Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Уральский государственный лесотехнический университет»

На правах рукописи

Чудинов Сергей Александрович

ЭФФЕКТИВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ЛЕСОВОЗНЫХ ЛЕСНЫХ ДОРОГ НА ОСНОВЕ ДИСПЕРСНО АРМИРОВАННЫХ УКРЕПЛЕННЫХ ГРУНТОВ

4.3.4. Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства
и переработки древесины

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный консультант:
доктор технических наук,
профессор Гороховский А.Г.

Екатеринбург 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ…….. 6
ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ……. 14
1.1 Лесовозные лесные дороги в транспортной системе лесосырьевых баз.. 14
1.2 Особенности конструирования и устройства лесовозных лесных дорог. 15
1.3 Технологии укрепления грунтов для устройства конструктивных слоев дорожных одежд …….. 17
1.4 Современные аспекты дисперсного армирования конструкционных материалов в дорожном строительстве……... 22
1.4.1 Виды и характеристика армирующих волокон……. 24
1.4.2 Свойства дисперсно армированных композиций на основе портландцемента……. 26
1.5 Выводы по первой главе……..…….. 30
ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ФИБРОЦЕМЕНТОГРУНТОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ……...… 33
2.1 Особенности процессов структурообразования цементогрунта в конструкции лесовозных лесных дорог…… 33
2.2 Особенности процессов структурообразования Дисперсно армированных цементных композиций……...…… 36
2.3 Влияние волокон на структурообразование фиброцементогрунтовых композиций……. 40
2.4 Формирование фиброцементогрунтовых композиций с высокой структурной плотностью……... 46
2.5 Структурные взаимодействия компонентов фиброцементогрунта…….. 50
2.6. Выводы по второй главе……... 65
ГЛАВА 3 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ……. 68
3.1 Структурно-логическая схема и методические основы проведения

экспериментальных исследований……... 68
3.2 Характеристика оборудования и контрольно-измерительной аппаратуры…… 73
3.3 Исходные материалы и их характеристика……. 74
3.4 Методика статистической обработки экспериментальных данных…….. 85
3.5 Выводы по третьей главе…….. 88
ГЛАВА 4 ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ФИБРОЦЕМЕНТОГРУНТОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ В КОНСТРУКЦИЯХ ЛЕСОВОЗНЫХ ЛЕСНЫХ ДОРОГ…. 90
4.1 Прочностные показатели и морозостойкость фиброцементогрунтовых композиций на основе базальтовых волокон…….. 90
4.2 Разработка и анализ интеллектуальных систем для определения прочностных показателей фиброцементогрунтовых композиций на основе базальтовых волокон……. 99
4.3 Прочностные показатели и морозостойкость фиброцементогрунтовых композиций на основе базальтовых волокон из отходов производства теплоизоляционных плит……...…… 103
4.4 Прочностные показатели и морозостойкость фиброцементогрунтовых композиций на основе стеклянных волокон…… 112
4.5 Прочностные показатели и морозостойкость фиброцементогрунтовых композиций на основе полипропиленовых волокон…….. 121
4.6 Влияние геометрических характеристик волокон на прочностные показатели фиброцементогрунтовых композиций……. 130
4.7 Структурные прочностные характеристики фиброцементогрунтовых композиций……. 136
4.8 Расчетное моделирование деформационных характеристик конструкций лесовозных лесных дорог на основе фиброцементогрунтовых композиций……. 142
4.9 Исследование структуры фиброцементогрунтовых композиций методом оптической микроскопии……..… 148

4.10 Исследование кинетики структурообразования фиброцементогрунтовых композиций…… 161
4.11 Исследование процессов структурообразования фиброцементогрунтовых композиций методом ИК-спектроскопии….. 165
4.12 Выводы по четвертой главе…… 175
ГЛАВА 5 УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ УСТРОЙСТВА КОНСТРУКЦИЙ ЛЕСОВОЗНЫХ ЛЕСНЫХ ДОРОГ НА ОСНОВЕ ФИБРОЦЕМЕНТОГРУНТОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ……... 177
5.1 Разработка конструкций лесовозных лесных дорог на основе фиброцементогрунтовых композиций с заданными свойствами…..... 177
5.1.1 Исследование свойств конструкций лесовозных лесных дорог на основе фиброцементогрунтовых композиций с добавкой полиДМДААХ…….. 178
5.1.2 Исследование свойств конструкций лесовозных лесных дорог на основе фибробитумоцементогрунтовых композиций……..…… 182
5.1.3 Исследование свойств конструкций лесовозных лесных дорог на основе фиброзолоцементогрунтовых композиций…….……. 187
5.1.4 Исследование свойств конструкций лесовозных лесных дорог на основе фиброминералогрунтовых композиций……... 193
5.2 Особенности технологических факторов устройства конструкций лесовозных лесных дорог на основе фиброцементогрунтовых композиций…….…… 199
5.3 Технология регенерации цементогрунтовых конструкций рекультивируемых лесовозных лесных дорог……..…….. 204
5.4 Выводы по пятой главе…….……. 211
ГЛАВА 6 ОПЫТНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕСОВОЗНЫХ ЛЕСНЫХ ДОРОГ НА ОСНОВЕ ФИБРОЦЕМЕНТОГРУНТОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ……. 213
6.1 Конструктивные характеристики опытных участков…… 215

6.2 Технология строительства опытных участков……... 217
6.3 Исследования транспортно-эксплуатационных показателей конструкций лесовозных лесных дорог……..……. 220
6.3.1 Модуль упругости конструкций дорожных одежд……..……. 220
6.3.2 Продольная ровность дорожных покрытий……..…… 223
6.3.3 Поперечная ровность дорожных покрытий …….. 227
6.3.4 Регистрация дефектов на дорожных покрытиях..……..... 231
6.4 Выводы по шестой главе……..……. 235
ГЛАВА 7 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕСОВОЗНЫХ ЛЕСНЫХ ДОРОГ НА ОСНОВЕ ФИБРОЦЕМЕНТОГРУНТОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ……... 238
7.1 Разработка и анализ интеллектуальных систем для расчета стоимости строительства лесовозных лесных дорог……..……... 239
7.2 Оценка технико-экономической эффективности строительства лесовозных лесных дорог на основе фиброцементогрунтовых композиций на примере Свердловской области……..……... 246
7.3 Выводы по седьмой главе……..……... 252
ЗАКЛЮЧЕНИЕ…… 254
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК…… 258
ПРИЛОЖЕНИЯ…… 291

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Автомобильный транспорт является важнейшим элементом производственных процессов лесного комплекса, обеспечивая планомерную и длительную эксплуатацию лесосырьевых баз в многолесных районах. В настоящее время вывозка более 90 % заготавливаемых лесоматериалов осуществляется по лесовозным лесным дорогам. Возрастающее значение лесовозных лесных дорог в транспортном освоении лесосырьевых баз обосновано переходом отрасли на многоцелевое использование лесных ресурсов, увеличением среднего расстояния дальности транспортировки лесоматериалов, совершенствованием лесовозного автомобильного транспорта, доставке лесоматериалов непосредственно к потребителю. В данных условиях эффективность и безопасность транспортировки лесоматериалов должна обеспечиваться требуемыми транспортно-эксплуатационными показателями в течение заданного срока службы при минимальной стоимости строительства и эксплуатации лесовозных лесных дорог.

