

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Пензев Антон Петрович

**Влияние геологических факторов на эффективность упрочнения
песчаных грунтов растворами алифатических эпоксидных смол**

1.6.7. Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2025

Диссертация подготовлена на кафедре инженерной и экологической геологии
геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

- Научный руководитель** – **Самарин Евгений Николаевич**, доктор геолого-минералогических наук, доцент
- Официальные оппоненты** – **Добров Эдуард Михайлович**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», кафедра аэропортов, инженерной геологии и геотехники, профессор
- Экзарьян Владимир Нишанович**, доктор геолого-минералогических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе», экологический факультет, кафедра экологии и природопользования, заведующий кафедрой
- Еремина Ольга Николаевна**, кандидат геолого-минералогических наук, ФГБУН «Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук», лаборатория грунтоведения и механики грунтов, ведущий научный сотрудник

Защита диссертации состоится 19 декабря 2025 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета МГУ.016.1 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119234, Москва, Ленинские горы, д. 1, Главное здание МГУ, корпус «А», геологический факультет, аудитория 415.

E-mail: mgu.04.01@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3614>

Автореферат разослан 14 ноября 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор геолого-минералогических наук, доцент

Н.А. Харитонова

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Песчаные грунты широко распространены в природе и часто используются в строительстве, однако, их применение в качестве оснований сопряжено с рядом негативных свойств, среди которых, как правило, выделяют высокую проницаемость, разжижаемость, суффозионные деформации и способность к внутреннему размыву. Одним из наиболее эффективных методов улучшения свойств песчаных грунтов является глубинное инъекционное закрепление, однако, его применение сталкивается с рядом ограничений. Метод пропитки, широко используемый для закрепления грунтов, оказывается малоэффективным в массивах с низкими коэффициентами фильтрации ($K_f \leq 2-5 \text{ м/сут}$). В таких условиях инъекция может привести к нарушению сплошности грунтового массива, что делает необходимым разработку новых рецептур и технологий обработки.

Исследования эффективности использования вяжущих материалов, как правило, проводятся в лабораторных условиях с применением инъекционных или фильтрационных колонн. Такие методы имеют существенные ограничения, так как не позволяют в полной мере оценить изменение свойств модифицированных грунтов в пространстве. Также выраженным сдерживающим фактором в развитии инъекционной обработки грунтов выступает ограниченность современных общепринятых лабораторных методов. Зачастую при работе с уникальными объектами инженерной деятельности создаются и отдельные методики проведения испытаний без попыток их дальнейшей унификации. Более того, из последней редакции нормативного документа СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений» было исключено требование об обязательной апробации выбранной методики закрепления на экспериментальной площадке.

В этой связи особый интерес представляет комплексное изучение инъекционного закрепления грунтов методом пропитки в лабораторных и полевых условиях. Несмотря на ограниченный опыт применения этого метода в практике технической мелиорации, особенно в России, комплексный подход в оценке эффективности использования вяжущих материалов с учетом геологических факторов позволяет получить объективный прогноз распространения рабочего раствора в массиве и дополнить результаты лабораторных исследований.

Степень разработанности темы исследования. Исследования в области технической мелиорации грунтов, которые заложили основы современных методов закрепления и улучшения свойств грунтов, принадлежат ряду выдающихся ученых и инженеров: Абрамова Т.Т., Адамович А.Н., Айлер Р.К., Аскalonov B.B., Банник Г.И., Безрук В.М., Бражник И.А., Воронкович С.Д., Герсанов Н.М., Гольдштейн М.Н., Гончарова Л.В., Евдокимова Л.А., Еремина О.Н., Ибрагимов М.Н., Жинкин Г.Н., Крутов В.И., Камбефор А., Ларионова Н.А., Максимович Н.Г., Морозов С.С., Морозов С.А., Никитин А.В.,

Огородникова Е.Н., Осипов В.И., Пендин В.В., Платонов А.П., Першин М.Н., Ржаницын Б.А., Розанов Н.П., Румянцев А.А., Самарин Е.Н., Сергеев Е.М., Сергеев В.И., Соколов Н.Н., Соколовский А.Н., Соколович В.Е., Толстопятов Б.В., Филатов М.М., Черкашин А.А., Швецов В.Н., Шимко Т.Г., Шишкун А.Г., Ciardi G., Conlee C.T., Durmusoglu E., Finsterle S., Gallagher P.M., Hamderi M., Karol R.H., Koch A.J., Mitchell J.K., Noll M.R., Rollins K.M. и др. Вопросами методологии технической мелиорации и ее связи с другими науками занимались такие ученые, как Камбефор А., Воронкович С.Д., Королев В.А., Трофимов В.Т. и др.

В развитие методологии глубинной обработки грунтов цементами значительный вклад внесли: М.Н. Ибрагимов, В.В. Семкин, А.В. Черняков, а также зарубежные специалисты: D. Bruce, J. Warner, K. Weaver, K. Kirsch, A. Bell, J. Kerisel, C. Gesner и G. Mayer и др. Их работы охватывают как теоретические аспекты процессов цементации, так и практические методы применения цементных суспензий для закрепления грунтов в различных инженерно-геологических условиях.

Вопросы смолизации грунтов нашли отражение в трудах таких исследователей как Згадзай Л.К., Е.Н. Огородникова, С.Д. Воронкович, Н.А. Ларионова, Н.Г. Максимович, Н.А. Блескина, а также зарубежных ученых: G. Ciardi, C.T. Conlee, L. Zeevaert, R. Peck, P.M. Gallagher, M. Hamderi и других. Их работы посвящены разработке и оптимизации составов синтетических смол, изучению их взаимодействия с различными типами грунтов и оценке долговечности закрепленных массивов.

Однако, несмотря на внушительный список выдающихся исследователей, мелкозернистые песчаные грунты, как объект технической мелиорации, до сих пор остаются в области внимания ученых, а тонкозернистые и пылеватые песчаные грунты крайне мало изучены и в настоящее время.

Наиболее перспективным и активно развивающимся можно выделить метод закрепления грунтов, основанный на использовании органических и неорганических вяжущих, в первую очередь, за счет их крайне высокой проникающей способности. Слабая изученность таких композитных составов постоянно побуждает современных авторов к активному поиску новых рецептур вяжущих. По мнению автора, синтетические смолы выгодно отличаются на фоне остального широкого спектра инъекционных материалов, используемых в строительстве. Тем более, современная практика глубинной инъекционной обработки грунтов приводит к постоянному появлению новых инъекционных материалов, которые требуют детального анализа. К одной из таких рецептур относится и раствор на основе алифатической эпоксидной смолы и коллоидного кремнезема, разработанный нами в процессе настоящего исследования.

Целью работы: является изучение влияния состава и свойств песчаных грунтов на эффективность их закрепления при обработке современными химическими вяжущими на основе модифицированного раствора алифатической эпоксидной смолы.

Задачи исследования:

- 1) на основе анализа опубликованных материалов разработать и апробировать новый состав химического вяжущего, удовлетворяющего современным требованиям технической мелиорации грунтов;
- 2) собрать коллекцию образцов песчаных грунтов различных гранулометрического, минерального и химического составов;
- 3) экспериментально изучить влияние гранулометрического состава, плотности сложения и степени водонасыщения песчаных грунтов на эффективность их закрепления вяжущим на основе авторской рецептуры;
- 4) Оценить влияние минерального состава песчаных грунтов, состава поверхностных пленок и степени засоления на качество закрепления;
- 5) Разработать методику лабораторного исследования полного цикла исследований, удовлетворяющую современным требованиям технической мелиорации;
- 6) Провести опытные инъекционные работы для уточнения методики лабораторного изучения эффективности использования вяжущих;
- 7) Провести промышленное внедрение авторской рецептуры.

