4.3 представлены значения понижающих коэффициентов $F(z)$.

Таблица 4.3 - Коэффициенты, отражающие снижение относительной деформации набухания с глубиной $F(z)$ [114].

Глубина, м	0 - 1	1 - 2	2 - 3	3 - 4	5 - 6	6 - 7	7 - 8	8 - 9
$F(z)$	0,85	0,60	0,40	0,27	0,20	0,14	0,08	0,04

4.1.2 Моделирование поведения оснований фундаментов

Одним из эффективных инструментов для прогнозирования поведения набухающих грунтов является численное моделирование, основанное на методе конечных элементов. Программа Plaxis 2D предоставляет возможности для определения напряжённо-деформированного состояния основания с учётом использования улучшенных грунтов и других сложных инженерных условий.

Использование численного моделирования на основе экспериментальных данных для оценки эффективности добавок в реальных условиях остаётся ограниченным. Существующие модели часто не позволяют в полной мере учесть изменения прочностных и деформационных характеристик улучшенного грунта при прогнозировании поведения оснований под фундаментами зданий и сооружений совместно с фундаментами.

В этом разделе приведены результаты создания и проверки численной модели, которая позволит описать поведение фундаментов, расположенных на улучшенных набухающих грунтах. Модель разработана в программном комплексе Plaxis 2D, опираясь на результаты лабораторных испытаний, описанные в главе 3. Выбор плоской деформации обоснован тем, что рассматривается нагрузка, действующая в одной плоскости, перпендикулярной продольной оси здания. Это делает задачу корректной для двумерной аппроксимации. Результаты исследования открывают новые горизонты для практического применения этой модели в проектировании.

Конечно-элементное моделирование исследуемого грунта было выполнено с помощью апробированной модели Mohr Coulomb (MC). Основное преимущество этой математической модели заключается в том, что она не требует дополнительных входных данных и для её использования вполне хватает параметров, полученных в результате испытаний. Данные качества модели подходят для решения нашей задачи с набухающими грунтами ввиду небольшого объема фундамента, плоской постановки задачи. Цель разработанного метода —

повысить точность прогнозирования деформационного поведения основания рассматриваемого фундамента и упростить процесс проектирования.

В качестве исходных данных были использованы результаты лабораторных испытаний глинистого грунта, отобранного в регионе с высокой чувствительностью к сезонным изменениям влажности, приведённые в главе 3.

Геометрия расчётной схемы имела симметричную форму, а глубина расчётной области составляла 12 м. В центре массива находилась жёсткая фундаментная плита размером 3 x 2 м², которая была заглублена на 2 м от нулевой отметки. Для уменьшения вычислительной нагрузки использовалась только половина геометрии, а левая часть фундамента зеркально отражалась относительно оси симметрии (рисунок 4.1).

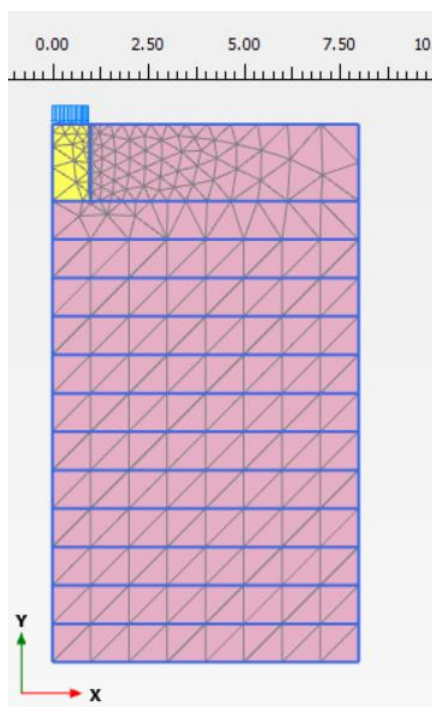


Рисунок 4.1 - Расчётная схема для расчёта деформаций в основании жёсткой плиты

На нижней и боковых границах задавались граничные условия, запрещающие перемещения в нормальном направлении. Это имитировало боковое и нижнее закрепление массива.

В расчётах применялись типовые значения нагрузки, соответствующие различным эксплуатационным случаям: от лёгких промышленных сооружений до

многоэтажных зданий: 100, 150, 200, 250 и 300 кПа. В данном исследовании применялась модифицированная модель Mohr–Coulomb. Набухающие свойства грунтов, такие как относительная деформация набухания и давление набухания, вводились как внешнее действие.

Конечной целью моделирования является выявление зависимости вертикального перемещения основания от глубины замены грунта, улучшенного по предложенному методу. При этом исследования проводились для 4 типов грунта и 5 уровней внешних нагрузок. Результаты численного моделирования позволили разработать метод улучшения набухающего грунта и разработать практические рекомендации.

Различную нагрузку вводили в каждой отдельной фазе. Главной целью моделирования было определение минимально необходимой глубины замены основания, которая позволила бы ограничить подъём фундамента в пределах установленных нормативов ($\delta \leq 25$ мм).

Вертикальное разбиение массива выполнялось с переменным шагом, что учитывало различную степень влияния глубинных слоёв на процесс набухания. Все отметки задавались относительно обреза фундамента, которая условно принята за нулевую отметку.

Моделирование выполнялось в нескольких фазах. Для каждого из четырёх типов глин была сформирована отдельная фаза с частичным замещением грунта, внутри которой поэтапно производился расчёт с изменением глубины с улучшенными свойствами грунтов. Методология заключалась в ручном итеративном переборе: на первом этапе сетка формировалась равномерными слоями по 1,0 м. На каждом шаге замещались нижележащие элементы с исходными параметрами грунта на улучшенный грунт с пониженными значениями относительной деформации набухания (ε_{sw}) и другими откалиброванными свойствами.

Границы зоны набухания H_{sw} были определены в соответствии с требованиями пункта 6.2.14 СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений». Результаты

расчётов по определению зон набухания H_{sw} для отобранных образцов грунта I, II, III и IV при пяти уровнях нагрузок на подошву фундамента.

Для определения нормативных пределов подъёма использовались положения СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений». Согласно пункту 6.2.5 и пункту 6 приложения Г, величина подъёма фундамента в случае набухания не должна превышать 25 % от предельных значений деформаций основания фундаментов [7]. Таким образом, при осадке в 100 мм (для зданий с полным железобетонным каркасом) максимально допустимый подъём составляет 25 мм. В ряде случаев допускается осадка до 150 мм, однако принятый предел в 100 мм является более строгим и соответствует консервативному подходу проектирования. Расчёты выполнялись до тех пор, пока величина вертикального перемещения (подъёма) не достигала контрольных значений: ($\delta \leq 25$ мм).

В итоге был проведён ряд численных экспериментов, направленных на изучение поведения набухающих оснований. Исследование было разделено на четыре основных параметра:

1. Грунтовые условия: рассматривались четыре типа набухающих глин - I, II, III и IV.
2. Нагрузка: были выбраны пять уровней внешнего давления - 100, 150, 200, 250 и 300 кПа.
3. Гидрологический режим: было рассмотрено два варианта - свободное увлажнение и экранирование поверхности.
4. Вариант усиления основания: было исследовано два расчётных случая - основание из натурального грунта (для оценки деформаций массива) и основание с частичной заменой грунта (для определения необходимой глубины усиления).

В общей сложности было проведено 80 численных экспериментов, охватывающих все возможные комбинации указанных параметров. Эти эксперименты позволили получить большое количество данных о том, как тип

грунта, величина нагрузки и схема увлажнения влияют на деформации основания как в естественном, так и в улучшенном состоянии.

4.2 Результаты численных экспериментов: Оценка улучшения свойств оснований с применением разработанного метода.

4.2.1 Деформация естественного грунта.

На первом этапе расчётов было смоделировано поведение естественного основания, опираясь на характеристики, полученные в лабораторных условиях, которые описаны в главе 2. На рисунке 4.2 представлены графики деформации поверхности и изополя перемещений грунта при инфильтрации влаги для образцов грунта I, II, III, и IV.

Из рисунка видно, что набухание естественного грунта достигает значительных величин, что отображается красным цветом. Однако под подошвой фундамента и в околофундаментной зоне набухание уменьшается, что проявляется в переходе от красного к оранжевому цвету. Это снижение обусловлено дополнительным давлением, которое фундамент передает на грунт, что приводит к уменьшению набухания в этой области. Это согласуется с выводами других авторов, которые утверждают, что даже небольшое увеличение нагрузки на фундамент может значительно ограничить вертикальные перемещения основания [114]. Естественно, чем больше давление, тем меньше деформации подъёма.

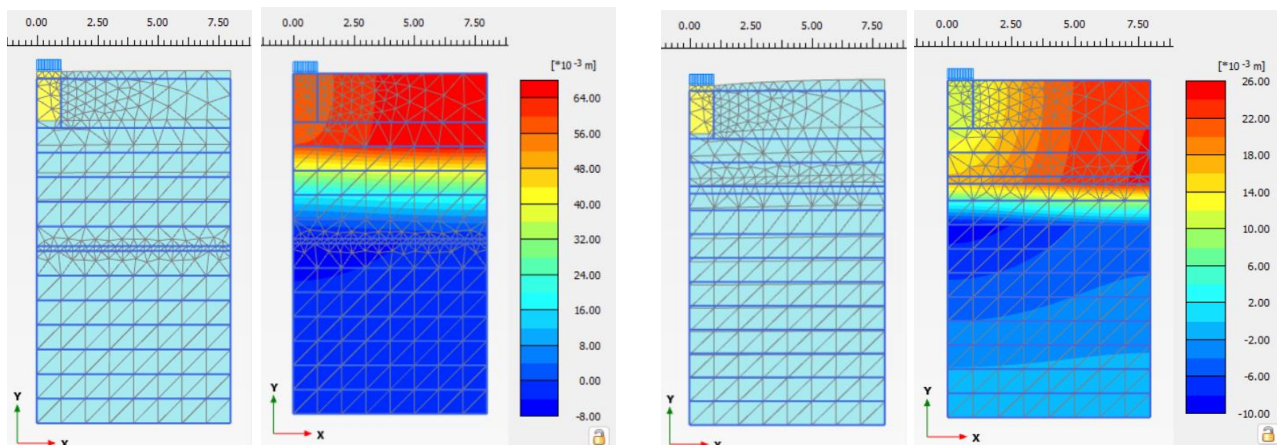
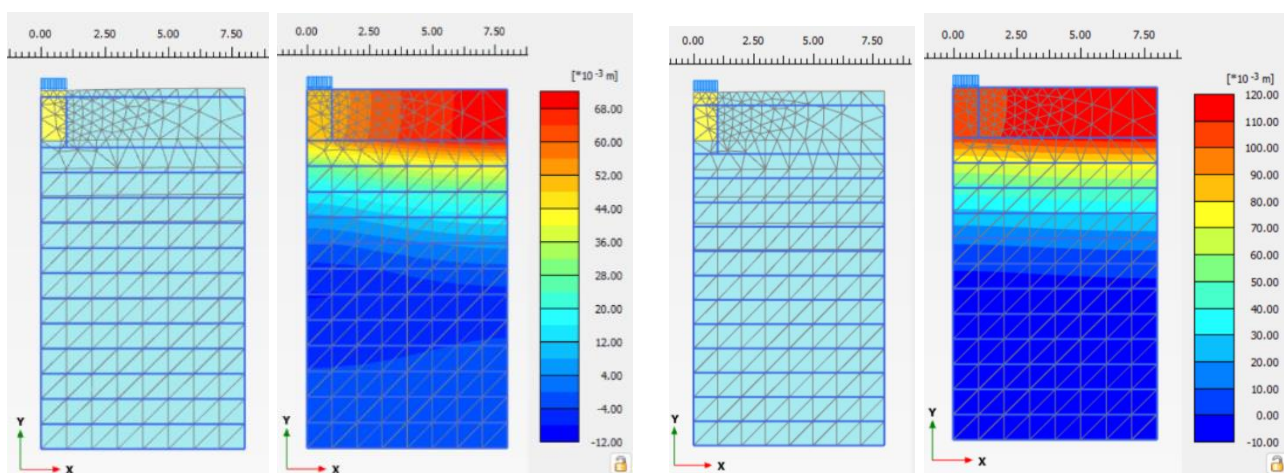
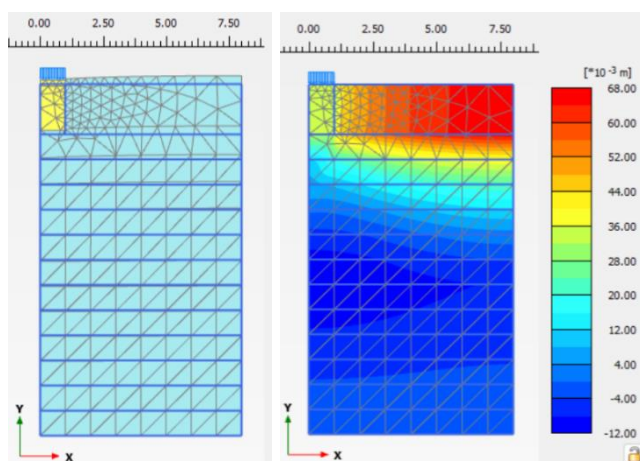
а) $P = 100 \text{ кПа}$ б) $P = 150 \text{ кПа}$ в) $P = 200 \text{ кПа}$ г) $P = 250 \text{ кПа}$ д) $P = 300 \text{ кПа}$

Рисунок 4.2 (I) - деформация естественного грунта образца I в условиях инфильтрации влаги:

Слева – Деформации поверхности; Справа – изополя перемещений;

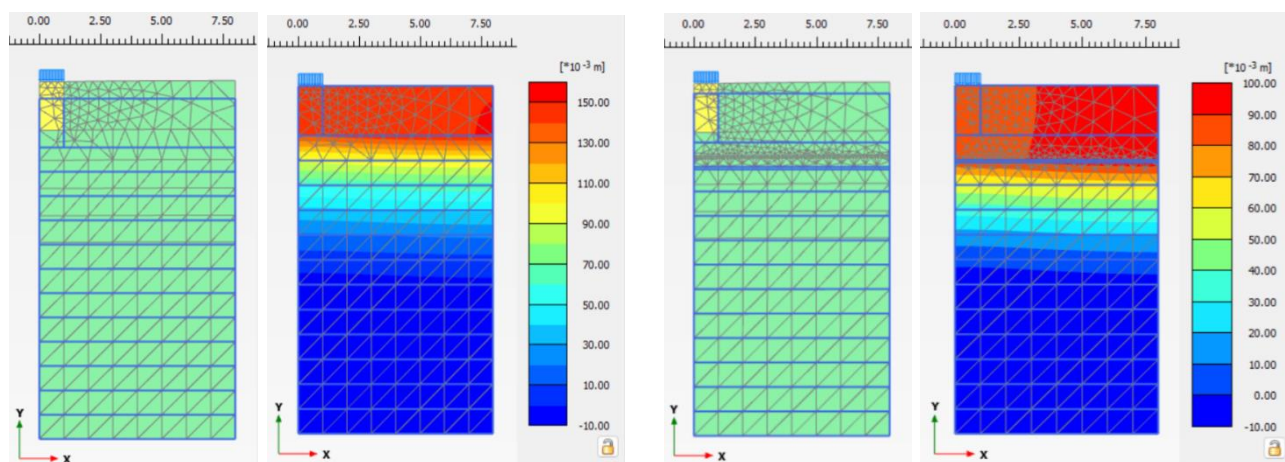
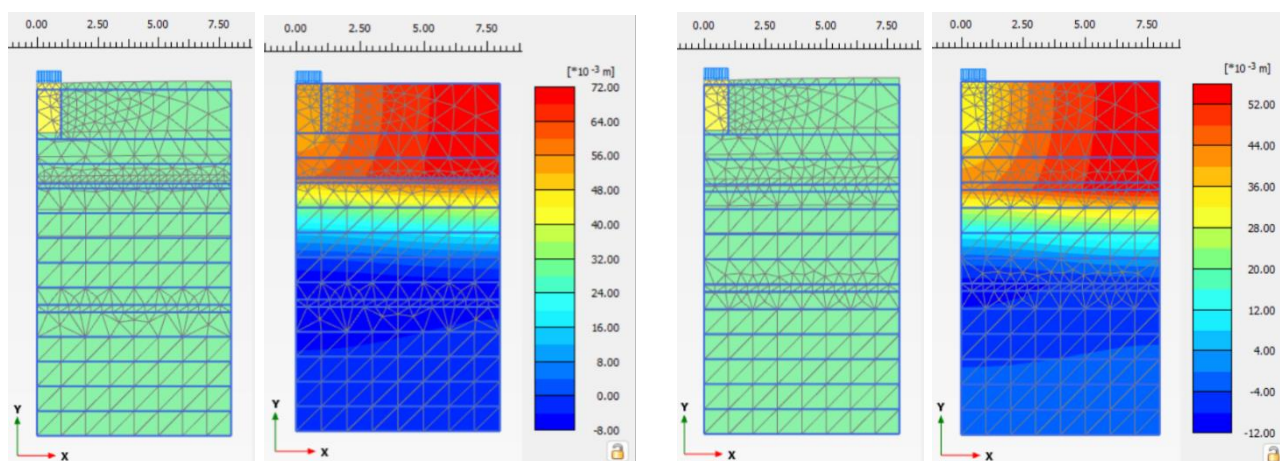
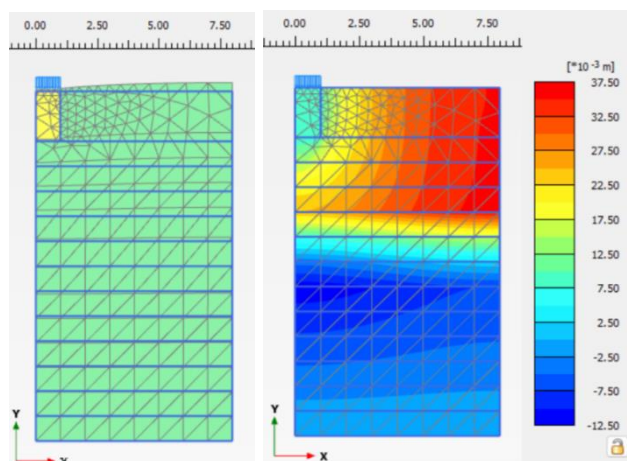
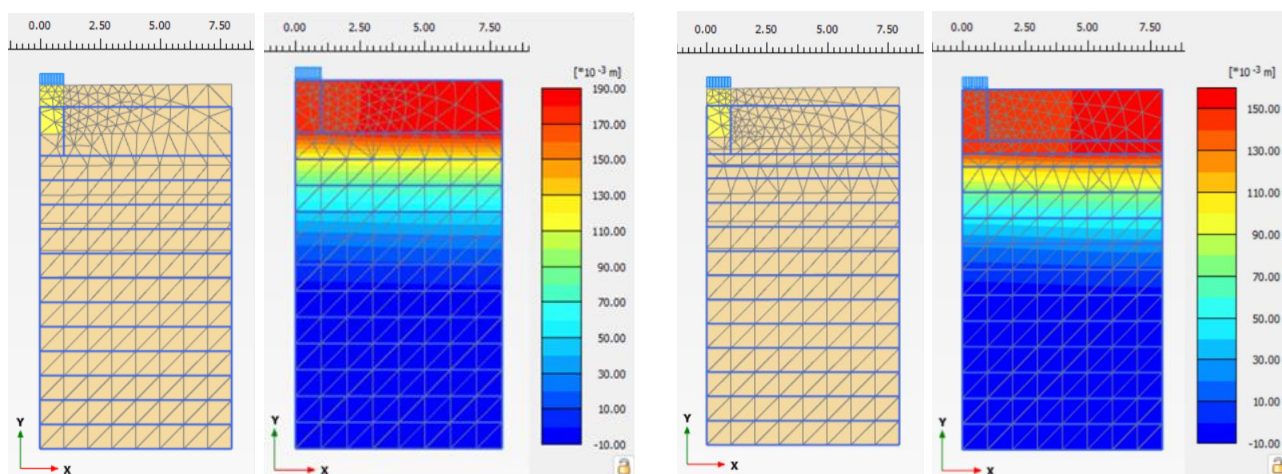
а) $P = 100 \text{ кПа}$ б) $P = 150 \text{ кПа}$ в) $P = 200 \text{ кПа}$ г) $P = 250 \text{ кПа}$ д) $P = 300 \text{ кПа}$