Однако при возрастании требований к качеству лесовозных лесных дорог их транспортно-эксплуатационное состояние преимущественно остается неудовлетворительным, а параметры конструкций не отвечают требованиям движения. Принимаемые проектные решения конструкций лесовозных лесных дорог должны быть оптимальными для конкретных условий эксплуатации, учитывать особенности процессов и условий лесного комплекса и основываться на последних достижениях науки и техники. В этой связи преимущество следует отдавать технологиям устройства конструкций лесовозных лесных дорог из местных укрепленных грунтов, отличающихся минимальным содержанием вяжущих компонентов. Одной из перспективных технологий транспортного освоения лесосырьевых баз, в полной мере отвечающей современным тенденциям развития лесозаготовительной отрасли, является устройство конструкций лесовозных лесных дорог на основе дисперсно армированных укрепленных грунтов.

Проблема совершенствования конструкций лесовозных лесных дорог на основе дисперсно армированных укрепленных грунтов актуальна для отрасли и имеет важное значение для развития лесной промышленности и увеличения доли продукции лесного комплекса в валовом внутреннем продукте Российской Федерации, так как ее решение способствует развитию транспортной инфраструктуры лесосырьевых баз, повышению транспортно-эксплуатационных качеств дорог, снижению затрат на вывозку лесоматериалов, а также стоимости строительства и эксплуатации дорог.

Степень разработанности темы исследования. Вопросами технологии устройства конструкций лесовозных лесных дорог на основе укрепленных грунтов занимались такие ученые, как В. М. Безрук, П. А. Ребиндер, Ю. Д. Силуков, С. И. Булдаков, Р. Н. Ковалев, И. Н. Кручинин, Д. Н. Афоничев, А. Ю. Мануковский, В. К. Курьянов, Л. Я. Громская, С. А. Морозов, И. И. Леонович, Н. С. Колбас и др. Исследованиями свойств дисперсно армированных конструкций посвящены работы А. А. Берлина, Д. М. Карпиноса, С. Т. Милейко, К. В. Талантовой, Ю. В. Пухаренко, Р. Р. Сахибгареева, А. Ю. Ковалевой, В. Б. Бабаева, А. Н. Зотова, В. В. Билозира, В. Б. Арончика и др. Большой вклад в развитие технологии дисперсного армирования грунтов в конструкциях дорожных одежд внесли ученые Австралии, Германии, Индии, Китая, США и др. стран, из которых необходимо отметить S. Shukla, F. Changizi, M. Maher, M. Chen, M. Abdi, A. Estabragh, M. Mirzababaei, A. Hamidi, N. Consoli, L. Festugato, M. Chauhan, B. Lian, N. Bakir, K. Abbeche и др.

Цель исследования. Повышение эффективности транспортного освоения лесосырьевых баз на основе совершенствования конструкций лесовозных лесных дорог.

Объект исследования – конструкции лесовозных лесных дорог.

Предмет исследования – физико-механические свойства и транспортно-эксплуатационные качества конструкций лесовозных лесных дорог на основе фиброцементогрунтовых композиций.

Научная новизна работы:

1. Математическая модель структуры фиброцементогрунта, отличающаяся тем, что учитывает взаимодействие основных структурообразующих элементов и их взаимосвязь со свойствами материала и позволяет рассчитать напряженно-деформационные характеристики волокон в плоскости сдвига.

2. Экспериментально-статистические модели, отличающиеся тем, что позволяют выявить рациональные пределы содержания компонентов, вида и геометрических характеристик волокон при обеспечении высоких физико-механических свойств, морозостойкости и структурных характеристик фиброцементогрунтовых композиций в конструкциях лесовозных лесных дорог.

3. Конечно-элементные модели, отличающиеся тем, что позволяют рассчитать деформационные характеристики при разработке и обосновании параметров конструкций лесовозных лесных дорог из фиброцементогрунта на основании из глинистых грунтов различной консистенции.

4. Рациональные конструкции на основе фиброцементогрунтовых композиций, отличающиеся тем, что учитывают особенности грунтов лесной зоны и обеспечивают высокие транспортно-эксплуатационные показатели лесовозных лесных дорог.

5. Комплексная методика технико-экономического обоснования технологии транспортного освоения лесосырьевых баз с использованием интеллектуальной системы, позволяющей оценить единовременные затраты на устройство конструкций лесовозных лесных дорог в зависимости от транспортно-логистической схемы доставки материалов.

Теоретическая значимость исследований:

– разработана математическая модель структуры фиброцементогрунта, учитывающая напряженно-деформационные характеристики волокон в плоскости сдвига;

– разработаны экспериментально-статистические модели зависимости прочностных показателей, коэффициента морозостойкости, угла внутреннего трения и удельного сцепления от содержания компонентов, вида и

геометрических характеристик волокон в фиброцементогрунтовых композициях конструкций лесовозных лесных дорог;

– разработаны конечно-элементные модели зависимости вертикальных и горизонтальных деформаций конструкций лесовозных лесных дорог из фиброцементогрунта на основании из глинистых грунтов различной консистенции.

Практическая значимость исследований:

– разработан технологический регламент на устройство конструкций лесовозных лесных дорог из фиброцементогрунтовых композиций с высокими транспортно-эксплуатационными показателями;

– разработаны защищенные патентами рецептуры фиброцементогрунтовых композиций для условий эксплуатации в конструкции лесовозных лесных дорог;

– разработана технология получения фиброцементогрунта методом регенерации цементогрунтовых слоев рекультивируемых лесовозных лесных дорог;

– разработана комплексная методика технико-экономического обоснования технологии транспортного освоения лесосырьевых баз на основе оценки единовременных затрат на устройство конструкций лесовозных лесных дорог в зависимости от транспортно-логистической схемы доставки материалов.

Методология и методы исследований. При выполнении работы использовались современные методы научных исследований, в том числе математического планирования эксперимента, статистики и моделирования с применением современных средств вычислительной техники, метод конечных элементов, метод оптической микросъемки и ИК-спектроскопии, метод экономического анализа, стандартные методики определения физико-механических свойств материалов и транспортно-эксплуатационных характеристик конструкций дорожных одежд, соответствующие действующим нормативно-техническим документам. Экспериментальное исследование опытных участков проводилось при помощи комплекса измерительной

передвижной дорожной лаборатории ТРАССА 123000089000 (зав. № 737), оборудованной ПЭВМ, приборами контроля продольной ровности по международной системе IRI, поперечной ровности и видеофиксации дефектов на дорожном покрытии.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель структуры фиброцементогрунта, учитывающая напряженно-деформационные характеристики волокон в плоскости сдвига и их взаимосвязь со свойствами материала.

2. Экспериментально-статистические модели влияния содержания компонентов, вида и геометрических характеристик волокон на прочностные показатели, коэффициент морозостойкости, угол внутреннего трения и удельное сцепление фиброцементогрунтовых композиций в конструкциях лесовозных лесных дорог.

3. Конечно-элементные модели влияния фиброцементогрунтовых композиций на вертикальные и горизонтальные деформации конструкций лесовозных лесных дорог на основании из глинистых грунтов различной консистенции.

4. Рациональные конструкции лесовозных лесных дорог на основе фиброцементогрунтовых композиций с учетом условий преобладания в лесной зоне кислых, переувлажненных грунтов и требований по обеспечению высоких транспортно-эксплуатационных качеств.

5. Технологические требования по устройству конструкций лесовозных лесных дорог из фиброцементогрунтовых композиций.