Объект исследования: автором была собрана коллекция техногенных, аллювиальных, флювиогляциальных и морских песчаных грунтов юрского, мелового и четвертичного возраста. По гранулометрическому составу образцы песчаных грунтов варьируются от тонкозернистых до средне-крупнозернистых (по Е.М. Сергееву), по минеральному составу – от чисто кварцевых, до аркозовых и граувакковых. В рамках исследования также изучались модельные песчаные грунты с заданным минеральным составом, а также пески с искусственными поверхностными пленками. Техногенные и аллювиальные грунты изучались как в массиве, так и в нарушенном сложении в лабораторных условиях.

Предмет исследования: выявление закономерностей влияния геологических факторов на эффективность упрочнения песчаных грунтов растворами алифатических эпоксидных смол.

Научная новизна

1. Выявлено влияние геологических факторов: гранулометрического, минерального, химического составов песчаных грунтов, а также состава водорастворимых солей на эффективность использования разработанной оригинальной рецептуры закрепления грунтов.
2. Разработан и защищен патентом RU 2785603 С1 новый состав химического вяжущего для закрепления песков с низкими коэффициентами фильтрации ($K_f < 2-5$ м/сут) на основе

коллоидного кремнезема и алифатической эпоксидной смолы. Показано, что предложенный химический инъекционный состав работает в широком диапазоне температур (от -20 до +40°C).

3. Сконструирована и изготовлена новая стендовая установка для закрепления дисперсных грунтов в лабораторных условиях, защищена патентом на полезную модель № 226929.

4. Разработана и апробирована методика проведения инъекционных испытаний методом пропитки для воздушно-сухих и водонасыщенных песчаных грунтов.

5. Предложен новый вариант инъекционной обработки грунтов в лабораторных условиях методом пропитки с помощью секционных инъекционных колонн.

6. Определен диапазон гранулометрического состава песчаных грунтов, для которых химическое инъекционное закрепление методом пропитки с использованием авторской рецептуры наиболее эффективно.

Теоретическая значимость работы

1. Опробован новый состав химического инъекционного вяжущего на основе алифатической эпоксидной смолы для закрепления мелкозернистых и пылеватых песчаных грунтов.

2. Выявлено положительное влияние неорганических поверхностных пленок как на качество заполнения порового пространства инъектируемых песчаных грунтов, так и на их прочностные характеристики.

3. Выявлены закономерности положительного влияния минерального состава песчаных грунтов на их прочностные характеристики по ряду: кварцевые пески < олигомиктовые пески < аркозовые пески < граувакковые пески.

4. Показано, что комплексная оценка эффективности использования вяжущих достигается путем последовательной комбинации лабораторных и полевых исследований: инъекционные колонны → стеновые испытания → натурный эксперимент.

Практическая значимость работы

1. Разработана стендовая установка авторской конструкции, позволяющая в лабораторных условиях моделировать процесс инъекционного закрепления грунтов методом пропитки как в воздушно-сухих, так и водонасыщенных грунтах. Данная установка позволяет вести контроль как за параметрами инъекционного процесса (давление нагнетания, расход рабочего раствора и т.д.), так и за эффективностью и качеством распространения вяжущего в поровом пространстве.

2. Разработана и апробирована комплексная методика, включающая полный цикл лабораторного и полевого изучения эффективности применения химических вяжущих, позволяющая провести всестороннюю оценку как параметров инъекционного процесса, так и оценку свойств модифицированных грунтов на стадии апробации и тестирования новых рецептур вяжущих.

Фактический материал. Автором была собрана представительная коллекция образцов (более 1000 кг), отобранных автором с площадок проведения работ в период с 2020 по 2024 годы: образцы морского генезиса с территории Воробьевых гор, аллювиальные пески – Мещерского полигона МГУ, пески с различными аутигенными образованиями – Романцевских гор и карьера «Кондуки», техногенные грунты – дамбы шламохранилища Усольского калийного комбината. Также автору были предоставлены образцы песчаных грунтов компаниями: ООО «Инженерная Геология», ООО «Петромоделинг» и ООО «Протех Инжиниринг».

Личный вклад автора заключается:

- в сборе, обработке и анализе накопленного фактического материала;
- в полевых и лабораторных исследованиях состава и свойств песчаных грунтов;
- в разработке собственной авторской рецептуры для химического инъекционного закрепления грунтов;
- в разработке методики лабораторного исследования песчаных грунтов как объектов технической мелиорации;
- в разработке стеновой установки авторской конструкции для моделирования инъекционного процесса в лабораторных условиях.

Основные методы исследований. В настоящем диссертационном исследовании использован стандартный комплекс методов изучения состава, строения и свойств грунтов с привлечением оборудования, приобретенного за счет средств Программы развития МГУ имени М.В. Ломоносова. Минеральный состав грунтов был изучен рентгенодифракционным фазовым анализом с помощью рентгеновского дифрактометра Ultima-IV фирмы Rigaku (Япония). Оценка микростроения грунтов выполнена с помощью рентгеновского компьютерного микротомографа Yamato TDM-1000H-II и растрового электронного микроскопа LEO 1450VP. Изучение особенностей строения песчаных фракций проводилось с помощью оптического микроскопа (Levenhuk DTX 500 LCD). Анализ прочностных и деформационных свойств грунтов проведен с помощью автоматизированного комплекса АСИС «Геотек». Испытания по адгезии геля рабочего раствора проводились с использованием комплекса ОНИКС-1.АП. Также в рамках настоящего исследования использовалось инъекционное лабораторное оборудование собственных конструкций.

Защищаемые положения

1. Эффективность инъекционной обработки раствором кремнеземисто-эпоксидного состава в зависимости от гранулометрического состава проявляется двояко: увеличение среднего диаметра частиц от 0,081 до 0,25 мм приводит к практически линейному снижению прочности модифицированных грунтов на фоне экспоненциального увеличения радиуса закрепления.

2. Влияние минерального состава на эффективность инъекционной обработки песков раствором на основе кремнеземисто-эпоксидного вяжущего можно оценить посредством измерения адгезии формирующегося геля к поверхности породообразующих минералов: для кремнеземисто-эпоксидного инъекционного раствора выявлен следующий ряд: кварц < кальцит < полевые шпаты < амфибол < пироксен, а для типов песков по составу: кварцевые пески < олигомиктовые пески < аркозовые пески < граувакковые пески.

3. Влияние поверхностных пленок на эффективность закрепления проявляется не только посредством изменения адгезионной способности песчаных зерен, но и за счет изменения структуры геля рабочего раствора в поровом пространстве и конфигурации самого порового пространства; неорганические поверхностные пленки положительно сказываются на качестве заполнения порового пространства, а именно на формировании массивной микроструктуры геля рабочего раствора.

4. Оценка эффективности химической инъекционной обработки песчаных грунтов должна основываться на полном комплексе лабораторных (инъекционные колонны и физическое моделирование) и натурных полевых экспериментов, что позволяет оценить целесообразность, потенциал инъектируемости грунтов, радиус их эффективного закрепления, а также исходные параметры рабочего раствора и технологического процесса.