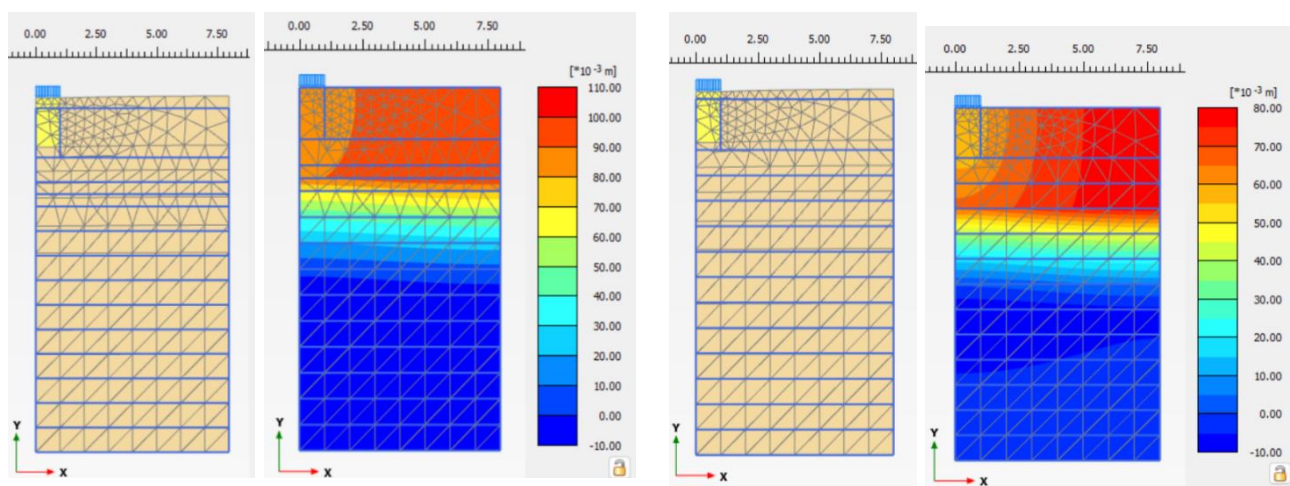
Рисунок 4.2 (II) - деформация естественного грунта образца II в условиях инфильтрации влаги:

Слева – Деформации поверхности; Справа – изополя перемещений;



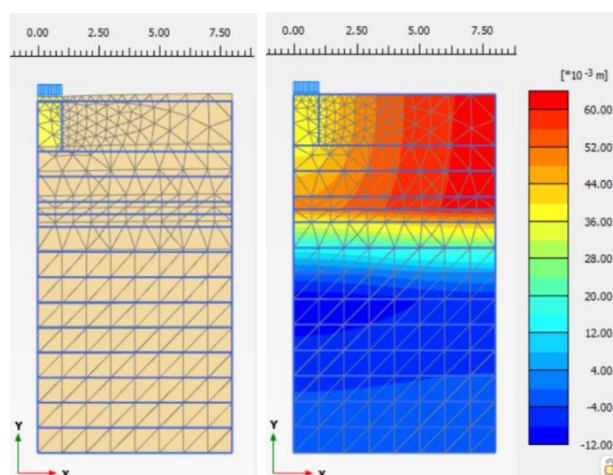
$P = 100 \text{ кПа}$

б) $P = 150 \text{ кПа}$



в) $P = 200 \text{ кПа}$

г) $P = 250 \text{ кПа}$



д) $P = 300 \text{ кПа}$

Рисунок 4.2 (III) - деформация естественного грунта образца III в условиях инфильтрации влаги: Слева – Деформации поверхности; Справа – изополя перемещений;

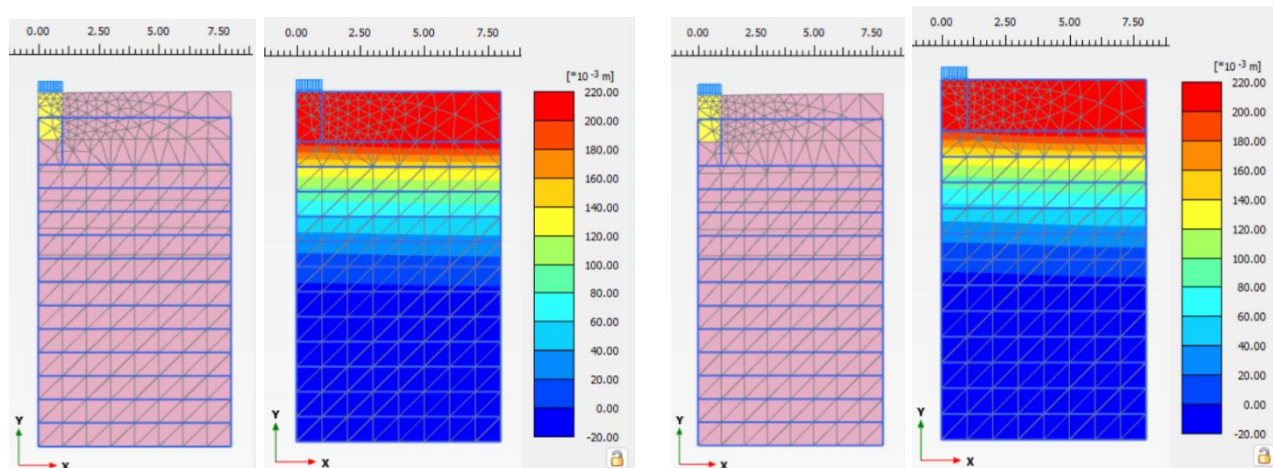
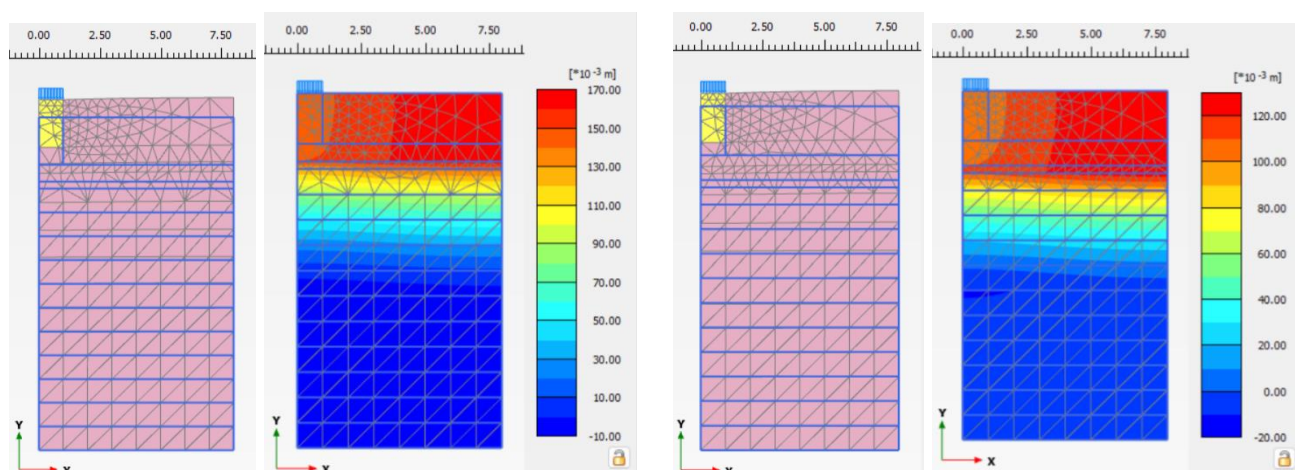
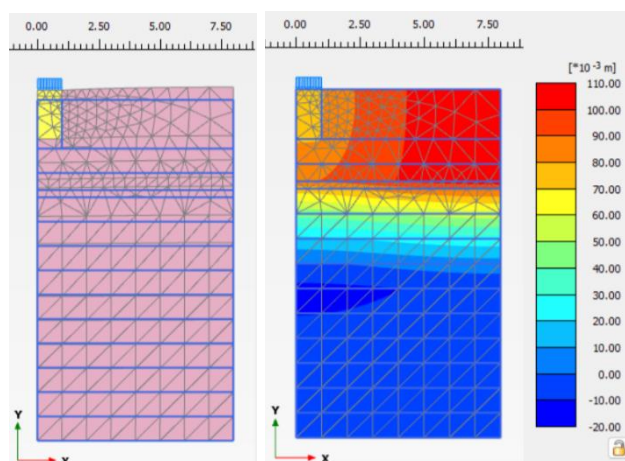
а) $P = 100 \text{ кПа}$ б) $P = 150 \text{ кПа}$ в) $P = 200 \text{ кПа}$ г) $P = 250 \text{ кПа}$ д) $P = 300 \text{ кПа}$

Рисунок 4.2 (IV) - деформация естественного грунта образца IV в условиях инфильтрации влаги: Слева – Деформации поверхности; Справа – изополя перемещений;

Также было смоделировано поведение естественного основания для всех образцов при экранировании поверхности.

На рисунке 4.3 представлены графики деформаций поверхности и изополя перемещений грунта при экранировании поверхности.

Сравнение рисунков 4.2 и 4.3 показывает, что набухание естественного грунта при экранировании поверхности меньше расчётного набухания в условиях инфильтрации влаги. Однако, несмотря на это, величины набухания остаются высокими, что показано красным цветом, и превышают предельные значения. Снижение набухания объясняется тем, что экранирование поверхности грунтового основания от воздействия погодно- климатических факторов уменьшает интенсивность тепло- влагообмена между грунтом и атмосферой. В результате деформация набухания также уменьшается.

Анализ результатов численных экспериментов позволил выявить несколько важных закономерностей, касающихся взаимодействия фундаментов с набухающими основаниями.

- Наблюдается обратная пропорциональная зависимость между величиной внешней нагрузки и деформациями набухания: с ростом нагрузки от 100 кПа до 300 кПа вертикальный подъем фундамента последовательно уменьшается во всех рассматриваемых сценариях.

- Выявлена прямая пропорциональная зависимость между интенсивностью набухания, определяемой параметрами ε_{sw} (относительная деформация набухания) и P_{sw} (давление набухания), и величиной подъема фундамента. Увеличение этих параметров приводит к росту деформаций;

- Переход от положительных значений (подъем) к отрицательным (осадка) наблюдается при низких показателях ε_{sw} и P_{sw} , характерных для грунтов с умеренной интенсивностью набухания, и при высоком уровне внешней нагрузки P . Этот эффект показывает, что при определённом сочетании свойств грунта и нагрузки внешнее давление не только полностью компенсирует давление набухания, но и начинает вызывать осадку основания.

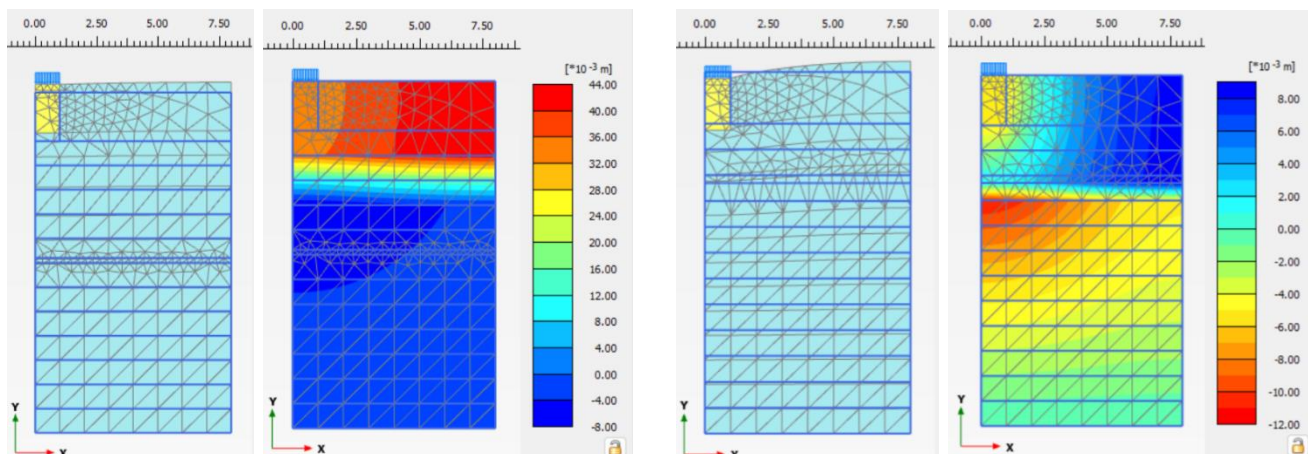
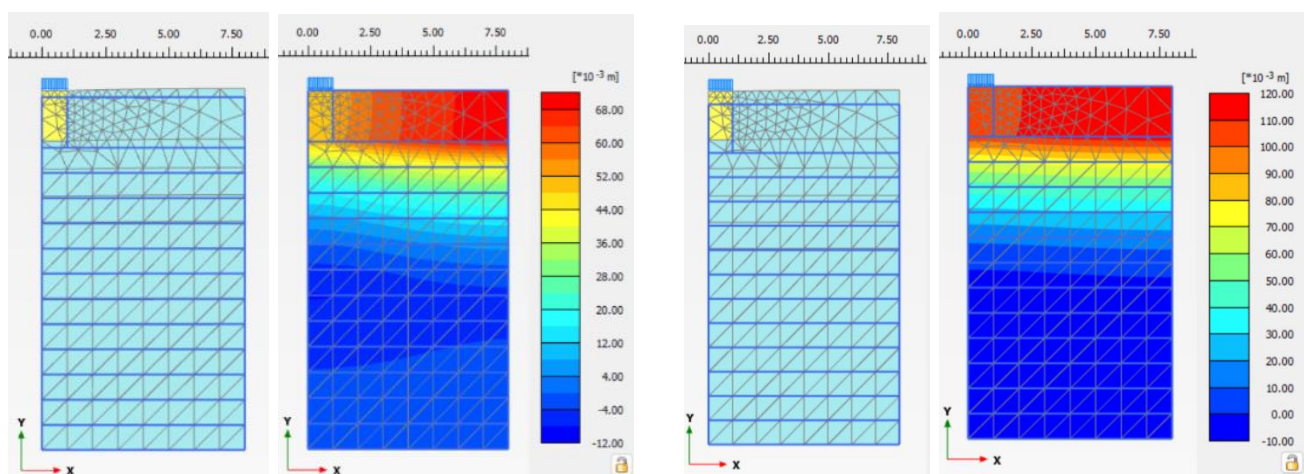
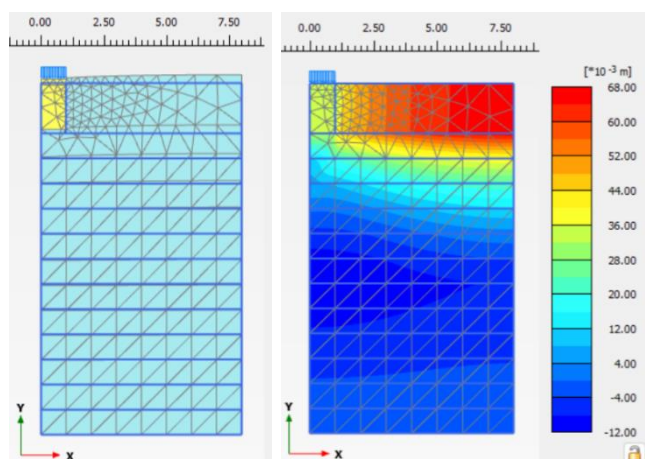
а) $P = 100 \text{ кПа}$ б) $P = 150 \text{ кПа}$ в) $P = 200 \text{ кПа}$ г) $P = 250 \text{ кПа}$ д) $P = 300 \text{ кПа}$