6. Комплексная методика технико-экономического обоснования технологии транспортного освоения лесосырьевых баз на основе оценки единовременных затрат на устройство конструкций лесовозных лесных дорог.

Степень достоверности научных положений, рекомендаций и выводов подтверждена результатами экспериментов с применением современной методики физико-механических испытаний, оптической микроскопии и ИК-спектроскопии с использованием поверенных средств измерений и применением

методов статистического анализа результатов исследований. Достоверность результатов научных исследований подтверждается положительными результатами промышленной апробации на предприятиях лесного комплекса и в дорожных организациях.

Личный вклад автора. Постановка цели и задач, выбор объекта и предмета исследований, разработка математической модели структуры фиброцементогрунта, планирование, проведение и анализ результатов лабораторных и опытно-производственных экспериментов, разработка экспериментально-статистических моделей свойств фиброцементогрунтовых композиций в конструкциях лесовозных лесных дорог, разработка составов фиброцементогрунтовых композиций с заданными свойствами, разработка комплексной методики определения технико-экономической эффективности, формулирование выводов, обобщение результатов исследований в виде статей и заявок на патенты.

Соответствие диссертационной работы паспорту научной специальности. Результаты, выносимые на защиту, относятся к пункту 8 «Технология транспортного освоения лесосырьевых баз» паспорта научной специальности 4.3.4. «Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины».

Апробация работы. Основные положения и результаты работы доложены, обсуждены и получены положительные оценки:

– на международных научно-практических и научно-технических конференциях: «Формирование регионального лесного кластера: социально-экономические и экологические проблемы и перспективы лесного комплекса» (Екатеринбург, 2011); «Фундаментальные и прикладные исследования молодых ученых» (Омск, 2020); «Эффективный ответ на современные вызовы с учетом взаимодействия человека и природы, человека и технологий: социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса» (Екатеринбург, 2021, 2024, 2025); «Проблемы безопасности на транспорте» (Гомель, 2021); «Лес-Наука-Инновации-2022» (Минск, 2022); «Устойчивое и инновационное развитие

лесопромышленного комплекса. RusForest 2022» (Екатеринбург, 2022); «Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе» (Пермь, 2023); «Наука и инновации в строительстве» (Белгород, 2023); «Инновационное развитие транспортного и строительного комплексов» (Гомель, 2023); «Транспорт: логистика, строительство, эксплуатация, управление» (Екатеринбург, 2023); «Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации» (Омск, 2023);

– на всероссийских и национальных научно-практических и научно-технических конференциях: «Научное творчество молодежи – лесному комплексу России (Екатеринбург, 2011, 2024); «Образование. Транспорт. Инновации» (Омск, 2019); «Транспорт и логистика: актуальные вопросы, проектные решения и инновационные достижения» (Красноярск, 2023); «Приоритетные и перспективные направления научно-технического развития Российской Федерации» (Москва, 2023); «Лесоэксплуатация и комплексное использование древесины» (Красноярск, 2023); «Леса России: политика, промышленность, наука, образование» (Санкт-Петербург, 2023); «Химия. Экология. Урбанистика» (Пермь, 2023).

Результаты работы апробированы в ООО «ЛЕСПРОЕКТ» (г. Екатеринбург), ООО «Уральский дорожный научно-исследовательский центр» (г. Екатеринбург), ООО «Союз Автодор» (г. Иваново), ООО «ТД Гекса-Урал» (г. Екатеринбург), используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» при подготовке бакалавров по направлению 35.03.02 «Технология лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств» и магистров по направлению 35.04.02 «Технология лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств».

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 55 печатных работ, в том числе 3 в изданиях, индексируемых в Web of Science и Scopus, 14 в изданиях, рекомендованных ВАК, 6 патентов на изобретение, 1 патент на полезную модель, 4 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ и 4 монографии.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа включает введение, семь глав, заключение, библиографический список, состоящий из 285 ссылок на отечественные и зарубежные работы, и 9 приложений. Общий объем работы 332 страницы, в том числе 290 страниц основного текста, 152 рисунка, 58 таблиц и 42 страницы приложений.

ГЛАВА 1
СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Лесовозные лесные дороги в транспортной системе лесосырьевых баз

В соответствии с Лесным кодексом Российской Федерации [76] и Федеральным законом от 23.06.2016 № 206-ФЗ [162] объекты лесной инфраструктуры, обеспечивающие использование, защиту и воспроизводство лесов, включают лесные дороги. Согласно СП 288.1325800.2016 лесные дороги по назначению классифицируются на лесовозные лесные дороги и лесохозяйственные лесные дороги. Лесовозные лесные дороги устраивают в эксплуатирующихся лесах для обеспечения вывозки заготовленной древесины с территории лесосырьевых баз, перевозки лесозаготовительной техники, технических грузов, персонала, а также для реализации лесохозяйственных целей. Согласно требований [90] лесовозные лесные дороги постоянного действия, являющиеся объектами капитального строительства, проектируются на основании проектов освоения лесов, в соответствии с лесохозяйственными регламентами лесничеств.

Общая протяженность лесовозных лесных дорог на территории Российской Федерации составляет около 1,8 млн. км [176]. При этом около 80 % лесовозных лесных дорог не являются круглогодичными [250]. К отрицательным факторам, препятствующим устойчивому строительству и развитию сети лесовозных лесных дорог постоянного действия, можно отнести:

– недостаток местных каменных дорожно-строительных материалов на территориях лесосырьевых баз;

– особые условия лесой зоны, включающие преобладание слабых, глинистых, переувлажненных, кислых грунтов;

– применение технических и технологических решений при строительстве дорог, не отвечающих технико-экономической эффективности;

– недофинансирование предприятиями лесозаготовительной отрасли инвестиционных проектов по строительству сети лесовозных автомобильных дорог.

Значительное отставание в развитии транспортной системы лесосырьевых баз, безусловно, препятствует не только устойчивому росту, но и нормальному функционированию лесозаготовительной отрасли. Данная тенденция существенно ограничивает объемы лесозаготовок, поскольку эффективное освоение лесосырьевых баз требует обеспечения условий ритмичной работы лесозаготовительных предприятий при круглогодичной транспортировке древесины. Поэтому важной задачей является развитие общей сети лесных дорог и увеличение доли лесовозных лесных дорог постоянного действия.

В целях снижения сезонности заготовки и вывозки древесины, повышения прогнозируемого спроса на древесину и увеличения освоения расчетной лесосеки путем обеспечения транспортной доступности лесных ресурсов, Стратегией развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года предусмотрены мероприятия по стимулированию строительства лесных дорог, включая осуществление внедрения новых современных технологий и материалов [153].

1.2 Особенности конструирования и устройства лесовозных лесных дорог

В соответствии с СП 288.1325800.2016, СП 318.1325800.2017, СП 37.13330.2012 одним из главных конструктивных элементов лесовозных лесных дорог, обеспечивающих в течение заданного срока службы требуемые транспортно-эксплуатационные показатели, безопасность и эффективность работы лесотранспорта, является дорожная одежда [63, 90, 151, 214]. Выбор и расчет конструкции, технологические режимы по устройству и эксплуатации дорожной одежды является сложным производственным процессом, учитывающим планируемый объем перевозки древесины, состав транспортного потока, срок службы дороги, локальные природно-климатические и гидрогеологические условия, наличие местных дорожно-строительных

материалов, экологические требования, экономическую эффективность и другие показатели.