Публикации и апробации диссертационного исследования

Основные теоретические и практические аспекты, рассматриваемые в диссертационной работе, неоднократно докладывались и обсуждались как на российских, так и на международных конференциях, таких как: Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (МГУ, Москва, 2020, 2021, 2023, 2024 гг.); Ломоносовские чтения, секция «Геология» (МГУ, Москва, 2023, 2024 гг.), VIII Международная геологогеофизическая конференция «ГеоЕвразия-2025. Геологоразведочные технологии: наука и бизнес» и др.

Итогом данного исследования стало промышленное внедрение авторской рецептуры, результаты которого подтверждались заказчиком и подрядчиком в процессе проведения инъекционных и вскрышных работ.

Результаты проведенных исследований, основные положения и проблемы, рассматриваемые в диссертации, изложены в 8 публикациях, в том числе в 2 патентах и 3 публикациях в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.6.7. Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение: «Инженерная геология» (2023 № 3,4), «Геотехника» (2024 № 2).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения, списка литературы и 4 приложений. Содержит 117 графических иллюстраций и 20 таблиц. Библиографический список состоит из 174 источников. Объем рукописи составляет 185 страниц.

Благодарности. Автор выражает особую благодарность и признательность научному руководителю профессору, д.г.-м.н. Евгению Николаевичу Самарину за неоценимый вклад в разработку, подготовку и написание настоящего диссертационного исследования, помошь и поддержку, а также становление автора в специальности. Отдельную благодарность автор выражает Пензеву Петру Васильевичу за помощь, подготовку и разработку оборудования для проведения уникальных лабораторных испытаний.

Автор благодарен сотрудникам кафедры инженерной и экологической геологии, оказавшим помошь и поддержку при подготовке настоящего диссертационного исследования: заведующему кафедрой, профессору, д.г.-м.н. В.Т. Трофимову, члену-корреспонденту РАН, профессору, д.г.-м.н. Е.А. Вознесенскому, профессору, д.г.-м.н. В.А. Королеву, к.г.- м.н. Н.А. Ларионовой, О.И. Голубцовой, М.В. Фламиной, к.г.-м.н. В.В. Фуникову, к.г.- м.н. М.С. Чернову, к.т.н. А.Ю. Мирному, А.В. Бершову, к.г.-м.н. О.С. Барыкиной, д.г.- м.н. О.В. Зеркалю.

Автор благодарит сотрудников «Лаборатории охраны геологической среды и взаимосвязи поверхностных и подземных вод» геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова: к.г.-м.н. Т.Г. Шимко, М.А. Царева и к.г.-м.н. М.Л. Кулешову за профессионализм и всестороннюю помошь в проведении лабораторных исследований и опытно-промышленных работ.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Современные представления о химическом инъекционном закреплении грунтов

В главе представлен обзор основных способов инъекционного закрепления песчаных грунтов, а также существующих разновидностей органических и неорганических вяжущих, применяемых в практике технической мелиорации. В мировой и отечественной литературе возможности использования инъекционных растворов принято характеризовать по двум ключевым характеристикам грунтов – гранулометрическому составу и проницаемости.

Очевидно, что возможности инъекционной обработки мелких и пылеватых песков весьма ограничены, что побудило автора к разработке раствора оригинального состава (рис. 1).

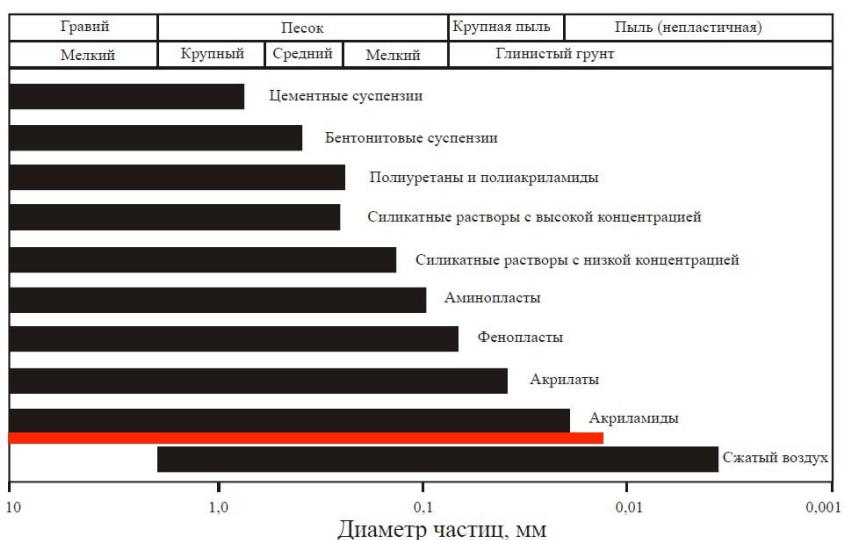


Рис. 1. Предел применимости различных инъекционных растворов (черный цвет) и область применения кремнеземисто-эпоксидного состава (красным цветом), по Karol R. H.¹ с дополнениями

К сожалению, современная практика инъекционного закрепления грунтов ограничивается использованием эмпирических формул для оценки потенциала инъецируемости песчаного массива и совершенно игнорирует геологические особенности грунтовых массивов. В опубликованной литературе присутствуют лишь фрагментарные сведения о влиянии химического, минерального, гранулометрического составов, плотности сложения и пр. на эффективность и качество закрепления песчаных грунтов.

Предложенный нами подход к учету геологических факторов позволяет оптимизировать процесс исследования свойств вяжущих, условий применения растворов, повысить их эффективность и обеспечить долговременную устойчивость закрепленных грунтов. В противном случае, игнорирование неоднородности и специфики их строения может привести к неравномерному распределению инъекционных материалов в обрабатываемом массиве грунта, снижению качества формирующегося в поровом пространстве геля, что негативно скажется на эксплуатационных характеристиках преобразованных грунтов.

Таким образом, настоящая работа предполагает изучение влияния не только гранулометрического состава и проницаемости песчаных грунтов на эффективность их закрепления модифицированным раствором алифатической эпоксидной смолы, но и попытку

¹Karol R. H. Chemical grouting and soil stabilization, revised and expanded. – Crc Press, 2003. -584 p.

всесторонней характеристики эффективности использования песчаных грунтов для инъекционной обработки с точки зрения их состава и строения.

Глава 2. Характеристика объектов исследования

Исследования выполнены на песчаных грунтах разного генезиса. Различия в генезисе проявляются в дисперсности песчаных отложений, степени окатанности песчаных зерен, сортированности песков и др. По гранулометрическому составу пески варьируют от пылеватых до средней крупности (табл. 1).