Рисунок 4.3 (I) - деформация естественного грунта образца I при экранировании поверхности:

Слева – Деформации поверхности; Справа – изополя перемещений;

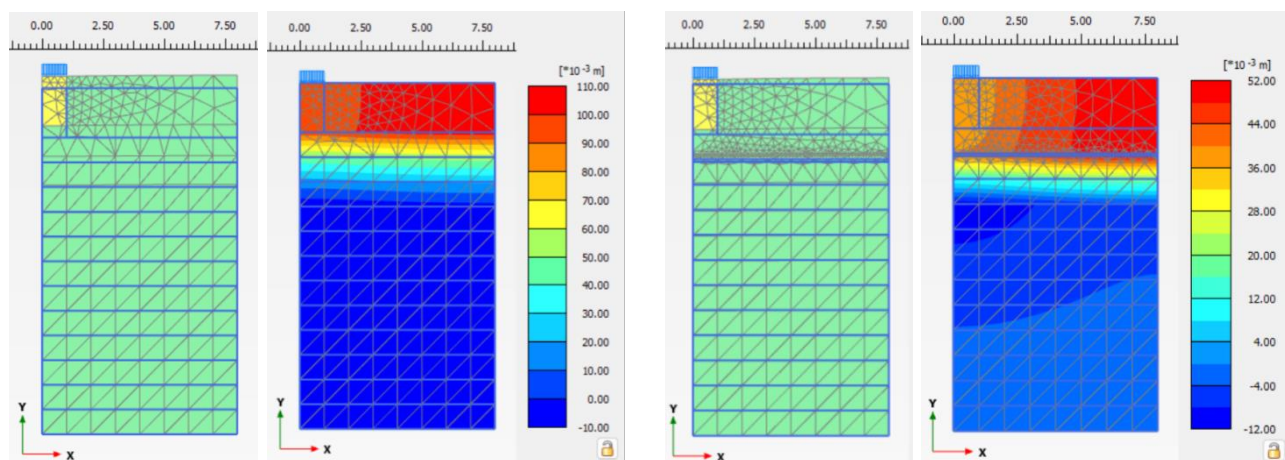
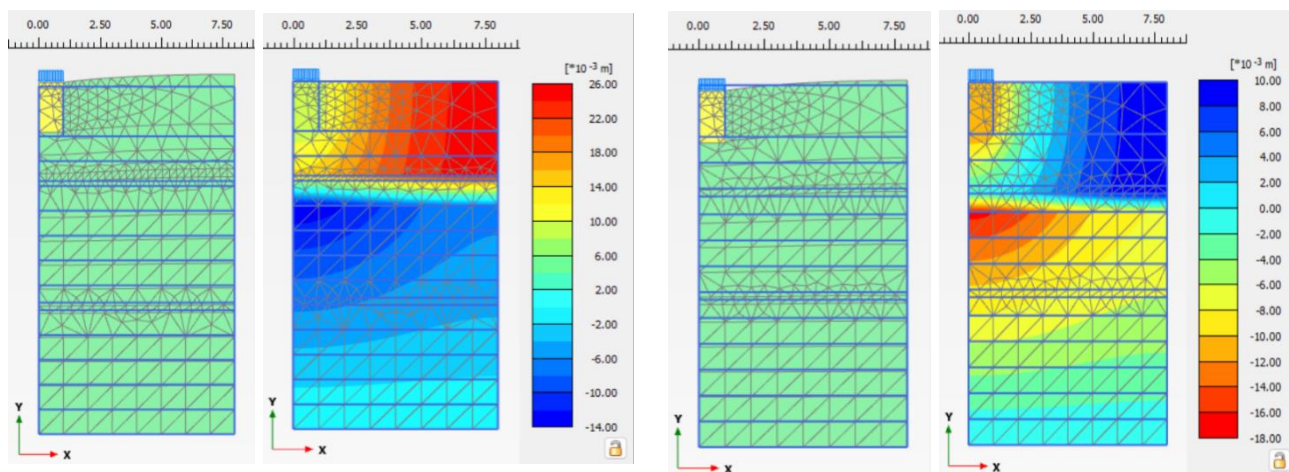
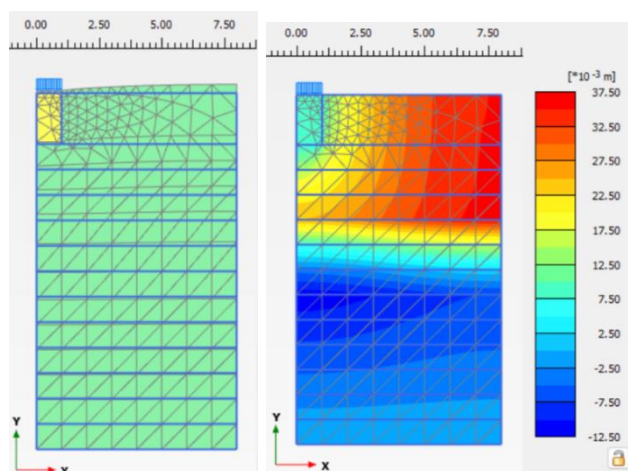
а) $P = 100 \text{ кПа}$ б) $P = 150 \text{ кПа}$ в) $P = 200 \text{ кПа}$ г) $P = 250 \text{ кПа}$ д) $P = 300 \text{ кПа}$

Рисунок 4.3 (II) - деформация естественного грунта образца II при экранировании поверхности:
 Слева – Деформации поверхности; Справа – изополя перемещений;

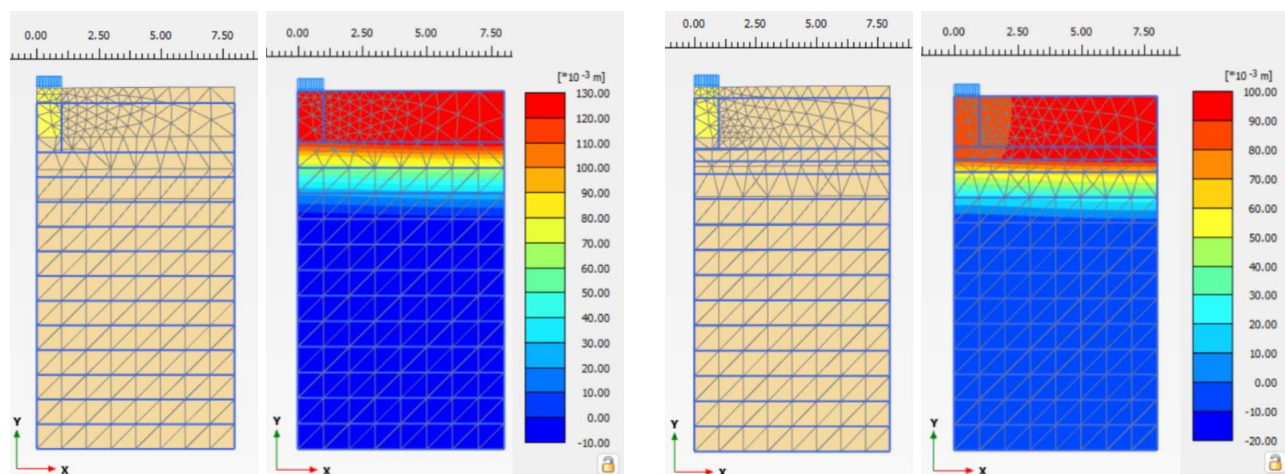
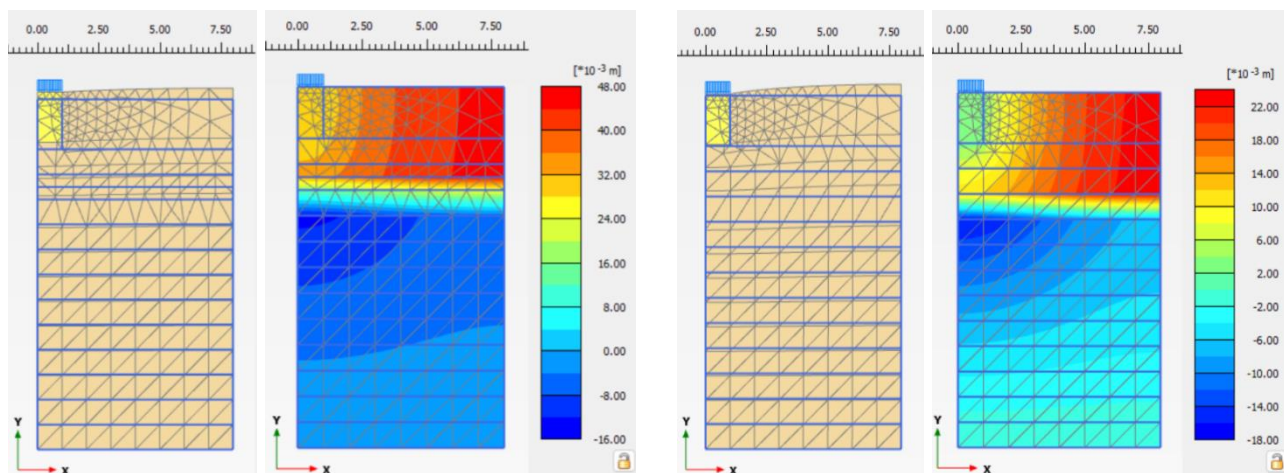
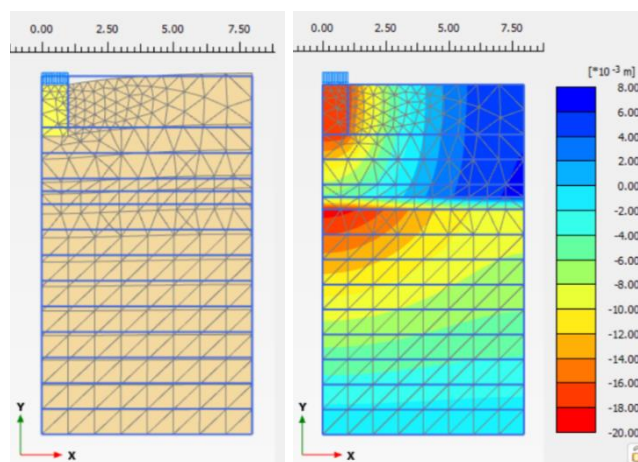
а) $P = 100 \text{ кПа}$ б) $P = 150 \text{ кПа}$ в) $P = 200 \text{ кПа}$ г) $P = 250 \text{ кПа}$ д) $P = 300 \text{ кПа}$

Рисунок 4.3 (III) - деформация естественного грунта образца III при экранировании поверхности: Слева – Деформации поверхности; Справа – изополя перемещений;

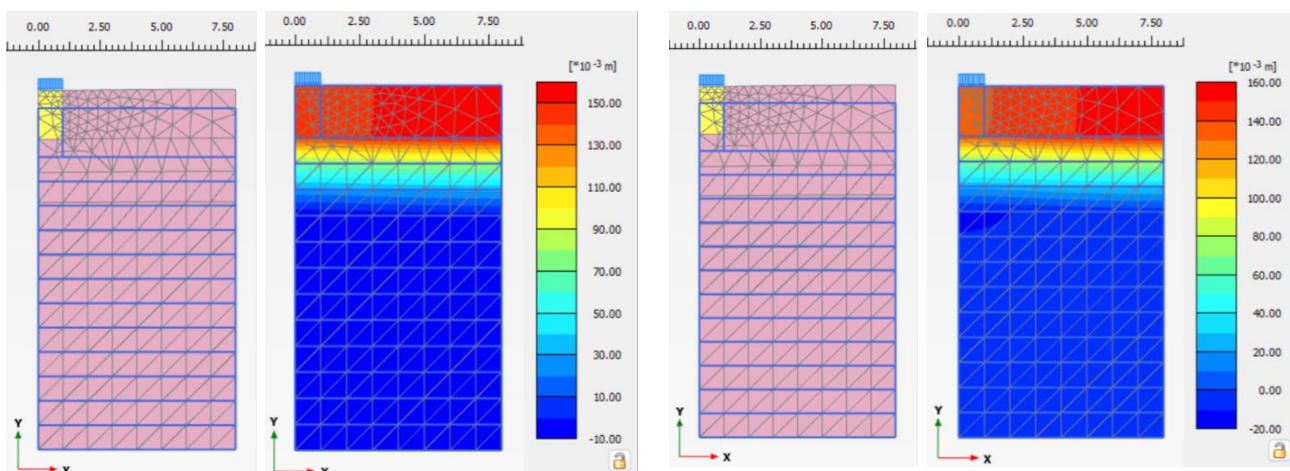
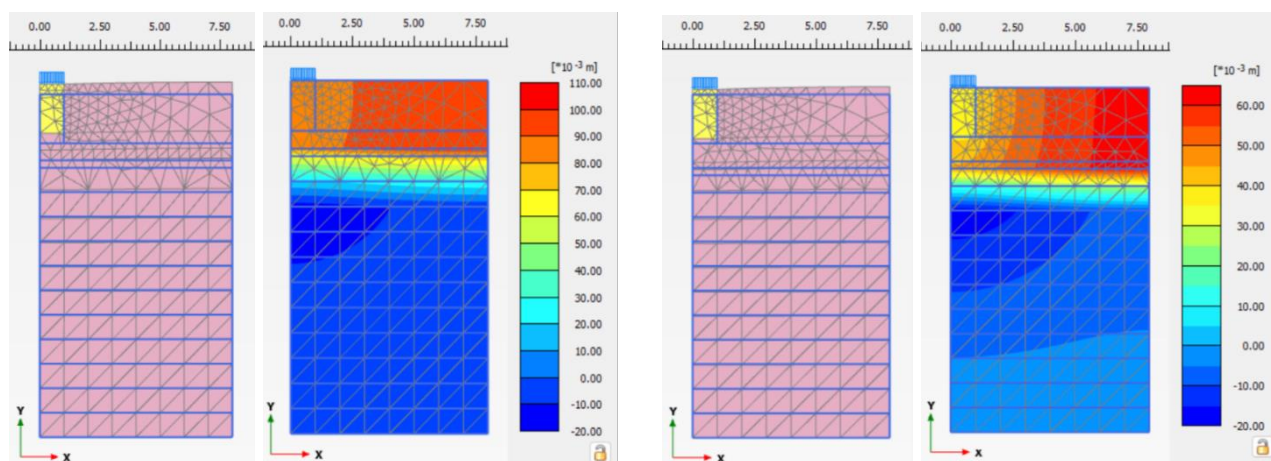
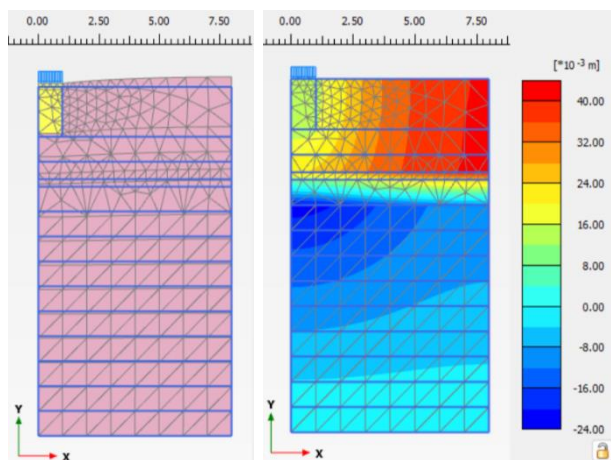
а) $P = 100 \text{ кПа}$ б) $P = 150 \text{ кПа}$ в) $P = 200 \text{ кПа}$ г) $P = 250 \text{ кПа}$ д) $P = 300 \text{ кПа}$

Рисунок 4.3 (IV) - деформация естественного грунта образца IV при экранировании поверхности: Слева – Деформации поверхности; Справа – изополя перемещений;

В сводной таблице 4.4 приведены результаты деформаций центра подошвы фундамента для всех типов грунтов и пяти уровней нагрузок, как при инфильтрации влаги, так и при экранировании поверхности. Положительные значения перемещений указывают на подъём фундамента, а отрицательные — на его осадку.

Таблица 4.4 - Значения деформаций центра подошвы фундамента

<i>Тип грунта</i>	ε_{sw} %	<i>Давление, кПа</i>	<i>Деформация при инфильтрации влаги, мм</i>	<i>Деформация при экранировании поверхности, мм</i>
<i>I</i>	9.8	100	58.1	32.9
		150	10.6	-5.1
		200	-24.5	-24.5
		250	-30.6	-30.6
		300	-37.2	-37.2
<i>II</i>	12.5	100	141.1	96.1
		150	82.4	37.5
		200	53.2	8.2
		250	33.1	-11.9
		300	8.1	-34.6
<i>III</i>	15.3	100	176.2	121.1
		150	140	85.3
		200	84.1	28.9
		250	58.2	3.1
		300	37.6	0.0
<i>IV</i>	18.2	100	210	144.5
		150	204	138.6
		200	147	81.8
		250	104.8	39.3
		300	79.2	13

* Положительные значения указывают на подъём фундамента, а отрицательные на его осадку

Проанализировав результаты численного моделирования, можно сделать вывод, что все четыре исследуемых образца в их естественном состоянии испытывают значительное вертикальное перемещение основания при набухании. Например, при давлении в 100 кПа и инфильтрации влаги величина вертикального перемещения колеблется от +58,1 мм до +210 мм, в зависимости от типа грунта.

При экранировании поверхности, при таком же давлении, величина вертикального перемещения составляет от +32,9 мм до +144,5 мм (таблица 4.4), что значительно превышает допустимый норматив по СП 22.13330.2016 (25 мм). Такие значения свидетельствуют о высоком риске повреждения фундаментов и надземных конструкций при отсутствии инженерной защиты основания.

С увеличением давления в моделях происходит уменьшение набухания. При определенном давлении для грунтов типа I и II наблюдается переход от положительной (набухающей) деформации к отрицательной, что свидетельствует об осадке. Максимальная величина осадки составляет -37,2 мм для грунта I при максимальном давлении 300 кПа.