Согласно сложившейся практике строительства лесовозных лесных дорог на магистральных путях и ветках применяют в основном дорожные одежды переходного типа с покрытиями из гравийных, щебеночных, песчано-гравийных, песчано-щебеночных и грунтощебеночных материалов. Лесовозные лесные дороги с гравийным покрытием составляют более 84 % общей протяженности лесовозных лесных дорог круглогодичного действия [251]. Однако большая часть территорий лесосырьевых баз Российской Федерации не располагает или имеет незначительные запасы местных каменных материалов. В данных условиях доставка каменных материалов на большие расстояния значительно увеличивает единовременные финансовые затраты, что в конечном итоге ограничивает объемы строительства лесовозных лесных дорог. Таким образом, целесообразным является применение эффективных конструкций лесовозных лесных дорог, требующих минимальных объемов или позволяющих полностью избавиться от использования инертных каменных материалов.

Одной из таких является технология по устройству конструкций лесовозных лесных дорог из местных укрепленных грунтов. Опыт строительства и длительной эксплуатации конструкций из укрепленных грунтов показывает, что применение данной технологии способствует существенному сокращению единовременных и приведенных затрат на строительство и эксплуатацию лесовозных лесных дорог, обеспечивает комплексную механизацию дорожно-строительных работ, повышает производительность труда и позволяет сократить сроки строительно-монтажных работ, а также уменьшить стоимость транспортировки древесины за счет высоких транспортно-эксплуатационных качеств дорожного покрытия [106, 140, 159, 160, 198, 201, 202, 207, 210, 211, 213].

1.3 Технологии укрепления грунтов для устройства конструктивных слоев дорожных одежд

Технология укрепления грунтов для устройства конструктивных слоев дорожных одежд заключается в искусственном повышении прочностных свойств естественных грунтов до требуемых расчетных показателей различными методами: физическими, механическими и химическими [23, 28, 31, 41–43, 64, 72–74, 94, 126, 167, 169–172, 175, 203, 209, 248]. Набольшее развитие в практике дорожного строительства получили химические методы укрепления грунтов.

Применение технологии укрепления грунтов химическими методами для строительства конструктивных слоев дорожных одежд в России и зарубежных странах насчитывает более 100 лет. За данный период накоплен значительный научно-технических потенциал и практической опыт по использованию различных добавок для укрепления грунтов при строительстве автомобильных дорог. В трудах В. М. Безрука, П. А. Ребиндера, Ю. Д. Силукова, С. И. Булдакова, Р. Н. Ковалева, И. Н. Кручинина, Д. Н. Афоничева, А. Ю. Мануковского, В. К. Курьянова, Л. Я. Громской, С. А. Морозова, И. И. Леоновича, Н. С. Колбаса многих других [10, 11, 13, 14, 16–18, 25, 30, 40, 45, 47, 55, 56, 61, 62, 68–71, 84, 85, 95, 99, 102, 135, 136, 138, 139, 151, 228, 229, 250, 285] разработаны научно-технические основы укрепления грунтов минеральными, органическими и полимерными добавками для строительства конструктивных слоев дорожных одежд.

Исследованиями [12, 15, 26, 46, 114, 115, 127, 137, 150, 157, 204, 205] установлено, что комплексное укрепление грунтов портландцементом и активными добавками позволяет обеспечить расширение видов грунтов, пригодных для устройства конструктивных слоев дорожных одежд, снизить необходимое содержание минерального вяжущего, улучшить процессы структурообразования и увеличить прочностные показатели материала. Доказана эффективность применения ряда веществ совместно с портландцементом для укрепления грунтов: гашеная и молотая негашеная известь, хлористый кальций,

силикат натрия, сернокислый магний, каустическая сода, хлорное железо, золы уноса, жидкий битум, сырая высокосмолистая нефть и другие [224, 232, 251]. Результаты исследований подтвердили положительный эффект от использования портландцемента совместно с активными добавками, однако установили, что степень действенности зависит от оптимального количества добавок, состава и свойств грунтов, а также от ряда других факторов.

Одним из важных направлений научных исследований является применение электролитов и органических поверхностно-активных веществ (ПАВ) для улучшения процессов твердения грунтов, укрепленных портландцементом [14, 15, 18, 86, 88], а именно: сульфитноспиртовой барды (ССБ) и ее производных, сырого сульфатного мыла, торфяной смолы, талового масла, кислого гудрона, мылонафта, абиетиновых или канифольных мыл, сахарозы, сульфолигнатов кальция и натрия.

Отечественными и зарубежными исследованиями установлена высокая эффективность в улучшении прочностных показателей цементогрунтов при использовании активных добавок в виде: эмульсии из нерастворимых в воде синтетических высокомолекулярных материалов (винил, диен и другие) [113], пластифицирующей добавки дивинилстирольного латекса, водорастворимой смолы на основе этиленгиколя и двухзамещенного натрия, термически обработанного фосфогипса, госсиполовой смолы, дистиллата гидроформинала, органического растворимого пиридина, пиритных огарков [25].

Для увеличения времени технологического разрыва между укладкой цементогрунтовой смеси и ее уплотнением, проведены исследования с рядом активных добавок, замедляющих процесс схватывания портландцемента. Для достижения указанной цели рекомендуется использовать в составах цементогрунтовых смесей сырую нефть, соли лигносульфокислоты и соли борной кислоты [35]. Цементогрунтовая смесь, содержащая жидкое стекло и портландцемент, имеет увеличенные сроки схватывания с добавками фосфатов щелочных металлов, хлористого магния, кремнефторида натрия, лигносульфоната натрия, цитрата или тартарата натрия [112]. В качестве замедляющей добавки

процессов гидратации и гидролиза портландцемента эффективно использовать компоненты на основе пятиокиси фосфора: простой или тройной суперфосфат и химический гипс [25].

Исследованиями [35, 123, 135] доказана высокая действенность использования в составе цементогрунтовых смесей добавок ПАВ для замедления процессов схватывания минерального вяжущего в начальный период набора прочности и получении цементогрунтовых слоев конструкций дорожных одежд с высокими прочностными и эксплуатационными показателями. Исследованиями [256] установлена высокая эффективность применения комплексной добавки на основе октилтриэтоксисилана и гдироксида натрия, способствующая образованию более плотной и однородной структуры цементогрунта, уменьшая количество адсорбционной воды, связанной с глинистыми минералами, что повышает физико-механические свойства получаемого материала.

Ю.В. Карасем, А.П. Парфеновым и В.П. Подлипской [87, 111] установлена высокая эффективность добавок кремнийорганических соединений, обеспечивающих гидрофобизацию цементогрунта: метилсиликонат натрия (ГКЖ-11), этилсиликонат натрия (ГКЖ-94). Перспективными направлением в технологии укрепления грунтов является использование добавок ПАВ на основе катионоактивных соединений средней молекулярной массы, принадлежащих к числу жирных аминов и четвертичных молей аммониевых оснований.

Д. Давидсоном, Г. Гувером и Ф. Кардушом (США) [177] проведены исследования по использованию катионоактивной добавки «Арквад 2НТ», состоящую из диоктадецилдиметиламмонийхлорида $[CH_3]_2[C_{18}H_{37}]_2 NH_4Cl$. При добавлении водного раствора концентрацией 3-5% с добавкой «Арквад 2НТ» в грунт до оптимальной влажности в тяжелые лессовидные суглинки, установлено увеличение их прочности в сухом состоянии и уменьшение набухания в 2 раза.