Таблица 1

Характеристика песчаных грунтов

№ п/п	Наименование грунта	Гранулометрический состав песчаных грунтов по массе фракций в мм, %							Название грунта по ГОСТ 25100-2020
		>2	2-1	1-0,5	0,5- 0,25	0,25- 0,1	0,1- 0,05	<0,05	
1	пески флювиогляциальные (fgQ _{II} ms)	0	2	8	53	28	8	1	средней крупности
2	аллювиальные пески второй надпойменной террасы р. Клязьма (alQ _{III} ^{II}), глубина отбора 1,2-1,4 м	0	1	7	52	33	1	6	средней крупности
3	песок (alQ _{III} ^{II}), глубина отбора 1,6-1,8 м	0	0	9	53	32	1	5	средней крупности
4	нижнемеловые пески (K ₁ ik)	0	0	0	1	85	12	2	мелкие
5	нижнемеловые пески (K ₁ kn)	0	0	0	2	76	13	9	мелкие
6	верхнеюрские- нижнемеловые пески (J ₃ -K ₁ lp)	0	0	3	16	69	5	7	мелкие
7	пески тела дамбы шламохранилища (tQ _{IV})	0	0	1	26	67	5	1	мелкие
8	нижнемеловые пески с карбонатными поверхностными пленками (K ₁ g-br)	0	0	13	36	20	31	0	пылеватые
9	пески флювиогляциальные с железистыми поверхностными пленками (fgQ _{Idns})	0	0	2	40	20	37	1	пылеватые
10	нижнемеловые пески с глинистыми поверхностными пленками (K ₁ g-br)	0	0	0	4	49	44	2	пылеватые

Для изучения влияния минерального состава использовались искусственные песчаные смеси на основе аллювиального песка (alQ_{III}^{II}) (табл.1, позиция 3) с добавлением полевых шпатов, пироксена, кальцита, роговой обманки и биотита (до 50%) различной дисперсности так, чтобы гранулометрический состав конечной смеси не изменялся. Для изучения влияния состава аутигенных пленок были использованы как природные грунты, так и модельные разности – на основе аллювиального песка (alQ_{III}^{II}) – с заданным составом поверхностных пленок (глинистые,

железистые, карбонатные, силикатные и органические), в количестве от 1 до 3 %, что соответствует их природному содержанию. Изучение песчаных грунтов с естественными аутигенными образованиями доказало правомерность использования образцов песчаных грунтов с искусственно нанесенными пленками.

Глава 3. Методика экспериментальных исследований

В главе основное внимание посвящено созданию комплексной методики изучения влияния геологических факторов на эффективность закрепления песчаных грунтов химическими вяжущими (рис. 2).

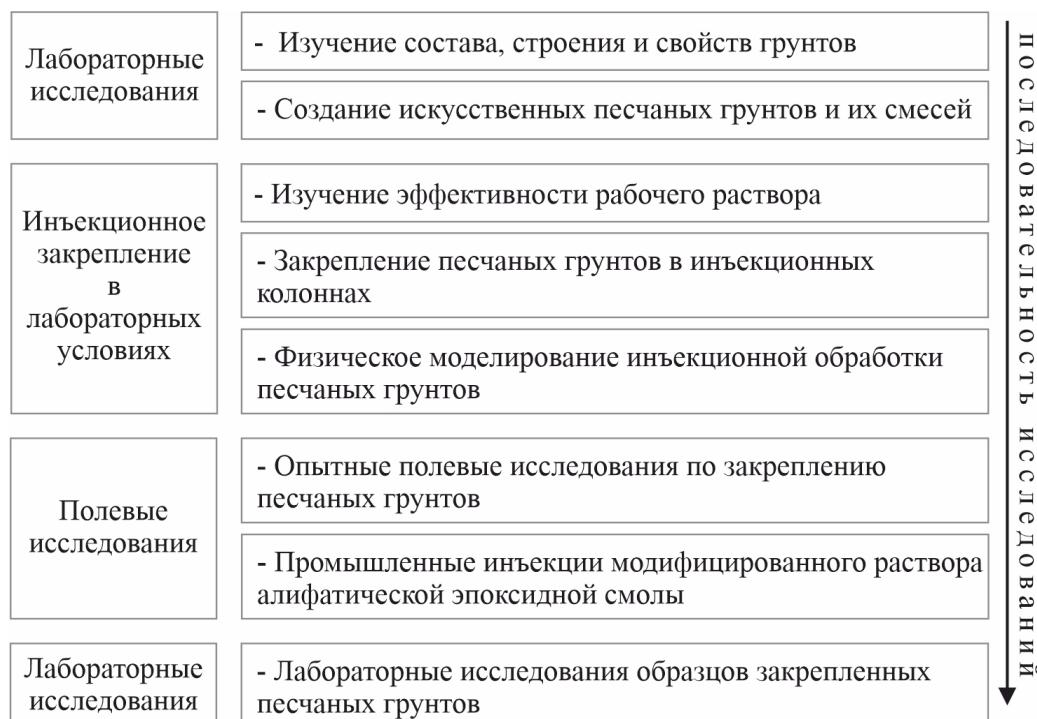


Рис. 2. Общая схема методики экспериментальных исследований

Изучение состава, строения и свойств песчаных грунтов проводилось с помощью стандартных лабораторных методов, исследование прочностных и деформационных характеристик проводилось в соответствии с нормативными документами.

Для создания грунтов с искусственными поверхностными пленками использовался песок ($\text{alQ}_\text{III}^\text{II}$), предварительное удаление естественных аутигенных образований проводилось по модифицированной методике Е.Н. Огородниковой. Искусственные пленки заданного состава наносились путем осаждения малорастворимых соединений различного состава.

Приготовление рабочего раствора производилось путем подбора компонентов вяжущего, содержание отвердителя подбиралось экспериментально. Условная вязкость определялась при помощи вискозиметра ВП-4. Определение краевого угла смачивания проводилось методом сидящей капли, определение адгезии геля к минеральным поверхностям

производилось с помощью адгезиметра ОНИКС-АП методом отрыва. Для искусственных пленок применялся метод решетчатого надреза.

Закрепление песчаных грунтов в лабораторных условиях проводилось с использованием разборных инъекционных колонн с внутренним диаметром 25 мм и высотой 50 мм. В инъекционные колонны песок укладывался посекционно, при плотности $\rho=1,70 \text{ г/см}^3$, пористость при укладке составляла 36-40%, коэффициент пористости – 0,56-0,67.

Инъекция осуществлялась под давлением от 0,1 до 0,6 МПа, расход рабочего раствора с вязкостью 1,1 сП не превышал 0,10-0,33 л/мин. Время инъекции раствора через колонну варьировало от 5-10 мин. – для мелко-среднезернистого песка, до 30 мин. – для тонко-мелкозернистого. После «схватывания» раствора – через 90 мин., колонна разбиралась, образцы закрепленного грунта извлекали выдавливанием плоским штампом, измерялись, взвешивались, а после помещались в соответствующие условия хранения.

Физическое моделирование инъекционного закрепления грунтов производилось в лабораторных условиях на разборном однокамерном стенде, представляющем собой параллелепипед с длинами сторон 800x500x300 мм (полезный объем – 135 л). Инъектор представляет собой трубку с перфорацией в нижней части, расстояние между рядами перфорации – 25 мм, диаметр перфорации – 3 мм.

Инъекционная обработка песчаных грунтов в естественном сложении производилась с помощью забивного инъектора стандартной конструкции диаметром 25,4 мм, перфорированная часть инъектора составляла 300 мм, расстояние между пазами с перфорацией – 50 мм, диаметр отверстий – 3 мм. Инъектор погружался в массив посредством забивания в грунт на расчетную глубину, подача вяжущего происходила с поддержанием постоянного давления (1,2-1,3 атм). Расход рабочего раствора составлял 20-25 л/мин., общий объем использованного рабочего раствора – 0,2 м³, объем закрепленного грунта – 0,5 м³. Вскрытие и опробование обработанного массива песчаных грунтов производилось спустя месяц после проведения инъекции.

Промышленное внедрение рецептуры производилось по аналогичной схеме, с увеличение глубины инъекционной обработки до 3 м. Давление инъекции находилось в диапазоне 0,7-1,0 атм, объем раствора, закачанного в каждую скважину, составил 1700 л при интервале инъекции 2 м.

