

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА  
ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

*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

ДИССЕРТАЦИЯ  
на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель:  
доктор геолого-минералогических наук,  
доцент Самарин Евгений Николаевич

Москва – 2025

## Оглавление

<i>Введение.....</i>	<i>5</i>
<i>Глава 1. Современные представления о химическом инъекционном закреплении песчаных грунтов.....</i>	<i>14</i>
1.1. Основные способы инъекционного закрепления песчаных грунтов в массиве (в том числе, область применения инъекционной обработки массивов грунтов) .....	15
1.2. Органические и неорганические вяжущие, используемые в практике технической мелиорации песков .....	19
1.3. Песчаные грунты как объект химического инъекционного закрепления.....	26
Выводы к главе 1 .....	39
<i>Глава 2. Характеристика объектов исследования.....</i>	<i>41</i>
2.1. Природные песчаные грунты .....	41
2.2. Искусственные песчаные грунты с заданным гранулометрическим составом .....	51
2.3. Искусственные песчаные грунты с заданным минеральным составом.....	52
2.4. Песчаные грунты с искусственно созданными поверхностными пленками .....	53
Выводы к главе 2 .....	56
<i>Глава 3. Методика экспериментальных исследований .....</i>	<i>58</i>
3.1. Методика изучения состава, строения и свойств естественных и искусственных грунтов .....	58
3.2. Создание искусственных песчаных грунтов и их смесей .....	60
3.3. Методика экспериментального изучения эффективности рабочего раствора .....	61
3.4. Методика закрепления песчаных грунтов в лабораторных условиях .....	64
3.5. Физическое моделирование инъекционной обработки песчаных грунтов методом однородной пропитки в лабораторных условиях .....	66
3.6. Опытные полевые исследования по закреплению песчаных грунтов .....	69
3.7. Промышленная инъекция модифицированного раствора алифатической эпоксидной смолы .....	69
3.8. Лабораторные исследования образцов закрепленных песчаных грунтов.....	71

<b>Выводы к главе 3 .....</b>	<b>73</b>
<i>Глава 4. Свойства гелеобразующей системы .....</i>	<i>75</i>
<b>4.1. Компоненты рабочего раствора .....</b>	<b>75</b>
<b>4.2. Свойства модифицированного раствора алифатической эпоксидной смолы.....</b>	<b>76</b>
<b>Выводы к главе 4 .....</b>	<b>89</b>
<i>Глава 5. Эффективность использования модифицированного раствора алифатической эпоксидной смолы при закреплении грунтов в лабораторных условиях.....</i>	<i>90</i>
<b>5.1. Влияние гранулометрического состава песчаных грунтов на эффективность их закреплении.....</b>	<b>98</b>
<b>Выводы к параграфу 5.1 .....</b>	<b>105</b>
<b>5.2. Влияние плотности песчаных грунтов на эффективность их обработки.....</b>	<b>106</b>
<b>5.3. Влияние минерального состава песчаных грунтов на эффективность их закреплении</b>	<b>112</b>
<b>Выводы к параграфу 5.3 .....</b>	<b>119</b>
<b>5.4. Наличие состава водорастворимых солей и их влияние на эффективность закреплении песчаных грунтов.....</b>	<b>119</b>
<b>5.5. Влияние поверхностных пленок на эффективность закреплении песчаных грунтов.</b>	<b>123</b>
<b>Выводы к параграфу 5.5 .....</b>	<b>131</b>
<i>Глава 6. Опытные полевые работы по инъекционному закреплению грунтов методом пропитки с использованием модифицированного раствора алифатической эпоксидной смолы.....</i>	<i>133</i>
<b>6.1. Опытное инъекционное закрепление массива аллювиальных песчаных грунтов методом пропитки на территории Мещерского полигона МГУ им. М.В. Ломоносова.....</b>	<b>133</b>
<b>6.2. Промышленное внедрение модифицированного раствора алифатической эпоксидной смолы .....</b>	<b>142</b>
<b>Выводы к главе 6 .....</b>	<b>149</b>
<i>Глава 7. Использование физического моделирования инъекционного закреплении песчаных грунтов методом пропитки в лабораторных условиях .....</i>	<i>150</i>
<b>Выводы к главе 7 .....</b>	<b>161</b>

<i>Заключение.....</i>	<i>163</i>
<i>Список литературы.....</i>	<i>166</i>
<i>Приложения .....</i>	<i>180</i>
<b>Приложение №1. Патент №226929. Емкость лабораторной установки для исследования характера распространения инъекционного раствора для закрепления грунта .....</b>	<b>180</b>
<b>Приложение №2. Патент № 2785603. Инъекционный раствор для закрепления пескосодержащего массива .....</b>	<b>181</b>
<b>Приложение №3. Характеристика песчаных грунтов .....</b>	<b>182</b>
<b>Приложение №4. Акт об опытном испытании инъекционного раствора на основе алифатической эпоксидной смолы .....</b>	<b>184</b>



## **Введение**

### **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 ( $K_f \leq 2-5$  м/сут) [16,17,43,47,78,88,90,145,155]. В таких условиях инъекция может привести к нарушению сплошности грунтового массива, что делает необходимым разработку новых рецептов 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» [91] 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., Аскалонов В.В., Банник Г.И., Безрук В.М., Бражник И.А., Воронкевич С.Д., Герсеванов Н.М., Гольдштейн М.Н.,

Гончарова Л.В., Евдокимова Л.А., Ибрагимов М.Н., Жинкин Г.Н., Крутов В.И., Камбефор А., Ларионова Н.А., 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., Шишкин 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., Воронкевич 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 Е.Н. Огородникова, С.Д. Воронкевич, 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, не смотря 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 данного вопроса побуждает современных авторов решать вопросы создания новых рецептур вяжущих. По мнению автора, синтетические смолы выгодно отличаются на фоне остального широкого спектра инъекционных вяжущих, 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 [66].

### **Цель и задачи 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.

Основные задачи исследования сводились к следующему:

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 различного гранулометрического, минерального и химического состава;
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, 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**

Объектом настоящего исследования являлись песчаные грунты различного гранулометрического, минерального и химического состава, генезиса и возраста. Автором была собрана коллекция техногенных, аллювиальных, флювиогляциальных и морских песчаных грунтов юрского, мелового, плейстоценового и четвертичного возраста. По гранулометрическому составу образцы песчаных грунтов варьируются от тонкозернистых до средне-крупнозернистых, по минеральному составу от аркозовых до граувакковых. В рамках исследования изучались модельные песчаные грунты с заданным минеральным составом, а также искусственными поверхностными пленками. Техногенные и аллювиальные грунты изучались как в массиве, так и в нарушенном сложении в лабораторных условиях.

### **Предмет исследования**

Предметом настоящего исследования является выявление закономерностей влияния геологических факторов на эффективность упрочнения песчаных грунтов растворами алифатических эпоксидных смол.

### **Научная новизна**

1. Выявлено влияние геологических факторов: гранулометрического, минерального, химического состава песчаных грунтов, а также состава водорастворимых солей, на эффективность использования разработанной оригинальной рецептуры.
2. Разработан и защищен патентом RU 2785603 C1 [66] 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 [65].
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 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 комбинации лабораторных и полевых исследований: инъекционные колонны, стендовые испытания и 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 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 авторской рецептуры для химического инъекционного закрепления грунтов;
- в разработке методики лабораторного исследования песчаных грунтов как объектов технической мелиорации;
- в разработке стендовой 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 порообразующих 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.

### **Степень достоверности**

Достоверность полученных данных обосновывается стандартными методиками пробоотбора, хранения и транспортировки, а также подготовки и изучения образцов, использованием различного современного и ежегодно поверяемого оборудования, а также большим количеством образцов и проб, обеспечивающих высокую статистическую достоверность полученных результатов.

### **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 геолого-геофизическая 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 6 публикациях, в том числе в 3 публикациях в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.6.7. Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение:

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.
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.
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.

Иные научные издания:

4. Царев М.А., Лободенко И.Ю., Малофеев А.А., Еремина Н.Е., Ермолинский А.Б., Чернов М.С., Самарин Е.Н., Пензев А.П. Изучение фильтрационных свойств барьеров безопасности для захоронения радиоактивных отходов на примере глиноземистого бетона // Гидросфера. Опасные процессы и явления. – 2024. – Т. 6. - № 1. – С. 52-75.

5. 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.

6. 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.

В процессе выполнения научной работы также были получены следующие патенты:

7. 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 (Приложение №1).

8. 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 (Приложение №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, помощь 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 помощь 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. Фуниковой, 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, советы и критические замечания в подготовке и проведении опытно-промышленных работ, выражает благодарность студентам и аспирантам геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова А.В. Шеховцовой, А.Б. Ермолинскому, С.С. Летуновской, М.С. Гравис, С.В. Томасенко, Г.А. Лебедеву, Г.Д. Немцеву, а также ведущему специалисту ООО «ИГИИС» Н.А. Журавлевой.

*Также автор выражает благодарность семье (Наталье Анатольевне, Елене Петровне и Алине Григорьевне) и друзьям за поддержку во время проведения и написания диссертационного исследования.*

## **Глава 1. Современные представления о химическом инъекционном закреплении песчаных грунтов**

Задачи, связанные с глубинным преобразованием грунтовых массивов с целью повышения их прочности, несущей способности, контроля за распределением напряжений и другими характеристиками, в современных сложных инженерно-геологических условиях нередко требуют применения методов физико-химической мелиорации грунтов. Данная группа методов позволяет добиться целенаправленного улучшения свойств грунтов на значительных глубинах, что особенно актуально для территорий со сложными инженерно-геологическими условиями. Как отмечается в работах С.Д. Воронкевича [16,17], методы физико-химической мелиорации классифицируются по физико-технологическим признакам на две основные категории:

- инъекционная, буросмесительная и струйная обработка грунтов с использованием вяжущих и других химически активных веществ;
- термическое и электрическое воздействие на грунтовые массивы.

Каждый из этих методов обладает уникальными особенностями и применяется в зависимости от специфики грунтовых условий и поставленных инженерных задач.

В рамках настоящего исследования основное внимание уделено вопросам глубинной инъекционной обработки дисперсных грунтов растворами химических вяжущих, которая представляет собой один из ключевых методов целенаправленного улучшения свойств грунтов для решения широкого спектра геотехнических задач. Современные методы глубинной обработки массивов грунтов с применением вяжущих материалов можно подразделить на две основные группы: к первой – инъекционные методы, к которым, как правило, относят инъекцию с однородной пропиткой грунта, разрывную инъекцию, уплотнительную инъекцию, а также струйную технологию; ко второй – методы глубинного перемешивания или буросмесительные технологии [6,8,16].

Основной целью такого рода мероприятий является увеличение несущей способности массивов грунтов (силовая инъекция) или снижение их фильтрационной способности с использованием противofильтрационных материалов – тампонажная инъекция [16].

Опыт применения инъекционных методов обработки грунтов, с одной стороны, может считаться распространенным: гидротехническое строительство и создание противofильтрационных завес, тоннельное строительство, укрепление грунтов при проходке шахт и других горных выработок, противодействие опасным геологическим процессам, а главное, усиление грунтов оснований при возведении зданий и сооружений. Однако, с другой стороны, практическая сторона вопроса является менее изученной и сталкивается с большим количеством сложностей, в основном, вследствие единичного применения тех или иных

технологий, слабо разработанной опытно-промышленной базы актуальных лабораторных и полевых исследований, отсутствие специализированной нормативной литературы, недостаток квалифицированных специалистов области технической мелиорации пород и т.д.

### **1.1. Основные способы инъекционного закрепления песчаных грунтов в массиве (в том числе, область применения инъекционной обработки массивов грунтов)**

**Уплотнительная инъекция (displacement grouting)** основана на принципе смещения грунтовых частиц радиально от разрастающегося шара раствора вяжущего, тем самым, уплотняя область грунтового массива, окружающего точку инъекции [135,140]. Как правило, в качестве инъекционного материала рекомендуется использовать высоковязкие растворы цементных суспензий. Отмечаются попытки добавления в цементную суспензию пылеватого песчаного материала, зол уноса или специальных добавок (пластификаторов) для увеличения скорости твердения раствора. В условиях относительно однородной среды в массиве грунта формируются несжимаемые бочкообразные формы [165,167].

Наилучшей областью применения данной технологии являются зоны частичного разуплотнения грунтов, массивы полускальных грунтов или области дробления и выветривания, области активизации суффозии и карстовых процессов, а также стабилизация слабых грунтов [16]. Наиболее эффективно уплотнительная инъекция исторически показывает себя при тоннельном строительстве, особенно для предотвращения нежелательных осадков. В настоящее время технология не претерпела принципиальных изменений, отмечается использование данного метода при корректировке горизонтальных смещений в тоннельном строительстве при взаимодействии с уже эксплуатируемыми сооружениями [44]. Данная методика, вследствие появления оборудования для создания экстремально высокого давления инъекции (свыше 200 МПа), в настоящее время также используется в рамках «компенсационной» инъекции, что позволяет корректировать неравномерную осадку зданий и сооружений.

**Струйная технология (jet-grouting)** берет свое начало в Японии, где в 70-х годах прошлого века был предложен метод высокоскоростной подачи цементной суспензии совместно с формированием полостей посредством подачи струи жидкости и воздуха через специальные сопла под высоким давлением (до 700 МПа) [157]. В 1974 году группой японских ученых под руководством W. Nakanishi был предложен революционный метод, известный как Chemical Churning Piles (CHCP) [154], основанный на использовании высокоскоростной струи химического вяжущего для формирования свай в грунтовой массиве. Спустя некоторое время технология была доработана [159], и в качестве основного материала начал использоваться водцементный раствор, что позволило значительно снизить стоимость работ и повысить экологическую безопасность метода.

Сущность метода состоит в размыве полости в грунтовой толще при подъеме оборудования с одновременным ее заполнением цементной суспензией. В настоящее время струйная цементация претерпела существенные изменения вследствие своего широкого применения и технического развития. Можно выделить три основных типа струйной цементации: однокомпонентная технология (jet-1), двухкомпонентная технология (jet- 2), трехкомпонентная технология (jet-3) [115,168].

**Метод глубинного перемешивания (DMM)**, как правило, применяется для слабых грунтов, таких как илы, грунты текучей консистенции, слаболитифицированные или структурно неустойчивые грунты, лессовые грунты и т.д., особенно, залегающие ниже уровня грунтовых вод, где применение стандартных инъекционных методов либо невозможно, либо не дает необходимого эффекта при закреплении. Метод глубинного перемешивания основан на размельчении грунта в массиве специальным миксером (буромесителем), без его извлечения, с одновременным введением вяжущих или химических растворов. Основные материалы, применяемые в настоящее время в качестве вяжущих, это известь и портландцемент.

Согласно С.Д. Воронкевичу [16] варианты метода глубинного перемешивания подразделяются на следующие группы:

- **Шведский метод** улучшения грунтов [114,124,148], разработанный для укрепления слабых водонасыщенных глинистых и пылеватых грунтов, представляет собой технологию, основанную на создании известково-грунтовых или цементно-грунтовых свай. Данный метод широко применяется в скандинавских странах для повышения несущей способности и стабилизации грунтовых массивов, подверженных значительным деформациям под нагрузкой. Технология предполагает механическое перемешивание грунта с вяжущими материалами с использованием специализированного буромесительного оборудования.

Метод основан на механическом перемешивании слабых грунтов с вяжущими материалами (известью или цементом) с помощью буромесителя. Модифицированные грунты значительно увеличивают несущую способность массива слабых грунтов, метод позволяет минимизировать осадки и деформации грунтовой толщи, а его применение не оказывает негативного воздействия на окружающую среду [163].

- **Японская технология** улучшения грунтов представляет собой метод, основанный на использовании вращающихся штанг с копающими и перемешивающими лопастями, закрепленными на стальной раме. Этот метод получил широкое распространение благодаря своей высокой эффективности, вариативности и способности работать на значительных глубинах (до 50 метров) [124,147].

- **Способ известковых свай** активно применяется в зарубежной практике для улучшения свойств пылеватых и глинистых грунтов. Этот метод основан на двух основных

механизмах взаимодействия системы "известковая свая – грунт": уплотнение и дегидратация грунтов в непосредственном окружении сваи, а также миграция ионов кальция ( $\text{Ca}^{2+}$ ) в окружающий грунт с последующим взаимодействием извести и глинистой компоненты грунтовой толщи.

В процессе установки известковых свай происходит увеличение их объема за счет гашения извести, что сопровождается поглощением влаги из окружающего массива грунтов. Это приводит к постепенному уплотнению и дегидратации грунтов в непосредственной близости от сваи.

Процесс дегидратации, в свою очередь, приводит к постепенному снижению влажности грунтового массива, что особенно важно при взаимодействии с водонасыщенными глинистыми и пылеватыми грунтами, склонными к значительным деформациям под дополнительной нагрузкой. В процессе гашения извести выделяются ионы кальция ( $\text{Ca}^{2+}$ ), которые мигрируют в грунтовой массив, взаимодействуя с глинистыми минералами, что приводит к формированию новых соединений, таких как низкоосновные гидросиликаты кальция [16].

- **Инъекция известковых суспензий и паст** представляет собой эффективный метод улучшения физико-механических свойств пылеватых и глинистых грунтов, применяемый в современной практике закрепления грунтов. Сущность данного метода заключается в нагнетании под давлением суспензионного раствора гидратированной извести в толщу грунта, что приводит к его структурной модификации. В процессе инъекции раствор проникает по ослабленным зонам, трещинам и порам грунтового массива, формируя систему искусственно созданных полостей и разрывных нарушений. Этот процесс сопровождается уплотнением грунта, снижением его пористости и повышением несущей способности за счет образования новых структурных связей между частицами грунта и компонентами известкового раствора [10,16]. Внедрение известковых суспензий также приводит к активации химических реакций, таким как катионный обмен и пуццолановые реакции, которые способствуют долговременной стабилизации грунтов [17].

- **Разрывная инъекция или инъекция методом гидроразрыва** представляет собой технологию, основанную на нагнетании относительно вязких растворов в грунтовой массив с целью создания искусственных разрывов и трещин, по которым происходит распространение вяжущего. Данный метод широко применяется для укрепления дисперсных слабопроницаемых грунтов, где традиционные инъекционные растворы и суспензии не способны эффективно распространяться в поровом пространстве из-за низкой проницаемости и быстрой коагуляции пор. При повышении давления нагнетания в грунте формируется сеть разрывных нарушений, которая, как правило, распространяется от точки инъекции по трем плоскостям под углами  $120^\circ$ . Распространение вяжущего вещества происходит по полостям и трещинам гидроразрыва, что

способствует формированию армирующей сетки в грунтовом массиве, повышая его несущую способность [2,88].

Основной сложностью данной технологии является контроль за развитием сети трещин и эффективностью внедрения вяжущего в грунтовый массив. В зависимости от типа используемого вяжущего, выделяют два основных класса растворов: фильтрующиеся и нефилтующиеся жидкости.

Фильтрующиеся жидкости, такие как водные растворы силикатов или полимеров, требуют меньшего давления нагнетания, а степень раскрытия трещин и распространения вяжущего регулируется давлением нагнетания [16]. Нефильтрующиеся жидкости, к которым относятся цементные суспензии и известковые пасты, формируют преимущественно вертикальные или субвертикальные сети трещин, а их распространение происходит более эффективно при поддержании давления нагнетания не ниже давления гидроразрыва [160].

Одной из ключевых проблем метода гидроразрывной инъекции является сложность контроля за эффективностью и качеством заполнения порового пространства. В неоднородном грунтовом массиве естественная сеть трещин может быть неравномерной, а степень заполнения порового пространства закономерно уменьшается по мере удаления от точки инъекции. Это обусловлено изменением фильтрационных свойств грунта, а также неравномерным распределением напряжений в массиве. В связи с этим, для обеспечения высокой эффективности метода требуется тщательный мониторинг процесса инъекции, включая контроль давления нагнетания, объема вводимого раствора и геометрических параметров сети трещин, что приводит к существенному усложнению и удорожанию инъекционного процесса [88].

- **Инъекция с однородной пропиткой** грунта представляет собой метод глубинной обработки, при котором вяжущие вещества внедряются в грунтовый массив под низким давлением, без нарушения его естественной структуры и природного сложения. Метод однородной пропитки основывается на использовании растворов низкой вязкости, проникающих в поровое пространство грунта за счет давления нагнетания, капиллярных сил и пр., что обеспечивает равномерное распределение вяжущего вещества по всему объему обрабатываемого массива.

Простота реализации и промышленного внедрения данного метода делает его одним из наиболее простых и востребованных в современной практике. Инъекция с однородной пропиткой может быть выполнена с использованием стандартного оборудования [76,82,93], что снижает стоимость работ и сокращает время их выполнения, данный метод также позволяет минимизировать негативное воздействие на окружающую среду.

Основной сложностью успешного применения технологии инъекционной обработки методом пропитки является выбор вяжущего для обработки песчаных и пылеватых грунтов.

Современная мировая практика глубинного инъекционного закрепления грунтов предоставляет широкий спектр органических и неорганических химических вяжущих для закрепления дисперсных грунтов с различными пределами применимости, основанными, в первую очередь, на проницаемости или растворопроницаемости грунтов [141,158,166]. В практике инъекционных работ оценка совместимости вяжущего и грунта осуществляется, как правило, с использованием эмпирических критериев, полученных на основе лабораторных исследований и производственного опыта. Большинство исследователей полагает, что пределом применимости инъекционных составов для пропитки массивов грунтов являются песчаные грунты с коэффициентом фильтрации от 1 м/сут или же от 2-5 м/сут [16,17,43,47,78,88,90,145,155].

Накопленный обширный практический и теоретический опыт исследователей предлагает несколько групп низковязких химических вяжущих для средних и более грубых песчаных разностей, однако мелкие пески, и тем более пылеватые, часто со значительным содержанием глинистых частиц, резко снижающих их проницаемость, накладывают ряд существенных ограничений при реализации их инъекционной обработки методом пропитки [8,16,47,58,81].

Большинство исследователей, соприкасающихся в практике с инъекционными методами закрепления грунтов, сходятся во мнении, что изучение низкопроницаемых песчаных грунтов, как объекта технической мелиорации, является актуальной задачей как с точки зрения практической необходимости, так и с точки зрения научного аспекта.

## **1.2. Органические и неорганические вяжущие, используемые в практике технической мелиорации песков**

В современной практике технической мелиорации используется множество вяжущих, применяемых для решения большого количества научных и практических задач. В зависимости от условий и факторов применяют либо суспензионные, либо химические растворы. Выбор рабочего раствора, как правило, обуславливается его реологическими и технологическими свойствами, которые более подробно рассмотрены многими авторами [10,16,47,77,81,90].

Закрепление грунтов инъекционными методами осуществляется, как правило, с использованием различных видов цемента. Более 90% всех преобразованных грунтов на планете подвергались обработке вяжущими на основе цементной суспензии [145]. Использование цемента, как основного вяжущего, обусловлено простотой его применения, дешевизной, а также возможностью прогнозирования надежности модифицированных грунтов [43].

В современной практике принято подразделять цементные суспензии, в зависимости от реологических свойств, на стабильные и нестабильные.

Нестабильные растворы, к которым относятся водоцементные растворы в чистом виде или же с добавлением отошующих веществ: песка, шлаков, зол уноса и др., используются для

инъекционной обработки трещиноватых массивов грунтов или других грунтов с высокой проницаемостью.

Стабильные растворы, как правило, используются для закрепления песчаных и трещиновато-пористых пород. Стабильность растворам придается различными способами и стабилизирующими добавками: высокодисперсными глинами и бентонитами, химическими добавками (силикат натрия), поверхностно-активными веществами и различными пластифицирующими добавками.

Однако все эти виды цементных суспензий неприменимы даже для крупных и зачастую гравелистых песчаных грунтов, не говоря о более дисперсных разностях [170]. В конце 20-го века мировая строительная практика внедрила новое гидравлическое вяжущее – ультрадисперсный цемент марки «Микродур» [161]. Современная геотехника использует различное множество микро- и ультрадисперсных цементах, с площадью удельной поверхности клинкера до 20000 см<sup>2</sup>/г, в отличие от стандартных портландцементов марки М500 с удельной поверхностью 2500-3500 см<sup>2</sup>/г [152]. Вследствие чего предел применения цементных суспензий претерпел резкое изменение и снизился с  $K_f$  80-100 м/сут до 1-5 м/сут, однако данная граница применимости является теоретической [43].

Относительно низкая проницаемость большинства литологических типов дисперсных грунтов обусловила интенсивное развитие рынка химических вяжущих для инъекционной обработки грунтов, особенно с использованием метода пропитки.

Силикат натрия или жидкое стекло ( $R_2O \times nSiO_2$ ) представляет собой наиболее широко используемое и экологически безопасное вяжущее вещество, выполняющее, по большей части, роль тампонажного материала.

Впервые инъекционное закрепление трещиноватых скальных грунтов путем инъекции концентрированного силикатного вяжущего была апробирована и запатентована И. Езерским [16,145]. Использование жидкого стекла с применением хлорида кальция (метод двурстворной силикатизации) было опробовано и запатентовано Г. Иостеном несколько позднее [16] в 1925 г. Основной областью применения данного метода являлось снижение водопритока в шахты и горные выработки. Однако при использовании двурстворного способа силикатизации возникает высокая неоднородность закрепленного массива, достигается небольшой радиус закрепления, также данный способ более сложный в реализации по сравнению с одностворной схемой, которая и является наиболее распространенной в настоящее время.

В отечественной практике первое внедрение способа двурстворной силикатизации было выполнено Б.А. Ржаницыным в 1933 г.: при проходке первого радиуса метрополитена возникла необходимость усиления грунтового основания дома № 16 по улице Коминтерна [81].



Применение силиката натрия [28] в качестве однорастворного метода силикатизации [80] обусловлено высокой проникающей способностью, способностью к быстрому гелеобразованию и устойчивостью к воздействию водной среды, что делает его эффективным и экономически привлекательным вяжущим для закрепления песчаных и пылеватых грунтов. Силикат натрия имеет крайне высокую разбавляемость, а для ускорения процесса поликонденсации используются следующие отвердители:

- Кремнефтористоводородная кислота ( $\text{H}_2\text{SiF}_6$ );
- Алюминий сернокислый ( $\text{Al}(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ );
- Двуокись углерода ( $\text{CO}_2$ );
- Щавелевая кислота ( $\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$ );
- Хлористый кальций ( $\text{CaCl}$ );
- Алюминат натрия  $\text{NaAlO}_2$  и многие другие.

Большинство исследователей отмечает, что сложность в четком регулировании времени гелеобразования и низкая адгезионная прочность грунтовых композитов с применением силикатов натрия ограничивают его применение в качестве силовой рецептуры [118], вследствие чего в современной практике происходят попытки использования различного рода добавок для улучшения его эксплуатационных характеристик: фосфорная кислота ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ), борная кислота ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ), формамид ( $\text{CH}_3\text{NO}$ ), этилацетат ( $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$ ), глиоксаль ( $\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_2$ ) и др.

В отечественной, и по большей части, зарубежной практике наибольшее применение и распространение получили методы смолизации [112]. Одним из первых химических органических вяжущих, успешно внедренных в промышленное использование, принято считать акриламид, впервые испытанный и запатентованный [122] группой американских ученых в 1953 году. Революционной данная технология считалась вследствие возможности регулирования времени гелеобразования рабочего раствора, а также возможности его практически неограниченного разбавления водой.

Фенол-формальдегидные смолы (ФФС) нашли активное производственное применение в конце 50-х годов XX века. Использование ФФС повысило спрос геотехники и строительства на химические вяжущие вследствие их высокой проникающей способности (низкой вязкости (5 – 10 сантипуаз (сП))), высокой прочности модифицированного массива, а также устойчивости при хранении в водонасыщенных условиях [162].

К 1990-м годам стало очевидным, что фенолформальдегидные смолы могут оказывать негативное воздействие на окружающую среду и здоровье человека из-за выделения токсичных веществ (фенола и формальдегида) в процессе отверждения и эксплуатации. Начиная с 2000-х

годов использование ФФС запрещено в большинстве стран в качестве вяжущего для закрепления грунтов [87].

На замену ФФС пришли более экологические и безопасные вяжущие – полиуритановые и акриловые смолы. Начиная с 60-х годов прошлого века активно используются карбамидные смолы [99,171,172], особенно со сниженным содержанием свободного формальдегида ( $<1\%$ ) [111,134,142,143].

Также некоторую популярность в нашей стране получили акрилатные [11,49,55,123] и фурфурол-анилиновые смолы или фурфурол-ацетоновые смолы с применением в качестве сополимеров меламина, фурфурола, анилина, ацетона и пр. Отмечается также и применение резорцин формальдегидных смол [71], выгодным отличием которых является возможность твердения в любых инженерно-геологических условиях [52,53,54].

В процессе развития лаборатории грунтоведения и технической мелиорации грунтов в МГУ им. М.В. Ломоносова особое внимание уделялось относительно новым химическим вяжущим составам [1,20,21], например: ТЭГ-1 [22], преимуществом данного состава являлась особо высокая растворимость в воде без потери возможности гелеобразования в различных температурных условиях.

Основное внимание при разработке новых методов и вяжущих для технической мелиорации в рамках отечественной школы мелиорации грунтов уделялось С.Д. Воронкевичем, который продвигал идеи большого потенциала инъекционной технологии закрепления грунтов в строительстве и вопросах природоохранных мероприятий [16].

В 1981 г. группой ученых по руководством С.Д. Воронкевича в МГУ им. М.В. Ломоносова был запатентован новый состав [22] для инъекционного закрепления грунтов с использованием алифатической эпоксидной смолы, полиэтилен полиамина и хлористого натрия для защиты от размыва основания гидротехнического сооружения.

Наиболее известным в то время, взятым за основу, был состав на основе гексаметилентриамина и эпоксидной смолы с добавлением спиртово-ацетоновых растворов суммарных сланцевых фенолов [18], а также состав на основе эпоксидной смолы с использованием растворителя [19]. Основными недостатками данной группы растворов отмечалась высокая вязкость, пожароопасность, низкая термическая устойчивость, а также невозможность использования их при закреплении засоленных грунтов.

Предложенная рецептура готовилась на основе концентрированного раствора хлористого натрия, вследствие чего достигалась инертность по отношению к засоленным грунтам и солесодержащим породам, а высокий pH раствора делал возможным его использование для закрепления карбонатных и загипсованных грунтов.

Отмечается, что начальная вязкость состава снизилась до 2,0-3,5 сП, а время гелеобразования регулировалось в пределах 30-150 минут при нормальных условиях.

В последние десятилетия особую популярность набирает раствор коллоидного кремнезема ( $\text{SiO}_2$ ), относящийся, к так называемым наноматериалам [83,84,86], интенсивное использование которого в мировой практике начинается в конце XX века [110,117,118,119,120,129,130]. Этот суспензионный раствор имеет низкую вязкость, сопоставимую с водой, и незначительную плотность; диаметр частиц кремнезема в выпускаемых промышленных продуктах имеет широкий диапазон от 6 до 100 нм, что обуславливает его более высокую проницаемость [137,138]. Коллоидный кремнезем получают из насыщенного раствора кремневой кислоты с формированием Si-O-Si (силоксановых) связей [3,5]. Рост молекул по указанному механизму приводит к образованию частиц, размер которых можно технологически контролировать в пределах 20-100 нм [4,7]. Такие частицы содержат большое количество поверхностных Si-OH групп, часть которых ионизирована [50].

Для растворов коллоидного кремнезема  $\text{SiO}_2$  в качестве отвердителя наиболее часто применяется хлорид натрия 10 или 20%-ной концентрации [86], хотя могут использоваться растворы других хлоридов и даже цементная суспензия [121]. Изначально большинство исследований по применению коллоидного кремнезема было сосредоточено в США [133,136,151] и затем – в Китае [144,149,150,169], что обусловлено, прежде всего, климатическими факторами.

Основной особенностью использования указанного вяжущего следует считать температурный диапазон его применимости, а именно, не ниже 20-25°C. В настоящее время этот инъекционный материал получил широкое распространение в мировой практике [117], причем в самых разнообразных областях инженерной деятельности: туннельное строительство [116]; защита трубопроводов и предотвращение утечек воды из коммуникаций, а также обеспечение неподвижности (иммобилизация) токсикантов в массивах дисперсных грунтов [156]; удаление загрязняющих веществ из массивов дисперсных грунтов, образование непроницаемых барьеров, тампонаж промысловых нефтяных скважин; воздействие на пески для предупреждения их динамического разжижения [126,128]; тампонажное уплотнение массивов пылеватых и песчаных грунтов [86]; создание проницаемых защитных геохимических барьеров [84,87].

Как показывает мировой опыт, самостоятельные растворы коллоидного кремнезема следует рассматривать как тампонажные [117]. Попытки многих авторов разработать вариант силового варианта рецептуры на основе коллоидного кремнезема, обеспечивающего прочность на раздавливание закрепленного грунта более 1 МПа, долгое время были безуспешными вследствие климатических особенностей России, где среднегодовая температура массивов грунтов, расположенных в перигляциальной зоне, редко превышает 8–14°C. Попытка

промышленного использования 15%-ого раствора коллоидного кремнезема с добавлением 10%-го раствора NaCl в качестве отвердителя даже в климатических условиях северного Кавказа по итогам инъектирования не позволила получить достаточно упрочненные массивы грунтов [84].

В то же время обработка песчаных грунтов в запарафинированных инъекционных трубках в лабораторных условиях, когда для извлечения образцов закрепленного грунта используется нагрев, позволяет получать закрепленные образцы с прочностью на одноосное сжатие до 1 МПа и более [69,86]. Совершенно очевидно, что упрочняющий инъекционный раствор на основе коллоидного кремнезема при указанных температурах грунтового массива должен предполагать дополнительный нагрев рабочего раствора в течение индукционного периода — временной интервал от введения в раствор отвердителя до его затвердевания. Такой же эффект, например, можно получить при добавлении отвердителя — любого полиамина — к алифатической эпоксидной смоле [164].

Основываясь на работах С.Д. Воронкевича, автором, совместно с коллегами [19,22], разработан оригинальный инъекционный раствор на основе алифатической эпоксидной смолы и коллоидного кремнезема [66], отверждение которого достигается добавлением полиэтиленполиамина (ПЭПА). Следует отметить, что использование коллоидного кремнезема для разведения алифатической эпоксидной смолы приводит к снижению итоговой стоимости рабочего раствора без существенного ухудшения физических и физико-механических свойств полимеризующегося на его основе геля.

Все инъекционные способы, как известно, обладают своими границами применимости, данные ограничения принято обосновывать исходя из водопроницаемости и гранулометрического состава. Эффективность закрепления массивов дисперсных грунтов во многом определяется пределами проницаемости растворов вяжущих. На рис.1 представлена диаграмма С.Д. Воронкевича [16,17], демонстрирующая способы инъекционного закрепления в зависимости от типов грунтов и их примерных коэффициентов фильтрации.

Данная диаграмма иллюстрирует оптимальные диапазоны применения наиболее распространенных инъекционных составов в зависимости от гранулометрического состава грунтов и их коэффициентов фильтрации. Отметим, что приведённая классификация учитывает рецептуры с низкой концентрацией вяжущих, что существенно увеличивает проникающую способность рабочего раствора, но, с другой стороны, приводит к существенному снижению эффективности применения для инъекционного закрепления.

Различные авторы отмечают, что те или иные способы подходят для закрепления мелкозернистых и пылеватых песков. Однако, упоминаний о закреплении пылеватых песков

инъекционными методами на основе пропитки в мировой и отечественной литературе, на настоящий момент, не встречено.

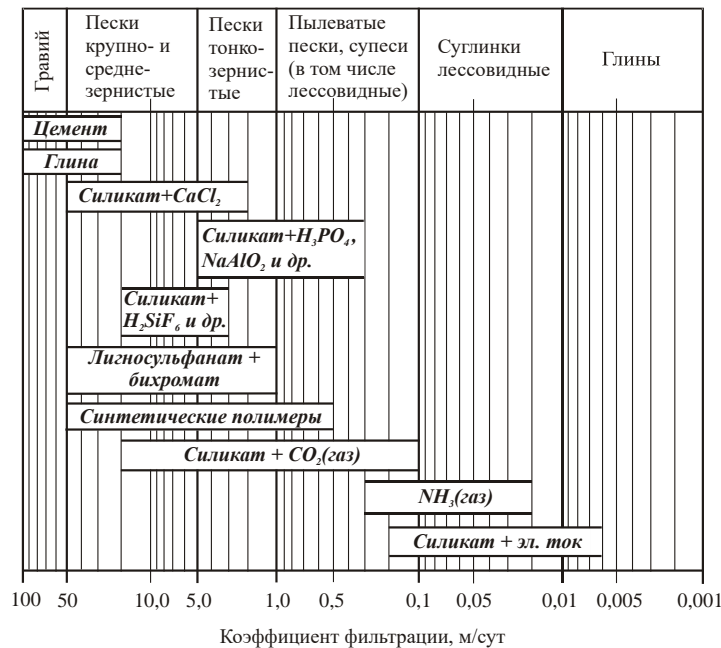


Рис. 1. Пределы применимости наиболее распространенных методов инъекционной обработки дисперсных грунтов [17]

На рис. 2 показана диаграмма Р. Кэрола [146], на которой изображены пределы применимости различных инъекционных растворов в зависимости от гранулометрического состава грунтов.



Рис. 2. Предел применимости различных инъекционных растворов (черный цвет) [146] и область применения кремнеземисто-эпоксидного состава (красный цвет)

В работах Р. Кэрола [146] показано, что инъекционные растворы с вязкостью менее 2 сП, например, на основе акриламидных смол, без проблем инжектируются в грунты с коэффициентом

фильтрации ( $K_f$ ) до  $10^{-1}$  м/сут. Растворы с вязкостью до 5 сП, такие как фенопласты, могут применяться в грунтах с  $K_f$  не менее 1 м/сут, а с вязкостью до 10 сП – только в грунтах с  $K_f$  не ниже 10 м/сут. При этом возникают трудности при использовании любых инъекционных растворов в грунтах с содержанием пылеватых частиц более 20 % (при условии, что при инъекции методом пропитки не возникает гидроразрыва в грунтовом массиве) [16,88]. Необходимо отметить, что для песков в рыхлом сложении проницаемость большинства инъекционных растворов увеличивается приблизительно на один порядок [16,17]. Диаграмма, представленная на рис. 2, более точно отражает инъекционные пределы применимости рабочих растворов на основе различных типов вяжущих, так как составлена на основе результатов полевых и лабораторных исследований.

Таким образом, анализ проблематики вопроса инъекции методом пропитки по литературным источникам подтверждает трудности инъекционного закрепления мелкозернистых и пылеватых песчаных грунтов. Существующие растворы не обладают достаточным пределом проницаемости для равномерной пропитки порового пространства массивов, сложенных такими грунтами. Радиус закрепления ограничен, а при разбавлении растворов структурная прочность модифицированного массива является неудовлетворительной.

### **1.3. Песчаные грунты как объект химического инъекционного закрепления**

Песчаные грунты представляют собой самостоятельный петрографический тип, входящий в большую группу обломочных осадочных образований.

#### **Влияние гранулометрического состава**

Относительное содержание зерен различного диаметра является важнейшей характеристикой с точки зрения технической мелиорации грунтов. Гранулометрический состав песков обуславливает не только их физико-механические свойства, но и потенциальную возможность их обработки [72].

Грубозернистые (размер преобладающей фракции 1-2 мм) и крупнозернистые (0,5-1 мм) пески обладают схожими характеристиками. Величина удельной поверхности достаточно низкая и составляет первые десятки  $\text{см}^2/\text{г}$ , следовательно, такие пески являются мало физико-химически активными, что объясняется их низкой дисперсностью.

Удельная поверхность среднезернистых песков (0,25-0,5 мм) больше и составляет от 100 до 500  $\text{см}^2/\text{г}$ . С точки зрения современного опыта инъекционного закрепления песчаных грунтов, данные фракции песчаных грунтов являются наиболее изученными, а опыт их закрепления наиболее обширный, что обусловлено, в первую очередь, их высокой проницаемостью.

Мелкозернистые пески (0,1-0,25 мм) характеризуются высокой удельной поверхностью (от 600 до 1000  $\text{см}^2/\text{г}$ ) и относительно высокой сорбционной способностью. Это обуславливает наличие на поверхности зёрен большого количества аутигенных плёнок.

Тонкозернистые и пылевато-глинистые пески (размер частиц менее 0,1 мм) отличаются высокой степенью дисперсности. Зачастую, наиболее дисперсные фракции представлены глинистыми минералами. Данные грунты способны к прогрессирующей суффозии и легко могут переходить в плавунное состояние.

Значения параметров гранулометрического состава мелкозернистых и тонкозернистых песков, характеризующие распределение частиц по крупности, составляют:  $d_{90}=0,1$  мм,  $d_{50}=0,05$  мм,  $d_{10}=0,002$  мм ( $d_{90,50,10}$  – диаметры частиц, составляющих в грунте 90, 50 и 10% соответственно) [16]. Данные значения представляют собой нижний предел дисперсности, характерный для песчаных грунтов. При этом указанные параметры совпадают с минимальной границей применимости используемого автором метода технической мелиорации – инъекционной пропитки грунтов. Это обусловлено тем, что дальнейшее уменьшение размеров частиц приводит к снижению предельной проницаемости грунта, что существенно ограничивает эффективность проникновения инъекционных растворов и их равномерного распределения в массиве. Таким образом, для грунтов с тонкодисперсной структурой (например, пылеватых песков, супесей и песчанистых суглинков) применение данного метода становится технически сложным и требует разработки альтернативных решений по проведению инъекционных работ.

Гранулометрический состав, как правило, используется для оценки растворопроницаемости песчаного массива. Часто используемыми считаются: критерий растворопроницаемости по Мичеллу [155], критерий Адамовича [2], Кинга-Буша [16], Хазена [16] и некоторые другие.

Увеличение дисперсности грунта ожидаемо приводит к росту количества контактов между затвердевшим инъекционным раствором и песчаными зернами, что обуславливает рост прочности модифицированных грунтов [82].

### **Влияние минерального состава**

Минерально-петрографический состав песчаных грунтов характеризует содержание в них основных породообразующих, акцессорных минералов и обломков различных горных пород. Известно, что в песках встречается более 200 различных минералов и обломков горных пород, однако, к породообразующим можно отнести лишь несколько десятков из них [102]. Именно содержание основных породообразующих минералов в песчаных грунтах заслуживает внимания в данной работе, так как содержание этих минералов непосредственно влияет на их дисперсность, однородность, морфологию отдельных зерен, следовательно, и на эффективность обработки химическими вяжущими. Следует отметить важность и аутигенных компонентов, наибольшее значение для закрепления которых оказывает присутствие глинистых минералов, наличие карбонатов, сульфатов, солей, оксидов и гидроксидов железа, марганца, алюминия и пр. [45].

В качестве главных породообразующих минералов в песках могут находиться кварц, полевые шпаты, слюды, роговая обманка, кальцит, гипс и пр. Наиболее распространенными в составе песков являются кварц и полевые шпаты. К второстепенным относятся минералы (слюды, амфиболы, пироксены, обломочный глауконит и т.д.) или обломки пород, присутствующие в количестве от 1 до 10% каждый, сумма примесей не должна превышать 20% обломочной части.

Чаще всего в минеральный состав песчаных грунтов входят следующие элементы: кварц – 70%, полевые шпаты – 8%, каолинит – 8%, кальцит – 7%, доломит – 3%, хлорит – 1%. Остальные минералы имеют подчинённое значение и их содержание составляет до 3 % [45].

В отечественной литературе общепринятой классификацией песков по минеральному составу считается классификация, предложенная П.И. Фадеевым в 1951 г [74,75].

В литологии, исходя из признаков степени однородности минерального состава, пески чаще всего подразделяют на три группы:

1. Однородные (мономинеральные);
2. Олигомиктовые (смешанные, состоящие из двух-трех минералов, один из которых преобладает);
3. Неоднородные, полимиктовые, (полиминеральные), включающие несколько минералов, в том числе обломки различных пород.

Граница первой группы с остальными, обычно, проводится по количеству единого породного комплекса от 80-90% и более, второй и третьей – от 60 (иногда 50%) до 80-90%. Также, довольно распространенной является классификация Н.В. Логвиненко [74].

Для классифицирования песчаных грунтов по минеральному составу широко используется диаграмма В.Д. Шутова (рис. 3) [104].

Кварцевые пески являются наиболее распространенными мономинеральными песчаными породами, переработанными и многократно переотложенными, в результате чего в составе остается наиболее химически и физически устойчивый минерал – кварц [72,100]. Кварцевые мономинеральные пески встречаются редко, а полевошпатовые, карбонатные и глауконитовые пески – крайне редко.

Наибольшее распространение получили полиминеральные пески. По составу они, зачастую, представляют собой смесь кварца, полевого шпата и обломков горных пород. Полиминеральные пески часто имеют аквальный или ледниковый генезис. Достаточно разнообразны по своему минеральному составу пески пустынь, так как, образуясь в результате механического выветривания в аридных условиях, они часто состоят из минералов, которые в более влажных условиях не сохраняются в виде зерен. К таковым относят полевые шпаты, гипс, различные тяжелые минералы, а также глинистые агрегаты [46].



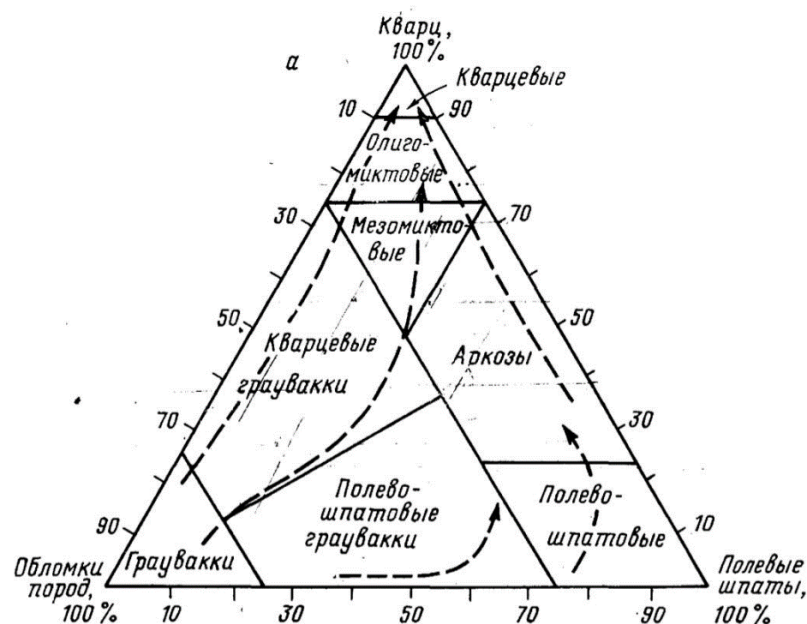


Рис. 3. Классификационная диаграмма песков минерально-петрокластического класса

В.Д. Шутова [104]

Полевые шпаты в песках содержатся в меньшем количестве, так как обладают более открытой по сравнению с кварцем кристаллической решеткой с низкой прочностью связей между отдельными кремнекислородными тетраэдрами, что приводит к быстрой деградации структуры в условиях гипергенеза [104,106].

В большинстве регионов России в составе песчаных грунтов содержится малое количество водорастворимых солей (содержание не превышает 0,01%) [74]. Однако, в районах, расположенных в южной части страны, пески с высоким содержанием солей встречаются довольно часто. Доля легкорастворимых солей в составе может превышать 0,3% [16]. Такие грунты чаще всего имеют морской генезис. В песках пролювиальных, аллювиальных и других видов континентальных отложений высокое содержание солей объясняется засолениями, вызванными поднятием уровня грунтовых вод вследствие естественных или антропогенных причин.

В песках морского генезиса, в свою очередь, может увеличиваться доля карбонатов за счёт включения обломков раковин донных организмов. Во многих случаях в составе песков содержится железо в различных формах: в зоне аэрации железо накапливается в виде окисных соединений, в зоне водонасыщения — в закисной форме [102,103]. Сульфаты встречаются, главным образом, в почвах песчаного состава полувзасушливых и засушливых регионов.

Таким образом, минеральный состав является одним из важных факторов при выборе инъекционного раствора, так как минералы, входящие в состав грунта, обладают различными способностями к взаимодействию с вяжущими. Причиной этого является адгезионная способность различных минеральных поверхностей к взаимодействию с полимерными

молекулами образующихся гелей. В связи с этим С.Д. Воронкевич [15,16] разделил минералы в зависимости от их энергетической способности на следующие четыре группы:

1. Минералы с высоким положительным потенциалом и большим количеством адсорбционных центров на поверхности частиц в виде катионов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$ . К этой группе относятся такие минералы как кальцит и доломит.

2. Минералы с высоким отрицательным потенциалом и значительным количеством слабых адсорбционных центров на поверхности частиц в виде ионов  $\text{O}^{2-}$ . К этой группе относятся кварц, каолинит, вулканический туф.

3. Минералы с низким отрицательным потенциалом в связи с наличием на поверхности частиц компенсирующих катионов  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ . К этой группе относятся полевые шпаты, гипс, слюда и др.

4. Минералы с преимущественно нейтральной поверхностью (тальк, гранит) [61].

Зависимость прочности песчаных грунтов, закрепленных способом газовой силикатизации, от минерального состава смесей приведена на рис.4. Компоненты инъекционных растворов неодинаково взаимодействуют с различными по составу минеральными поверхностями, что проявляется в изменении углов краевого смачивания [16]. В исследованиях, проведенных Е.Н. Огородниковой [61], показано, что для кварца значение смачивания карбамидной смолой в 2 раза выше, чем для кальцита, что объясняется противоположными по знаку зарядами поверхностей (рис. 5).

Кварцевые пески довольно хорошо вступают в реакцию с большинством инъекционных материалов. Глинистые минералы (наиболее характерные для песков элювиального генезиса) обладают высокой ёмкостью катионного обмена (ЕКО), а на поверхности частиц расположено большое количество адсорбционных центров.

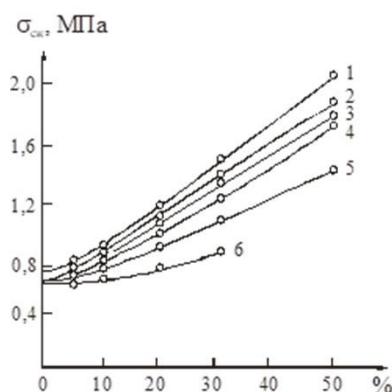


Рис. 4. Зависимость прочности на одноосное сжатие песчаных грунтов, закрепленных способом газовой силикатизацией, от процентного содержания примесей различного минерального состава: 1 – кальцит; 2 – глауконит; 3 – микроклин; 4 – роговая обманка; 5 – кварц; 6 – мусковит [16]

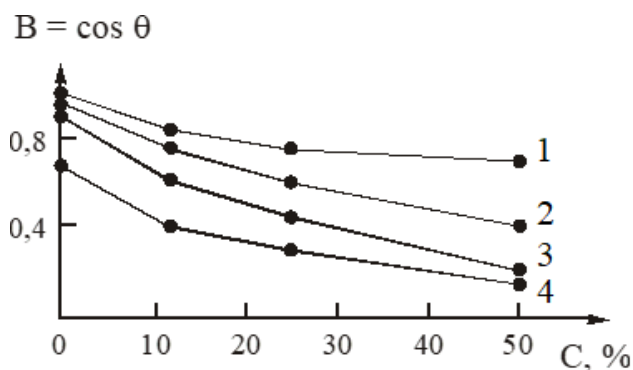


Рис. 5. Изотермы смачивания различных минералов карбамидной смолой:

1- кварц; 2 – микроклин; 3 – роговая обманка; 4 – кальцит [16]

Увеличение доли карбонатных и глинистых минералов способствует возрастанию физико-химической активности песчаных грунтов. В исследованиях, проведенных Б.А. Ржаницыным [78,81,82], отмечена двоякая роль карбонатов при инъекционной обработке песчаных грунтов методом смолизации. Так, как с одной стороны, они способствуют созданию толстых и плотных пленок инъекционного раствора вокруг песчаных частиц, а с другой – приводят к частичной сорбции отвердителя и препятствуют протеканию реакции поликонденсации смолы. Повышенное содержание полевых шпатов, слюды, роговой обманки и других минералов, относящихся к третьей группе (по С.Д. Воронкевичу), снижает физико-химическую активность песков при взаимодействии с инъецируемыми растворами за счёт меньшего количества адсорбционных центров на поверхности песчаных частиц (по сравнению с минералами второй группы).

Роль глинистых частиц также весьма значительна и двойственна: с одной стороны, высокая физико-химическая активность глинистой фракции обуславливает повышенные значения прочности, а с другой – присутствие глин снижает проницаемость и радиус инъекционного закрепления [16]. Также отмечено, что наличие в песчаных грунтах примесей карбонатов и глин увеличивает время гелеобразования [60]. Гумусовые вещества, содержащиеся в грунте, оказывают негативное влияние на его упрочнение. Их воздействие возрастает по мере увеличения кислотности, что связано с изменением количественного и качественного соотношения состава органических кислот в грунтах [43,90].

### **Влияние поверхностных пленок**

Аутигенные образования на поверхности зерен имеют большую роль в характеристике песков как объектов технической мелиорации [16]. Кварц в дисперсных несвязных грунтах редко встречается в чистом виде, его поверхность обычно покрыта пленками, представленными гидратами окисей железа, алюминия, кремнекислоты и органических веществ, которые образованы в результате физико-химических процессов и прочно связаны с поверхностью

минеральных зерен [72,102]. Аутигенные пленки формируются за счет разнообразных химических соединений, выпадающих из раствора обычно в виде ионов, адсорбируемых коллоидами, и в виде частиц минералов (преимущественно глинистых) [16].

Минеральный тип и строение пленок зависят от многих факторов, среди которых выделяют состав атмосферы, участие органического вещества, тектонические движения, климат, микрорельеф, характер растительности и другие, определяющие геохимическую обстановку территории и направленность физико-химических процессов на границе раздела минерал – поровый раствор [17]. Наиболее важную роль в формировании состава аутигенных образований имеет генезис песков и характер постгенетических процессов [56].

Выделяется несколько видов пленок на поверхности песчаных зерен:

1. Глинистый тип, при котором пленки связаны с поверхностью кварцевых зерен, чаще всего через обменный катион  $\text{Ca}^{2+}$ .

2. Железистый тип – оболочки представляют коллоидный комплекс, состоящий, в основном из гидроксидов железа и алюминия, прочно связанных с поверхностью песчаных зерен.

3. Переходный тип (между первым и вторым), когда вещество оболочек характеризуется низким соотношением  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ .

4. Оболочки глинистого типа, включающие: внутренний слой, состоящий из соединений железа, и внешний – представленный собственно глинистым веществом.

В аллювиальных песках образуются каолинит-гидрослюдистые, а в ледниковых — гидрослюдистые пленки. Каолинитовые аутигенные образования характерны для песчаных грунтов жаркого гумидного климата. Глинистые поверхностные пленки обуславливают более высокую адсорбционную способность, наличие обменной адсорбции и гидрофильность [53,56,57].

Наличие карбонатных поверхностных пленок характерно для морских песков, не испытывавших постседиментационных изменений [102]. Отложение карбонатов может происходить при воздействии пересыщенной морской воды, а также за счет растворения карбонатного вещества [56].

Аутигенные поверхностные пленки, преимущественно органического типа, в состав которого входят гуминовые и фульвокислоты, характерны для песчаных грунтов в гумусовых горизонтах [42].

Железистые пленки образуются при выветривании или в процессе адсорбции и последующего прочного закрепления водно-растворимых соединений железа на поверхности песчаных зерен [16]. Отмечено, что в первом случае прочность закрепления пленки на поверхности частиц существенно выше, чем во втором [74]. Железистые образования представлены либо в виде аморфной коллоидальной окиси железа, либо в гетит-гидрогетитовой

или гедрогематитовой кристаллических формах [16]. Исследование, проведенное В.М. Фридландом и И.Г. Цюрюпой показало, что наличие железистых пленок приводит к увеличению обменной емкости поверхностно-инертных минералов: кварца и уменьшению обменной емкости поверхностно-активных минералов, например, слюд [74].

Таким образом, на эффективность закрепления грунтов существенно влияют сорбционные процессы и явления, находящиеся на границе раздела «инъекционный раствор – грунт». Различие в сорбционной способности песков с различными по составу поверхностными пленками доказано исследованиями Е.Н. Огородниковой [61].

В процессе инъекционного закрепления происходит частичное поглощение компонентов вещества пленок вяжущими, что приводит к изменению его свойств. При высокой сорбционной способности грунтов наблюдается снижение прочности при удалении от точки инъекции. Исследование влияния сорбционного процесса на прочность закрепления песчаных грунтов раствором силиката натрия было проведено В.М. Голодновым [25], а также предложен вариант систематизации песчаных грунтов по степени влияния их сорбционной способности на прочность закрепления.

Определено влияние поверхностных пленок на эффективность закрепления песков способом газовой силикатизации. Образцы с железистыми или гидратированными кремнеземистыми пленками характеризуются примерно в два раза большей прочностью, чем с пленками органического состава. Низкая прочность закрепленных песков с органическими пленками обусловлена их частичным растворением, что является причиной снижения структурной прочности затвердевшего раствора и контактной связи геля с поверхностью песчаных зерен. По своему влиянию на прочность при закреплении аутигенные образования располагаются в следующий типологический ряд по убыванию: гидратированные кремнеземистые, слабожелезненные, органоминеральные, гумусовые [42,97].

Было определено влияние поверхностных пленок на прочность при закреплении песков раствором на основе карбамидной смолы. Объектом исследования послужил природный флювиогляциальный песок; модельные образцы с удаленными аутигенными образованиями и с искусственно нанесенными железистыми пленками в виде гидроксида железа; а также песчаный грунт, поверхность которого обрабатывалась парафином. По прочности при инъекционной обработке исследованные образцы образуют следующий типологический ряд: природный флювиогляциальный песок, модельные образцы с искусственно нанесенными железистыми пленками, песок с удаленными поверхностными пленками, песчаный грунт, обработанный парафином [52].

### Влияние морфологии песчаных зерен

Существенное значение в технической мелиорации грунтов имеет адгезия – прилипание жидкости или твердых тел к разнородным поверхностям, которое осуществляется за счет уменьшения свободной поверхностной энергии системы [12]. Для частиц грунта адгезия определяется силой, которую необходимо приложить к частицам для их отрыва от поверхности. Существуют разные причины адгезии частиц грунта: силы молекулярного притяжения, кулоновская, магнитное притяжение, капиллярная сила, а также расклинивающее давление тонкого слоя жидкости и химическая связь [74].

Основным элементом морфологии поверхности зерен является рельеф. От формы частиц зависит суммарная площадь поверхности. При визуальном определении песчаные зерна подразделяются на четыре группы: округлые (углы и грани не прослеживаются), угловатые (обломки с углами и ребрами), полуокруглые (обломки с признаками первой и второй групп) и обломки со сложной конфигурацией [100]. Прослеживается связь окатанности зерен с их размером (рис. 6). Наиболее хорошо окатываются грубо-, крупно- и среднезернистые песчаные частицы; мелко- и тонкозернистые частицы окатываются в меньшей степени [56].

Микрорельеф песчаных зерен зависит от условий образования и транспортировки грунтов [72]. Наиболее хорошо окатаны эоловые пески, средне – аллювиальные и пролювиальные, слабо – делювиальные. Для морских песков характерен широкий диапазон изменения окатанности – от слабой до хорошей [74].

В качестве показателей формы зерен используется окатанность и сферичность. По определению Х. Уделла сферичность – это показатель, оценивающий степень отличия зерна от сферы того же объема, что и само зерно, а окатанность характеризует степень сглаженности выступов на контуре зерна [104].

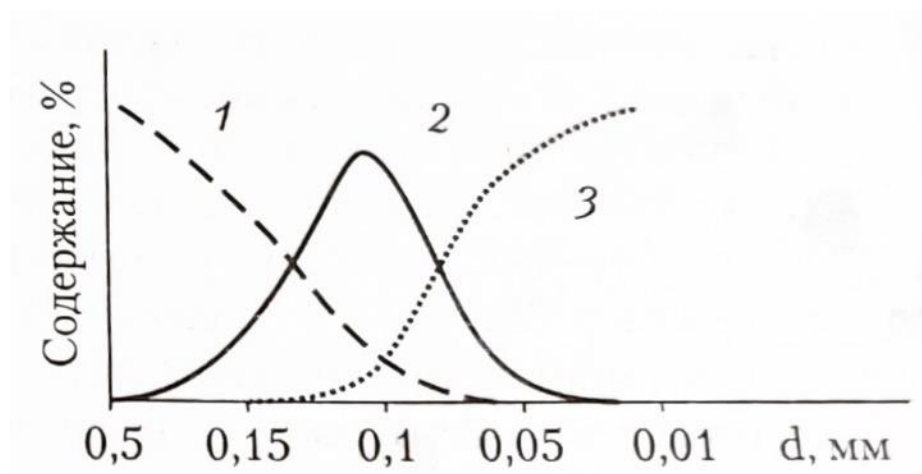


Рис. 6. Взаимосвязь окатанности зерен с их размером у песчаных грунтов

1 – окатанные зерна, 2 – полуокатанные, 3 – неокатанные [104]

### **Влияние жидкой компоненты песчаных грунтов**

Состав жидкой компоненты в песчаных грунтах разнообразен и может быть представлен неорганическими, органическими и смешанными жидкостями, а также эмульсиями. Основными водно-физическими свойствами песчаных грунтов является влажность, влагоемкость, водоотдача, капиллярность и водопроницаемость. Эти свойства обуславливают отношение песчаных грунтов к водным растворам химических реагентов, используемых для целей целенаправленного закрепления, и определяют условия инъекционного процесса [16].

Самой распространенной в песках является вода, содержащая различные растворенные соли, анионы (хлориды, сульфаты, гидрокарбонатные и смешанные поровые растворы) и катионы (кальциевые, магниевые, натриевые, калиевые и др.).

Минерализация водных растворов в песках изменяется в широких пределах и подчиняется вертикальной и климатической зональности. Тип минерализации природных вод в песках также может быть различным. По преобладающим анионам в них самыми распространенными являются гидрокарбонатные, сульфатные и хлоридные воды, а по катионам – кальциевые, магниевые и натриевые. Органические жидкости и их смеси в песках могут быть представлены природными и техногенными образованиями. Наиболее сложный и пестрый состав в песках имеют техногенные сточные воды, поступающие из различных источников загрязнений, и зачастую представляют собой комплексные загрязнители, в составе которых совместно могут присутствовать органические и неорганические компоненты [74].