Таким образом, получены значения набухания, многократно превышающие нормативно допустимые.

Полная замена грунта, склонного к набуханию, могла бы значительно изменить поведение основания. Однако очевидно, что процесс полной замены грунта сопряжён с техническими и экономическими сложностями, особенно если существуют альтернативные решения.

В строительной практике, проектирование оснований и фундаментов осуществляется с учётом того, чтобы величина подъёма фундамента в случае набухания не превышала 25% от максимально допустимой осадки, как это указано в пункте 6.2.5 СП 22.13330.2016, и пункте 6 приложения Г [7]. Эффективность численных экспериментов оценивалась по максимально допустимому подъёму, который не должен превышать 25 мм.

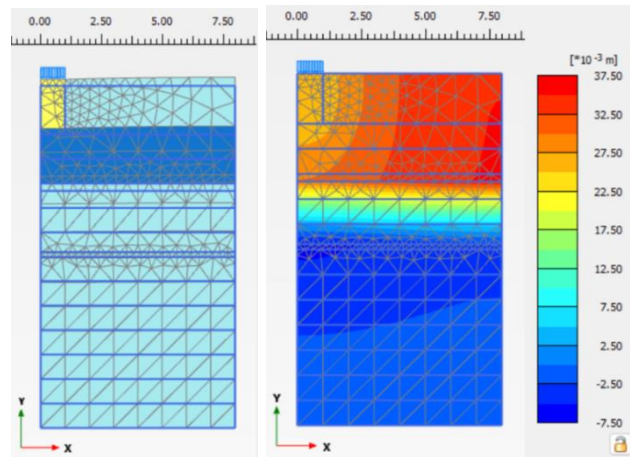
4.2.2 Снижение деформации набухания до предельного подъёма.

В этом разделе представлены результаты численных экспериментов, целью которых было найти оптимальное решение для минимизации подъема фундамента до максимально допустимого уровня.

Численные эксперименты были проведены в соответствии с разработанной методикой, которая предполагала последовательную замену грунтов на их улучшенные модификации, начиная от подошвы фундамента и далее вглубь с шагом в один метр, до достижения максимального подъёма в 25 мм. На завершающем этапе использовалась более тонкая дискретизация сетки с шагом 10 см до тех пор, пока не достигли допустимого подъёма фундамента.

Такая методика позволяет с достаточной для инженерной практики точностью определить необходимую толщину замены грунта в каждом случае. Увеличение глубины замены грунта проводилось последовательно, по одному метру, начиная от подошвы фундамента. Для примера, если при замене третьего метра грунта подъём не превышал предельного перемещения, то следующий расчёт был с заменой грунта на 2.10 м, далее 2.20 м и т. д., пока не определилась минимальная мощность улучшенного грунта, при которой вертикальная деформация не превышала максимально допустимого предела.

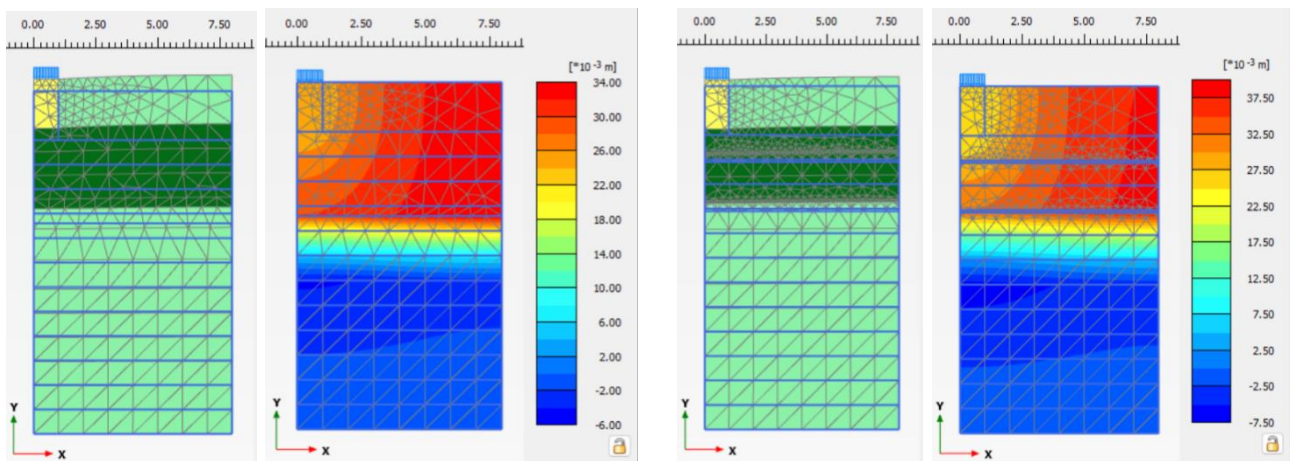
Графики деформации поверхности и изополя перемещений грунта для этой мощности представлены на рис. 4.4 в условиях инфильтрации влаги и на рис. 4.5 в условиях экранирования поверхности.



а) $P = 100 \text{ кПа}$

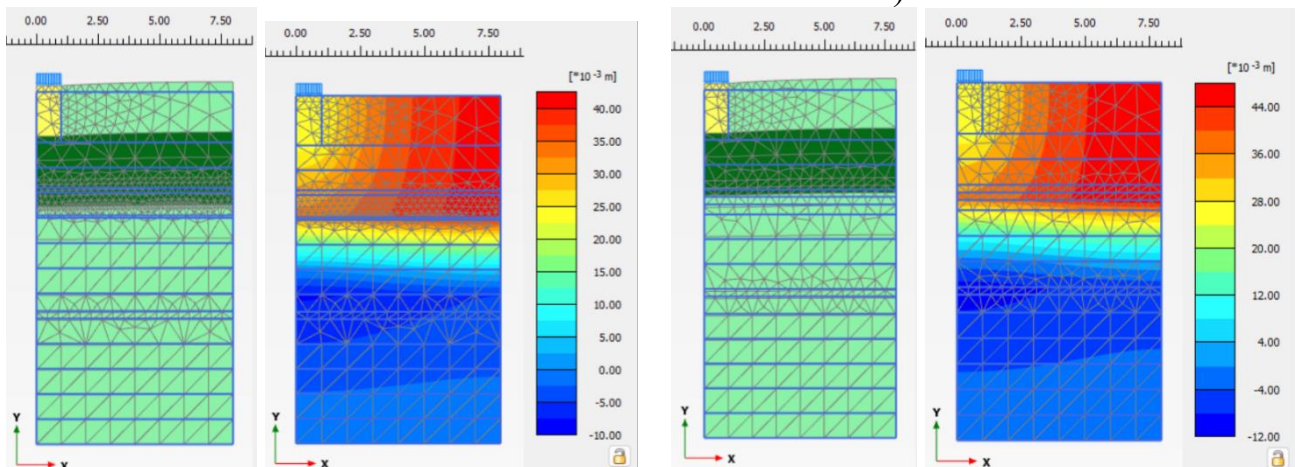
Рисунок 4.4 (I) - деформация грунта образца I в условиях инфильтрации влаги, при частичном улучшении. Слева – Деформации поверхности; Справа – изополя перемещений грунта:

Натуральный грунт, Улучшенный грунт



а) $P = 100 \text{ кПа}$

б) $P = 150 \text{ кПа}$



в) $P = 200 \text{ кПа}$

г) $P = 250 \text{ кПа}$

Рисунок 4.4 (II) - деформация грунта образца II в условиях инфильтрации влаги, при частичном улучшении. Слева – Деформации поверхности; Справа – изополя перемещений грунта:

Натуральный грунт, Улучшенный грунт

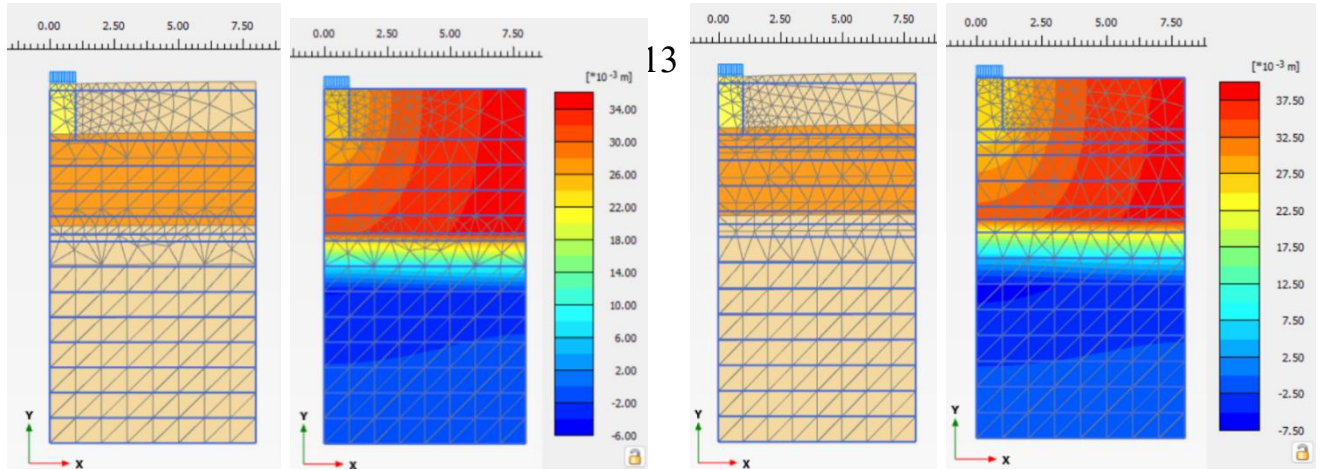
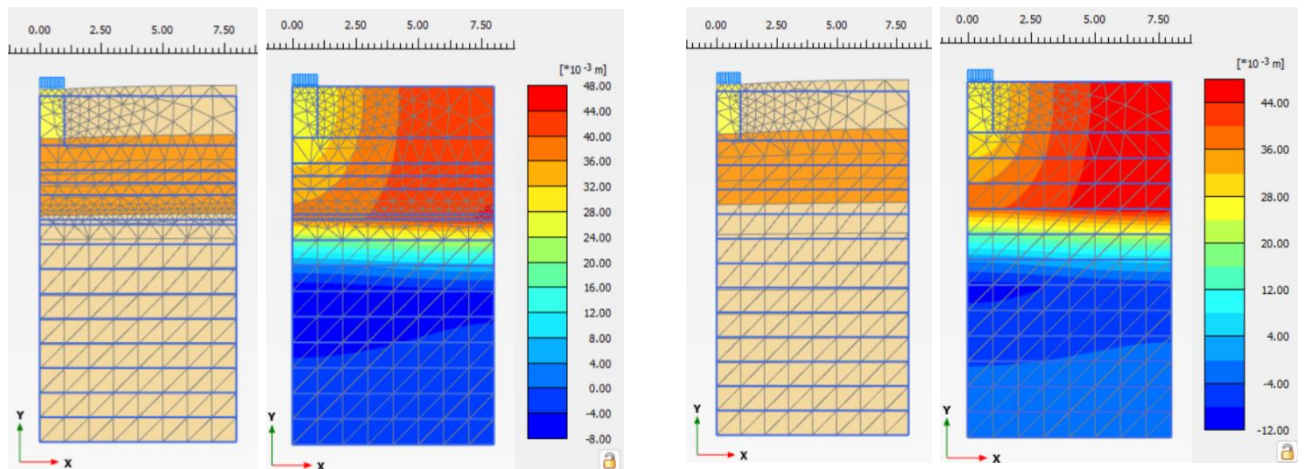
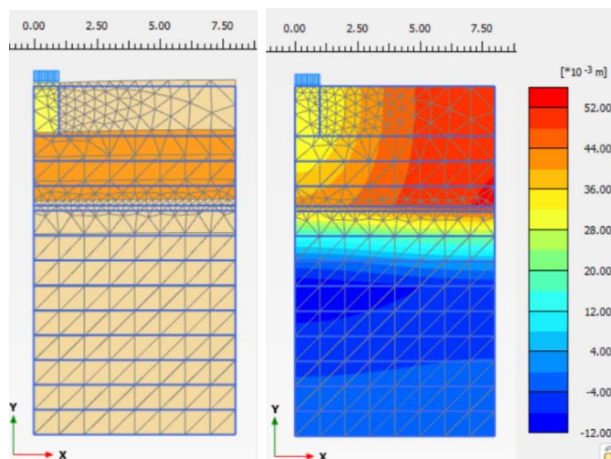
а) $P = 100 \text{ кПа}$ б) $P = 150 \text{ кПа}$ в) $P = 200 \text{ кПа}$ г) $P = 250 \text{ кПа}$ д) $P = 300 \text{ кПа}$

Рисунок 4.4 (III) - деформация грунта образца III в условиях инфильтрации влаги, при частичном улучшении. Слева – Деформации поверхности; Справа – изополя перемещений грунта: Натуральный грунт, Улучшенный грунт

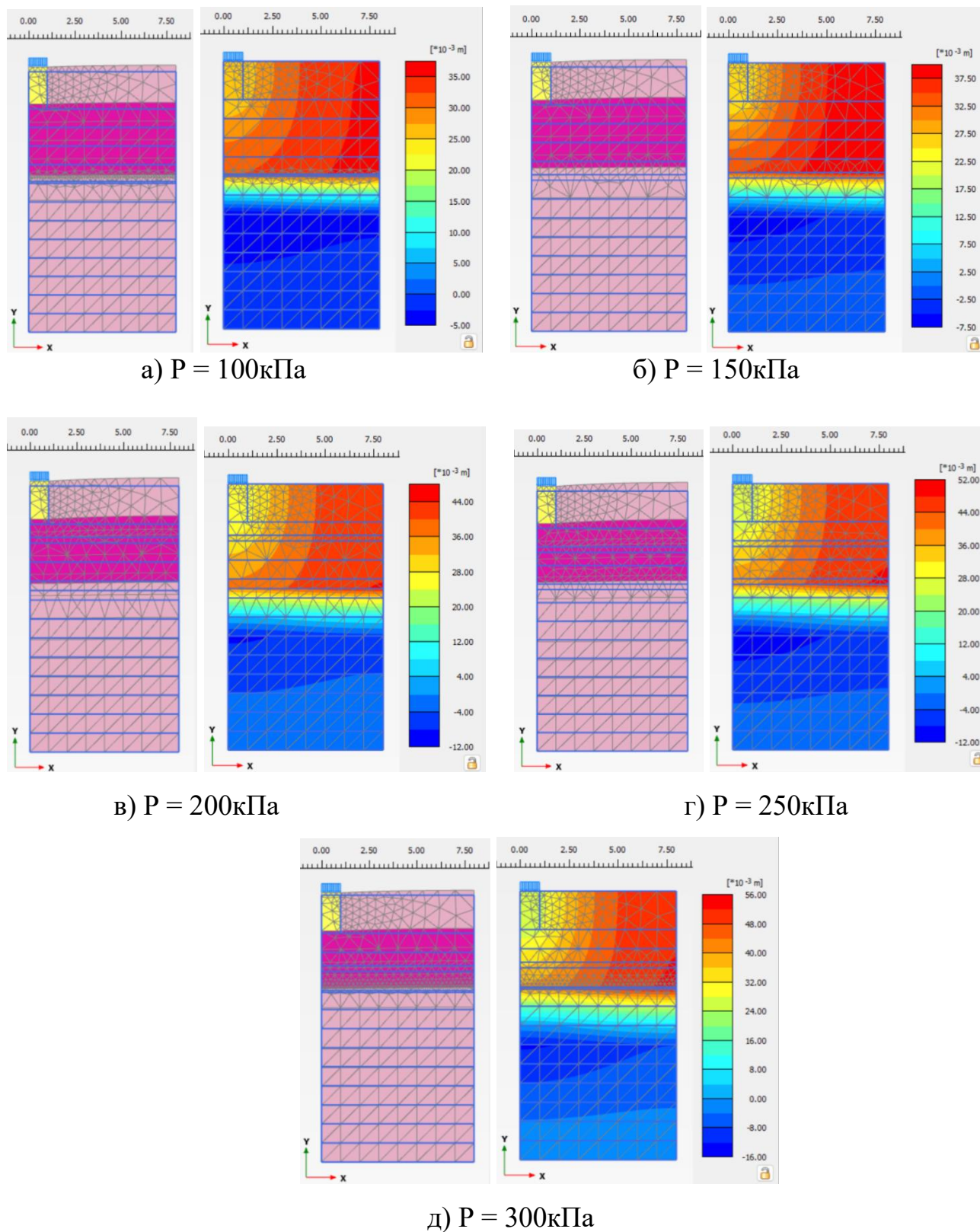


Рисунок 4.4 (IV) - деформация грунта образца IV в условиях инфильтрации влаги, при частичном улучшении. Слева – Деформации поверхности; Справа – изополя перемещений грунта: Натуральный грунт, Улучшенный грунт

На рисунке 4.5 особенно наглядно виден переход от положительной деформации (подъём, красная зона) к незначительной или отрицательной (синяя зона) при частичном замене естественного грунта на улучшенный.

Численные эксперименты были проведены для двух сценариев: с инфильтрацией влаги и с экранированием поверхности. На рисунке 4.5 изображены результаты численного моделирования, проведенного для всех образцов в условиях экранирования поверхности. На рисунке показана минимально необходимая глубина частичного улучшения грунта, которая позволяет снизить деформации подъема до предельного значения; и деформации поверхности и изополя перемещений при частичном улучшении грунта.

Анализ графических результатов выявляет несколько закономерностей:

- В зоне замены грунта, выделенной голубым цветом, деформации незначительны.

- С глубиной наблюдается переход к отрицательным значениям перемещений (синяя зона), что свидетельствует о развитии осадок.

Сравнение с рисунком 4.4, который демонстрирует результаты инфильтрации, показывает, насколько сильно экранирование влияет на глубину укрепления основания. Например, для грунта (III), чтобы обеспечить допустимые деформации при внешней нагрузке в 200 кПа, в условиях экранирования требуется заменить грунт на глубину 1,6 м, что в два раза меньше, чем глубина замены в условиях инфильтрации — 3,2 м.