Глава 4. Свойства гелеобразующей системы

Предложенный состав для инъекционной пропитки грунтов готовился на основе коллоидного кремнезема 7,5%-ой концентрации, алифатической эпоксидной смолы и отвердителя – полиэтиленполиамина (ПЭПА) в соотношении: 3,00:1,00:0,16.

Время гелеобразования раствора зависит от температуры и эффективно регулируется дозировкой отвердителя ПЭПА в широком диапазоне температур. При взаимодействии смолы с отвердителем происходит экзотермическая реакция, что позволяет использовать вяжущее даже при отрицательных температурах. Вязкость рабочего раствора остается практически неизменной на протяжении всего индукционного периода, возрастая от 1,1 до 6,0 сП непосредственно перед отверждением.

Прочность геля в воздушно-влажных условиях достигает 0,25 МПа, при хранении в водонасыщенных условиях – снижается до 0,15 МПа, видимо, за счет размягчения кремнеземистого геля, имеющего глобуллярную структуру, вследствие гидратации.

Преимуществом рабочего раствора является более низкое (52,8 мН/м), по сравнению с водой (72,9 мН/м), поверхностное натяжение, что при инъекции позволяет добиться отжатия поровой влаги за счет лучшей смачиваемости поверхности песчаных зерен.

Кремнеземисто-эпоксидный раствор отличается высокой адгезией (табл. 2) к основным породообразующим минералам песчаных грунтов и, вне зависимости от вида минерала, позволяет достичь формирования прочных цементационных контактов по всему объему песчаного грунта. Присутствие цепочечных и ленточных силикатов приводит к увеличению прочности на одноосное сжатие закрепленных песчаных грунтов (табл.2).

Таблица 2

Результаты испытаний по определению прочности сцепления (адгезии) вяжущего

Порода (минерал)	Усилие отрыва, Н	Площадь отрыва, мм ²	Прочность сцепления, МПа
Амфиболит (85% амфибола)	401	1375	0,29
Калиевый полевой шпат	540	2500	0,22
Кальцит	478	2410	0,20
Кварц	439	2500	0,18
Пироксенит (90% пироксена)	706	2000	0,35

Глава 5. Эффективность использования модифицированного раствора алифатической эпоксидной смолы при закреплении грунтов в лабораторных условиях

Для изучения свойств песчаных грунтов, закрепленных модифицированным раствором, были подготовлены серии образцов, закрепленных в инъекционных колоннах. В качестве основного показателя эффективности использовалась прочность на одноосное сжатие R_c (МПа).

Подбор оптимального давления нагнетания для определения максимального расстояния распространения рабочего раствора и его эффективного радиуса закрепления осуществляется методом подбора, в диапазоне от 0,1 до 0,5-0,6 МПа, плотность сложения песчаных грунтов в экспериментах – 1,70 г/см³. Расход рабочего раствора в процессе нагнетания варьировался в пределах 0,05-0,15 л/мин., пропитка инъекционной колонны проводилась в течение 10-45 мин.

Для каждой из серий экспериментов использовалась параллельная обработка от 2 до 4 инъекционных колонн. Установлено, что среднее падение прочности по длине инъекционной колонны не превышает 20 %, максимальные падения прочности характеры для среднезернистых песчаных грунтов и достигают 50 %. Плотность модифицированных грунтов по радиусу закрепления остается практически неизменной, а ее падение имеет прямую закономерность с изменением прочности.

Средние значения прочности спустя сутки после инъекционной обработки для всех типов грунтов составляют 0,8-1,2 МПа. Дальнейший набор прочности образцов для воздушно-влажных условий происходит в первые 14 дней (до 2,0 МПа). Прочность сохраняется практически неизменной на протяжении трех лет хранения.

Хранение образцов грунтов в условиях водонасыщения в первые две недели приводит практически к двукратному падению прочности – до 0,5 МПа. Слабая водостойкость геля приводит к полной потери прочности при 20 циклах водонасыщения-осушение. Полная потеря прочности при изучении морозостойкости наступает при 12-15 цикле промораживания-оттаивания. Набухание модифицированных грунтов при хранении в водонасыщенных условиях не превышает 1%.

Результаты исследований о влиянии гранулометрического состава на эффективность инъекционного закрепления песчаных грунтов показаны на рис. 3. Снижение дисперсности приводит к логичному увеличению эффективного радиуса распространения вяжущего в поровом пространстве, вместе с тем, к снижению прочностных свойств.

Максимальные значения прочности характерны для более дисперсных разностей, как правило, мелких и пылеватых песков, средние значения прочности достигают 1,8-2,2 МПа, при закреплении среднезернистых песчаных грунтов прочность снижается до 1,4 МПа. Такое изменение прочности обусловливается числом контактов между песчаными зернами, а также толщиной пленок геля, формирующихся на поверхности песчаных зерен.

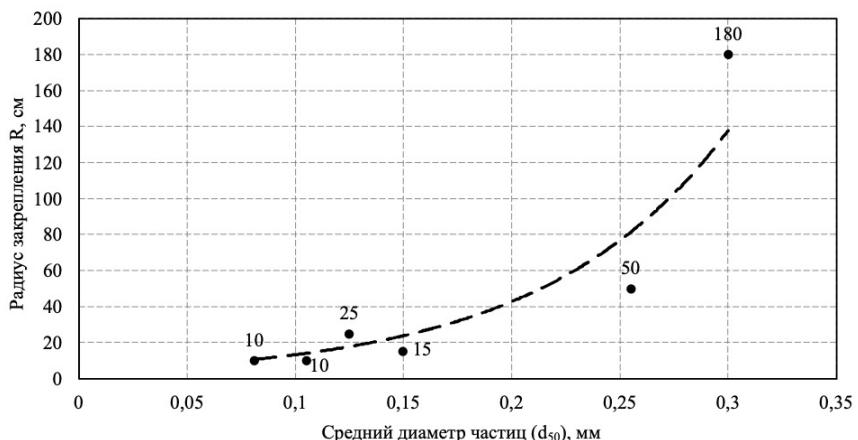


Рис. 3. Зависимость эффективного радиуса закрепления песчаных грунтов от среднего диаметра частиц

Рост прочности с увеличением плотности упаковки песчаных частиц носит линейный характер. В максимально рыхлом сложении ($\rho_d=1,48 \text{ г/см}^3$) средняя прочность изменяется в диапазоне 0,9-1,0 МПа, тогда как для плотного сложения ($\rho_d=1,70 \text{ г/см}^3$) возрастает до 1,4- 1,5 МПа. Увеличение прочности объясняется закономерным снижением среднего размера пор, увеличивающимся количеством контактов между зернами, а также более ярким проявлением зацепления между песчаными частицами.

Анализ влияния минерального состава на эффективность закрепления песчаных грунтов показывает высокую сходимость с результатами адгезии геля к различным минеральным поверхностям основных породообразующих минералов песчаных грунтов (см. табл. 2), прочностные свойства образцов увеличиваются по ряду: кварц < кальцит < полевые шпаты < амфибол < пироксен (табл. 3).