Коллективом ученых ВИАИ ВВС проведены исследования и доказана эффективность применения добавок «Алкамон» (гидрофобилизующая добавка из смеси четвертичных солей диэтиламинометилдигликолевого эфира высших кислот) и цитилпиридийбромид (катионоактивное вещество из группы

четвертичных солей аммониевых оснований) для укрепления воздушно-сухих и оптимально влажных высокодисперсных грунтов [87].

Особый интерес в практике дорожного строительства представляет ряд ПАВ, позиционирующихся производителями как стабилизирующие добавки. При этом многие стабилизаторы используются совместно с минеральными вяжущими веществами или представляются как комплексные вяжущие вещества, обеспечивающие заданные прочностные показатели и морозостойкость обработанных грунтов, соответствующие требованиям для конструктивных слоев дорожных одежд: «ДорЦем ДС-1»; «Стабилар 95»; «Цемдор»; «Статус-3, 5»; «Полистаб»; «Дорзин (Roadzyme)»; «NovoCrete»; «ANT»; «АКРОПОЛ»; «ПАРАГОН М10+50»; «Чимстон»; «ПГСЭ-4»; «POLYBOND2; «NanoOSTAB»; «NICOFLOK»; «Пермазум»; «ISS-2500»; «RRP»; «Раодбонд»; «СГ-25»; «МАРИ РОС»; «Underbold»; «CONSOLID 444»; «SOLIDRY»; «СЦ» и другие. [2, 3, 7, 24, 32, 34, 37, 39, 50, 58, 83, 105, 125, 154, 155, 163, 167, 168, 173, 174, 200, 212, 215].

При проектировании и строительстве лесовозных лесных дорог с применением технологии устройства дорожных одежд из укрепленных грунтов требуется учитывать специфику эксплуатации, сложные транспортные условия, а также особые природно-климатические и грунтово-гидрологические факторы лесной зоны [25, 151, 177, 206, 208]:

– преобладание в районах лесосырьевых баз слабых, переувлажненных, кислых глинистых местных грунтов;

– размещение основных лесосырьевых ресурсов Российской Федерации в I и II дорожно-климатических зонах, в которых предъявляются наиболее высокие требования к морозостойкости укрепленных грунтов;

– затененность и плохая проветриваемость автомобильных дорог в условиях леса, что затрудняет естественную просушку грунтов при выполнении технологических операций по их укреплению;

– использование для вывозки лесоматериалов тяжелой техники с нагрузкой на ось более 10 тонн;

– ограниченный во времени освоения лесосырьевых баз срок службы лесовозных лесных дорог, по истечении которого требуется проведение мероприятий по демонтажу конструктивных элементов и рекультивации занимаемых земель;

– отдаленность многолесных лесосырьевых баз от сети автомобильных дорог общего пользования, что удорожает доставку дорожно-строительных материалов.

Учитывая изложенное, в целях повышения эффективности технологии укрепления грунтов для устройства конструкций лесовозных лесных дорог при научно-техническом руководстве автора на кафедре «Автомобильных дорог, мостов и тоннелей» ФГБОУ ВО «УГЛТУ» проводятся лабораторные и опытно-промышленные исследования. В рамках исследований построены опытные участки лесовозных лесных дорог и автомобильных дорог, используемых для транспортировки лесоматериалов, с конструктивными слоями из укрепленных грунтов с целью мониторинга их транспортно-эксплуатационного состояния:

– автомобильная дорога Верхняя Синячиха – Махнево – Болотовское в Свердловской области с покрытием дорожной одежды из местного грунта, укрепленного портландцементом с добавкой полиДМДААХ, 2009 г.;

– автомобильная дорога п. Самза – п. Зеленоборск в Тюменской области Ханты-Мансийского автономного округа – Югра с основанием дорожной одежды из местного грунта, укрепленного портландцементом с добавкой полиДМДААХ, 2009 г.;

– лесовозная лесная дорога в УУОЛ УГЛТУ с покрытием дорожной одежды из местного грунта, укрепленного портландцементом с добавкой полиДМДААХ, 2009 г.;

– автомобильная дорога Арамашево – Юргинское в Тюменской области с основанием дорожной одежды из местного грунта, обработанного добавками «CONSOLID 444» и «SOLIDRY», 2010 г.;

– лесовозная лесная дорога в ГУСО «Верх-Исетское лесничество» с покрытием дорожной одежды из местного грунта, укрепленного портландцементом с добавкой полиДМДААХ, 2010 г.

К настоящему времени накоплен большой опыт по применению и совершенствованию технологии укрепления грунтов для устройства конструкций лесовозных дорог. Однако, продолжительный опыт эксплуатации лесовозных лесных дорог показывает, что сложные транспортные условия, а также природно-климатические и грунтово-гидрологические факторы лесной зоны ограничивают возможности эффективного применения данной технологии для строительства лесовозных лесных дорог [36]. Основными причинами являются низкое сопротивление растяжению и низкая трещиностойкость грунтов, укрепленных портландцементом, а также их высокая деформативность на слабых основаниях в условиях лесной зоны. Данные факторы приводят к ускоренному появлению дефектов в конструктивных слоях, снижению транспортно-эксплуатационных качеств, потере несущей способности и полному разрушению дорожной одежды лесовозных лесных дорог. Эффективным способом решения данных проблем является технология дисперсного армирования цементогрунтовой матрицы волокнами фибры, которая позволит обеспечить фиброцементогрунту высокие и транспортно-эксплуатационные показатели в течение заданного срока службы лесовозных лесных дорог [116].

1.4 Современные аспекты дисперсного армирования конструкционных материалов в дорожном строительстве

Научно-техническое развитие технологии дисперсно армированных конструкционных материалов неразрывно связано с дорожной отраслью. Начиная с 30-х годов 20 века фибробетон применяется в слоях покрытия дорожных одежд жесткого типа, поскольку традиционно используемые железобетонные слои не в полной мере отвечали значительно возросшим транспортным нагрузкам. В России, США, Японии и в странах Европы были построены и успешно эксплуатировались участки объектов транспортного строительства из бетона,

армированного различными волокнами [130, 152, 156, 238, 247, 271, 281]. Дисперсное армирование позволило значительно увеличить прочность, износостойкость, ударо- и трещиностойкость материала, а также снизить объем бетона для устройства слоев покрытия и увеличить его долговечность в условиях действия высоких транспортных нагрузок и сложных природно-климатических факторов.

Рассматривая мировую практику строительства конструктивных слоев дорожных одежд из дисперсно армированных грунтовых композиций, можно отметить опыт США в 1991 году, где был построен участок автомобильной дороги, устроенный путем армирования полипропиленовыми волокнами местного грунта толщиной 30 м. Применение полипропиленовых волокон позволило повысить максимальную плотность на 5% и снизить оптимальную влажность на 5 %, а также увеличить на 33 % количество проходов большегрузного транспорта на данном участке по сравнению с не армированным грунтом.

В 2008 году на полигоне Брэдшоу Филд в Северной территории Австралии конструкция дорожной одежды на перронах, рулевых дорожках и вертолетной площадке построена из местного грунта, укрепленного портландцементом и полипропиленовыми волокнами, где показала высокие прочностные и деформационные характеристики [245].