Результаты численных экспериментов по определению минимальной глубины замены грунта, необходимой для уменьшения деформации набухания до максимально допустимого уровня, представлены в сводной таблице 4.5. Из результатов видно, что для достижения максимально допустимого уровня подъёма фундамента при инфильтрации влаги необходимо заменить верхние слои основания на глубине от 2,3 до 3,9 метра. Однако, если поверхность будет экранирована, то требуемая глубина замены уменьшится почти вдвое и составит 1,3–2,0 метра.

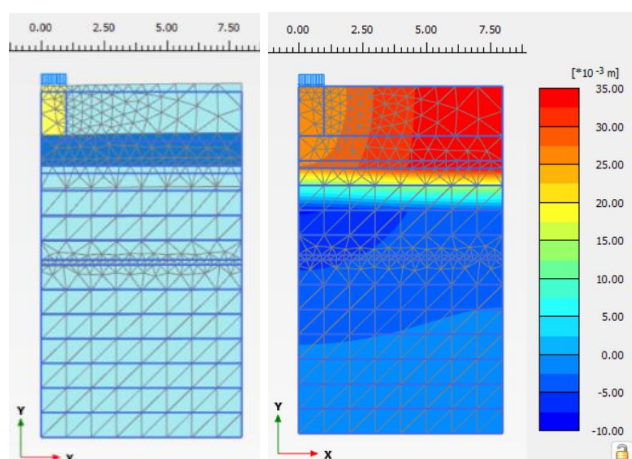
а) $P = 100 \text{ кПа}$

Рисунок 4.5 (I) - деформация грунта образца I при экранировании поверхности, при частичном улучшении. Слева – Деформации поверхности; Справа – изополя перемещений грунта:

Натуральный грунт, Улучшенный грунт

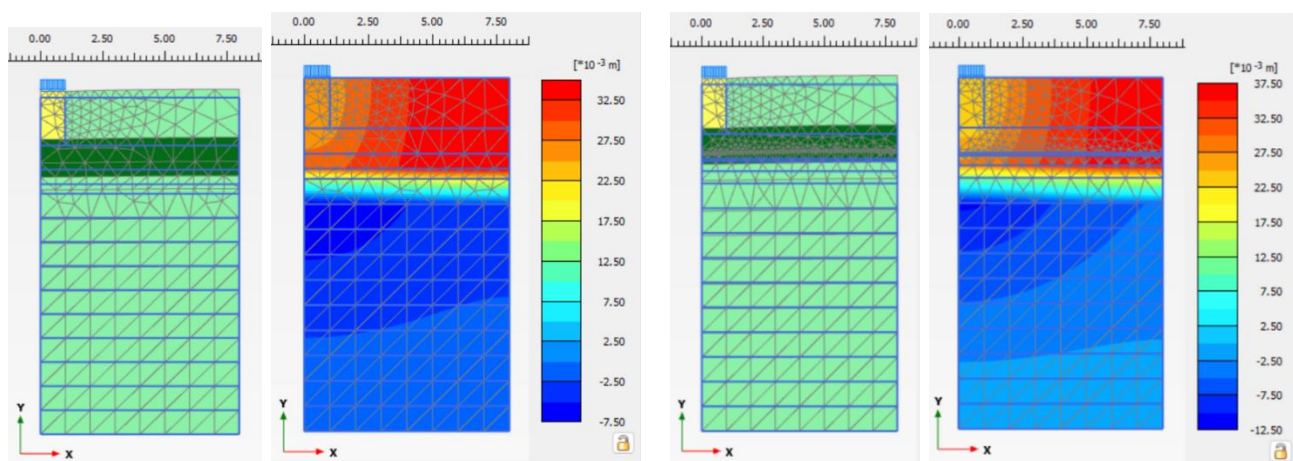
а) $P = 100 \text{ кПа}$ б) $P = 150 \text{ кПа}$

Рисунок 4.5 (II) - деформация грунта образца II при экранировании поверхности, при частичном улучшении. Слева – Деформации поверхности; Справа – изополя перемещений грунта:

Натуральный грунт, Улучшенный грунт

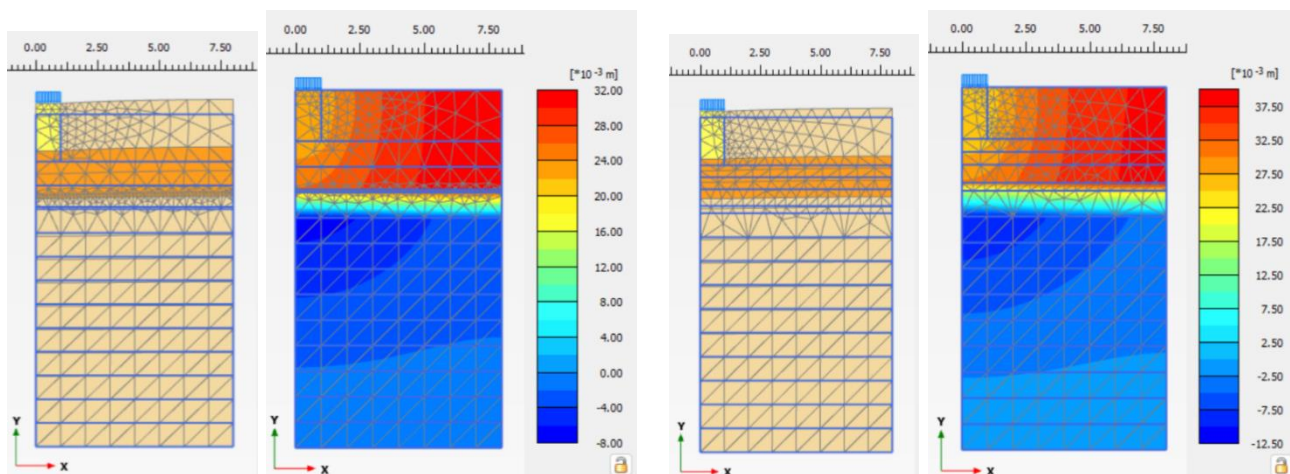
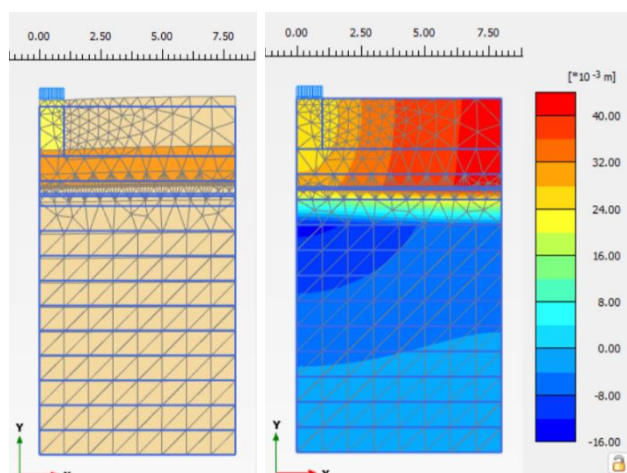
а) $P = 100 \text{ кПа}$ б) $P = 150 \text{ кПа}$ в) $P = 200 \text{ кПа}$

Рисунок 4.5 (III) - деформация грунта образца III при экранировании поверхности, при частичном улучшении. Слева – Деформации поверхности; Справа – изополя перемещений грунта: Натуральный грунт, Улучшенный грунт

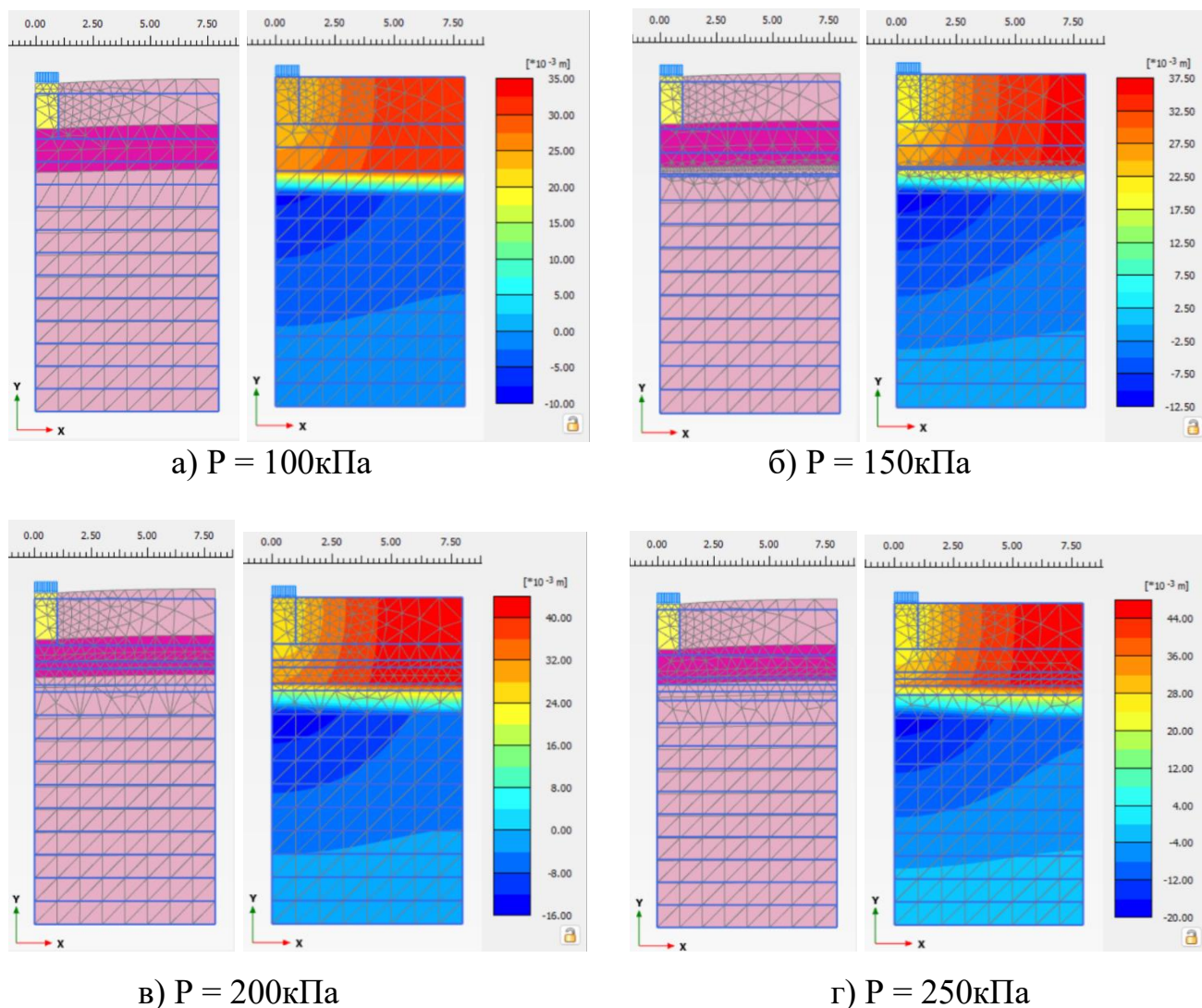


Рисунок 4.5 (IV) - деформация грунта образца IV при экранировании поверхности, при частичном улучшении. Слева – Деформации поверхности; Справа – изополя перемещений грунта: Натуральный грунт, Улучшенный грунт

Следует подчеркнуть, что при увеличении давления на грунт в некоторых случаях отпадает необходимость в улучшении его свойств. При этом, чем меньше грунт склонен к набуханию, тем при менее высоких значениях давления можно обойтись без его замены.

В частности, при инфильтрации влаги для образца I не требуется замена грунта при нагрузках от 150 кПа и выше, а для образца II — при нагрузках от 300 кПа.

При экранировании поверхности для образца I замена грунта не требуется при нагрузках от 150 кПа и выше, для образца II — при нагрузках от 200 кПа и выше,

для образца III — при нагрузках от 250 кПа и выше, а для образца VI — при нагрузках от 300 кПа.

Таблица 4.5 - Минимальная глубина замены грунта, необходимая для снижения деформации до максимально допустимого подъёма.

<i>Тип грунта</i>	ε_{sw} %	<i>Давление, кПа</i>	<i>Минимальная глубина замены при инфильтрации влаги, м</i>	<i>Минимальная глубина замены при экранировании поверхности, м</i>
<i>I</i>	<i>9.8</i>	<i>100</i>	<i>2.3</i>	<i>1.3</i>
		<i>150</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
		<i>200</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
		<i>250</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
		<i>300</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
<i>II</i>	<i>12.5</i>	<i>100</i>	<i>3.4</i>	<i>1.6</i>
		<i>150</i>	<i>3.1</i>	<i>1.5</i>
		<i>200</i>	<i>2.9</i>	<i>0</i>
		<i>250</i>	<i>2.6</i>	<i>0</i>
		<i>300</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
<i>III</i>	<i>15.3</i>	<i>100</i>	<i>3.7</i>	<i>1.9</i>
		<i>150</i>	<i>3.5</i>	<i>1.7</i>
		<i>200</i>	<i>3.2</i>	<i>1.6</i>
		<i>250</i>	<i>3</i>	<i>0</i>
		<i>300</i>	<i>2.8</i>	<i>0</i>
<i>IV</i>	<i>18.2</i>	<i>100</i>	<i>3.9</i>	<i>2</i>
		<i>150</i>	<i>3.7</i>	<i>1.9</i>
		<i>200</i>	<i>3.5</i>	<i>1.7</i>
		<i>250</i>	<i>3.3</i>	<i>1.6</i>
		<i>300</i>	<i>3.1</i>	<i>0</i>

Таким образом, проведённые численные эксперименты позволяют сделать вывод, что необходимая глубина замены грунта уменьшается с уменьшением его склонности к набуханию и с увеличением значений давления на грунт.

В следующем разделе будут рассмотрены закономерности, описывающие зависимость глубины замены грунта от его свойств и от значений, действующих на него нагрузок.

4.3 Метод усиления набухающих глинистых грунтов с применением добавок смесей полипропиленовых волокон и извести.

4.3.1 Прогноз необходимости улучшения грунта для обеспечения допустимых значений деформаций.

Анализ результатов численного моделирования показал, что в естественных условиях все четыре исследуемых образца испытывают значительное вертикальное перемещение основания в процессе набухания. Величины набухания значительно превышают допустимые деформации подъёма, регламентированные нормативными документами. Однако с увеличением давления в моделях наблюдается снижение набухания.

При достижении критических значений давления для всех типов грунтов наблюдается переход от положительных (набухающих) деформаций к отрицательным, что свидетельствует о начале процессов осадочной деформации. Эта ситуация наблюдалась как при инфильтрации влаги в грунтовый массив, так и при поверхностном экранировании.

На рисунке 4.6 представлены графические зависимости деформации фундамента от относительного набухания грунта при различных уровнях нагрузки. Эти графики были получены на основании результатов численных экспериментов.

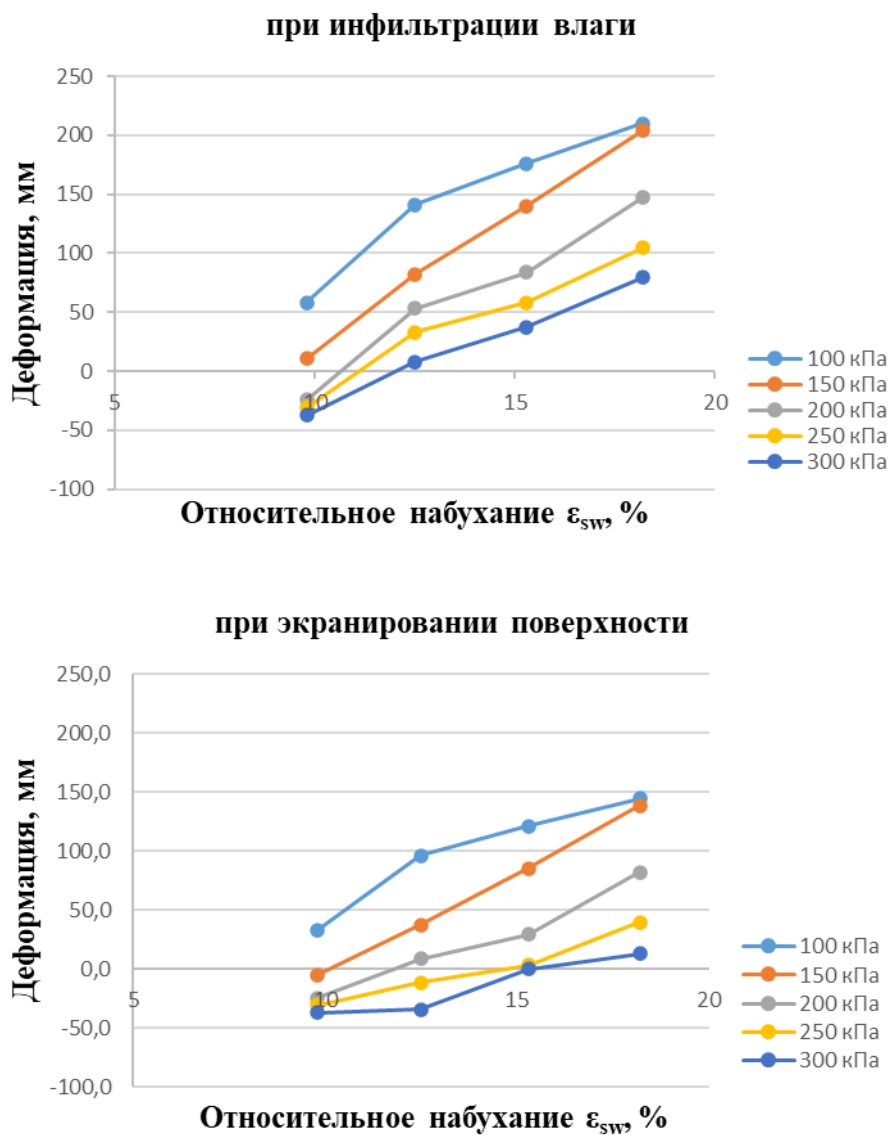


Рисунок 4.6 - Графики зависимости деформации фундамента от относительного набухания грунта при различных уровнях давления и в условиях инфильтрации влаги и экранирования поверхности.