Таблица 3

Изменение прочностных свойств закрепленных песчаных грунтов в зависимости от
минерального состава

Содержание полевых шпатов, %	Средние значения прочности (R_c , МПа)	Содержание роговой обманки, %	Средние значения прочности (R_c , МПа)	Содержание кальцита, %	Средние значения прочности (R_c , МПа)	Содержание биотита, %	Средние значения прочности (R_c , МПа)
0	1,24	0	1,24	0	1,24	0	1,24
10	1,31	10	1,29	5	1,24	1	1,21
20	1,33	20	1,44	10	1,26	3	1,11
30	1,43	30	1,45	20	1,29	5	0,99
40	1,59	40	1,57	30	1,32	7	0,81
50	1,62	50	1,71	40	1,31		

По влиянию на прочность закрепления исследованные типы аутигенных пленок в песках можно расположить в следующий ряд по убыванию прочности на раздавливание образцов модифицированного песка: глинистая, железистая, силикатная, карбонатная, органическая.

Увеличение прочностных свойств закрепленных песчаных грунтов с различными аутигенными образованиями (рис. 4) обусловлено частичным захватом частиц пленочных образований и встраиванием их в структуру формирующегося геля, что подтверждается исследованием микростроения закрепленных образцов (рис. 5). Отмечены высокая адгезия и сравнительно низкое значение краевого угла смачивания инъекционного раствора к поверхности, покрытой глинистой пленкой.

Низкая прочность песков с органическими аутигенными образованиями связана с изменением химического состава геля в результате частичного растворения органического вещества пленок, а также гидрофобностью поверхности относительно инъекционного раствора и низкой адгезией.

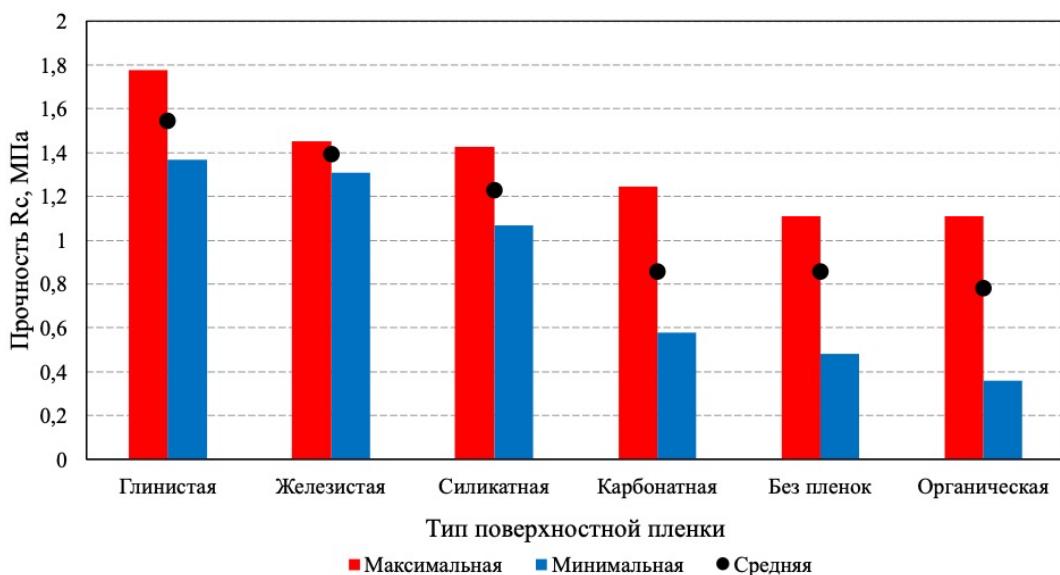


Рис. 4. Типологический ряд влияния аутигенных пленок на прочность закрепленных грунтов

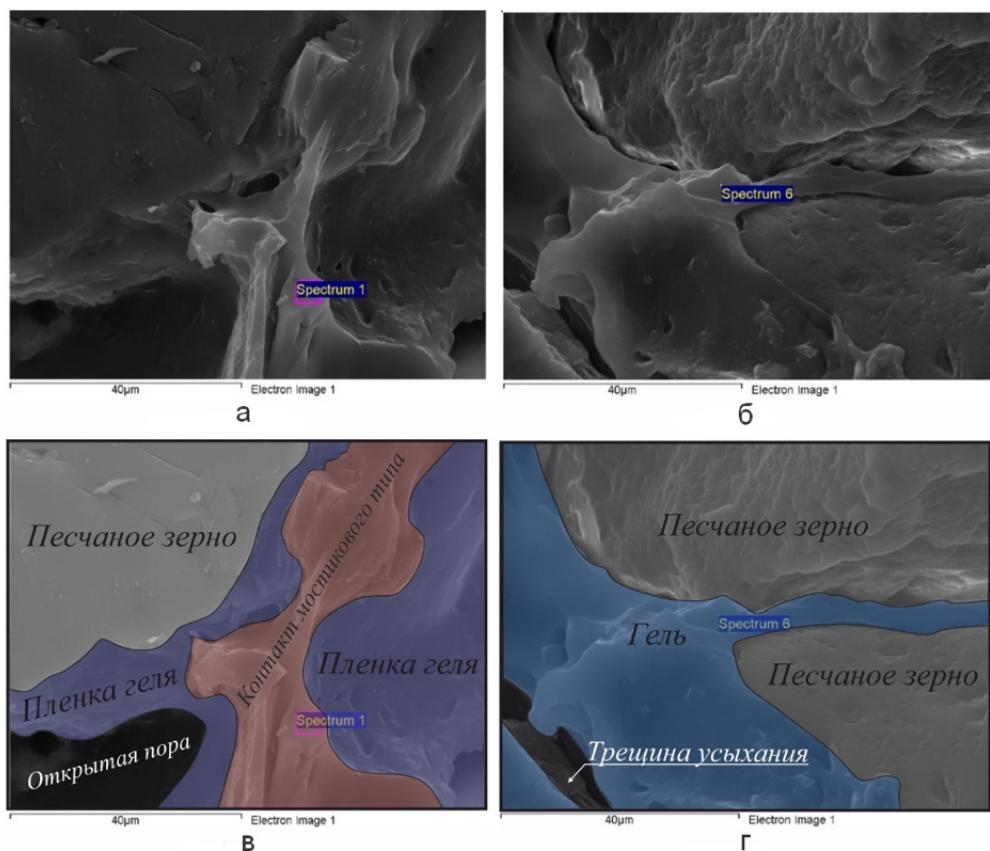


Рис. 5. Электронно-микроскопические снимки закрепленного песчаного грунта (K_1ik) (а, б) и пример их дешифрирования (в, г соответственно)

Наличие водорастворимых солей ($NaCl$ и Na_2SO_4) в целом носит негативный характер. При содержании солей до 3 % не наблюдается резкого снижения прочности (< 20 %) закрепленных образцов, однако увеличение содержания солей до 5-7 % приводит к троекратному падению прочности – до 0,3-0,4 МПа. Такой эффект, видимо, обусловлен

взаимодействием сульфата или хлорида натрия с коллоидным кремнеземом, для которого эти соли являются отвердителем. В результате еще на протяжении индукционного периода происходит формирование хлопьевидного осадка, что, во-первых, снижает проницаемость песков, а, во-вторых, приводит к существенному расслаиванию вяжущего и невозможности формирования однородного геля.

Глава 6. Опытные полевые работы по инъекционному закреплению грунтов методом пропитки с использованием модифицированного раствора алифатической эпоксидной смолы

В главе описано проведение полевых исследований по инъекционной обработке песчаных грунтов методом пропитки (рис. 6). Опытные работы проводились в массиве аллювиальных песков (aQ_{III}^{II}) (табл. 1, образцы 2-3) средней плотности сложения ($e = 0,6$) и малой степени водонасыщения ($We = 2-4 \%$), со слабо выраженной горизонтальной слоистостью.