Анализ имеющегося научно-технического и практического опыта массового применения дисперсно армированных конструкционных материалов в дорожно-строительной сфере позволили выделить следующие закономерности, которые следует учитывать при устройстве фиброцементогрунтовых конструкций лесовозных автомобильных дорог:

1. Свойства дисперсно армированных конструкционных материалов зависят от вида, характеристик волокон и их количества.

2. Эффективность дисперсного армирования определяется оптимальным содержанием волокон и их относительной длиной: отношением длины к диаметру волокна.

3. Эффективность дисперсного армирования зависит от величины межфазного взаимодействия «волокно – кристаллизационная матрица».

Важным свойством дисперсно армированных конструкционных материалов является повышенная структурная вязкость, благодаря которой они приобретают значительную стойкость при динамических нагрузках, в том числе ударных. Учитывая изложенное, применение фиброцементогрунта в конструктивных слоях дорожных одежд лесовозных дорог в условиях действия динамических нагрузок от лесотранспорта и тяжелых эксплуатационных условиях лесной зоны будет особенно эффективным.

1.4.1 Виды и характеристика армирующих волокон

В настоящее время в строительной отрасли используется множество различных видов волокон, отличающихся характеристиками, которые активно виляют на свойства дисперсно армированных конструкционных материалов (табл. 1.1) [9, 38, 80, 134, 164].

Таблица 1.1 – Характеристики волокон, используемых в составах дисперсно армированных конструкционных материалов

Вид волокна	Плотность, кг/м^3	Прочность на растяжение, МПа	Модуль упругости, МПа	Удлинение при разрыве, %
Полипропиленовое	900	400-800	3500-8000	8-25
Полиэтиленовое	950	700	1400-4200	10
Нейлоновое	1100	770-900	4000	14-19
Акриловое	1200	210-420	210	25-45
Полиэфирное	1400	730-780	8400	11-13
Целлюлозное	1200	300-500	10000	0,5-4
Асбестовое	2600	1200-3100	160000	0,5-1
Стеклянное	2600	1050-3850	7000-8000	1,5-3,5
Стальное	7800	600-3150	200000	2-4
Углеродное	2000	2000	245000	1
Карбоновое	1630	7800	380000	2,1
Полиамидное	900	720	1900	24
Кевларовое	1450	3600	150000	2,1-4
Вискозное	1200	660-720	5600-5800	14-16
Хлопковое	1500	420-700	4900-5100	3-10
Базальтовое	2700	1600-3600	7000-11000	1,4-3,6

Самым распространенным видом волокон, используемым для приготовления фибробетонов является стальная фибра, поскольку ее деформативные характеристики обеспечивают хорошую совместимость с бетонной матрицей [130]. Однако, учитывая структурные различия кристаллизационной матрицы, меньшую прочность и трещиностойкость фиброцементогрунта по сравнению с фибробетоном, использование стальной фибры для дисперсного армирования цементогрунта будет способствовать интенсивному развитию коррозионных процессов стальных волокон и снижению физико-механических показателей материала. Поэтому применение стальной фибры не целесообразно в конструктивных слоях дорожных одежд из фиброцементогрунта в условиях действия изгибающих нагрузок от лесотранспорта и сложных природно-климатических и грунтово-гидрологических факторов лесной зоны.

В современных строительных технологиях большое распространение получили дисперсно армированные конструкционные материалы на основе неметаллических волокон. Стоит отметить высокую эффективность применения фибры на основе отходов промышленного производства, например, базальтовых волокон из отходов изготовления теплоизоляционных плит, асбестовых волокон из отходов асбестотехнической промышленности и других [101].

В соответствии с актуальным направлением технических и технологических решений, связанных с применением возобновляемых ресурсов в строительной сфере [272], широкое распространение за рубежом для дисперсного армирования грунтов и цементогрунтов получили натуральные волокна на основе: кокосовой койры [226, 261], сизаля, пальмовых волокон, джутовых волокон, волокон из льна, соломы, волокон бамбука и сахарного тростника [273]. В целях уменьшения эффекта набухания натуральных волокон в процессе твердения цементогрунтовой матрицы рекомендуется производить их обработку гидрофобизирующими веществами, препятствующими переносу воды между матрицей и волокном, таких как битумная эмульсия, водорастворимый акрил, полистирольное покрытие и т.п. [245]. Однако анализ результатов исследований показывает, что дисперсное

армирование натуральными волокнами не позволяет достичь требуемых прочностных показателей и морозостойкости для устройства конструкций лесовозных лесных дорог. Кроме того, существенным недостатком натуральных волокон, ограничивающим их применение для дисперсного армирования цеметогрунтовых слоев, является их биоразлагаемость.

Учитывая множество видов и разнообразие характеристик волокон, эффективность их применения в составах фиброцементогрунтовых композиций определяются степенью качественного взаимодействия цементогрунтовой матрицы и фибры. Кроме того, свойства дисперсно армированных композиций на основе портландцемента зависят от содержания, размеров волокон и технологических факторов.

1.4.2 Свойства дисперсно армированных композиций на основе портландцемента

Анализ результатов исследований [130, 141, 144] свидетельствует о высоких прочностных, деформационных характеристиках и трещиностойкости фибробетонных композиций в результате введения высокомодульных стальных и неметаллических фиброволокон. При этом по данным источников [82, 93] высокомодульные неметаллические волокна повышают стойкость фибробетона к образованию трещин в меньшей степени, чем стальная фибра. Низкомодульные синтетические волокна для улучшения механических характеристик эффективно применять для бетонов, модуль упругости которых в 2-5 раз меньше по сравнению с данным типом фибр [22, 77].

Согласно исследованиям [49, 60, 270] использование неметаллических низкомодульных волокон (стеклянных, базальтовых и других минеральных волокон) также позволяет увеличивать прочностные показатели дисперсно армированных бетонов, при условии, когда они обладают более высоким, по сравнению с исходной матрицей модулем упругости.

В исследованиях [1, 27, 33, 51, 52, 65, 66, 78, 129, 149] установлено значительное увеличение прочности и трещиностойксоти сталефибробетона при уменьшении диаметра фибр. Использование фибры большего диаметра снижает эффективность дисперсного армирования и даже может привести к снижению прочности в сравнении с неармированным бетоном в результате неоднородности матрицы с фибровыми включениями, которые являются также концентраторами напряжений.

Стоит отметить, что фибровые включения выполняют не только упрочняющую композиционный материал функцию, но и оказывают модифицирующее действие, улучшая внутреннюю структуру и механические показатели цементных матриц. Так, по результатам исследований [244, 258] с использованием низкомодульных волокон получены фибробетоны с повышенной прочностью на изгиб и вязкостью разрушения. Благодаря указанным свойствам дисперсно армированные бетоны приобретают высокую стойкость при динамических нагрузках, в том числе ударных, что обуславливает их применение в сложных эксплуатационных условиях.

Исследованиями [29, 53, 67, 142] установлено, что степень повышения сопротивляемости ударным и другим динамическим нагрузкам зависит от геометрических характеристик используемых волокон, их степени насыщения в бетонной матрице, дисперсности минеральных компонентов в составе матрицы и от технологии изготовления изделий. При этом оптимальное объемное насыщение фибробетонов низкомодульными синтетическими волокнами позволяет получать материал, не уступающий по ударостойкости сталефибробетону.