Пески в зависимости от своего состава, структуры и состояния содержат различные виды воды, выделяемые в соответствии с общей классификацией воды в грунтах [39]. Связанная и адсорбционная вода в песчаных грунтах содержится в небольшом количестве. Пески не содержат осмотической воды, так как в песках отсутствует двойной электрический слой. Особенностью песчаных грунтов является наличие значительного количества капиллярной воды, относящейся к воде переходного типа.

Капиллярная вода в песках может формироваться двояко: за счет явления капиллярной конденсации, а также за счет капиллярного впитывания воды под действием сил поверхностного натяжения или по сообщающимся порам при контакте песка со свободной водой.

Крупные и средней крупности пески относятся к невлагоемким, а мелкие и пылеватые – к средневлагоемким. Характерные значения величин максимальной молекулярной влагоемкости для различных по крупности песков приведены в таблице 1. Помимо гранулометрического состава на величину  $W_{\text{ММВ}}$  влияет состав поверхностных пленок, что отмечено в работе [74].

Таблица 1

Влажность максимальной молекулярной влагоемкости фракций разной крупности  
(по А.Ф. Лебедеву) [23]

Пески	Влажность максимальной молекулярной влагоемкости, %
Крупные	1,6
Средней крупности	1,6
Мелкие	2,7
Пылеватые	9,8

Водоотдача зависит от состава грунтов, продолжительности дренирования и температуры воды [17]. Средние значения водоотдачи песчаных грунтов различного гранулометрического состава представлены в таблице 2.

Таблица 2

Средние значения водоотдачи песчаных грунтов [74]

Пески	Водоотдача, %	Коэффициент водоотдачи, д.ед.
Крупные	95-98	0,25-0,35
Средней крупности	80-90	0,20-0,25
Мелкие	50-70	0,15-0,20
Пылеватые	30-50	0,10-0,15

На высоту и скорость капиллярного поднятия влияет гранулометрический и минеральный состав грунта, тип поверхностных пленок, размеры пор и характер их распределения, состав водного раствора. Приближенные значения коэффициентов фильтрации песчаных грунтов представлены в табл. 3.

Таблица 3

Приближенные значения коэффициентов фильтрации песчаных грунтов [74]

Пески	К <sub>ф</sub> , м/сут
Грубо- и крупнозернистые	50-30
Среднезернистые	30-10
Мелкозернистые	10-2
Мелкие	2-0,1

Максимальная высота капиллярного поднятия увеличивается с уменьшением размера частиц, а влияние минерального состава носит второстепенный характер (табл. 4). Скорость капиллярного поднятия не постоянна: она максимальна в начальный момент времени, а затем постепенно снижается до нуля [9,22,41].



Приближенные значения величин капиллярного поднятия песчаных грунтов [59]

Диаметр фракций, мм	Высота капиллярного поднятия, см			
	Окатанный кварц	Остроугольный кварц	Полевой шпат	Слюда
2-1	9,0	5,5	6,8	12,3
1-0,5	14,6	13,2	13,3	20,8
0,5-0,25	26,3	25,7	23,3	32,7
0,25-0,1	61,8	56,0	49,2	65,8
0,1-0,05	82,7	100,3	99,3	122,4

Водопроницаемость песчаных грунтов определяется величиной и характером пористости, степенью однородности гранулометрического состава, количеством и качеством примеси глинистых частиц, величиной и характером поверхности минеральных зерен, составом и свойствами фильтрующейся жидкости [16].

Наличие различных форм влаги в песчаных грунтах, как правило, отмечается исследователями, как значимый фактор при инъекционных работах, однако, многие авторы [16,47,82,145] при изучении процесса инъекции водонасыщенных песчаных грунтов брали за основу тот факт, что растворы вытесняют воду из порового пространства инжектируемого массива, не смешиваясь с нею. Такое условие достижимо лишь в редких случаях, когда расчет инъекционного процесса учитывает поверхностные натяжения жидкостей, возникающих на контакте: вода-раствор-песчаный грунт.

При работе с инъекционными растворами на водной основе, которые и являются наиболее распространенными в практике технической мелиорации, такая контактная поверхность отсутствует. Опыт инъекционной обработки песчаных грунтов показывает, что распространение вяжущего, даже при обработке однородного массива происходит не равномерно, а по «основным проходам вокруг крупных частиц» [47], что приводит к разбавлению рабочего раствора в поровом пространстве.

Разбавление или разжижение [47,145] растворов вяжущего, сопровождается либо увеличением срока схватывания вяжущего, либо снижением итоговой прочности модифицированного грунта по периферии закрепленного массива, формируя, тем самым, переходную область: закрепленный-незакрепленный грунт.

### **Влияние строения песчаных грунтов**

Плотность сложения песчаных грунтов является одним из ключевых параметров, определяющих эффективность их закрепления химическими вяжущими. Этот показатель характеризует степень уплотнения грунтового массива и напрямую влияет на его физические

свойства, такие как пористость, растворопроницаемость, а также несущая способность как самого массива грунтов, так и его модифицированной области [98].

Высокая плотность сложения приводит к снижению пористости и увеличению контактной поверхности между частицами, что затрудняет проникновение вяжущих вглубь массива [17]. В таких условиях эффективность закрепления снижается, так как вяжущие материалы не могут равномерно распределиться по объему грунта. Напротив, рыхлые песчаные грунты с низкой плотностью сложения обладают высокой пористостью и проницаемостью, что способствует более равномерному распределению вяжущих растворов [16]. Однако в этом случае может потребоваться большее количество вяжущего материала для заполнения пор и достижения целевых значений прочности.

Плотность сложения песчаных грунтов также влияет на их начальные физико-механические свойства. Плотные пески обладают большим сцеплением, высоким модулем деформации и низкой разжимаемостью, что может снизить потребность в дополнительном закреплении [67]. Однако, при необходимости закрепления таких грунтов вяжущими важно обеспечить равномерное распределение раствора, что требует применения специальных технологий, таких как инъекция методом однородной пропитки [16]. В случае рыхлых песчаных грунтов, являющихся более восприимчивыми к закреплению вяжущими, для достижения значительного увеличения прочности требуется тщательный подбор состава вяжущего и технологии его внедрения [47].

Плотность сложения песчаных грунтов также влияет на процесс гелеобразования и отверждения вяжущих материалов. В плотных песках низкая проницаемость может замедлить процесс гелеобразования, особенно при использовании материалов с ограниченным временем гелеобразования или полимеризации, таких как силикатные растворы. В рыхлых песках высокая проницаемость способствует быстрому распределению вяжущих, но может привести к неравномерному отверждению из-за быстрого вымывания раствора из порового пространства [47]. Это требует применения вяжущих с регулируемым временем гелеобразования и использования технологий, обеспечивающих равномерное распределение раствора.

Песчаные грунты представляют собой сложные многокомпонентные системы, которые характеризуются специфическим строением, текстурой и структурой, определяющими их свойства и поведение в условиях внешних воздействий. Структурно-текстурные особенности песчаных грунтов формируются под влиянием различных геологических процессов, таких как седиментация, диагенез и выветривание, что приводит к образованию неоднородных и слоистых структур. Однородные и изотропные среды являются исключительными примерами, в реальности же, чаще всего техническая мелиорация сталкивается с неоднородными слоистыми грунтами [47].

Структура песчаных грунтов определяется совокупностью таких факторов, как размер, форма, характер поверхности частиц, количественное соотношение структурных элементов (зерен) и характер взаимосвязи между ними. Зерна песка могут быть округлыми, угловатыми или промежуточными по форме, что влияет на их упаковку и плотность сложения. Поверхность зерен может быть гладкой или шероховатой, что определяет силу трения и сцепления между частицами. Количественное соотношение зерен различного размера (гранулометрический состав) также играет важную роль в формировании структуры грунта, так как от него зависят пористость, водопроницаемость и механическая прочность.

Текстура песчаных грунтов отражает пространственное расположение структурных элементов и может быть слоистой, массивной или пористой. Слоистость обусловлена чередованием слоев с различным гранулометрическим составом или плотностью, что часто наблюдается в аллювиальных или морских отложениях. Массивная текстура характерна для однородных песков, а пористая – для рыхлых, слабоуплотненных песчаных разностей. Текстура напрямую влияет на фильтрационные свойства грунтов, а также на их устойчивость к внешним нагрузкам.

Строение песчаных грунтов, включая их структурные и текстурные особенности, оказывает решающее влияние на эффективность их закрепления различными вяжущими. Например, неоднородные и слоистые грунты требуют применения более сложного оборудования для инъектирования, например, манжетной колонны, или других видов сложных инъекторов, чтобы достичь равномерного распределения вяжущего в поровом пространстве песчаного массива [47].

### **Выводы к главе 1**

Таким образом, в опубликованной литературе присутствуют лишь фрагментарные сведения о влиянии минерального, гранулометрического, химического состава, плотности сложения и пр. на эффективность их закрепления методом инъекционной пропитки. Известные устоявшиеся и новые инновационные вяжущие с указанных позиций характеризуются фрагментарно, в зависимости от конкретных, в основном, практических целей исследований, гораздо реже – научных, и как правило, работы посвящены изучению одного или нескольких геологических факторов.

В мировой и отечественной литературе эффективность применения вяжущих принято характеризовать по двум ключевым особенностям песчаных грунтов – проницаемости (величине коэффициента фильтрации) и гранулометрическому составу, причем последний приобретает ключевое значение при оценке возможности использования суспензионных растворов. Накопленный опыт практического применения растворов вяжущих веществ для инъекционной обработки грунтов методом пропитки показывает следующее: закрепление мелких песчаных

грунтов проводится только в исключительных случаях, причем требует серьезной модификации состава инъекционных растворов [132], более широко распространено закрепление средних и крупных песчаных разностей [77].

Необходимо признать, что современная практика инъекционного закрепления грунтов ограничивается использованием эмпирических формул для оценки потенциала инъецируемости песчаных грунтов, главным образом из-за неоднородности массивов грунтов и специфики гидравлического распространения жидкостей в их поровом пространстве [16].

Более глубокий, хоть и трудоемкий, подход к учету геологических факторов позволяет оптимизировать процесс исследования свойств вяжущих, условий применения растворов на их основе, а также материально-техническое обеспечение при производстве работ, повысить их эффективность и обеспечить долговременный эффект укрепления грунтов. В противном случае, игнорирование неоднородности и специфики строения массивов грунтов может привести к непредсказуемому результату, например, неоднородной деформируемости модифицированного грунтового основания, что вряд ли будет способствовать нормальной эксплуатации проектируемых зданий и сооружений.

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

## Глава 2. Характеристика объектов исследования

Экспериментальные лабораторные и полевые исследования выполнены на представительной коллекции образцов (приложение № 3). Объектами исследования в данной работе являются песчаные грунты различного минерального и гранулометрического состава, возраста и генезиса, отобранные в различных районах России.

В основе принципа отбора коллекции песчаных грунтов с целью дальнейшей инъекционной обработки лежит максимально возможная изменчивость гранулометрического, минерального и химического состава песчаных разностей.

Также, в процессе проведения данного исследования использовались модельные песчаные грунты, вследствие невозможности сбора достаточного количества природных песчаных грунтов различного минерального состава, а также песков с различными аутигенными пленками. Выбор модельных грунтов был осуществлен автором с целью получения статистических закономерностей влияния конкретного фактора (к примеру, минерального состава).

### 2.1. Природные песчаные грунты

**Флювиогляциальный песок московской стадии оледенения среднеплейстоценового возраста (fgQ<sub>пms</sub>)**, отобранный в с. Овсяниково Ростовского района Ярославской области, глубина отбора 0,5-1,0 м. Песок рыжевато-коричневый, средней крупности (по ГОСТ 25100-2020 [31]) чистый, слабо отсортированный, мелко-среднезернистый, (по классификации Е.М. Сергеева [51]) (табл. 5). Интегральная кривая гранулометрического состава представлена на рис. 7. Средний диаметр частиц ( $d_{50}$ ) равен 0,32 мм, коэффициент неоднородности ( $d_{60}/d_{10}$ ) составляет 3,4. Плотность частиц грунта составляет 2,68 г/см<sup>3</sup>. Коэффициент фильтрации песчаного грунта при  $\rho=1,70$  г/см<sup>3</sup> составляет 16,0 м/сут.

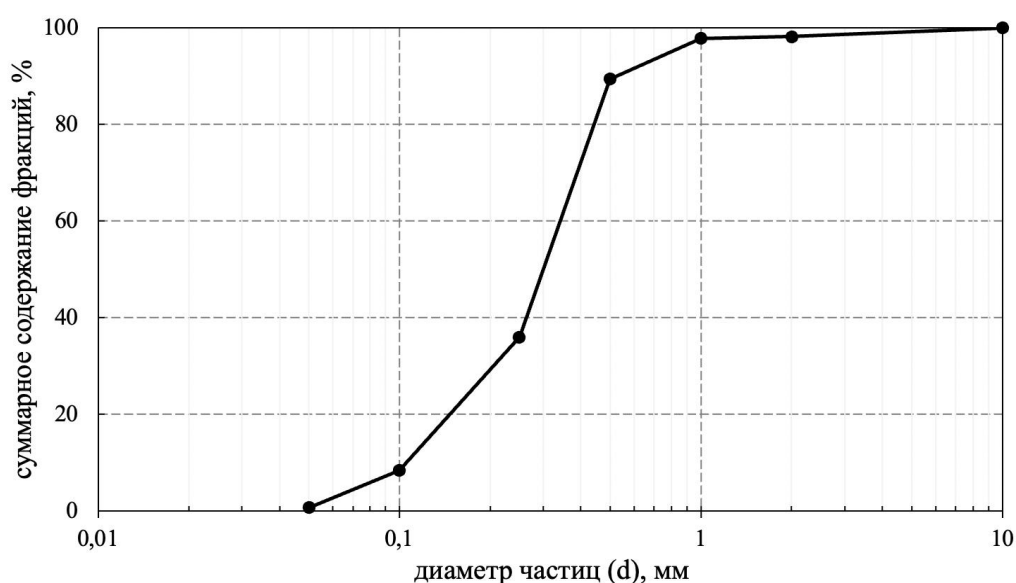


Рис. 7. Интегральная кривая гранулометрического состава песчаного грунта (fgQ<sub>пms</sub>), отобранного в с. Овсяниково Ростовского района Ярославской области

В минеральном составе преобладает кварц – до 96,5%, примеси калиевого полевого шпата и плагиоклаза незначительны и равны 2,5% и 1% соответственно. Количество роговой обманки незначительно мало, однако отмечается на дифрактограмме.

Таблица 5

Гранулометрический состав песчаного грунта (fgQ<sub>пмс</sub>), с. Овсяниково Ростовского района Ярославской области

Название грунта по ГОСТ 25100-2020 [31] / классификации Е.М. Сергеева [51]	Содержание фракции (мм), %						
	>2	2-1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	<0,05
Пески средней крупности / Пески слабо отсортированные, мелко-среднезернистые	2	0	9	53	28	8	1

Наличие водорастворимых солей [62] незначительно, согласно ГОСТ 25100-2020 [31] по засоленности легкорастворимыми солями данный песчаный грунт относится к незасоленным.

**Нижнемеловой песок икшинской свиты (K<sub>1ik</sub>)**, отобранный по адресу г. Москва, ул. Косыгина, д.20, глубина отбора 4,0-12,0 м. Песок серовато-желтый, мелкий (по ГОСТ 25100-2020 [31]), чистый, хорошо отсортированный, мелкий (по Е.М. Сергееву [51]) (табл. 6). Песчаные зерна в основном бесцветные, прозрачные, хорошо окатанные, с редкими железистыми пленками, с единичными включениями слюды. Интегральная кривая гранулометрического состава представлена на рис. 8.

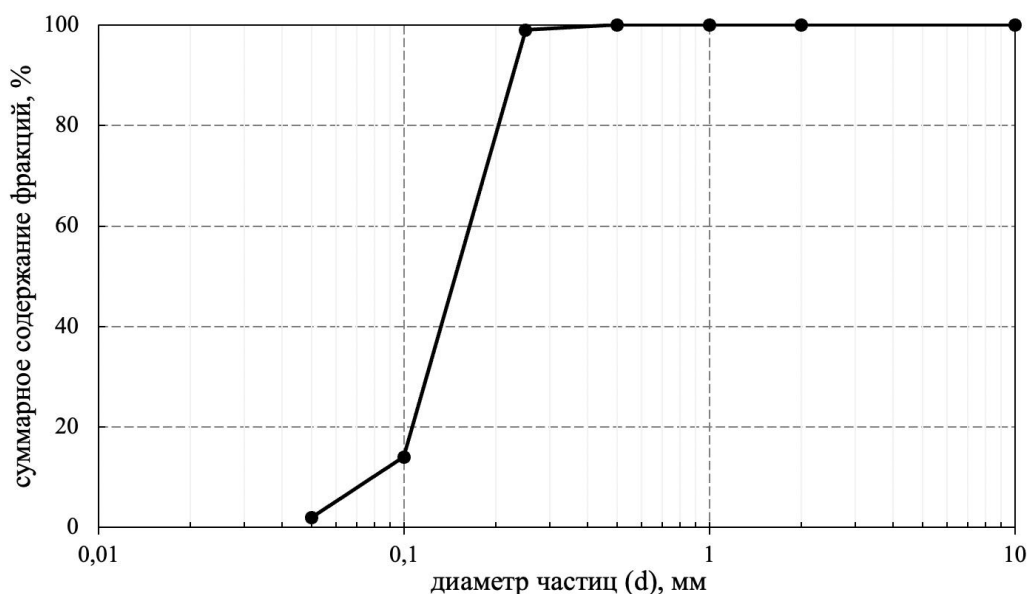


Рис. 8. Интегральная кривая гранулометрического состава песчаного грунта (K<sub>1ik</sub>), отобранного в г. Москва, ул. Косыгина, д.20

Гранулометрический состав песчаного грунта ( $K_{1ik}$ ), г. Москва, ул. Косыгина, д.20

Название грунта по ГОСТ 25100-2020 [31] / классификации Е.М. Сергеева [51]	Содержание фракции (мм), %						
	>2	2-1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	<0,05
Пески мелкие/ Пески хорошо отсортированные, мелкозернистые	0	0	0	1	85	12	2

Средний диаметр частиц ( $d_{50}$ ) равен 0,20 мм, коэффициент неоднородности ( $d_{60}/d_{10}$ ) составляет 2,2. Плотность частиц грунта составляет 2,66 г/см<sup>3</sup>. Коэффициент фильтрации песчаного грунта при  $\rho=1,70$  г/см<sup>3</sup> составляет 2,0 м/сут.

По минеральному составу образец песчаного грунта состоит преимущественно кварцевого состава, содержание кварца – 99,5%. Примеси калиевого полевого шпата и плагиоклаза незначительны и равны 0,3% и 0,2% соответственно. Учитывая, что при количественном анализе данных погрешность составляет 1%, то значения калиевого полевого шпата и плагиоклаза можно считать равным менее 1% [174].

Согласно ГОСТ 25100-2020 [31] по засоленности легкорастворимыми солями данный песчаный грунт относится к незасоленным.

**Нижнемеловые пески кунцевской свиты ( $K_{1kn}$ )**, отобранные по адресу г. Москва, ул. Косыгина, д.20, глубина отбора 13,0-19,0 м. Пески темно-коричневые до черного, мелкие (по ГОСТ 25100-2020 [31]), чистые, хорошо отсортированные, мелкозернистые (по Е.М. Сергееву [51]) (табл. 7). Интегральная кривая гранулометрического состава представлена на рис. 9.

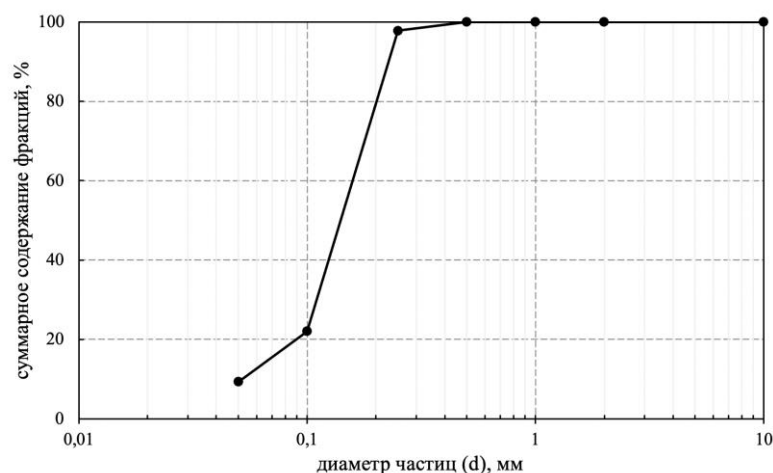


Рис. 9. Интегральная кривая гранулометрического состава песчаного грунта ( $K_{1kn}$ ), отобранного в г. Москва, ул. Косыгина, д.20

Средний диаметр частиц ( $d_{50}$ ) равен 0,16 мм, коэффициент неоднородности ( $d_{60}/d_{10}$ ) составляет 3,3. Плотность частиц грунта составляет 2,67 г/см<sup>3</sup>. Коэффициент фильтрации песчаного грунта при  $\rho=1,70$  г/см<sup>3</sup> составляет 1,0 м/сут [174].

Таблица 7

Гранулометрический состав песчаного грунта ( $K_1kn$ ), г. Москва, ул. Косыгина, д.20

Название грунта по ГОСТ 25100-2020 [31] / классификации Е.М. Сергеева [51]	Содержание фракции (мм), %						
	>2	2-1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	<0,05
Пески мелкие / Пески хорошо отсортированные, мелкозернистые	0	0	0	2	76	13	9

По данным рентгеноструктурного анализа определено, что состав образца преимущественно кварцевый (содержание кварца 95,1%) с незначительной примесью апатита (1,8%), гидрослюда (1,3%) и плагиоклаза (1,1%). Акцессорными минералами в данной пробе являются пирит (0,4%) и каолинит (0,3%).

Согласно ГОСТ 25100-2020 [31] по засоленности легкорастворимыми солями данный песчаный грунт относится к незасоленным.

**Верхнеюрские-нижнемеловые пески лопатинской свиты ( $J_3-K_1lp$ )**, отобранные по адресу г. Москва, ул. Косыгина, д.20, глубина отбора 17,0-18,0 м. Пески от коричневатого-серых до коричневатого-черных, , мелкие (по ГОСТ 25100-2020 [31]), чистые, слабо отсортированные, средне-мелкозернистые (по Е.М. Сергееву [51]) (табл. 8). Интегральная кривая гранулометрического состава представлена на рис. 10.

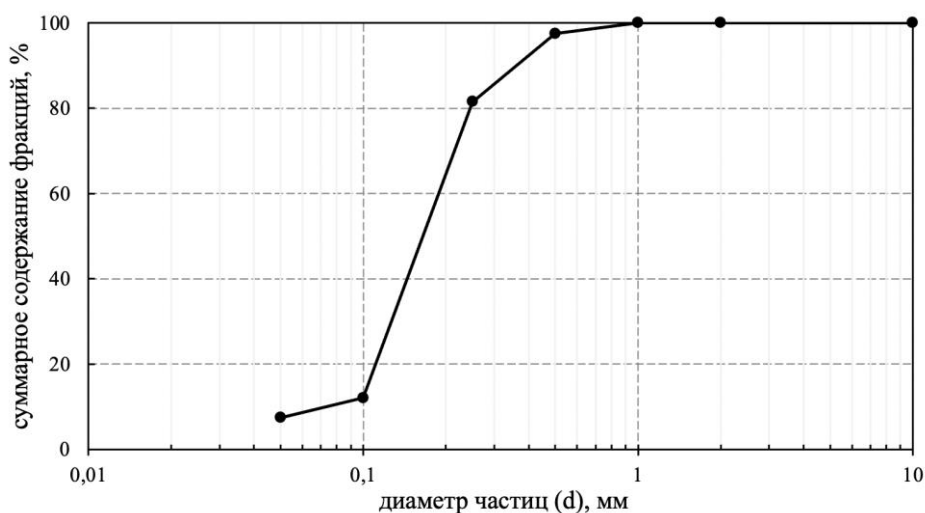


Рис. 10. Интегральная кривая гранулометрического состава песчаного грунта ( $J_3-K_1lp$ ), отобранного в г. Москва, ул. Косыгина, д.20



Средний диаметр частиц ( $d_{50}$ ) равен 0,2 мм, коэффициент неоднородности ( $d_{60}/d_{10}$ ) составляет 2,6. Плотность частиц грунта составляет 2,67 г/см<sup>3</sup>. Коэффициент фильтрации песчаного грунта при  $\rho=1,70$  г/см<sup>3</sup> составляет 1,0 м/сут.

По данным рентгеноструктурного анализа определено, что состав образца преимущественно кварцевый (содержание кварца 73,3%) с примесью апатита (14,8%). В качестве незначительной примеси наблюдаются: калиевый полевой шпат (4,1%), пирит (3,5%), гидрослюда (2,3%) и плагиоклаз (2,0%).

Таблица 8

Гранулометрический состав песчаного грунта (J<sub>3</sub>- K<sub>1</sub>lp), г. Москва, ул. Косыгина, д.20

Название грунта по ГОСТ 25100-2020 [31] / классификации Е.М. Сергеева [51]	Содержание фракции (мм), %						
	>2	2-1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	<0,05
Пески мелкие / Пески слабо отсортированные, средне-мелкозернистые	0	0	3	16	69	5	7

Согласно ГОСТ 25100-2020 [31] по засоленности легкорастворимыми солями данный песчаный грунт относится к незасоленным.

**Аллювиальные пески второй надпойменной террасы р. Клязьма (аQш<sup>II</sup>),** отобранные на Мещерской научно-учебной базе МГУ, с глубины 1,2-1,4 м.

Пески от рыжевато-коричневых до светловато-серых, средней крупности (по ГОСТ 25100-2020 [31]) чистые, слабо отсортированные, мелко-среднезернистые, (по классификации Е.М. Сергеева [51]) (табл. 9). Интегральная кривая гранулометрического состава представлена на рис. 11. Средний диаметр частиц ( $d_{50}$ ) равен 0,27 мм, коэффициент неоднородности ( $d_{60}/d_{10}$ ) составляет 3,1. Плотность частиц грунта составляет 2,68 г/см<sup>3</sup>. Коэффициент фильтрации песчаного грунта при  $\rho=1,70$  г/см<sup>3</sup> составляет 13,6 м/сут.

Согласно количественной интерпретации данных рентгеноструктурного анализа, песчаные грунты имеют преимущественно кварцевый состав (95%) с примесями калиевого полевого шпата (3%) и плагиоклаза (2%).

Согласно ГОСТ 25100-2020 [31] по засоленности легкорастворимыми солями данный песчаный грунт относится к незасоленным.

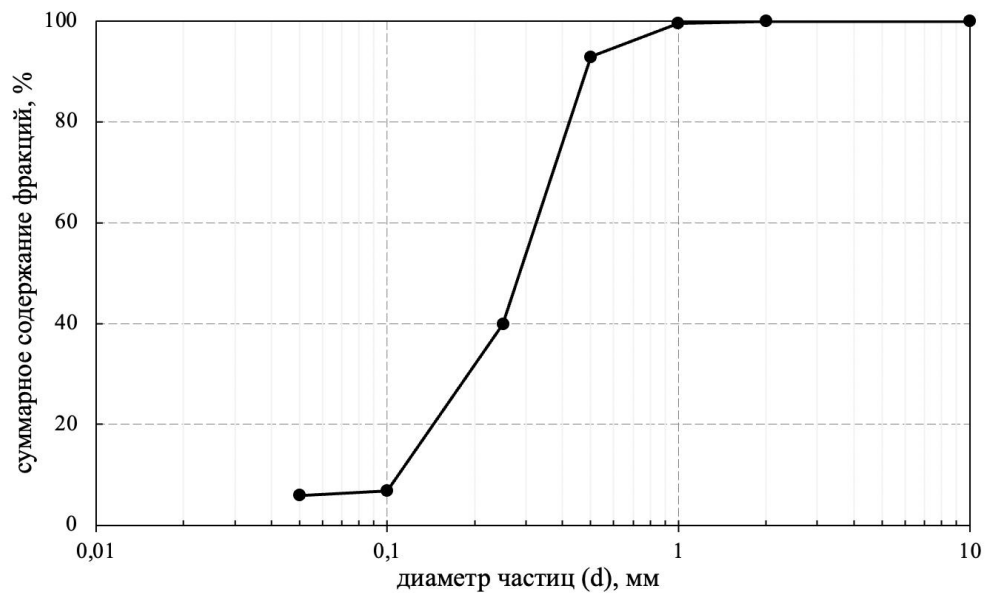


Рис. 11. Интегральная кривая гранулометрического песчаного грунта ( $aQ_{III}^{II}$ ), отобранного на Мещерской научно-учебной базе МГУ, с глубины 1,2-1,4 м

Таблица 9

Гранулометрический состав песчаного грунта ( $aQ_{III}^{II}$ ), отобранного на Мещерской научно-учебной базе МГУ, с глубины 1,2-1,4 м

Название грунта по ГОСТ 25100-2020 [31] / классификации Е.М. Сергеева [51]	Содержание фракции (мм), %						
	>2	2-1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	<0,05
Пески средней крупности / Пески слабо отсортированные, мелко-среднезернистые	0	1	7	53	33	1	6

**Аллювиальные пески второй надпойменной террасы р. Клязьма ( $aQ_{III}^{II}$ )**, отобранные на Мещерской научно-учебной базе МГУ, с глубины 1,5-1,8 м. Пески от рыжевато-коричневых до светловато-серых, средней крупности (по ГОСТ 25100-2020 [31]) чистые, слабо отсортированные, мелко-среднезернистые, (по классификации Е.М. Сергеева [51]) (табл. 10). Интегральная кривая гранулометрического состава представлена на рис. 12. Средний диаметр частиц ( $d_{50}$ ) равен 0,28 мм, коэффициент неоднородности ( $d_{60}/d_{10}$ ) составляет 3,0. Плотность частиц грунта составляет 2,68 г/см<sup>3</sup>. Коэффициент фильтрации песчаного грунта при  $\rho=1,70$  г/см<sup>3</sup> составляет 13,6 м/сут.

Согласно количественной интерпретации данных рентгеноструктурного анализа, песчаные грунты имеют преимущественно кварцевый состав (95%) с примесями калиевого полевого шпата (3%) и плагиоклаза (2%).

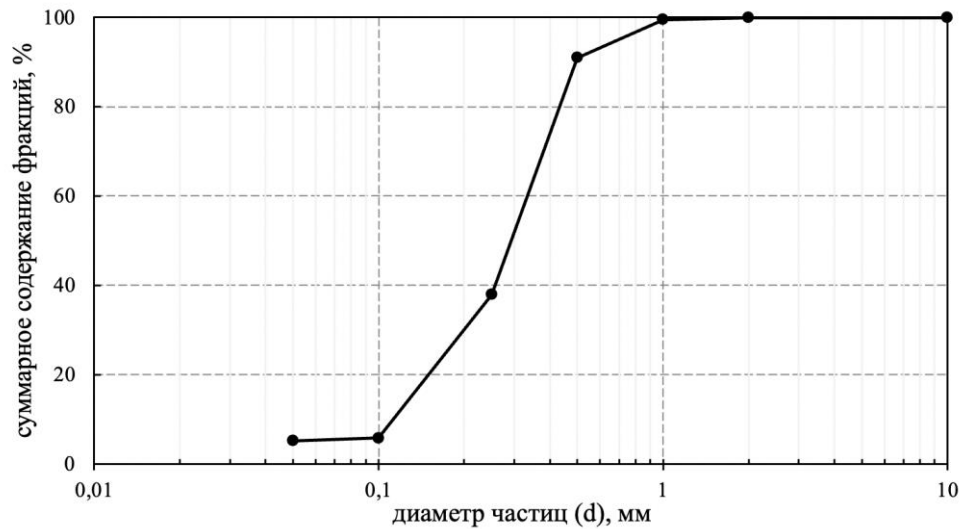


Рис. 12. Интегральная кривая гранулометрического состава песчаного грунта ( $aQ_{III}^{II}$ ), отобранного на Мещерской научно-учебной базе МГУ, с глубины 1,5-1,8 м

Согласно ГОСТ 25100-2020 [31] по засоленности легкорастворимыми солями данный песчаный грунт относится к незасоленным.

Таблица 10

Гранулометрический состав песчаного грунта ( $aQ_{III}^{II}$ ), отобранного на Мещерской научно-учебной базе МГУ, с глубины 1,5-1,8 м

Название грунта по ГОСТ 25100-2020 [31] / классификации Е.М. Сергеева [51]	Содержание фракции (мм), %						
	>2	2-1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	<0,05
Пески средней крупности / Пески слабо отсортированные, мелко-среднезернистые	0	0	9	53	32	1	5

**Техногенные пески ( $tQ_{IV}$ ) дамбы шламохранилища**, отобранные в теле искусственно созданной дамбы Усольского калийного комбината, расположенной южнее г. Березники Пермского края, с глубины 2,0-2,5 м.

Пески рыжевато-коричневые, с зеленоватым оттенком, мелкие (по ГОСТ 25100-2020 [31]) чистые, слабо отсортированные, средне-мелкозернистые, (по классификации Е.М. Сергеева [51]) (табл. 11). Интегральная кривая гранулометрического состава представлена на рис. 13. Средний диаметр частиц ( $d_{50}$ ) равен 0,26 мм, коэффициент неоднородности ( $d_{60}/d_{10}$ )

составляет 2,0. Плотность частиц грунта составляет 2,65 г/см<sup>3</sup>. Коэффициент фильтрации песчаного грунта при  $\rho=1,70$  г/см<sup>3</sup> составляет 2,5 м/сут.

В минеральном составе преобладает кварц – 85%, примеси калиевого полевого шпата, представленного альбитом, составляют 10% и микроклином – 5%.

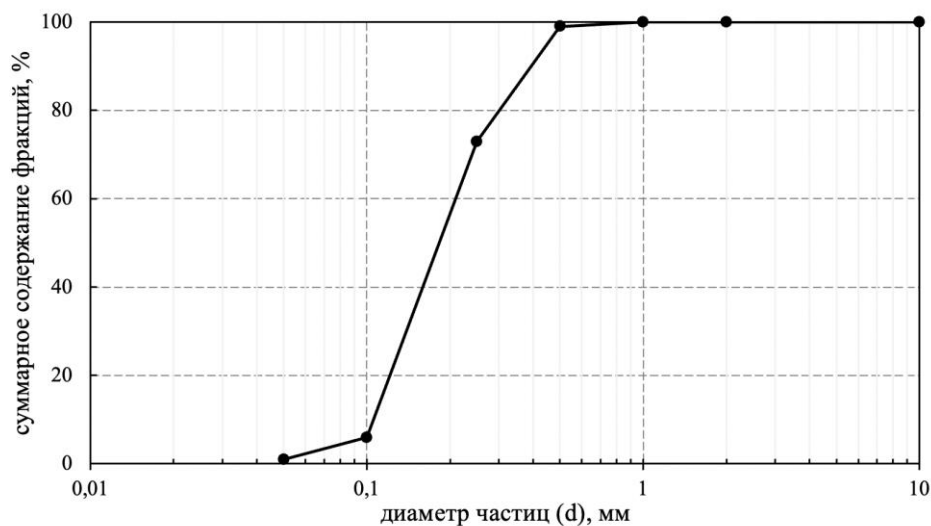


Рис. 13. Интегральная кривая гранулометрического состава песчаного грунта ( $tQ_{IV}$ ), отобранного в теле дамбы УКК, южнее г. Березники Пермского края, с глубины 2,0-2,5 м

Таблица 11

Гранулометрический состав песчаного грунта ( $tQ_{IV}$ ) дамбы шламохранилища, отобранного в теле искусственно созданной дамбы Усольского калийного комбината, расположенной южнее г. Березники Пермского края, с глубины 2,0-2,5 м.

Название грунта по ГОСТ 25100-2020 [31] / классификации Е.М. Сергеева [51]	Содержание фракции (мм), %						
	>2	2-1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	<0,05
Пески мелкие / Пески слабо отсортированные, средне-мелкозернистые	0	0	1	26	67	5	1

Согласно ГОСТ 25100-2020 [31] по засоленности легкорастворимыми солями данный песчаный грунт относится к незасоленным.

**Нижнемеловые пески готеривского, барремского яруса ( $K_{lg-br}$ ) с карбонатными пленками**, отобранные на территории рекреационного комплекса Романцевские горы (Кондуки), с глубины 0,5-1,0 м.

Пески светловато-серые, с бежевым оттенком, пылеватые (по ГОСТ 25100-2020 [31]) неотсортированные, мелкие (по классификации Е.М. Сергеева [51]) (табл. 12). Интегральная кривая гранулометрического состава представлена на рис. 14. Средний диаметр частиц ( $d_{50}$ )

равен 0,21 мм, коэффициент неоднородности ( $d_{60}/d_{10}$ ) составляет 4,7. Плотность частиц грунта составляет 2,67 г/см<sup>3</sup>. Коэффициент фильтрации песчаного грунта при  $\rho=1,70$  г/см<sup>3</sup> составляет 4,1 м/сут.

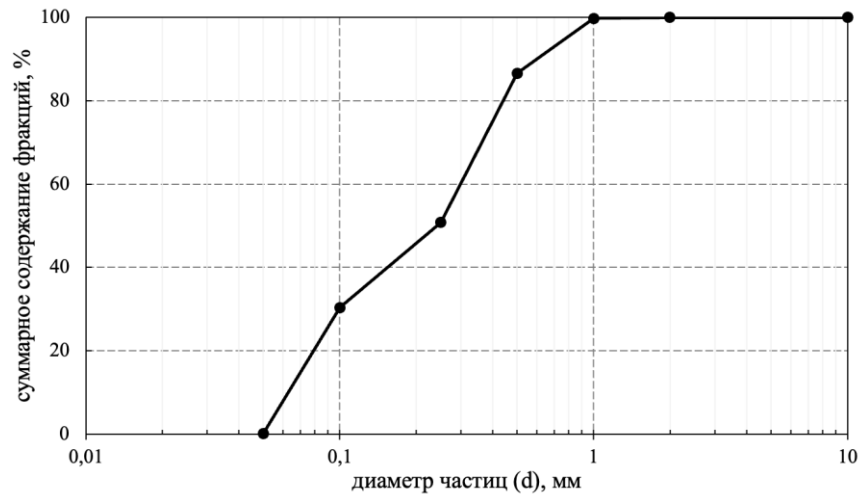


Рис. 14. Интегральная кривая гранулометрического состава песчаного грунта ( $K_{1g-br}$ ) с карбонатными пленками, отобранного на территории рекреационного комплекса Романцевские горы (Кондуки), с глубины 0,5-1,0 м.

По данным рентгеноструктурного анализа определено, что состав образца преимущественно кварцевый (содержание кварца 94%). Примеси калиевого полевого шпата и плагиоклаза незначительны и равны 4% и 2% соответственно. Согласно ГОСТ 25100-2020 [31] по засоленности легкорастворимыми солями данный песчаный грунт относится к незасоленным.

Таблица 12

Гранулометрический состав песчаного грунта ( $K_{1g-br}$ ) с карбонатными пленками, отобранного на территории рекреационного комплекса Романцевские горы (Кондуки), с глубины 0,5-1,0 м.

Название грунта по ГОСТ 25100-2020 [31] / классификации Е.М. Сергеева [51]	Содержание фракции (мм), %						
	>2	2-1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	<0,05
Пески пылеватые / Пески неотсортированные, мелкие	0	0	13	36	20	30	0

**Флювиогляциальный песок донской стадии оледенения нижнеплейстоценового возраста ( $fgQ_{1dns}$ )**, отобранные на территории рекреационного комплекса Романцевские горы (Кондуки), с глубины 0,5-1,0 м. Песок коричневатого-рыжий, пылеватый (по ГОСТ 25100-2020 [31]) неотсортированный, мелкий (по классификации Е.М. Сергеева [51]) (табл. 13). Интегральная кривая гранулометрического состава представлена на рис. 15. Средний

диаметр частиц ( $d_{50}$ ) равен 0,18 мм, коэффициент неоднородности ( $d_{60}/d_{10}$ ) составляет 4,2. Плотность частиц грунта составляет 2,69 г/см<sup>3</sup>. Коэффициент фильтрации песчаного грунта при  $\rho=1,70$  г/см<sup>3</sup> составляет 2,7 м/сут.

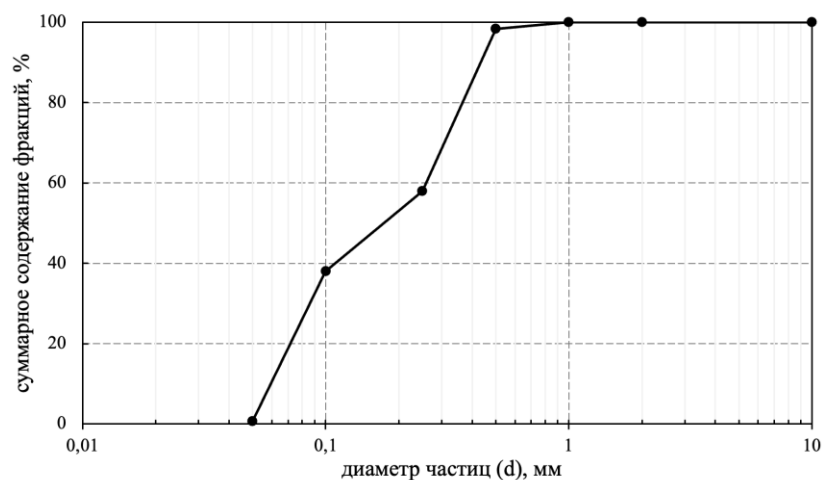


Рис. 15. Интегральная кривая гранулометрического состава песчаного грунта ( $fgQ_{1dns}$ ), отобранного на территории рекреационного комплекса Романцевские горы (Кондуки), с глубины 0,5-1,0 м.

Согласно количественной интерпретации данных рентгеноструктурного анализа, песчаные грунты имеют преимущественно кварцевый состав (95%) с примесями калиевого полевого шпата (2%) и плагиоклаза (3%). Согласно ГОСТ 25100-2020 [31] по засоленности легкорастворимыми солями данный песчаный грунт относится к незасоленным.

Таблица 13

Гранулометрический состав песчаного грунта ( $fgQ_{1dns}$ ), отобранного на территории рекреационного комплекса Романцевские горы (Кондуки), с глубины 0,5-1,0 м.

Название грунта по ГОСТ 25100-2020 [31] / классификации Е.М. Сергеева [51]	Содержание фракции (мм), %						
	>2	2-1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	<0,05
Пески пылеватые / Пески неотсортированные, мелкие	0	0	2	40	20	37	1

**Нижнемеловые пески готеривского, барремского яруса ( $K_{1g-br}$ ) с глинистыми пленками**, отобранные на территории рекреационного комплекса Романцевские горы (Кондуки), с глубины 0,5-1,0 м.

Пески светловато-серые, пылеватые (по ГОСТ 25100-2020 [31]) неотсортированные, мелкие (по классификации Е.М. Сергеева [51]) (табл. 14). Интегральная кривая гранулометрического состава представлена на рис. 16. Средний диаметр частиц ( $d_{50}$ ) равен 0,14

мм, коэффициент неоднородности ( $d_{60}/d_{10}$ ) составляет 2,4. Плотность частиц грунта составляет  $2,68 \text{ г/см}^3$ . Коэффициент фильтрации песчаного грунта при  $\rho=1,70 \text{ г/см}^3$  составляет 3,0 м/сут.

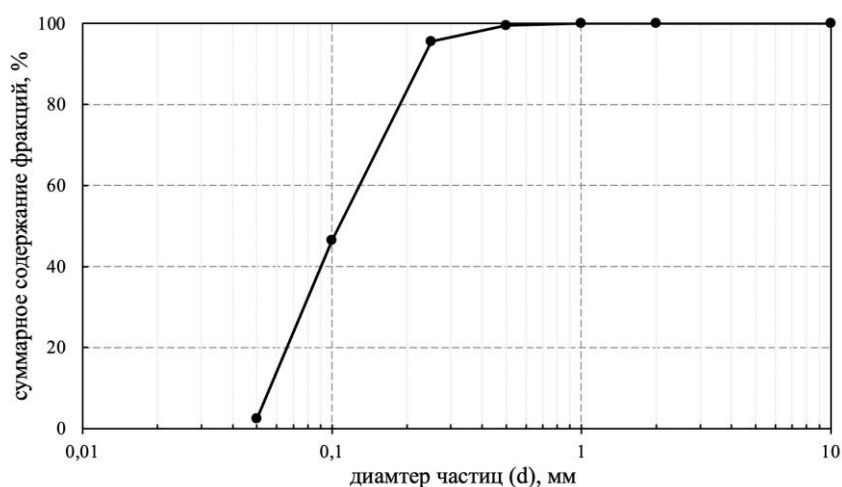


Рис. 16. Интегральная кривая гранулометрического состава песчаного грунта ( $K_{1g-br}$ ) с глинистыми пленками, отобранного на территории рекреационного комплекса Романцевские горы (Кондуки), с глубины 0,5-1,0 м.

По минеральному составу образец песчаного грунта состоит преимущественно кварцевого состава, содержание кварца – 98%. Примеси калиевого полевого шпата и плагиоклаза незначительны составляют менее 1% соответственно. Учитывая, что при количественном анализе данных погрешность составляет 1%, то значения калиевого полевого шпата и плагиоклаза можно считать равным менее 1%.

Таблица 14

Гранулометрический состав песчаного грунта ( $K_{1g-br}$ ), отобранного на территории рекреационного комплекса Романцевские горы (Кондуки), с глубины 0,5-1,0 м.

Название грунта по ГОСТ 25100-2020 [31] / классификации Е.М. Сергеева [51]	Содержание фракции (мм), %						
	>2	2-1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	<0,05
Пески пылеватые / Пески неотсортированные, мелкие	0	0	0	4	49	44	2

## 2.2. Искусственные песчаные грунты с заданным гранулометрическим составом

Для создания коллекции песчаных грунтов заданного гранулометрического состава использовались аллювиальные пески второй надпойменной террасы р. Клязьма ( $aQ_{III}^{II}$ ), отобранные на Мещерской научно-учебной базе МГУ, с глубины 1,2-1,4 м. Использование единого естественного песчаного грунта обусловлено единообразием минерального и

химического состава, а также водорастворимых солей для исключения влияния различных геологических факторов на эффективность инъекционной обработки.

В рамках данного исследования использовалось разделение песчаных грунтов по среднему диаметру частиц грунта ( $d_{50}$ ). Однако, учитывая тот факт, что использование показателя  $d_{50}$  приводит к возможности использования образцов с различными интегральными кривыми гранулометрического состава, также использовалось и подразделение выбранных песчаных грунтов по степени неоднородности (по Хазену [16])  $C_u = d_{60}/d_{10}$ , а также по коэффициенту отсортированности (по И.П. Фадееву [100]) –  $K_{от} = d_{90}/d_{10}$ .

Для изучения влияния гранулометрического состава на эффективность распространения инъекционного закрепления методом пропитки были использованы пять грунтов – один с природным гранулометрическим составом, а также четыре с заданным (табл. 15).

Таблица 15

Гранулометрический состав модельных песчаных грунтов

Название грунта по ГОСТ 25100-2020 [31] / классификации Е.М. Сергеева [51]	Содержание фракции (мм), %							$d_{50}$	$d_{60}/d_{10}$
	>2	2-1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	<0,05		
Пески средней крупности / Пески слабо отсортированные, мелко-среднезернистые	0	1	7	52	33	1	6	0,27	3,1
Пески средней крупности / Пески слабо отсортированные средне-мелкозернистые	0	0	13	37	39	5	6	0,24	3,5
Пески пылеватые / Пески неотсортированные, мелкие, пылеватые	0	0	0	19	38	32	11	0,14	3,7
Пески пылеватые / Пески неотсортированные, мелкие, пылеватые	0	0	0	17	34	21	28	0,10	8,3
Пески пылеватые / Пески неотсортированные, мелкие, пылеватые	0	0	0	9	32	25	34	0,09	7,3

### 2.3. Искусственные песчаные грунты с заданным минеральным составом

Для изучения влияния минерального состава на эффективность инъекционного закрепления грунтов было принято решение использовать искусственно созданные грунты с заданным минеральным составом. В качестве исходного материала был использован аллювиальный песок второй надпойменной террасы р. Клязьма ( $aQ_{III}^{II}$ ), отобранный на Мещерской научно-учебной базе МГУ, с глубины 1,5-1,8 м, описанный ранее.



Для создания искусственных смесей песчаных грунтов использовались фракции 0,5- 0,25 мм, 0,1-0,25 мм, а также < 0,05 мм, добавляемые пропорционально с величиной фракции в гранулометрическом составе исходного грунта.

Для изучения влияния минерального состава песчаных грунтов на эффективность их закрепления использовались различные минералы, добавляемые в следующих пропорциях:

- Полевой шпат (микроклин) – 10, 20, 30, 40, 50 % соотношении с чистым кварцевым песком;
- Кальцит – 10, 20, 30, 40, 50 % соотношении с чистым кварцевым песком;
- Роговая обманка – 10, 20, 30, 40, 50 % соотношении с чистым кварцевым песком;
- Слюда (биотит) – 1, 3, 5, 7, 10 % соотношении с чистым кварцевым песком.

#### 2.4. Песчаные грунты с искусственно созданными поверхностными пленками

В качестве исходного материала для создания песчаных грунтов с искусственными поверхностными пленками был выбран аллювиальный песок второй надпойменной террасы р. Клязьма ( $aQ_{III}^{II}$ ), отобранный на Мещерской научно-учебной базе МГУ, с глубины 1,2-1,4 м (табл. 16).

Зерна аллювиального песчаного грунта имеют светло-серую окраску, реже встречаются зерна светло-коричневого и темно-серого цвета. Встречаются отдельные песчаные частицы с тонкой светло-желтой железистой пленкой, что свидетельствует о первоначальном растворении пленок оксида железа  $Fe^{2+}$ , а затем их вторичной адсорбции в уже окисленном до  $Fe^{3+}$  состоянии. На некоторых зернах присутствуют железистые аутигенные образования красно-коричневого цвета, приуроченные к углублениям и неровностям на поверхности, что свидетельствует о неполном удалении природных поверхностных пленок (рис. 17,18).



Рис. 17. Фото под бинокулярным микроскопом: а – природного песчаного грунта;  
б – песка с удаленными аутигенными пленками

**Модельные образцы с искусственно нанесенными глинистыми поверхностными пленками** имеют коричневатую-серую окраску. Сплошная рубашка наблюдается лишь на единичных угловато-окатанных зернах, распространение глинистых пленок можно отнести к островному. Поверхностные образования, представленные глинистыми частицами, покрывают от 35 до 75% поверхности песчаного зерна. Наблюдаются единичные окатанные зерна, не покрытые пленкой.

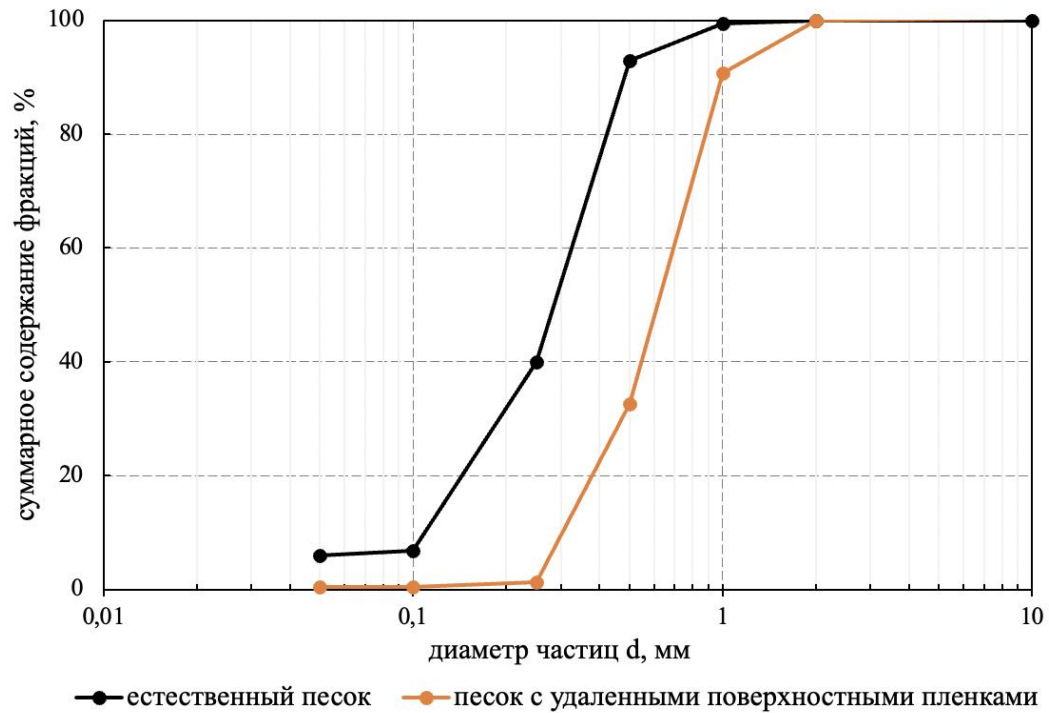


Рис. 18. Интегральные кривые гранулометрического состава модельных песчаных грунтов до и после удаления поверхностных пленок

Таблица 16

Гранулометрический состав песчаных грунтов до и после удаления поверхностных пленок

Название грунта по ГОСТ 25100-2020 [31] / классификации Е.М. Сергеева [51]	Содержание фракции (мм), %						
	>2	2-1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	<0,05
Пески средней крупности* / Пески слабо отсортированные, мелко-среднезернистые	0	1	7	53	33	1	6
Пески средней крупности** / Пески слабо отсортированные, мелко-среднезернистые	0	0	9	58	31	1	0

Примечание: \* - до удаления поверхностных пленок, \*\* - после удаления

**Песок с искусственно-созданными железистыми поверхностными образованиями** имеет рыжевато-коричневую окраску, более насыщенную, по сравнению с природным ожелезненным песком. Поверхностные пленки, искусственно созданные в лабораторных условиях, занимают меньшую площадь на поверхности песчаного зерна (20-40%), по сравнению с природным грунтом. Распространение пленок – островное, с концентрированными окислами железа в углублениях на песчаной поверхности. Также встречаются отдельные песчаные зерна, практически полностью покрытые железистыми рубашками.

**Песок с искусственно нанесенными карбонатными пленками** имеет светло-серую окраску. Поверхностные образования кальцитового состава имеют островное распространение на поверхности зерен и приурочены к углублениям и неровностям на поверхности песчаных частиц. Отмечаются отдельные зерна, покрытые сплошными рубашкам кальцитового состава. Площадь, занимаемая карбонатными поверхностными пленками, изменяется в широком диапазоне, от 5 до 95%. На отдельных зернах наблюдаются тонкие железистые поверхностные пленки светло-желтого цвета. На наиболее хорошо окатанных зернах карбонатные поверхностные пленки практически отсутствуют.

**Песок с искусственно нанесенными силикатными поверхностными пленками** имеет светло-серую окраску. Пленка имеет распространение от островного до сплошного, наиболее концентрированные участки пленок на поверхности относятся к углублениям и неровностям на поверхности песчаных зерен. Отдельные зерна практически полностью покрыты тонким слоем силикатной поверхностной пленки, сглаживающей неровности поверхности зерна. Зерен, на которых силикатные образования полностью отсутствуют, не наблюдается.

**Песок с органическими поверхностными образованиями** имеет темно-коричневую окраску. Распространение поверхностных пленок на песчаных зернах неравномерное: от островного до сплошного. Скопление вещества приурочено к углублениям на поверхности песчаных зерен. Наименее окатанные зерна покрыты рубашкой органической пленки.

Обобщающие характеристики поверхностных пленок приведены в таблице 17. Процентное содержание вещества пленки для модельных грунтов изменяется от 1,75 до 2,76%. Распространение аутигенных образований на поверхности зерен варьирует от сплошного до островного, площадь, занятая искусственными поверхностными пленками, изменяется в широком диапазоне и зависит от окатанности песчаных частиц.

Для исследуемых песчаных грунтов влажность максимальной молекулярной влагоемкости варьируется в пределах 0,6-1,9%, что обусловлено гидрофильностью компонентов, образующих искусственные поверхностные пленки. Наибольшие значения характерны для образцов с глинистыми поверхностными пленками хлорит-гидрослюдистого состава, что также свидетельствует о наибольшей адсорбционной способности образцов по отношению к воде.

Количественные характеристики вещества поверхностных пленок различного типа на песчаных зернах модельных грунтов

Тип поверхностной пленки	Содержание вещества пленки, %	Площадь заполнения поверхности зерна пленками, %
Глинистая	2,76	35-75
Карбонатная	1,75	50-75
Железистая	2,61	20-40
Силикатная	2,20	30-100
Органическая	2,42	10-85

### Выводы к главе 2

По генезису исследуемые образцы охватывают, в основном, флювиальный ряд отложений [103], представленный аллювиальными, флювиогляциальными и морскими отложениями. Различия в генезисе проявляются в дисперсности песчаных отложений, степени окатанности песчаных зерен, сортированности образцов и др.

По гранулометрическому составу пески варьируют от пылеватых до мелко-среднезернистых (по классификации Е.М. Сергеева [51]), вследствие невозможности сбора полного гранулометрического ряда песчаных грунтов с единым минеральным и химическим составом, были использованы искусственно созданные песчаные грунты.

По минеральному составу естественные песчаные грунты, в основном, преимущественно кварцевого состава, вследствие чего нами было принято решение о создании модельных грунтов с заданным минеральным составом, с сохранением гранулометрического состава, близкого к природному.

Для изучения влияния состава аутигенных пленок были использованы как природные грунты, так и модельные разности с заданным составом поверхностных пленок. Изучение песчаных грунтов с естественными аутигенными образованиями доказали правомерность использования образцов песчаных грунтов с искусственными поверхностными пленками.

Коллекция песчаных грунтов по классификации ГОСТ 25100-2020 [31] относится к незасоленным. вследствие чего нами принято решение об использовании также и модельных разностей с различной степенью засоления.

В настоящем исследовании при характеристике песчаных грунтов основное внимание, в первую очередь, уделялось показателям, оказывающим непосредственное влияние на эффективность и качество инъекционной обработки грунтов методом пропитки.

В связи с трудностью обработки пылеватых и мелких песчаных грунтов основное внимание в рамках данной работы уделялось наиболее дисперсным разностям.

Искусственно созданные модельные образцы позволяют провести точную оценку гранулометрического, минерального состава, а также состава поверхностных пленок, данные образцы были выбраны с целью исключения возможного влияния ряда других факторов на прочностные свойства модифицированных грунтов.

Таким образом, серия образцов песчаных грунтов, отобранных для анализа, характеризует широкий спектр природных и модельных песков, что позволяет получить необходимый объем результатов для достижения поставленной цели исследования.

### Глава 3. Методика экспериментальных исследований

В рамках данной работы проводилось изучение состава, строения и свойств как естественных, так и искусственных песчаных грунтов с помощью стандартных лабораторных методов на кафедре инженерной и экологической геологии. В процессе данного научного исследования также применялось и испытывалось авторское оборудование, авторские методики инъекционной обработки грунтов в лабораторных условиях, использовались методы анализа качества вяжущего и его эффективности для обработки коллекции песчаных грунтов. Общая схема методики экспериментальных исследований представлена на рис. 19.

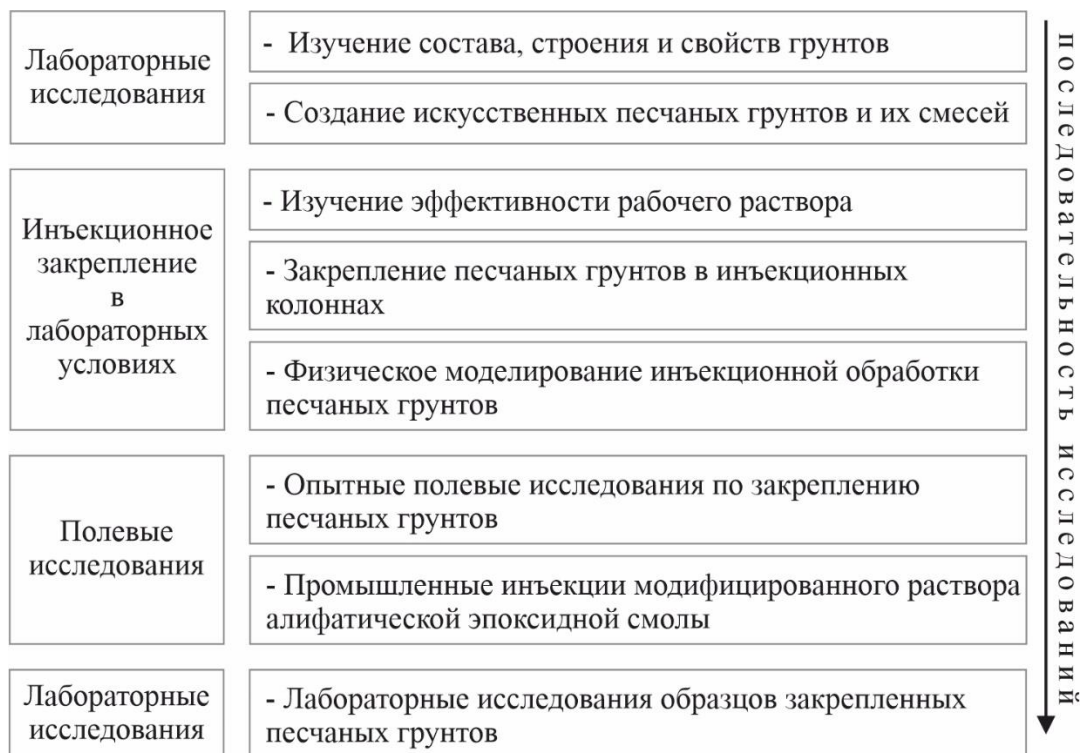


Рис. 19. Общая схема методики экспериментальных исследований

#### 3.1. Методика изучения состава, строения и свойств естественных и искусственных грунтов

**Валовой химический состав** исследованных образцов грунтов определялся по общепринятой методике [51] в химической лаборатории геологического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова, либо анализировался нами рентгенофлюоресцентным методом [51], на приборе «СПЕКТРОСКАН МАХ-GV» производства НПО «СПЕКТРОН» г.Санкт-Петербург.