Анализ графиков показывает, что в зависимости от интенсивности набухания грунта, при определённых нагрузках подъём фундамента может оказаться ниже предельно допустимых значений. Физической основой данного явления служит превышение вертикальных напряжений, вызванных внешней нагрузкой, над

давлением набухания грунта, что приводит к эффективному подавлению деформаций набухания и минимизации вертикальных перемещений фундамента.

Таким образом, при проектировании оснований и фундаментов на набухающих грунтах следует начать с прогноза деформации основания рассматриваемого фундамента, учитывая характеристики грунта и предполагаемую нагрузку. Это поможет определить, нужно ли улучшать грунт, а затем установить необходимую толщину слоя улучшенного грунта.

По итогам анализа результатов численных экспериментов были разработаны рекомендации для предварительного прогнозирования необходимости улучшения грунта при инфильтрации и при экранировании поверхности влаги, сведенные в таблицы (таблица 4.6 а и б).

Таблица 4.6 - необходимости улучшения грунта для снижения деформации набухания до максимально допустимого подъёма.

а) в условиях инфильтрации влаги					
Относительное набухание ε_{sw} , %	Давление Р, кПа				
	100	150	200	250	300
10,0	✓	X	X	X	X
12,5	✓	✓	✓	✓	X
15,0	✓	✓	✓	✓	✓
18,0	✓	✓	✓	✓	✓

б) при экранировании поверхности					
Относительное набухание ε_{sw} , %	Давление Р, кПа				
	100	150	200	250	300
10,0	✓	X	X	X	X
12,5	✓	✓	X	X	X
15,0	✓	✓	✓	X	X
18,0	✓	✓	✓	✓	X

* Этими таблицами можно пользоваться для предварительного прогнозирования.

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

4.3.2 Определение необходимой толщины слоя улучшенного грунта.

В случае превышения предельно допустимых значений деформаций подъёма фундамента (h_{sw}), необходимо определить требуемую толщину слоя модифицированного грунта. Данная мера позволит обеспечить соответствие нормативным требованиям и снижение деформации набухания до максимально допустимого подъёма.

На основании серии численных экспериментов была произведена оценка оптимальной толщины модифицированного грунтового слоя для двух альтернативных сценариев: при условии проникновения влаги в грунтовую толщу и при создании экранирующего барьерного слоя на поверхности. Результаты численного моделирования представлены на рисунке 4.7, где сплошные линии иллюстрируют зависимость необходимой толщины улучшенного грунтового слоя от коэффициента относительного набухания грунта при различных уровнях давления.

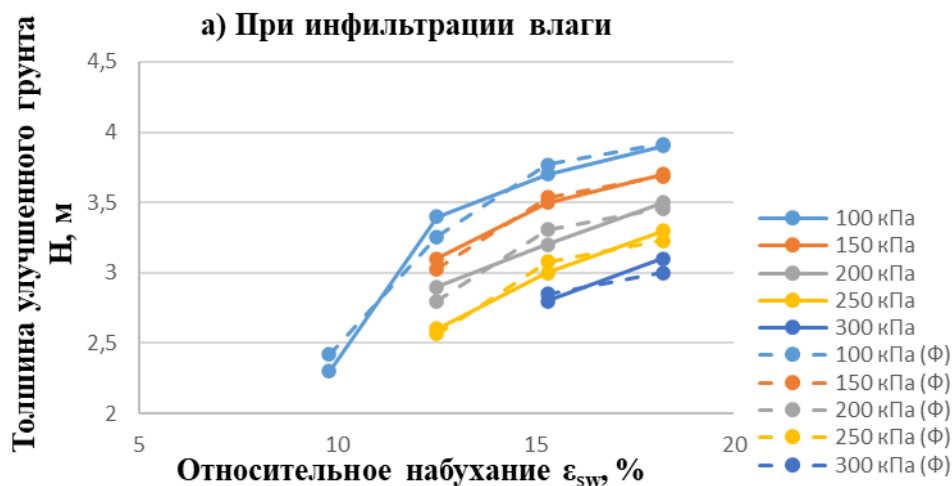


Рисунок 4.7-а - Графики зависимости необходимой толщины улучшенного грунтового слоя от относительного набухания грунта при различных уровнях давления в условиях инфильтрации влаги.

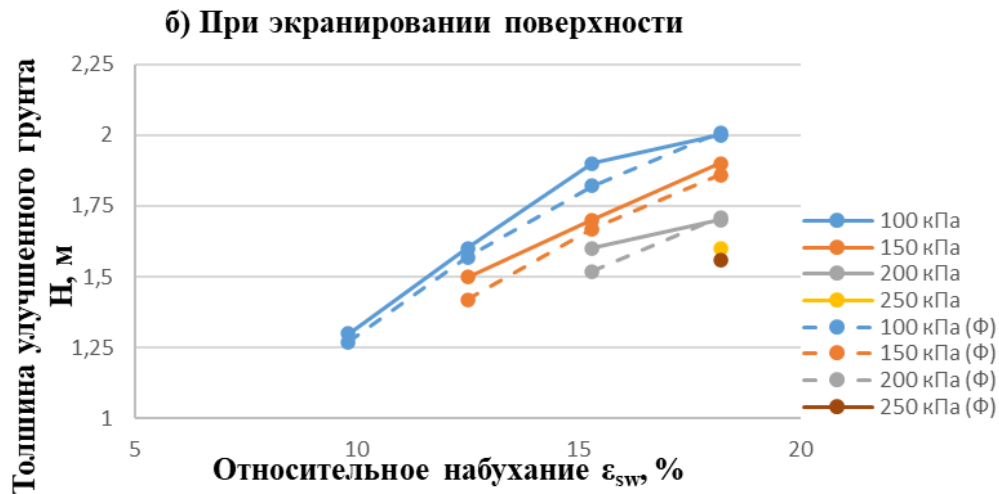


Рисунок 4.7-б - Графики зависимости необходимой толщины улучшенного грунтового слоя от относительного набухания грунта при различных уровнях давления при экранировании поверхности

На основе результатов численного моделирования в PLAXIS была проведена аппроксимация, чтобы определить зависимость толщины слоя модифицированного грунта от характеристик грунтов и величины приложенного давления. Сравнительный анализ линейной, степенной и полиномиальной моделей второго порядка показал превосходство последней по критериям точности.

В результате были получены две эмпирические зависимости, которые можно использовать для прогнозирования толщины слоя ($\hat{H}$, см) в рамках двух различных расчетных схем:

- Формула (4.1) – для условий инфильтрации поверхностных вод в грунтовый массив;
- Формула (4.2) – для условий экранирования поверхности.

$$\hat{H} = 82,1\varepsilon_{sw}(1 - 0,028\varepsilon_{sw}) - 0,46P - 295,7, \quad (4.1)$$

$$\hat{H} = 20\varepsilon_{sw}(1 - 0,02\varepsilon_{sw}) - 0,3P, \quad (4.2)$$

Где $\hat{H}$ — необходимая толщины слоя модифицированного грунта, (см)

ε_{sw} — относительное набухание грунта, (%);

P — предполагаемое давление на уровне подошвы фундамента (кПа).

Графики зависимости необходимой толщины улучшенного грунтового слоя от относительного набухания грунта при различных уровнях давления представлены на рисунке 4.7. На этом рисунке пунктирными линиями изображены расчетные кривые выполненных на основе выведенных эмпирических формул (4.1) и (4.2), а сплошными линиями показаны кривые, полученные экспериментально. Эти графики показывают хорошее соответствие между экспериментальными и расчетными данными.

Для выявления возможности применения этих эмпирических формул необходимо провести тщательную статистическую проверку. В данном исследовании был проведён статический анализ на основе коэффициента детерминации (R^2) и среднюю абсолютную процентную ошибку (MAPE).

Двойная проверка с использованием R^2 и $MAPE$ стала надёжным и общепризнанным стандартом валидации геотехнических моделей, и неотъемлемой частью современного научного обоснования и практической применимости геотехнических моделей. Чтобы подтвердить правильность и применимость выведенных формул, была проведена комплексная проверка прогнозных моделей.

По полученным результатам проверен коэффициент детерминации (R^2), который рассчитывается по следующей формуле:

$$R^2 = 1 - (SS_{res} / SS_{tot}), \quad (4.3.a)$$

где SS_{res} — сумма квадратов остатков регрессии, рассчитывается по формуле:

$$SS_{res} = \sum_i (H_i - \hat{H}_i)^2 \quad (4.3.b)$$

H_i — каждое фактическое значение необходимой толщины слоя модифицированного грунта из набора данных численных экспериментов,

$\hat{H}_i$ — соответствующее значение необходимой толщины, рассчитанное по формуле,

SS_{tot} — общая сумма квадратов фактических значений из набора данных численных экспериментов, рассчитывается по формуле:

$$SS_{tot} = \sum_i (H_i - \bar{H})^2 \quad (4.3.в)$$

$\bar{H}$ — среднее арифметическое всех фактических значений y_i

Также были рассчитаны средние абсолютные процентные ошибки ($MAPE$) по экспериментальным и расчётным значениям необходимой толщины улучшенного грунта. Расчёты проводились по формуле:

$$MAPE = 100 \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{H_i - \hat{H}_i}{H_i} \right| \quad (4.4)$$

Таблица 4.7 - расчёт коэффициента детерминации (R^2) и средней абсолютной процентной ошибки ($MAPE$) по уравнению 4.1

Относительное набухание	Давление	Минимальная глубина замены	Глубина замены по формуле	квадрат погрешности	квадрат отклонения	Относительная погрешность
ε_{sw}	P	H_i	$\hat{H}_i$	$(H_i - \hat{H}_i)^2$	$(H_i - \bar{H})^2$	$\left \frac{H_i - \hat{H}_i}{H_i} \right $
%	кПа	см	см	см ²	см ²	-
9,80	100	230	242,10	146,49	8100	0,053
12,50	100	340	325,36	214,26	400	0,043
12,50	150	310	302,36	58,33	100	0,025
12,50	200	290	279,36	113,16	900	0,037
12,50	250	260	256,36	13,23	3600	0,014
15,30	100	370	376,30	39,74	2500	0,017
15,30	150	350	353,30	10,92	900	0,009
15,30	200	320	330,30	106,17	0	0,032
15,30	250	300	307,30	53,35	400	0,024
15,30	300	280	284,30	18,52	1600	0,015
18,20	100	390	391,07	1,14	4900	0,003
18,20	150	370	368,07	3,74	2500	0,005
18,20	200	350	345,07	24,35	900	0,014

18,20	250	330	322,07	62,96	100	0,024
18,20	300	310	299,07	119,56	100	0,035

$$\bar{H} = 320, SS_{res} = 985,9, SS_{tot} = 27000, R^2 = 0,963; MPAE = 2,338$$

В таблицах 4.7 и 4.8 представлены результаты статического анализа. Откуда видно, что коэффициенты детерминации R^2 достигли 0,963 и 0,944, а средние абсолютные процентные ошибки составили 2,338% и 2,442% для формул (4.1) и (4.2) соответственно.

Таблица 4.8 - расчёт коэффициента детерминации (R^2) и средней абсолютной процентной ошибки ($MAPE$) по уравнению 4.2

Относительное набухание	Давление	Минимальная глубина замены	Глубина замены по формуле	квадрат погрешности	квадрат отклонения	Относительная погрешность
ε_{sw}	P	H_i	$\hat{H}_i$	$(H_i - \hat{H}_i)^2$	$(H_i - \bar{H})^2$	$\left \frac{H_i - \hat{H}_i}{H_i} \right $
%	кПа	См	См	См ²	См ²	-
9,80	100	130	127,58	5,84	1444	0,019
12,50	100	160,00	157,50	6,25	64	0,016
12,50	150	150,00	142,50	56,25	324	0,050
15,30	100	190,00	182,36	58,31	484	0,040
15,30	150	170,00	167,36	6,95	4	0,016
15,30	200	160,00	152,36	58,31	64	0,048
18,20	100	200,00	201,50	2,26	1024	0,008
18,20	150	190,00	186,50	12,22	484	0,018
18,20	200	170,00	171,50	2,26	4	0,009
18,20	250	160,00	156,50	12,22	64	0,022

$$\bar{H} = 168$$

$$SS_{res} = 220,8$$

$$SS_{tot} = 3960$$

$$R^2 = 0,944;$$

$$MPAE = 2,442$$

Проведённый статистический анализ эмпирических формул (4.1) и (4.2) позволил сделать следующие выводы:

- Полученные зависимости можно использовать в инженерных расчетах, так как они обладают достаточной точностью и адекватностью.
- Формулы просты в применении и могут быть легко использованы в решении инженерных задач.

Таким образом, разработанные эмпирические зависимости представляют собой эффективный инструмент для прогнозирования необходимой толщины слоя модифицированного грунта. Это, в свою очередь, позволяет повысить надежность и оптимизировать проектные решения при строительстве на набухающих грунтах в условиях Сирии.

4.3.3 Выводы по главе 4

В общей сложности было проведено 80 расчетных экспериментов в программном комплексе PLAXIS. Анализ полученных данных позволил сделать следующие выводы:

1. Вертикальные деформации исследуемых природных грунтов превышают установленные предельные значения.
2. Подъем грунта в результате набухания прямо пропорционален давлению набухания (P_{sw}) и относительному набуханию (ε_{sw}), и обратно пропорционален приложенному давлению (P). При высоких значениях приложенного давления может наблюдаться осадка грунта.
3. Необходимая толщина слоя замещения грунта прямо пропорциональна параметрам набухания (ε_{sw}) и (P_{sw}) и обратно пропорциональна внешней нагрузке (P), а также зависит от влажностного режима поверхности.

4. Разработан инженерный метод усиления набухающих глинистых грунтов оснований с использованием композитных добавок на основе полипропиленовых волокон и извести. Получены эмпирические зависимости для определения мощности слоя модифицированного грунта.

5. Доказано, что разработанные эмпирические зависимости являются эффективным инструментом для прогнозирования толщины слоя модифицированного грунта. Их использование позволяет повысить надежность и оптимизировать проектные решения при строительстве на набухающих грунтах в условиях Сирии.

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% происходят 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Нормативная литература:

1. ГОСТ 5180-2015 Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик.
2. ГОСТ 12071-2014 Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов.
3. ГОСТ 12248-2010 Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости (с Поправкой).
4. ГОСТ 12248.6-2020. Межгосударственный стандарт. Грунты. Метод определения набухания и усадки".
5. ГОСТ 22733-2016 Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности.
6. ГОСТ 25100-2020 Грунты. Классификация.
7. СП 22.13330.2016 Основания зданий и сооружений.
8. СП 449.1325800.2019 Инженерные изыскания для строительства в районах распространения набухающих грунтов. Общие требования.
9. Syrian Arab Code for the Design and Construction of Reinforced Concrete Structures. Appendix Five - Design and Construction of Foundations. الكود العربي السوري لتصميم وتنفيذ المنشآت بالخرسانة المسلحة. الملحق الخامس - تصميم وتنفيذ الأساسات. الطبعة الثالثة. دمشق - 2019 // 2019

Научно-техническая литература:

10. Абед А. Влияние давления набухания на несущую способность набухающих грунтов, Дис. ... магистра техн. наук, Университет Аль Баас, Хомс, Сирия. (на арабском языке). 2003.
11. Абелев М. Ю. Строительство промышленных и гражданских сооружений на слабых водонасыщенных грунтах / М. Ю. Абелев, Стройиздат, 248 с.
12. Абелев М. Ю., Абелев К. М. Геотехнические исследования площадок строительства, сложенных слабыми водонасыщенными глинистыми грунтами // Геотехника. 2010. (6). С. 30–34.
13. Аввад Л. 88 Влияние смесей полипропиленовых волокон с известью на геотехнические свойства набухающих грунтов в геологических условиях Сирии. // Инновации и инвестиции. 2025. № 5. С. 806–810.
14. Аксенова В. С. Влияние применения геосинтетических материалов при строительстве автомобильных дорог на безопасность дорожного движения // Молодой учёный. 2024. № 17 (516). С. 35–37.

15. Алафар Х. С. Обоснование методов защиты зданий и сооружений при освоении подземного пространства в Сирийской Арабской Республике в условиях набухающего грунтового-породного массива.
16. Альсусу М. Влияние начальной влажности на свойства набухающих грунтов, распространенных в северо-восточной части Сирии. Дисс. ... магистра техн. наук, Дамасский университет (Сирия), 2006. (на арабском языке). 2006.
17. Ахмед М. М. Воздействие нормальных сил набухания на рандбалку : диссертация ... кандидата технических наук : 05.23.02. — Ленинград, 1988. — 164 с. 1988.
18. Ашрам М. Н. Набухающие грунты как основания фундаментов зданий и сооружений в северо-восточных регионах Сирии: дис. ... канд. техн. наук. — 160 с 2000.
19. Васильев С. А., Васильев Н. П., Пола А. А. Современные материалы для усиления оснований сооружений и покрытий // Форум молодых ученых. 2017. № 12 (16). С. 236–241.
20. Габиров Ф. Г. Теория и практика улучшения свойств структурно-неустойчивых глинистых грунтов при решении геотехнических и инженерно-геоэкологических проблем // Баку:«Элм», 2014.—422 с. Gabibov FG Teoriya i praktika uluchsheniya svoystv strukturno-neustoychivyh glinistyh gruntov pri reshenii geotekhnicheskikh i inzhenerno-geoekologicheskikh problem/FG Gabibov.— Baku:«Elm», 2014.—422 s. 2014. С. 422.
21. Герсеванов Н. М. Основы динамики грунтовой массы — Н. М. Герсеванов | elima.ru / Н. М. Герсеванов, Госстройиздат, 1931. 242 с.
22. Голли О. Р. Использование закономерностей набухания глинистых грунтов в строительстве // Реконструкция городов и геотехническое строительство. 2004. (8). С. 131–141.
23. Гришина А. С. Анализ работы фиброармированного грунта в качестве обратной засыпки удерживающих конструкций 2023.
24. Гришина А. С., Пономарев А. Б. Анализ прогностических моделей определения прочности фиброгрунта на сдвиг // Construction and Geotechnics. 2017. № 3 (8). С. 106–112.
25. Далматов Б. И. Механика грунтов, основания и фундаменты (включая специальный курс инженерной геологии) / Б. И. Далматов, Ленинград: Стройиздат, Ленинградское отделение, 1988. 415 с.
26. Дашко Р. Э., Шидловская А. В. Физико-химическая природа набухания и осмотической усадки глинистых пород в основании сооружений по результатам экспериментальных исследований // Записки Горного института. 2013. (200). С. 193–200.
27. Зайцев А. В., Ниязова Ю. А. Анализ экспресс-методов определения набухания (на примере глинистых грунтов города Кемерово) Томск: Томский политехнический университет, 2024.С. 146–148.
28. Иванова М. В. Применение геосинтетических материалов при устройстве земляного полотна на слабых основаниях // Молодой учёный. 2024. № 17 (516). С. 45–48.