Исследованиями [8] установлено влияние ориентации волокон на прочностные показатели дисперсно армированных бетонов. Укладка волокон параллельно к оси напряжений позволила увеличить прочность на 30 %, чем при хаотическом распределении, однако, поперечная укладка не давала упрочнения бетона. При значениях угла, равных 15°; 30°; 45°; 60°; 75° к направлению

выдергивающего усилия, сопротивление волокон достигли не меньшие значения, чем у ориентированных по направлению действующего усилия.

Как показано выше, дисперсно армированные композиции на основе портландцемента приобретают высокие прочностные, деформационные показатели и трещиностойкость. Однако еще более важным качественным показателем является долговечность материала, то есть сохранение достигнутого уровня свойств фибробетонов в течение всего периода эксплуатации конструкции. Фактор долговечности дисперсно армированных бетонов во многом определяется степенью устойчивости волокон в среде цементного камня и их защищенности от внешней среды. Анализ результатов отечественных и зарубежных исследований показывает, что не все известные виды армирующих волокон обладают химической устойчивостью в условиях среды бетонной матрицы.

Известно [121, 246], что прочность стеклоцемента снижается с течением времени, поскольку стеклянные волокна подвергаются коррозии в продуктах гидратации портландцемента. Однако в условиях твердения фиброцементогрунта, отличающихся незначительным содержанием портландцемента, составляющим, как правило, 4 – 10 % от массы сухого грунта, очевидно, что процессы коррозии стеклянных волокон будут проявляться малосущественно.

Углеродные волокна не коррозируют в щелочной среде и значительно повышают прочность на растяжение и модуль упругости дисперсно армированных бетонов [220, 237]. Однако значительная стоимость ограничивает их применение в качестве дисперсной арматуры.

Результатами исследований [75, 130, 79, 97] установлено, что синтетические волокна имеют высокую коррозионную стойкость в бетоне, что обеспечивает их эффективное применение фибробетоне с высокими прочностными показателями, морозостойкостью и трещиностойкостью, а также создает предпосылки для успешного применения в составах фиброцементогрунтовых композиций в конструкциях лесовозных автомобильных дорог. Данный вывод подтверждается исследованиями [274], где установлено, что полипропиленовое волокно обладает

высокими эксплуатационными свойствами при смешении с грунтом, укрепленным цементом. Также отмечено, что дисперсное армирование цементогрунта позволяет улучшить прочностные характеристики материала при изгибе и ударную вязкость. Волокна за счет осевого растяжения позволяют распределять внешние нагрузки в объеме дисперсно армированных композиций на основе портландцемента, увеличивая их прочностные показатели.

Кроме того, в результате исследований [217, 218, 221, 222, 227, 230, 231, 233, 234, 236, 241–243, 245, 254, 259, 260, 263, 265, 266, 277, 279, 280, 284] установлено, что дисперсное армирование полипропиленовыми волокнами позволяет повысить прочностные характеристики, трещиностойкость и морозостойкость, а также увеличить показатели удельного сцепления и угла внутреннего трения фиброцементогрунта. По результатам исследований [257] также известно, что за счет активного формирования новообразований и межфазного трения на поверхности волокон, значительно увеличивается скорость структурообразования цементогрунтовой матрицы и возрастает показатель несущей способности дисперсно армированных укрепленных грунтов.

Исследованиями [245] установлено, что применение полиэтиленовых волокон эффективно для увеличения прочностных и деформационных показателей, а также для повышения ударной вязкости дисперсно армированных грунтовых композитов по сравнению с обычными грунтами.

На основании результатов экспериментов [219, 225, 235] дисперсное армирование полиэфирными и нейлоновыми волокнами позволяет увеличить угол внутреннего трения, удельное сцепление и модуль упругости фиброцементогрунтовых композиций.

Результаты дисперсного армирования цементогрунта базальтовыми и стеклянными волокнами [216, 223, 239, 264] доказывают их эффективность по увеличению прочностных показателей и трещиностойкости дисперсно армированных укрепленных грунтов.

Таким образом, представленные исследования подтверждают высокую эффективность применения волокон различных видов в составе дисперсно

армированных композиций на основе портландцемента, что обосновывает перспективные возможности для применения фиброцементогрунта в конструкциях лесовозных лесных дорог. Однако результаты исследований носят не структурированный и не полный характер, отсутствуют теоретические представления об особенностях взаимодействия основных структурообразующих элементов фиброцементогрунтовых композиций в обосновании повышения их физико-механических свойств. Не достаточно изучены закономерности влияния компонентного состава на основе различных видов и размеров волокон на физико-механические свойства фиброцементогрунтовых композиций. Кроме того, требуются исследования влияния компонентного состава фиброцементогрунтовых композиций на деформационные характеристики конструкций лесовозных лесных дорог. Особый интерес представляет разработка усовершенствованных конструкций на основе фиброцементогрунтовых композиций для условий эксплуатации в конструкции лесовозных лесных дорог, а также рациональных технологических параметров их устройства. Целесообразно исследовать транспортно-эксплуатационные качества фиброцементогрунтовых конструкций лесовозных лесных дорог на опытных участках и разработать комплексную методику технико-экономического обоснования технологии транспортного освоения лесосырьевых баз.

Решение приведенных задач позволит получить комплексные знания в целях повышения эффективности транспортного освоения лесосырьевых баз путем совершенствования конструкций лесовозных лесных дорог на основе фиброцементогрунтовых композиций.

1.5 Выводы по первой главе

1. В целях повышения эффективности транспортного освоения лесосырьевых баз требуется совершенствование конструкций лесовозных лесных дорог без использования каменных дорожно-строительных материалов, отличающихся высокой эффективностью в условиях преобладания слабых,

глинистых, переувлажненных, кислых грунтов, воздействия высоких нагрузок от лесотранспорта и низкой стоимостью на устройство и эксплуатацию. Конструкции лесовозных лесных дорог из грунтов, укрепленных портландцементом, не в полной мере отвечают данным требованиям. Основными причинами являются низкое сопротивление растяжению и низкая трещиностойкость цементогрунта, а также его высокая деформативность на слабых основаниях в условиях лесной зоны. Эффективным способом решения данных проблем является устройство конструкций лесовозных лесных дорог по технологии дисперсного армирования цементогрунтовой матрицы волокнами фибры.

2. Многочисленные исследования отечественных и зарубежных ученых подтверждают высокую эффективность применения волокон различных видов, в том числе на основе отходов промышленного производства, в составе дисперсно армированных композиций на основе портландцемента, позволяющих увеличить прочностные показатели, деформационные характеристики, морозостойкость, трещиностойкость и ударную вязкость материала. Данные свойства обосновывают перспективные возможности устройства конструкций лесовозных лесных дорог на основе фиброцементогрунтовых композиций с высокими транспортно-эксплуатационными показателями в течение заданного срока службы.

3. Волокна за счет осевого растяжения позволяют распределять внешние нагрузки в объеме дисперсно армированных композиций на основе портландцемента, увеличивая их физико-механические свойства. Кроме того, фибровые включения выполняют не только упрочняющую функцию, но и оказывают модифицирующее действие, улучшая внутреннюю структуру и механические показатели цементных матриц.

4. Качественные характеристики конструкций из дисперсно армированных композиций на основе портландцемента в значительной степени зависят: от оптимального содержания, вида и геометрических размеров фибры; от ориентации волокон в кристаллизационной матрице; от величины межфазного

взаимодействия «волокно – кристаллизационная матрица»; от технологических режимов по устройству материала и других факторов.