**Минеральный состав** образцов изучался с помощью рентгеноструктурного анализа [105] на геологическом факультете МГУ им. М.В.Ломоносова [51]. Рентгеноструктурные исследования проведены на приборе ДРОН-3 ( $K\alpha$  Cu – излучение, Ni - фильтр). Порошкограммы исследованы при скорости 1 град/мин в интервале углов  $2\theta$  от  $2^\circ$  до  $60^\circ$ , при скорости 1 град/мин. Исследования были выполнены на кафедре литологии и морской геологии В.Л. Косоруковым и аспирантом ФБГУ «ВНИГНИ» С.В. Томасенко.

**Содержание и состав водорастворимых солей** определялись в соответствии со стандартной методикой [14,30,33,34,62,96], описанной Е.В. Аринушкиной [8], в соответствии с нормативной документацией [30,33].

**Гранулометрический состав** песчаных грунтов определялся ситовым методом с промывкой (по ГОСТ 12536-2014 [27]). Для образцов, содержащих пылеватую и глинистую фракцию, определение гранулометрического состава проводилось пипеточным методом, подготовка образцов грунта проводилась по методике П.Ф. Мельникова путем растирания с раствором пирофосфата натрия [51].

**Плотность твердого компонента** образцов определялась пикнометрическим методом с использованием дистиллированной воды [38].

**Определение плотности песчаных грунтов в массиве** производилось методом режущего кольца по ГОСТ 5180-2015 [38].

**Минимальная и максимальная плотности скелета** песчаных грунтов в воздушно-сухом состоянии определялись по плотности в рыхлом и плотном сложении [29].

**Естественная и гигроскопическая влажности** образцов определялись весовым методом [51].

**Влажность максимальной молекулярной влагоемкости** определялась методом влагоемких сред (по А.Ф. Лебедеву) в модификации А.М. Васильева [51].

**Коэффициент фильтрации** песчаных грунтов определялся с помощью трубки Г.Н. Каменского согласно ГОСТ 25584-2016 [32] при плотностях, соответствующих последующим экспериментам.

**Исследование прочностных и деформационных свойств** песчаных грунтов в нарушенном сложении проводилось в ходе трехосных испытаний в соответствии с ГОСТ 12248-2020 [26] и компрессионных по ГОСТ 12248-2020 [26]. Трехосные испытания проводились на приборе ГТ 1.3.5 серии АСИС (ООО НПП «Геотек», г. Пенза) в камере стабилометра типа А; компрессионное сжатие – в одометрах ГТ 1.1.9; испытания на одноплоскостной срез – в установке ГТ 1.2.16 этого же производителя.

Испытания на трехосное сжатие проводились по консолидировано-дренированной схеме (КД) при давлении в камере от 50 до 500 кПа с постоянной скоростью деформаций 0,1 мм/мин. Программа компрессионных испытаний включала нагрузку ступенями 0,025-0,05-0,1-0,3-0,5 МПа, со стабилизацией деформации на каждой ступени 0,01 мм за 16 часов и последующую однократную и полную нагрузку. Испытания на одноплоскостной срез проводились по кинематической схеме нагружения с постоянной скоростью 0,1 мм/мин.

Программа изучения свойств закрепленных песчаных грунтов проводилась по тем же схемам испытаний, при аналогичных нагрузках, с сохранением скорости деформации.

Названия песчаных грунтов даны в соответствии с классификациями ГОСТ 25100-2020 и Е.М. Сергеева [51].

### **3.2.Создание искусственных песчаных грунтов и их смесей**

Одной из задач данной работы являлось изучение влияния гранулометрического состава песчаных грунтов на эффективность их закрепления рабочим раствором, вследствие чего производилось создание искусственных песчаных грунтов с заданным гранулометрическим составом.

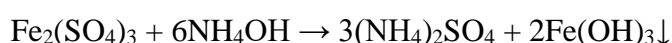
Использование одного исходного грунта позволяет исключить влияние минерального состава, наличия и состава аутигенных пленок, формы и окатанности зерен и др. В качестве исходного грунта был взят аллювиальный песок второй надпойменной террасы р. Клязьма ( $aQ_{III}^{II}$ ), путем разделения и последующего смешения отдельных фракций в необходимых соотношениях был получен ряд образцов песчаного грунта с заданным средним диаметром частиц ( $d_{50}$ ). Для подтверждения правильности подбора фракций и для последующей подготовки песчаного грунта с заданным  $d_{50}$ , образцы искусственных грунтов сравнивались также и по показателям  $d_{10}$ ,  $d_{60}$ ,  $d_{90}$ . Подбор осуществлялся с учетом постоянства степени неоднородности (по Хазену) и коэффициенту отсортированности (по И.П. Фадееву). Для более точного соответствия подобранных песчаных смесей также проводился и анализ кумулятивных кривых для каждого из искусственных образцов.

#### ***Создание песков с искусственными аутигенными пленками***

Для создания песчаных грунтов с заданным составом аутигенных образований предварительно проводилось полное удаление естественных поверхностных пленок по модифицированной методике Е.Н. Огородниковой [61], для чего использовали последовательно 250 мл 5 %-ого раствора соляной кислоты (HCl) и 250 мл 5 %-ого раствора щавелевой кислоты ( $C_2H_2O_4$ ) на каждые 500 г песчаного грунта. Для нейтрализации остаточной кислоты в грунт с удаленными аутигенными образованиями по капле добавлялся 10% раствор аммиака ( $NH_3$ ) при тщательном перемешивании до pH фильтрата 7,0.

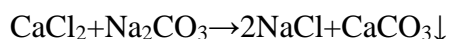
Аутигенные пленки заданного состава наносились путем осаждения малорастворимых соединений заданного состава. В количественном соотношении содержание поверхностных образований не превышает 3%.

Создание железистых поверхностных пленок проводилось путем осаждения гидроксида железа III ( $Fe(OH)_3$ ) при добавлении 5 %-ого раствора аммиака ( $NH_4OH$ ) к раствору сульфата железа III ( $Fe_2(SO_4)_3$ ). Остаточный раствор удалялся дистиллированной водой до потери качественной реакции на сульфат-ион в промывочной жидкости. Количественное определение железа в искусственном образце песка проводилось по методу Тамма [24].



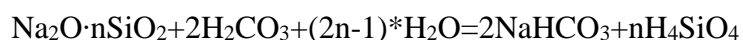
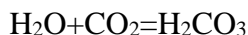


Карбонатные поверхностные пленки наносились путем добавления раствора карбоната натрия ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) и хлорида кальция ( $\text{CaCl}_2$ ) в высушенный песчаный грунт. Песок с раствором перемешивался до однородного состояния. При взаимодействии растворов происходит осаждение карбоната кальция ( $\text{CaCO}_3$ ). Грунт с осажденными кальцитовыми пленками промывался дистиллированной водой до полного удаления хлорида натрия ( $\text{NaCl}$ ). Количественное определение карбонатов проводилось в солянокислой вытяжке [8].



Создание глинистых поверхностных пленок проводилось путем добавления в песчаный грунт однородной суспензии, состоящей из синей кембрийской глины хлорит-гидрослюдистого состава, отобранной в г. Никольское, Ленинградская обл., с преобладающим размером частиц – менее 0,001 мм. Количественное содержание глины в полученных модельных образцах измерялось путем потери массы после кипячения с аммиаком и отмучивания.

Силикатные поверхностные пленки создавались путем добавления в высушенный песчаный грунт раствора жидкого стекла ( $\rho = 1,43 \text{ г/см}^3$ ,  $M_c = 3,3$ ). Процесс отверждения жидкого стекла происходил постепенно, при взаимодействии с  $\text{CO}_2$ , вследствие чего на протяжении длительного времени проводилось его постоянное перемешивание. Количество геля кремнекислоты, осажденного на поверхности песчаных зерен, определялось по методике В.Е. Соколовича в щелочной вытяжке из образца [89,90].



Грунт с осажденными кремнеземистыми пленками промывался дистиллированной водой до полного удаления щелочи.

Для создания органических пленок использовался осадок гумата калия, полученный путем щелочной вытяжки из чернозема (0,1 нормальным раствором  $\text{KOH}$ ), с последующим осаждением 0,1 нормальным раствором соляной кислоты. Затем осадок гумата калия отделялся от надосадочной жидкости, отмывался от избытка кислоты диализом, подсушивался до текуче-пластичной консистенции и перемешивался с песком. Количественно органическое вещество контролировалось по содержанию углерода, который определялся методом мокрого сжигания по И.В. Тюрину [8].

### **3.3. Методика экспериментального изучения эффективности рабочего раствора**

Приготовление модифицированного раствора алифатической эпоксидной смолы производилось путем подбора компонентов вяжущего. Содержание отвердителя, в качестве которого выступает полиэтиленполиамин (ПЭПА), подбиралось экспериментально, так, чтобы время гелеобразования варьировалось в интервале от 30 до 180 мин, данный диапазон

традиционно используется в отечественной практике для химического инъекционного закрепления грунтов [16,17].

**Условная вязкость** растворов определялась на начальный момент времени сразу после смешивания с отвердителем [37], дополнительно производился контроль изменения её значения на протяжении всего индукционного периода раствора вплоть до момента гелеобразования.

Определение проводилось при помощи вискозиметра ВП-4. Вязкость находилась по формуле:

$$\eta_{кр} = \eta_v \times \frac{t_{кр}}{t_v} [\text{сП}],$$

где  $\eta_v = 1 \text{ сП}$  – условная вязкость воды,  $t_{кр}$  – время, за которое из вискозиметра вытекло 50 мл исследуемой жидкости,  $t_v$  – время, за которое из вискозиметра вытекло 50 мл воды.

**Плотность рабочего раствора** определялась по ГОСТ 18995.1-73, с помощью ареометра. По окончании гелеобразования **плотность геля** контролировалась весовым способом по ГОСТ 5180-2015 [38].

**Измерение температуры** экзотермической реакции производилось с помощью жидкостного и электронного термометра [51].

**Определение краевого угла смачивания** рабочего раствора и его компонентов производилось методом сидячей капли [58]. Для определения угла между твердой поверхностью и каплей использовались основные порообразующие минералы песчаных грунтов, из которых были приготовлены пластины толщиной 1 см. Для определения влияния поверхностных пленок на величину краевого угла смачивания использовалась стеклянная поверхность с различными пленками. Фотофиксация по методу сидячей капли производилась не менее 10 раз, после чего находилось среднее значение краевого угла смачивания.

**Определение сорбции** компонентов рабочего раствора по отношению к песчаным грунтам с различными по составу аутигенными и поверхностными образованиями проводилось в статических условиях. Навески грунта, массой в 10 г помещались в конические колбы объемом 100 мл. В колбы добавлялось по 10 мл раствора коллоидного кремнезема в рабочей концентрации, после чего образцы отстаивались в течение суток. Содержание кремнезема проводилось в исходном и равновесных растворах по методике В.Е. Соколовича [90]. Количество адсорбированного кремнезема определялось по разности между исходным и конечным его содержанием в растворе.

Аналогичная серия экспериментов была проведена с раствором алифатической эпоксидной смолы марки ДЭГ-1 и ее аналогов. Содержание органического вещества в исходном и равновесных растворах определялось методом мокрого сжигания, предложенным И.В. Тюриным [8].

Величина сорбции определялась по формуле:

$$N = \frac{(C_1 - C)V}{P} * 100$$

где N – величина сорбции, мг/г; V – объем раствора, см<sup>3</sup>, C<sub>1</sub> – начальное содержание исследуемого на сорбцию вещества, мг/мл; C – конечное содержание исследуемого на сорбцию вещества, мг/мл; P – масса грунта, г [8]

Результаты, полученные при определении сорбции в статических условиях использовались для характеристики максимальной сорбционной емкости грунта [39].

**Определение адгезии геля рабочего раствора** к минеральной поверхности производилось с помощью адгезиметра ОНИКС-АП. Сущность метода состояла в измерении силы, необходимой для отрыва полимеризовавшегося геля от поверхности различных минералов и горных пород, в направлении, перпендикулярном плоскости покрытия, с помощью приклеенного металлического штампа (грибка) и адгезиметра (рис. 20) в соответствии с ГОСТ 28574-2014 [35].

Определение адгезии производилось на образцах минералов и горных пород с выровненной поверхностью, размерами не менее 700х700 мм. На подготовленные образцы наносился гель рабочего раствора толщиной не более 3-5 мм и выдерживался в воздушно-влажных условиях в эксикаторе над водой в течение 2 недель до полной полимеризации рабочего раствора. После чего на выровненную поверхность приклеивался обезжиренный металлический штамп и выдерживался в течение суток до полного схватывания клея. Образцы прижимались металлической рамкой, на которую устанавливался адгезиметр. Металлический штамп, приклеенный на образец минерала, фиксировался шарнирным образом с захватным устройством адгезиметра.



Рис.20. Общий вид адгезиметра ОНИКС-АП:

- 1 – корпус гидравлического пресса; 2, 11, 12, 13 – электронный блок; 3, 6 – рукоять;  
4 – силовой поршень; 5 – регулировочный захват; 7, 8 – регулируемые опоры; 9 – пластина;  
10 – тяговый винт

Нагружение осуществлялось равномерно, со скоростью не более 1 МПа/с, время испытания до отрыва металлического штампа составляло от 30 до 90 с. Показания величины силы, при которой произошел отрыв металлического штампа, снимались с прибора, расчет величины адгезии производился по формуле:

$$\sigma = \frac{A}{F} [\text{МПа}], \text{ где}$$

$A$  – значение силы, при которой произошел отрыв (Н),  $F$  – площадь отрыва, мм.

Исследование проводилось также на минеральных поверхностях кварцевого состава с нанесенными поверхностными пленками. В случае невозможности исследования адгезии методом отрыва, адгезия геля рабочего раствора к минеральной поверхности определялась методом решетчатого надреза в соответствии с ГОСТ 31149-2014 [36].

На высушенные модельные образцы наносился модифицированный раствор алифатической эпоксидной смолы толщиной около 0,5 мм. Минеральные поверхности с искусственно нанесенными пленками и гелем выдерживались в течении суток в воздушно-сухой среде. На полученное покрытие наносились надрезы в двух перпендикулярных направлениях, длиной не менее 20 мм, расстояние между разрезами до 2-3 мм, проводилось не менее 6 параллельных разрезов. Испытания проводились не менее, чем на трех участках покрытия.

### **3.4.Методика закрепления песчаных грунтов в лабораторных условиях**

*Закрепление песчаных грунтов в инъекционных колоннах* методом пропитки проводилась в инъекционных колоннах оригинальной конструкции, разработанной автором (рис. 21), которая состоит из разборных секций внутренним диаметром 25 и высотой 50 мм и может наращиваться в зависимости от проницаемости помещенного в нее образца песчаного грунта. Резьбовые соединения герметизировались фторопластовым уплотнительным материалом для предотвращения фильтрации рабочего раствора при инъекционном закреплении при высоком давлении. Нижняя часть колонны перекрывалась сетчатым фильтром, на который помещался слой гравия толщиной до 10,0 мм. Такая конструкция позволяет извлекать образцы песчаного грунта из колонны без предварительного нагрева, а также без дополнительной внешней нагрузки на закрепленный образец [69].

Инъекционная колонна закреплялась в вертикальном положении на штативе Бунзена, сетчатым фильтром вниз. В процессе проведения экспериментов установлено, что качество инъекционной обработки не зависит от положения инжектора и направления распространения рабочего раствора в вертикальной плоскости.

Процесс инъекционного закрепления грунта происходил с заполнением порового пространства грунтов рабочим раствором, с сохранением плотности сложения песчаных грунтов, что соответствует их природной структуре. Эффективное расстояние распространения рабочего

раствора определялось либо по прекращению процесса фильтрации, либо – что реже – по преимущественному распространению раствора вдоль стенок колонны [69,70].

Инъекция осуществлялась под давлением от 0,1 до 0,6 МПа для песчаных грунтов, расход рабочего раствора с вязкостью 1,1 сП не превышал 0,10-0,33 л/мин. Давление нагнетания создавалось путем компрессора с ресивером, подача давления в инъекционный бак осуществлялась по пневмомагистрالي, регулировка давления осуществлялась с помощью механического реле компрессора. 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 сечением 24,8 мм, измерялись, взвешивались, затем помещались в соответствующие условия хранения для проведения дальнейших экспериментов.

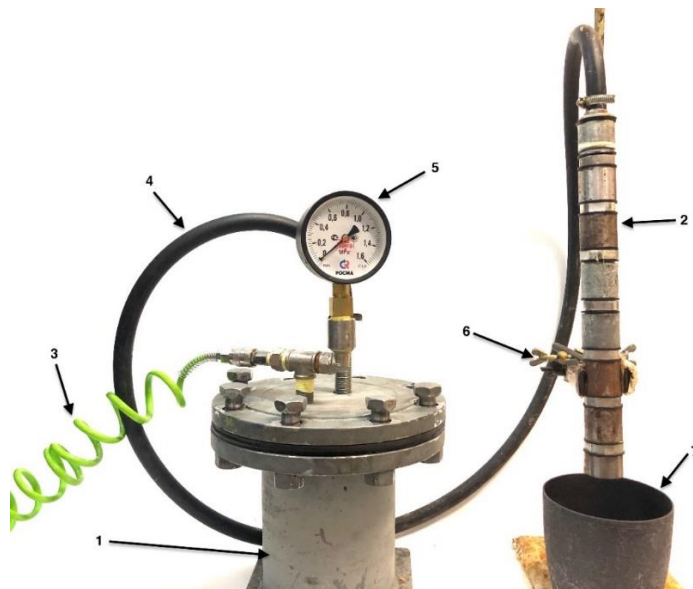


Рис. 21. Установка для исследования инъекционного закрепления грунтов. Обозначения:

1 – инъекционный бак, 2 – сборная инъекционная колонна, 3 – компрессорная пневмомагистраль, 4 – шланг инъекционного бака, 5 – манометр, 6 – зажим-лапка на штативе Бунзена, 7 – аккумулялирующая емкость

Как правило, проведение комплексных лабораторных исследований, особенно при работе с новыми рецептурами, проводится перед началом полномасштабных инъекционных работ в полевых условиях. Физическое моделирование, в данном случае, позволяет уточнить инъекционные параметры, оценить эффективность обработки грунтов вяжущими, кроме того, уточнить методику инъекционной обработки грунтов и получить первичные данные о свойствах модифицированных грунтов и их изменении.

### **3.5. Физическое моделирование инъекционной обработки песчаных грунтов методом однородной пропитки в лабораторных условиях**

*Физическое моделирование инъекционного закрепления грунтов* производилось в лабораторных условиях на авторской установке оригинальной конструкции [63,65].

Весомый мировой опыт в области физического моделирования инъекционного процесса [125,127,139,153] позволил учесть все особенности изучения поведения рабочих растворов в стендовых установках.

Авторская установка представляет собой параллелепипед, выполненный из листов нержавеющей стали толщиной 5 мм, с длинами сторон 800х500х300 мм (рис. 22) [68]. Емкость является однокамерной, с полезным объемом 135 л. Лицевая стенка стенда выполнена из прозрачного поликарбоната, что необходимо для визуального контроля за скоростью и характером распространения инъекционного раствора в поровом пространстве грунтов. Верхняя часть емкости оснащена направляющими, позволяющими выбирать свободное положение инжектора в пространстве. Имеется возможность установки нескольких инжекторов в пространстве стенда. Лицевая стенка является съемной, что существенно упрощает доступ к закрепленному массиву грунтов и его последующему пробоотбору [63].

Комплекс измерительной аппаратуры позволяет в реальном времени контролировать и измерять параметры инъекционного процесса: давление, скорость распространения и расход рабочего раствора, объем закрепленного грунта и т.д., а также анализировать полученные результаты для определения оптимальных условий инъекционного закрепления в полевых условиях. На тыльной стороне модели имеется возможность установки датчиков (рис. 22 позиция (14)) концентрации, температуры, pH, электропроводности и других датчиков стандартных конструкций в зависимости от условий проведения эксперимента.

Боковые стенки авторского стенда сконструированы с учетом возможности подачи и вывода излишнего флюида из порового пространства грунтов (рис. 22 позиции (10,12)). Для создания различного градиента напора имеется возможность установки нескольких типов нагнетательных насосов. Точки ввода и вывода, а также места установки регистрирующей аппаратуры (рис. 22 позиция (14)) дополнительно оснащаются сетчатым фильтром для обеспечения сохранности измерительной аппаратуры.

Инжектор (рис. 22 позиция (7)), установленный в стенде, подключается к нагнетательной емкости, подразумевающей установку расходомера и датчика давления нагнетания для контроля за основными параметрами инъекционного процесса. Инжектор представляет собой трубку с перфорацией в нижней части, расстояние между рядами перфорации – 25 мм, диаметр перфорации – 3 мм, конструктивно подразумевается возможность установки дополнительных манжет на область перфорации, для предотвращения загрязнения полости инжектора.

Разработанный стенд позволяет проводить эксперименты по инъекционному закреплению песчаных грунтов методом пропитки в лабораторных условиях как для воздушно-сухих, так и водонасыщенных грунтов. Одной из основных задач при создании авторского стенда было проведение серии испытаний по нагнетанию рабочих растворов низкой вязкости (вязкость рабочего раствора приближена к вязкости воды) с поддержанием минимального постоянного давления инъекции ( $P < 0,1$  МПа).

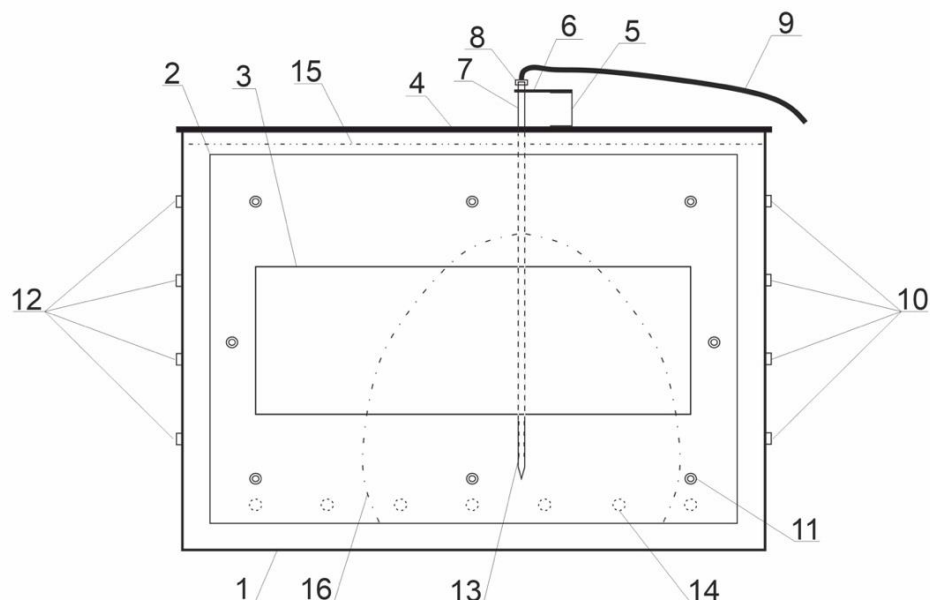


Рис. 22. Схема стендовой установки собственной конструкции для инъекционного закрепления грунтов в лабораторных условиях: 1 - корпус стенда, 2 – съемная фронтальная крышка, 3 – прозрачная часть для визуального контроля инъекции, 4 – направляющие для крепления инъекторов, 5 – перпендикулярные направляющие, 6 – держатель инъектора, 7 – инъектор, 8 – переходник для подключения шланга, 9 – шланг для подачи раствора, 10 – вывод излишков жидкости, 11 – крепление фронтальной стенки, 12 – ввод воды, 13 – перфорация инъектора, 14 – места крепления дополнительных датчиков, 15 – уровень максимального заполнения, 16 – контур закрепленного целика грунта

В вышеописанном стенде проводились испытания как на воздушно-сухих, так и на водонасыщенных песчаных грунтах. Авторская конструкция стендовой установки показала результаты, сопоставимые с натурными экспериментами.

### ***Экспериментальные исследования в рамках физического моделирования инъекционного процесса***

Заполнение стенда проводилось с применением послойной трамбовки, с мощностью элементарного уплотняемого слоя в пределах 3-5 см. Общая высота образца составила порядка 35 см, а общая масса используемого песчаного грунта - 135 кг. В центральную часть искусственно сформированного массива погружался инъектор с перфорацией в нижней части. Для инъекции



было подготовлено 17,6 литров рабочего раствора. Процесс инъекционной обработки песчаных грунтов проводился на протяжении 15 минут. Расход рабочего раствора составил 1-2 л/мин, при давлении нагнетания в 25-50 кПа [68].

Инъекционная обработка проводилась методом пропитки, скорость распространения раствора контролировалась визуально (рис. 23), так как одна из стенок выполнена из прозрачного поликарбоната. Отметим, что за момент окончания инъекции принят момент выхода рабочего раствора по приинъекторной области на поверхность, по достижении которого нагнетание прекращается. Установлено, что в процессе проведения эксперимента удалось провести нагнетание 17,0 л рабочего раствора [63].

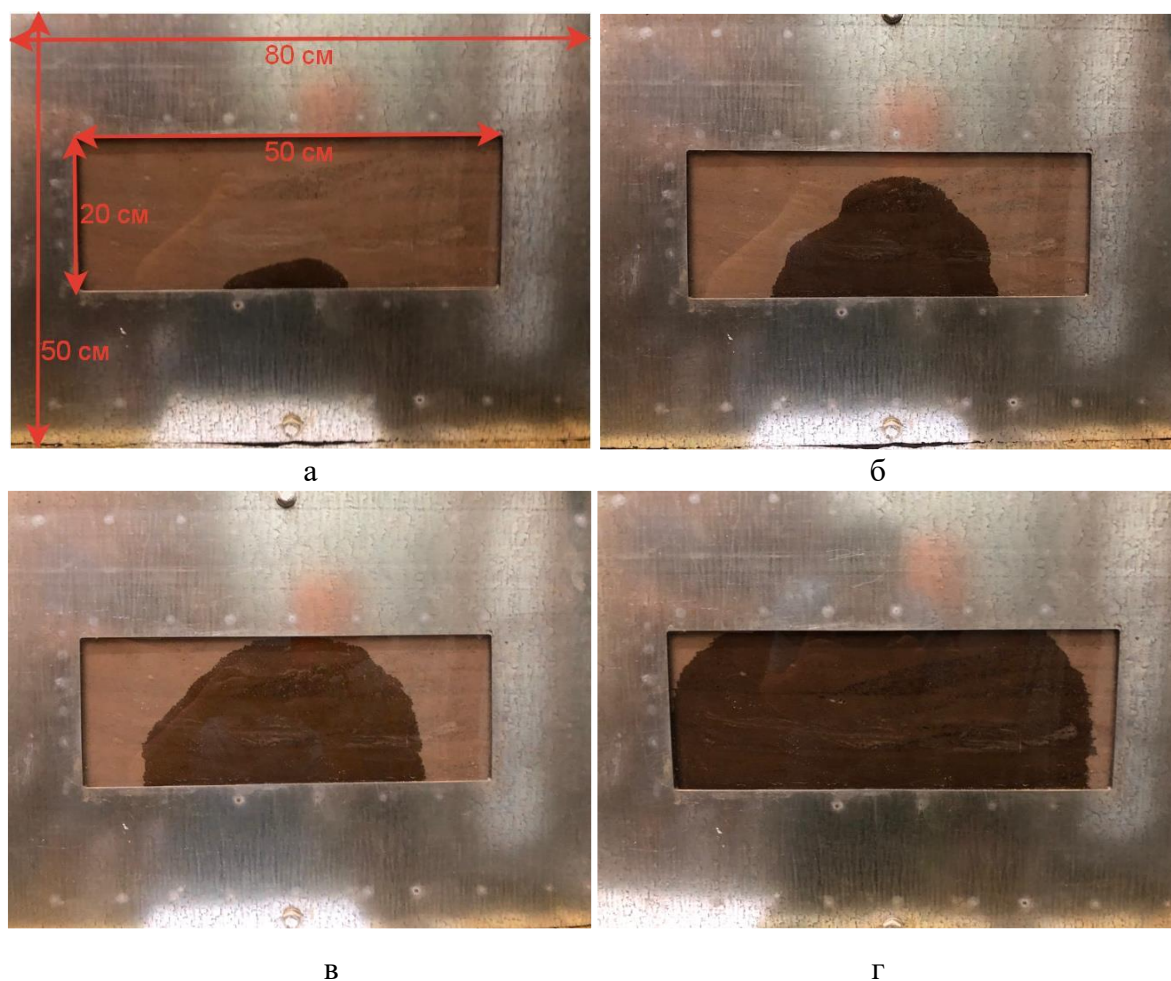


Рис. 23. Характер распространения рабочего раствора в песчаном грунте ( $aQ_{III}^{II}$ ) на стендовой установке с течением времени от начала инъекции:

а – 6 минут, б – 9 минут, в – 11 минут, г – 15 минут

Набор прочности грунтового композита, по результатам предыдущих исследований [8,9], составляет порядка 28 дней, вследствие чего стенд разбирался по прошествии данного интервала времени, для дальнейшего анализа и опробования. Вскрытие емкости проводится путем снятия



фронтальной части стенда, после чего незакрепленная, рыхлая часть песчаного грунта вынималась, и производился анализ закрепленной его части [13].

### **3.6.Опытные полевые исследования по закреплению песчаных грунтов**

*Опытная инъекционная обработка песчаных грунтов* в естественном сложении производилась с помощью забивного инъектора стандартной конструкции [76] диаметром 25,4 мм, перфорированная часть инъектора составляла 300 мм, расстояние между пазами с перфорацией – 50 мм, диаметр отверстий – 3 мм. Перед забивкой инъектора производилось предварительное закрытие каждого ряда перфорации эластичными тонкими резиновыми манжетами, которые прорывались в процессе нагнетания рабочего раствора.

Подготовка к закреплению массива грунтов сводилась к следующему: инъектор погружался в массив посредством забивания в грунт на расчетную глубину, после чего на него надевался переходник с быстросъемным механизмом, соединяющийся с резервуаром рабочего раствора. Раствор модифицированной алифатической эпоксидной смолы подавался в грунт через инъектор с поддержанием постоянного давления инъекции (1,2-1,3 атм). Расход рабочего раствора составлял 20-25 л/мин. Общий объем использованного рабочего раствора составил 0,2 м<sup>3</sup>, объем закрепленного грунта 0,5 м<sup>3</sup>. Вскрытие обработанного массива песчаных грунтов производилось спустя месяц после проведения инъекции [70].

### **3.7.Промышленная инъекция модифицированного раствора алифатической эпоксидной смолы**

Для проведения инъекционных работ был сооружен инъекционный узел, который включал емкости для приготовления растворов, насосы для перекачивания воды и компонентов инъекционного раствора, а также насосную станцию.

Проведение опытных инъекционных работ происходило в ноябре (дневные температуры воздуха составляли от +1 до -19°C), над раствором узлом было сооружено укрытие, представляющее собой отапливаемый тепловыми пушками ангар.

**Растворный узел включал в себя следующее:**

- емкости с технической водой (еврокуб, 4 шт);
- емкости для смешивания химического рабочего раствора (еврокуб, 2 шт);
- перекачивающий насос высокого давления (для смешивания рабочего раствора);
- нагнетательную насосную станцию для инъекции растворов;
- нагнетательные и вспомогательные шланги для перекачивания и инъекции химических растворов и суспензий;
- места хранения компонентов рабочего раствора и цемента;
- места хранения бурового оборудования.

Растворный узел располагался как можно ближе к области инъекционной обработки грунтов, вследствие чего потери давления в нагнетательных шлангах были минимальными.

Оборудование для проведения инъекционных работ имело возможность повышения давления нагнетания до 40 атм, при расходе рабочего раствора до 40 л/мин. Для обеспечения работы при высоких расходах рабочего раствора и повышенном давлении нагнетания использовались армированные шланги высокого давления.

**Подготовка скважин** к инъекции заключалась в бурении на заданную глубину, установке иньектора на глубину «холостой» зоны (1 м от поверхности), тампонировании цементно-гипсовым раствором пространства между иньектором и стенкой скважины для предотвращения выпора рабочего раствора при нагнетании в инъекционную скважину. После застывания цементно-гипсового раствора скважина была готова к проведению инъекционных работ.

Бурение скважин проводилось на проектную глубину 3 м с помощью малогабаритной буровой установки, с использованием шнека, диаметром 72 мм.

Всего на площадке были пройдены 3 скважины глубиной по 3 м для нагнетания химического вяжущего. Скважины бурились и обрабатывались с соблюдением очередности «через одну» для исключения возможности сообщения между соседними скважинами. Соседние скважины бурились и обрабатывались после схватывания раствора в предыдущей скважине. Расстояние между скважинами составило 1,25 м [173].

#### ***Схема проведения инъекционных работ***

Для приготовления рабочего раствора использовались следующие компоненты:

- Смола алифатическая эпоксидная марки ДЭГ-1, производства АО «ХИМЭКС Лимитед», произведенная в соответствии с ТУ 2225-673-11131395-2010.
- Коллоидный кремнезем марки NANOSIL-30, производства ООО «Кремний», произведенный по ТУ 20.13.62-001-36426128-2018.
- Полиэтиленполиамин (ПЭПА), производства АО «ХИМЭКС Лимитед», произведенный по ТУ 2413-646-11131395-07.

Приготовление рабочего раствора проводилось из расчета обработки одной инъекционной скважины, с мощностью обрабатываемой зоны в 2 погонных метра. Согласно предварительным расчетам, для обработки одного погонного метра песчаного грунта при планируемом радиусе инъекции порядка 80 см необходимо приготовление рабочего раствора в объеме 850 л. Для подготовки к инъекционному химическому закреплению готовились две емкости с рабочим раствором общим объемом 1700 л.

Отвердитель, в качестве которого использовался ПЭПА, добавлялся к рабочему раствору непосредственно перед началом инъекции. При добавлении отвердителя обеспечивалось постоянное перемешивание рабочего раствора с помощью циркуляционного насоса. Подача

инъекционного раствора осуществлялась в аккумулирующую емкость нагнетательной станции порционно, объемом по 150 л.

Контроль качества рабочего раствора проводился параллельно с приготовлением рабочего раствора. В процессе инъекционной обработки песчаных грунтов, температура рабочего раствора составляла 13°C. При этом температура исходной технической воды составляла 4°C, вязкость рабочего раствора – 1,1 сП, плотность рабочего раствора 1,05-1,1 г/см<sup>3</sup>.

Давление инъекции составляло 0,7-1,0 атм, первые 300 л рабочего раствора пропитали грунт без давления, «самотеком». При дальнейшем внедрении инъекционного раствора в поровое пространство грунтов наблюдалось некоторое повышение давления инъекции до 1 атм. Объем раствора, закачанного в каждую скважину, составил 1700 л при 2-х метровом интервале инъекции.

### **3.8. Лабораторные исследования образцов закрепленных песчаных грунтов**

*Исследование порового пространства* закрепленных грунтов проводилось с использованием метода рентгеновской компьютерной микротомографии (μКТ) на приборе КТ Yamato TDM-1000H-II [51], приобретенном по программе Развития Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова. Образец модифицированного грунта помещался на вращающийся столик-манипулятор томографа, после чего производилась рентгеновская просвечивающая съемка в различных проекциях. Изображения полученных проекций реконструировались в трехмерную модель. Съемка осуществлялась при 10-20-кратном увеличении, разрешение съемки составило 19 мкм. Анализ трехмерных реконструкций образцов производился в программном комплексе VGStudio MAX2.2, выделение различных структурных элементов осуществлялось на основании их рентгеноконтрастности относительно друг друга. Для этого также проводилась отдельная съемка компонентов модифицированного грунта.

*Изучение микростроения* закрепленных образцов песчаных грунтов производилось по стандартным методикам [51] с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) LEO 1450 VP, оснащенного энергодисперсионным спектрометром INCA 300, приобретенном по программе Развития Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова. Подготовка образцов для исследования на РЭМ выполнялась методом сушки на воздухе, а также методом вакуумной морозной сушки. Для закрепленных образцов грунта поверхность для исследований готовилась в виде скола, с последующим напылением электропроводного покрытия. Изображения микростроения образцов получены в режиме вторичных электронов [85].

*Прочность образцов закрепленного грунта* на одноосное сжатие определялась на приборе МП-2С (рис. 24).



Рис. 24. Образец закрепленного песчаного грунта в приборе для испытаний на одноосное сжатие МП-2С; высота образца – 50 мм, диаметр – 25 мм

Расчёт прочности на одноосное сжатие  $\sigma_{сж}$  производится по формуле:

$$\sigma_{сж} = \frac{P}{S} \text{ [кг/см}^2\text{]},$$

где  $P$  – усилие,  $S$  – площадь поперечного сечения образца.

**Фильтрационные испытания** произведены на установке, устроенной по принципу, изложенному в ГОСТ 12730.5–2018 [107,108,109]. Установка отличается применением инертных материалов, контактирующих с раствором (полиэтилен, полипропилен, сополимеры стирола), с возможностью установки заданного давления раствора (воды), его температуры и химического состава, оборудованной датчиками контроля температур и давлений (воды и воздуха), функционирующими в автоматическом режиме совместно с чувствительным кондуктометрическим расходомером (рис. 25).

В качестве раствора для фильтрации использована водопроводная вода с минерализацией 146 мг/л и рН 7.8. В течение 70 суток образцы подвергались фильтрации при различном градиенте напора, при этом для трех образцов давление на входе в них одинаково.

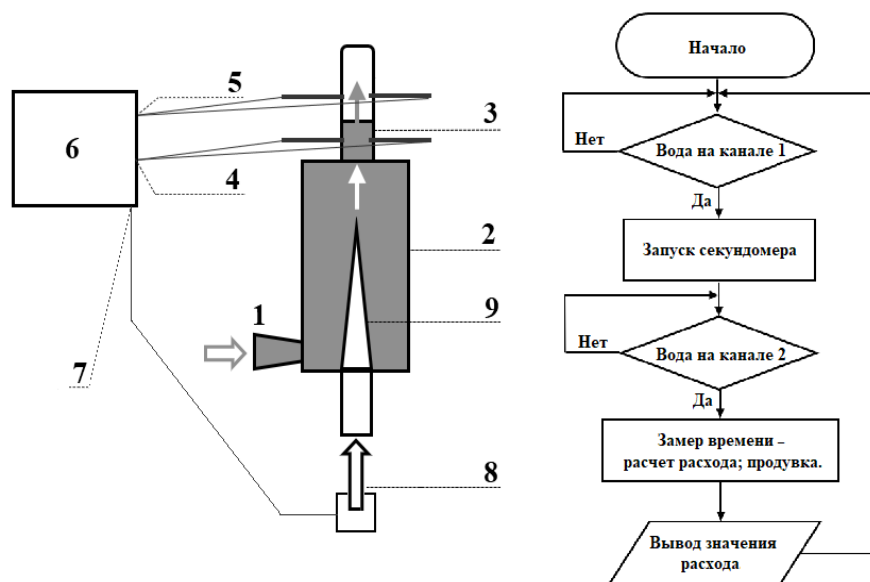


Рис. 25. Конструктивная и логическая схемы кондуктометрического расходомера (1 – вход фильтрата; 2 – приемная камера; 3 – измерительная трубка; 4 – вход первой пары электродов через потенциометрический датчик (канал 1); 5 – вход второй пары электродов через потенциометрический датчик (канал 2); 6 – контроллер; 7 – управляемое питание малогабаритного компрессора; 8 – компрессор; 9 – продувочный клапан) [109]

Расчет  $K_f$  проводится согласно основному закону фильтрации ( $V = -K_f \nabla H$ ), при скорости фильтрации  $V$  из регистрируемого расхода, площади поперечного сечения образца и давлений на его торцах  $I$  [ $m_{вод.ст.} / m_{вод.ст.}$ ], с учетом колебаний атмосферного давления на выходе из образца.

### Выводы к главе 3

Основной задачей настоящего исследования является создание комплексной методики изучения влияния геологических факторов на эффективность закрепления песчаных грунтов химическими вяжущими. Выполненный анализ современного состояния инъекционной обработки грунтов методом пропитки показал, что одной из основных проблем является низкая методическая проработка вопросов применимости химических вяжущих в тех или иных инженерно-геологических условиях, вследствие, прежде всего, дороговизны отработки методики и возможности применения химических вяжущих для дисперсных грунтов.

Задачи изучения влияния различных геологических факторов решались при помощи авторской конструкции - для изучения эффективного радиуса закрепления песчаных грунтов использовались разборные инъекционные колонны. Данная установка является универсальной, так как позволяет избежать процесса нагревания запарафинированных трубок при извлечении грунта после инъекционной обработки. Отметим, что главной задачей при использовании разборных инъекционных колонн являлась гомогенизация модифицированного образца в колонне, что является достижимым при использовании авторского оборудования.

Однако, данный вид исследований не лишен некоторых недостатков, среди которых – свободное истечение раствора под действием силы тяжести сверху вниз по инъекционной колонне в процессе ее хранения до наступления времени полимеризации, что безусловно сказывается на качестве распределения вяжущего по инъекционной колонне.

В связи с этим была предложена идея разработки физической модели для инъекционного закрепления грунтов в лабораторных условиях [65], которая позволяет нивелировать негативные эффекты, проявляющиеся в инъекционных колоннах. Стендовая установка позволяет произвести объемный эксперимент, моделирующий процесс распространения раствора вяжущего вещества в поровом пространстве по мере удаления от точки инъекции. Тем не менее, использование стенда для закрепления грунтов накладывает существенные ограничения на изучение максимального расстояния рабочего раствора, так как модель имеет ограниченный объем (до 0,15 м<sup>3</sup>), данное ограничение не позволяет рассуждать о радиусе инъекционной обработки в полевых условиях, но с другой стороны, позволяет проводить исследование физико-механических свойств, а также, в целом, работать с более объемной выборкой образцов модифицированных грунтов.

Сравнение результатов лабораторного закрепления грунтов позволили выявить некоторые закономерности в распределении свойств модифицированных грунтов по мере удаления от точки инъекции, которые невозможно изучать с применением отдельно взятого оборудования.

Для получения полного представления о процессе инъекционной обработки песчаных грунтов методом пропитки были проведены натурные испытания, которые позволили создать единую методику изучения влияния эффективности использования вяжущего при закреплении грунтов, а также провести комплексный анализ модифицированных грунтов.

Показатели отдельных свойств грунтов, в большинстве своем, проводились по общепринятым и стандартным методикам, по единой схеме испытаний, что позволяет стандартизировать результаты и выявить закономерности в изменении состава, строения и свойств песчаных грунтов при их инъекционной обработке.

## Глава 4. Свойства гелеобразующей системы

В процессе настоящего исследования нами была представлена и апробирована рецептура инъекционного раствора на основе алифатической эпоксидной смолы с добавлением коллоидного кремнезема, в качестве отвердителя для рабочего раствора использовался полиэтиленполиамин [66,69].

### 4.1. Компоненты рабочего раствора

Для изготовления рабочего раствора нами использовались следующие компоненты:

Алифатическая эпоксидная смола марки ДЭГ-1 и ее современные аналоги:

- Алифатическая эпоксидная смола марки «А» (по ТУ 2225-144-07510508-2015)
  1. Вязкость (при 25°C) – 100-140 сП;
  2. Содержание эпоксидных групп – 15,8-24,0%;
  3. Функциональность – 3.
- Алифатическая эпоксидная смола марки «Этал-1» (по ТУ 2225-027-00203306-97)
  1. Вязкость (при 25°C) – 80-160 сП;
  2. Содержание эпоксидных групп – 14,5-18,5%;
  3. Функциональность – 3.
- Алифатическая эпоксидная смола марки ДЭГ-1 (по ТУ 2225-673-11131395-2010)
  1. Вязкость (при 25°C) – 80-160 сП;
  2. Содержание эпоксидных групп – 14,5-18,5%;
  3. Функциональность – 3.

Коллоидный кремнезем:

- Раствор коллоидного кремнезема марки «Лейксил-30» (по ТУ 2145-012-61801487-2014)
  - Начальная вязкость (при 20°C) – 6,05 сП;
  - Вязкость (при 20°C) – 1,15 сП;
  - Плотность (при 20°C) – 1,19 – 1,21 г/см<sup>3</sup>;
  - pH – 10,07;
  - Массовая доля диоксида кремния 29 – 31%.
- Раствор коллоидного кремнезема марки «NANOSIL-30» (по ТУ 20.13.62-001-36426128-2018)
  - Начальная вязкость (при 20°C) – 6,21 сП;
  - Вязкость (при 20°C) – 1,17 сП;
  - Плотность (при 20°C) – 1,20 – 1,21 г/см<sup>3</sup>;
  - pH – 10,0;
  - Массовая доля диоксида кремния 29 – 31%.

В качестве отвердителя был выбран полиэтиленполиамин (ПЭПА) (по ТУ 2413-010-75678843-2012). Отвердитель представляет собой жидкость от светло-желтого до темно-бурого цвета. Плотность ПЭПА при 25°C равна 0,956-1,011 г/см<sup>3</sup>. Значение вязкости не нормировано ТУ или паспортом и составляет около 900 мПа\*с. В процессе проведения полевых работ использовался полиэтиленполиамин (ПЭПА), производства АО «ХИМЭКС Лимитед», произведенный по ТУ 2413-646-11131395-07 со схожими характеристиками раствора.

#### 4.2. Свойства модифицированного раствора алифатической эпоксидной смолы

Содержание отвердителя (ПЭПА) в рабочем растворе подбиралось экспериментально, исходя из времени гелеобразования для инъекции суспензии в песчаные грунты, которое изменяется в интервале от 40 до 180 минут. Согласно общепринятым представлениям [94,95], при уменьшении времени гелеобразования в диапазоне индукционного периода рабочего раствора, также наблюдаются и существенные изменения прочностных свойств геля. Было установлено, что увеличение концентраций вяжущего сопровождается закономерным увеличением прочности на 50-70%. Исходя из оптимальных параметров инъекционного процесса нами был выбран временной диапазон в 90-150 минут, который можно считать технологически приемлемым [48].

В процессе исследования нами был подобран состав рабочего раствора, представляющего из себя смесь коллоидного кремнезема с 7,5 %-ой концентрацией, органической эпоксидной алифатической смолы и отвердителя в виде полиэтиленполиамин, в соотношении 3,0:1,0:0,16 (рис. 26). Данная рецептура является наиболее подходящей как с точки зрения времени гелеобразования (около 90 минут), так и с точки зрения получаемой прочности геля. Такой временной интервал достаточен для проведения процесса инъекционной обработки массива песчаного грунта, без боязни схватывания раствора в рабочей установке [69].

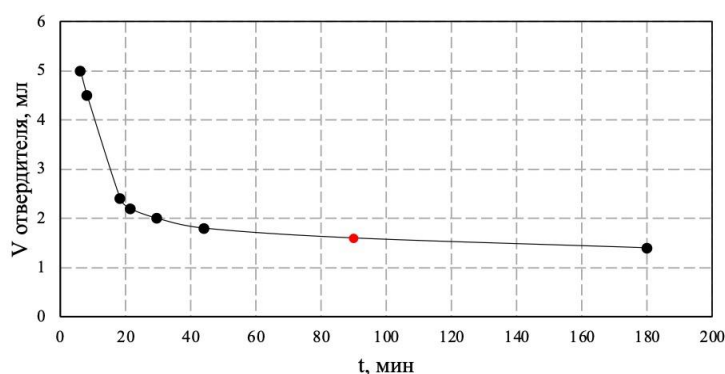


Рис. 26 График зависимости объема отвердителя от времени гелеобразования рабочего раствора (при 20°C)

Уменьшение количества отвердителя пагубно влияет на время гелеобразования, увеличивая его в несколько раз, что серьезно затрудняет весь процесс инъекционной обработки.



Ко всему прочему, уменьшение объема полиэтиленполиамиона приводит к образованию менее водоустойчивых гелей, при иных пропорциях рабочего раствора. Увеличение объемов полиэтиленполиамиона позволяет получить образцы с более высокой прочностью, но время гелеобразования в таких растворах варьируется в пределах первых десяти минут, что делает невозможным использование современных способов инъекционного закрепления. Также, наблюдается сильная усадка образцов геля спустя несколько часов, что приводит к их расслаиванию [69].

Температура грунтов в европейской части России изменяется от  $-4,6^{\circ}\text{C}$  до  $14,2^{\circ}\text{C}$  в течение года, среднегодовая температура от  $4,1^{\circ}\text{C}$  до  $6,3^{\circ}\text{C}$ , а глубина сезонного промерзания от 17 до 90 см. Исходя из этого, нами было решено изучить влияние температуры рабочего раствора на время гелеобразования при температуре 10 и  $0^{\circ}\text{C}$ . Экспериментальный подбор объемной доли отвердителя проводился при температуре окружающей среды и компонентов рабочего раствора в  $10^{\circ}\text{C}$ .

Изучение взаимодействия раствора коллоидного кремнезема, модифицированного алифатической эпоксидной смолой и отвердителем в соотношении 3,0:1,0:0,16 не позволяет добиться требуемого времени гелеобразования. Для формирования образцов геля коллоидного кремнезема данной серии рабочего раствора было принято решение использовать следующие пропорции 3,0:1,0:0,2 (рис. 27).

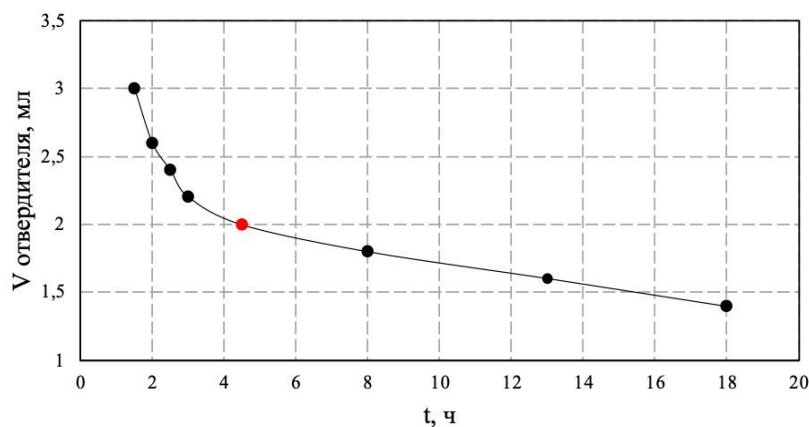


Рис. 27. График зависимости объема отвердителя от времени гелеобразования рабочего раствора (при  $10^{\circ}\text{C}$ )

Увеличение количества отвердителя до 2 мл позволяет достичь минимальных требований к физико-механическим характеристикам геля, а также его жизнестойкости.

Для температуры  $0-1^{\circ}\text{C}$  был подобран состав рабочего раствора, представляющий из себя смесь коллоидного кремнезема с 7,5 %-ой концентрацией, органической эпоксидной алифатической смолы и отвердителя в виде полиэтиленполиамиона, в соотношении 3,0:1,0:0,4 (рис. 28).

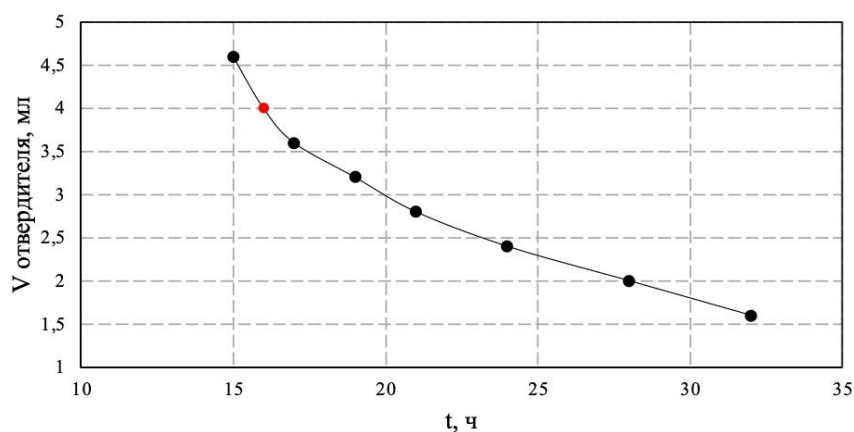


Рис. 28. График зависимости объема отвердителя от времени гелеобразования рабочего раствора (при близкой к  $0^{\circ}\text{C}$ )

Проведенные исследования показали, что температура окружающей среды, а главным образом, температура компонентов рабочего раствора, является наиболее простым и действенным методом регулирования времени гелеобразования рабочих растворов.

Основным объектом настоящего исследования является рабочий раствор при стандартных условиях давления и температуры ( $20^{\circ}\text{C}$ / 760 мм рт.с.).

Вязкость раствора является важнейшим физическим параметром, характеризующим свойства инъекционного раствора, позволяет определить тип глубинной обработки грунтов.

Наиболее применимыми для песчаных грунтов являются ньютоновские жидкости с малой вязкостью, чем и является наш рабочий раствор. Незначительное изменение вязкости во времени позволяет отнести его к не эволюционирующим ньютоновским жидкостям. С практической точки зрения, незначительное увеличение относительной вязкости упрощает поддержание постоянного расхода через инъектор, не прибегая к повышению давления инъекции [69].

Нами было установлено, что в первые 85 минут вязкость изменяется в пределах  $\mu = 1,1-1,6$  сП, в последующие пять минут значение данного параметра резко возрастает до  $\mu = 6,8-7,0$  сП, что характеризует момент гелеобразования (рис. 29).

В процессе проведения лабораторных исследований было замечено, что процесс полимеризации происходил с выделением большого количества тепла. Как известно, повышение температуры, сопровождающееся усилением броуновского движения, приводит к сокращению времени гелеобразования [69].

Снижение температуры окружающей среды и раствора приводит к существенному увеличению времени гелеобразования. Увеличение количества отвердителя до 2 мл позволило сохранить физико-механические свойства полимеризовавшегося раствора, однако время гелеобразования существенно увеличилось (до 4,0-4,5 ч). Показатели вязкости рабочего раствора (при  $T = 10^{\circ}\text{C}$ ) не увеличились и варьируются в пределах  $\mu = 1,1-1,55$  сП на протяжении первых

250 минут, в последующие десять минут значение данного параметра резко возрастает до  $\mu = 3,2-8,2$  сП, что характеризует момент гелеобразования (рис. 29).

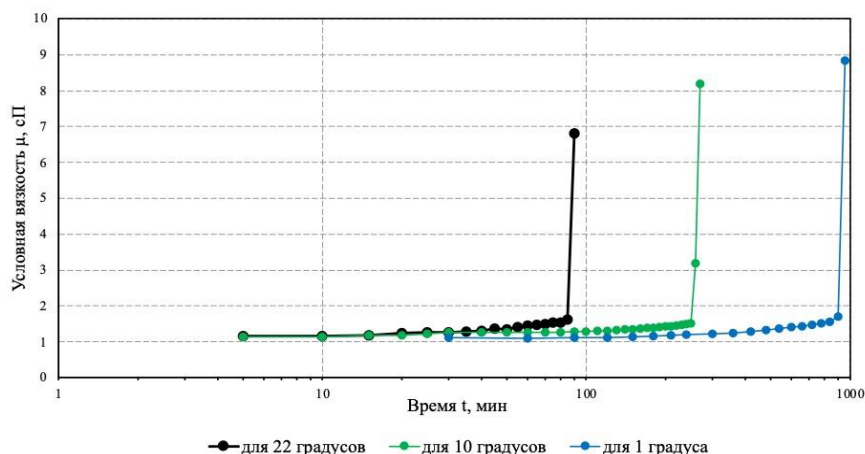


Рис. 29. Изменение условной вязкости рабочего раствора во времени при различной температуре

Для температур, близких к отрицательным, требуется существенное увеличение количества отвердителя (ПЭПА). Для формирования рабочего раствора, применимого в низкотемпературных условиях ( $T = 1-0^{\circ}\text{C}$ ) требуется двукратное увеличение количества полиэтиленполиамиона до 4 мл.

При исследовании серии наиболее подходящих рабочих растворов для данных температур, было установлено, что увеличение количества алифатической эпоксидной смолы приводит к расслаиванию комплексного сополимера. Повышение процентного содержания полиэтиленполиамиона приводит к сокращению времени гелеобразования, но формированию менее устойчивого геля в воздушно-влажных условиях.

Время гелеобразования выбивается за рамки оптимальных значений для инъекции (увеличилось до 16 ч). Показатели вязкости рабочего раствора (при  $T$  близкой к  $0^{\circ}\text{C}$ ) при этом остаются неизменными и варьируются в пределах  $\mu = 1,1-1,7$  сП на протяжении первых 15 часов, в последующие десять минут значение данного параметра резко возрастает до  $\mu = 8,8$  сП, что характеризует момент гелеобразования (рис. 29).

В процессе проведения лабораторных исследований было замечено, что процесс полимеризации происходил с выделением большого количества тепла. Как известно, повышение температуры, сопровождающееся усилением броуновского движения, приводит к сокращению времени гелеобразования.

При измерении температуры экзотермической реакции температура внешней среды составляла  $20-22^{\circ}\text{C}$ , резкое повышение температуры (до  $34,5^{\circ}\text{C}$ ) геля наблюдалось в первые минуты, после чего происходило его постепенное остывание (рис. 30).

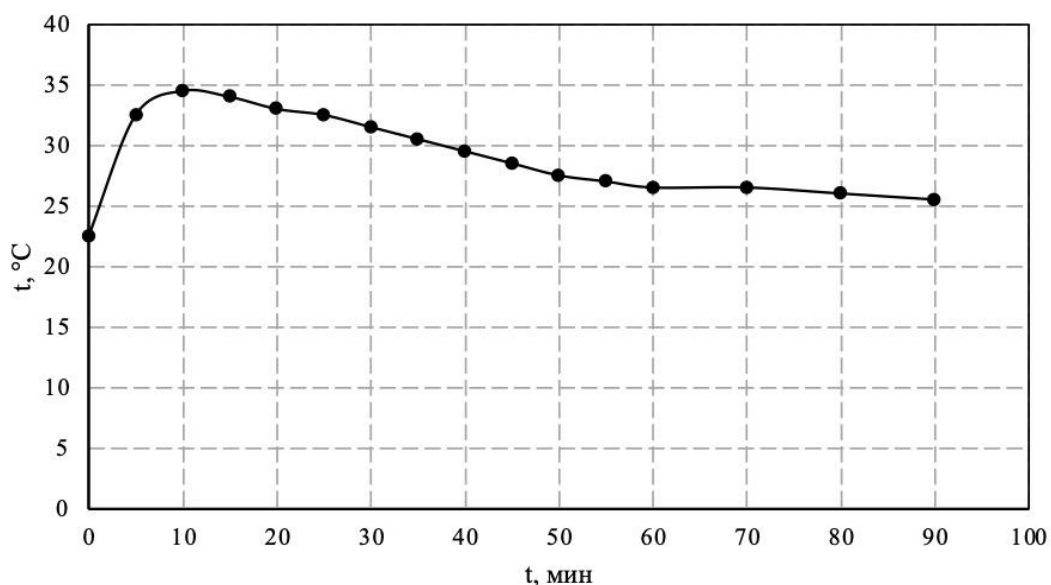


Рис. 30. Изменение температуры рабочего раствора при поликонденсации эпоксидной смолы в зависимости от времени

Деформация свободного набухания геля в воздушно-влажных условиях не превышает 1%, а в водонасыщенной среде – составляет 16% в течение трех месяцев. Тем не менее, образцы закрепленных песчаных грунтов, хранившиеся в водонасыщенных условиях в течение двух лет, набухают не более чем на 2-3%, а давление набухания в них не развивается.

Для характеристики прочностных свойств геля рабочего раствора, как самостоятельного компонента модифицированного массива грунтов, была изготовлена серия цилиндрических образцов геля рабочего раствора в специальных разборных секциях. Образцы геля извлекались из секций спустя 4 часа после окончания гелеобразования и помещались в различные условия хранения.

В процессе испытания образцов на прочность на одноосное сжатие (рис. 31,32) нами испытывались образцы геля и закрепленного грунта в воздушно-влажном и водонасыщенном состояниях (при хранении под водой). Испытания на одноосное сжатие проводились с заданной периодичностью, каждые 7 суток. Несмотря на высокую адгезию данного рабочего раствора испытания проводились как на геле, так и на закрепленных образцах песка [69].

Известно, что прочность как геля, так и закрепленных песков зависит от времени [145]. Основной набор прочности наблюдается в первые недели с момента гелеобразования.

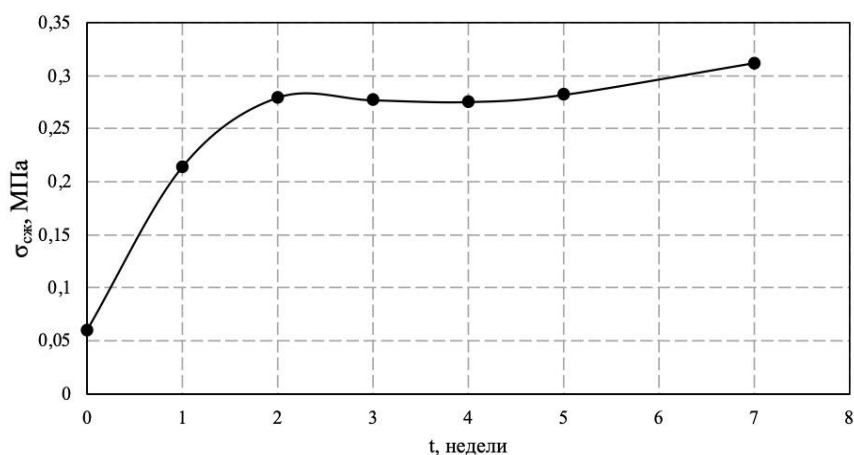


Рис. 31. Изменение во времени прочности ( $\sigma_{сж}$ ) образцов геля, хранившихся в воздушно-влажной среде

При испытании на прочность образцов геля, хранившихся в воздушно-влажных условиях (рис. 31), получено, что прочность на одноосное сжатие спустя час с момента гелеобразования составила 0,06 МПа, спустя неделю значение  $\sigma_{сж}$  выросло до 0,21 МПа, через две недели с момента гелеобразования прочность возросла до 0,28 МПа. Дальнейший набор прочности происходил постепенно, прочность образцов варьировалась в пределах 0,28-0,31 МПа.

При испытании на прочность геля в водонасыщенном состоянии (рис. 32) образцы после полимеризации были помещены в воду. Спустя неделю значение  $\sigma_{сж}$  составило 0,12 МПа, дальнейшее значение прочности варьировалось в пределах 0,13-0,15 МПа.