29. Кильдеева Т. И. [и др.]. ОСОБЕННОСТИ ИНВЕСТИЦИОННО-СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ В РАЙОНАХ СО СЛОЖНЫМИ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИМИ УСЛОВИЯМИ // Вестник Академии знаний. 2025. № 2 (67). С. 1035–1041.
30. Кондратьева Л. Н., Аввад Л. 89 Укрепление набухающих грунтов при строительстве фундаментов зданий и сооружений в геологических условиях Сирии. // Строительная механика и конструкции. 2025. № 3 (46). С. 119–130.
31. Кондратьева Л. Н., Аввад Л. 90 ВЛИЯНИЕ ДОБАВЛЕНИЯ ИЗВЕСТИ И ПОЛИПРОПИЛЕНОВЫХ ВОЛОКОН НА ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОСНОВАНИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ НАБУХАЮЩИХ ГРУНТОВ СИРИИ // Геотехника. № 4 (XVI). С. 58–74.
32. Коуса И. Д. Исследование влияния набухания грунтов основания на напряженно-деформированное состояние жестких и гибких одиночных висячих свай дис. канд. техн. наук: 05.23.02 1988.
33. Кульчицкий Л. И., Усъяров О. Г. физико - химические основы формирования свойств глинистых пород | Геологический портал GeoKniga / Л. И. Кульчицкий, О. Г. Усъяров, Москва: Недра, 1981. 178 с.
34. Луценко Е. В. Опасные ситуации природного характера и защита от них / Е. В. Луценко, Изд. 2-е-е изд., Красноярск: Электронная библиотечная среда Красноярского государственного педагогического университета им. В.П. Астафьева, 2015. 375 с.
35. Лучкин М. А. [и др.]. Расчет осадок зданий и сооружений на слабых глинистых грунтах с учетом деформаций сдвига во времени // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2007. № 2. С. 13–17.
36. Мангушев Р. А., Мальцева К. А. Сравнительный Анализ Способов Закрепления Слабых Грунтов В Основании Фундаментов Исторических Зданий Цементными Растворами Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2024.С. 146–147.
37. Мангушев Р. А., Осокин А. И., Усманов Р. А. Устройство и реконструкция оснований и фундаментов на слабых и структурно-неустойчивых грунтах / Р. А. Мангушев, А. И. Осокин, Р. А. Усманов, Издательство Лань, 2018. 460 с.
38. Маслов Н. Н. Основы механики грунтов и инженерной геологии / Н. Н. Маслов, Изд. 2, перераб. и доп-е изд., Москва: Высшая Школа, 1968. 631 с.
39. Махер Ш. О. Набухающие грунты и строительство на них (в условиях Сирийской Арабской Республики) дис. канд. техн. наук: 05.23.02 2002.
40. Махмудова Д. А. Повышение устойчивости земляных полотен к циклическим нагрузкам с помощью инновационных геотехнических решений // Universum: технические науки. 2024. № 6 (123) (2). С. 60–62.
41. Машенко А. В., Пономарев А. Б. Анализ Влияния Армирования Фиброволокном На Свойства Глинистых Грунтов В Условиях Сезонного Промерзания И Оттаивания // Вестник Волгоградского Государственного Архитектурно-Строительного Университета. Серия: Строительство И Архитектура. 2016. № 1 (44-(63)). С. 40–50.

42. Мустафаев А. А. Фундаменты на просадочных и набухающих грунтах: [учеб. пособие для строит. специальностей вузов] / А. А. Мустафаев / А. А. Мустафаев, Москва: Высшая школа, 1989. 590 с.
43. Мустафаев А. А., Габибов Ф. Г., Ерганджиев А. П. Расчет балочных фундаментов на набухающих грунтах // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1985. (1). С. 8–10.
44. Науменко А. И. Использование фиброволокна для укрепления дорожных грунтов 2018. С. 20–24.
45. Осипов В. И., Соколов В. Н. Глины и их свойства. Состав, строение и формирование свойств - Монография / В. И. Осипов, В. Н. Соколов, Москва: ГЕОС, 2013. 576 с.
46. Осипов В. И., Соколов В. Н., Румянцева Н. А. Микроструктуры глинистых пород | Геологический портал GeoKniga / В. И. Осипов, В. Н. Соколов, Н. А. Румянцева, Москва: Недра, 1989. 211 с.
47. Осокин А. И. Конструктивные и технологические решения устройства подземных сооружений на слабых грунтах в условиях плотной городской застройки // Геотехника. 2023. № 4 (15). С. 32–43.
48. Парамонов В. Н. Факторы риска при устройстве подземных сооружений в сложных инженерно-геологических условиях // Жилищное Строительство. 2009. № 2. С. 35–37.
49. Передельский Л. В., Ананьев В. П. Набухающие глинистые грунты Северного Кавказа / Л. В. Передельский, В. П. Ананьев, Ростов-наДону: Изд-во Рост. ун-та, 1987. 144 с.
50. Салим Б. Исследование поведения глинистых грунтов в южном регионе Сирии Дисс. магистра техн.наук (на арабском языке) 2003.
51. Салим Б., Аль-Мансури А. Исследование характеристик набухающих грунтов в провинции Дерья (Сирия). (на арабском языке). // Вестник Дамасского университета. 2003. № 2 (9). С. 11–27.
52. Сергеев Е. М. Грунтоведение / Е. М. Сергеев, Москва: МГУ, 2008. 398 с.
53. Сирадж О. Фундаменты в сложных грунтовых условиях (на арабском языке) / О. Сирадж, Дамаск Сирия: Дом знаний, 1992.
54. Снежкин Б. А., Лапицкий С. А. Оценка свойств набухающих глинистых грунтов: монография Снежкин Б. А., Лапицкий С. А. читать онлайн и в мобильном приложении ЭБС Университетская Библиотека Онлайн. / Б. А. Снежкин, С. А. Лапицкий, Москва, Берлин:, 2021. 416 с.
55. Сорочан Е. А. Строительство сооружений на набухающих грунтах / Е. А. Сорочан, Москва: Стройиздат, 1989. 312 с.
56. Сорочан Е. А., Ким М. С. Давление набухающего грунта на подпорные стенки // Основания, Фундаменты И Механика Грунтов. 1988. № 3. С. 9–11.
57. Сорочан Е. А., Ким М. С. Воздействие набухающего грунта на смещающуюся подпорную стенку // Основания, Фундаменты И Механика Грунтов. 1995. № 5. С. 14–17.

58. Стефанов Р. И. Практическое значение глинистых грунтов для инженерно-геологической оценки и анализ процессов их набухания // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). 2023. (4). С. 195–205.
59. Татьянников Д. А., Пономарев А. Б., Клевеко В. И. Исследования механических характеристик геосинтетических материалов для разработки методики расчета несущей способности армированных фундаментных подушек // Академический вестник уралниипроект РААСН. 2015. (1). С. 84–89.
60. Тер-Мартirosян Завен З. Г., Тер-Мартirosян Армен А. З. Взаимодействие Фундамента И Сваи С Набухающим Грунтом // Основания, Фундаменты И Механика Грунтов. 2018. № 5. С. 2–7.
61. Торопова Ю. А. Анализ Существующих Исследований Армирования Грунта Полимерным Фиброволокном Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова, 2023.С. 302–308.
62. Фадеев А. Б. Метод конечных элементов в геомеханике / А. Б. Фадеев, Москва: Недра, 1987. 220 с.
63. Храменков М. Г. [и др.]. Микроструктурные преобразования набухающих глинистых минералов // Георесурсы. 2023. № 1 (25). С. 108–118.
64. Цытович Н. А. Механика грунтов. Краткий курс / Н. А. Цытович, Изд. 4-е перераб. и доп.-е изд., Москва: Высшая Школа, 1983. 288 с.
65. Цытович Н. А., Тер-Мартirosян З. Г. Основы прикладной геомеханики в строительстве. / Н. А. Цытович, З. Г. Тер-Мартirosян, Москва: Высшая Школа, 1981. 317 с.
66. Черепенин П. Д., Чижов А. А. Геосинтетические материалы в дорожном строительстве // Материалы XX Всероссийской (национальной) научно-технической конференции студентов и аспирантов. 2024. С. 980–985.
67. Ширанов А. М., Невзоров А. Л. Повышение устойчивости песчаной подушки за счет преднапряжения армирующих слоев геосинтетика // Construction and Geotechnics. 2020. № 1 (11). С. 30–40.
68. Abboud N., Machlah M., Daod R. Changes in the mechanical properties of expansive soils under the effect of full wetting-partial drying cycles. تغيرات الخواص الميكانيكية للتربة الانتفاخية تحت تأثير دورات الترطيب التام –التجفيف الجزئي // Damascus University Journal for Engineering Sciences. 2022. № 5 (38).
69. Abdelkader H. A. M. [и др.]. An Experimental Study on Geotechnical Properties and Micro-Structure of Expansive Soil Stabilized with Waste Granite Dust // Sustainability. 2022. № 10 (14). С. 6218.
70. Abdulla A. Status of soil information and soil management in Syria Amman: fao.org, Food and Agriculture Organization, 2012.С. 33.
71. Abed A. Numerical Modeling of Expansive Soil Behavior 2008.
72. Ahmed A. Evaluation of Drying and Wetting Cycles with Soil Cushion to Mitigate the Potential of Expansive Soil in Upper Egypt // Electronic Journal of Geotechnical Engineering. 2009. (14). С. 1–11.

73. Al-Abdullah A. S. The Effect of Adding Calcium Chloride on The Behavior of Clayey Soils. تأثير إضافة كلور الكالسيوم على سلوك التربة الغضارية // Association of Arab Universities Journal of Engineering Sciences. 2016. № 2 (23). C. 49–63.
74. Al-Gharbawi A. S. A., Najemalden A. M., Fattah M. Y. Expansive Soil Stabilization with Lime, Cement, and Silica Fume // Applied Sciences. 2023. № 1 (13). C. 436.
75. Alkiki I. M., Karabash Z., Aldaood A. Effect of lime treatment on swelling and some geotechnical properties of an expansive soil from mosul city // Journal of Engineering Science and Technology. 2023. № 1 (18). C. 167–186.
76. Almajed A., Dafalla M., Shaker A. A. The Combined Effect of Calcium Chloride and Cement on Expansive Soil Materials // Appl. Sci. 2023. (13). C. 4811.
77. Al-Mukhtar M., Khattab S., Alcover J.-F. Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil // Engineering Geology. 2012. (139–140). C. 17–27.
78. Al-Mukhtar M., Lasledj A., Alcover J.-F. Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 20 °C // Applied Clay Science. 2010. № 2 (50). C. 191–198.
79. Al-Rawas A. A., Hago A. W., Al-Sarmi H. Effect of lime, cement and Sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from Oman // Building and Environment. 2005. № 5 (40). C. 681–687.
80. Alshimaa F., Mahmoud A., Mustafa F. Effect of Granite Powder and Polypropylene Fiber on Geotechnical Properties of Expansive Soil // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). 2023. № 05 (10). C. 18–26.
81. AL-Soudany K. Improvement of expansive soil by using silica fume // Kufa Journal of Engineering. 2018. № 1 (9). C. 222–239.
82. Al-Taie A. [и др.]. Swell-shrink Cycles of Lime Stabilized Expansive Subgrade // Procedia Engineering. 2016. (143). C. 615–622.
83. Anggraini M., Setiawan D., Saleh A. Chemical stabilization techniques for clay soil: A compre... // Journal of the Mechanical Behavior of Materials. 2025. № 1 (34). C. 20250056.
84. Aqel R. [и др.]. Piping Stabilization of Clay Soil Using Lime // Geosciences. 2024. № 5 (14). C. 122.
85. Arias-Jaramillo Y. P. [и др.]. Evaluation of the Effect of Binary Fly Ash-Lime Mixture on the Bearing Capacity of Natural Soils: A Comparison with Two Conventional Stabilizers Lime and Portland Cement // Materials. 2023. № 11 (16). C. 3996.
86. Attom M. F., Al-Akhras N. M., Malkawi A. I. Effect of fibres on the mechanical properties of clayey soil // Proc Inst Civ Eng Geotech Eng. 2009. № 5 (162). C. 277–282.
87. Awwad L. 91 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. C. 758–763.

88. Baglari D., Dash S. Improvement of expansive soil by lime and reinforcement roorkee Roorkee, India:, 2013.C. 1–6.
89. Baloochi H., Aponte D., Barra M. Soil Stabilization Using Waste Paper Fly Ash: Precautions for Its Correct Use // *Applied Sciences*. 2020. № 23 (10). C. 8750.
90. Barbosa V. H. R., Marques M. E. S., Guimarães A. C. R. Predicting Soil Swelling Potential Using Soil Classification Properties | *Geotechnical and Geological Engineering* | Springer Nature Link // *Geotech Geol Eng*. 2023. (41). C. 4445–4457.
91. Basma A. A., Tuncer E. R. Effect of Lime on Volume Change and Compressibility of Expansive Clays // *Transportation Research Record*. 1991. (1296). C. 52–61.
92. Belabbaci Z. [и др.]. Stabilization of Expansive Soils with Milk of Lime: the Case of Clays of Tlemcen, Algeria // *Electron. J. Geotech*. 2012. (17). C. 1293–1304.
93. Bell F. G. Lime stabilization of clay minerals and soils // *Engineering Geology*. 1996. № 4 (42). C. 223–237.
94. Benyahia S. [и др.]. Swelling properties and lime stabilization of N’Gaous expansive marls, NE Algeria // *Journal of African Earth Sciences*. 2020. (170). C. 103895.
95. Bowles. J. E. *Foundation Analysis and Design* / J. E. Bowles., 3ed-е изд., New York, NY, USA: McGraw-Hills Inc, 1988. 829 с.
96. Buhler R. L., Cerato A. B. Stabilization of Oklahoma Expansive Soils using Lime and Class C Fly Ash USA: American Society of Civil Engineers, 2012.C. 1–10.
97. Cai Y. [и др.]. Effect of polypropylene fibre and lime admixture on engineering properties of clayey soil // *Engineering Geology*. 2006. № 3 (87). C. 230–240.
98. Chabrat N. [и др.]. Long-term characteristics of a stabilized expansive clay exposed to environmental-driven processes // *Transportation Geotechnics*. 2024. (46). C. 101257.
99. Chen F. H. *Foundations on expansive soils* / F. H. Chen, Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Scientific Pub. Co., 1988. 464 с.
100. Daneshfar R., Moghadasi J. Clay Swelling: A Critical Review of 50 Years of Research 2017.C. 16.
101. Day R. W. *Foundation Engineering Handbook Design and construction with the 2009 International Building Code* / R. W. Day, 2/E (ebook)-е изд., New York: McGraw Hill, 2010.
102. Di Sante M. [и др.]. The Combined Use of Fly Ash and Lime to Stabilize a Clayey Soil: A Sustainable and Promising Approach // *Geosciences*. 2025. № 9 (15). C. 346.
103. Donalson G. W. The occurrence of problems of heave and factors affecting its nature Texas, TX, USA:, 1969.C. 25–36.
104. Elh A., Ismaiel H. Treatment of Expansive Subgrade By Lime Addition // *Journal of Engineering Sciences*. 2019. № 5 (41). C. 1778–1795.