Плотность песков в естественном сложении изменялась в пределах 1,77-1,84 г/см³. K_f массива песчаных грунтов в естественном сложении колеблется в пределах 6-8 м/сут, значения K_f при нарушенном сложении в плотном состоянии составляет 8-12 м/сут. Пористость песчаных грунтов в естественном сложении изменяется в пределах 38-40 %, при проведении работ в инъекционной колонне составляла от 40 до 41 %.



Рис. 6. Вскрытие целиков закрепленного песчаного грунта (а, б), и их последующее опробование (в)

Закрепленный в полевых условиях массив имел бочкообразную форму, с диаметром закрепления около 150 см (рис. 6(а)). Модифицированный грунт характеризуется ярко выраженной зоной контакта «закрепленный/незакрепленный грунт», мощностью порядка 1-2 см, что говорит об отсутствии дробления по фронту рабочего раствора в процессе инъекции.

Прочность грунта в массиве достигает 1,5 МПа при некотором снижении к краевой части закрепленного массива, что практически идентично результатам, полученным в фильтрационной колонне (см. главу 5). Низкие значения прочности на одноосное сжатие (0,6- 0,7 МПа) образцов закрепленного грунта в приинъекторной зоне (на расстоянии до 5 см от инъектора) обусловлены механическим воздействием инъектора на песчаный грунт вследствие его погружения и последующего «выдергивания» из толщи аллювиальных отложений.

Опытно-промышленное внедрение рецептуры проводилось в теле дамбы шламохранилища, сложенной насыпными техногенными мелкозернистыми песчаными грунтами (tQ_{IV}). Толща формировалась посредством послойной отсыпки с последующим уплотнением, мощность элементарного слоя при укатке составляла 30 см.

Подготовительные работы включали: бурение скважин диаметром 76 мм на проектную глубину (3 м), установка инъектора на глубину «холостой» зоны (1 м), тампонирование цементно-гипсовым раствором устья скважины между инъектором и стенкой скважины - для предотвращения выпора рабочего раствора при нагнетании. Инъекционные скважины располагались на одной прямой с шагом в 1,25 м. Бурение скважин проводилось с соблюдением очередности «через одну» для недопущения сообщения между соседними скважинами.

Проведение инъекционных работ проводилось в температурном диапазоне от –2 до –9°C. Экзотермическая реакция взаимодействия отвердителя с алифатической смолой позволила увеличить температуру рабочего раствора до 13°C.

Результаты определения прочностных свойств модифицированных техногенных песков в пределах эффективного радиуса закрепления показали высокую эффективность предложенной инъекционной рецептуры, прочность образцов на раздавливание превышала 1 МПа. Заполнение порового пространства грунта равномерно, остаточная пористость не превышает 13 %, микростроение модифицированных в полевых условиях грунтов соотносится с лабораторными аналогами. Кремнеземисто-эпоксидный состав позволяет добиться устойчивого снижения коэффициента фильтрации песков на 5 порядков, до 1×10^{-5} м/сут.

Проведенные полевые исследования показали высокую сходимость полученных результатов с данными лабораторных исследований, что подтверждает не только целесообразность применения кремнеземисто-эпоксидного вяжущего, но и правомерность использования комплекса лабораторных исследований для оценки эффективности инъекционных рецептур для целенаправленного улучшения свойств грунтов.

Глава 7. Использование физического моделирования инъекционного закрепления песчаных грунтов методом пропитки в лабораторных условиях

В главе рассматривается опыт создания и использования малогабаритной физической модели для симуляции процесса инъекционной обработки грунтов (рис. 7), данный способ

анализа выгодно отличается на фоне дорогостоящих и трудозатратных полевых инъекционных работ.

Для эксперимента использовался аллювиальный песок (aQ_{III}^{II}), выбор данного песчаного грунта обусловлен возможностью сопоставления накопленного объема данных по инъекционной обработке грунтов в полевых условиях и в инъекционных колоннах.

Заполнение физической модели проводилось путем послойной трамбовки песка, мощность элементарного слоя варьировалась в пределах 3-5 см, общая масса используемого песчаного грунта 135 кг. Плотность песка после укладки составила $1,68 \text{ г}/\text{см}^3$, пористость 41 %. В центральную часть установки погружался инъектор с перфорацией в нижней части. Верхняя часть песка перед проведением инъекции была перекрыта гипсовым замком для предотвращения выпора грунта и выхода раствора на поверхность в приинъекторной части.

Для инъекции методом пропитки использовалось 17,6 л рабочего раствора. Процесс инъекционной обработки песчаных грунтов проводился на протяжении 15 мин. Расход рабочего раствора составил 1-2 л/мин., при давлении нагнетания в 25-50 кПа. Скорость распространения раствора контролировалась визуально. Объем закрепленного грунта составил порядка $0,04 \text{ м}^3$.

Набор прочности грунтового композита, с учетом результатов предыдущих исследований, составляет порядка 28 дней, вследствие чего конструкция установки разбиралась по прошествии данного интервала времени для дальнейшего анализа и опробования модифицированных грунтов.



Рис. 7. Стендовая установка для моделирования инъекционного закрепления грунтов методом пропитки (а), закрепленный целик (б) песчаного грунта (aQ_{III}^{II}) (вид с фронтальной части)

Прочность на одноосное сжатие закрепленных песчаных грунтов изменялась в пределах от 1,1 до 1,4 МПа для воздушно-влажного песка, и в пределах 0,9-1,2 МПа – для первоначально водонасыщенного. Полученный объем данных позволил доказать сопоставимость прочностных

свойств, качества заполнения порового пространства, остаточной свободной пористости (менее 10 %) и однотипность микростроения модифицированных грунтов в полевых и лабораторных условиях.

Данные о распределении прочности позволили выделить основные зоны модифицированных грунтов, соотносящиеся с результатами полевых исследований:

- приинъекторная (5-10 см);
- центральная часть массива, в которой гель имеет гомогенную структуру;
- краевая зона (до 10 см);
- контактная зона (до 5 см и около 10 см при водонасыщенных условиях закрепления).

Вне зависимости от условий проведения испытаний прослеживаются определенные закономерности в строении зон преобразованного массива: приинъекторная – частичного разуплотнения грунтов, сопровождающаяся падением прочности (до 20%); центральная часть массива, где гель имеет однородную (гомогенную) структуру и позволяет достичь максимальных значений прочности, а также краевую часть массива, сопровождающуюся падением прочностных свойств, обусловленным расслоением рабочего раствора.

Заключение

Проведенный анализ современного состояния инъекционной обработки дисперсных грунтов с низкими коэффициентами фильтрации (< 2-5 м/сут) указывает на существенную необходимость разработки и опробования новых инъекционных рецептур, удовлетворяющих современным требованиям геотехники и строительства.

Разработанная автором рецептура на основе эпоксидно-кремнеземистого вяжущего характеризуется низкой вязкостью (1,1-1,2 сП) и может быть использована для закрепления широкого спектра песчаных грунтов, вплоть до их пылеватых разностей с коэффициентами фильтрации до 0,1 м/сут. Время гелеобразования предложенного рабочего раствора эффективно регулируется в широком диапазоне как положительных, так и отрицательных температур с помощью дозировки отвердителя.