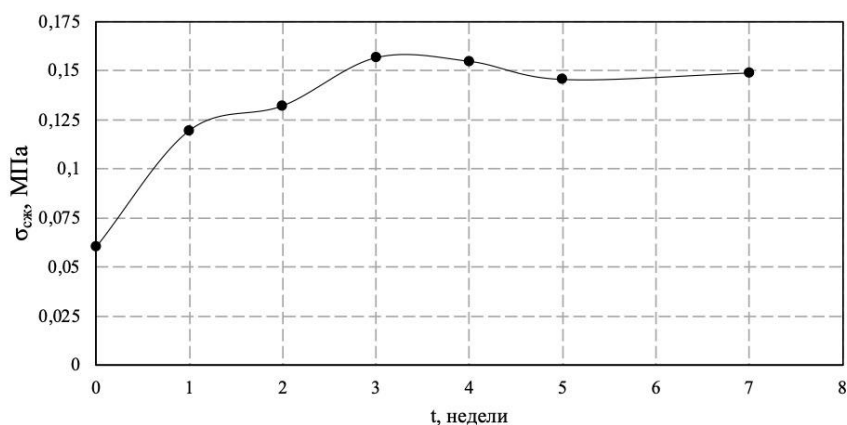
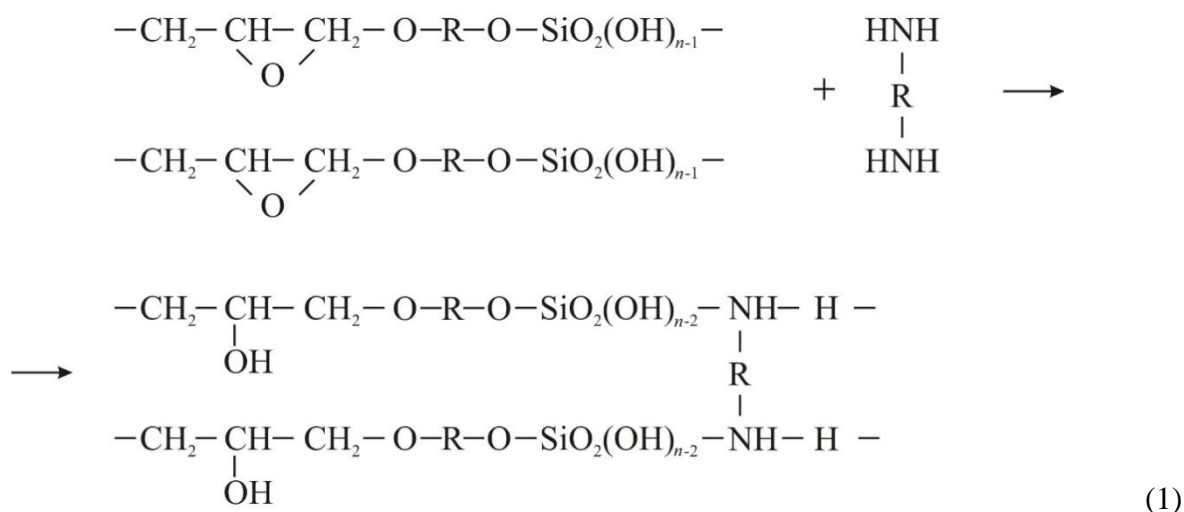


Рис. 32. Изменение во времени прочности ( $\sigma_{сж}$ ) образцов геля, хранившихся в водонасыщенных условиях

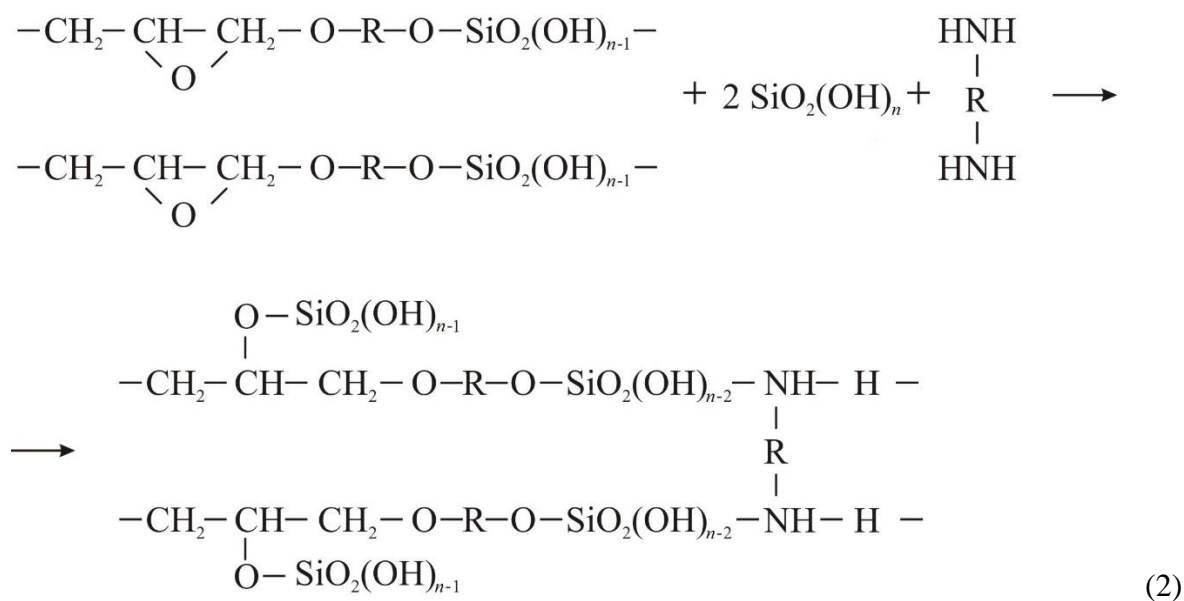
Гель рабочего раствора имеет однородную структуру, что свидетельствует об эффективной сополимеризации эпоксидных радикалов и коллоидов диоксида кремния с образованием олигомерных цепочек [101]. Данный процесс осуществляется благодаря наличию краевых реакционноспособных гидроксильных радикалов как у отдельных эпоксидных цепочек,

так и у коллоидных частиц кремнезема. При добавлении отвердителя происходит «сшивание» отдельных олигомерных цепочек алифатической эпоксидной смолы в объемный гель [69].

Используя структурные выкладки В.А. Деминой [40], с учетом гомогенности кремнеземисто-эпоксидного раствора после смешения отдельных компонентов, а также однородности структуры геля после твердения, эту реакцию схематично можно представить в следующем виде:



где O-R-O соответствует дегидрированному этиленгликолю; или, учитывая способность коллоидного кремнезема SiO<sub>2</sub> активно взаимодействовать со свободными гидроксилами формирующегося геля:



Хлорид натрия, образующийся после раскрытия эпоксидных радикалов и омыления щелочью в результате смешения со слабощелочной суспензией коллоидного кремнезема,

является побочным продуктом реакции. С другой стороны, крупные кристаллы NaCl в обработанных образцах песков также не зафиксированы [69].

Результаты определения краевого угла смачивания для основных породообразующих минералов песчаных грунтов представлены на рисунке 33. Значения краевых углов смачивания использовались в качестве одной из характеристик гидрофильности поверхности песчаных разностей, влияющей на процесс распространения инъекционного раствора в поровом пространстве грунтов. Данный показатель косвенно влияет на эффективность распространения рабочего раствора в поровом пространстве грунта в зависимости от его минерального состава. Присутствие ленточных силикатов в минеральном составе песков приводит к снижению краевого угла смачивания поверхности, а, следовательно, к увеличению эффективного радиуса распространения рабочего раствора по длине инъекционной колонны.

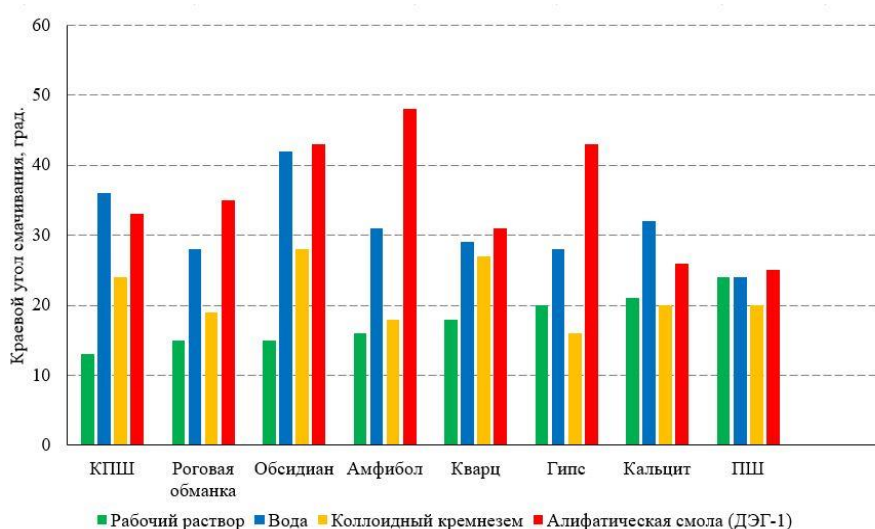


Рис. 33. Значения краевых углов смачивания для основных породообразующих минералов песчаных грунтов

Поверхностное натяжение рабочего раствора составляло 52,8 мН/м, что практически на 30% ниже, чем у воды (72,86 мН/м).

Определение краевого угла смачивания проводились и для подготовленных минеральных поверхностей с различными поверхностными пленками [59]. Полученные результаты (рис. 34) свидетельствуют о том, что присутствие органического вещества приводит к существенному увеличению угла смачивания [3], что приводит к ухудшению качества обработки порового пространства. Карбонатные пленки сравнительно хуже смачиваются раствором алифатической эпоксидной смолы. Значения величин смачивания силикатной, железистой и глинистой пленок составом рабочего раствора близки между собой. Значения величин смачивания водой поверхности с различными по составу искусственными образованиями, исключая органическую, близки между собой (табл. 18), что подтверждается результатами определения высоты капиллярного поднятия.

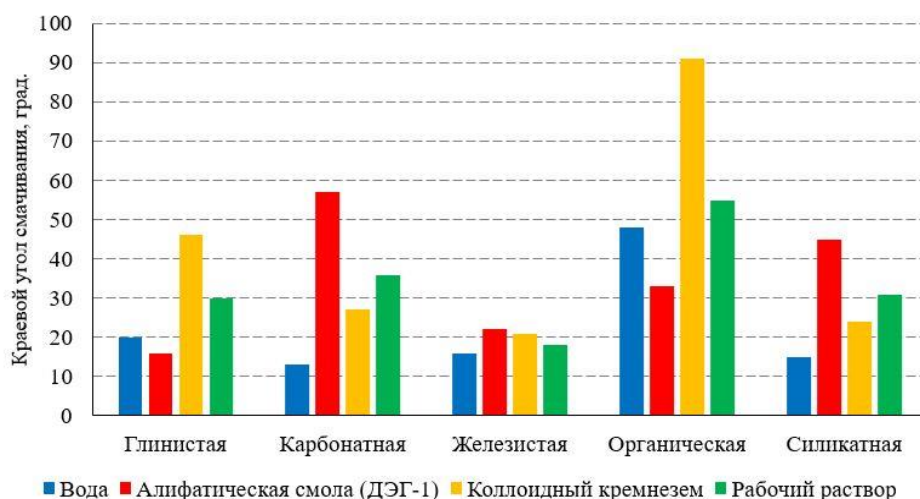


Рис. 34. Значения краевых углов смачивания для пленок различного состава

Таблица 18

Величины смачивания в зависимости от вида пленки и состава раствора

Тип аутигенной пленки	Вода	Эпоксидная смола	Коллоидный кремнезем	Инъекционный раствор
Глинистая	0,94*	0,96	0,69	0,87
Карбонатная	0,97	0,54	0,89	0,81
Железистая	0,96	0,93	0,93	0,95
Органическая	0,67	0,84	-0,02	0,57
Силикатная	0,97	0,71	0,91	0,86

Примечание: \* – цифрами указаны величины смачивания, рассчитанные по формуле  $B = \cos \theta$ , где  $\theta$  – значение краевого угла смачивания

Уменьшение угла смачивания приводит к увеличению взаимодействия между компонентами инъекционного раствора и поверхностью минералов, что приводит к более выраженной «обволакиваемости» песчаных частиц, а, следовательно, к повышению прочности образцов закрепленного грунта. Также, снижение краевого угла смачивания увеличивает эффективность распространения рабочего раствора в поровом пространстве и его лучшему заполнению, особенно, для более дисперсных разностей и отдельных мелких пор [59].

Немаловажным фактором качества заполнения порового пространства является адгезия геля к минеральной поверхности песчаных зерен, которое обусловлено качеством «сцепления» геля и минеральной поверхности. Экспериментально показано, что гель рабочего раствора формирует однородную структуру в поровом пространстве песчаных грунтов, однако, наблюдается значительная разница в прочности закрепленных грунтов различного минерального состава, что свидетельствует о влиянии силы сцепления геля и минеральной поверхности.



Исходя из данных, представленных в таблице 19, можно сделать вывод, что минеральный состав оказывает ощутимое влияние на прочность песчаных грунтов, обработанных рабочим раствором методом инъекции.

Таблица 19

Результаты испытаний по определению прочности сцепления (адгезии) раствора коллоидного кремнезема, модифицированного алифатической эпоксидной смолой

Порода (минерал)	Усилие отрыва, Н	Площадь отрыва, мм <sup>2</sup>	Прочность сцепления, МПа	Граница/характер отрыва
Амфиболит (85% амфибола)	401	1375	0,292	Гель-горная порода/ адгезионный отрыв
Калиевый полевой шпат	540	2500	0,216	Гель-горная порода/ адгезионный отрыв; по слою горной породы/ когезионный отрыв
Кальцит	478	2410	0,198	Гель-горная порода/ адгезионный отрыв
Кварц	439	2500	0,176	Гель-горная порода/ адгезионный отрыв
Пироксенит (90% пироксена)	706	2000	0,353	Гель-горная порода/ адгезионный отрыв

Для кварца, основного породообразующего минерала песчаных грунтов, характерны низкие (0,176 МПа) значения прочности, кальцит также обладает низкими значениями прочности геля на отрыв (0,198 МПа).

В силикатах наблюдается зависимость прочности на отрыв от сложности строения структурной решетки (класса силикатов). Наименьшие значения прочности на отрыв (МПа) характерны для калиевого полевого шпата (0,216 МПа) – алюмосиликата (каркасной структуры), далее амфиболы (0,292 МПа) (относящиеся к ленточным силикатам). Наибольшей прочностью на отрыв обладают пироксены (0,353 МПа), относящиеся к цепочечным силикатам.

Следует отметить, что при испытании образца калиевого полевого шпата произошел частичный отрыв по части породы (рис. 35).

Присутствие цепочечных и ленточных силикатов приводит к увеличению прочности на одноосное сжатие ( $R_c$ , МПа), а, следовательно, наблюдается следующая последовательность в значениях прочности закрепленных песчаных грунтов в зависимости от их минерального состава (от меньшего к большему): кварцевые пески → аркозовые пески → граувакковые пески [67].



Рис. 35. Адгезиметр ОНИКС-1 АП (а) для определения прочности сцепления модифицированного раствора алифатической эпоксидной смолы с поверхностью калиевого полевого шпата (б)

К сожалению, определение адгезии геля к искусственно нанесенным пленкам невозможно вследствие легкости отрыва материала пленки от кварцевой поверхности, вследствие чего было принято решение о косвенной оценке адгезии геля рабочего раствора к поверхности с искусственными поверхностными образованиями с помощью метода решетчатого разреза (ГОСТ 31149-2014 [36]).

Косвенное определение адгезии геля рабочего раствора по отношению к поверхностным пленкам различного состава, нанесенным на минеральную кварцевую поверхность (рис. 36), проводилось путем выполнения параллельных надрезов в продольном и поперечном направлениях с шагом 1-2 мм. После нанесения надрезов отслоившиеся частицы удаляются, а сетка разрезов сравнивается с визуальными эталонами, результатам теста присваиваются баллы в зависимости от площади и характера отслоения.

По величине косвенной адгезии искусственные поверхностные пленки образуют следующий типологический ряд (в соответствии с ГОСТ 31149-2014 [36]) по убыванию: глинистая, железистая, органическая, карбонатная, силикатная. Классификация адгезии в баллах приведена в таблице 20.

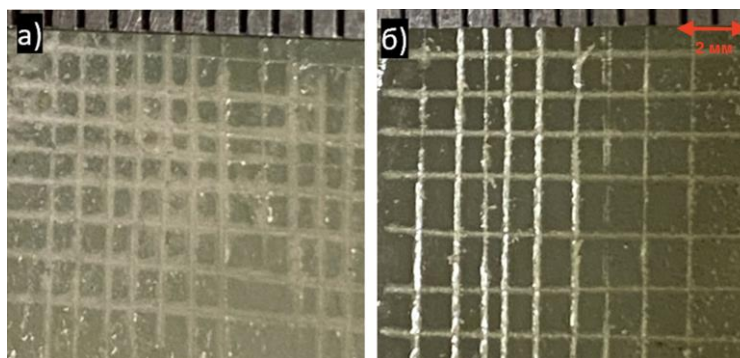


Рис. 36. Сетка решетчатых надрезов (шаг 1-2 мм) для определения адгезии геля к кварцу с различными поверхностными пленками (по ГОСТ 31149-2014): а – силикатной; б – глинистой

Наблюдается высокая адгезия геля рабочего раствора к глинистой и железистой пленкам. Адгезия геля к органической и карбонатной поверхностной пленке ниже. Самая низкая адгезия затвердевшего раствора к образцу с силикатными пленками, что объясняется сглаживанием поверхности при их нанесении на поверхность песчаных зерен.

Таблица 20

Результаты определения адгезии к минеральной поверхности с различными аутигенными пленками

Место в типологическом ряду	Состав поверхностной пленки	Баллы (ГОСТ 31149-2014 [36])
1	Глинистая	0
2	Железистая	0
3	Органическая	1
4	Карбонатная	1
5	Силикатная	2

Для косвенной оценки эффективности обработки песчаных грунтов кремнеземисто-эпоксидным рабочим раствором было определено отношение органического вещества в геле к общей массе навески грунта (рис. 37). Данный подход к анализу качества заполнения порового пространства позволяет, хоть и косвенно, определить эффективность применения вяжущего, а также прогнозируемую прочность модифицированных грунтов.

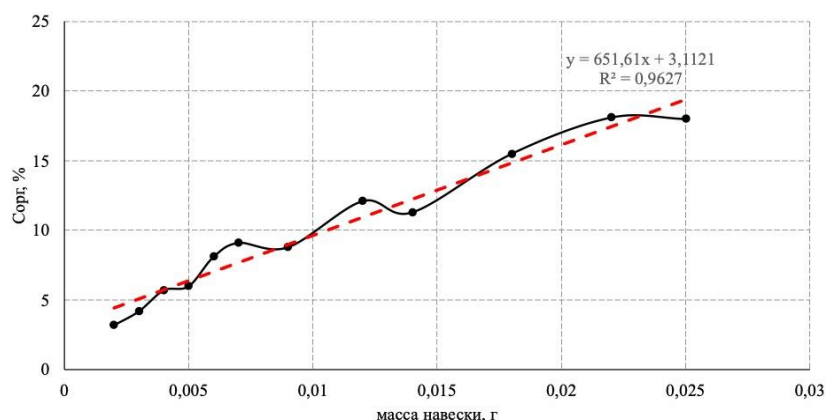


Рис. 37. Тарировочная кривая для определения содержания органического вещества в зависимости от массы навески геля рабочего раствора; черным цветом— экспериментальные данные, красный пунктир – линия тренда

Изменение прочности закрепленных образцов обусловлено, в том числе, сорбцией компонентов инъекционного раствора на поверхности зерен. С ростом поглощающей способности песчаных грунтов наблюдается снижение прочности геля рабочего раствора, а также уменьшение эффективного радиуса закрепления.

Количество сорбированного коллоидного кремнезема (CS) в зависимости от состава поверхностных пленок приведено на рисунке 38. Определение данного показателя по отношению к песку с органическими пленочными образованиями данным способом невозможно, так как коллоидный кремнезем полностью растворяет поверхностные пленки.

Значения количества сорбированного коллоидного кремнезема песком с глинистыми, железистыми и силикатными пленками, близки между собой. Количество сорбированного кремнезема песком с удаленными поверхностными пленками ниже в 1,3 раза. Максимальное значение, полученное для образцов с карбонатными поверхностными пленками, что связано с высокой сорбционной способностью кальцита по отношению к кремниевой кислоте, данное наблюдение подтверждается исследованиями, проведенными В.М. Голодновым [25].

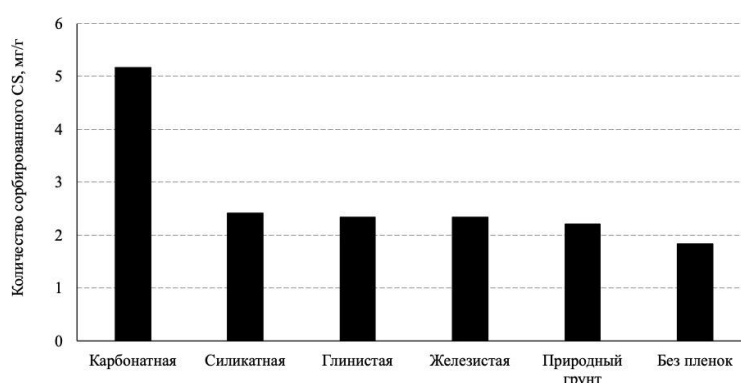


Рис. 38. Количество сорбированного коллоидного кремнезема в зависимости от состава поверхностных пленок

Полученные значения количества сорбированного органического вещества также близки между собой (рис. 39), что объясняется единым гранулометрическим и минеральным составом исследуемых образцов, а также небольшим процентным содержанием пленочного вещества. Падение сорбционной способности образцов с силикатными поверхностными образованиями, предположительно, связано с уменьшением удельной поверхности частиц, так как силикатные пленки сглаживают неровности песчаных зерен.

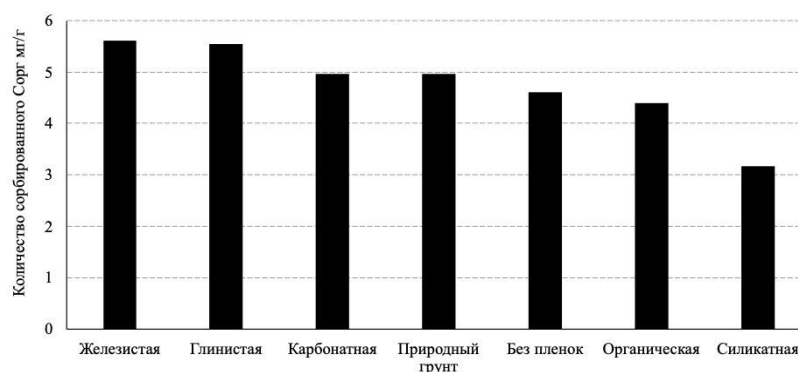


Рис. 39. Количество сорбированного органического вещества в пересчете на  $C_{орг}$  в зависимости от состава поверхностных пленок

#### Выводы к главе 4

На основе многочисленных анализов и экспериментов была разработана новая рецептура для инъекционной пропитки грунтов. В качестве основного вяжущего использован 7,5 %-ный раствор коллоидного кремнезема. Добавленная к основному раствору пара модификантов - алифатическая эпоксидная смола – полиэтиленполиамин (ПЭПА) – играет одновременно роль отвердителя и ускорителя процесса гелеобразования, прежде всего за счет температурного эффекта. Конечные соотношения компонентов при температуре 25<sup>0</sup> С следующие: коллоидный кремнезем: эпоксидная смола: ПЭПА - 3,00:1,00:0,16.

Время гелеобразования модифицированного раствора эффективно регулируется дозировкой отвердителя ПЭПА в широком диапазоне температур (от 30 минут до 16 часов). Вязкость кремнеземисто-эпоксидного раствора остается практически неизменной на протяжении всего индукционного периода, постепенно возрастая от 1,1 до 1,6 сП на протяжении 95% времени индукционного периода. Перед окончанием индукционного периода наступает резкий скачок вязкости в 4-5 раз, до 6,8-7,0 сП, после чего происходит мгновенное отверждение раствора вяжущего.

Прочностные свойства отвержденного геля в воздушно-влажных условиях достигают значений в 0,25 МПа, при хранении в водонасыщенных условиях - закономерно снижаются до 0,15 МПа за счет сорбции молекул воды кремнеземистым гелем.

Разработанный автором инъекционный раствор характеризуется более низким, по сравнению с водой, поверхностным натяжением, что позволяет добиться отжатия поровой влаги, за счет лучшей смачиваемости поверхности минералов песчаных грунтов.

Кремнеземисто-эпоксидный состав отличается высокой адгезией к основным породообразующим минералам песчаных грунтов. Это позволяет достичь формирования прочных цементационных контактов по всему объему порового пространства вне зависимости от минерального состава обрабатываемых песков.

Проведенные исследования также позволили установить, что данная рецептура имеет возможность использования при отрицательных температурах вследствие протекания экзотермической реакции при взаимодействии алифатической эпоксидной смолы и полиэтиленполиамин.

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

Для изучения свойств песчаных грунтов, закрепленных модифицированным раствором алифатической эпоксидной смолы, автором были подготовлены серии образцов, закрепленных в инъекционных колоннах. В качестве основного показателя, характеризующего эффективность закрепления песчаных грунтов, было принято решение взять прочность на одноосное сжатие  $R_c$  (МПа). Отечественная практика технической мелиорации не имеет четко установленного показателя качества эффективности применения вяжущих для закрепления грунтов, вследствие чего было принято решение использовать международный стандарт ASTM D4219-22 «Standard Test Method for Short-term Unconfined Comprehensive Strength Index of Chemically Grouted Soils». Параллельно с измерением прочностных свойств производился контроль за измерением плотности и влажности согласно ГОСТ 5180-2015 [38].

Для каждого из подобранных образцов настоящего исследования применялась стандартная серия экспериментальных исследований в соответствии с методикой проведения лабораторных и полевых работ. Основу цикла исследований составляет изучение свойств закрепленных образцов в инъекционных колоннах, а также полевые и стендовые испытания.

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. Выбор оптимального давления нагнетания всецело зависит от проницаемости песчаного грунта и плотности его сложения, вследствие чего, для упрощения анализа массива лабораторных данных было принято решение об использовании песчаных грунтов с плотностью сложения – 1,70 г/см<sup>3</sup>.

Инъекционная обработка каждого из объектов настоящего исследования проводилась сериями, для получения не только выраженных закономерностей распределения прочностных свойств по длине инъекционных колонн, но и для изучения качества заполнения порового пространства, фильтрационных свойств, а также влияния условий хранения образцов после инъекционной обработки (воздушно-влажные и водонасыщенные условия).

Инъекционная обработка проводится «сверху-вниз», однако в некоторых исследованиях встречается инъекционная пропитка грунтов в колоннах в обратном направлении – «снизу-вверх». Отметим, что при данном виде инъекционной обработки грунтов происходит полное заполнение порового пространства, что не соответствует результатам полевых инъекционных работ, вследствие чего, для большего удобства проведения работ и достижения максимально сопоставимого результата, пропитка грунта проводится «сверху-вниз».

Для достижения качественного результата эффективности использования кремнеземисто-эпоксидного вяжущего проводилась параллельная инъекционная обработка от 2 до 4 инъекционных колонн, для каждого из условий хранения – как в воздушно-влажных условиях, так и в условиях полного водонасыщения образцов [41]. Установившийся факт набора прочности геля привел к нахождению оптимального времени выдержки образцов закрепленного грунта – в течение недели и одного месяца для любых условий хранения, данный вывод подтверждается исследованиями изменения прочностных свойств закрепленных грунтов на протяжении двух лет.

Отметим, что в процессе проведения настоящего исследования было установлено, что первый и последний образцы инъекционных колонн, как правило, имеют некоторые отклонения в общем изменении прочностных свойств по эффективному радиусу закрепления, вследствие наличия гравийной подсыпки, ударного воздействия инъекционного раствора, воздействия силы тяжести при хранении в вертикальном состоянии до наступления времени гелеобразования и др., что привело к решению не учитывать данные образцы в выборке по средним значениям прочностных свойств, если отклонение от среднего медианного значения превышает 25%.

Для демонстрации единого подхода к определению эффективности использования кремнеземисто-эпоксидного вяжущего рассмотрим поэтапное изучение песчаных грунтов нижнемелового возраста икшинской свиты ( $K_{lik}$ ). Инъекционная обработка грунтов методом пропитки происходила с поддержанием постоянного давления в диапазоне от 0,25-0,35 МПа, плотность грунта при укладке и последующем уплотнении в инъекционной колонне приближена к значениям в 1,68-1,70 г/см<sup>3</sup>, пористость в инъекционной колонне составляла 39-40%.

При данных условиях длина инъекционной колонны в процессе эксперимента составляла 50 см, что соответствует эффективному радиусу закрепления мелкозернистых песчаных грунтов (по классификации Е.М. Сергеева [51]). Расход рабочего раствора в процессе нагнетания варьировался в пределах 0,05-0,1 л/мин, пропитка инъекционной колонны проводилась в течение 20-30 минут, различия во времени инъекционной обработки связаны не только со скоростью распространения рабочего раствора в поровом пространстве, но и с равномерной пропиткой всего порового пространства в объеме инъекционной колонны.

Результаты серии испытаний по инъекционной обработке песчаных грунтов показали (рис. 40), что прочностные свойства закрепленных песчаных грунтов изменяются закономерно, в соответствие со скоростью осаждения компонентов рабочего раствора в поровом пространстве, однако, как показано на графике, наблюдаемый разброс не превышает 15-20%.

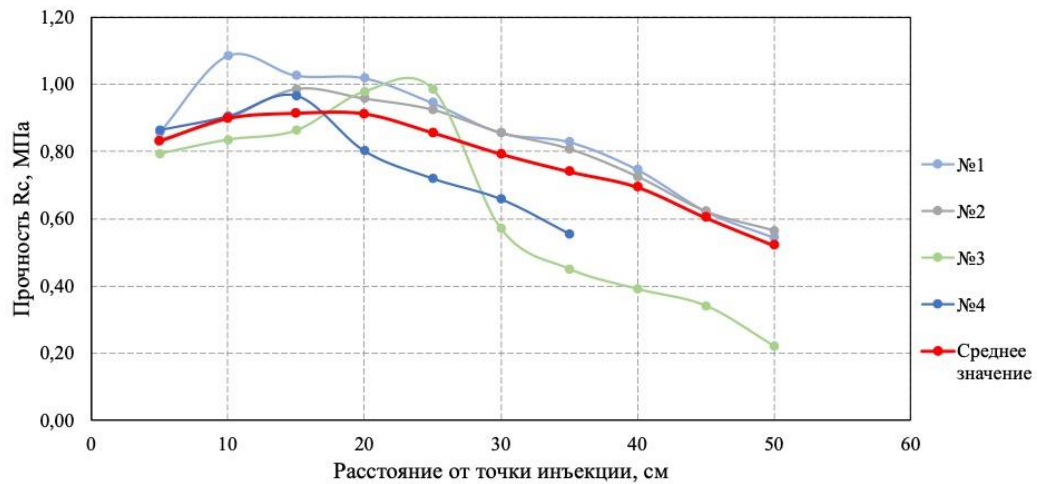


Рис. 40. Изменение прочности по длине инъекционной колонны закрепленного песка ( $K_{ik}$ ), хранившегося в воздушно-влажных условиях, спустя сутки после пропитки кремнеземисто-эпоксидным вяжущим (№1-4 – параллельные эксперименты)

Плотность модифицированного песчаного грунта (рис. 41) по радиусу его закрепления остается практически неизменной и изменяется в диапазоне  $1,92\text{--}2,01\text{ г/см}^3$ , а ее падение имеет прямую закономерность с изменением прочностных свойств песчаных грунтов. Постепенное падение плотности по радиусу закрепления связано, в первую очередь, с качеством заполнения порового пространства и плотностью геля рабочего раствора, вследствие чего было принято решение о детальном изучении порового пространства с применением компьютерной рентгеновской микротомографии (рис. 43).



Рис. 41. Изменение плотности песка ( $K_{ik}$ ) по длине инъекционной колонны, закрепленного кремнеземисто-эпоксидным вяжущим

На электронно-микроскопических снимках (рис. 42) модифицированного песчаного грунта икшинской свиты ( $K_{ik}$ ) отчетливо видно равномерное заполнение порового пространства, а также равномерное покрытие песчаных зерен гелем рабочего раствора. Гель кремнеземисто-эпоксидного вяжущего формирует равномерную поверхностную пленку толщиной 3-5 мкм.



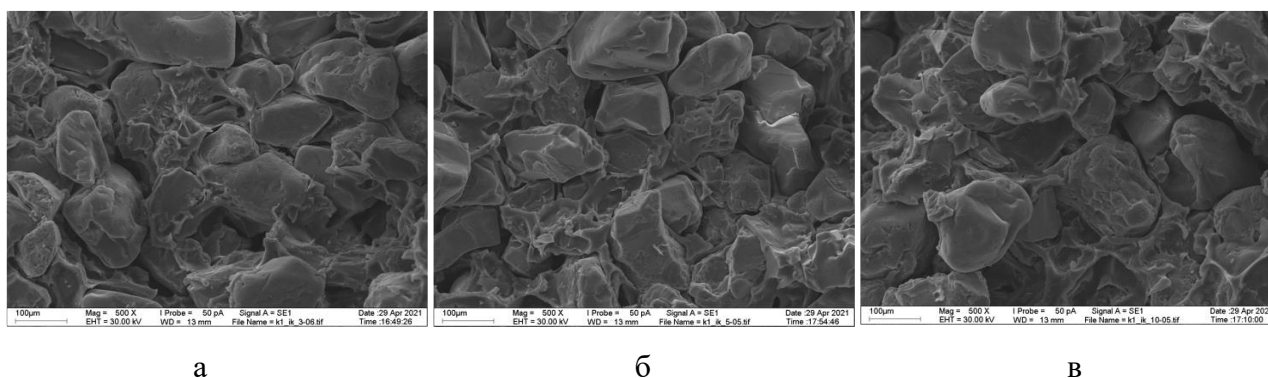


Рис. 42. Микростроение образцов закрепленного песка ( $K_{ik}$ ) с уплотненной скелетно-матричной микроструктурой по интервалам опробования в инъекционной колонне:

а – 10-15 см, б – 20-25 см, в – 45-50 см; увеличение в 500 раз

(съемка выполнена Черновым М.С.); пример дешифрирования приведен на рис. 44

Для крупных пор характерно неполное заполнение пространства, что подтверждается данными микротомографии. Однако, в таких местах наблюдается формирование дополнительных контактов – «мостиков» полимеризовавшегося рабочего раствора. Такие «мостики» служат дополнительными ребрами жесткости для обработанного песчаного грунта, что прямо подтверждается результатами испытаний на одноосное сжатие.

Общая пористость до инъекционной обработки составила 39% по всей длине колонны, спустя месяц после инъекции пористость закрепленного грунта в интервале 5-10 и 20-25 см составила 11%, для интервала 35-40 см характерно незначительное увеличение пористости до 14% (рис. 43).

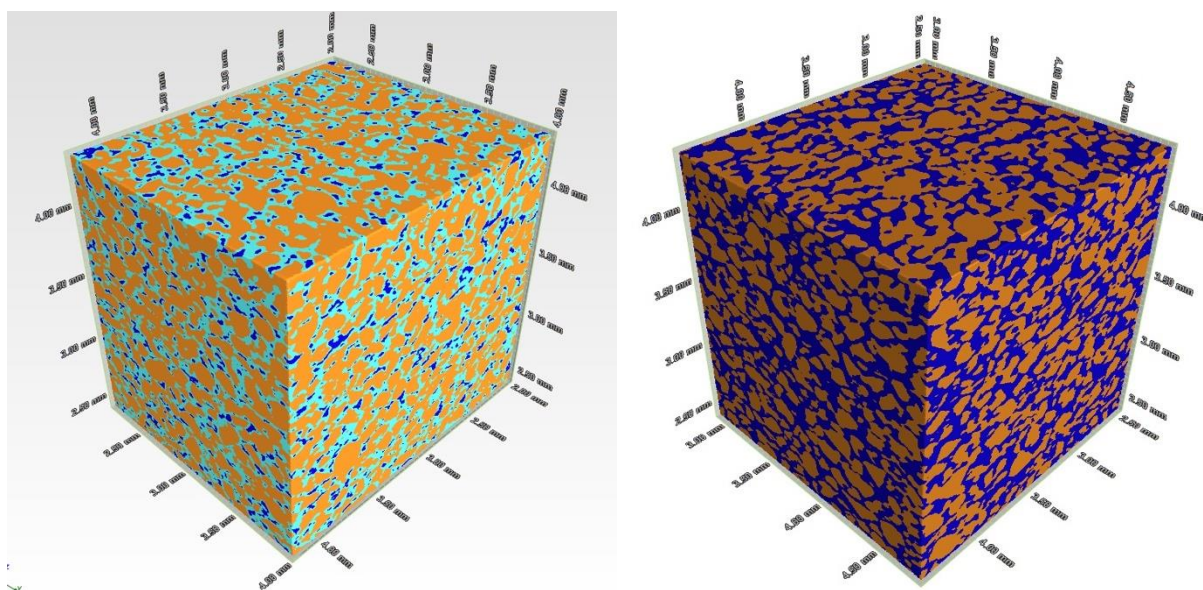


Рис. 43. Трехмерная реконструкция образцов закрепленного песка ( $K_{ik}$ ): оранжевый цвет – скелет грунта, голубой – заполненное поровое пространство, синий/фиолетовый – поровое пространство, свободное от геля (съемка выполнена Ермолинским А.Б.)

В процессе исследования микростроения песчаных грунтов после инъекционной обработки, для получения дополнительной информации по характеру заполнения порового пространства, были проведены анализы с помощью растровой электронной микроскопии, принципы дешифровки которого изображены на рис. 44.

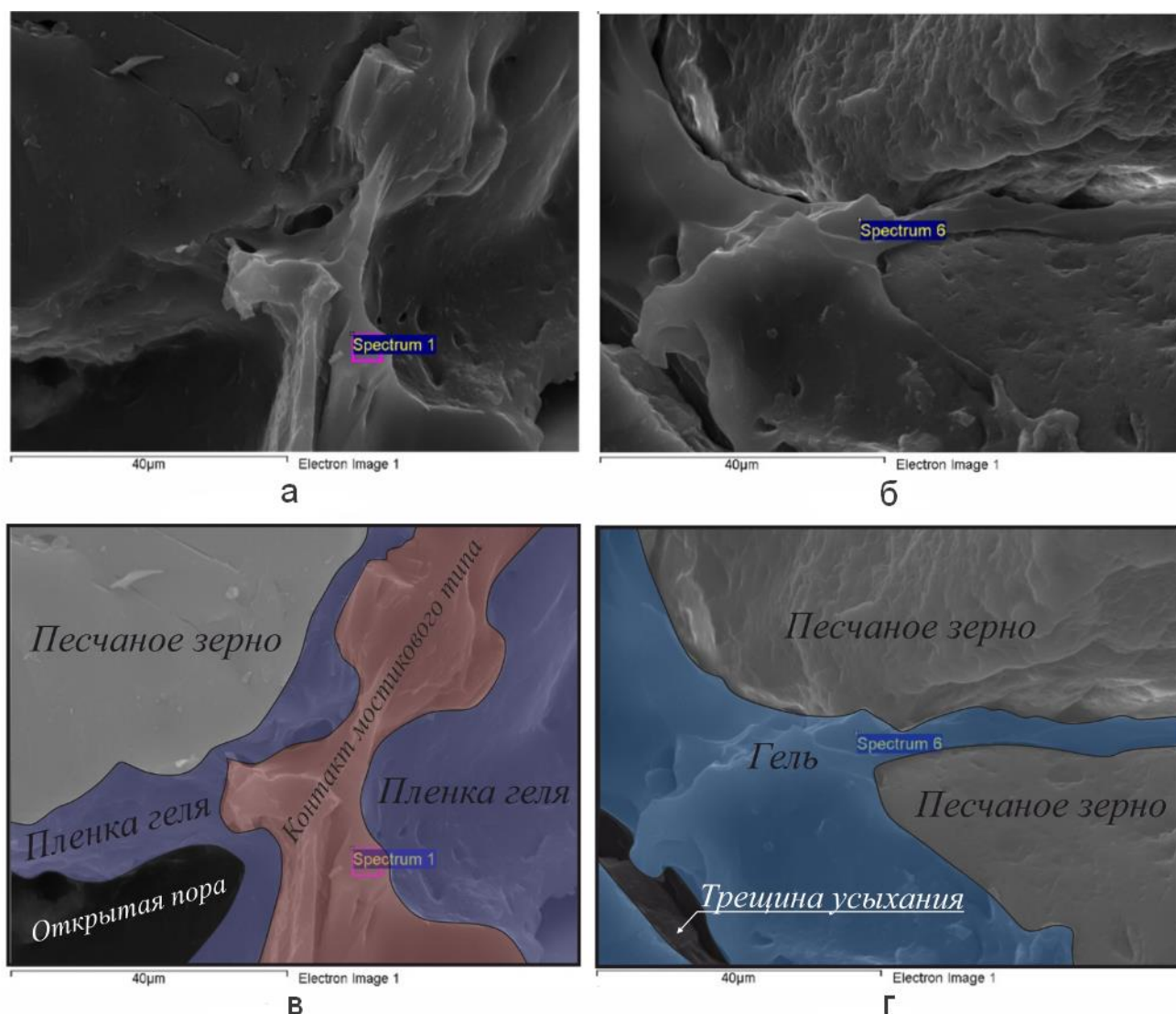


Рис. 44. Электронно-микроскопический снимок закрепленного песчаного грунта (Klik) (а,в) и пример его дешифрирования (в,г соответственно); spectrum – точка спектрального анализа (съемка выполнена Черновым М.С.)

Исследования проводились на образцах, хранившихся в воздушно-влажной среде на протяжении 3 месяцев, результаты электронной микроскопии говорят о высокой степени сохранности скелета полимеризовавшегося раствора.

Согласно результатам спектрального анализа (рис. 45) на «мостике» между песчаными частицами, установлено, что процесс гелеобразования раствора протекает равномерно, в процессе чего формируется комплексный сополимер, что подтверждается результатами спектрального анализа. В состав геля рабочего раствора входят следующие элементы: Cl, Si, O.

Это свидетельствует о том, что в результате сополимеризации кремнеземисто-эпоксидного вяжущего формируется однородный комплексный сополимер из кремнекислородного каркаса, содержащего эпоксидные звенья [69].

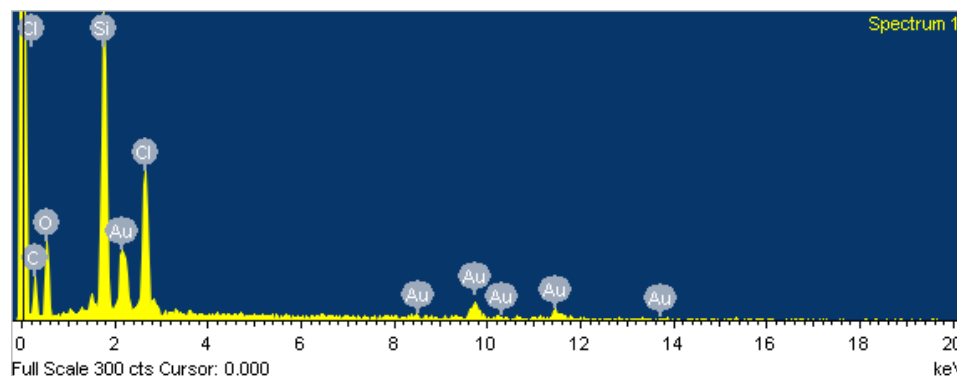


Рис. 45. Атомный спектр геля в поровом пространстве образца закрепленного песка ( $K_{1ik}$ )

Важным элементом изучения эффективности инъекционного закрепления песчаных грунтов кремнеземисто-эпоксидным вяжущим является возможность его использования ниже уровня грунтовых вод (водонасыщенные условия закрепления). Вследствие чего, нами была проведена серия инъекционных испытаний по инъекционной обработке грунтов, хранившихся в водонасыщенном состоянии.

Для водонасыщенных образцов однократная прокачка рабочего раствора выражается в существенном падении прочности по радиусу закрепления, что связано, прежде всего, с разбавлением рабочего раствора.

Для учета влияния разбавления рабочего раствора нами была проведена серия экспериментов по инъекционной пропитке водонасыщенного песчаного грунта, вследствие чего было установлено, что пропитка дополнительными 50-100 мл рабочего раствора приводит к полному вытеснению воды из порового пространства грунта, что всецело нивелирует эффект разбавления и не приводит к снижению прочностных свойств. Однако, отметим, что последующее хранение образцов закрепленного грунта в водонасыщенных условиях (под водой) приводит к увеличению влажности с 13-17% до 24-30% (по сравнению с воздушно-влажными образцами), пиковые значения влажности при длительном хранении в условиях водонасыщения достигают 31-32%, что характерно для менее плотных образцов песчаных грунтов (рис. 46).

Увеличение влажности закрепленных грунтов сопровождаются набуханием образцов в пределах 1-го процента. Конденсированный гель кремнеземисто-эпоксидного вяжущего является гигроскопичным, однако, при его долгой гидратации давление набухания развиваться не будет, отметим, что набухание образцов чистого геля гораздо больше по сравнению с закрепленными образцами (до 16%).

Длительное хранение образцов закрепленных грунтов в условиях водонасыщения приводит к падению прочности в два раза, с 2 до 1 МПа, по сравнению с образцами, хранившимися в воздушно-влажных условиях (рис. 46).

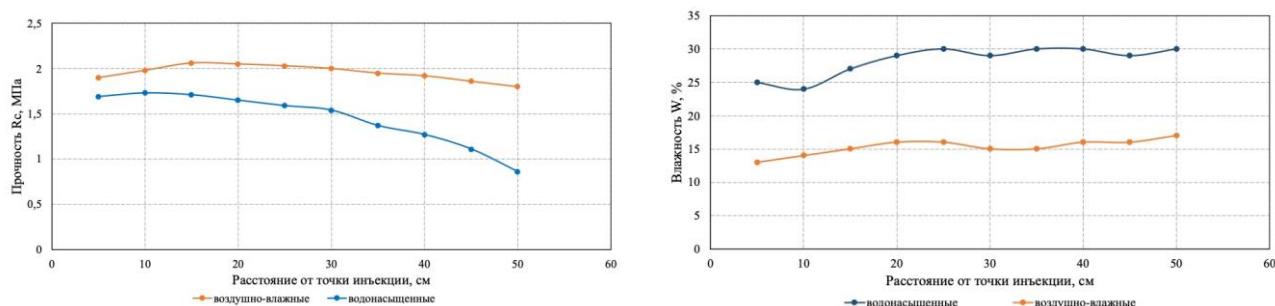


Рис. 46. Изменение прочности и влажности модифицированных песчаных грунтов ( $K_{ik}$ ) по радиусу закрепления, хранившиеся в водонасыщенных и воздушно-влажных условиях

Снижение прочностных свойств модифицированных песчаных грунтов в водонасыщенных условиях привело к очевидному вопросу водостойкости как самого геля рабочего раствора, так и модифицированных песчаных грунтов. При 5 циклах водонасыщения-осушения наблюдается полная потеря прочности геля кремнеземисто-эпоксидного вяжущего, однако при изучении модифицированных грунтов полная потеря прочности наступает на 17-20 цикл водонасыщения-осушения. В тоже время, морозостойкость закрепленных песчаных грунтов также снижается, полная потеря прочности наступает при 12-15 цикле промораживания-оттаивания.

Вопросу долговечности модифицированных грунтов в исследовании также было уделено особое внимание. С этой целью была проведена серия экспериментов по изучению прочностных свойств закрепленных грунтов в воздушно-влажных и водонасыщенных условиях на протяжении 1-го года (рис. 47).

Было установлено, что прочность на одноосное сжатие закрепленных песков по длине колонны изменяется следующим образом: на расстоянии 10 – 20 см от точки инъекции прочность составила 0,90 МПа. На большем удалении от точки инъекции наблюдается постепенное снижение прочности, и на расстоянии 50 см ее значение снижается практически на 50 %, до 0,52 МПа.

Прочность закрепленного грунта резко возрастает, спустя неделю прочность повышается в 2 раза, до 1,69-1,22 МПа. Дальнейший набор прочности происходит постепенно, увеличивается в 2,5 раза спустя две недели (до 2,06-1,57 МПа). Последующие изменения прочностных свойств связаны с технологическим процессом инъекционной обработки и варьируются в пределах 10- 20%. Столь высокие прочностные характеристики объясняются хорошей сортировкой песчаного грунта.



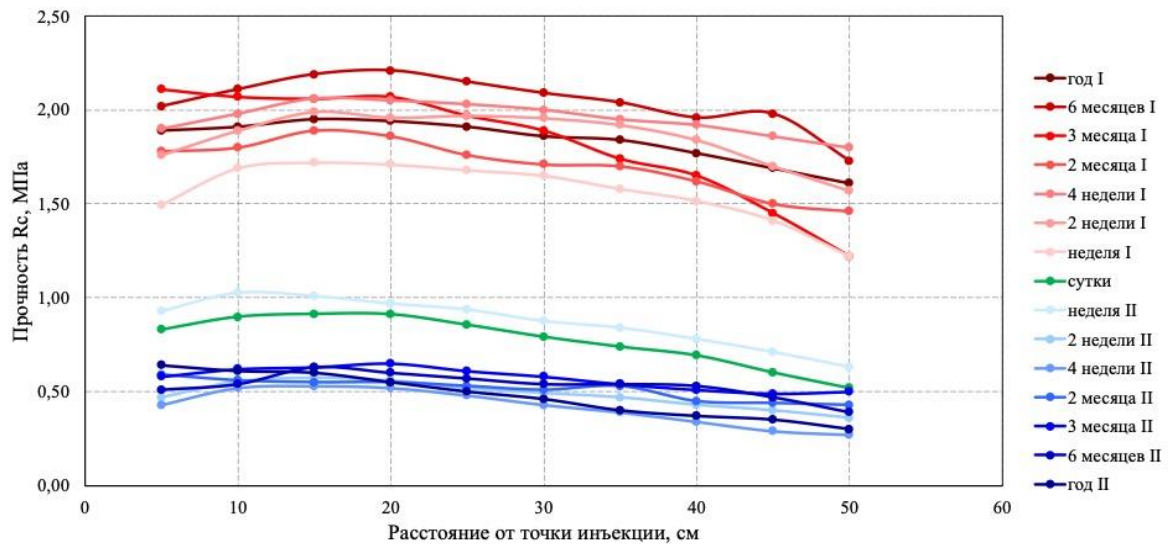


Рис. 47. Изменение прочности закрепленного песка ( $K_{ik}$ ), хранившегося в воздушно-влажных (I) и водонасыщенных (II) условиях различное время (сутки-52 недели), по длине инъекционной колонны

При испытаниях закрепленного песчаного грунта (рис. 48), хранившегося в водонасыщенных условиях, наблюдается характерное снижение прочности. Спустя неделю после инъекции прочностные свойства закономерно незначительно увеличиваются (на 15-25 %), до 0,6-1,0 МПа. Последующие испытания показывают, что прочность закрепленных грунтов при длительном хранении в воде закономерно снижается на 30-40 %, до 0,3-0,65 МПа.

В течение года хранения, последующие изменения прочности не превышали 10-15 %, что также можно объяснить лишь характером заполнения порового пространства и качеством формирования грунта в инъекционные колонны перед проведением эксперимента.



Рис. 48. Внешний вид закрепленных песков ( $K_{ik}$ ), хранившихся в воздушно-влажных условиях, после испытаний на одноосное сжатие; красным цветом – интервалы опробования по длине инъекционной колонны

Изучение эффективности использования кремнеземисто-эпоксидного вяжущего в инъекционных колоннах не ограничивается оценкой прочностных свойств закрепленных

песчаных грунтов во времени. Длительный анализ изменения прочности на одноосное сжатие во времени позволил оптимизировать дальнейшее изучение эффективности закрепленных грунтов, вследствие чего был сделан вывод о необходимости оценки прочности через неделю или месяц после инъекционной обработки. Отметим, что изучение комплекса свойств закрепленных грунтов проводилось и для всей коллекции образцов в поисках отклонений в закономерностях изменения свойств по эффективному радиусу закрепления. Вследствие того, что изменение прочностных свойств, как основного показателя эффективности применения раствора вяжущего, не выявило существенных отклонений от их закономерного изменения, их дальнейшее подробное описание в тексте не представляется возможным и рассмотрено в опубликованных автором научных работах [64,67,69,70].

### **5.1. Влияние гранулометрического состава песчаных грунтов на эффективность их закрепления**

Для исследования влияния гранулометрического состава на качество и эффективность их обработки вяжущим использовался аллювиальный песок второй надпойменной террасы р. Клязьма (аQIII<sup>II</sup>). Выбор одного песчаного грунта был связан с возможностью снизить влияние иных геологических факторов на прочностные свойства модифицированных грунтов. Для удобства сравнения и интерпретации зависимостей влияния гранулометрического состава исследуемых грунтов, опираясь на мировой опыт исследования влияния гранулометрического состава, был взят средний (медианный) диаметр частиц –  $d_{50}$ .

Инъекция методом пропитки осуществлялась на фильтрационной установке с разборной инъекционной колонной. Процесс инъекционного закрепления грунта происходил с полным заполнением порового пространства, с сохранением плотного сложения песчаных грунтов.

Плотность сложения песчаного грунта в инъекционной колонне равнялась  $1,70 \text{ г/см}^3$ , пористость составляла 36-37%, коэффициент пористости – 0,57-0,59. Путем проведения серии тестовых экспериментов с нагнетанием рабочего раствора в инъекционные колонны под различным давлением было установлено, что оптимальное давление инъекции для закрепления пылеватых песков, составляет 0,3-0,35 МПа. Попытки увеличения давления нагнетания до 0,5- 0,6 МПа приводили к развитию процесса пристенной фильтрации, при котором рабочий раствор вяжущего фильтровался по границе песчаный грунт-инъекционная колонна.

При условиях поддержания максимального допустимого давления инъекции для сохранения условий пропитки порового пространства (0,3-0,35 МПа), максимальная длина инъекционной колонны, которую способен пропитать рабочий раствор за время индукционного периода, составило 15 см для образцов с  $d_{50} = 0,081$ .

Анализ полученных результатов показал, что максимальной прочностью характеризуются образцы песчаного грунта в начале инъекционной колонны, в ее первых 5 см, далее, по длине

пути фильтрации рабочего раствора прочность образцов закономерно снижается, что обусловливается неравномерным осаждением компонентов вяжущего в поровом пространстве. Данное явление объясняется тем, что осаждение алифатической эпоксидной смолы с вяжущим при низких скоростях фильтрации происходит медленнее, и по мере удаления от точки инъекции ее концентрация в рабочем растворе незначительно увеличивается, вместе с этим наблюдается резкое снижение концентрации коллоидного кремнезема, что приводит к некоторому к незначительному расслаиванию рабочего раствора.

На рисунке 49 показано, что максимальная прочность на одноосное сжатие закрепленных образцов грунта ( $R_c$ , МПа) с  $d_{50} = 0,081$ , хранившихся в воздушно-влажных условиях, увеличивается с 2,8 до 3,5 МПа при выдержке на протяжении 3-х месяцев. Падение прочности по длине пути фильтрации изменяется от 30 до 40%. Для образцов грунта, хранившихся в водонасыщенных условиях данная закономерность сохраняется, максимальная прочность для первых 5 см инъекционной колонны составляет 1,43 МПа при хранении на протяжении недели, и 1,88 МПа при хранении на протяжении 3-х месяцев. Однако, при хранении модифицированных образцов песчаного грунта в водонасыщенных условиях падение прочности по длине пути фильтрации более выраженное, от 15 до 66%.

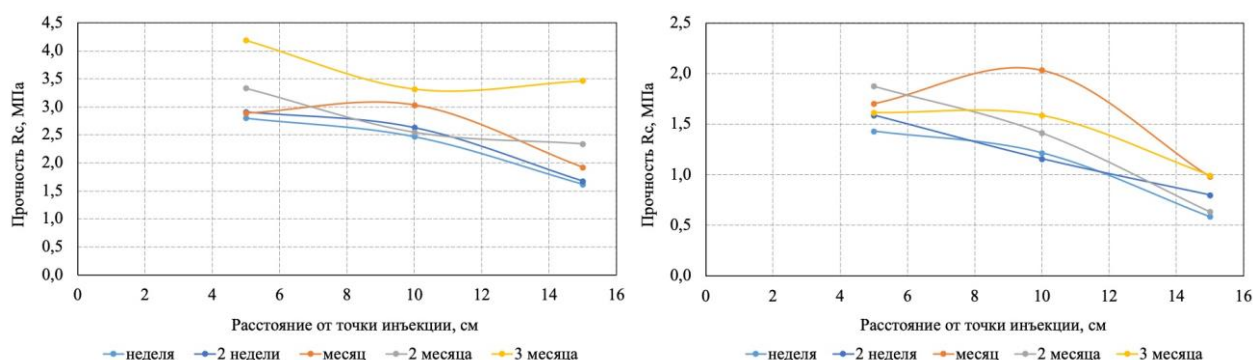


Рис. 49. Графики изменения прочности на одноосное сжатие во времени закрепленных песчаных грунтов с  $d_{50} = 0,081$  в зависимости от расстояния от точки инъекции в воздушно-влажных (слева) и водонасыщенных (справа) условиях

Небольшие значения прочности водонасыщенных закрепленных грунтов по отношению к воздушно-влажным объясняется снижением способности коллоидного кремнезема образовывать большое количество силоксановых связей из-за расклинивающего давления поверхностных пленок (толстых гидратных оболочек). Плотность закрепленного песка измерялась в момент извлечения образцов из инъекционной колонны, а также перед испытанием на одноосное сжатие. Для образцов грунта, хранившихся в воздушно-влажных наблюдается следующая зависимость – итоговая плотность ( $2,05-2,07 \text{ г/см}^3$ ) ниже начальной ( $2,09-2,11 \text{ г/см}^3$ ). Данное изменение плотности по длине пути фильтрации объясняется неравномерностью пропитки колонны песчаного грунта инъекционным раствором.

Для образцов грунта, хранившихся в водонасыщенных условиях, обнаружена обратная зависимость – конечная плотность (2,0-2,11 г/см<sup>3</sup>) выше начальной (2,05-2,07 г/см<sup>3</sup>), что объясняется влаги в остаточных порах в закрепленных грунтах. При этом плотность песков может увеличиваться по мере удаления от начала колонны, что, видимо, обусловлено влиянием силы тяжести на распределение постинъекционного раствора, заполняющего поровое пространство грунта. То есть, вертикальное расположение инъекционной колонны может способствовать некоторому уплотнению – за счет увлажнения - песка в нижней части колонны. Эти данные хорошо коррелируют с уменьшением прочности образцов закрепленного грунта на одноосное сжатие по мере удаления от точки инъекции, что отражает увеличение эластичности геля.

Для образцов грунта, хранившихся в воздушно-влажных условиях, изменение влажности по длине инъекционной колонны практически не происходит и всегда колеблется в диапазоне 8- 10%. Для водонасыщенных образцов изменение влажности по длине пути фильтрации рабочего раствора происходит более наглядно, первый образец характеризуется влажностью 16%, последний – 18-20%, что свидетельствует о большем количестве свободного порового пространства.

Стоит отметить, что при хранении образцов закрепленных грунтов и увеличении их влажности происходил процесс свободного набухания грунта, о чем свидетельствуют измерения диаметра и высоты образцов по окончании периода хранения. Увеличение объема образца вследствие набухания не превышает 1 % для всех образцов закрепленных грунтов.

Изменение плотности и влажности по длине фильтрационных колонн, в зависимости от условий хранения имеет закономерный характер, вследствие чего автором принято решение, в соответствие с ASTM D4219-22, здесь и далее по тексту, основное внимание уделить характеру изменения прочностных свойств модифицированных грунтов.

Обработка песчаных грунтов с  $d_{50} = 0,105$  проводилась с поддержанием постоянного давления инъекции в диапазоне 0,3-0,35 МПа, плотность сложения грунта в инъекционных колоннах равнялась 1,70 г/см<sup>3</sup>, пористость составляла 36-37%. Максимально возможная длина инъекционной колонны, с учетом возможности возникновения эффекта пристенной фильтрации составила 20 см, однако при цикличном повторении инъекционной обработки песчаных грунтов не удалось достичь схожего показателя, нижняя часть инъекционной колонны при последующих экспериментах не пропитывалась, или процесс пропитки был крайне неоднородным.

Прочностные свойства образцов закрепленного грунта с  $d_{50} = 0,105$  (рис. 50) изменялась следующим образом: при хранении образцов в воздушно-влажных условиях максимальная прочность отмечена у первых образцов инъекционных колонн – 2,73 МПа (неделя), 2,76 МПа (месяц) и 2,84 МПа (2 недели). Изменение прочности по длине инъекционной колонны



закономерно снижается в зависимости от удаления от точки инъекции. Потеря прочности составляет от 24 до 45%, что соответствует значениям 1,5-2,09 МПа. При хранении в водонасыщенных условиях наблюдается схожее изменение прочностных свойств, падение прочности составляет 40-60% и изменяется в диапазоне от 1,29-1,92 МПа в начале инъекционной колонны, до 0,5-1,15 МПа в конце.

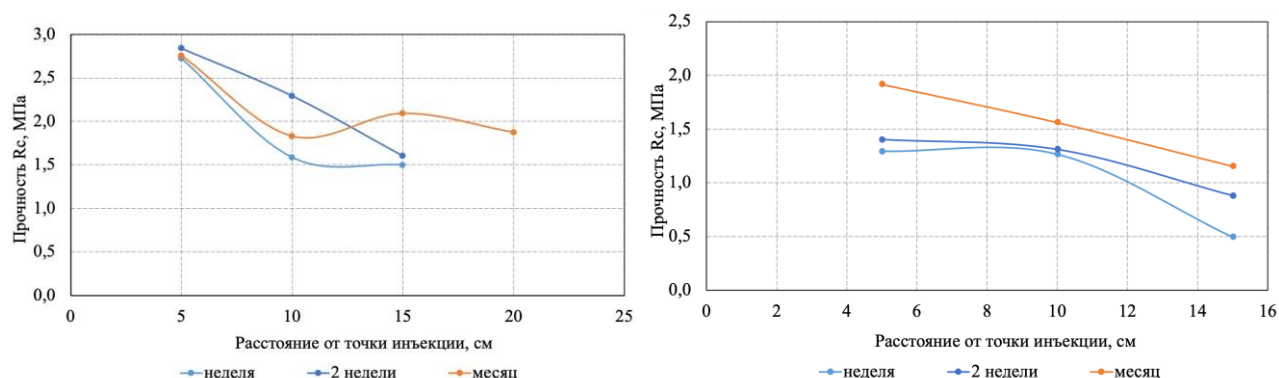


Рис. 50. График изменения прочности на одноосное сжатие во времени закрепленных песчаных грунтов с  $d_{50} = 0,105$  в зависимости от расстояния от точки инъекции в воздушно-влажных (слева) и водонасыщенных (справа) условиях

Процесс инъекции песчаных грунтов с  $d_{50} = 0,125$  проводился при поддержании давления нагнетания в диапазоне 0,2-0,25 МПа, плотность грунта при укладке в инъекционную колонну оставалось неизменной – 1,70 г/см<sup>3</sup>, пористость составляла 36-37%.