105. Fityus S. G., Smith D. W., Allman M. A. Expansive soil test site near newcastle // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2004. № 7 (130). C. 686–695.
106. Ghobadi M. H., Abdilor Y., Babazadeh R. Stabilization of clay soils using lime and effect of pH variations on shear strength parameters // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2014. № 2 (73). C. 611–619.
107. Gromko G. J. Review of Expansive Soils // Journal of the Geotechnical Engineering Division. 1974. № 6 (100). C. 667–687.
108. Hassan W. [и др.]. Experimental investigation of mechanical behavior of geosynthetics in different soil plasticity indexes // Transportation Geotechnics. 2023. (39). C. 100935.
109. Holtz W. G., Gibbs H. J. “Engineering Properties of Expansive Soils,” Transactions of ASCE, Vol. 121, 1956, pp. 641-679. - References - Scientific Research Publishing // Transactions of American Society of Civil Engineers. 1956. (121). C. 641–679.
110. Hossain M., Malo R. Improvement of Geotechnical Properties of Expansive Soil by Lime and Polypropylene Fiber Material // Journal of Geotechnical Studies, Volume. 2021. № 2 (6). C. 6–13.
111. Hussein S. A., Ali H. A. A.-R. Stabilization of Expansive Soils Using Polypropylene Fiber // Civil Engineering Journal. 2019. № 3 (5). C. 624–635.
112. Jahandari S. [и др.]. Experimental study of the effects of curing time on geotechnical properties of stabilized clay with lime and geogrid // International Journal of Geotechnical Engineering. 2019. № 2 (13). C. 172–183.
113. Jeyapa J. K., Rice G., Lytton R. L. State-Of-The-Art Review of Expansive Soil Treatment Methods / J. K. Jeyapa, G. Rice, R. L. Lytton, USA: Texas A & M University: College Station, TX, 1981.
114. Jones G. An empirical preliminary prediction of heave // Journal of the South African Institution of Civil Engineering. 2017. № 4 (59). C. 64–66.
115. Jones L., Jefferson I. Expansive Soils London, UK:, 2012.C. 413–441.
116. Jumadilova S. Zh. [и др.]. The use of geosynthetic materials to increase the bearing capacity of soil cushions // Nanotechnologies in Construction A Scientific Internet-Journal. 2024. № 4 (16). C. 342–354.
117. Kassim K., Chern K. Lime stabilized Malaysian cohesive soils // Jurnal Kejuruteraan Awam. 2004. № 1 (16). C. 13e23.
118. Khan A. J. Effect of sand layer on swelling of underlying expansive soil. MSc Thesis 1995.
119. Kumar A., Walia B. S., Bajaj A. Influence of Fly Ash, Lime, and Polyester Fibers on Compaction and Strength Properties of Expansive Soil | Journal of Materials in Civil Engineering | Vol 19, No 3 // Journal of Materials in Civil Engineering. 2007. № 3 (19). C. 242–248.
120. Kumar S., Dutta R. K. Unconfined Compressive Strength of Bentonite-Lime-Phosphogypsum Mixture Reinforced with Sisal Fibers // Jordan Journal of Civil Engineering. 2014. (8). C. 239–250.

121. Le T. M., Dang L. C., Khabbaz H. Strength Characteristics of Lime and Bottom Ash Reinforced Expansive Soils Philadelphia, PL, USA: American Society of Civil Engineers, 2019. C. 352–362.
122. Leite R. [и др.]. Lime stabilization of expansive soil from Sergipe - Brazil // E3S Web of Conferences. 2016. (9). C. 14005.
123. Lucian C. Geotechnical Aspects of Buildings on Expansive Soils in Kibaha, Tanzania 2008.
124. Mahedi M., Cetin B., White D. J. Cement, Lime, and Fly Ashes in Stabilizing Expansive Soils: Performance Evaluation and Comparison // Journal of Materials in Civil Engineering. 2020. № 7 (32). C. 04020177.
125. Majid A. E., Baba K., Razzouk Y. Assessing the impact of plant fibers on swelling parameters of two varieties of expansive soil // Case Studies in Chemical and Environmental Engineering. 2023. (8). C. 100408.
126. Mateos M. Stabilization of soils with fly ash alone // Iowa State University Soil Research Laboratory Contribution. 1964. C. 59–65.
127. Mearek S. M., Shadhar A. K., Abbood H. H. Relation Between Swelling Pressure and Potential Expansion Soil with Atterberg Limits // Wasit Journal of Engineering Sciences. 2022. № 2 (10). C. 12–19.
128. Mei T. [и др.]. A novel expansive soil hardener: performance and mechanism of immersion stability // RSC Advances. 2022. № 47 (12). C. 30817–30828.
129. Melhem D. M. The effect of calcite additives on clay for ceramic tile manufactory // Proceedings of the Qualicer. 2014. C. 18.
130. Moayed R., Haratian M., Izadi E. Improvement of Volume Change Characteristics of Saline Clayey Soils // Journal of Applied Sciences. 2010. № 1 (11). C. 76–85.
131. Mozumder. R. S., Bhumik M. C., Sheikh P. Influence of bamboo fiber reinforcement on the mechanical behavior of soft soil | Discover Civil Engineering | Springer Nature Link // Discover Civil Engineering. 2025. № 2 (181). C. 20.
132. Murty V. R., Praveen G. V. Use of Chemically Stabilized Soil as Cushion Material below Light Weight Structures Founded on Expansive Soils // Journal of Materials in Civil Engineering. 2008. № 5 (20). C. 392–400.
133. Nayem N. H. Stabilization of Expansive Soil by Improving the Engineering Properties Using Lime and Fly Ash // International Journal of Engineering Management. 2023. № 2 (7). C. 27–34.
134. Nelson J. D., Miller D. J. Expansive soils—problems and practice in foundation and pavement engineering / J. D. Nelson, D. J. Miller, New York: Department of Civil Engineering, Colorado State University, 1992. 259 c.
135. Noorzad R., Mirmoradi S. H. Laboratory evaluation of the behavior of a geotextile reinforced clay // Geotextiles and Geomembranes. 2010. № 4 (28). C. 386–392.
136. Nowamooz H., Jahangir E., Masrouri F. Volume change behaviour of a swelling soil compacted at different initial states // Engineering Geology. 2013. (153). C. 25–34.

137. Obda O. [и др.]. Remote Sensing and Mineralogical Characterization of Expansive Soil Slopes in Northern Morocco: A Case Study Using PS-InSAR // *Geotechnical and Geological Engineering*. 2025. № 7 (43). С. 371.
138. O'Neill M. W., Poormoayed N. Methodology for Foundations on Expansive Clays // *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. 1980. № 12 (106). С. 1345–1367.
139. O'Neill M. W., Poormoayed N. Methodology for Foundations on Expansive Clays // *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. № 5 (107). С. 1345–1367.
140. Peck R. B., Hanson W. E., Thornburn T. H. *Foundation Engineering* / R. B. Peck, W. E. Hanson, T. H. Thornburn, New York, NY, USA: Wiley, 1974. 530 с.
141. Pratikso A. R. Stabilization of Expansive Soil with Lime, Fly Ash and Cement // *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*. 2023. № 4s (11). С. 491–497.
142. Prusinski J. R., Bhattacharja S. Effectiveness of portland cement and lime in stabilizing clay soils 1999 1999.
143. Punthutaecha K. [и др.]. Volume Change Behaviors of Expansive Soils Stabilized with Recycled Ashes and Fibers // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2006. № 2 (18). С. 295–306.
144. Puppala A. J., Musenda C. Effects of Fiber Reinforcement on Strength and Volume Change in Expansive Soils // *Transportation Research Record*. 2000. № 1 (1736). С. 134–140.
145. Ravi. E., Arun Murugan R. B., Stalin V. K. Performance of geosynthetics in swell-shrink behavior of expansive soils | Request PDF Bangkok, Thailand:, 2012.C. 691–698.
146. Sabri M. M. [и др.]. Stabilization of expansive soil with lime and brick dust | *Magazine of Civil Engineering* // *Magazine of Civil Engineering*. 2023. № 8 (124). С. 12401.
147. Sadeghian R., Maleki M., Kazempour A. Laboratory investigation of the swelling pressure of bentonite with quicklime and hydrated lime using ASTM-4546-96 and constant volume methods // *Scientific Reports*. 2024. № 1 (14). С. 21223.
148. Sakr M. A., Shahin M. A., Metwally Y. M. Utilization of Lime for Stabilizing Soft Clay Soil of High Organic Content // *Geotechnical and Geological Engineering*. 2009. № 1 (27). С. 105–113.
149. Salih S. R., Shafiqu Q. S. M. Effect of Treating Expansive Soil with Lime // *Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences*. 2024. № 2 (27). С. 226–233.
150. Santos M. L. de J., Casagrande M. D. T. Improvement of Unpaved Roads Using the Soil Reinforcement Technique with Natural Açaí and Coconut Fibers // *Revista de Gestão Social e Ambiental - RGSA*. 2025. № 7 (19). С. e012890–e012890.
151. Seco A. [и др.]. Stabilization of expansive soils for use in construction // *Applied Clay Science*. 2011. № 3 (51). С. 348–352.
152. Sellaf H., Benamar B., Hadj Mostefa A. Exploring the Influence of Plastic Powder Incorporation on Geotechnical Properties of Expansive Soil Stabilized with Granite Powder for Building Applications // *International Journal of Engineering Research in Africa*. 2024. (68). С. 85–97.

153. Selvamsagayaradja M., Murugaiyan V., Sundarajan T. Investigation on Expansive Soil Problems Associated with Damages in Low Rise Buildings along South East Coast of India: A Geotechnical Mapping Approach // *Techniques and Innovation in Engineering Research* Vol. 7. 2023. (7). C. 106–129.
154. Sharma H. The Effect of Geosynthetic Content on Soil Behaviour // *International Journal of Scientific Research in Science and Technology*. 2019. C. 304–307.
155. Simons K. B. Limitations of Residential Structures on Expansive Soils // *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 1991. № 4 (5). C. 258–270.
156. Sivakumar D., Rathish V. R., Das S. Properties Change in Cohesive Soil using Lime and Fly Ash // *Automation and Autonomous System*. 2012. № 9 (4). C. 430–433.
157. Soğancı A. S. The Effect of Polypropylene Fiber in the Stabilization of Expansive Soils // *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering*. 2015. № 8 (9). C. 994–997.
158. Sridevi P. Stabilization of Expansive Soils Using Flyash // *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. 2024. № 3 (12). C. 2364–2368.
159. Sun Z. [и др.]. A Study of the Bond Strength and Mechanism between Basalt Fibers and Asphalt Binders // *Applied Sciences*. 2024. № 6 (14). C. 2471.
160. Swaidani A. al-, Hammoud I., Meziab A. Effect of adding natural pozzolana on geotechnical properties of lime-stabilized clayey soil // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2016. № 5 (8). C. 714–725.
161. Tang C. [и др.]. Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil // *Geotextiles and Geomembranes*. 2007. № 3 (25). C. 194–202.
162. Thyagaraj T. [и др.]. Laboratory Studies on Stabilization of an Expansive Soil by Lime Precipitation Technique // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2012. № 8 (24). C. 1067–1075.
163. Tiwari N., Satyam N. An experimental study on strength improvement of expansive subgrades by polypropylene fibers and geogrid reinforcement // *Scientific Reports*. 2022. № 1 (12). C. 6685.
164. Twinkle S., Student M. T. Effect of polypropylene fibre and lime admixture on engineering properties of expansive soil 2011 2011. № 2 (6). C. 6–13.
165. Van der Merwe D. H. The Prediction of Heave from the Plasticity Index and the Percentage Clay Fraction of Soils. // *The South African Institution of Civil Engineering*. 1964. № 6 (6). C. 103–107.
166. Viswanadham B. V. S., Phanikumar B. R., Mukherjee R. V. Swelling behaviour of a geofiber-reinforced expansive soil // *Geotextiles and Geomembranes*. 2009. № 1 (27). C. 73–76.
167. Waseem U. Stabilization of subgrade soils using cement and lime: a case study of kala shah kaku, lahore, pakistan // *Pakistan Journal of Science*. 2014. № 1 (66). C. 39–44.
168. Yazici M. F., Keskin S. N. Enhancing Mechanical Properties of Low Plasticity Clay Soil Using Hemp Fibers: Effects of Fiber Content and Fiber Surface Coating // *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. 2024. № 2 (48). C. 961–975.

169. Zamin B. [и др.]. Field-Obtained Soil-Water Characteristic Curves of KPK Expansive Soil and Their Prediction Correlations // ResearchGate. 2020. С. 1–13.
170. Zhao J. [и др.]. Analysis of Mechanical Properties of Fiber-Reinforced Soil Cement Based on Kaolin // Materials. 2024. № 9 (17). С. 2153.
171. Zhuang X., Li T., Yang D. Dynamic properties and microstructural mechanisms of cement-stabilized soils improved with industrial by-product silica fume // Journal of Engineering and Applied Science. 2025. № 1 (72). С. 202.
172. Zumrawi M., Abdelmarouf A., Gameil A. Damages of Buildings on Expansive Soils: Diagnosis and Avoidance // International Journal of Multidisciplinary and Scientific Emerging Research. 2017. (6). С. 108–116.
173. Zumrawi M. M., Hamza O. S. Improving the Characteristics of Expansive Subgrade Soils Using Lime and Fly Ash // International Journal of Science and Research. 2014. № 12 (3). С. 1124–1129.
174. The General establishment of geology and mineral resources in Syria (GEGMR). Official document No. 3207/T/9. – 2007 (in Arabic). Damascus, 2007.
175. The General establishment of geology and mineral resources in Syria (GEGMR). A Guide for mineral resources in Syria. – 2011 (in Arabic). Damascus, 2011.

ПРИЛОЖЕНИЕ

АКТ О ВНЕДРЕНИИ

General Company
For Engineering Studies
And Consulting



الشركة العامة
للدراسات الهندسية

الرقم : ٥٢١٠٤/٢٠٠٤

التاريخ : ١٠/٢٨/٢٠٠٤

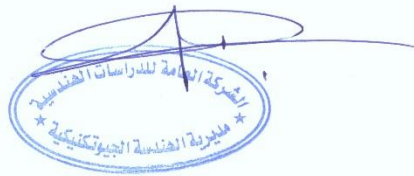
وثيقة

عن تطبيق نتائج بحث أطروحة
لانا عواد

"تأثير إضافات ألياف البولي بروبيلين والكلس على خصائص التربة الانتفاخية لأساسات المباني والمنشآت في الجمهورية العربية السورية"

نؤكد هنا أن نتائج بحث أطروحة لانا عواد حول موضوع "تأثير إضافات ألياف البولي بروبيلين والكلس على خصائص التربة الانتفاخية لأساسات المباني والمنشآت في الجمهورية العربية السورية" يستفاد منه في شركتنا في التصميم الهندسي والدراسات التنفيذية الهندسية لتربة وأساسات المباني والمنشآت التي يتم تنفيذها على الترب الانتفاخية في الظروف الجيولوجية الهندسية الإقليمية للجمهورية العربية السورية. إن طريقة تحسين التربة التي تم تطويرها في إطار هذه الأطروحة لتطبيق إضافات ألياف البولي بروبيلين مع الكلس لتحسين خصائص التربة الغضارية الانتفاخية هي ذات أهمية عملية وهي ملائمة للترب المحلية الانتفاخية. وقد تمت الاستفادة منها في شركتنا في التصميم الهندسي للمنشآت في مناطق التربة الانتفاخية في سوريا. (على وجه الخصوص ، تم الاستفادة من نتائج الدراسة في التصميم). حيث أخذت بعين الاعتبار خصائص التربة المحسنة وفقا للطريقة التي تم تطويرها في هذه الرسالة وقد أدى ذلك إلى تأثير اقتصادي إيجابي ملحوظ في نتائج التصميم الجيوتكنيكي.

المدير العام
د.م طارق حسام الدين
بالتفويض
مدير الهندسة الجيوتكنيكية والمساحة
م. باسم زينو



Dummar -

Tel: 3124571-3118577-

Fax:3117262-3113212- P.O.Box

دمشق - ضاحية دمر

Damascus

هاتف: 3124571 - 3118577 - 3121979

3121979

فاكس: 3117262 - 3113212 - ص.ب: 2350

2350

Перевод с арабского и английского языков на русский язык

Генеральная компания по инженерному проектированию и консалтингу

№: 104\СД

Дата: 28.10.2024

Акт

о внедрении результатов диссертационного исследования

Аввад Лана

на тему влияния добавок полипропиленовых волокон и извести на свойства
набухающих грунтов оснований зданий и сооружений Сирийской Арабской
Республики

Настоящим подтверждаем, что результаты диссертационного исследования Аввад Лана на тему влияния добавок полипропиленовых волокон и извести на свойства набухающих грунтов оснований зданий и сооружений Сирийской Арабской Республики используются в нашей компании при разработке проектной и конструкторской документации основания зданий и сооружений, сложенных набухающими глинистыми грунтами, в региональных инженерно-геологических условиях Сирийской Арабской Республики.

Разработанный в рамках данной диссертации метод применения добавок смесей полипропиленовых волокон с известью для улучшения строительных свойств набухающего глинистого грунта, обладает актуальностью, подходит для местных набухающих грунтов, представляет практический интерес и был использован при разработке проектной и конструкторской документации объектов в районах распространения набухающих грунтов в Сирии. (В частности, результаты исследования использовались при проектировании оснований зданий и сооружений) с учётом улучшенных свойств грунтов по разработанной в данной диссертации методике. Это привело к получению существенного положительного экономического эффекта при геотехническом проектировании.

Генеральный Директор

Др. инженер Тарек Хусам Альдин

По поручению

Директор департамента геотехнического проектирования и изыскания

Бассем Зенон /подпись/

Штамп: Генеральная компания по инженерному проектированию и консалтингу

Дамаск, Думмар

Тел.: 3124571–3118577 – 3121979 - 3121979

Факс: 3117262–3113212

Почтовый ящик: 2350

-----Конец перевода документа-----

Я, переводчик Абдул Рахман Али, владеющий русским, английским и арабским языками, подтверждаю, что выполненный мною перевод приложенного документа является правильным, точным и полным.

Переводчик Абдул Рахман Али

Санкт-

Петербург.

Абдул Рахман Али

[Signature]

*В соответствии со ст. 81 Основ законодательства Российской Федерации о нотариате
нотариус свидетельствует только подлинность подписи переводчика, выполнившего настоящий
перевод, и не удостоверяет содержание представленного документа.*

Российская Федерация
Санкт-Петербург

Двадцать третьего марта две тысячи двадцать шестого года

Я, Воробьева Ольга Владимировна, временно исполняющая обязанности нотариуса
нотариального округа Санкт-Петербург Ульяновой Елены Сергеевны, свидетельствую
подлинность подписи переводчика Абдул Рахман Али.

Подпись сделана в моем присутствии.

Личность подписавшего документ установлена.

Зарегистрировано в реестре: № 78/266-н/78-2026-3-570.

Уплачено за совершение нотариального действия: 800 руб.



[Signature]

О.В. Воробьева



ИТОГО В НАСТОЯЩЕМ ДОКУМЕНТЕ
3 (ТРИ) ЛИСТА
ВРИО НОТАРИУСА

A handwritten signature in blue ink, written in a cursive style, is located below the text "ВРИО НОТАРИУСА".