Серия многочисленных экспериментов в течение трех лет показала, что применение раствора на основе эпоксидной алифатической смолы позволяет достичь стабильных значений прочности закрепленных песков – от 1,0 МПа и выше. Инъекционную обработку водонасыщенных песчаных грунтов наиболее эффективно проводить исключительно для достижения тампонажного эффекта. При взаимодействии с грунтами различного гранулометрического состава достигается существенное снижение коэффициента фильтрации (на 4-5 порядков).

Предложенная автором методика проведения комплексного изучения потенциала инъектируемости в лабораторных и полевых условиях позволяет с высокой степенью

достоверности получить представление о потенциале применения химических вяжущих в различных инженерно-геологических условиях. Оценка эффективного радиуса закрепления с использованием инъекционных колонн позволяет с достаточной точностью прогнозировать качество заполнения порового пространства, степень изменения состава и свойств модифицированных грунтов.

Разработанная и апробированная установка для физического моделирования инъекционного процесса в дисперсных грунтах предоставляет возможность получения необходимого объема инъекционных параметров и фактического материала для получения полного объема данных для последующего изучения свойств модифицированных грунтов. Физическое моделирование, при высокой сходимости с результатами полевых экспериментов, позволяет не только повысить скорость проведения комплекса экспериментов, но и существенно повысить экономическую эффективность и целесообразность использования новых современных инъекционных рецептур для последующего промышленного внедрения.

Проведенный комплекс полевых и лабораторных исследований также позволил выделить и оценить неоднородности в строении закрепленного массива песчаных грунтов, вследствие чего модифицированный массив, как правило, имеет следующее строение:

- приинъекторная зона, для которой закономерно некоторое снижение прочностных и деформационных свойств, что обусловлено, в первую очередь, разуплотнением и нарушением естественного сложения песчаных грунтов при внедрении и удалении инъектора, а также ударным воздействием рабочего раствора во время самой инъекционной пропитки;
- центральная часть массива, для которой характерны максимальные значения прочностных свойств, что подтверждается наличием более качественных и многочисленных контактов цементационного и мостикового типа между песчаными зернами, наблюдаемых при исследовании микростроения модифицированных грунтов;
- краевая зона, как правило, наиболее подверженная влиянию разбавления рабочего раствора и излишнему перераспределению компонентов кремнеземисто-эпоксидного вяжущего вследствие снижения скорости проникновения раствора на периферии модифицированного массива по мере внедрения инъекционного состава;
- контактная зона (при водонасыщенных условиях закрепления около 10 см) – фиксируется наличие неполимеризованной эпоксидной смолы, что не приводит к изменению прочности грунта.

Изучение зональности модифицированных грунтов показывает, что изменение свойств в пределах модифицированной области несущественно (не превышает 20%), что позволяет говорить об общем равномерном строении массива.

Проведена оценка влияния гранулометрического, минерального, химического составов, а также состава водорастворимых солей, на эффективность использования предложенной рецептуры.

Полученные результаты показывают, что увеличение дисперсности песчаных грунтов положительно влияет на их прочность после инъекционной обработки, вместе с тем, приводя к снижению максимального радиуса распространения вяжущего.

Наличие неорганических аутигенных образований различного состава положительно сказывается на прочностных свойствах песчаных грунтов. Присутствие органических поверхностных пленок приводит к снижению прочности на одноосное сжатие грунтов, что обусловлено несколькими причинами, среди которых главными являются: изменение структуры геля и увеличение гидрофобности поверхности песчаных зерен.

Исследование влияния минерального состава показало, что увеличение содержания кварца в составе песчаного грунта приводит к некоторому снижению прочностных свойств модифицированных грунтов, что, однако, крайне незначительно сказывается на абсолютных значениях прочности на одноосное сжатие. Данная закономерность также подтверждается результатами определения адгезии геля к основным породообразующим минералам песчаных грунтов.

Наличие водорастворимых солей в песчаных грунтах носит негативный характер, даже невысокое их содержание – в пределах первых процентов – приводит к существенному падению прочности закрепленных песчаных грунтов.

Предложенная автором инъекционная рецептура на основе кремнеземисто-эпоксидного вяжущего показала свою эффективность для улучшения свойств грунтов.

Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности и отрасли наук

1. **Пензев А.П.**, Самарин Е.Н., Чернов М.С., Ермолинский А.Б., Фуникова В.В., Соколов В.Н. Закрепление песчаных и пылеватых грунтов модифицированным раствором эпоксидной смолы // Инженерная геология. – 2023. Т. 18. – № 3. С. 52-65. EDN: NBTOQK. Импакт- фактор 0,410 (РИНЦ). Объем публикации: 1,62 п.л., объем вклада соискателя: 50 %.

2. **Пензев А.П.**, Самарин Е.Н., Шеховцова А.В., Мирный А.Ю., Пензева Е.П., Летуновская С.С. Сравнение эффективности инъекционного закрепления песчаных грунтов в полевых и лабораторных условиях на основе алифатической эпоксидной смолы // Инженерная геология. – 2023. Т. 18. – № 4. С. 50-62. EDN: JGXVWV. Импакт-фактор 0,410 (РИНЦ). Объем публикации: 1,5 п.л., объем вклада соискателя: 50 %.

3. **Пензев А.П.** Разработка стендовой установки для инъекционного упрочнения песчаных грунтов методом пропитки в лабораторных условиях // Геотехника. – 2024. Т. 16. – № 2. С. 16- 33. EDN: TSLBWI. Импакт-фактор 0,439 (РИНЦ). Объем публикации: 1,96 п.л.

Патенты

4. Пат. 226929 Российская Федерация, МПК G01N 13/00. Емкость лабораторной установки для исследования характера распространения инъекционного раствора для закрепления грунта / **Пензев А.П.**, Самарин Е.Н., Патентообладатели Пензев А.П., Самарин Е.Н. – № 2024108834, заявл. 03.04.2024, опубл. 28.06.2024.

5. Пат. 2785603 Российская Федерация, МПК E02D 3/12, C09K 17/18. Инъекционный состав для закрепления пескосодержащего массива / **Пензев А.П.**, Самарин Е.Н., Патентообладатели Пензев А.П., Самарин Е.Н. – № 2022112899, заявл. 13.05.2022, опубл. 09.12.2022.

Публикации в иных научных изданиях

6. Царев М.А., Лободенко И.Ю., Малофеев А.А., Еремина Н.Е., Ермолинский А.Б., Чернов М.С., Самарин Е.Н., **Пензев А.П.** Фильтрационные свойства песков, закрепленных инъекцией эпоксидного состава для завесы от раствора солей // Гидросфера. Опасные процессы и явления. – 2024. –Т. 6. - № 1. – С. 52-75. EDN: BDTSEG. Импакт-фактор 0,452 (РИНЦ). Объем публикации: 2,77 п.л., объем вклада соискателя 10 %.

7. **Пензев А.П.**, Самарин Е.Н., Гравис М.С. Состав для инъекционной обработки массивов песчаных грунтов с целью повышения их несущей способности на основе алифатической смолы // Инженерные изыскания в строительстве. Материалы пятой Общероссийской научно-практической конференции молодых специалистов. Изд-во. Геомаркетинг (М.), 2023. – С. 38-44.

8. **Пензев А. П.**, Самарин Е. Н. Моделирование инъекционного процесса песчаных грунтов в лабораторных условиях // Труды VIII Международной геолого-геофизической конференции «ГеоЕвразия-2025. Геологоразведочные технологии: наука и бизнес». – 2025. – Т. 2. – С. 50-54.