Вследствие увеличения гранулометрического состава песчаных грунтов наблюдалось и увеличение длины пути фильтрации при меньшем давлении инъекции, оптимальная длина инъекционной колонны составила 30 см.

Образцы, хранившиеся в воздушно-влажных условиях, обладают более характерными, можно сказать, классическими распределениями прочностных свойств по мере удаления от точки инъекции. Прочность первого образца инъекционной колонны незначительна, вследствие присутствия гравийной подсыпки, а также незначительного разуплотнения песчаного грунта вследствие ударного воздействия струи инъекционного раствора. Наибольшие значения прочности характерны для центральной части инъекционного раствора, где наблюдается максимальное заполнение порового пространства инъекционным раствором. Конечная часть инъекционной колонны показывает равномерное снижение значений прочности, что связано с неравномерным распределением вяжущего в поровом пространстве по длине пути фильтрации, о чем говорилось в начале главы.

Увеличение гранулометрического состава песчаных грунтов приводит к закономерному снижению капиллярного давления в поровом пространстве песчаного грунта, вследствие чего появляется незначительная фильтрация рабочего раствора вниз по колонне в процессе ее

хранения до достижения полного гелеобразования вяжущего, данная закономерность также подтверждается результатами исследования порового пространства с применением методов электронной томографии.

Прочностные свойства образцов закрепленного грунта с  $d_{50} = 0,125$  (рис. 51) изменялась следующим образом: при хранении образцов в воздушно-влажных условиях максимальная прочность отмечена у вторых-третьих образцов инъекционных колонн от 1,91 до 2,43 МПа. Существенно отличается характер изменения прочности для образца, хранившегося в воздушно-влажных условиях на протяжении 2-х месяцев, прочность на одноосное сжатие которого изменяется в диапазоне 2,83-2,90 МПа, данные значения прочности можно считать максимально возможными для данной песчаной разницы.

Прочность по длине инъекционной колонны закономерно снижается в зависимости от удаления от точки инъекции. Потеря прочности в среднем составляет 30-40%, что соответствует значениям 1,5-2,09 МПа. Отметим, что на графике (рис. 51) существенно выделяется образец, хранившийся на протяжении 3-х месяцев. При хранении в воздушно-влажных условиях для данного образца наблюдается нехарактерное изменение прочности, она увеличивается по длине пути фильтрации от 1,52 до 2,51 МПа, а при хранении в водонасыщенных условиях наблюдается чрезмерное падение прочности (до 70%), в абсолютных значениях до 0,09 МПа. Причиной таких существенных нарушений закономерностей формирования прочности по длине пути фильтрации служит качество сборки инъекционных колонн и условия распространения рабочего раствора в поровом пространстве.

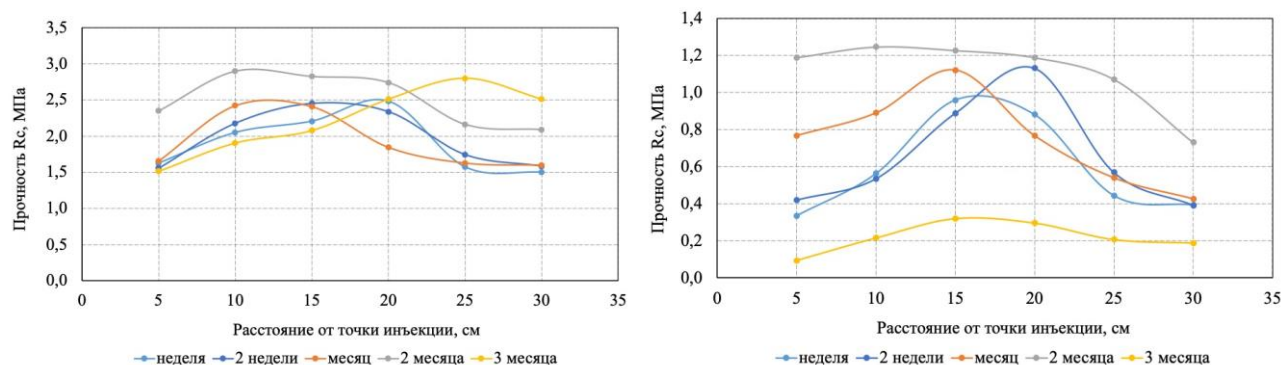


Рис. 51. График изменения прочности на одноосное сжатие во времени закрепленных песчаных грунтов с  $d_{50} = 0,125$  в зависимости от расстояния от точки инъекции в воздушно-влажных (слева) и водонасыщенных (справа) условиях

При хранении остальных образцов в водонасыщенных условиях наблюдается стандартное изменение прочностных свойств, наибольшие значения прочности характерны для среднего интервала колонны – от 0,77 до 1,32 МПа, максимальное падение прочности не превышает 60% и изменяется в диапазоне от 0,43 до 0,73 МПа в конце инъекционной колонны.

Инъекционная обработка песчаных грунтов с  $d_{50} = 0,255$  проводилась при поддержании давления нагнетания в диапазоне 0,2-0,25 МПа, плотность грунта при укладке в инъекционную колонну оставалось неизменной – 1,70 г/см<sup>3</sup>, пористость составляла 36-37%.

Увеличение среднего диаметра частиц песчаных грунтов позволило достичь существенного наращивания длины инъекционной колонны при сохранении давления нагнетания, оптимальная длина колонны в среднем составила 60 см, величина колонны, в большей степени, ограничивалась длиной индукционного периода рабочего раствора.

При хранении образцов в воздушно-влажных условиях (рис. 52) наблюдается классическая закономерность постепенного снижения прочности закрепленных песчаных грунтов по длине пути фильтрации рабочего раствора. Наибольшие значения прочности (2,38 МПа) характерны для образцов, выдержанных в эксикаторе над водой на протяжении месяца, средняя потеря прочности по длине инъекционной колонны составляет от 20 до 35%.

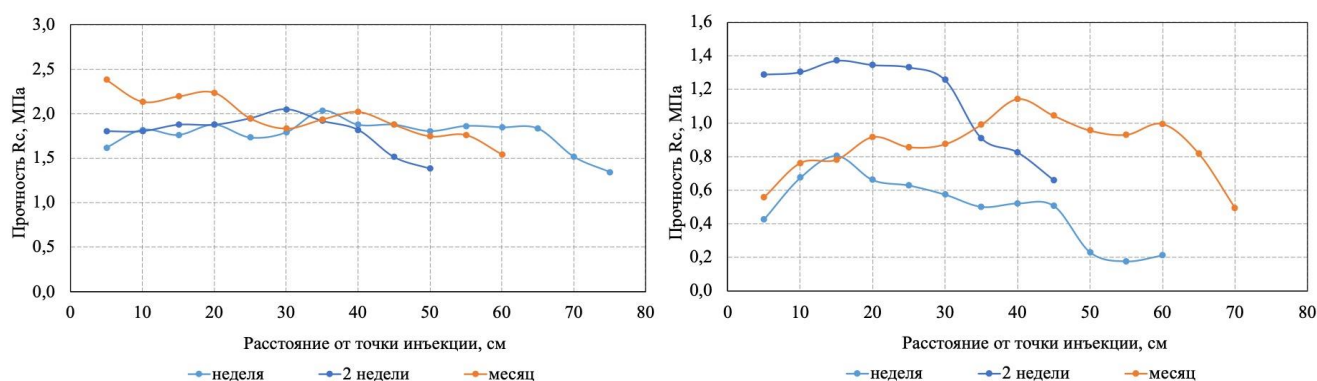


Рис. 52. График изменения прочности на одноосное сжатие во времени закрепленных песчаных грунтов с  $d_{50} = 0,255$  в зависимости от расстояния от точки инъекции в воздушно-влажных (слева) и водонасыщенных (справа) условиях

Для модифицированных грунтов, хранившихся в водонасыщенных условиях, зависимость изменения прочности по длине пути фильтрации не несет существенных изменений. Максимальные значения прочности характерны для срединного интервала инъекционной колонны: от 0,51 до 1,37 МПа, падение прочности по длине пути фильтрации относительно воздушно-влажных образцов более выраженное, до 50-60% в среднем, что соответствует значениям прочности 0,4-0,6 МПа. Отметим, что недельный образец, хранившийся в условиях водонасыщения, характеризуется четырехкратным падением прочности, от 0,8 до 0,2 МПа, данный эффект обусловлен некачественной пропиткой образца при его закреплении, что подтверждается более высокими значениями пористости.

Инъекционная обработка песчаных грунтов с  $d_{50} = 0,3$  проводилась при поддержании давления нагнетания в диапазоне 0,15-0,2 МПа, плотность грунта при укладке в инъекционную

колонну –  $1,70 \text{ г/см}^3$ , пористость составляла 36%, данный песчаный грунт согласно классификации Е.М. Сергеева – мелко-среднезернистый.

При данных условиях длина инъекционной колонны составляла 180-200 см, при повышении давления нагнетания рабочего раствора можно достичь увеличения длины пути фильтрации, однако дальнейшее увеличение радиуса закрепления является нецелесообразным в лабораторных условиях.

При желаемом увеличении длины инъекционной колонны следует использовать более вязкие варианты химических вяжущих, также, стоит учесть, что данные песчаные грунты, при теоретическом рассмотрении, имеют возможность обработки стабильными цементными суспензиями на основе ультрадисперсного цемента, а также более вязкими и более экономически выгодными рецептурами на основе карбамидных смол.

Изменение прочности по длине пути фильтрации поддается общей закономерности – средняя часть инъекционной колонны обладает максимальной прочностью в 1,2-1,6 МПа, однако по мере удаления от точки инъекции и потеря прочности резко превышает 50% (для образца, выдержанного в течение 1 месяца). Первые секции инъекционной колонны также характеризуются низкими значениями прочности (0,4-0,6 МПа), что объясняется высокой подвижностью компонентов рабочего раствора вследствие свободной миграции в поровом пространстве под действием силы тяжести. В таких условиях не удается достичь формирования массивной микроструктуры в поровом пространстве, гель рабочего раствора остается лишь в качестве пленки на песчаных зернах, а также концентрируется в менисках на контакте между отдельными песчаными зернами.

Миграция вяжущего в поровом пространстве также подтверждается резким увеличением плотности по длине пути фильтрации рабочего раствора и снижением остаточной пористости. Также, стоит отметить, что закрепленный песчаный грунт не имеет выраженных пиков прочности, для которых всегда характерна минимальная остаточная пористость и максимальная концентрация компонентов рабочего раствора.

При хранении образцов в водонасыщенных условиях также наблюдаются инверсия прочностной зависимости по длине пути фильтрации – постепенное ее увеличение в зависимости от удаления от точки инъекции от 0,13-0,2 МПа до 0,7-0,8 МПа (рис. 53). Однако, стоит обратить внимание и на изменение прочности с шагом в 5 см, что равно длине одной инъекционной секции. Изменение прочности на столь коротком интервале времени говорит о крайне неоднородном заполнении порового пространства.

При работе со среднезернистыми песчаными грунтами применение лабораторного метода – закрепление в инъекционных колоннах, следует считать нецелесообразным, влияние силы тяжести и качества уплотнения грунта в трубках в таких условиях носит первостепенное

значение. Однако, стоит помнить, что такого широкого диапазона изменения прочности (до 0,4 МПа) на 5 см инъецируемого грунта в массиве наблюдаться не может.

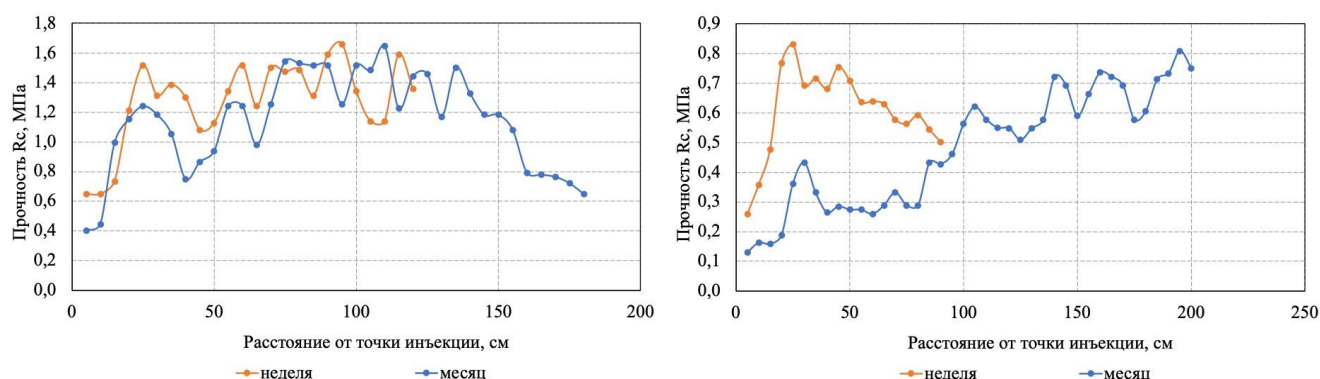


Рис.53. График изменения прочности на одноосное сжатие во времени закрепленных песчаных грунтов с  $d_{50} = 0,3$  в зависимости от расстояния от точки инъекции в воздушно-влажных (слева) и водонасыщенных (справа) условиях

### Выводы к параграфу 5.1

Дисперсность песчаных грунтов влияет на конечные результаты и закономерности распределения вяжущего в поровом пространстве, а также на качество заполнения порового пространства и формирование микростроения грунтового композита. Полученный объем данных позволяет сделать логичный вывод о влиянии гранулометрического состава на прочность. Снижение дисперсности приводит к логичному увеличению эффективного радиуса распространения вяжущего вещества в поровом пространстве, вместе с тем, снижение дисперсности отражается и на равномерности распределения прочностных свойств по длине пути фильтрации рабочего раствора. Снижение дисперсности, а следовательно, увеличение проницаемости и снижение капиллярного давления в поровом пространстве приводят к неравномерному его заполнению, однако столь высокая степень выраженности данного эффекта, как будет показано далее, характерна лишь для лабораторных условий при использовании инъекционных колонн.

Эффективный радиус распространения является субъективным параметром, характеризующим качество инъекционной обработки грунтов. С точки зрения автора под эффективным радиусом закрепления следует понимать расстояние, пройденное инъекционным раствором в поровом пространстве без разрыва сплошности, на котором наблюдается потеря 50% прочности закрепленных песчаных грунтов. Данное предположение позволяет сделать вывод об экспоненциальном влиянии гранулометрического состава на эффективный радиус распространения рабочего раствора (рис. 54).

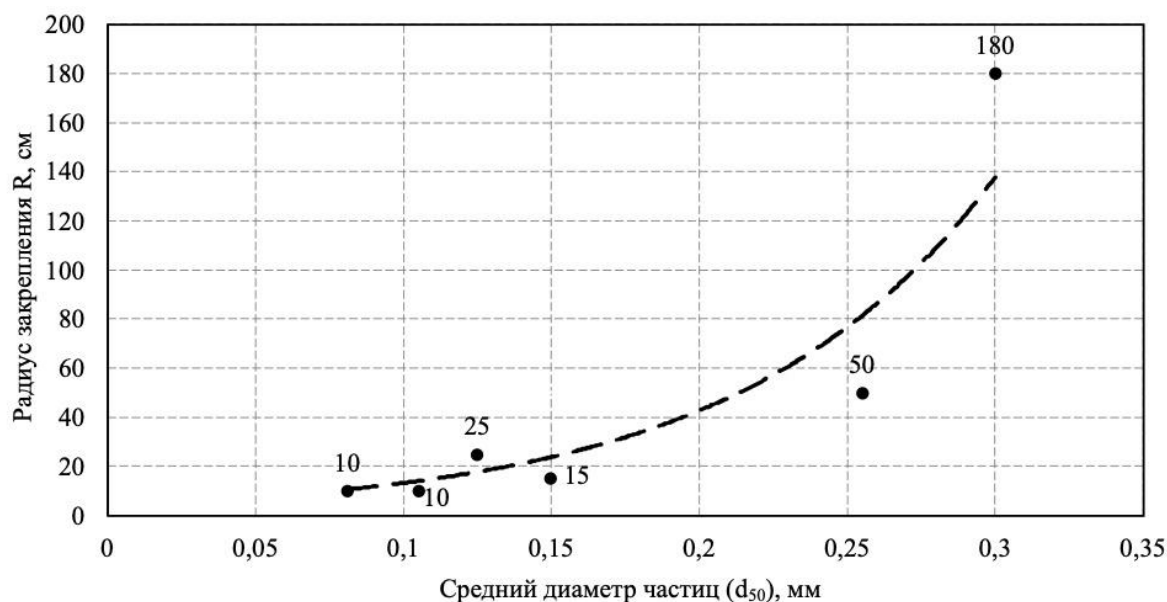


Рис. 54. Зависимость эффективного радиуса закрепления песчаных грунтов от среднего диаметра частиц

В результате проведенного анализа прочностных свойств закрепленных песчаных грунтов на защиту выносятся (первое защищаемое положение): **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.**

## 5.2. Влияние плотности песчаных грунтов на эффективность их обработки

Немаловажным фактором, существенно влияющим на качество и эффективность заполнения порового пространства, является плотность сложения. Плотность сложения песков напрямую влияет на пористость, а, следовательно, и проницаемость песчаных грунтов. Увеличение плотности приводит к закономерному снижению проницаемости песчаного грунта, что в свою очередь, приводит к снижению эффективного радиуса распространения вяжущего в поровом пространстве.

В рыхлых песках эффективность закрепления и качество грунтового композита определяются в большей степени свойствами раствора, что объясняется недостаточными контактами между песчаными зернами и приводит к логическому снижению итоговой прочности модифицированного массива. Однако, в практике технической мелиорации, взаимодействие с рыхлыми песками носит ограниченный характер.

Для исследования влияния плотности сложения песков на качество и эффективность их обработки вяжущим использовался аллювиальный песок второй надпойменной террасы р. Клязьма ( $aQ_{III}^{II}$ ). Для более точного определения прочностных характеристик использовались



результаты двух параллельных испытаний, что позволяет с уверенностью говорить о статистических закономерностях в изменении прочностных свойств песчаного грунта по длине пути фильтрации. Время выдержки образцов после гелеобразования для всех образцов составило 7 суток.

Для инъекционной обработки песчаных грунтов была выбрана наиболее оптимальная длина инъекционной колонны – 30 см (рис. 55), увеличение длины пути фильтрации при работе с мелко-среднезернистыми песками не представляет сложностей, однако данная длина была выбрана как минимальная необходимая. Также отметим, что при использовании коротких инъекционных колонн в процессе закрепления не происходит неравномерного распределения компонентов вяжущего в поровом пространстве, что позволяет получить более равномерное распределение прочностных свойств по длине пути фильтрации.



Рис. 55. Внешний вид закрепленных песков ( $aQ_{III}^{II}$ ), хранившихся в воздушно-влажных условиях, после испытаний на одноосное сжатие; красным цветом – интервалы опробования по длине инъекционной колонны (см)

Давление инъекции при обработке песчаных грунтов оставалось неизменным – 0,1 МПа, средний расход рабочего раствора варьировался в диапазоне 0,05-0,1 л/мин. Условиях хранения модифицированных грунтов также оставались неизменными – выдержка закрепленных образцов продолжалась в течении 1-ой недели в воздушно-влажных условиях при хранении в эксикаторе над водой.

Закрепление грунтов происходило в максимально рыхлом сложении при плотности скелета  $\rho_d = 1,48 \text{ г/см}^3$ , для снижения ударного воздействия рабочего раствора на рыхлый грунт инъекционная колонна была увеличена на одну секцию, до 35 см. Верхняя часть инъекционной колонны заполнялась гравием для снижения влияния давления жидкости на плотность песчаного грунта, в данном случае гравийная подсыпка выполняет роль рассекателя рабочего раствора в поровом пространстве.

Результаты определения прочностных свойств (рис. 56) при проведении параллельных испытаний изменяются в диапазоне до 10%, изменение прочностных свойств по длине

инъекционной колонны также имеет классический вид, снижение прочности в первых секциях инъекционной колонны связано со «стеканием» рабочего раствора во время индукционного периода, так как сам процесс инъекции не превышает 5-10 минут. Падение прочности по длине пути фильтрации не превышает 20%, в диапазоне 0,8-1 МПа.

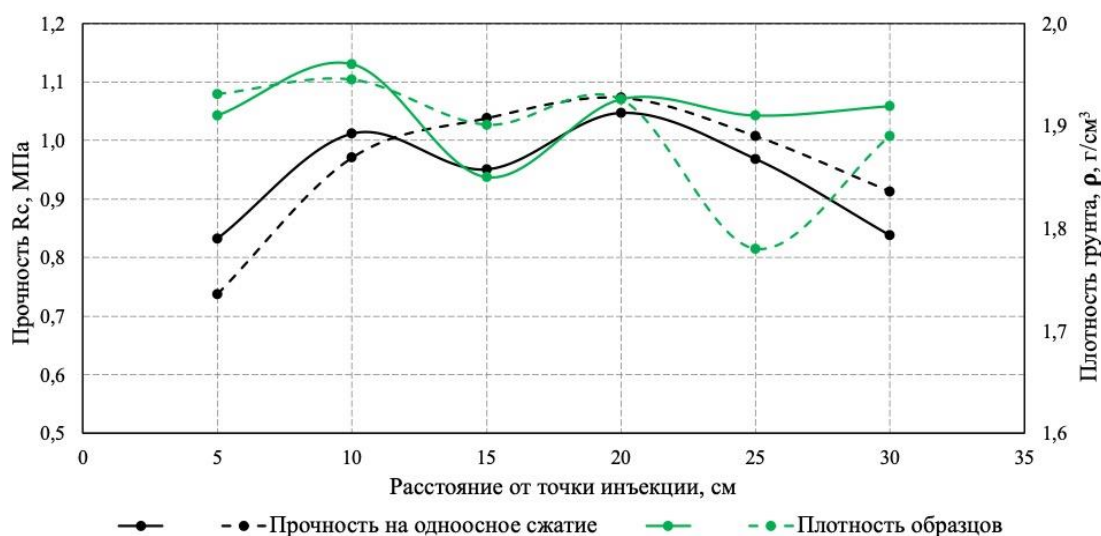


Рис. 56. График изменения прочности на одноосное сжатие и плотности закрепленных песчаных грунтов ( $aQ_{III}^{II}$ ), хранившихся в воздушно-влажных условиях, в зависимости от расстояния от точки инъекции (плотность скелета до инъекции  $\rho_d=1,48$  г/см<sup>3</sup>)

Увеличение плотности сложения до  $\rho_d=1,53$  г/см<sup>3</sup> приводит к увеличению прочностных свойств с 0,8-1 МПа до 0,95-1,2 МПа (рис. 57). Незначительное увеличение плотности скелета песчаных грунтов приводит к увеличению средних значений прочности на 20%, что объясняется увеличением контактов между песчаными зернами и прочностью зацепления между отдельными зернами.

Дальнейшее увеличение плотности сложения песка в инъекционной колонне до  $\rho_d=1,60$  г/см<sup>3</sup> привело к незначительному росту прочностных свойств закрепленных грунтов (рис. 58). Резкое увеличение прочностных свойств в конце одной из инъекционных колонн незакономерное на таком коротком отрезке проникновения рабочего раствора, что, по-видимому, связано с условиями хранения инъекционной колонны в процессе гелеобразования рабочего раствора. Среднее увеличение прочности относительно максимально рыхлого состояния составляет около 20-25%. Область повышенных значений прочности (1,36 МПа) отражает возможность формирования более массивной структуры геля в поровом пространстве, при сохранении концентрации компонентов вяжущего при распределении в поровом пространстве.



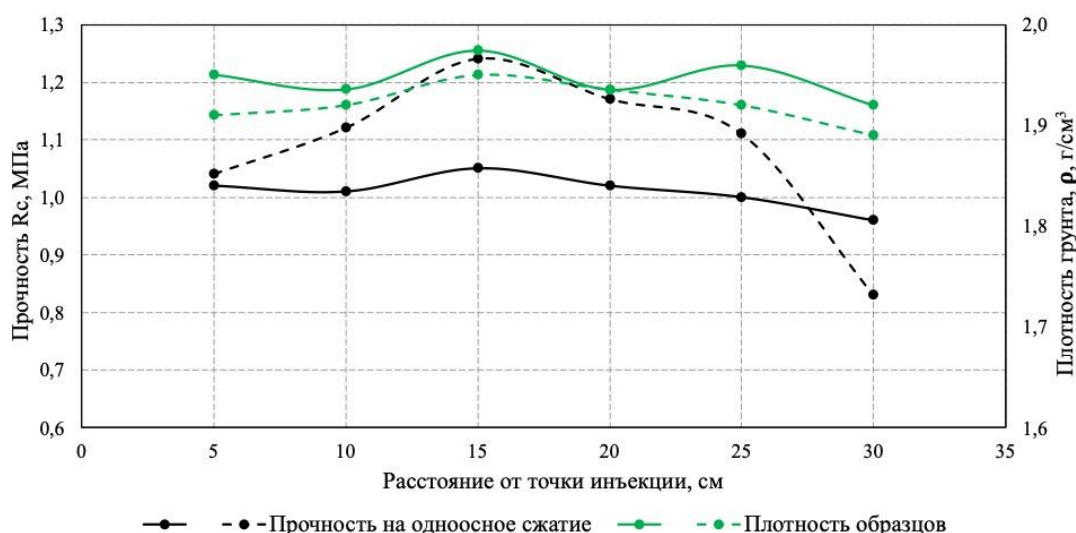


Рис. 57. График изменения прочности на одноосное сжатие и плотности закрепленных песчаных грунтов ( $aQ_{III}^{II}$ ), хранившихся в воздушно-влажных условиях, в зависимости от расстояния от точки инъекции (плотность скелета до инъекции  $\rho_d=1,53$  г/см<sup>3</sup>)

Для образцов песчаного грунта с исходной плотностью скелета  $\rho_d=1,65$  г/см<sup>3</sup> характерно постепенное увеличение прочностных свойств по длине инъекционной колонны, однако рост не превышает 15%, от 1,2 до 1,4 МПа для пиковых значений прочности (рис. 59).

Для образцов в максимально плотном сложении, при условиях формирования песчаного грунта в инъекционные колонны, плотность скелета  $\rho_d=1,70$  г/см<sup>3</sup>. Попытки дальнейшего увеличения плотности позволили добиться увеличения плотности скелета до 1,73 г/см<sup>3</sup>, однако плотность песчаного грунта по длине инъекционной колонны становится крайне неравномерной, следовательно за максимально возможную плотность песчаных грунтов при формировании в инъекционных колоннах следует считать за  $\rho_d=1,70$  г/см<sup>3</sup>.

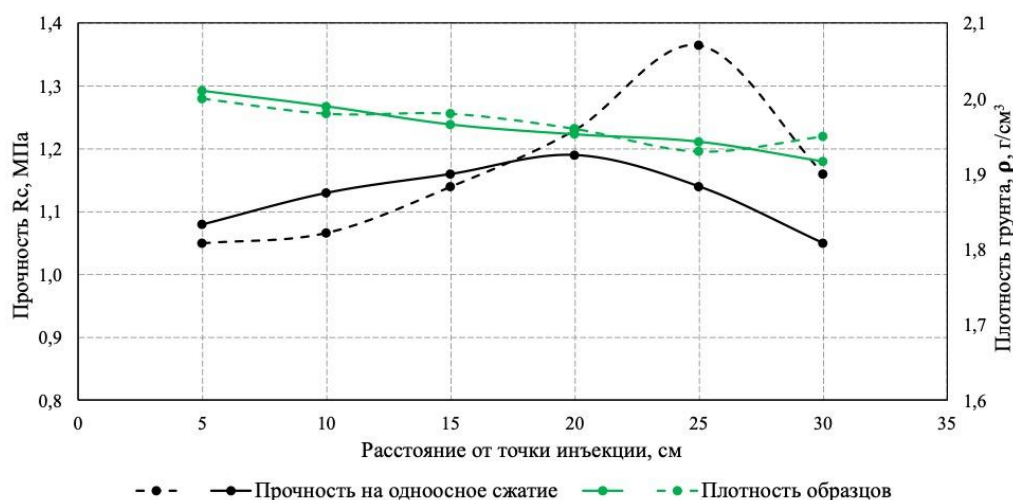


Рис. 58. График изменения прочности на одноосное сжатие и плотности закрепленных песчаных грунтов ( $aQ_{III}^{II}$ ), хранившихся в воздушно-влажных условиях, в зависимости от расстояния от точки инъекции (плотность скелета до инъекции  $\rho_d=1,60$  г/см<sup>3</sup>)

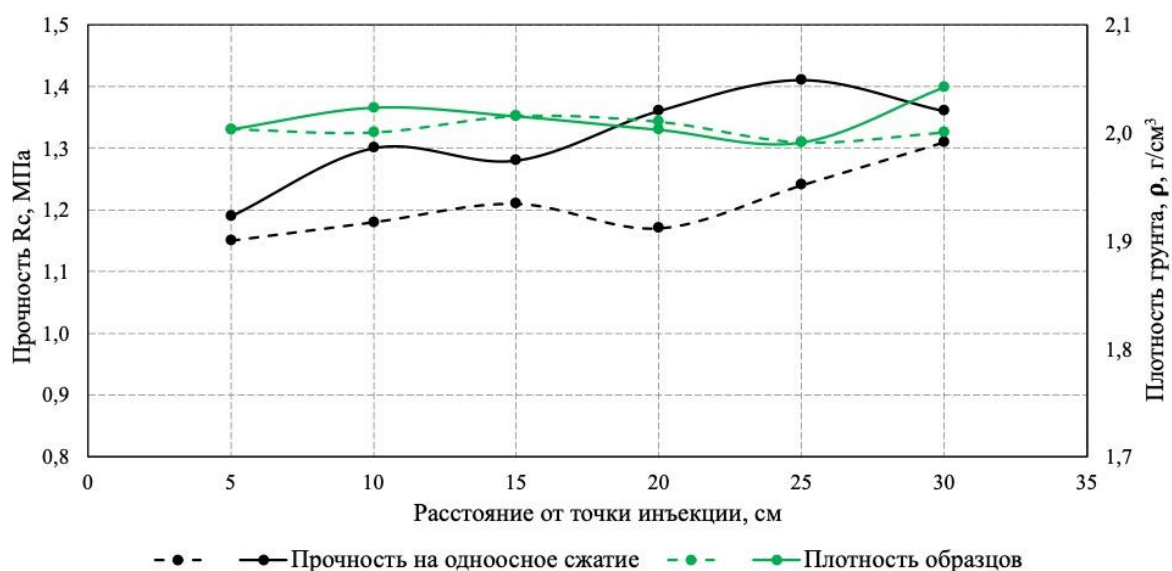


Рис. 59. График изменения прочности на одноосное сжатие и плотности закрепленных песчаных грунтов ( $aQ_{III}^{II}$ ), хранившихся в воздушно-влажных условиях, в зависимости от расстояния от точки инъекции (плотность скелета до инъекции  $\rho_d=1,65$  г/см<sup>3</sup>)

Для образцов с данной плотностью изменение прочности на одноосное сжатие по длине пути фильтрации не превышает 15%, от 1,25 до 1,48 МПа (рис. 60), отметим, что минимальные значения прочности характерны для первых образцов инъекционных колонн, в которых, как правило, не достигается максимальных значений прочности вследствие ударного воздействия инъекционного уплотнения, частичного разуплотнения грунта, а также миграции компонентов вяжущего вниз по инъекционной колонне в период хранения при индукционном периоде. По всей видимости, имеет место уплотнение под воздействием движущейся жидкости, отметим, что влияние уплотнения неравномерно и характерно для начала инъекционной колонны.

Общий вид распределения прочностных свойств по длине пути фильтрации максимально схож с линейным графиком прочности по длине колонны. На основании этого можно сделать вывод, что при плотной упаковке песчаных частиц размер пор в песчаном грунте становится приемлемым для формирования капиллярного давления, удерживающего рабочий раствор в поровом пространстве, а миграция вяжущего обеспечивается поддержанием минимального давления инъекции (до 0,1 МПа).

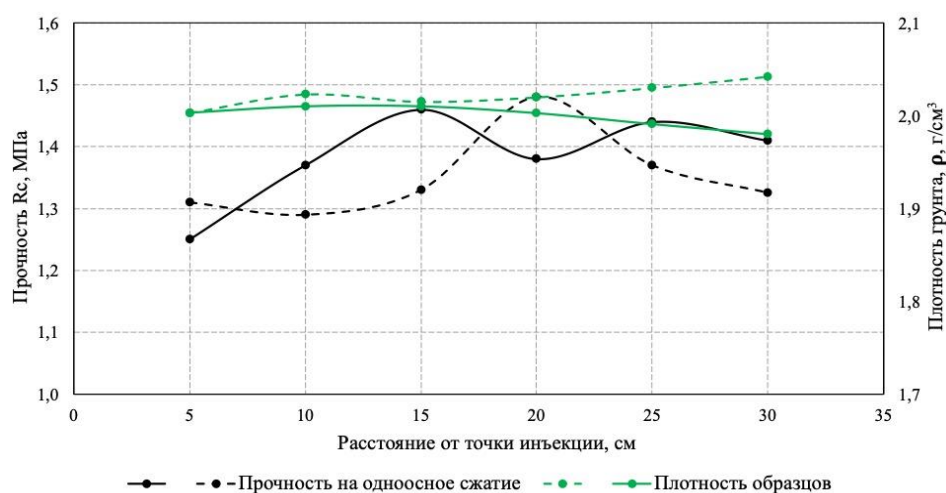


Рис. 60. График изменения прочности на одноосное сжатие и плотности закрепленных песчаных грунтов ( $aQ_{III}^{II}$ ), хранившихся в воздушно-влажных условиях, в зависимости от расстояния от точки инъекции (плотность скелета до инъекции  $\rho_d = 1,70$  г/см<sup>3</sup>)

На графике (рис. 61) показана общая зависимость прочностных свойств закрепленных песчаных грунтов в зависимости от исходной плотности скелета песчаных грунтов. Рост прочности с увеличением плотности упаковки песчаных частиц носит линейный характер, такое распределение прочностных свойств можно назвать классическим.

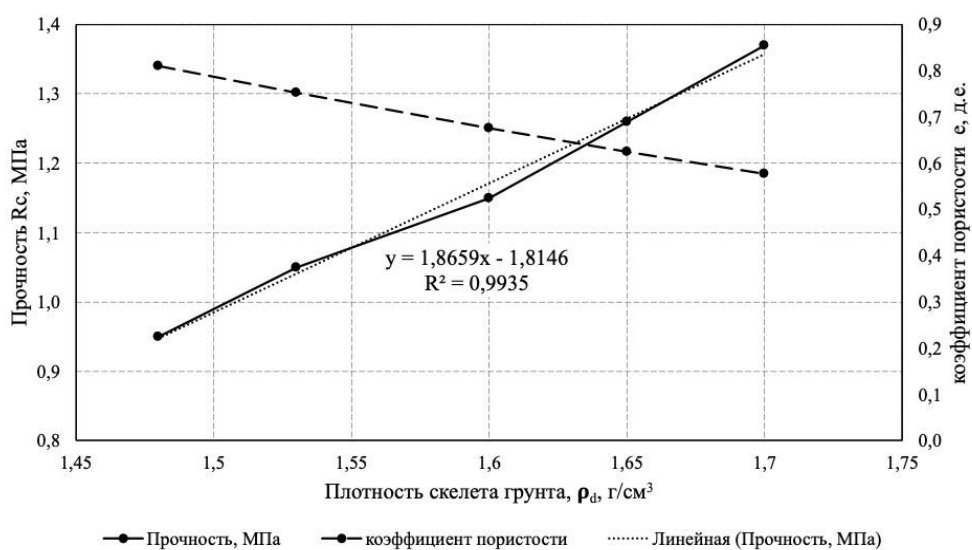


Рис. 61. График изменения прочности на одноосное сжатие закрепленных песчаных грунтов ( $aQ_{III}^{II}$ ) и коэффициента пористости в зависимости от плотности скелета

Такой характер изменения прочностных свойств в зависимости от плотности сложения подтверждается многими авторами [47,131,145]. Увеличение прочности песчаного грунта при увеличении плотности сложения объясняется закономерным снижением среднего размера пор, увеличивающимся количеством контактов между песчаными зернами, а также присутствием зацепления между песчаными частицами.

### 5.3. Влияние минерального состава песчаных грунтов на эффективность их закрепления

В минеральном составе песчаных грунтов основным компонентом является кварц, содержание которого редко снижается ниже 50% [102]. Содержание кварца, в первом приближении, можно рассматривать как показатель зрелости песчаных грунтов, однако четких закономерностей между количеством кремнезема и возрастом песчаных грунтов не наблюдается [72]. В связи с невозможностью использования широкой выборки природных грунтов, удовлетворяющих поставленным задачам, автором было принято решение использовать модельные грунты с заданным минеральным составом, а за минимальное процентное содержание принять значение в 50%.

Для исследования влияния плотности сложения на качество и эффективность их обработки вяжущим использовался аллювиальный песок второй надпойменной террасы р. Клязьма ( $aQ_{III}^{II}$ ). Выбор одного исходного грунта для создания модельных вариаций связан с попыткой нивелирования влияния окатанности, сферичности, наличия аутигенных образований и других характеристик. Для более точного определения прочностных характеристик использовались средние значения двух параллельных испытаний, что позволяет с уверенностью говорить о статистических закономерностях в изменении прочностных свойств песчаного грунта по длине пути фильтрации.

Для инъекционной обработки песчаных грунтов была выбрана наиболее оптимальная длина инъекционной колонны – 30 см, причины выбора данной длины пути фильтрации описаны в начале главы.

Давление инъекции при обработке песчаных грунтов оставалось неизменным – 0,1 МПа, средний расход рабочего раствора варьировался в диапазоне 0,05-0,1 л/мин. Условия хранения закрепленных песчаных грунтов также оставались неизменными – выдержка закрепленных образцов продолжалась в течении 1-го месяца в воздушно-влажных условиях при хранении в эксикаторе над водой. Данное время выдержки образца позволит снизить влияние процесса набора прочности при гелеобразовании рабочего раствора, ранее было показано, что по достижении 1-го месяца структурная прочность геля рабочего раствора максимальна.

Для исследования влияния содержания основных породообразующих минералов были выбраны следующие минералы: полевые шпаты, роговая обманка, кальцит и биотит.

Для исследования влияния полевых шпатов была выбрана серия содержанием от 0 до 50% с шагом в 10%, в качестве добавки в исходный грунт использовался микроклин различных фракций, для сохранения исходного отношения фракций гранулометрического состава. Выбор 6 точек можно считать достаточным для определения зависимости изменения прочностных свойств от процентного содержания.

Результаты определения адгезии геля рабочего раствора позволили сделать вывод о положительном влиянии присутствия полевых шпатов на итоговую прочность закрепленных грунтов, что также подтверждается и результатами определения прочности на одноосное сжатие (рис. 62,63). На графиках изменения прочностных свойств (рис. 62) наблюдается неравномерное изменение прочностных свойств закрепленных грунтов по длине пути фильтрации, что, по всей видимости, связано с неравномерным распределением компонентов вяжущего в поровом пространстве, однако общая закономерность увеличения прочности прослеживается четко.

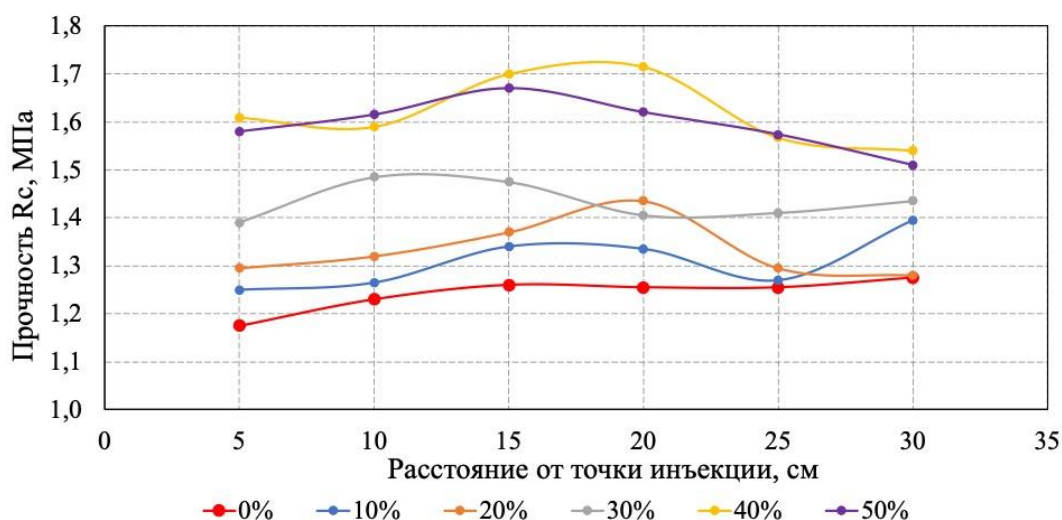


Рис. 62. График изменения прочности на одноосное сжатие по длине инъекционной колонны закрепленных модельных образцов песчаного грунта с различным процентным содержанием полевых шпатов

Увеличение прочностных свойств по мере возрастания процентного содержания полевых шпатов происходит равномерно, незначительные отклонения на прямой, по большей части, связаны с качеством проведения лабораторных исследований и последующим извлечением образцов из инъекционной колонны (рис. 63). Общее увеличение прочности составило 30-35%, однако стоит отметить тот факт, что при создании модельных грунтов с заданным минеральным составом использовались фракции основных порообразующих минералов с минимальной окатанностью и низкой сферичностью, что является некоторым фактором излишнего завышения прочностных свойств закрепленных грунтов, однако в числовом выражении данный эффект определить крайне затруднительно.

Для образцов с 50% содержанием ПШ не наблюдается роста прочности относительно образца с 40% содержанием ПШ, что говорит о максимально возможном наборе прочности и дальнейшее ее увеличение будет связано не с минеральным составом песчаного грунта, а с его структурно-текстурными особенностями.

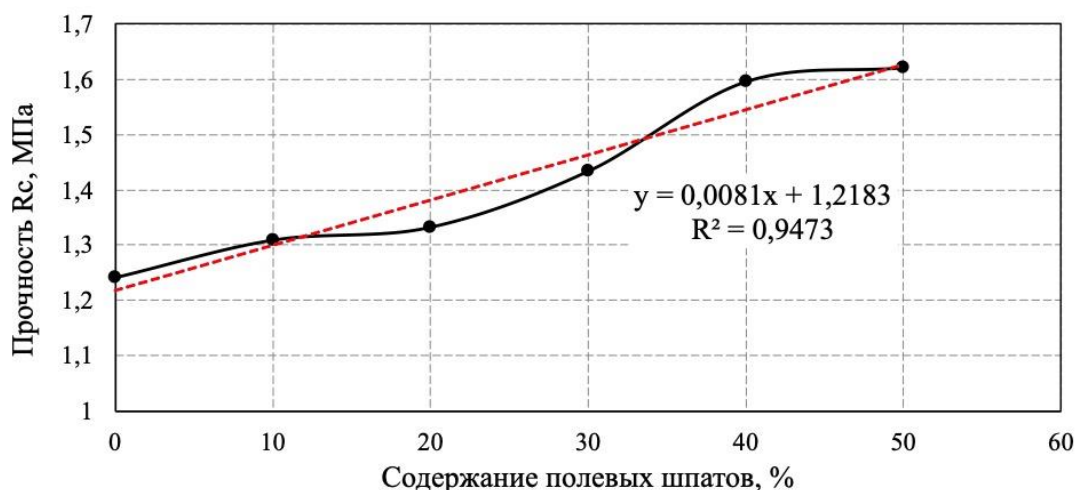


Рис. 63. График изменения прочности на одноосное сжатие закрепленных модельных песчаных грунтов в зависимости от процентного содержания полевых шпатов; черным цветом – экспериментальные данные, красный пунктир – линия тренда

Для оценки влияния содержания амфиболов в песчаных грунтах на его прочностные характеристики при инъекционной обработке методом пропитки применялись различные фракции роговой обманки. Введение фракций осуществлялось в соответствии с предварительно разработанной и описанной методикой, максимальная массовая доля добавления амфиболов в процессе лабораторных экспериментов составила 50 %. На графиках (рис. 64,65) наблюдается вполне логичная закономерность, увеличение массовой доли амфиболов в песчаных грунтах приводит к росту прочности на 40%.

Стоит отметить, что на графике (рис. 65) наблюдается отсутствие прироста прочности в диапазоне 20-30%, что обусловлено неравномерным изменением прочностных свойств по длине пути фильтрации рабочего раствора. Опыт предыдущих исследований позволяет сделать вывод о том, что причиной высокого изменения прочности по длине колонны служит процесс инъекции раствора на основе алифатической эпоксидной смолы.

Однако, согласно величине коэффициента детерминации ( $R^2$ ) можно сделать вывод о том, что влияние конкретных двух точек на общую зависимость изменения прочностных свойств незначительно. Полученные результаты также подтверждаются и результатами измерения адгезии геля рабочего раствора к амфиболиту, вследствие чего можно сделать вывод о положительном влиянии ленточных силикатов на прочностные свойства модифицированных песчаных грунтов.



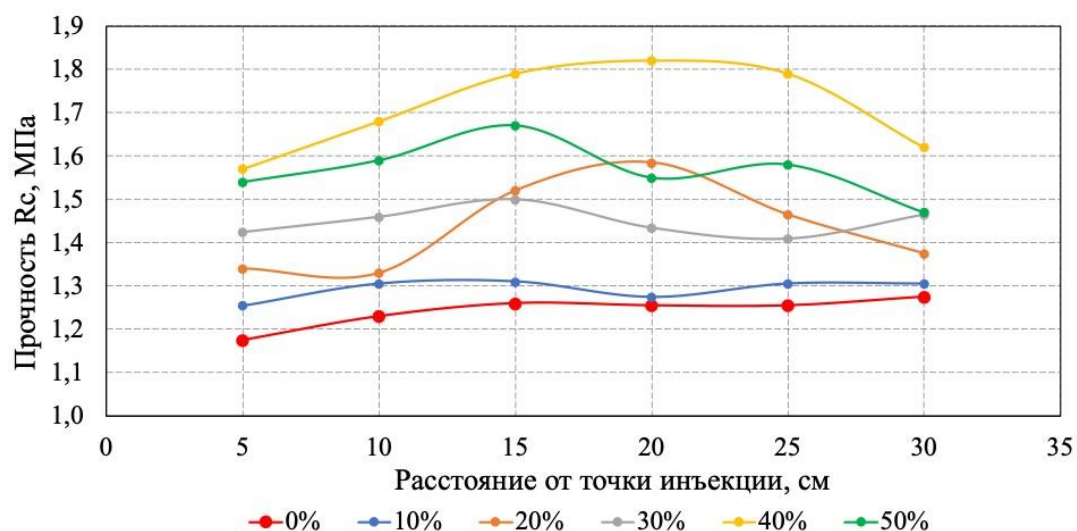


Рис. 64. График изменения прочности на одноосное сжатие по длине инъекционной колонны закрепленных модельных образцов песчаного грунта с различным процентным содержанием роговой обманки

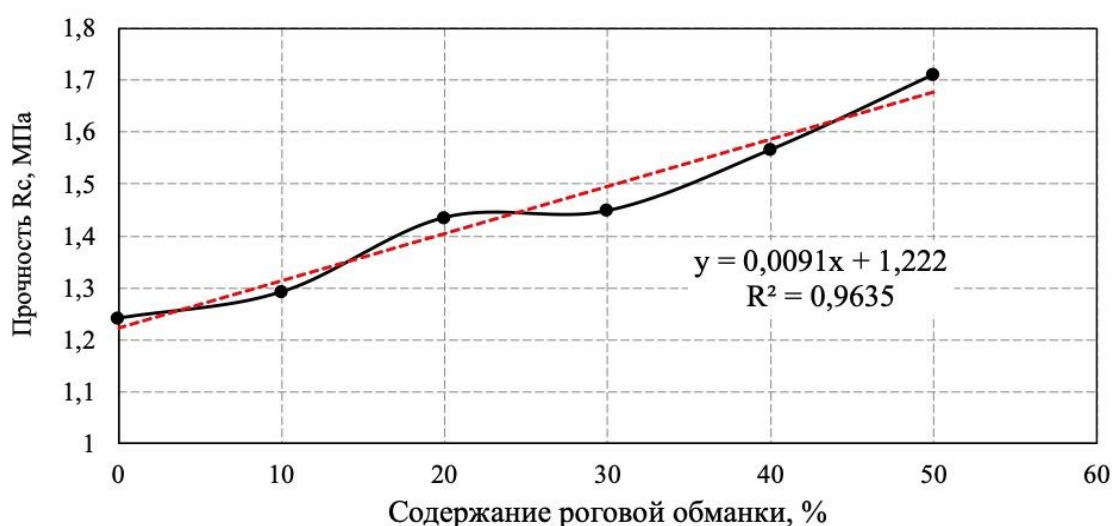


Рис. 65. График изменения прочности на одноосное сжатие закрепленных модельных песчаных грунтов в зависимости от процентного содержания роговой обманки; черным цветом — экспериментальные данные, красный пунктир — линия тренда

Изучение влияния минерального состава на эффективность закрепления песчаных грунтов невозможно без исследований о влиянии кальцита на прочностные свойства. Карбонаты также часто являются породообразующими минералами песчаных грунтов, в редких же случаях могут встречаться и карбонатные пески, в которых содержание кальцита превышает 80-90%. Исходя из этого нами было решено сохранить широкий диапазон изменения массовых долей кальцита в песчаном грунте до 40% (рис. 66,67). При инъекционной обработке данного ряда модельных грунтов существенного набора прочности не наблюдалось, общий рост прочности не

превышает 10%. Максимальные значения прочности отмечены для образцов с 30% содержанием кальцита, при удалении от точки инъекции наблюдается некоторое снижение прочности. Однако данные изменения прочности носят характер погрешности при инъекционной обработке песчаных грунтов.

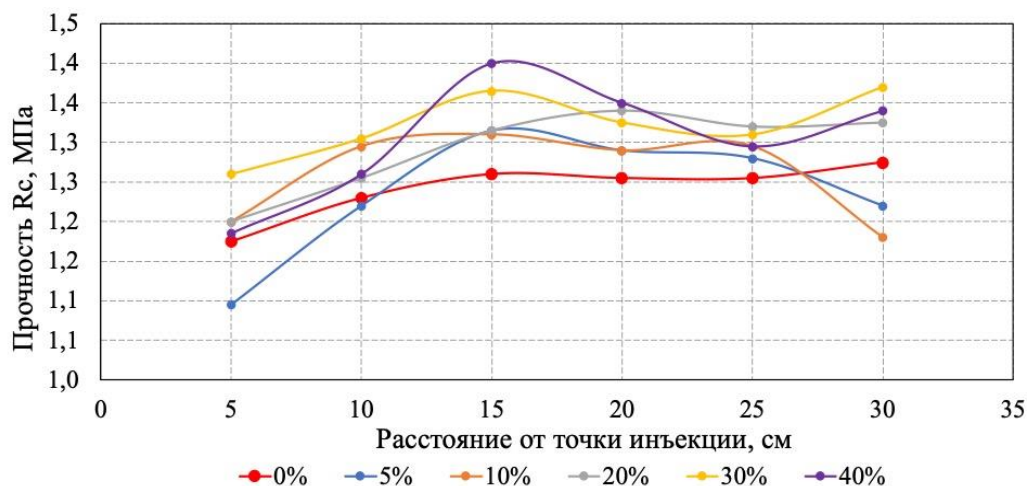


Рис. 66. График изменения прочности на одноосное сжатие по длине инъекционной колонны закрепленных модельных образцов песчаного грунта с различным процентным содержанием кальцита

Общий набор прочности также незначителен, что отражает, с одной стороны, небольшую, но положительную динамику увеличения прочности, с другой стороны, показывает отсутствие выраженного эффекта увеличения прочностных свойств. Данная серия модельных образцов также имеет существенные отличия и от результатов определения адгезионных свойств кальцита. При определении адгезии наблюдался ощутимый прирост прочности, что нельзя сказать о образцах модельного песчаного грунта.

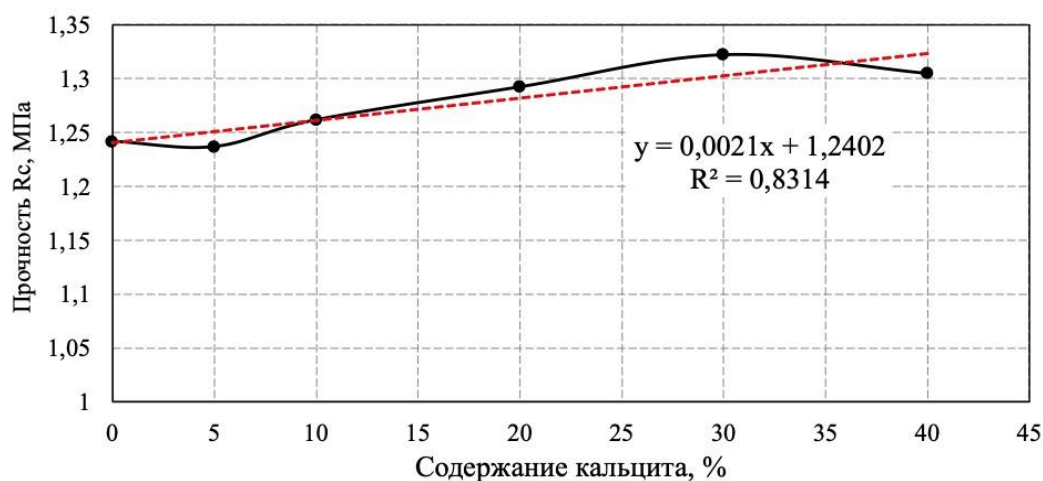


Рис. 67. График изменения прочности на одноосное сжатие закрепленных модельных песчаных грунтов в зависимости от процентного содержания кальцита; черным цветом — экспериментальные данные, красный пунктир — линия тренда



Параллельно с процессом инъекционной обработки песчаных грунтов с заданным содержанием кальцита нами было решено исследовать влияние вида добавляемого кальцита, для чего вместо песчаных фракций был использован химически чистый порошковый карбонат кальция. Инъекционная обработка проводилась с поддержанием давления до 1 атм, снижение среднего размера частиц и наличие пылевой фракции не повлияли на скорость распространения и расход вяжущего. Графики изменения прочностных свойств показаны на рис. 68.

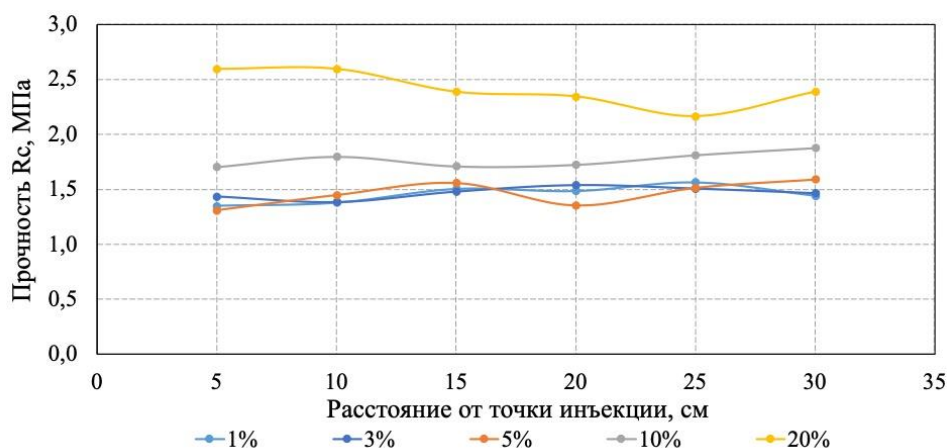


Рис. 68. График изменения прочности на одноосное сжатие по длине инъекционной колонны закрепленных модельных образцов песчаного грунта с различным процентным содержанием порошкового  $\text{CaCO}_3$

Наличие порошкового карбоната положительно сказалось на изменении прочностных свойств по длине пути фильтрации, что объясняется встраиванием частиц карбоната кальция в структуру геля рабочего раствора, что также подтверждается увеличением прочностных свойств закрепленных песчаных грунтов в зависимости от процентного содержания  $\text{CaCO}_3$  (рис. 69).

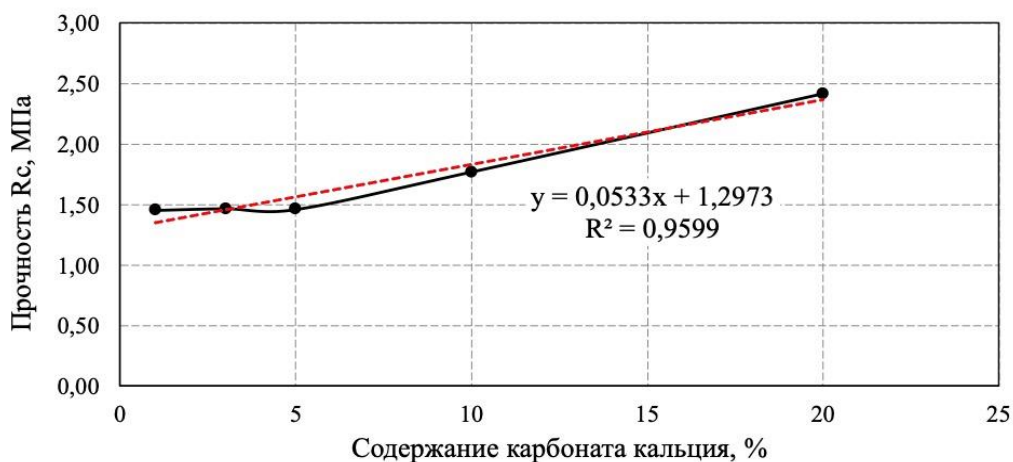


Рис. 69. График изменения прочности на одноосное сжатие закрепленных модельных песчаных грунтов в зависимости от процентного содержания порошкового  $\text{CaCO}_3$ ; черным цветом — экспериментальные данные, красный пунктир — линия тренда

При изучении вопроса влияния слоистых алюмосиликатов использовалась добавка биотита в диапазоне от 1 до 7%, так как в природе редко наблюдается большее содержание слюдистых минералов в песчаных грунтах. Еще на этапе изучения адгезии геля рабочего раствора возникли ощутимые сложности в определении силы отрыва штампа, согласно результатам эксперимента не удалось определить адгезию геля к биотиту, так как происходил отрыв не штампа или геля рабочего раствора, а отдельных слоев биотита.

Общая зависимость присутствия слоистых алюмосиликатов показывает, что их присутствие негативно сказывается на прочностных свойствах песчаных грунтов, что подтверждается графиками изменения прочности по длине пути фильтрации (рис. 70).

Увеличение содержания биотита до 7% приводит к падению прочности на 40%, график падения прочности (рис. 71) остается линейным. Столь существенное падение прочности объясняется низкой адгезией геля рабочего раствора к поверхности биотита и его низкой смачиваемости, что негативно сказывается на общем эффекте инъекционной обработки модельных песчаных грунтов раствором на основе алифатической эпоксидной смолы.

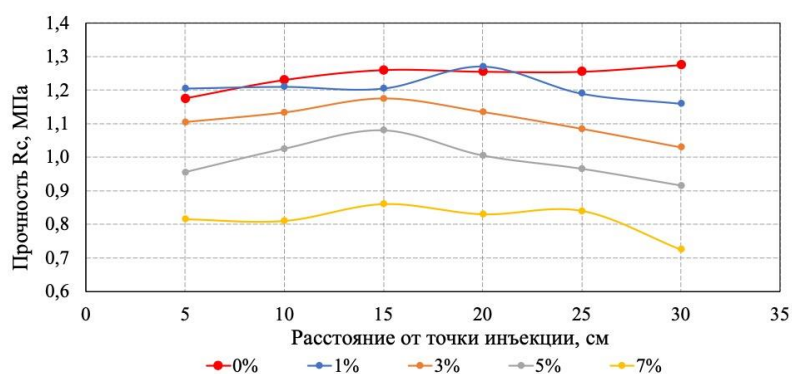


Рис. 70. График изменения прочности на одноосное сжатие по длине инъекционной колонны закрепленных модельных образцов песчаного грунта с различным процентным содержанием биотита

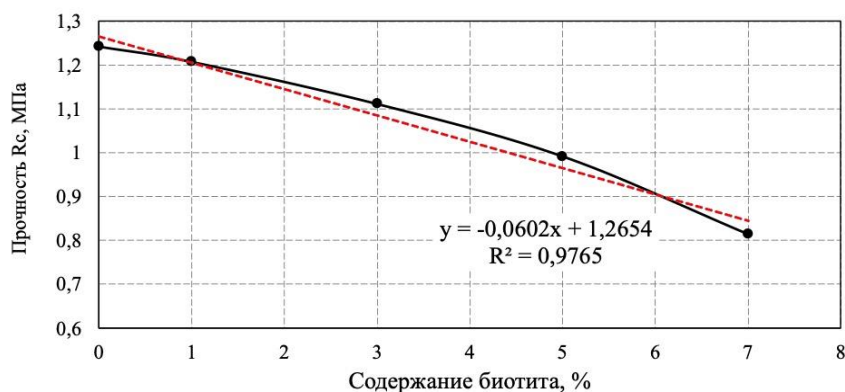


Рис. 71. График изменения прочности на одноосное сжатие закрепленных модельных песчаных грунтов в зависимости от процентного содержания биотита, черным цветом – экспериментальные данные, красный пунктир – линия тренда

### Выводы к параграфу 5.3

Серия лабораторных экспериментов по анализу влияния минерального состава на эффективность закрепления песчаных грунтов с различным минеральным составом имеет закономерную сходимость с результатами определения адгезии геля к различным минеральным поверхностям основных породообразующих минералов песчаных грунтов, вследствие чего на защиту выносятся (второе защищаемое положение): **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.**

### 5.4. Наличие состава водорастворимых солей и их влияние на эффективность закрепления песчаных грунтов

Работы, проводимые лабораторией грунтоведения и технической мелиорации под руководством С.Д. Воронкевича, показывали перспективную возможность использования алифатических смол для закрепления засоленных грунтов [22]. Для изучения влияния количества и состава водорастворимых солей нами использовались добавки NaCl и Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Добавление солей производилось в диапазоне от 1 до 10%. Проведение инъекционных работ проводилось в инъекционных колоннах длиной 30 см, давление инъекции оставалось неизменным, в диапазоне от 0,05 до 0,1 МПа.

Попытки увеличения содержания водорастворимых солей выше 10% привели к существенному ухудшению прочностных характеристик и невозможности их инъекционной обработки, высокое содержание солей в песчаном грунте приводит к интенсивному расслаиванию геля рабочего раствора, вследствие чего наблюдается взаимодействие коллоидного кремнезема с солью и формирование хлопьевидного осадка, закупоривающего поры и резко снижающего проницаемость песчаных грунтов. Также, негативное воздействие проявляется и для алифатической эпоксидной смолы, которая в разбавленном виде резко отделяется от воды. Наличие высокого содержания водорастворимых солей приводит к тому, что рабочий раствор из стабильного резко превращается в нестабильный, что существенно ограничивает возможности его инъекции методом однородной пропитки.

Увеличение содержания NaCl показывает, что инъекционная обработка грунтов с массовым содержанием грунтов до 3% не несет существенного снижения прочностных характеристик модифицированного грунта, падение прочности не превышает 20%, однако остается в диапазоне 1-1,2 МПа, что все еще можно считать удовлетворительным для

инъекционной рецептуры (рис. 72). Однако, дальнейшее увеличение доли NaCl приводит к снижению прочности модифицированных грунтов в 2-3 раза, до 0,25-0,4 МПа (рис. 73).

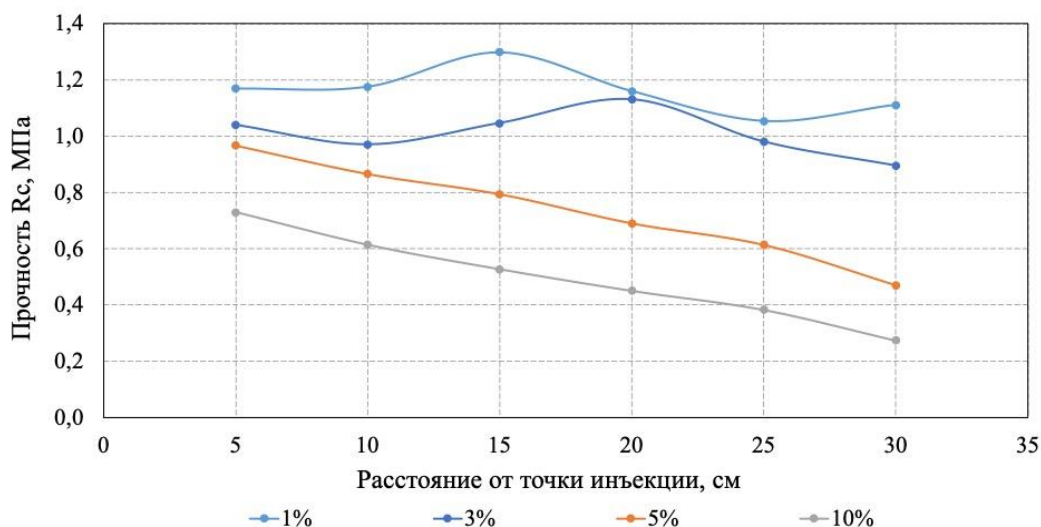


Рис. 72. График изменения прочности закрепленных песчаных грунтов с разным процентным содержанием хлорида натрия по длине инъекционной колонны

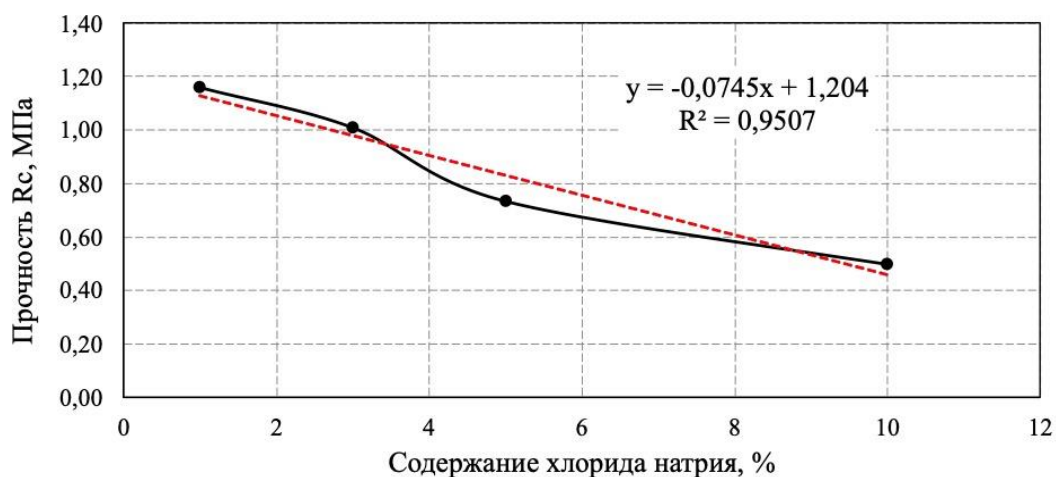


Рис. 73. График изменения прочности на одноосное сжатие по длине инъекционной колонны закрепленных песчаных грунтов в зависимости содержания хлорида натрия, черным цветом – экспериментальные данные, красный пунктир – линия тренда

При изучении влияния  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  автором наблюдались схожие зависимости, однако наличие сульфата натрия даже в небольших массовых долях приводит к резкому падению прочности в 2 раза, до 0,6-0,7 МПа (рис. 74). Дальнейшее увеличение содержания сульфата натрия привело к более интенсивному падению прочности, а образцы с 10% содержанием  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  не поддаются инъекционной обработке.

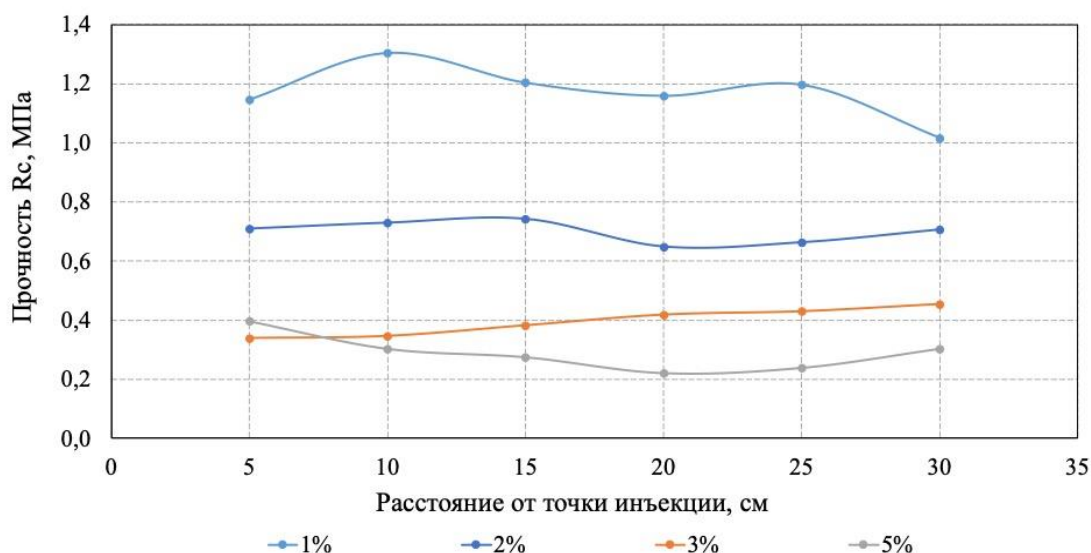


Рис. 74. График изменения прочности закрепленных песчаных грунтов с разным процентным содержанием сульфата натрия по длине инъекционной колонны

Падение прочности закрепленных грунтов объясняется резким взаимодействием сульфата натрия с коллоидным кремнеземом, для которого первый выступает отвердителем, формирование хлопьевидного осадка лишь снижает проницаемость песчаного грунта, приводит к существенному расслаиванию рабочего раствора и невозможности формирования однородного геля раствора на основе алифатической эпоксидной смолы.

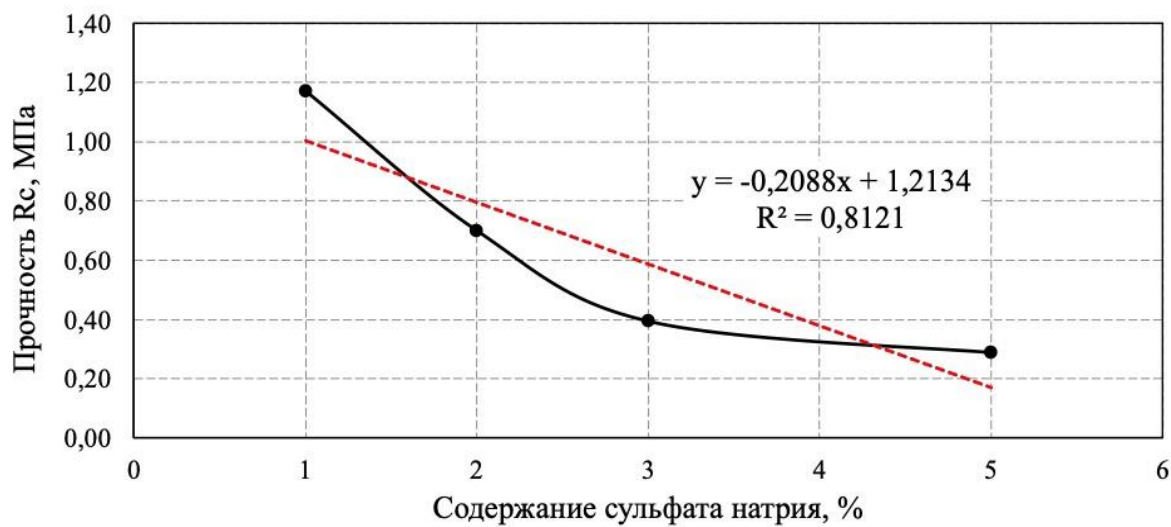


Рис. 75. График изменения прочности на одноосное сжатие закрепленных песчаных грунтов по длине инъекционной колонны в зависимости содержания сульфата натрия, черным цветом – экспериментальные данные, красный пунктир – линия тренда

Однако, при изучении свойств самого геля рабочего раствора автором было установлено, что поверхностное натяжение рабочего раствора ниже, чем у воды, вследствие чего рабочий

раствор как бы вытесняет поровую жидкость, параллельно заполняя пустотное пространство без существенного разбавления самого раствора.

Для оценки влияния засоленности нами был проведен эксперимент в стенде по нагнетанию рабочего раствора в водонасыщенный песчаный грунт с предельной концентрацией NaCl.

Для проведения эксперимента использовался аллювиальный песчаный грунт с территории Мещерского полигона МГУ, что и в других экспериментах. Общая масса песка, используемого в эксперименте, составляла 20 кг, высота песка в емкости составила 15 см, длина и ширина по 25 см.

Емкость заполнялась концентрированным рассолом и выдерживалась в течение 2 часов до полного заполнения порового пространства. Инъектор помещался в нижнюю часть модели посредством вдавливания, после чего происходило нагнетание 2,5 литров рабочего раствора при давлении порядка 25 кПа.

Проведение эксперимента по закреплению песчаного грунта в рассоле NaCl показало, что в условиях высокого засоления формирующийся закрепленный объем песка имеет неправильную форму (рис. 76), что может происходить из-за неравномерного распространения раствора вдоль пути инъекционной пропитки и за счет неравномерного хлопьеобразования коллоидного кремнезема.



Рис. 76. Внешний вид закрепленного целика песчаного грунта после инъекционной пропитки, насыщенного концентрированным рассолом хлорида натрия

Вследствие малого объема закрепленного песчаного грунта невозможно определить прочность по радиусу закрепления, однако отобранные образцы показали снижение

прочностных свойств в 2 раза, до 0,5-0,7 МПа, образцы из краевой части закрепленного целика грунта имеют крайне низкую прочность.

Также, детальное изучение закрепленных образцов грунта показало, что наблюдается и увеличение свободного порового пространства в образцах закрепленных песчаных грунтов. При изучении фильтрационных свойств закрепленных образцов песчаного грунта установлено, что проницаемость закрепленных образцов изменяется в пределах 0,2-0,48 Д, увеличение проницаемости происходит по мере удаления от точки инъекции.

### **5.5. Влияние поверхностных пленок на эффективность закрепления песчаных грунтов**

Для исследования влияния аутигенных пленок на эффективность закрепления песчаных грунтов раствором на основе алифатической эпоксидной смолы, нами использовались как природные грунты, так и созданные модельные образцы песчаных грунтов с поверхностными пленками глинистого, карбонатного, железистого, силикатного и органического состава. В качестве исходного грунта использовался аллювиальный песок второй надпойменной террасы р. Клязьма (аQIII<sup>II</sup>).

Перед нанесением пленок с заданным составом производилось первоначальное удаление природных аутигенных пленок с поверхности песчаных зерен согласно описанной методике. Нанесение поверхностных образований на модельные разности происходило в лабораторных условиях, вследствие чего при визуальном контроле наблюдалась неравномерность покрытия песчаных зерен аутигенными образованиями (см. табл. 17). Процентное содержание вещества пленки составляет от 1,75 до 2,76%. Распространение аутигенных образований на поверхности зерен изменяется от сплошного до островного, площадь, занятая поверхностными пленками, изменяется в широком диапазоне и зависит от морфологии песчаных зерен [59].

Удаление аутигенных образований негативно сказывается на прочностных свойствах закрепленных песчаных грунтов (рис. 77) вследствие взаимодействия компонентов вяжущего исключительно с кварцевой поверхностью песчаных зерен, которая обладает низкой адгезией по отношению к кварцу. Падение прочности по длине пути фильтрации достигает 50-60%, с 1,0 до 0,5-0,4 МПа, что объясняется сорбцией компонентов раствора на поверхности песчаных частиц, а также невозможностью качественного «прилипания» геля к песчаному зерну [59].



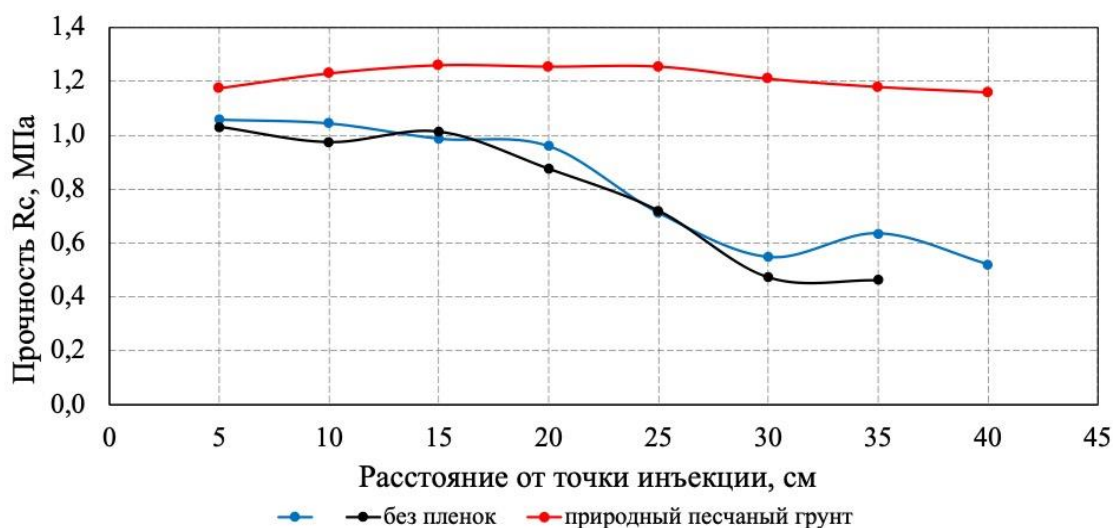


Рис. 77. График изменения прочности закрепленных песчаных грунтов по длине инъекционной колонны для образцов с удаленными поверхностными пленками (два параллельных эксперимента) и природными

Для образцов с органическими пленками (рис. 78) наблюдаются самые низкие значения прочности на одноосное сжатие, в пределах 0,36-1,11 МПа, а также низкие значения плотности: 1,91-1,96 г/см<sup>3</sup>, и сравнительно высокая влажность, изменяющаяся в диапазоне 11-19%. Пониженные значения прочности на одноосное сжатие подтверждаются результатами определения адгезии и краевого угла смачивания. Прочность образцов снижается по мере удаления от точки инъекции, что объясняется растворением органического вещества и его выносом в нижнюю часть инъекционной колонны. Невысокие значения плотности и повышенные значения влажности объясняются изменением химического состава геля вяжущего и увеличением доли окклюзированной воды в его структуре при частичном растворении и выносе пленочного вещества в поровое пространство [59].

Детальное исследование порового пространства закрепленных грунтов показывает уменьшение числа контактов между сополимеризовавшимся раствором и песчаными зернами, что свидетельствует о низкой адгезии геля к поверхности, покрытой органическим пленочным веществом.



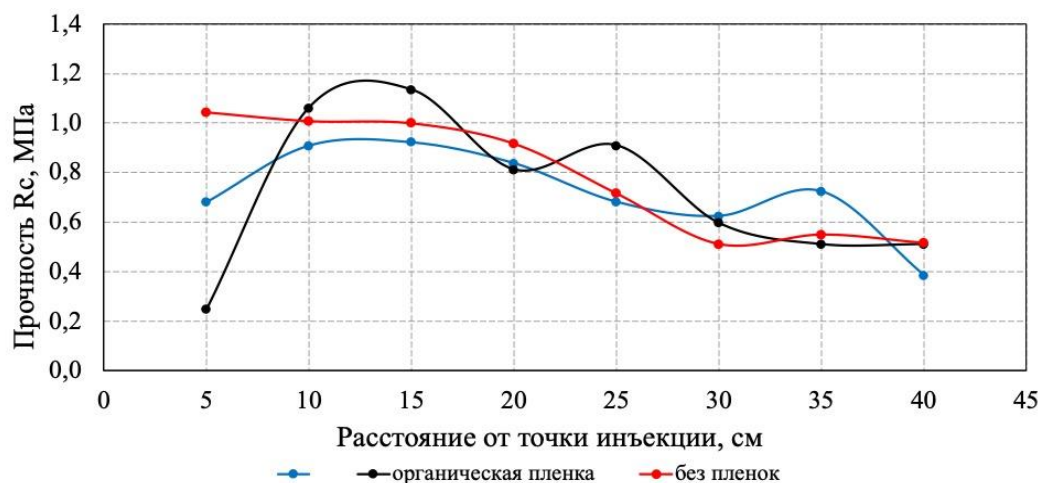


Рис. 78. График изменения прочности закрепленных песчаных грунтов по длине инъекционной колонны для образцов с органическими поверхностными пленками (два параллельных эксперимента) и с удаленными пленками

В центральной части электронно-микроскопического снимка (рис. 79) наблюдаются песчаные частицы, покрытые тонким слоем органической поверхностной пленки, повторяющей микрорельеф зерен. Наблюдается существенно меньшее число контактов между гелем раствора и частицами песка, что свидетельствует о низкой адгезии геля к поверхности, покрытой органическим пленочным веществом.

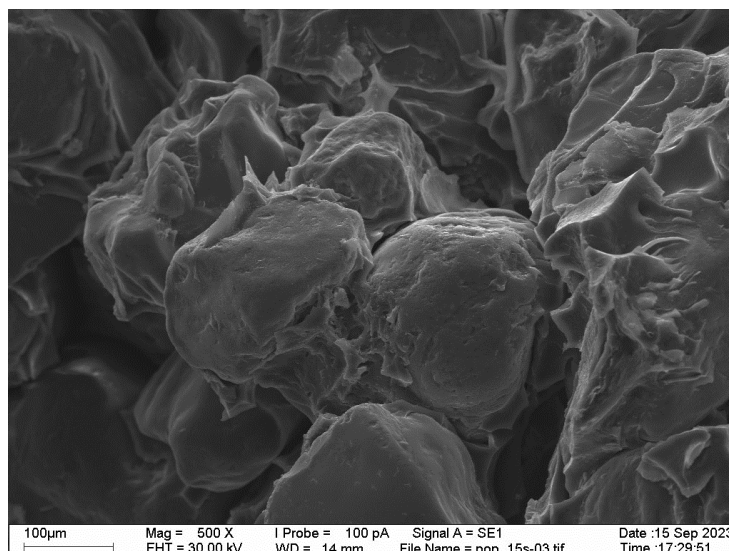


Рис. 79. Микростроение образца закрепленного песка с органическими поверхностными пленками уплотненной скелетно-матричной микроструктуры; увеличение в 500 раз (съемка выполнена Черновым М.С.)

Прочность закрепленных песков с карбонатными поверхностными пленками (рис. 80) изменяется в пределах 0,58-1,25 МПа. Значения прочности на одноосное сжатие по радиусу закрепления изменяются скачкообразно, что, вероятно, связано с неравномерным

распределением кальцитовых образований на поверхности зерен. Значения плотности изменяются от 1,98 до 2,04 г/см<sup>3</sup>, влажности – от 9 до 12%.

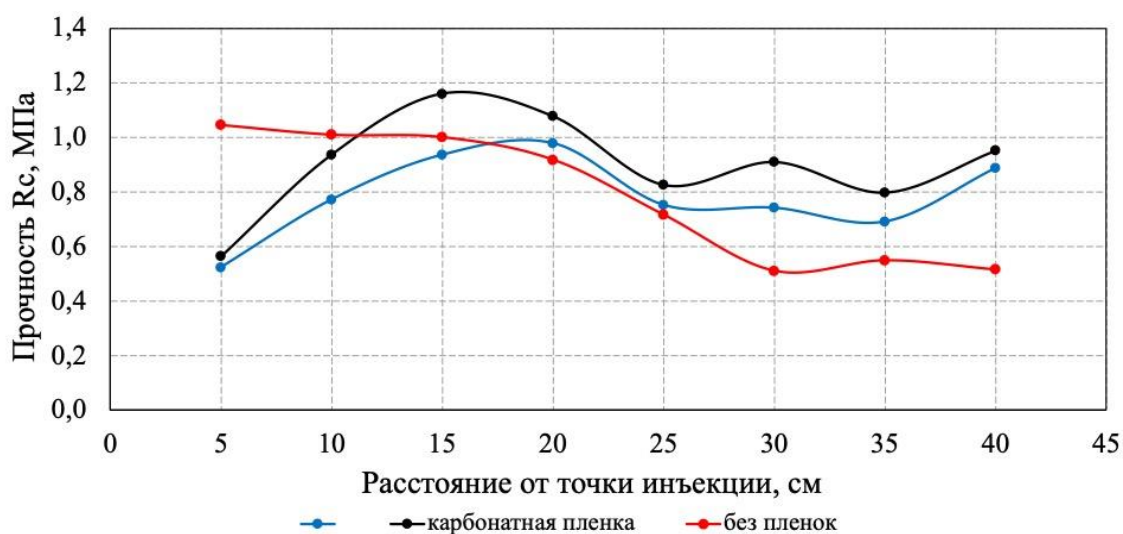


Рис. 80. График изменения прочности закрепленных песчаных грунтов по длине инъекционной колонны для образцов с карбонатными поверхностными пленками (два параллельных эксперимента) и с удаленными пленками

Исследование порового пространства показало, что гель рабочего раствора имеет однородную структуру и формирует своеобразные поверхностные рубашки вокруг зерен, толщина которых варьируется в пределах 2,5-15 мкм. В поровом пространстве наблюдаются «мостики» геля толщиной до 14 мкм., которые выступают дополнительными ребрами жесткости. На электронно-микроскопических снимках наблюдаются отдельные кубические кристаллы NaCl размером до 1-3 мкм (рис. 81), что свидетельствует о неполном удалении хлорида натрия в процессе отмыва модельного песчаного грунта.

Следует отметить, что кристаллы солей присутствуют в незначительном количестве и не оказывают влияния на процесс инъекционной обработки. Структуру геля в поровом пространстве можно отнести к скелетно-матричному типу, в поровом пространстве не наблюдается формирования массивной структуры, что также объясняется частичным усыханием геля рабочего раствора.

Прочность закрепленных образцов с силикатными поверхностными пленками (рис. 82) изменяется от 1,07 до 1,42 МПа. Плотность варьирует от 1,94 до 2,01 г/см<sup>3</sup>, а влажность изменяется от 7 до 11%. Наблюдается незначительное снижение прочности и увеличение пористости к концу инъекционной колонны, что связано, прежде всего, с процессом сорбции компонентов рабочего раствора [59].

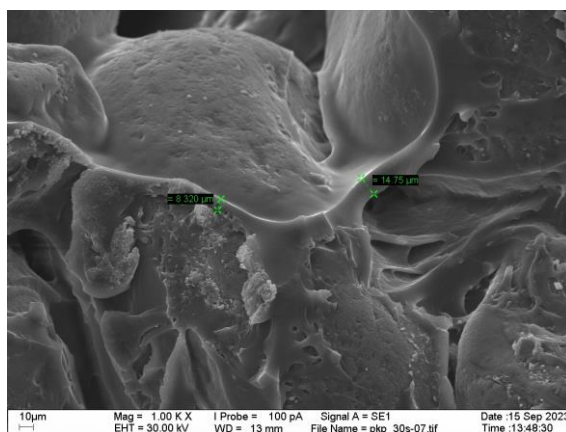


Рис. 81. Микростроение образца закрепленного песка с карбонатными поверхностными пленками уплотненной скелетно-матричной микроструктуры; увеличение в 1000 раз (съемка выполнена Черновым М.С.)

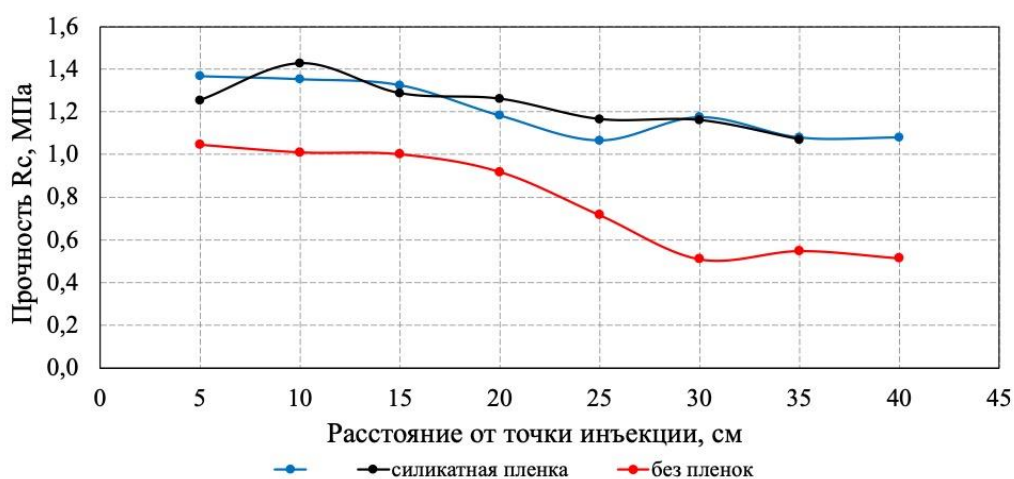
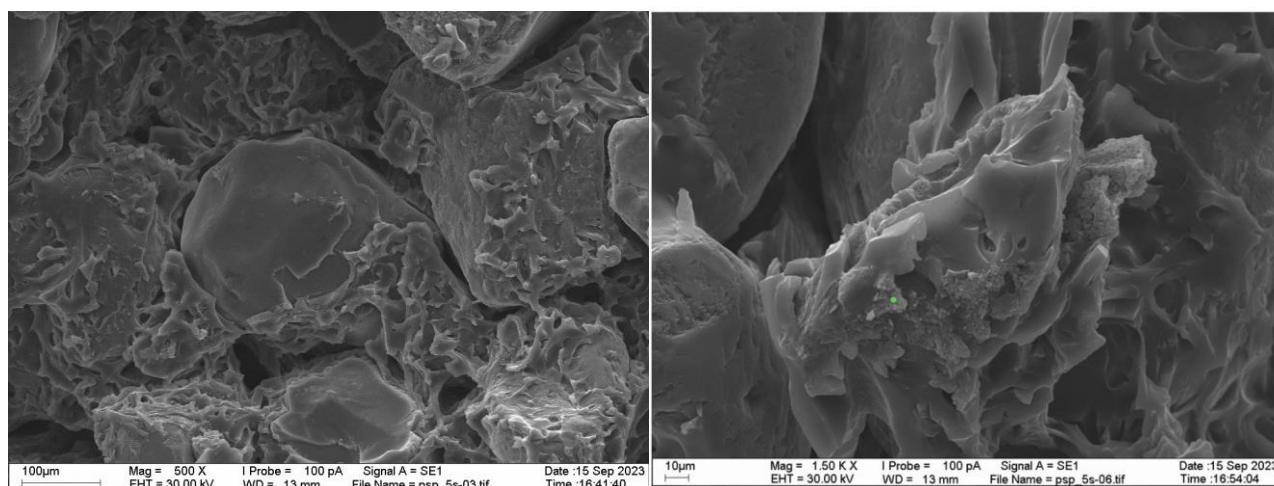


Рис. 82. График изменения прочности закрепленных песчаных грунтов по длине инъекционной колонны для образцов с силикатными поверхностными пленками (два параллельных эксперимента) и с удаленными пленками

Поры между песчаными зернами заполнены затвердевшим гелем, формирующим ячеистую микроструктуру. Следует отметить, что адгезия геля к поверхности кварцевого зерна существенно выше, чем к силикатным поверхностным пленкам, о чем свидетельствует отсутствие контактов между пленками и затвердевшим раствором. При растворении и последующем встраивании силикатной пленки в поровое пространство, заполненное гелем, происходит частичное расслаивание самого геля рабочего раствора [59].

На рис. 83 (б) наблюдается сополимеризованный гель в поровом пространстве закрепленного песчаного грунта, внутри которого присутствует пленочное вещество пластинчатой формы, что подтверждается результатами спектрального анализа, где в поровом пространстве наблюдается повышенное содержание кремния. При встраивании силикатной пленки в поровое пространство происходит частичное расслаивание геля.



а

б

Рис. 83. Микростроение образца закрепленного песка с силикатными поверхностными пленками ячеистой микроструктуры;

а – увеличение в 500 раз, б - 1500 раз (съемка выполнена Черновым М.С.)

Прочность на одноосное сжатие для закрепленных образцов с железистыми пленками составляет 1,31-1,45 МПа (рис. 84). Значения плотности изменяются от 1,97 до 2,02 г/см<sup>3</sup>, влажности – от 9 до 11%. Значения прочности по радиусу закрепления изменяются равномерно, что связано с отсутствием скопления пленочного вещества в нижней части колонны, в отличие от классического распределения свойств по длине пути фильтрации. С увеличением прочности образцов возрастают значения их плотности и снижаются значения влажности. Снижение плотности данных образцов связано с выносом тонкодисперсной фракции железа за пределы инъекционной колонны. Высокая прочность песков с железистыми аутигенными пленками подтверждается результатами определения краевых углов смачивания и адгезии [59].

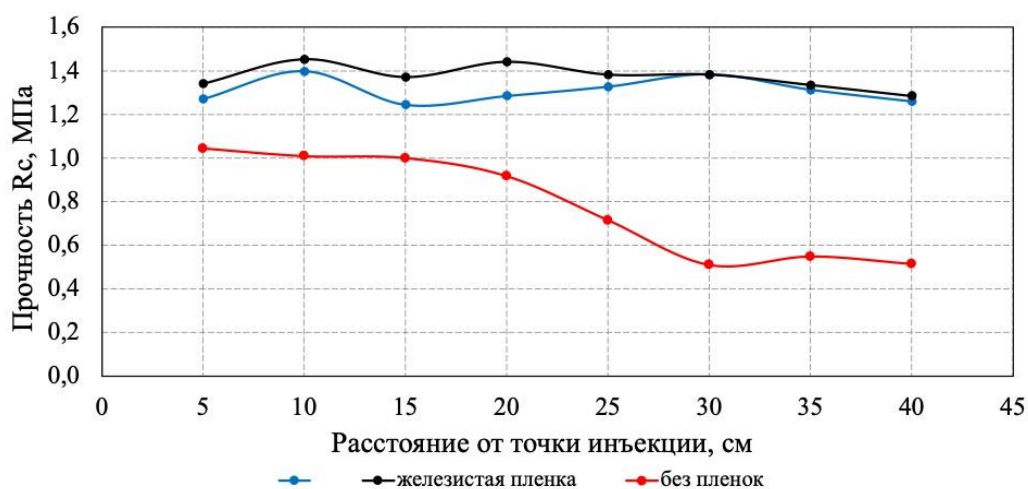


Рис. 84. График изменения прочности закрепленных песчаных грунтов по длине инъекционной колонны для образцов с железистыми поверхностными пленками (два параллельных эксперимента) и с удаленными пленками



На рис. 85 показаны песчаные зерна с железистыми поверхностными пленками, представленными мелкокристаллической массой. Распространение поверхностных образований неравномерно, наблюдается их приуроченность к дефектам и неровностям поверхности. Отслаивающиеся частицы железистых пленок встраиваются в объемную структуру геля, что объясняется низкими давлениями инъекции и низкой скоростью фильтрации рабочего раствора в поровом пространстве. Формирование контактов геля с поверхностью зерен приводит к формированию сотовой микроструктуры. Незаполненные поры между песчаными частицами заполнены «мостиками» затвердевшего раствора, которые выступают дополнительными ребрами жесткости, увеличивая прочность образцов [59].

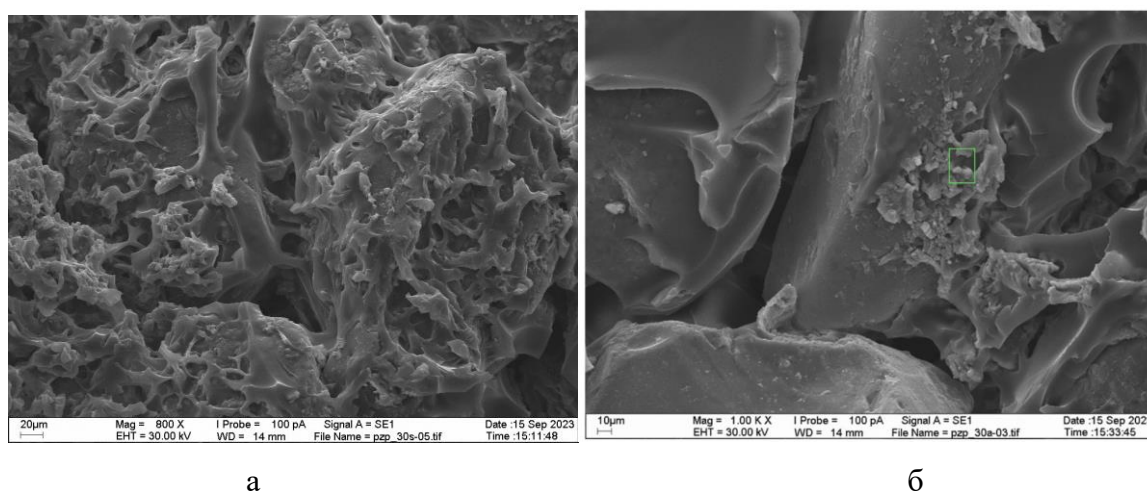


Рис. 85. Микростроение образца закрепленного песка с железистыми поверхностными пленками сотовой микроструктуры;

а – увеличение в 800 раз, б - 1000 раз (съемка выполнена Черновым М.С.)

Согласно результатам спектрального анализа, кроме элементов, входящих в состав геля (С, О, Cl), в поровом пространстве исследуемого образца наблюдается Fe, что свидетельствует о том, что происходит захват пленочного вещества в объемную структуру геля.

Для песков с глинистыми поверхностными пленками характерны максимальные значения прочности, составляющие от 1,37 до 1,75 МПа (рис. 86). Значения плотности изменяются от 1,99 до 2,06 г/см<sup>3</sup>, влажности – от 9 до 12%. Прочность увеличивается при удалении от точки инъекции, что объясняется выносом глинистого вещества в нижнюю часть колонны. Для песков с глинистыми образованиями характерны максимальные значения плотности, что обуславливается перемешиванием геля с веществом пленки и, вероятно, поглощением воды из раствора и набуханием глинистых частиц. Полученные высокие значения прочности также подтверждаются результатами определения адгезии, краевых углов смачивания и сорбции.

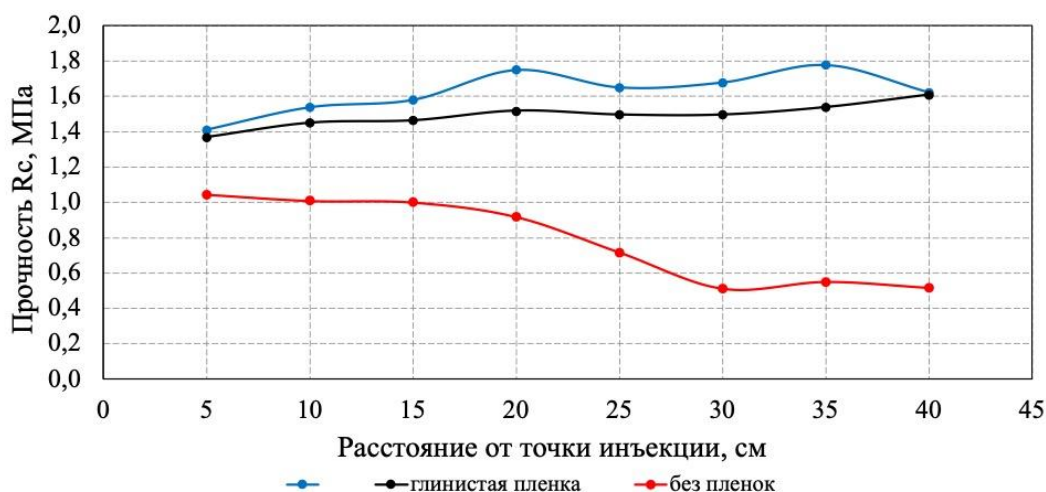


Рис. 86. График изменения прочности закрепленных песчаных грунтов по длине инъекционной колонны для образцов с глинистыми поверхностными пленками (два параллельных эксперимента) и с удаленными пленками

Электронно-микроскопические снимки закрепленного модельного песка с глинистыми пленками показаны на рис. 87. Отчетливо наблюдаются глинистые аутигенные образования, имеющие пластинчатую форму и приуроченные к неровностям поверхности. Толщина глинистых пленок составляет около 2 мкм. Поровое пространство равномерно заполнено сополимеризованным гелем рабочего раствора, образующим сетчато-ячеистую структуру и формирующим значительное количество точечных и капиллярных контактов с поверхностью песчаных зерен [59].

Однако, как можно заметить (рис. 87 (б)), наблюдаются отдельные крупные поры, не заполненные гелем, что связано с его частичным усыханием при хранении образцов в воздушно-влажных условиях в эксикаторе над водой.

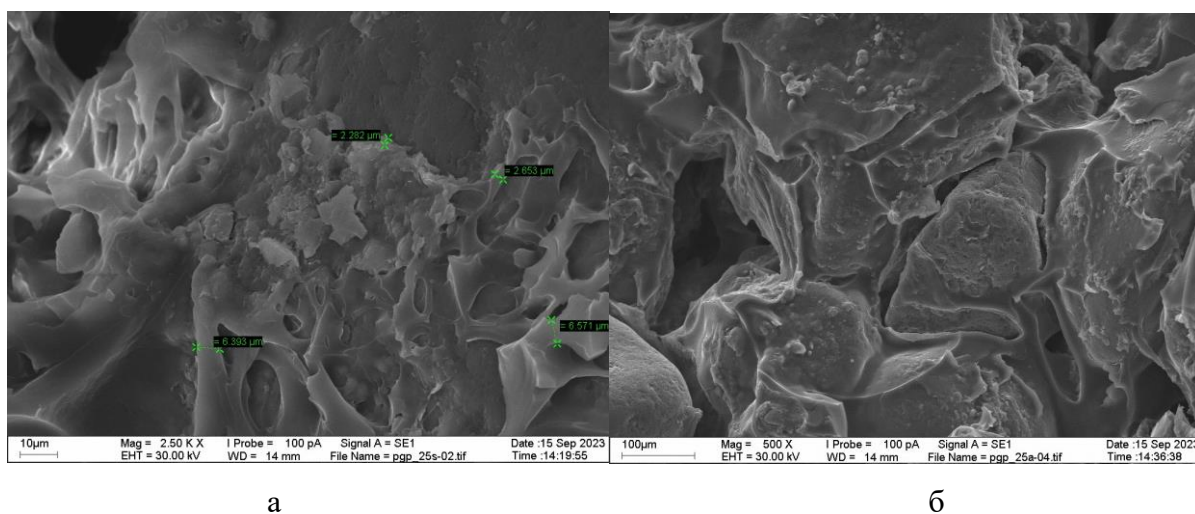


Рис. 87. Микростроение образца закрепленного песка с глинистыми поверхностными пленками уплотненной сетчато-ячеистой микроструктуры;  
а – увеличение в 2500 раз, б - 500 раз (съемка выполнена Черновым М.С.)

### Выводы к параграфу 5.5

По влиянию на эффективность закрепления (оценка по величине прочности на одноосное сжатие) исследованные типы поверхностных пленок в песках можно расположить в следующий ряд по убыванию: глинистая, железистая, силикатная, карбонатная, органическая (рис. 88).

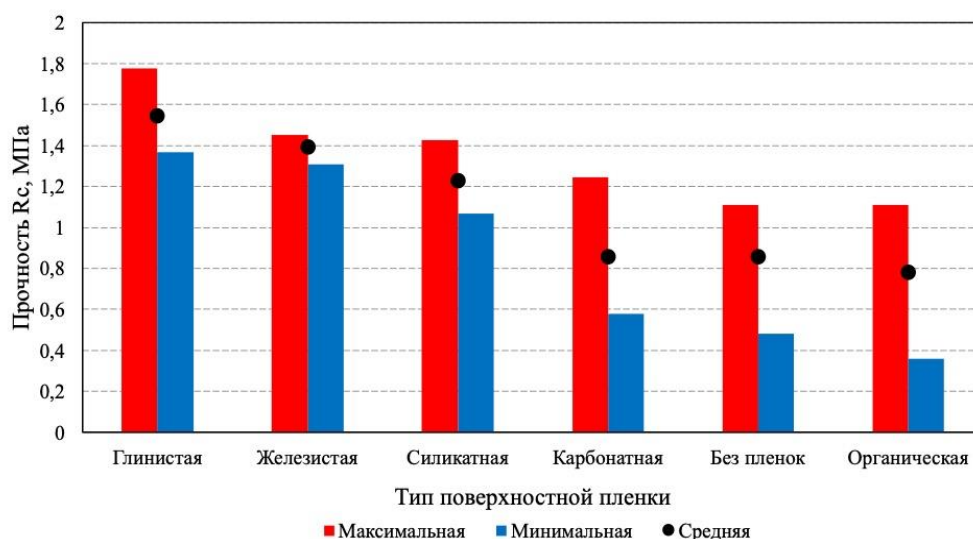


Рис. 88. Типологический ряд влияния аутигенных пленок на прочность закрепленных грунтов

Увеличение прочностных свойств закрепленных песчаных грунтов с различными пленками обусловлено частичным захватом частиц пленочных образований и встраиванием их в структуру формирующегося геля, что подтверждается исследованием микростроения закрепленных образцов. Отмечается высокая адгезия и сравнительно низкие значения краевого угла смачивания инъекционного раствора к поверхности, покрытой глинистой пленкой.

Относительно низкая прочность на одноосное сжатие песков с органическими пленками обусловлена, с одной стороны, изменением химического состава геля в результате частичного растворения пленочного вещества, а, с другой стороны, низкой адгезией формирующегося геля к поверхности песчаных зерен, что, видимо, является результатом проявления ее гидрофобности к инъекционному раствору.

Пониженные значения прочности на одноосное сжатие песков с удаленными поверхностными пленками, видимо, следует связывать с изменением общего заряда поверхности песчаных зерен, что ухудшает ее смачиваемость и обуславливает снижение адгезии формирующегося геля.

Электронно-микроскопические исследования образцов с различным составом поверхностных пленок показали, что поверхностные аморфные соединения в виде хлопьев (плоские агрегаты изометричной формы) способны отрываться от поверхности песчаных зерен и концентрироваться в наиболее мелких порах, что, в конечном счете, способствует формированию более плотных и прочных контактов между отдельными песчаными зернами.

На основании полученных экспериментальных результатов на защиту выносятся (третье защищаемое положение): **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.**



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

Полноценное всестороннее изучение эффективности применения вяжущего для инъекционного закрепления грунтов методом пропитки невозможно представить без опробования технологий и вяжущих в полевых условиях. Однако, современная практика, ввиду дороговизны и сложностей реализации данных методов все реже прибегает к опробованию разработанных рецептур в полевых условиях. Многие видные деятели технической мелиорации (Йостен, Людон, Камбефор) отмечали спорность математического обоснования применимости вяжущих для различных ИГУ, и отмечали, что следует доверять исключительно результатам опытных инъекционных работ.

### **6.1. Опытное инъекционное закрепление массива аллювиальных песчаных грунтов методом пропитки на территории Мещерского полигона МГУ им. М.В. Ломоносова**

Исследования по определению эффективности закрепления массива песчаных грунтов проводились с применением полевых инъекционных работ на территории Мещерской научной станции МГУ имени М.В. Ломоносова, в условиях, приближенных к производственным.

Опытные работы проводились на первой надпойменной террасе р. Клязьмы. Участок расположен на ровной поверхности с небольшим уступом в сторону надпойменной террасы. Аллювиальная толща ( $aQ_{III}^{II}$ ) в пределах опытного участка представлена среднезернистыми песками, средней плотности сложения ( $e = 0,6$ ), малой степени водонасыщения ( $W_e = 2-4\%$ ), характеризующимися горизонтальной слоистостью отложений. Строение верхней части разреза осложнено процессами педогенеза, выражающимися в образовании как генетических горизонтов подзолистых почв, так и сильно ожелезненных прослоев толщиной до 5-10 мм (рис. 89).

Средняя плотность частиц грунта  $\rho_s = 2,66 \text{ г/см}^3$ , плотность песчаных грунтов в естественном сложении изменялась в пределах 1,77-1,84 г/см<sup>3</sup>. При проведении дублирующих лабораторных работ грунт укладывался с плотностью  $\rho = 1,66-1,70 \text{ г/см}^3$ , данные значения приняты для использования вследствие невозможности более плотной упаковки песчаного грунта в инъекционные колонны.

$K_f$  массива песчаных грунтов на глубине порядка первого метра 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 ( $n$ ) в естественном сложении изменяется в пределах 38-40%, при проведении лабораторных работ составляла от 40 до 41% [70].

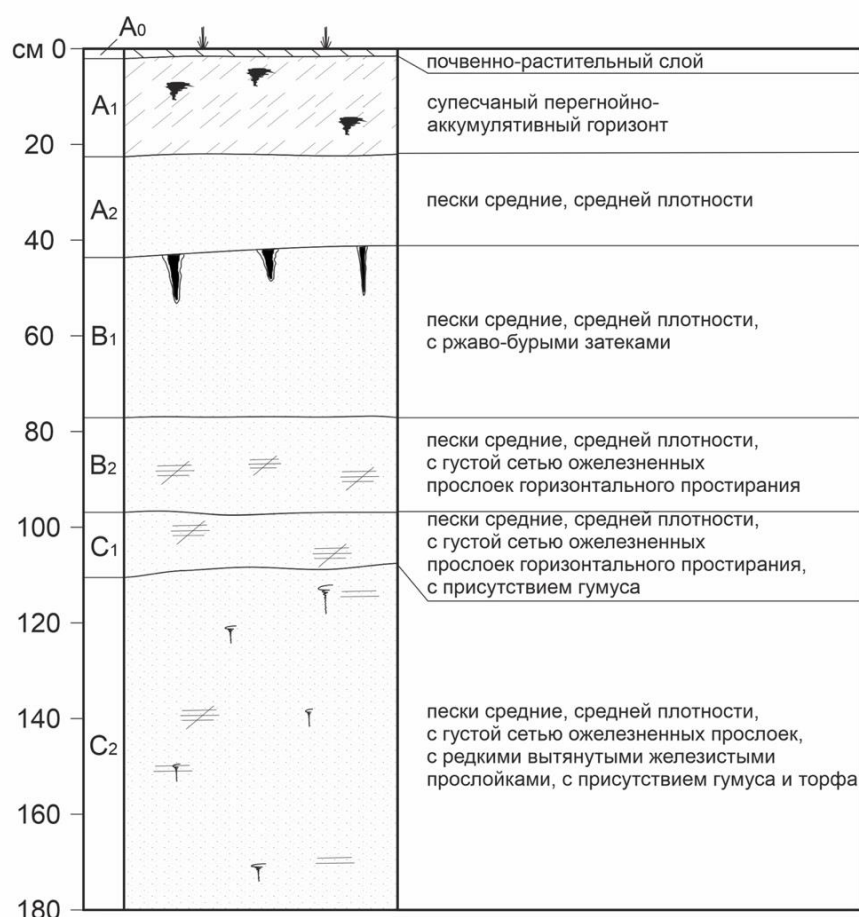


Рис. 89. Схематическое строение толщи аллювиальных песков в зоне почвообразования на территории опытного участка Мещерского полигона МГУ имени М.В. Ломоносова (по С.Д. Воронкевичу, с изменениями) [23]

В процессе опытных инъекционных работ закрепление воздушно-сухих грунтов зоны аэрации проводилось методом пропитки на глубине 1,0-1,4 м. Оценка качества обработки массива песчаных грунтов инъекционным раствором определялась посредством шурфования и вскрытия целика закрепленного массива песчаных грунтов с последующим пробоотбором по радиусу закрепления. На участке опытных работ грунтовые воды встречены на глубине 5-7 м, что позволяет исключить влияние капиллярной каймы и подтапливания закрепленного массива песчаных грунтов при его дальнейшей выдержке для набора максимальной прочности [70].

Закрепление маловлажных песчаных грунтов в естественном сложении производилось с помощью забивного инъектора стандартной конструкции [76] диаметром 25,4 мм, перфорированная часть инъектора составляла 300 мм, расстояние между пазами с отверстиями 50 мм, диаметр отверстий – 3 мм. Перед забивкой инъектора производилось предварительное закрытие каждого ряда перфорации эластичными тонкими резиновыми манжетами, которые прорывались в процессе нагнетания рабочего раствора.

Подготовка к закреплению массива грунтов сводилась к следующему: иньектор погружался в массив посредством забивания в грунт на расчетную глубину, после чего на иньектор надевался переходник с быстросъемным механизмом, соединяющийся с резервуаром (баком) рабочего раствора. Раствор модифицированной алифатической эпоксидной смолы подавался в грунт через иньектор с поддержанием постоянного давления инъекции (1,2-1,3 атм). Расход рабочего раствора составлял порядка 20-25 л/мин. Общий объем использованного рабочего раствора составил 0,2 м<sup>3</sup>, объем закрепленного грунта примерно равен 0,5 м<sup>3</sup>. Вскрытие обработанного массива песчаных грунтов производилось спустя месяц после проведения инъекции, для достижения полной сополимеризации геля рабочего раствора и максимального набора прочности [70].

Закрепленный в полевых условиях массив имел бочкообразную форму, с диаметром закрепления около 150 см (рис. 90). Модифицированный грунт характеризуется ярко выраженной зоной контакта «закрепленный/незакрепленный грунт», мощностью порядка 1-2 см, что говорит об отсутствии разбавления рабочего раствора в процессе инъекции. После инъекционной обработки и очистки примыкающего незакрепленного песка массив характеризовался высокой однородностью. Отбор проб закрепленного грунта производился путем вырезания цилиндрических проб по радиусу закрепления с интервалом в 10 см, начиная от точки установки иньектора. Форма закрепленного целика грунта, частично напоминающая шарообразную, говорит о равномерном распространении рабочего раствора от точки инъекции вне зависимости от направления по всему песчаному массиву [70].

Отбор образцов из массива закрепленного грунта в воздушно-влажном состоянии производился с помощью лабораторных колец стандартных размеров. Показано (рис. 91), что прочность в массиве изменяется в пределах 0,6-1,5 МПа, наблюдается увеличение прочности по мере удаления от точки инъекции к краевой зоне. Также отчетливо наблюдается увеличение прочности закрепленных грунтов при снижении влажности. Следует отметить, что влажность песчаного грунта в массиве варьируется в пределах 2-4%, для воздушно-сухих грунтов значения влажности находятся в диапазоне до 1%. В свою очередь, влажность закрепленных песчаных грунтов, хранившихся в воздушно-влажном и водонасыщенном состоянии, изменяется в пределах 10-13% и 15-19% соответственно. Низкие значения прочности на одноосное сжатие (0,6-0,7 МПа) образцов закрепленного грунта в прииньекторной зоне обусловлены механическим воздействием иньектора на песчаный грунт вследствие его «выдергивания» из толщи аллювиальных отложений [70].

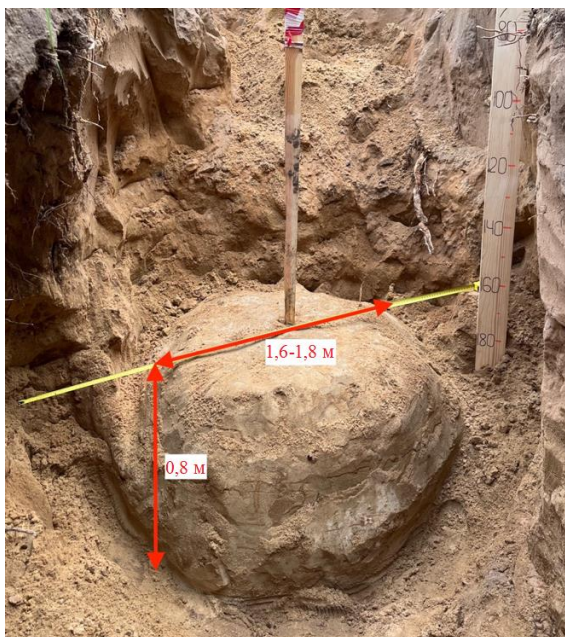


Рис. 90. Вскрытый целик закрепленного песчаного грунта ( $aQ_{III}^H$ ) на глубине 1,2-2,0 м на территории опытного участка Мещерского полигона МГУ имени М.В. Ломоносова

Для контроля за качеством проведения экспериментов в лабораторных условиях проводилась инъекционная обработка песчаных грунтов, отобранных из шурфа, в целевом участке. Для более качественного понимания природы изменения прочности на одноосное сжатие в зависимости от условий хранения образцов было изготовлено несколько инъекционных колонн с длиной в 75 см. Хранение образцов в воздушно-влажных и водонасыщенных условиях показывает некоторое снижение прочностных свойств модифицированных грунтов относительно полевых образцов, падение прочности достигает 50% на начальном интервале инъекции (с 1,2-1,5 до 0,5-0,6 МПа). Данная разность в прочности на одноосное сжатие обусловлена высокими коэффициентами фильтрации песчаных грунтов, вследствие чего происходит «стекание» рабочего раствора вниз по поровому пространству при его хранении в вертикальном состоянии до момента гелеобразования. Завышенные значения прочности, полученные при хранении образцов в воздушно-сухих условиях, объясняются отсутствием влаги в поровом пространстве и в самой структуре геля. Влажность по длине пути фильтрации для закрепленных образцов не превышает 1-2%, а прочность увеличивается на 50-80%, до 2,0-2,5 МПа. Данный эффект связан с потерей влаги гелем сополимеризованного раствора, вследствие чего прочность каждого отдельного контакта существенно возрастает, что оказывает столь высокий эффект, даже с учетом формирования трещин усыхания структуре геля [70].

Значения плотности закрепленных песчаных грунтов варьируются в диапазоне 1,92- 2,05 г/см<sup>3</sup>, максимальные значения плотности характерны для центральной части массива. Приинъекторная область характеризуется меньшими значениями плотности (до 1,90-1,92 г/см<sup>3</sup>), что можно объяснить воздействием на грунт инъектора при его внедрении и удалении, а также

ударным воздействием рабочего раствора на принижекторную область массива в процессе закрепления [70].

Закономерное снижение плотности по радиусу закрепления обусловлено снижением концентрации вяжущего вдоль радиуса закрепления вследствие его торможения в поровом пространстве по мере внедрения, что приводит к неравномерному выпадению компонентов рабочего раствора по длине пути фильтрации.

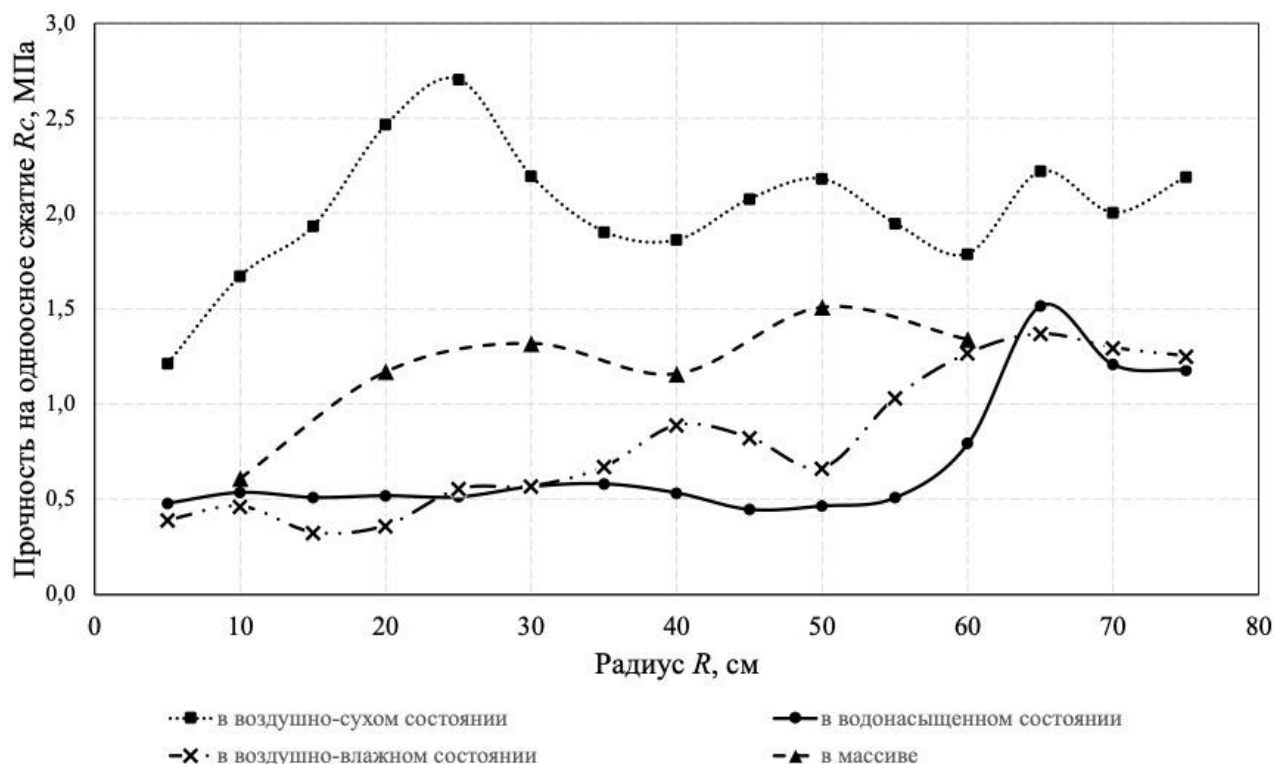


Рис. 91. График изменения прочностных свойств по радиусу инъекционного закрепления образцов закрепленного грунта в полевых и лабораторных условиях

Съемка с использованием растровой электронной микроскопии показывает, что заполнение порового пространства происходит равномерно, в качестве примера на рис. 92 показано типичное строение порового пространства, на котором отчетливо прослеживается равномерное распространение геля рабочего раствора в поровом пространстве, обволакивание песчаных зерен гелем с формированием массивной «рубашки» геля, формированием «мостиковых» и «менисковых» контактов между отдельными песчаными зернами [70].

В тоже время, при детальном рассмотрении микроскопических снимков закрепленных песчаных грунтов в лабораторных условиях (рис. 93) не наблюдается сколь угодно малых отличий, что говорит о корректности проведения лабораторных испытаний и возможности дальнейшего использования данных, полученных с помощью инъекционной обработки грунтов в инъекционных колоннах.

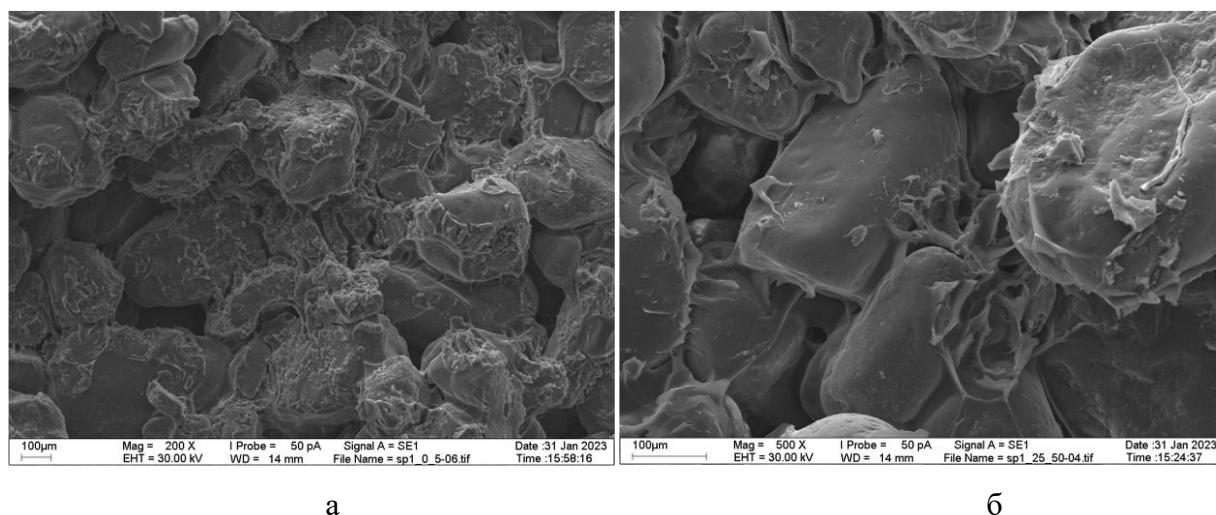


Рис. 92. Скелетно-матричная микроструктура образца закрепленного в массиве песка ( $aQ_{III}^{II}$ ): а – рубашки геля на песчаных зернах, увеличение в 200 раз; б – контакт пленки сформировавшегося геля и кварцевых песчаных зерен, увеличение в 500 раз (Съемка выполнена М.С. Черновым)

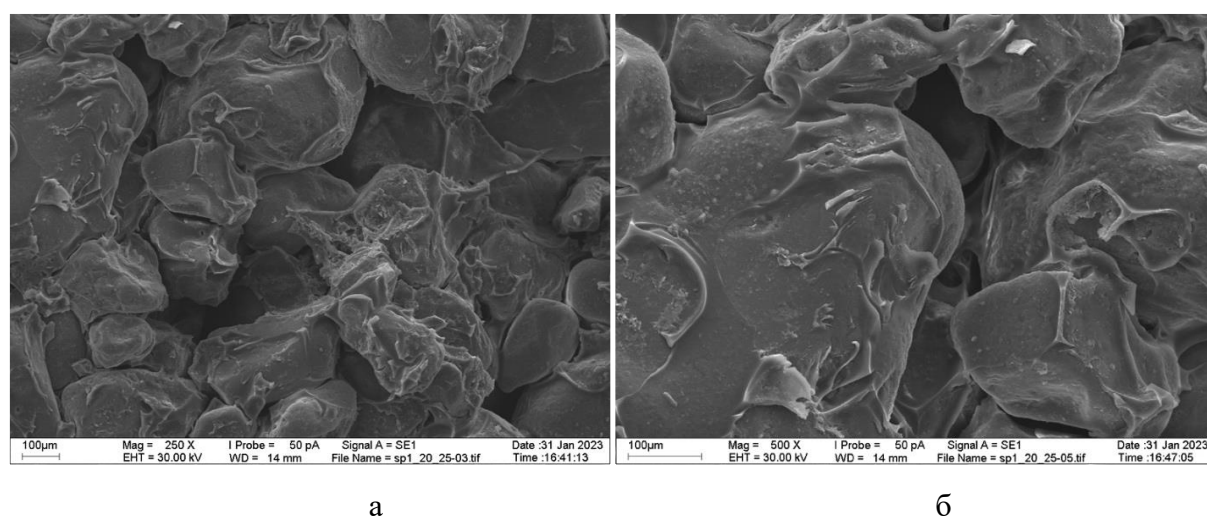


Рис. 93. Скелетно-матричная микроструктура образца закрепленного в лабораторных условиях песка ( $aQ_{III}^{II}$ ): а – рубашки геля на песчаных зернах, увеличение в 250 раз; б – контакт пленки сформировавшегося геля и кварцевых песчаных зерен, увеличение в 500 раз (Съемка выполнена М.С. Черновым)

Исследование физико-механических свойств закрепленных песчаных грунтов проводились на образцах, отобранных в полевых условиях из модифицированного массива. На диаграмме Кулона-Мора (рис. 94) приведены результаты определения прочностных характеристик для незакрепленных и закрепленных песчаных грунтов, отобранных в полевых условиях до и после закрепления массива песчаных грунтов.

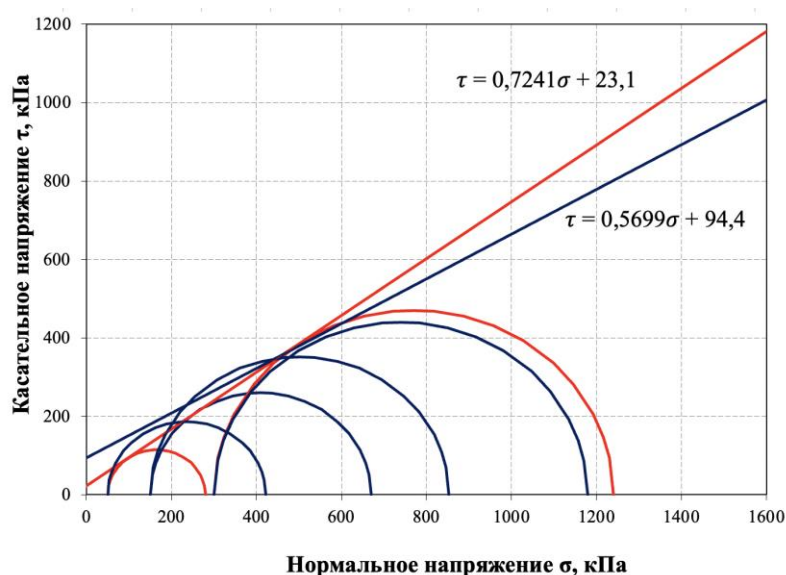


Рис. 94. Диаграммы Кулона-Мора для песчаных грунтов ( $aQ_{III}^{II}$ ); красным – незакрепленные грунты, синим – закрепленные грунты

По приведенным данным видно, что в результате инъекционной обработки методом пропитки увеличивается сцепление и незначительно падают значения угла внутреннего трения. Высокие значения сцепления незакрепленного песка объясняются наличием угловато-окатанных частиц, а также незначительным присутствием пылевато-глинистой компоненты. Снижение значений угла внутреннего трения ( $\phi$ ) и увеличение значений сцепления ( $c$ ) обосновывается тем, что поровое пространство песчаного грунта заполнено эластичным гелем (при сохранении естественной влажности) из-за чего формируются дополнительные «гибкие» контакты между песчаными зернами [70].

Результаты анализа прочностных характеристик естественных и модифицированных грунтов, а также самого геля рабочего раствора при испытании на одноплоскостной срез показаны на рис. 95. Отметим, что незакрепленный песок показывает малое значение сцепления и высокое значение угла внутреннего трения. Гель имеет более высокие значения сцепления, однако угол внутреннего трения стремится к нулю, указывая на то, что сам гель плохо «работает» на сдвиг. При всем этом система «грунт-гель» показывает увеличение значения сцепления при небольшом уменьшении угла внутреннего трения, что говорит о положительном влиянии инъекционного закрепления на прочностные свойства песчаных грунтов.

Также были исследованы деформационные характеристики незакрепленных и закрепленных грунтов, полученные в рамках проведения трехосных испытаний. За характерный показатель был принят секущий модуль деформации при 50% прочности, поскольку его изучение в стандартном диапазоне может быть некорректным в связи с малым размером диапазона при малых давлениях в камере. Так показатели модуля  $E_{50}$  демонстрируют близкие значения для незакрепленных и закрепленных грунтов.



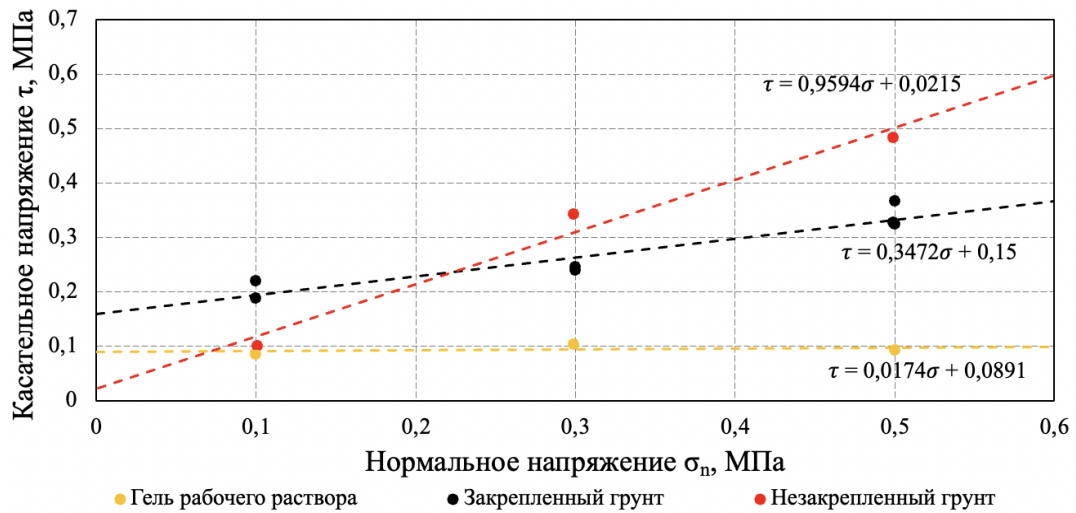


Рис. 95. Зависимость касательного напряжения от нормального при испытании на одноплоскостной срез для закрепленных и незакрепленных песчаных грунтов ( $aQ_{III}^{II}$ ), а также для геля рабочего раствора

В то же время при рассмотрении характерных графиков (рис. 96) зависимости девиаторного напряжения ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) от относительной вертикальной деформации ( $\epsilon$ ) можно заметить, что в начале испытания закрепленные грунты показывают большие значения относительных деформаций, что может быть связано с уменьшением сдвиговой жесткости в связи с изменением типа преобладающих контактов в структуре закрепленного грунта. В закрепленных песках около  $\frac{3}{4}$  порового пространства заполнены гелем вяжущего, таким образом, частицы связаны в большей степени с гелем, чем между собой.

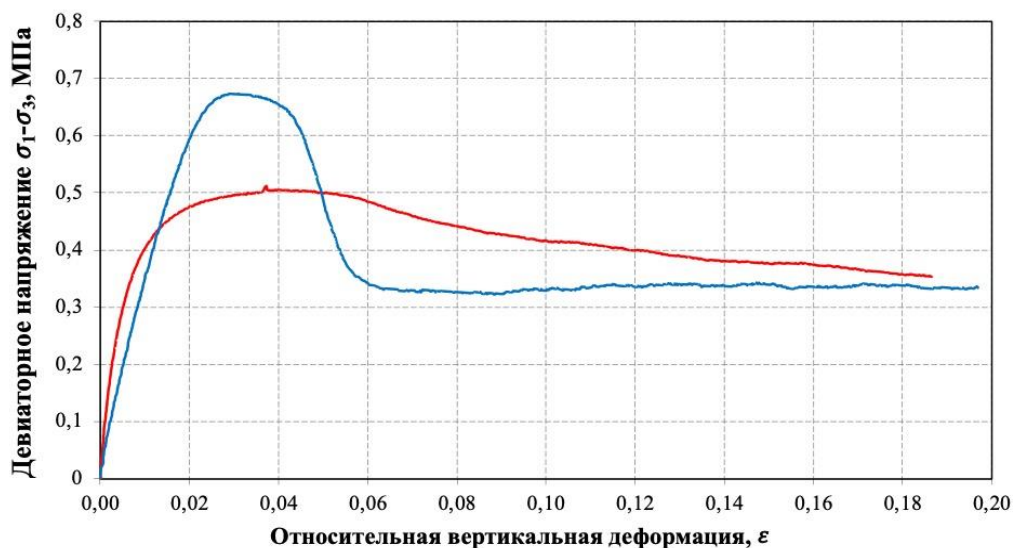


Рис. 96. Зависимость девиаторного напряжения от относительной деформации по результатам трехосных испытаний закрепленных (синий) и незакрепленных (красный) песчаных грунтов при  $\sigma_3 = 0,15$  МПа



В ходе компрессионных испытаний изучалось изменение деформационных характеристик в зависимости от удаления от точки инъекции. Были выделены три зоны: приинъекторная (до 15 см), центральная (от 15 до 30 см), краевая (от 30 см). Из каждой зоны были отобраны образцы, часть из которых испытывалась с сохранением естественной влажности, другая часть водонасыщалась путем фильтрации воды снизу-вверх перед проведением испытания. Исходя из результатов компрессионных испытаний (рис. 97), можно сделать вывод о разуплотнении грунтов в приинъекторной зоне, вследствие чего значения деформаций в данной зоне почти в 1,5 раза больше, чем в двух других. Также проведенные испытания демонстрируют закономерное уменьшение деформаций при удалении от зоны инъектирования, что наблюдается как у образцов с естественной влажностью, так и у образцов с предварительным водонасыщением в процессе проведения эксперимента. Высокие деформации в водонасыщенном состоянии могут быть связаны с заполнением оставшегося порового пространства водой и его постепенных свободным набуханием геля в поровом пространстве [70].

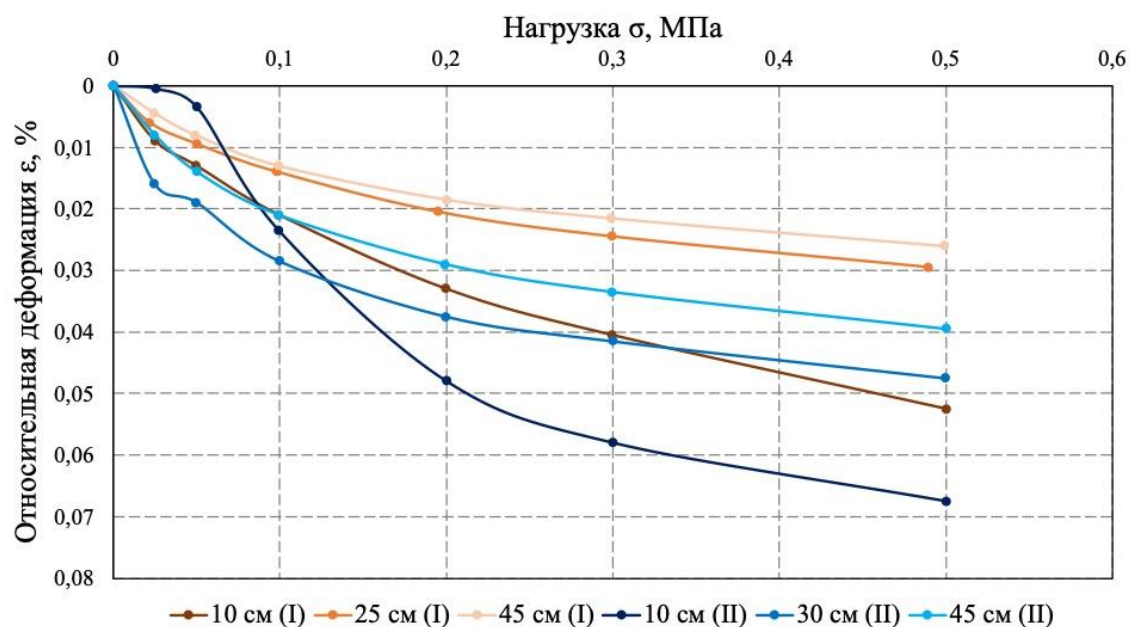


Рис. 97. Зависимость относительной деформации от нагрузки по результатам компрессионных испытаний по радиусу распространения рабочего раствора; I – воздушно-влажные грунты, II – водонасыщенные грунты

Подводя итог сказанному, можно сделать вывод о том, что комплексные исследования образцов позволили выделить три области модифицированного массива песчаных грунтов:

1) приинъекторную зону, для которой характерно некоторое снижение значений 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 инъекционного процесса;

2) центральную часть массива, для которой характерны максимальные значения прочностных свойств, что подтверждается полученными результатами исследования физико-механических свойств, а также наличием более качественных и многочисленных контактов цементационного и мостикового типов между песчаными зернами, наблюдаемых при исследовании микроструктуры;

3) краевую зону – область, наиболее подверженную влиянию разбавления рабочего раствора, подверженную излишнему перераспределению компонентов инъекционного состава рабочего раствора, а именно: снижению концентрации коллоидного кремнезема вследствие снижения скорости проникновения раствора на периферии закрепляемого объема грунта по мере внедрения рабочего раствора при инъекционной пропитке. В то же время, данные физико-химические процессы не оказывают чрезмерного влияния на сплошность и эффективность обработки массива в пределах радиуса закрепления при взаимодействии с влажными песками.

Также, падение прочности может наблюдаться за счет глобального изменения химического состава инъекционного раствора ввиду интенсивного осаждения торможения коллоидного кремнезема в поровом пространстве грунтов. В результате образующийся гель практически не содержит инертного заполнителя, и как следствие, модифицированный грунт теряет структурную жесткость.

## **6.2. Промышленное внедрение модифицированного раствора алифатической эпоксидной смолы**

Высокие перспективы раствора на основе алифатической эпоксидной смолы привели к возможности его использования, в качестве промышленного образца для закрепления тела дамбы шламохранилища в Пермском крае. Одним из ключевых преимуществ рабочего раствора является возможность его использования при отрицательных температурах. Как было показано выше, процесс гелеобразования возможен при околонулевых температурах компонентов рабочего раствора вследствие экзотермической реакции алифатической эпоксидной смолы с полиэтиленполиамином.

Полевые работы проводились при устоявшемся снежном покрове, в период с 10 по 25 ноября 2023 г. Площадка проведения испытаний сложена песками дамбы шламохранилища и представляет собой толщу насыпных техногенных песчаных грунтов ( $t_{QIV}$ ) в пределах отсыпки бокового створа дамбы шламохранилища (приложение №4).

По предварительным данным толща песчаных грунтов формировалась посредством послойной отсыпки с последующей трамбовкой, мощность элементарного слоя при укатке составляла 30 см.

Подготовка скважин к инъекции заключалась в бурении на проектную глубину (3 м), установке инъектора на глубину «холостой» зоны (1 м от дневной поверхности), тампонировании

цементно-гипсовым раствором пространства между инъектором и стенкой скважины для предотвращения выпора рабочего раствора при нагнетании в инъекционную скважину, диаметр скважины составлял 72-75 мм. После застывания цементно-гипсового раствора скважина была готова к проведению инъекции.

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.

Реактивы хранились в отапливаемом помещении, при температуре порядка 0-5 °С, инъекционные работы на площадке проводились в температурном диапазоне от –2 до –9°С.

Приготовление рабочего раствора проводилось из расчета обработки одной инъекционной скважины, с мощностью обрабатываемой зоны 2 погонных метра. Согласно предварительным расчетам, для обработки одного погонного метра песчаного грунта при планируемом радиусе инъекции порядка 80 см необходимо приготовление рабочего раствора в объеме 850 л. Для подготовки к инъекционному химическому закреплению готовились две емкости с рабочим раствором общим объемом 1700 л. Отметим, что расход рабочего раствора прямо соотносится с объемом закрепленного грунта.

Отвердитель, в качестве которого использовался ПЭПА, добавлялся к рабочему раствору непосредственно перед началом инъекции. При добавлении отвердителя обеспечивалось постоянное перемешивание рабочего раствора с помощью циркуляционного насоса. Подача инъекционного раствора осуществлялась в аккумулирующую емкость нагнетательной станции порционно объемом по 150 л.

Контроль качества рабочего раствора проводился параллельно с приготовлением рабочего раствора. В процессе инъекционной обработки песчаных грунтов температура рабочего раствора повысилась до 13 °С. При этом температура исходной технической воды для приготовления раствора вяжущего составляла 4 °С, вязкость рабочего раствора – 1,1 сП, плотность рабочего раствора 1,05-1,1 г/см<sup>3</sup>. То есть, температура рабочего раствора после смешивания компонентов повышалась, что свидетельствовало о прохождении экзотермической реакции.

Давление инъекции при однородной пропитке массива составляло 0,7-1,0 атм, первые 300 л рабочего раствора пропитали грунт без давления, «самотеком». При дальнейшем внедрении инъекционного раствора в поровое пространство грунтов наблюдалось некоторое повышение давления инъекции до 1 атм. Объем раствора, закачанного в каждую скважину, составил 1700 л при 2-х метровом интервале инъекции.

Вскрытие шурфа производилось по истечении 5 суток с момента инъекционной обработки песчаных грунтов. Данное время можно считать достаточным для частичной полимеризации рабочего раствора даже при отрицательных температурах.

Снятие «холостой зоны» мощностью порядка одного метра проводилось по всей предполагаемой области распространения вяжущего. Площадь вскрываемой зоны составила 3\*4 м, итоговая глубина шурфа не превышала 2,5 м.

На глубине 1,4 м был вскрыт слой щебнисто-гравийного грунта с песчано-глинистым заполнителем, покрытого слоем геоткани. Мощность гравийного слоя составила 40 см, наличие геоткани в его верхней части послужило некоторым экраном, препятствующим распространению инъекционного раствора по вертикали. При вскрытии шурфа наблюдалось распространение раствора вяжущего по щебнистому слою на значительное расстояние от ряда инъекционных скважин – до 5 м от точки инъекции. Однако, даже с учетом данного негативного факта рабочий раствор равномерно пропитал нижележащий слой песчаного грунта под слоем гравия по всей площади распространения [173].

В местах расположения инъекционных скважин были вскрыты цилиндрические «сваи», диаметром 60-65 см, с четко выраженной границей закрепленного и незакрепленного грунта. Из массива закрепленного грунта были отобраны монолиты размером 20\*20\*20 см, для последующей транспортировки и подготовки образцов к исследованиям и испытаниям в лабораторных условиях.



а

б

Рис. 98. Вскрытый целик закрепленного песчаного грунта ( $t_{QIV}$ ) (а) и его последующее опробование (б)

Было установлено, что образцы прошли через 4 цикла промерзания-оттаивания в процессе транспортировки, что незначительно снижает их прочностные характеристики, однако

существенного влияния данный процесс не оказывает. Важно отметить, что не представляется возможным оценить влияние однократного промерзания образцов на их свойства, при условии неполной полимеризации геля рабочего раствора.

Опробование массива песчаного грунта показало, что влажность незакрепленных песчаных грунтов варьирует в пределах 25-27 %, что соответствует влажным пескам, значения плотности ( $\rho$ , г/см<sup>3</sup>) изменяется в пределах 1,56-1,60 г/см<sup>3</sup>, что соответствует средней плотности сложения песков. Можно сделать вывод о недоуплотненности техногенного песчаного массива, уплотненного методом послойной трамбовки.

Характер изменения влажности показывает, что, как и в лабораторных условиях, при закреплении влажного песка наблюдается процесс отжатия излишней влаги из массива, а влажность самого закрепленного песчаного грунта остается неизменной и не превышает 15%. Стоит отметить, что имеет место некоторое разбавление рабочего раствора, вследствие чего его свойства могут несколько снижаться при от удаления от точки инъекции.

Подготовка образцов для определения прочностных свойств закрепленного грунта производилась в лабораторных условиях из монолитов. Были отобраны две серии образцов по пути распространения раствора вяжущего. Установлено (рис. 99), что при удалении от инъектора не наблюдается существенного изменения прочностных свойств закрепленного грунта.

Стоит отметить, что данные испытания проводились на двухнедельных образцах, что не соответствует периоду полного набора прочности закрепления песчаного грунта, вследствие чего в лабораторных условиях было проведено закрепление песчаных грунтов в инъекционных колоннах и их последующая выдержка на протяжении месяца в воздушно-влажных условиях. Потери прочности при 4 циклах промерзания-оттаивания, относительно инъекции в фильтрационных колоннах можно оценить в 15-20%, с 0,9 до 0,65-0,7 МПа (рис. 99).

Исследование физико-механических свойств закрепленных песчаных грунтов проводились на образцах незакрепленного грунта, а также отобранных из закрепленного массива. На диаграмме Кулона-Мора (рис. 100) приведены результаты определения прочностных характеристик для незакрепленных песчаных грунтов, отобранных в полевых условиях в нарушенном сложении. Полученные значения сцепления и угла внутреннего трения соответствуют имеющимся представлениям.



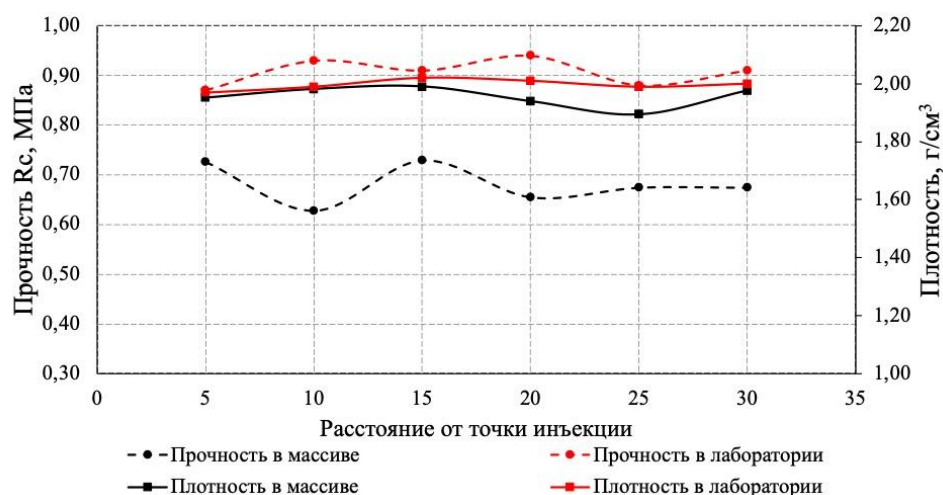


Рис. 99. График изменения прочности и плотности закрепленного песчаного грунта при удалении от точки инъекции в массиве и в лабораторных экспериментах

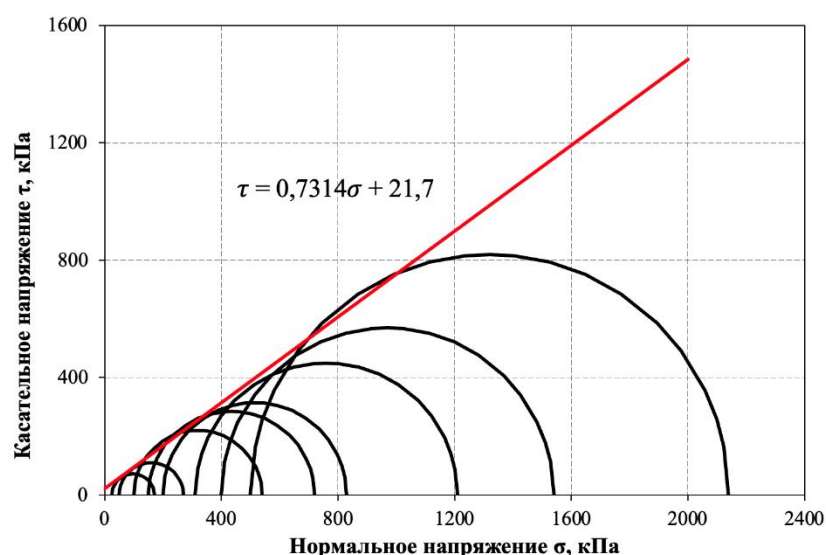


Рис. 100. Диаграммы Кулона-Мора для песчаных грунтов ( $tQ_{IV}$ )

Отбор закрепленных образцов грунта проводился из 2 зон: центральной части массива и краевой. На диаграмме Кулона-Мора (рис. 102) приведены результаты определения прочностных характеристик для образцов из краевой зоны. С учетом разброса было установлено, что значения сцепления и угла внутреннего трения сопоставимы с прочностными характеристиками незакрепленных грунтов, что говорит о том, что инъекционная обработка недоуплотненных песчаных грунтов не привела к снижению свойств грунтов в краевой зоне.

На диаграмме Кулона-Мора (рис. 102) приведены результаты определения прочностных характеристик для образцов из центральной зоны. По приведенным данным видно, что в результате закрепления сцепление увеличивается на порядок, однако, значение угла внутреннего трения снижается в 1,5 раза. Это говорит о том, что массив стал хуже «работать на сдвиг», но

данное явление может быть скомпенсировано прочностью сформированных в процессе обработки вяжущим новых структурных связей.

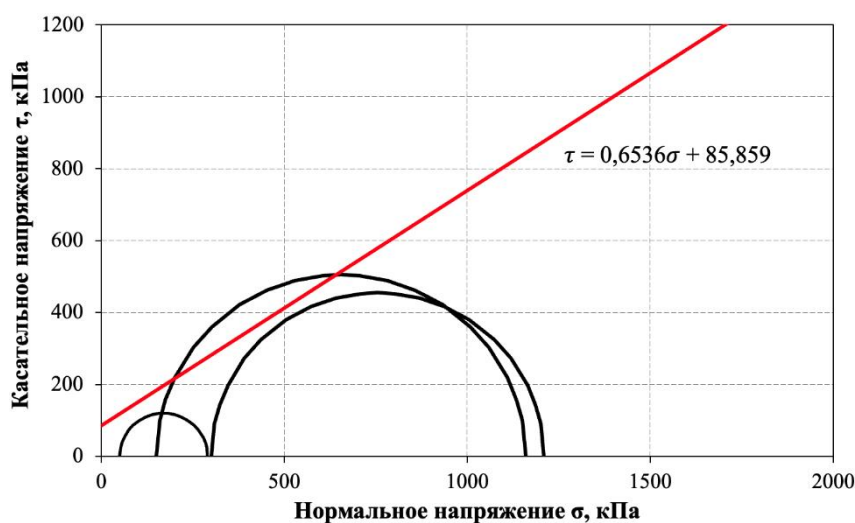


Рис. 101. Диаграмма Кулона-Мора для закрепленных песков (tQIV) (краевая часть целика)

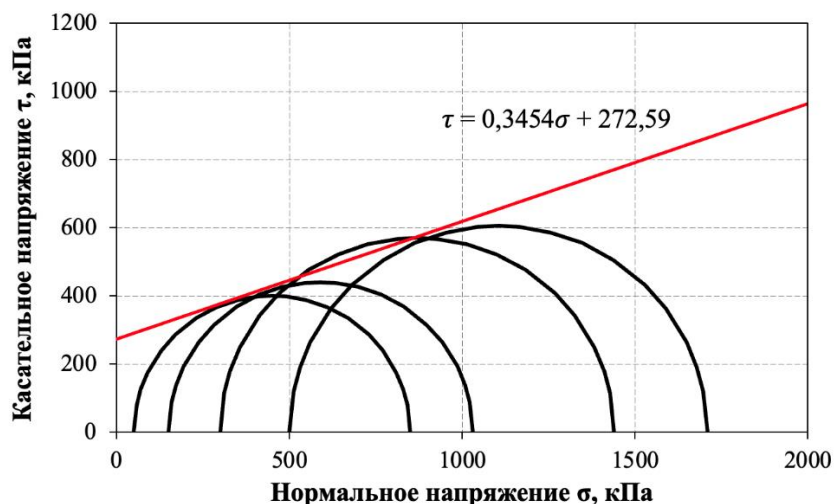


Рис. 102. Диаграмма Кулона-Мора для закрепленных песков (tQIV) (центральная часть целика)

Также были исследованы деформационные характеристики незакрепленных и закрепленных грунтов, полученные в рамках трехосных испытаний. За характерный показатель был также принят секущий модуль деформации при 50% прочности. Так, показатели модуля  $E_{50}$  для закрепленных грунтов показывают чуть большие значения, чем для незакрепленных. Учитывая разницу между значениями модулей в едином диапазоне (менее 10%), их можно считать сопоставимыми.

Анализ микростроения закрепленных песчаных грунтов с помощью растровой электронной микроскопии (рис. 103) демонстрирует сохранение структурных особенностей модифицированных грунтов. При изучении качества заполнения порового пространства также наблюдается равномерное распределение геля рабочего раствора в порах, однако можно отметить и присутствие зерен с островными рубашками вяжущего на поверхности.

На рис. 103 (б) наблюдается формирование ячеистой микроструктуры геля рабочего раствора, наиболее массивные «мостики геля» приурочены к более мелким порам. Также стоит отметить и более рыхлую структуру самого геля рабочего раствора, данный эффект объясняется промораживанием образцов в зимний период при их транспортировке.

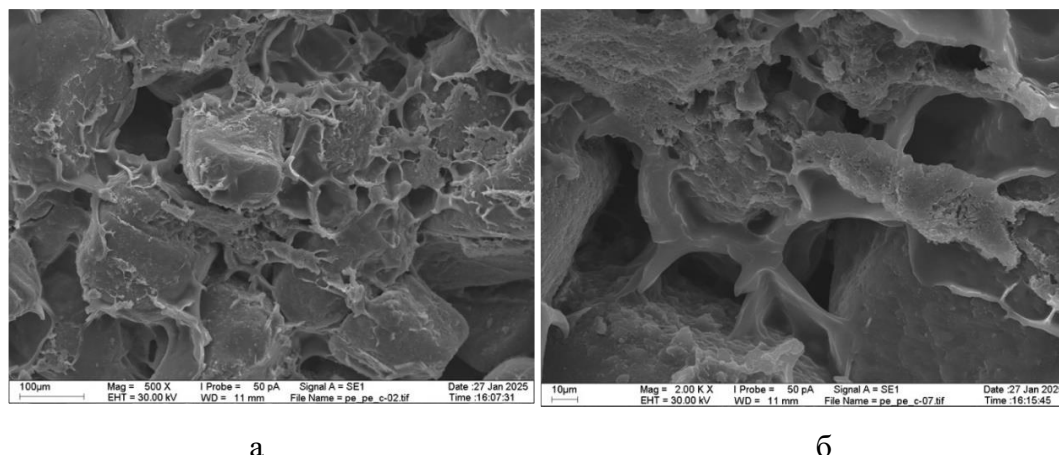


Рис. 103. Микростроение образца закрепленного песчаного грунта в центральной части закрепленного целика ячеистой микроструктуры: а – характер заполнения порового пространства между зернами, увеличение в 500 раз; б – контакт пленки сформировавшегося геля с зернами, увеличение в 2000 раз (Съемка выполнена М.С. Черновым)

Схожие прочностные и деформационные характеристики по мере удаления от точки инъекции также объясняются особенностями микростроения модифицированных грунтов, а именно его неизменностью по длине пути фильтрации (рис. 104). При удалении от точки инъекции не наблюдается изменения адгезии геля вяжущего к песчаным зернам, само строение геля рабочего раствора также остается неизменным и сохраняет ячеистую структуру.

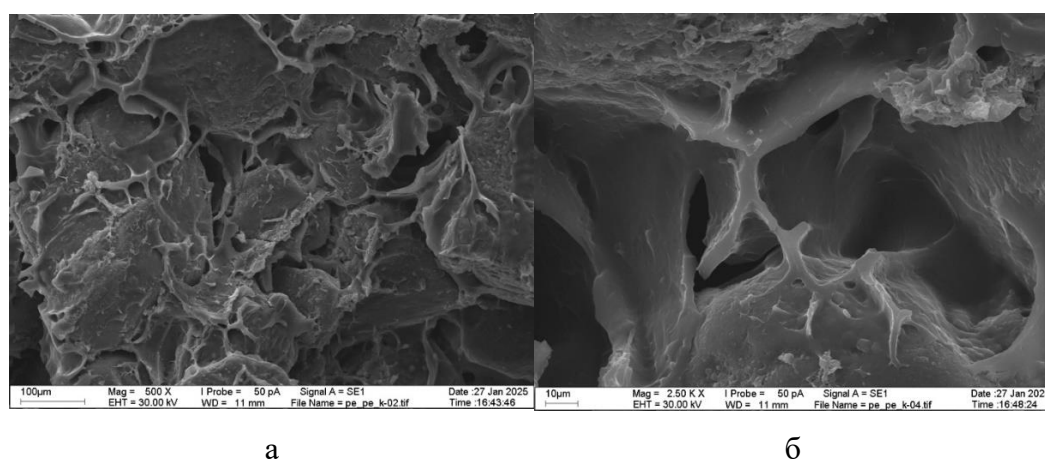


Рис. 104. Микростроение образца закрепленного песчаного грунта в центральной части закрепленного целика уплотненной ячеистой микроструктурой: а – характер заполнения порового пространства между зернами, увеличение в 500 раз; б – контакт пленки сформировавшегося геля, увеличение в 2500 раз (Съемка выполнена М.С. Черновым)



**Выводы к главе 6**

Проведение полевых исследований по инъекционной обработке песчаных грунтов методом пропитки в различных инженерно-геологических условиях, в том числе, при существенном изменении температурного диапазона проведения работ (до  $-19^{\circ}\text{C}$ ), позволило установить, что рецептура на основе алифатической эпоксидной смолы имеет широкий спектр применения в различных инженерно-геологических условиях.

Инъекционная обработка песчаных грунтов методом пропитки проводилась под низким давлением нагнетания рабочего раствора, до 0,1-0,15 МПа, с учетом низкой вязкости рабочего раствора предложенная рецептура позволяет эффективно обрабатывать даже мелко- и тонкозернистые песчаные грунты.

Время гелеобразования рабочего раствора эффективно регулируется в широком диапазоне температур.

Результаты определения прочностных свойств модифицированных грунтов в пределах эффективного радиуса закрепления свидетельствуют о высоких значениях прочности на одноосное сжатие ( $R_c > 1$  МПа). Заполнение порового пространства в пределах эффективного радиуса закрепления равномерно, остаточная пористость по всему массиву не превышает 10 %, микростроение модифицированных в полевых условиях грунтов соотносится с лабораторными аналогами. Кремнеземисто-эпоксидный инъекционный раствор позволяет добиться устойчивого снижения проницаемости песчаных грунтов, на 5 порядков, до  $1 \cdot 10^{-5}$ .

Несмотря на кажущуюся однородность массивов модифицированных песчаных грунтов следует учесть специфичность распределения свойств по его отдельным частям: приинъекторная зона, как правило, мощностью не более 15 см, подвержена некоторому разуплотнению вследствие механического воздействия при погружении инъектора; в краевой зоне – также мощностью в 10-15 см, как правило, сказываются эффекты разбавления инъекционного раствора и, возможно, неравномерности распределения его компонентов, что приводит к закономерному падению прочности. В тоже время, практика инъекционных методов позволяет учесть данные особенности распределения свойств и подразумевает использование не максимально возможного радиуса закрепления грунтов, а лишь эффективного радиуса, нивелирующего неоднородности модифицированного массива.

Проведенные полевые исследования показали высокую сходимость с результатами 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**

Согласно опыту отечественных и мировых практиков технической мелиорации, принципиальная последовательность лабораторных работ представлялась следующим образом: проведение комплексных исследований параметров инъекционного процесса, затем проведение опытных полевых работ. Нами было установлено, что результаты прочностных свойств песчаных грунтов, закрепленных в лабораторных и полевых условиях, имеют сопоставимые значения. Однако, экспериментальное внедрение вяжущего на опытных площадках является не только трудоемким, но и затратным методом апробации нового вяжущего, вследствие чего нами была рассмотрена возможность осуществления физического моделирования процесса инъекции в лабораторных условиях.

Для моделирования инъекционного закрепления песчаных грунтов методом пропитки использовался аллювиальный песок второй надпойменной террасы р. Клязьма ( $aQ_{III}^{II}$ ), 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 варьировала в пределах 3-5 см, общая высота составила 35 см, общая масса используемого песчаного грунта 135 кг. В центральную часть искусственно сформированного массива путем вдавливания погружался инъектор с перфорацией в нижней части. Верхняя часть песка перед проведением инъекции была обработана гипсом для предотвращения выпора грунта и выхода раствора в приинъекторной части (рис. 105).

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.

Инъекционная обработка проводилась методом пропитки, скорость распространения раствора контролировалась визуально. В результате общий объем закрепленного грунта составил порядка  $0,04 \text{ м}^3$  (рис. 106). За момент окончания инъекции принят выход рабочего раствора по приинъекторной области на поверхность, по достижении которого нагнетание прекращается. Установлено, что в процессе проведения единичного эксперимента удалось провести нагнетание 17,0 л рабочего раствора.

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 [63,68].



Рис. 105. Стендовая установка для физического моделирования инъекционного закрепления методом пропитки (вид сверху)

Вскрытие модели проводилось путем снятия фронтальной части конструкции, после чего незакрепленная, рыхлая часть песчаного грунта изымалась и производился анализ закрепленной его части (рис. 106). Вследствие выхода части рабочего раствора на поверхность, по приинъекторной области, сформировалась зона, мощностью 5-7 см, закрепленная путем инфильтрации рабочего раствора с поверхности после остановки эксперимента.



Рис. 106. Закрепленный методом пропитки в стендовой установке целик песчаного грунта ( $aQ_{III}^{II}$ ) (вид с фронтальной части)

Серия экспериментов показала, что закрепленный массив, как правило, представлял собой усеченную трапециевидную призму с четко выраженной краевой зоной (граница между незакрепленным и закрепленным грунтом). Проведенные испытания показали, что для

формирования «бочкообразного» целика грунта следует использовать меньший объем рабочего раствора (до 5-7 л), что позволит добиться равномерного распределения вяжущего в равном удалении от точки инъекции [63,68].

Влажность является одной из наиболее простых в определении, и в тоже время, достаточно показательной характеристикой закрепленного грунтового массива, при работе с инъекционными растворами на водной основе.

Поскольку формирующийся гель в структурированном состоянии на  $\frac{3}{4}$  состоит из молекул воды, то с учетом водоотдачи влажность выступает как интегральная характеристика, позволяющая оценить степень заполнения порового пространства закрепляемого грунта, от чего, в свою очередь, зависит плотность закрепленного песка и прочность в случае закрепления воздушно-сухого песчаного грунта.

На рис. 107 показано, что распределение влажности в исследуемой горизонтальной плоскости практически не изменяется, выделяется лишь контактная зона, в которой наблюдается некоторое снижение влажности до 8-9%, относительно остального массива модифицированного грунта (в среднем 13%).

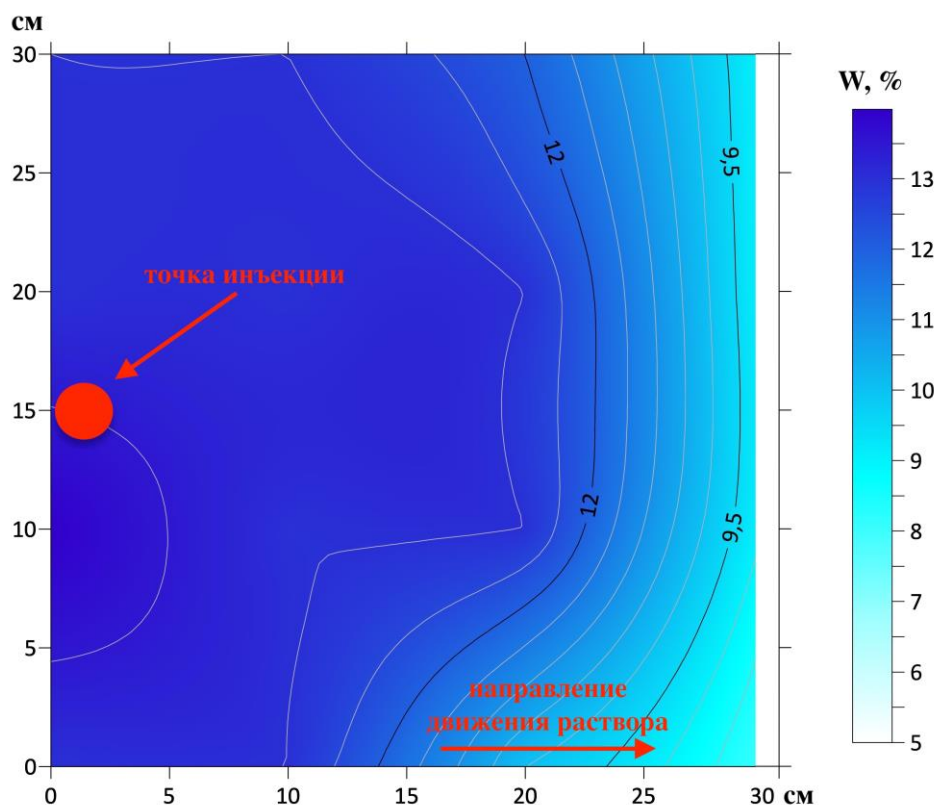


Рис. 107. Распределение влажности (%) в центральной плоскости закрепленного массива по мере удаления от точки инъекционного закрепления (воздушно-влажные условия закрепления)

По полученным данным, распределение в массиве прочности на одноосное сжатие изменяется в пределах от 1,1 до 1,4 МПа (рис. 108). Значения прочности не демонстрируют

закономерного снижения по длине пути фильтрации, что зачастую встречается при работе с инъекционными колоннами. Данный эффект объясняется использованием крайне низкого давления инъекции (не более 50 кПа), а также возможностью сохранения стабильности раствора, вследствие чего не наблюдается неравномерного осаждения компонентов вяжущего на песчаных зернах.

Распределение значений плотности в закреплённом массиве грунта (рис. 110) закономерно соответствует распределению прочности. Стоит учесть, что как изменение плотности сложения песчаных грунтов, так и изменение прочностных свойств модифицированного песчаного грунта обусловлены качеством трамбовки песка при его загрузке в ёмкость для физического моделирования. Эффективность заполнения порового пространства и формирование ячеистой или массивной микроструктуры геля вяжущего определяются размером отдельных пор, зависящих от заданной плотности сложения при проведении испытаний.

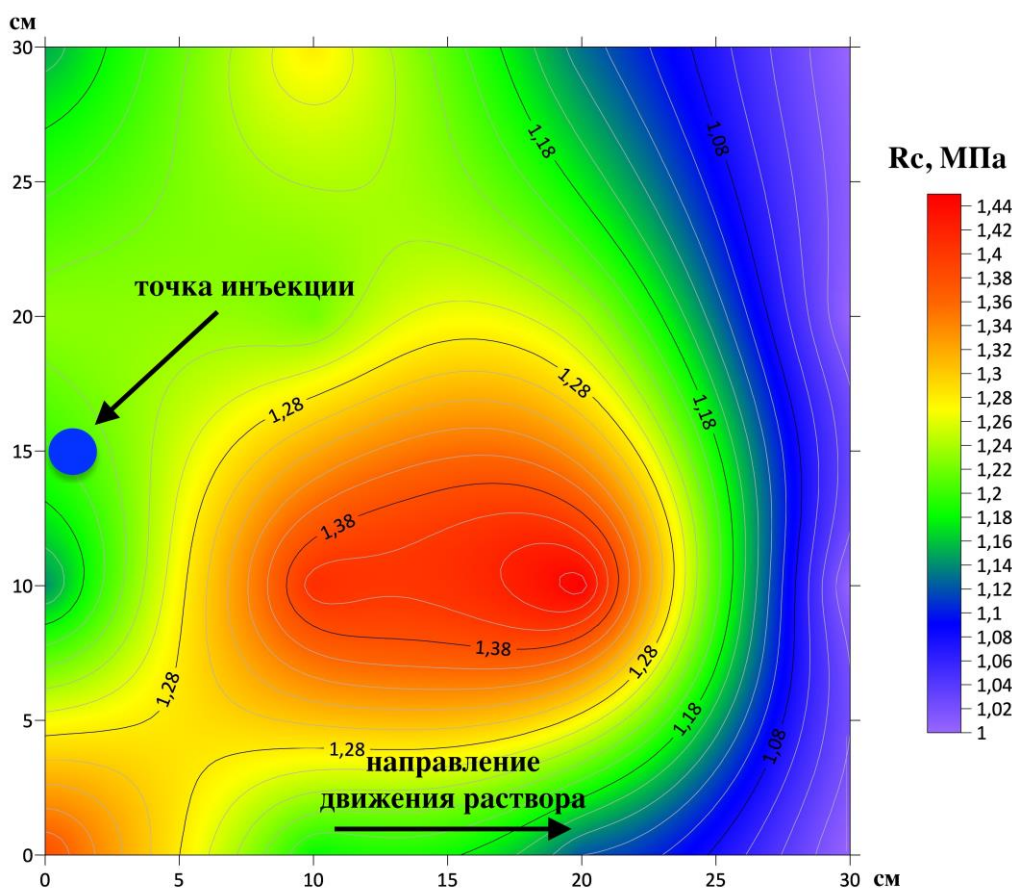


Рис. 108. Распределение прочности (МПа) в центральной плоскости закреплённого массива по мере удаления от точки инъекционного закрепления (воздушно-влажные условия закрепления)

Анализ микростроения порового пространства (рис. 109) лишь подтверждает правомерность использования результатов закрепления грунтов в инъекционных колоннах, о чем говорит схожесть как в самом качестве заполнения порового пространства, так и в распределении вяжущего по поверхности песчаных зерен.

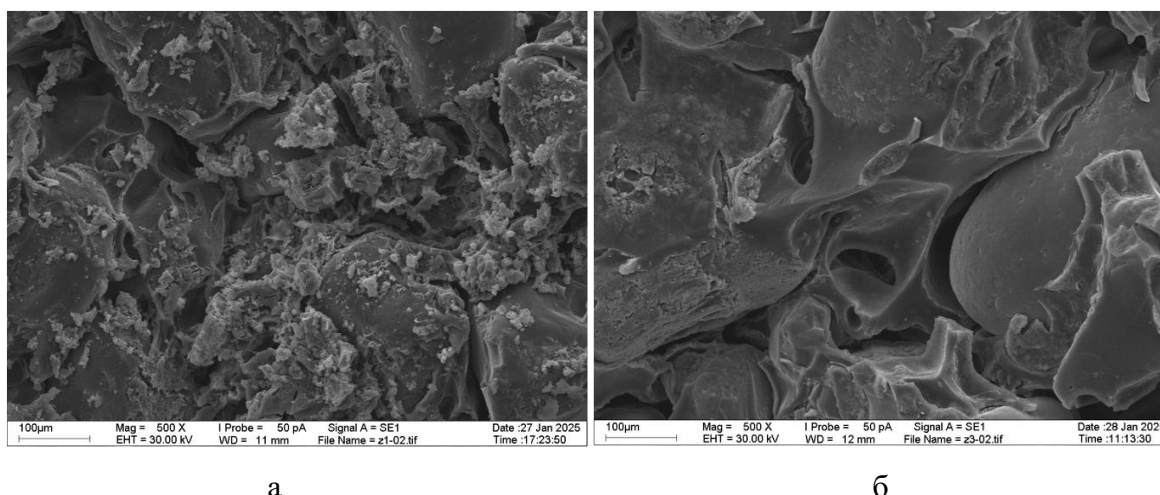


Рис. 109. Микроструктура образца закрепленного песчаного грунта в стенде: а – характер заполнения порового пространства в приинъекторной зоне, увеличение 500\*; б – характер заполнения порового пространства в краевой части, увеличение 500\* (Съемка выполнена М.С. Черновым)

Для качественной оценки фильтрационных характеристик нами были исследованы образцы по радиусу закрепления из трех зон модифицированного целика грунта. Фильтрационное испытание произведено на установке, устроенной по принципу, изложенному в ГОСТ 12730.5–2018 [107,108].

В качестве раствора для фильтрации использована водопроводная вода с минерализацией 146 мг/л и рН 7,8. В течение 70 суток образцы подвергались фильтрации при различном градиенте напора, при этом для трех образцов давление на входе в них одинаково [109].

Установлено, что качественное равномерное заполнение порового пространства кремнеземисто-эпоксидным вяжущим значительно снижает проницаемость модифицированных образцов, что более важно, изменение  $K_f$  по радиусу инъекционного закрепления незначительно, и изменяется от  $3.6 \cdot 10^{-5}$  в приинъекторной части массива, до  $2.7 \cdot 10^{-5}$  в краевой части модифицированного целика грунта. Согласно полученным результатам, можно сделать вывод о том, что заполнение порового пространства раствором на основе алифатической эпоксидной смолы по объему всего стенда происходит равномерно.



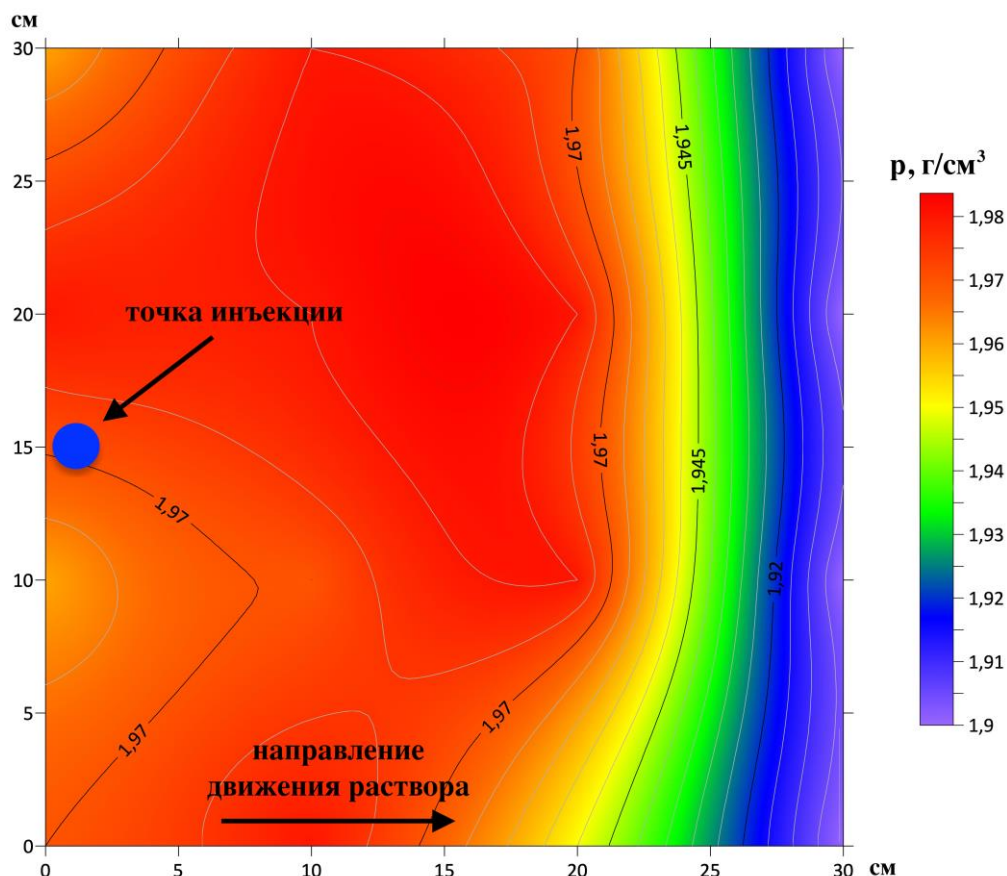


Рис. 110. Распределение плотности ( $\text{г/см}^3$ ) в центральной плоскости закрепленного массива по мере удаления от точки инъекционного закрепления (воздушно-влажные условия закрепления)

Как показали результаты полевых исследований, расстояние распространения рабочего раствора в пределах физической модели недостаточно для отслеживания эффекта расслоения вяжущего и неравномерного оседания его компонентов в поровом пространстве, что дает возможность сделать вывод о том, что распределение свойств внутри модифицированного целика грунтов изменяется хаотически.

По результатам испытаний было установлено, что вдоль радиуса закрепления воздушно-сухих песчаных грунтов прослеживаются 4 зоны:

- Приинъекторная (5-10 см) – зона максимального воздействия напора рабочего раствора, вследствие которого может наблюдаться вынос пылевой и глинистой фракции, а также некоторое разуплотнение песчаного грунта на контакте с перфорированной частью инъектора;
- Центральная часть массива, в которой гель имеет однородную структуру;
- Краевая зона (до 10 см), где наблюдается снижение прочностных свойств, обусловленное расслоением раствора (незначительно снижается концентрация коллоидного кремнезема);

- Контактная зона (около 10 см) на границе закрепленного массива, для которой характерно низкое содержание вяжущих, следовательно, отсутствие гелеобразующего вещества и эффекта закрепления.

Исследование физико-механических свойств закрепленных песчаных грунтов проводилось на образцах, хранившихся в воздушно-влажных условиях. Закрепленные грунты отбирались из двух зон: приинъекторной и центральной части, общей длиной 25-30 см. На диаграмме Кулона-Мора (рис. 111) приведены результаты определения прочностных характеристик для образцов из инъекторной зоны. Большой разброс значений указывает на неоднородность закрепления в данной зоне и не позволяет достоверно определить значения сцепления и угла внутреннего трения, однако стоит отметить, что для всех испытаний характерно высокие значения девиатора в момент разрушения ( $>0,5$  МПа).

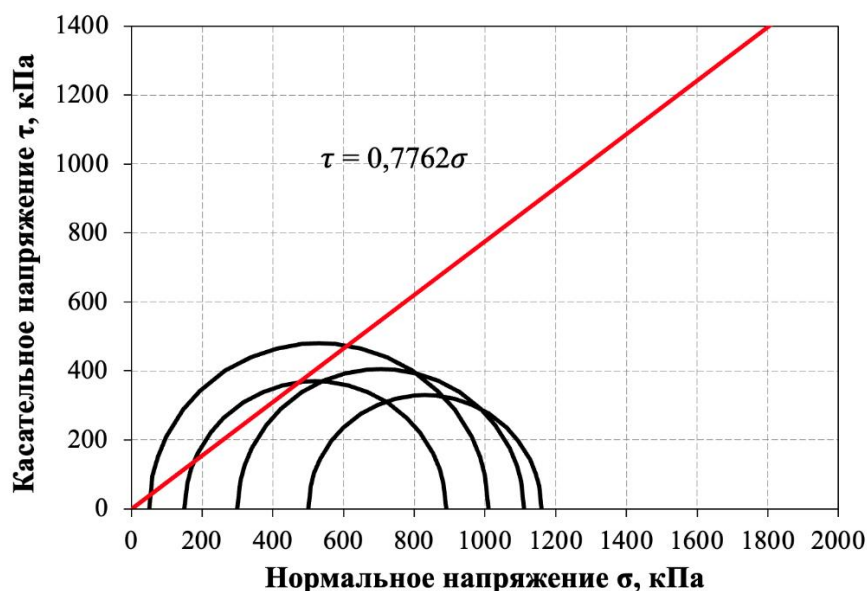


Рис. 111. Диаграмма Кулона-Мора для закрепленного в стенде воздушно-сухого песчаного грунта (приинъекторная часть)

На диаграмме Кулона-Мора (рис. 112) приведены результаты определения прочностных характеристик для образцов из центральной зоны. По приведенным данным видно, что в результате закрепления на порядок увеличивается сцепление, однако значение угла внутреннего трения падает в 1,5 раза, что согласуется с результатами, приведенными в работе ранее.

Также был проведен анализ графиков трехосного сжатия (девиатор напряжений от относительной деформации) незакрепленного грунта, закрепленного в массиве и закрепленного в модели (рис. 113). Самую высокую прочность показывают образцы, закрепленные в модели, однако, они же обладают наихудшими значениями секущего модуля деформаций  $E_{50}$ . Это связано с тем, что грунт в стенде обладал меньшей плотностью, соответственно, в полученной



системе грунт-гель процентное соотношение геля было выше, а он в свою очередь лучше сжимается, чем грунт.

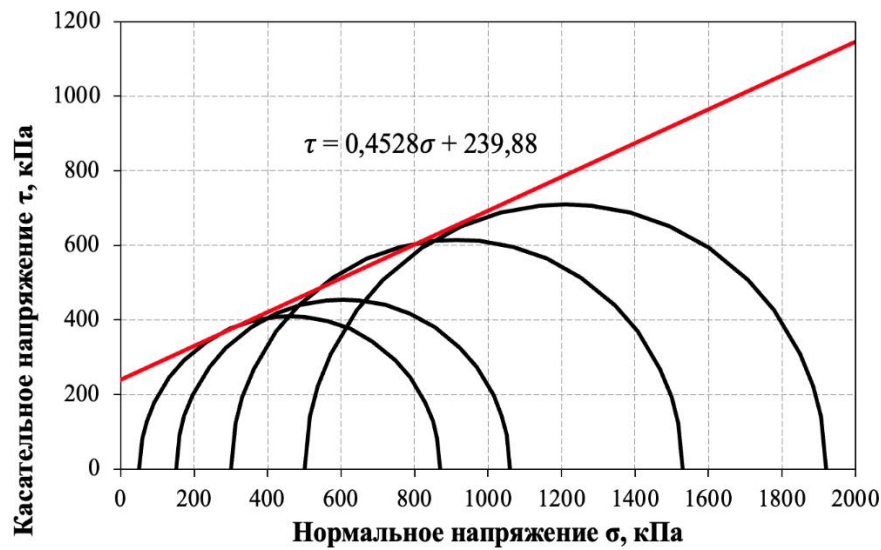


Рис. 112. Диаграмма Кулона-Мора для закрепленного в стенде воздушно-сухого песчаного грунта в (центральная часть)

Данная закономерность также находит отображение и в значениях деформационных характеристик незакрепленных в модели грунтов, полученных в рамках трехосных испытаний. За характерный показатель был также принят секущий модуль деформации при 50% прочности. Так, показатели модуля  $E_{50}$  для закрепленных грунтов сильно ниже в сравнении с незакрепленным песчаным грунтом.

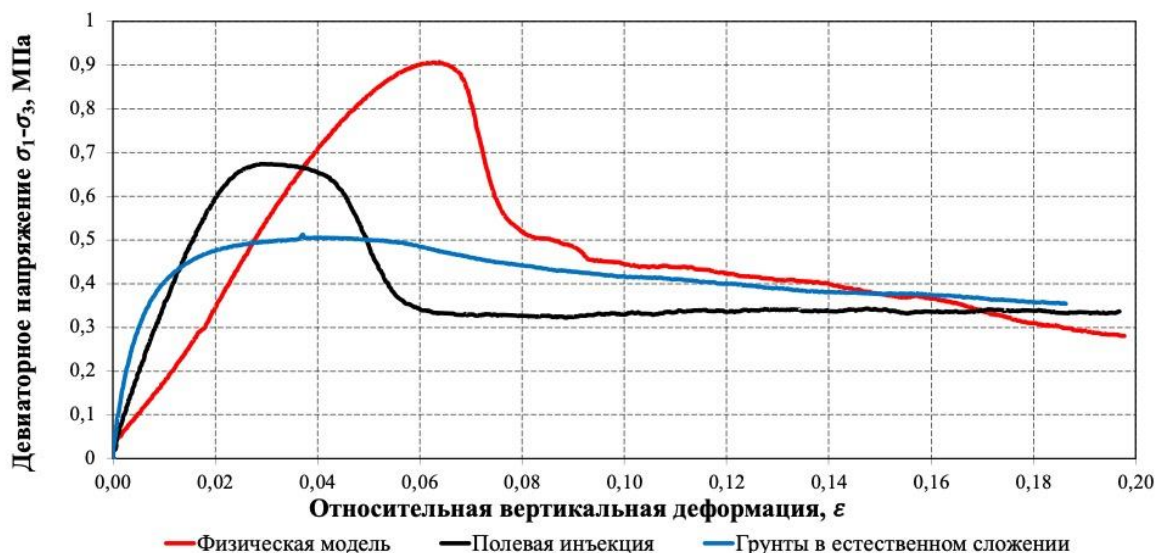


Рис. 113. Зависимость девиаторного напряжения от относительной деформации по результатам трехосных испытаний песчаных грунтов при  $\sigma_3=0,15$  МПа

Проведение экспериментов по закреплению водонасыщенных песчаных грунтов проводилось в точном соответствии с методикой предыдущих исследований. Перед началом

инъекционной обработки песчаного грунта к модели подключалась серия вводных и выводных шлангов, поровое пространство заполнялось водой, контроль за равномерностью пропитки проводился через лицевую сторону модели. После полного водонасыщения песчаного массива проводилась подсыпка сухого песка на высоту 5 см, затем сверху укладывались деревянные бруски с дополнительным пригрузом гирями в 100 кг. Сооружение гипсового замка, в условиях полного водонасыщения песчаных грунтов не представляется эффективным, вследствие чего было принято решение по созданию дополнительной пригрузки, имитирующей наличие естественной грунтовой толщи выше зоны инъекции.

В процессе инъекционного закрепления вводы и выводы были открыты для постепенного удаления отжимающейся воды из порового пространства. В процессе подачи рабочего раствора фиксировалось повышенное отжатие свободной воды (до 100 мл/мин.) на один вывод соответственно.

Для более точного понимания характера распространения рабочего раствора в водонасыщенном песке инъекционный раствор был подкрашен ярким красителем, не влияющим на свойства раствора. Подача вяжущего была остановлена при появлении красителя на поверхности песчаного грунта.

Закрепленный массив выдерживался в условиях водонасыщения на протяжении 28 суток, после чего производился спуск свободной воды через специальные выводные отверстия и проводился разбор физической модели (рис. 114): снятие лицевой стенки, удаление незакрепленного песка по периферии и отбор проб для последующих испытаний.



а

б

Рис. 114. Внешний вид закрепленного в водонасыщенных условиях целика грунта; а – после вскрытия модели, б – после удаления незакрепленного грунта

Основное внимание в данном эксперименте направлено на выявление влияния эффекта разбавления рабочего раствора на прочностные и фильтрационные свойства модифицированных песчаных грунтов.

По результатам определения влажности в закреплённом массиве можно сделать вывод, что главное отличие по сравнению с процессом закрепления воздушно-сухих грунтов состоит в изменении контактной зоны закреплённого и незакреплённого грунта. Вследствие хранения закреплённого целика песчаного грунта в водонасыщенных условиях не удастся провести качественное определение состава органической компоненты (эпоксидной смолы с отвердителем) в краевой зоне, что позволило бы определить границу распространения раствора, даже если он не придаст прочности грунту. Вследствие этого основным показателем граничной зоны закреплённый/незакреплённый грунт служат значения влажности и прочности модифицированных грунтов.

Под контактной зоной в данном случае понимается граница закреплённого и водонасыщенного грунта, где не наблюдается эффект закрепления, однако визуально прослеживается наличие красителя рабочего раствора. Влажность в данной зоне повышенная, до 26%. Стоит отметить, что пробы на влажность были отобраны после спуска воды из физической модели, вследствие чего невозможно более точно определить влажность песчаных грунтов, однако степень влажности в процессе проведения эксперимента была равна 1.

Краевая часть массива представляет зону со слабо прослеживающимися прочностными свойствами. Особенностью данной зоны служит ее повышенная влажность, наличие эффекта некоторой «цементации» порового пространства рабочим раствором, однако, прочностные свойства грунта в этой области не соотносятся со значениями самого целика грунта, что не позволяет провести отбор образцов. Мощность данной зоны не превышает 1-2 см. Первые две зоны не приобрели значительной прочности, к тому же, являются незначительными по своей мощности, вследствие чего, в дальнейшем не участвовали в опробовании массива на прочность [68].

Сам целик грунта, без учета краевой и контактной зоны, обладает слегка завышенными значениями влажности (до 15-17%), что свидетельствует о некотором эффекте разбавления вяжущего в поровом пространстве, что незначительно сказывается и на прочностных свойствах закреплённых грунтов (рис. 115,116).

Прочностные свойства (рис. 116) закреплённых водонасыщенных песков не имеют существенных отличий от результатов инъекционной обработки воздушно-сухих грунтов. Минимальные значения прочности составляют порядка 0,9 МПа. Данные значения прочности относятся к приинъекторной зоне, в которой, очевидно, наблюдается процесс разуплотнения грунтов в момент извлечения инъектора.

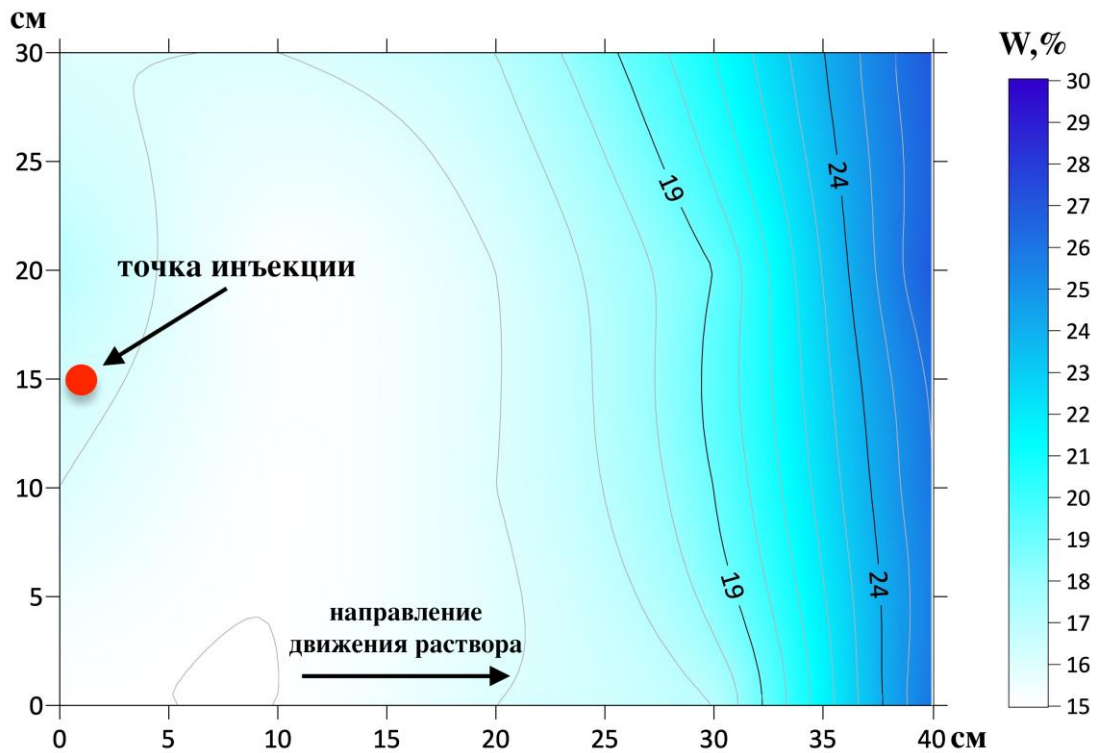


Рис. 115. Распределение влажности в центральной плоскости закрепленного массива (%) по мере удаления от точки инъекционного закрепления (водонасыщенные условия закрепления)

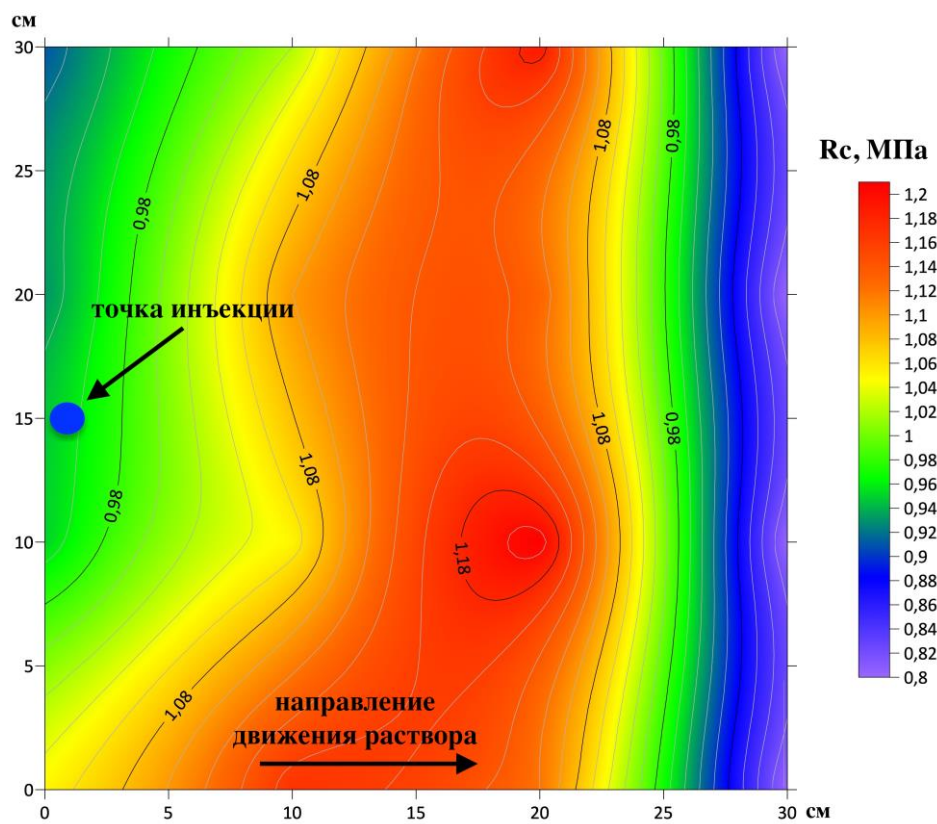


Рис. 116. Распределение прочности в центральной плоскости закрепленного массива (МПа) по мере удаления от точки инъекционного закрепления (водонасыщенные условия закрепления)



Значения плотности (рис. 117) закрепленных песчаных грунтов не имеют существенных изменений, погрешность изменения значений плотности закрепленных песчаных грунтов связана, в основном, с качеством трамбовки при подготовке физической модели к эксперименту и пробоотбором.

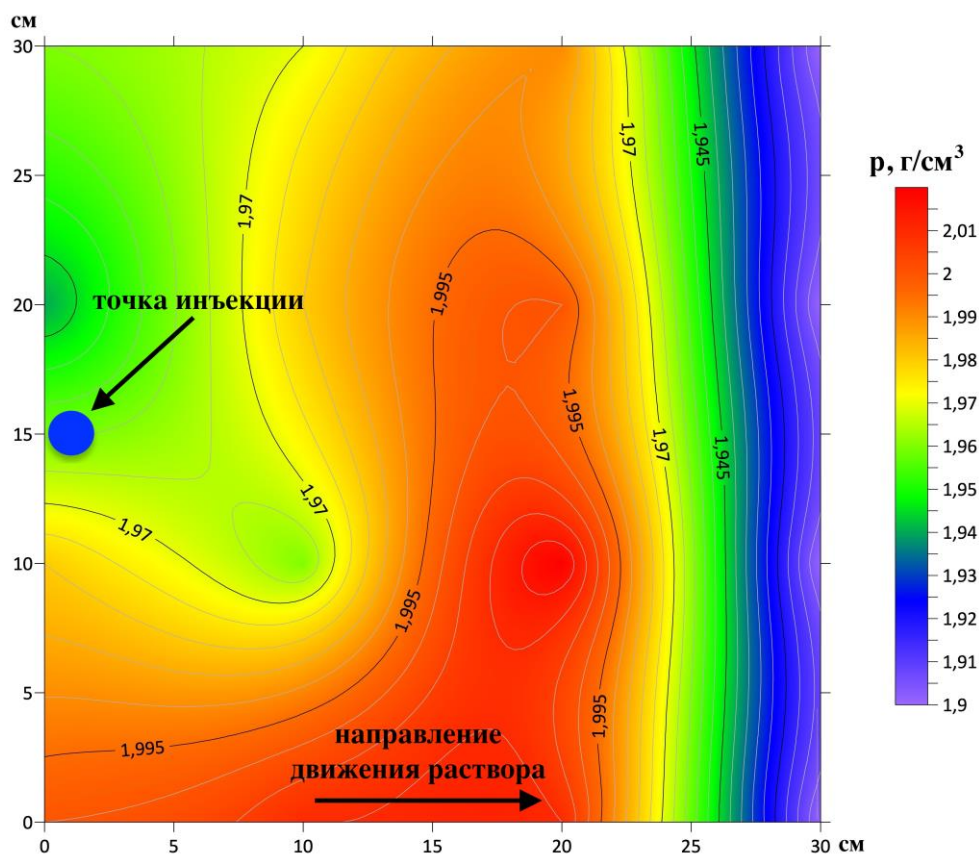


Рис. 117. Распределение плотности в центральной плоскости закрепленного массива ( $\text{г/см}^3$ ) по мере удаления от точки инъекционного закрепления (водонасыщенные условия закрепления)

Результаты закрепления водонасыщенных песчаных грунтов в стендовой установке показали, что разбавление рабочего раствора в процессе нагнетания и пропитки обрабатываемого массива незначительно, что говорит об эффективности его применения ниже уровня грунтовых вод. Активное вытеснение воды инъекционным раствором связано с низкими значениями поверхностного натяжения и угла краевого смачивания, характерными для этого раствора, вследствие чего данный состав попросту «отжимает» свободную воду из порового пространства дисперсных грунтов.

### Выводы к главе 7

Опыт создания и использования в отечественной практике инъекционных работ физического моделирования процесса инъекционной обработки грунтов является сравнительно новым, однако, выгодно отличается на фоне дорогостоящих полевых инъекционных работ, прежде всего с точки зрения экономических затрат.

Полученный объем данных позволяет утверждать о сопоставимости качества заполнения порового пространства, остаточной свободной пористости (менее 10%), и особенностях микростроения модифицированных грунтов, обработанных как разными способами в лабораторных условиях, так и в натурном эксперименте.

Полученные данные о распределении прочностных свойств закрепленных песков, вне зависимости от условий проведения испытаний (воздушно-сухие и водонасыщенные условия), позволили выделить основные зоны модифицированных грунтов, соотносящиеся с результатами полевых исследований:

- Приинъекторная (5-10 см) - частичного разуплотнения грунтов, сопровождающаяся некоторым падением прочности (до 20%);
- Центральная часть массива - гель имеет однородную (гомогенную структуру) и позволяет достичь максимальных значений прочности;
- Краевая зона (до 10 см) - характеризуется падением прочностных свойств песков, обусловленным разбавлением и частичным расслоением рабочего раствора;
- Контактная зона, до 5 см (при водонасыщенных условиях закрепления около 10 см) – фиксируется наличие неполимеризованной эпоксидной смолы, что не приводит к изменению прочности грунта.

Таким образом, на защиту выносится (четвертое защищаемое положение): **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 инъецируемости грунтов, радиус их эффективного закрепления, а также исходные параметры рабочего раствора и технологического процесса.**

## Заключение

Проведенный анализ современного состояния инъекционной обработки дисперсных грунтов с низкими коэффициентами фильтрации ( $< 2\text{--}5$  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 (1,2 сП) 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 3-х лет показала, что применение раствора на основе эпоксидной алифатической смолы позволяет достичь стабильных значений прочности закрепленных песков – от 1 МПа и выше. При учете всех неоспоримых преимуществ использования предложенного раствора, инъекционную обработку водонасыщенных песчаных грунтов наиболее эффективно проводить для достижения стабильного и эффективного тампонажного эффекта грунтов. При взаимодействии с грунтами различного гранулометрического состава, достигается существенный эффект снижения проницаемости (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 учете 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 модифицированного массива песчаных грунтов, вследствие чего модифицированный массив, как правило, имеет следующее строение:

- инъекторная 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 полученными результатами исследования физико-механических свойств, а также наличием более качественных и многочисленных контактов цементационного и мостикового типа между песчаными зернами, наблюдаемых при исследовании микростроения модифицированных грунтов;
- краевая зона, как правило, наиболее подверженную эффекту 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 лишний раз 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 состава, 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, что объясняется изменением структуры геля в поровом пространстве модифицированных песчаных грунтов.



Исследование влияния минерального состава показало, что увеличение содержания кварца в составе песчаного грунта приводит к некоторому снижению прочностных свойств, 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, содержание солей в пределах первых процентов приводит к существенному падению прочности закрепленных песчаных грунтов.

Предложенная автором инъекционная рецептура на основе кремнеземисто-эпоксидного вяжущего показала свой потенциал использования в строительной практике для улучшения свойств грунтов оснований сооружений.

## Список литературы

1. Абрамова Т. Т., Воронкевич С. Д. Состав для закрепления грунта: авторское свидетельство № 2617439/29-33: заявл. 18.05.1978: опубл. 30.11.1979, Бюл. № 44. – М.: Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, 1979.
2. Адамович А.Н. Закрепление грунтов и противofiltrационные завесы в гидроэнергетическом строительстве/ А.Н. Адамович. – М.: Энергия, 1980. – 319 с.
3. Адамсон А. Физическая химия поверхностей/ Пер. с англ. И.Г. Абидора; Под ред. З.М. Зорина, В.М. Муллера ; С предисл. Б.В. Дерягина – М.: Мир, 1979. 568 с.
4. Айлер Р.К. Химия кремнезема: растворимость, полимеризация, коллоидные и поверхностные свойства, биохимия: в 2 частях / Р. Айлер ; пер. с англ. Л. Т. Журавлева, под ред. В. П. Прянишникова. – М.: Мир, 1982 - Ч.1. - 1982. - 416 с.
5. Айлер Р.К. Химия кремнезема : растворимость, полимеризация, коллоидные и поверхностные свойства, биохимия : в 2 частях / Р. Айлер ; пер. с англ. Л. Т. Журавлева, под ред. В. П. Прянишникова. – М.: Мир, 1982. - Ч. 2. - 1982. - 712 с.
6. Аскалонов В. В. Классификация способов закрепления грунтов // Труды совещания по теоретическим основам технической мелиорации грунтов. – М.: Изд-во МГУ, 1961. – с. 41-44.
7. Аскалонов В. В., Вайсфельд Г. Б. Золи и гели  $\text{SiO}_2$  и их применение для закрепления грунтов //Почвоведение. – 1943. – №. 4-5. – С. 41-53.
8. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв: Учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности "Агрохимия и почвоведение" / Е.В. Аринушкина. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1970. - 487 с.
9. Банник Г.И. Основы технической мелиорации грунтов. - Киев: Вища школа, 1972. - 272 с
10. Банник Г.И. Техническая мелиорация грунтов. - Киев: Вища школа, 1976. - 303 с
11. Блескина Н.А., Глубинное закрепление грунтов синтетическими смолами / Н. А. Блескина, Б. С. Федоров. - Москва : Стройиздат, 1980. - 147 с.
12. Булах А.Г. Минералогия: учебник для студ. учреждений высш. проф. образования – М.: Академия, 2011. – 278 с.
13. Волженский А.В. Минеральные вяжущие вещества: Технология и свойства/ А.В. Волженский, Ю.С. Буров, В.С. Колокольников; Под ред. А.В. Волженского. - Москва: Стройиздат, 1979. - 476 с.
14. Воробьева Л.А Химический анализ почв: Учеб. для студентов вузов, обучающихся по направлению и спец. "Почвоведение"/ Л. А. Воробьева. - Москва: Изд-во Моск. ун-та, 1998. - 271 с.

15. Воронкевич С.Д. Инженерная геохимия с основами геохимии техногенеза. / С.Д. Воронкевич. - Москва : Геомаркетинг, 2011, 480 с.
16. Воронкевич С.Д. Основы технической мелиорации грунтов / С. Д. Воронкевич; Моск. гос. ун-т им. М. В. Ломоносова. - Москва: Науч. мир, 2005. - 498 с.
17. Воронкевич С.Д. Техническая мелиорация грунтов / С. Д. Воронкевич. - М.: Издательство «Академическая наука», 2015. - 244 с.
18. Воронкевич С. Д., Огородникова Е. Н. Исследование упрочнения песков карбамидными смолами // Вопросы инженерной геологии и грунтоведения. Сборник статей, посвященный 30-летию кафедры грунтоведения и инженерной геологии. – М.: Изд-во МГУ, 1968.
19. Воронкевич С.Д., Евдакимова Л.А., Ларионова Н.А., Сергеев В.И. Опыт применения инъекционного раствора на основе эпоксидной смолы для уплотнения скальных осадочных пород в районе створа Рогунской ГЭС // Гидротехническое строительство. - 1981 - № 10. - С. 15-18.
20. Воронкевич С. Д., Евдокимова Л. А. Тампонажный раствор: авторское свидетельство № 387085 СССР : № 1694056/29-14 : заявл. 11.08.1971 : опубл. 21.06.1973, Бюл. № 27. – М. : Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, 1973.
21. Воронкевич С. Д., Евдокимова Л. А., Ларионова Н. А. Состав для глубинного закрепления грунта : авторское свидетельство № 1986304/33 : заявл. 04.01.1974 : опубл. 25.07.1976, Бюл. № 27. – М. : Московский ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени государственный университет им. М. В. Ломоносова, 1976.
22. Воронкевич С. Д., Евдокимова Л. А., Емельянов С. Н., Ларионова Н. Л., Сергеев В. И. Состав для закрепления грунта : авторское свидетельство № 2888555/29-33 : заявл. 25.02.1980 : опубл. 15.12.1981, Бюл. № 46. – М. : Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, 1981.
23. Воронкевич С.Д., Евдокимова Л.А. Газовая силикатизация песчаных пород. / С.Д. Воронкевич, Л. А. Евдокимова. - М.: Изд-во МГУ, 1974 – 150 с.
24. Гедройц К.К. Химический анализ почв / К. К. Гедройц. - 3-е изд. - Москва ; Ленинград : Гос. изд-во сел.-хоз. и колхоз. кооп. лит-ры, 1932. - 535 с
25. Голоднов В.М. Влияние процесса сорбции на инъекционное закрепление песчаных пород силикатными растворами: дис. канд. геол.- мин- наук / Голоднов Владимир Михайлович - М., 1977 – 189 с.
26. ГОСТ 12248-2010 Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. – М.: Стандартинформ, 2011 – 77 с.

27. ГОСТ 12536-2014 Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. – М.: Стандартиформ, 2015 – 18 с.
28. ГОСТ 13078-81 Стекло натриевое жидкое. Технические условия. – М.: Стандартиформ, 2005 – 13 с.
29. ГОСТ 22733-2016. Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности. – М.: Стандартиформ, 2016. – 11 с.
30. ГОСТ 23740-2016. Грунты. Методы определения содержания органических веществ. – М.: Стандартиформ, 2017. – 9 с.
31. ГОСТ 25100–2020. Грунты. Классификация. – М.: Стандартиформ, 2020. – 37 с.
32. ГОСТ 25584-2016. Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации. – М.: Стандартиформ, 2016. – 18 с.
33. ГОСТ 26423–85 Почвы. Методы определения катионно-анионного состава водной вытяжки. – М.: Стандартиформ, 2011. – 4 с.
34. ГОСТ 26483–85. Почвы. Приготовление солевой вытяжки и определение ее pH по методу ЦИНАО. – М., Изд-во стандартов, 1985. 4 с.
35. ГОСТ 28674-2014. Защита от коррозии в строительстве. Конструкции бетонные и железобетонные. Методы испытаний адгезии защитных покрытий. М.: Стандартиформ, 2015 – 16 с. (МБ ГОСТ 28574-2014. Защита от коррозии в строительстве. Конструкции бетонные и железобетонные. Методы испытаний адгезии защитных покрытий. М.: Стандартиформ, 2014 – 11 с.)
36. ГОСТ 31149-2014. Материалы лакокрасочные. Определение адгезии методом решетчатого надреза. - М.: Стандартиформ, 2014 – 11 с.
37. ГОСТ 33-2000. Нефтепродукты. Прозрачные и непрозрачные жидкости. Определение кинематической вязкости и расчет динамической вязкости. - М.: Стандартиформ, 2002 – 23 с.
38. ГОСТ 5180-2015 Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. - М.: Стандартиформ, 2016 – 19 с.
39. Грунтоведение: учеб. для студентов вузов, обучающихся по геол. специальностям / В.Т. Трофимов [и др.]; под ред. В. Т. Трофимова. - 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Из-во Моск. ун-та : Наука, 2005. - 1023 с
40. Горшков В.С. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ [Учеб. пособие для хим.-технол. спец. вузов] / В.С. Горшков, В.В. Тимашев, В.Г. Савельев. — М.: Высш. школа, 1981. — 334 с.

41. Дмитриев Е.А. Математическая статистика в почвоведении / Е. А. Дмитриев, науч. ред. Ю.Н. Благовещенский. - Изд. 3-е, испр. и доп. – М.: Книжный дом «Либроком», 2008. – 326 с.
42. Евдокимова Л.А. К вопросу поверхностного взаимодействия песчаных грунтов при цементации и силикатизации // Материалы к VI всесоюзному совещанию по закреплению и уплотнению грунтов - Москва, 1968. - с.371-374.
43. Ефимов Н. Н. и др. Применение коллоидного кремнезема для изоляции водопритоков при ремонте низкопроницаемых интервалов скважин // Труды Российского государственного университета нефти и газа имени ИМ Губкина. – 2017. – №. 4. – С. 55-67.
44. Ибрагимов М.Н. Закрепление грунтов инъекцией цементных растворов / М. Н. Ибрагимов, В. В. Семкин. — Москва : Изд-во АСВ, 2012. — 254 с.
45. Инженерная геология России. Том 1. Грунты России./ Под ред. В.Т. Трофимова, Е.А. Вознесенского, В.А. Королева. – М.: КДУ, 2011. – 672 с.
46. Инженерно-геологическое и эколого-геологическое изучение песков и песчаных массивов // Труды Международной научной конференции (27-28 сентября 2018 г., МГУ, Москва, Россия) / под редакцией В.Т. Трофимова и В.А. Королева. – М., ООО «СамПринт», 2018, 283 с.
47. Камбефор А. Инъекция грунтов: Принципы и методы / Пер. с фр. Р. Е. Казаковой и В.Б. Хейфеца. - Москва: Энергия, 1971. - 333 с.
48. Колганова М. Д., Абакумова Н. В., Пензев А. П. Золоотвалы ТЭЦ г. Москвы и инженерно-геологические особенности зол // Гидрогеологические, инженерно-геологические и геоэкологические исследования: материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Воронеж: ООО Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2024. – С. 68–71.
49. Климчук И.В., Маланченко В.М., Ермаков А.Ю. Применение полимерных смол на шахтах Кузбасса // Горная промышленность. 2009. № 2. С. 19-21.
50. Кузнецова Т.В., Кудряшов И.В., Тимашев В.В. Физическая химия вяжущих материалов: Учебник для хим. -технол. спец. вузов. – М.: Высш. шк., 1989. – 384 с.: ил.
51. Лабораторные работы по грунтоведению. Учеб. Пособие /В.А. Королев, Е.Н. Самарин, С.К. Николаева и др.; Под ред. В.Т. Трофимова и В.А. Королева. – М.: Высш. Шк., 2008 – 519 с.
52. Ларионова Н.А. Влияние поверхностных пленок на песчаных грунтах при их укреплении органическими и неорганическими вяжущими // Материалы Всероссийской научно-практической конференции "Проблемы технической мелиорации грунтов оснований зданий и сооружений" - Уфа, 2016 - с. 87-92.

53. Ларионова Н.А. Влияние поверхностных пленок на эффективность укрепления песчаных грунтов неорганическими вяжущими. // Инженерная геология –2022. – Т.27. - №1. - с. 20-32.
54. Ларионова Н.А. Влияние химико-минерального состава песчаных грунтов на эффективность их укрепления физико-химическими методами. // Инженерно-геологическое и эколого-геологическое изучение песков и песчаных массивов. Труды международной конференции. - М., ООО «СамПринт», 2018 – с. 255-259.
55. Ларионова Н.А. Использование лигносульфонатов для укрепления песчаных грунтов. Инженерно-геологическое и эколого-геологическое изучение песков и песчаных массивов. // Труды международной конференции. - М., ООО «СамПринт», 2018 – с. 260-265.
56. Ларионова Н.А. Поверхностные пленки на песчаных зернах, их состав и условия образования. // Инженерная геология. – 2021 – Т.26. -№ 4. - с. 6–17.
57. Ларионова Н.А. Укрепление песчаных грунтов методом смолизации в строительстве. // Инженерно-геологическое и эколого-геологическое изучение песков и песчаных массивов. Труды международной конференции. - М., ООО «СамПринт», 2018 – с. 260-265.
58. Ларионова Н.А., Самарин Е.Н. Методические основы лабораторных исследований при физико-механическом укреплении грунтов / под ред. Е.А. Вознесенского. – М.: Геоинфо, 2021. – 188 с.
59. Летуновская С. С., Пензев А. П. Влияние поверхностных пленок на эффективность закрепления песчаных грунтов модифицированным раствором алифатической эпоксидной смолы // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2024» / отв. ред. И. А. Алешковский, А. В. Андриянов, Е. А. Антипов, Е.И. Зимакова. – М. : МАКС Пресс, 2023. – Серия «Геология». – С. 23. – [Электронный ресурс].
60. Мулюков Э.И. Роль карбонатных и глинистых примесей при смолизации. Закрепление и уплотнение грунтов в строительстве. //Тезисы докладов на IX Всесоюзном научно-техническом совещании. - Москва, «Стройиздат», 1978. - с. 174 – 178.
61. Огородникова Е.Н. Взаимодействие минералов и песков с карбамидной смолой в целях закрепления песчаных грунтов: Дис... канд. геол.-мин.наук./ Огородникова Елена Николаевна - Москва, 1970 - 227 с.
62. Огородникова Е. Н. Химический анализ грунтов / Е. Н. Огородникова, Н. Н. Комиссарова. – Москва : Изд-во МГУ, 1990. – 159 с.

63. Пензев А. П. Разработка стендовой установки для инъекционного упрочнения песчаных грунтов методом пропитки в лабораторных условиях // Геотехника. – 2024. – Т. 16. – № 2. – С. 16–33.
64. Пензев А.П., Летуновская С.С., Шеховцова А.В. Опыт промышленного внедрения модифицированного раствора алифатической эпоксидной смолы // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2024» / отв. ред. И.А. Алешковский, А. В. Андриянов, Е. А. Антипов, Е. И. Зимакова. – М. : МАКС Пресс, 2023. – Серия «Геология». – С. 24. – [Электронный ресурс].
65. Пензев А.П., Самарин Е.Н., Пат. 226929 Российская Федерация. Емкость лабораторной установки для исследования характера распространения инъекционного раствора для закрепления грунта. Патентообладатели Пензев А.П., Самарин Е.Н. – № 2024108834, заявл. 03.04.2024, опубл. 28.06.2024.
66. Пензев А. П., Самарин Е. Н. Пат. 2785603 Российская Федерация. Инъекционный состав для закрепления пескосодержащего массива. Патентообладатели Пензев А.П., Самарин Е.Н. – № 2022112899, заявл. 13.05.2022, опубл. 09.12.2022.
67. 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. – М. : Геомаркетинг, 2023. – С. 38–44.
68. Пензев А. П., Самарин Е. Н., Лебедев Г. А. Физическое моделирование инъекционного процесса песчаных грунтов методом пропитки // Экологическая геология: теория, практика и региональные проблемы: материалы восьмой международной научно-практической конференции. – Воронеж: Кварта, 2023. – С. 86–90.
69. 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.
70. 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 растворами на основе алифатической эпоксидной смолы // Инженерная геология. – 2023. – Т. 18. – № 4. – С. 50–62.
71. Першин М.Н., Глинская К.Н. Закрепление переувлажненных грунтов резорцин-формальдегидными смолами. //Материалы Совещания по закреплению грунтов». - Тбилиси, Грузинский политехнический институт им. В.И. Ленина, 1964. - с. 62-63.

72. Петтиджон Ф. Пески и песчаники: [Пер. с англ.] / Ф. Петтиджон, П. Поттер, Р. Сивер. – Москва, Мир, 1976. - 535 с
73. Полтораки О.М., Ковба Л.М. Физико-химические основы неорганической химии: Учебное пособие /под ред. В.И. Спицына. – М.: Изд-во МГУ, 1984 – 288 с.
74. Песчаные грунты России: в 2 томах. Том 1 / В.Т. Трофимов [и др.]; под ред. В.Т. Трофимова. – Москва: Издательство Московского Университета, 2021. – 394 с
75. Песчаные грунты России: в 2 томах. Том 2 / В.Т. Трофимов [и др.]; под ред. В.Т. Трофимова. – Москва: Издательство Московского Университета, 2021. – 382 с.
76. Пособие по химическому закреплению грунтов инъекцией в промышленном и гражданском строительстве (к СНиП 3.02.01 -83)/ НИИОСП им. Герсевичева. — М.: Стройиздат, 1986 - 128 с.
77. Рекомендации по комплексному изучению и оценке строительных свойств песчаных грунтов/ ПНИИС Госстроя СССР, МИСИ им. В.В. Куйбышева. – М.: Стройиздат, 1984. - 212 с.
78. Ржаницын Б. Закрепление грунтов химическим способом / Инж. Б. А. Ржаницын; [Предисл.: Г. В. Богомолов]; НКТП СССР. Главстройпром. Всес. науч.-иссл. ин-т водоснабжения, канализации, гидротехн. сооружений и инж. гидрогеологии Водгео. - Москва ; Ленинград : Онти. Глав. ред. строит. лит-ры, 1935. - Обл., 108 с.
79. Ржаницын Б.А. Закрепление и уплотнение грунтов в промышленном строительстве. // «Материалы Совещания по закреплению грунтов». - Киев, Академия строительства и архитектуры УССР, 1962. - с. 2-27.
80. Ржаницын Б.А., Соколов В.Е., Ибрагимов М.Н. Однорастворный способ силикатизации с применением кремнефтористоводородной кислоты. // «Материалы Совещания по закреплению грунтов». - Тбилиси, Грузинский политехнический институт им. В.И. Ленина, 1964. - с. 40-48.
81. Ржаницын Б.А. Силикатизация песчаных грунтов/ Б. А. Ржаницын; С предисл. чл.-кор. АН СССР проф. Н. М. Герсевичева, [с. 5]. - Москва : изд. и тип. Машстройиздата в Л., 1949. - 144 с.
82. Ржаницын Б.А. Химическое закрепление грунтов в строительстве. - М.: Стройиздат, 1986. - 263 с.
83. Самарин Е.Н. К вопросу классифицирования инъекционных материалов // Геотехника. - 2015. - № 4. - С. 42-51.
84. Самарин Е.Н., Кравченко Н.С., Чернов М.С. Защитные проницаемые реакционные барьеры на основе коллоидного кремнезема. // "Безопасный город и методы решения экологических проблем окружающей среды". Материалы XIII научно-практической



- конференции, Воронеж, 16-17 марта 2017 г. — Т. 2 из Комплексные проблемы техносферной безопасности. — Воронеж: Воронеж, 2017. - с. 163–172.
85. Самарин Е. Н., Ларионова Н. А., Чернов М. С., Соколов В. Н., Пензев А. П. Особенности микростроения дисперсных грунтов, закрепленных химическими вяжущими // Ломоносовские чтения 2024. Секция геологии. Подсекция инженерной и экологической геологии: тезисы. – М. : Москва, 2024. – С. 19–20.
  86. Самарин Е.Н., Попова А.М., Чернов М.С. Закрепление песчаных грунтов раствором коллоидного кремнезема. // Геотехника - 2015. - № 5. - С. 32-39.
  87. Самарин Е.Н., Фуникова В.В., Родькина И.А., Кравченко Н.С. Токсичность инъекционных материалов и рабочих инъекционных растворов на их основе. // Комплексные проблемы техносферной безопасности. -2017. - С. 187-191.
  88. Сергеев В. И., Шимко Т. Г., Кулешова М. Л., Степанова Н. Ю. Развитие инъекционного закрепления как основного метода технической мелиорации грунтов // Инженерная геология. – 2012. – № 4. – С. 6–13.
  89. Соколович В.Е. Теоретические основы силикатизации песчаных и лессовых грунтов: автореф. дис. д-ра техн. наук. 05.23.02 / Соколович Владимир Емельянович. - М., 1965. - 29 с.
  90. Соколович В.Е. Химическое закрепление грунтов. /В.Е. Соколович - М.: Стройиздат, 1980. - 119 с.
  91. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83 (с Изменениями № 1, 2). – М. : Минстрой России, 2016. – 204 с.
  92. СП 47.13330.2016. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96. – М. : Минстрой России, 2016. – 160 с.
  93. СТО НОСТРОЙ 2.3.18-2011 Укрепление грунтов инъекционными методами в строительстве. - М.: БСТ., 2011. - 68 с.
  94. Сычев М.М. Твердение вяжущих веществ. /М.М. Сычев - Л.: Стройиздат (Ленингр. отделение), 1974. - 80 с.
  95. Татевосян Г.О. Технология синтетических смол, пластических масс и изделий из них: [Учеб. пособие для проф.-техн. училищ] / Г. О. Татевосян, И. Б. Кузнецова. - Москва : Высш. школа, 1967. - 411 с
  96. Теория и практика химического анализа почв / под ред. Л. А. Воробьевой. – М.: ГЕОС, 2006. – 400 с.
  97. Техническая мелиорация пород / С. Д. Воронкевич, Л. А. Евдокимова, Р. И. Злочевская [и др.]; под ред. С. Д. Воронкевича. – М. : Изд-во МГУ, 1981. – 342 с.

98. Техногенные грунты: учебное пособие / Е.Н. Огоодникова, С.К. Николаева. – Москва: РУДН, 2017. – 636 с.: ил.
99. Указания по закреплению песчаных грунтов карбамидной смолой / Акад. строительства и архитектуры СССР. Науч.-исслед. ин-т оснований и подземных сооружений. – М.: Госстройиздат, 1960. - 19 с.
- 100.Фадеев П.И. Пески СССР. Часть 1. /П.И. Фадеев – М.: Изд-во МГУ, 1951. 291 с.
- 101.Физико-химическая механика природных дисперсных систем/ Под ред. Е.Д. Щукина, Н.В. Перцова, В.И. Осипова, Р.И. Злочевской. – М.: Изд-во МГУ, 1985. - 266 с.
- 102.Фролов В.Т. Литология. Кн.1: Учебное пособие. / В.Т. Фролов – М.: Изд-во МГУ, 1992. - 334 с
- 103.Шанцер Е.В. Очерки учения о генетических типах континентальных осадочных образований./ Е.В. Шанцер - М.: Наука. 1966. - 239 с.
- 104.Шванов В.Н. Петрография песчаных пород (компонентный состав, систематика и описание минеральных видов)/ В.Н. Шванов. – Л.: Недра, 1987. – 267 с.
- 105.Шлыков В.Г. Рентгеновские исследования грунтов: Учеб. пособие /В. Г. Шлыков; МГУ им. М. В. Ломоносова, Геол. фак. - Москва : Изд-во МГУ, 1991. - 183 с.
- 106.Шлыков В.Г. Рентгеновский анализ минерального состава дисперсных грунтов. /В.Г. Шлыков. - М.: ГЕОС., 2006. - 176 с.
- 107.Царев М. А. Расходомер сверхмалых потоков: заявка на патент № 2803394 : заявл. 23.04.2023.
- 108.Царев М. А., Лободенко И. Ю. Автоматизированный комплекс для проведения фильтрационных и миграционных испытаний образцов пористых материалов: патент № 2819962 : заявл. 28.05.2024.
- 109.Царев М. А., Лободенко И. Ю., Малофеев А. А., Ерёмина Н. Е., Ермолинский А. Б., Чернов М. С., Самарин Е. Н., Пензев А. П. Изучение фильтрационных свойств барьеров безопасности для захоронения радиоактивных отходов на примере глиноземистого бетона // Гидросфера. Опасные процессы и явления. – 2024. – Т. 1. – № 6. – С. 52–75.
- 110.Япаскурт О.В. Литология: учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению "Геология" / О. В. Япаскурт. - Москва : Академия, 2008. - 329
- 111.Agapoulaki G. I., Papadimitriou A. G. Rheological properties of colloidal silica grout for passive stabilization against liquefaction //Journal of Materials in Civil Engineering. – 2018. – Т. 30. – №. 10. – С. 04018251.

112. Anagnostopoulos C. A. et al. Research Article Mechanical Properties of An Epoxy Resin and Bentonite-Grouted Sand //Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. – 2019. – T. 16. – №. 1. – C. 15-23.
113. Bell F. Engineering treatment of soils. –London: CRC Press, 1993. - 290 p.
114. Bots P. et al. Geochemical evidence for the application of nanoparticulate colloidal silica gel for in situ containment of legacy nuclear wastes //Environmental Science: Nano. – 2020. – T. 7. – №. 5. – C. 1481-1495.
115. Broms B. B. Lime and lime/cement columns //Ground improvement. – 2004. – T. 2. – C. 252-330.
116. Burke G. K. Jet grouting systems: advantages and disadvantages //GeoSupport 2004: Drilled Shafts, Micropiling, Deep Mixing, Remedial Methods, and Specialty Foundation Systems. – 2004. – C. 875-886.
117. Butrón C. et al. Drip sealing of tunnels in hard rock: A new concept for the design and evaluation of permeation grouting //Tunnelling and underground space technology. – 2010. – T. 25. – №. 2. – C. 114-121.
118. Ciardi G., Vannucchi G., Madiati C. Effects of colloidal silica grouting on geotechnical properties of liquefiable soils: A review //Geotechnics. – 2021. – T. 1. – №. 2. – C. 460-491.
119. Chen C. et al. Ester-Modified Sodium Silicate Grout Material for Moraine Stabilization: Synthesis and Freeze-Thaw Resistance //Materials. – 2024. – T. 17. – №. 22. – C. 5512.
120. Conlee C. T. Dynamic properties of colloidal silica soils using centrifuge model tests and a full-scale field test : дис. – Drexel University, 2010.
121. Conlee C. T. et al. Centrifuge modeling for liquefaction mitigation using colloidal silica stabilizer //Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering. – 2012. – T. 138. – №. 11. – C. 1334-1345.
122. Dave K. K. et al. Development of colloidal silica grout using different reactants //Indian Geotechnical Conference. – 2010. – C. 569-572.
123. De Mello V. F. B., Hauser E. A., Lambe T. W. Polymerization of Acrylic Acids and Related Compounds : патент США № 2,651,619 : заявл. 1953.
124. Durmusoglu E., Corapcioglu M. Y. Experimental study of horizontal barrier formation by colloidal silica //Journal of Environmental Engineering. – 2000. – T. 126. – №. 9. – C. 833-841.
125. Gallagher P.M. Passive site remediation for mitigation of liquefaction risk.: дис. - Virginia Polytechnic Institute and State University, 2000.
126. Gallagher P. M., Conlee C. T., Rollins K. M. Full-scale field testing of colloidal silica grouting for mitigation of liquefaction risk //Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering. – 2007. – T. 133. – №. 2. – C. 186-196.

127. Gallagher P. M., Conlee C. T., Rollins K. M. Full-scale field testing of colloidal silica grouting for mitigation of liquefaction risk //Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering. – 2007. – T. 133. – №. 2. – C. 186-196.
128. Gallagher P. M., Finsterle S. Physical and numerical model of colloidal silica injection for passive site stabilization //Vadose Zone Journal. – 2004. – T. 3. – №. 3. – C. 917-925.
129. Gallagher P. M., Koch A. J. Model testing of passive site stabilization: A new grouting technique //Grouting and Ground Treatment. – 2003. – C. 1478-1489.
130. Gallagher P. M., Mitchell J. K. Influence of colloidal silica grout on liquefaction potential and cyclic undrained behavior of loose sand //Soil dynamics and earthquake engineering. – 2002. – T. 22. – №. 9-12. – C. 1017-1026.
131. Gallagher P. M., Pamuk A., Abdoun T. Stabilization of liquefiable soils using colloidal silica grout //Journal of Materials in Civil Engineering. – 2007. – T. 19. – №. 1. – C. 33-40.
132. Gallagher P. M., Lin Y. Column testing to determine colloidal silica transport mechanisms //Innovations in grouting and soil improvement. – 2005. – C. 1-10.
133. Gallagher P. M., Lin Y. Colloidal silica transport through liquefiable porous media //Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering. – 2009. – T. 135. – №. 11. – C. 1702-1712.
134. Gallagher P. M., Spatari S., Cucura J. Hybrid life cycle assessment comparison of colloidal silica and cement grouted soil barrier remediation technologies //Journal of hazardous materials. – 2013. – T. 250. – C. 421-430.
135. Gentry J., Magill D. Acrylamide Grouting: Successfully Controlling Groundwater from Canada to South America //Grouting and Deep Mixing 2012. – 2012. – C. 1562-1568.
136. Graf E. D. Compaction grouting technique and observations //Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. – 1969. – T. 95. – №. 5. – C. 1151-1158.
137. Green B. H. Development of a high-density, high-strength, cementitious grout using colloidal silica nano-particles //Grouting and Deep Mixing 2012. – 2012. – C. 1850-1858.
138. Hamderi M., Gallagher P. M. An optimization study on the delivery distance of colloidal silica //Sci. Res. Essays. – 2013. – T. 8. – №. 27. – C. 1314-1323.
139. Hamderi M., Gallagher P. M., Lin Y. Numerical model for colloidal silica injected column tests //Vadose Zone Journal. – 2014. – T. 13. – №. 2. – C. vzj2013. 07.0138.
140. Hamderi M., Gallagher P. M. Pilot-scale modeling of colloidal silica delivery to liquefiable sands //Soils and Foundations. – 2015. – T. 55. – №. 1. – C. 143-153.
141. Hayward Baker, Inc. Compaction grouting for the Baltimore Metro Subway : технический отчет / Hayward Baker, Inc. – Odenton, MD, USA, 1980.
142. Huang Y., Wang L. Experimental studies on nanomaterials for soil improvement: a review //Environmental Earth Sciences. – 2016. – T. 75. – №. 6. – C. 497-510.

143. Huang L. et al. Low viscosity polyurethane modified epoxy resin grouting for steel ring reinforcement of subway tunnel // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2022. – T. 2329. – №. 1. – C. 012043.
144. Hulla J., Slastan P., Janicek D. Sealing of dilatation joints with polyurethane resins // *Grouting and Ground Treatment*. – 2003. – C. 1254-1265.
145. Kang Y. T. et al. Synthesis and properties of nanohybrid materials with SiO<sub>2</sub> and epoxy Resin // *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. – 2014. – T. 14. – №. 5. – C. 3557-3560.
146. Karol R. H. Chemical grouting and soil stabilization, revised and expanded. – Crc Press, 2003. – 584 p.
147. Kettle C., Totty R., Vrba V. Shepherd's Bush Station Case History of Detailed Design and Pre-Injection Trial for Soil Consolidation by Ultrafine Cement Grout // *Grouting and Deep Mixing* 2012. – C. 937-962.
148. Krishnan J., Sharma P., Shukla S. Experimental investigations on the mechanical properties of sand stabilized with colloidal silica // *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. – 2021. – T. 45. – №. 3. – C. 1737-1758.
149. Hyung Mi L. et al. Comparative study of various preparation methods of colloidal silica // *Engineering*. – 2010. – T. 2010, - p. 998–1005.
150. Lei H. et al. Fluorine-free superhydrophobic coatings based on silicone and functionalized colloidal silica // *Coatings*. – 2019. – T. 9. – №. 3. – C. 159.
151. Liao H. J., Huang C. C., Chao B. S. Liquefaction resistance of a colloid silica grouted sand // *Grouting and ground treatment*. – 2003. – C. 1305-1313.
152. Liersch L. et al. Chemical Grouting for Water Control in Nearshore Poorly Cemented Sands // *Grouting and Deep Mixing* 2012. – 2012. – C. 1410-1420.
153. Liu J. et al. Model test on segmental grouting diffusion process in muddy fault of tunnel engineering // *Geofluids*. – 2020. – T. 2020. – №. 1. – C. 6698011.
154. Liu T. et al. Model Test on Grouting Diffusion in Water-Rich Sand // *International Conference on Geotechnical and Earthquake Engineering* 2018. – Reston, VA : American Society of Civil Engineers, 2018. – C. 85-93.
155. Mitchell J. K. Fundamentals of soil behaviour. — N. Y.: John Wiley and Sons, 1993.— 422 p.
156. Moridis G. J. et al. A field test of permeation grouting in heterogenous soils using a new generation of barrier liquid // *Proceedings of the Spectrum'96, Seattle, WA — USA, 1996*. — pp. 1-12.
157. Nakanishi W. Method for forming an underground wall comprising a plurality of columns in the earth and soil formation : патент // *Google Patents*. – 1974.

158. Noll M. R., Bartlett C., Dochat T. M. In situ permeability reduction and chemical fixation using colloidal silica //Proceeding of the sixth national outdoor action conference on aquifer restoration, ground water monitoring, and geophysical method, national ground water association. – 1992. – C. 443-457.
159. Shibazaki M. State of practice of jet grouting //Grouting and ground treatment. – 2003. – C. 198-217.
160. Stab E. S. EuroSoilStab: Development of Design and Construction Methods to Stabilise Soft Organic Soils: Design Guide Soft Soil Stabilisation. CT97-0351, Project No. BE 96-3177. – 2002.
161. Robinson H. D., Matheson G. M., Gómez J. E. Mechanical properties of polyurethane grout for permanent ground support applications //Grouting and Deep Mixing 2012. – 2012. – C. 1758-1766.
162. Santagata M. C., Santagata E. Experimental investigation of factors affecting the injectability of microcement grouts //Grouting and Ground Treatment. – 2003. – C. 1221-1234.
163. Tallard G. R., Caron C. Chemical grouts for soils. – Department of Transportation, Federal Highway Administration, Office of Research and Development, 1977. – T. 1. - 233 p.
164. Qi Y. et al. Method of calculating the compensation for rectifying the horizontal displacement of existing tunnels by grouting //Applied Sciences. – 2020. – T. 11. – №. 1. – C. 40.
165. Wang Y., Liu Q. Investigation on fundamental properties and chemical characterization of water-soluble epoxy resin modified cement grout //Construction and Building Materials. – 2021. – T. 299. – C. 123877.
166. Warner J. Compaction grouting: State-of-the-art report // Proceedings of the ASCE Specialty Conference on Grouting in Geotechnical Engineering. – 1978. – P. 1–15.
167. Warner J., Brown D. R. Compaction grouting: A comprehensive overview // Journal of Geotechnical Engineering. – 1974. – Vol. 100. – № CO1. – P. 79–95.
168. Wei X., Chen G. Model Test on Grouting Properties of Alluvial Filler Soil //Applied Sciences. – 2023. – T. 13. – №. 18. – C. 10395.
169. Yang Z. et al. Influence of coupling effects between gravel soil porosity and cement grout weight on diffusion laws and morphologies of penetration grouting //Applied Sciences. – 2022. – T. 12. – №. 15. – C. 7601.
170. Lin Y. Colloidal silica transport mechanisms for passive site stabilization of liquefiable soils: дисс. – Drexel University, 2006. – 359 p.
171. Yongfeng D. et al. Strength and permeability of cemented soil with PAM //Grouting and deep mixing 2012. – 2012. – C. 1800-1807.

172. Vipulanandan C., Sunder S., Magill D. Anionic and Cationic Surfactant Modified Acrylamide Grout // Grouting and Deep Mixing 2012. – С. 1819-1828.

**Фондовая литература**

173. Научно-исследовательская работа по обобщению данных гидрогеологического мониторинга на участках шламохранилища и солеотвала для оценки их воздействия на подземные и поверхностные воды. Построение геофильтрационной и геомиграционной моделей на участках шламохранилища и солеотвала ООО «ЕвроХим-УКК». Обоснование сооружения противофильтрационных барьеров (ПФЗ) в районе объектов хвостового хозяйства ООО «ЕвроХим-УКК».
174. Технический отчет по инженерно-геологическим изысканиям объекта реконструкции эскалаторной галереи на Воробьевых горах, расположенной по адресу: г. Москва, ул. Косыгина, д.20, 2020, 304 с.



## Приложения

Приложение №1. Патент №226929. Емкость лабораторной установки для исследования характера распространения инъекционного раствора для закрепления грунта





Приложение №2. Патент № 2785603. Инъекционный раствор для закрепления  
пескосодержащего массива



Приложение №3. Характеристика песчаных грунтов

№ п/п	Наименование грунта	Глубина отбора, м	Гранулометрический состав песчаных грунтов по массе фракций в мм, %							d <sub>50</sub>	d <sub>60</sub> /d <sub>10</sub>	Плотность частиц грунта ρ <sub>s</sub> , г/см <sup>3</sup>	Плотность скелета грунта ρ <sub>d</sub> , г/см <sup>3</sup> (при инъекционном закреплении)		Пористость n, %	Коэффициент пористости д.ед., e	Коэффициент фильтрации K <sub>ф</sub> , м/сут (при ρ=1,7 г/см <sup>3</sup> )	Название грунта по ГОСТ 25100- 2020	Название грунта по классификации Е.М. Сергеева
			>2	2-1	1-0,5	0,5- 0,25	0,25- 0,1	0,1- 0,05	<0,05				в макс. рыхлом состоянии	в макс. плотном состоянии					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	нижнемеловые пески (K <sub>1k</sub> )	10,0- 11,0	0	0	0	1	85	12	2	0,20	2,20	2,66	1,7		36	0,56	2	мелкие	хорошо отсортированные, мелкозернистые
2	пески флювиогляциальные (fgQ <sub>IIms</sub> )	2,5-3,0	0	2	8	53	28	8	1	0,32	3,40	2,68	1,7		37	0,58	16	средней крупности	слабо отсортированные, мелко-среднезернистые
3	нижнемеловые пески (K <sub>1kn</sub> )	14,0- 16,0	0	0	0	2	76	13	9	0,16	3,30	2,67	1,7		36	0,57	1	мелкие	хорошо отсортированные, мелкозернистые
4	верхнеюрские-нижнемеловые пески (J <sub>3</sub> -K <sub>1lp</sub> )	17,0- 18,0	0	0	3	16	69	5	7	0,20	2,60	2,7	1,7		37	0,59	1	мелкие	слабо отсортированные, средне-мелкозернистые
5	аллювиальные пески второй надпойменной террасы р. Клязьма (alQ <sub>III<sup>II</sup></sub> )	1,0-1,4	0	1	7	52	33	1	6	0,27	3,10	2,68	1,48	1,71	36	0,57	13,6	средней крупности	слабо отсортированные, мелко-среднезернистые
6	аллювиальные пески второй надпойменной террасы р. Клязьма (alQ <sub>III<sup>II</sup></sub> )	1,5-1,8	0	0	9	53	32	1	5	0,28	3,00	2,68	1,48	1,71	36	0,57	13,6	средней крупности	слабо отсортированные, мелко-среднезернистые
7	пески тела дамбы шламохранилища (tQ <sub>IV</sub> )	2,0-2,5	0	0	1	26	67	5	1	0,26	2,00	2,65	1,66		37	0,60	2,5	мелкие	слабо отсортированные, средне-мелкозернистые
8	нижнемеловые пески с карбонатными поверхностными пленками (K <sub>1g-br</sub> )	0,5-1,0	0	0	13	36	20	31	0	0,21	4,70	2,67	1,7		36	0,57		пылеватые	неотсортированный, мелкий
9	пески флювиогляциальные с железистыми поверхностными пленками (fgQ <sub>Idns</sub> )	0,5-1,0	0	0	2	40	20	37	1	0,18	4,20	2,69	1,7		37	0,58		пылеватые	неотсортированный, мелкий
10	нижнемеловые пески с глинистыми поверхностными пленками (K <sub>1g-br</sub> )	0,5-1,0	0	0	0	4	49	44	2	0,14	2,40	2,68	1,7		37	0,58		пылеватые	неотсортированный, мелкий
Модельные песчаные грунты																			
10	модельные песчаные грунты с заданным значением среднего диаметра частиц	-	0	0	13	37	39	5	6	0,24	3,50	2,68	1,7		37	0,59		средней крупности	слабо отсортированные, средне-мелкозернистые
		-	0	0	0	19	38	32	11	0,14	3,70	2,68	1,7		37	0,59		пылеватые	пылеватые, неотсортированные, мелкие
		-	0	0	0	17	34	21	28	0,10	8,30	2,68	1,7		37	0,59		пылеватые	пылеватые, неотсортированные, мелкие
		-	0	0	0	9	32	25	34	0,09	7,30	2,68	1,7		37	0,59		пылеватые	пылеватые, неотсортированные, мелкие
11	аллювиальные пески второй надпойменной террасы р. Клязьма (alQ <sub>III<sup>II</sup></sub> ), с удаленными аутигенными образованиями	-	0	0	9	58	31	1	0	0,38	2,6	2,67	1,7		36	0,57	20,6	средней крупности	слабо отсортированные, мелко-среднезернистые
12	нижнемеловые пески с удаленными поверхностными пленками (K <sub>1g-br</sub> )	-	0	0	0	11	67	21	1	0,19	2,6	2,67	1,7		36	0,57		мелкие	слабо сортированные, мелко-тонкозернистые
13	пески флювиогляциальные с удаленными поверхностными пленками (fgQ <sub>Idns</sub> )	-	0	1	1	61	21	16	0	0,27	4,2	2,67	1,7		36	0,57		средние	слабо сортированные, мелко-среднезернистые

№ п/п	Наименование грунта	Глубина отбора, м	Гранулометрический состав песчаных грунтов по массе фракций в мм, %							d <sub>50</sub>	d <sub>60</sub> /d <sub>10</sub>	Плотность частиц грунта ρ <sub>s</sub> , г/см <sup>3</sup>	Плотность скелета грунта ρ <sub>d</sub> , г/см <sup>3</sup> (при инъекционном закреплении)		Пористость п, %	Коэффициент пористости д.е., е	Коэффициент фильтрации К <sub>f</sub> , м/сут (при ρ=1,7 г/см <sup>3</sup> )	Название грунта по ГОСТ 25100- 2020	Название грунта по классификации Е.М. Сергеева
			>2	2-1	1-0,5	0,5- 0,25	0,25- 0,1	0,1- 0,05	<0,05				в макс. рыхлом состоянии	в макс. плотном состоянии					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Пески с искусственно нанесенными поверхностными пленками																			
14	пески с глинистыми пленками	-	0	0	9	58	31	1	0	0,38	2,6	2,67	1,7		36	0,57	10,6	средней крупности	слабо отсортированные, мелко-среднезернистые
15	пески с железистыми пленками	-	0	0	9	58	31	1	0	0,38	2,6	2,67	1,7		36	0,57	2,8	средней крупности	слабо отсортированные, мелко-среднезернистые
16	пески с карбонатными пленками	-	0	0	9	58	31	1	0	0,38	2,6	2,67	1,7		36	0,57	15	средней крупности	слабо отсортированные, мелко-среднезернистые
17	пески с силикатными пленками	-	0	0	9	58	31	1	0	0,38	2,6	2,67	1,7		36	0,57	22	средней крупности	слабо отсортированные, мелко-среднезернистые
18	пески с органическими пленками	-	0	0	9	58	31	1	0	0,38	2,6	2,67	1,7		36	0,57	13,8	средней крупности	слабо отсортированные, мелко-среднезернистые

Приложение №4. Акт об опытном испытании инъекционного раствора на основе  
алифатической эпоксидной смолы

**Акт  
об опытном испытании инъекционного раствора на основе  
алифатической эпоксидной смолы**

Испытания модифицированного раствора алифатической эпоксидной смолы проведены в ходе опытных инъекционных работ, выполненных в ноябре-декабре 2023 г. на территории ООО «ЕвроХим-Усольский калийный комбинат» с целью оценки применимости раствора для создания противофильтрационной завесы (ПФЗ) и повышения прочности грунтов в основании дамбы племхранилища и ее боковых примыканиях.

Опытные работы являлись частью НИР, выполняемой Лабораторией охраны геологической среды геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова по заданию ООО «ПроТех Инжиниринг». В рамках этой НИР изучена эффективность применения разработанного инъекционного раствора (патент RU 2 785 603 C1) в качестве основного материала для создания ПФЗ в условиях агрессивной солевой среды.

Опытные инъекционные работы были выполнены совместно с ООО «ГЕОТЕХНИКА-БЛОК-СЕРВИС» на двух опытных площадках:

- Опытный участок №1 (массив песчаных грунтов)

Инъекция раствора проведена методом пропитки в 3 скважины глубиной 3 м, расстояние между скважинами 1,25 м, глубина зоны обработки 1-3 м от поверхности. Параметры рабочего раствора: плотность 1,1 г/см<sup>3</sup>, вязкость 1,1 сПа, время гелеобразования 4 часа. Расход раствора на 1 погонный метр скважины - 876 л, давление инъекции 1-1,5 атм. Объем закрепленного песчаного грунта составил 2 м<sup>3</sup> на одну инъекционную скважину, общий объем закрепленного грунта составил 6 м<sup>3</sup>.

- Опытный участок №2 (массив трещиноватых полускальных грунтов)

Инъекция химического эпоксидного раствора проводилась после предварительной цементации трещиноватого массива для тампонажа крупных трещин. Закачка раствора проводилась в 3 инъекционные скважины глубиной 4 м, расположенные на расстоянии 1 м, интервал инъекционной обработки по глубине 2-4 м. Состав рабочего раствора аналогичный площадке №1, расход раствора 600 л на 1 п.м. скважины, давление инъекции 1-2 атм.

По окончании инъекционных работ произведено вскрытие закрепленных массивов шурфами, отобраны образцы закрепленных грунтов для лабораторных исследований.

Результаты изучения закрепленных массивов и лабораторных испытаний показали следующее.



В песчаном массиве было обнаружено, что на глубине 1,5 м в зону инъекции попал прослой гравия высокой проницаемости мощностью 0,3 м. Через этот слой произошла частичная потеря инъекционного раствора, поэтому радиус закрепления составил 30-40 см, а не 0,8 м, как планировалось. Высота закрепленного массива 2 м. Зона закрепленного массива по высоте скважины сплошная, распространение рабочего раствора – радиальное, что соответствует условиям инъекции методом пропитки. Прочность на одноосное сжатие закрепленных песчаных грунтов составила: через 1 неделю после инъекции - 0,6-0,7 МПа, через месяц (при хранении в воздушно-влажной среде) – 1,1-1,4 МПа.

Контроль качества закрепленных трещиноватых грунтов производился визуально. Наблюдалось распространение инъекционного раствора по мелким трещинам, не заполненным цементным раствором. Все трещины, вскрытые шурфом, были заполнены полимеризовавшимся раствором, наблюдалась также пропитка суглинистого грунта закрепляющим раствором от трещины.

Проведенные опытные испытания показали хорошие рабочие качества инъекционного раствора на основе модифицированной алифатической эпоксидной смолы. Работы проводились при температуре окружающей среды от 0 до -9<sup>0</sup>. При этом раствор проявил способность к полимеризации при низких температурах и хорошо регулируемое время гелеобразования при незначительном изменении соотношения компонентов. Рабочий раствор показал свою эффективность при обработке средне-мелкозернистых песчаных грунтов, как в качестве силовой рецептуры, так и в качестве тампонажной. В трещиноватых полускальных грунтах раствор на основе алифатической эпоксидной смолы может использоваться как тампонажный для доуплотнения инъекционной цементации.

и. о. Руководитель Научно-исследовательского центра  
ООО «ПроТех Инжиниринг»

по доверенности ПГИ-24/84 от 25.04.2024г.



С.И. Богдан