5. Имеющиеся данные исследований свойств дисперсно армированных композиций на основе портландцемента носят не структурированный и не полный характер. Для получения комплексных знаний в целях повышения эффективности транспортного освоения лесосырьевых баз путем совершенствования конструкций лесовозных лесных дорог на основе фиброцементогрунтовых композиций требуется проведение дальнейших теоретических, лабораторных и опытно-производственных исследований по решению следующих задач:

1. Теоретически исследовать особенности взаимодействия основных структурообразующих элементов фиброцементогрунтовых композиций в обосновании повышения их физико-механических свойств.

2. Установить закономерности и разработать экспериментально-статистические модели влияния компонентного состава на физико-механические свойства фиброцементогрунтовых композиций в конструкциях лесовозных лесных дорог.

3. Исследовать влияние компонентного состава фиброцементогрунтовых композиций на деформационные характеристики конструкций лесовозных лесных дорог.

4. Усовершенствовать конструкции лесовозных дорог на основе фиброцементогрунтовых композиций.

5. Установить рациональные технологические параметры устройства конструкций лесовозных лесных дорог на основе фиброцементогрунтовых композиций.

6. Исследовать транспортно-эксплуатационные качества фиброцементогрунтовых конструкций лесовозных лесных дорог на опытных участках.

7. Разработать комплексную методику технико-экономического обоснования технологии транспортного освоения лесосырьевых баз на основе оценки единовременных затрат на устройство конструкций лесовозных лесных дорог.

ГЛАВА 2
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ФИБРОЦЕМЕНТОГРУНТОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ

2.1 Особенности процессов структурообразования цементогрунта в конструкции лесовозных лесных дорог

Учитывая преимущественное распространение в лесных зонах на территории Российской Федерации глинистых грунтов, для устройства конструкций лесовозных лесных дорог на основе цементогрунта требуется учитывать особенности процессов структурообразования данного материала. Глинистый грунт является сложной полидисперсной системой, наиболее дисперсная часть которой представлена коллоидами [177]. Глинистые коллоиды отличаются большой суммарной и удельной поверхностью, которая определяет их большую реакционную способность, и наличие двойного электрического слоя ионов на границе раздела между дисперсной фазой и дисперсионной средой. В результате наличия на поверхности нескомпенсированных энергетически активных центров и сорбции парообразной и жидкой воды, глинистые коллоиды окружены водной оболочкой [57, 104]. Поэтому при укреплении портландцементом важно их рассматривать как весьма активную среду, существенно влияющую на процессы твердения и вступающую в физико-химическое взаимодействие с продуктами гидратации минерального вяжущего [15, 96, 166].

В процессе структурообразования цементогрунта в системе «глинистый грунт – портландцемент – вода» происходит нарушение нормального хода гидратации и гидролиза минерального вяжущего, особенно при укреплении кислых глинистых грунтов, характерных для лесных зон. Данный эффект обусловлен обменными процессами высокодисперсных кремнеземистых и алюмосиликатных составляющих грунтов, в результате которых происходит

связывание извести, гидролитически отщепляющейся при гидратационном твердении портландцемента, что приводит к понижению основности и химически неустойчивости возникающих гидросиликатов кальция, участвующих в образовании кристаллизационного каркаса [18]. С другой стороны, согласно данным исследований [17, 100, 252] при укреплении глинистых грунтов происходят процессы самопроизвольного синтеза комплексного вяжущего, упрочняющего цементогрунтовый каркас и включающего гидратированные силикаты цемента, гидрат извести, алюмосиликатные и кремнекислые соединения.

Согласно современным представлениям физико-химической теории твердения минеральных вяжущих, формирование прочной дисперсной структуры материала зависит от возникновения кристаллизационных контактов срастания между кристаллами гидратных новообразований [81, 177, 194]. Учитывая термодинамические условия возникновения зародышей-контактов гидратных новообразований, расстояние $h_к$, при котором возникновение контактов происходит с той же вероятностью, как и возникновение зародышей роста можно определить по выражению (2.1):

$$h_k = \frac{d_0}{2}\left[\frac{\ln \varepsilon}{\ln \varepsilon^x} + \sqrt{\frac{4w/kT}{\ln \varepsilon^x} + (\frac{\ln \varepsilon}{\ln \varepsilon^x})^2}\right] \qquad (2.1)$$

где: d_0 – межмолекулярное расстояние;

$\varepsilon = \mathrm{c}/\mathrm{c}_\infty$ – степень пересыщения гидратными новообразованиями;

κ - постоянная Больцмана;

T – абсолютная температура;

w – энергия связи между двумя молекулами;

$\varepsilon^x \approx 1{,}5$ – степень пересыщения гидратными новообразованиями, при которой происходит возникновение двухмерных зародышей роста.

Как видно из формулы (2.1), расстояние между срастающимися частицами может быть тем больше, чем выше степень пересыщения, но и при низких степенях пересыщения согласно выражениям 2.2 и 2.3, когда возникновение двухмерных зародышей практически прекращается, возникают контакты, если $h_k \leq (3 \div 4)d_0$.

$$h_k \approx \frac{d_0}{2}\sqrt{\frac{4w/kT}{\ln \varepsilon^x}} \tag{2.2}$$

$$h_k \approx (3 \div 4)d_0 \tag{2.3}$$

Таким образом, для повышения эффективности образования кристаллизационных контактов требуется сочетание условий пересыщения гидратными новообразованиями в окружающей среде и повышенной структурной плотности материала, создающей благоприятные условия для сближения срастающихся частиц до расстояния $h \leq h_к$, где $h_к$ – расстояние, при котором возникновение контактов происходит с той же вероятностью, как и возникновение зародышей роста.

Глинистые частицы обладают высокой гидрофильностью и способны удерживать на своей поверхности мощные оболочки сорбционной воды, в результате чего не обеспечивается плотная упаковка частиц и не достигается высокая структурная плотность цементогрунтовой матрицы. Также, в результате изоморфного связывания извести глинистыми минералами в процессе гидратационного твердения портландцемента, снижается величина пересыщения дисперсионной среды. Таким образом, в условиях лесной зоны при укреплении местных глинистых грунтов снижается эффективность образования кристаллизационных контактов и, следовательно, формирование оптимально развитой цементогрунтовой структуры, что уменьшает физико-механические и транспортно-эксплуатационные показатели, в особенности трещиностойкость цементогрунтовых конструкций лесовозных лесных дорог.

В данных условиях эффективным решением повышения качества конструкций лесовозных лесных дорог является использование дисперсного армирования цементогрунтовой матрицы волокнами фибры с получением нового материала – фиброцементогрунта. Кроме того, в целях интенсификации процессов структурообразования цементогрунтовой матрицы фиброцементогрунтов с возникновением между кристаллами гидратных новообразований прочных кристаллизационных контактов срастания, целесообразным является использование поверхностно-активной добавки – водорастворимый полиэлектролит поли-N,N-диметил-N,N-диаллиламмоний хлорид (полиДМДААХ) [115, 177, 183].

2.2 Особенности процессов структурообразования дисперсно армированных цементных композиций

Изучением особенностей процессов структурообразования дисперсно армированных цементных композиций посвящены научные работы многих отечественных и зарубежных ученых: В. Б. Арончика, В. Билозира, Ю. В. Пухаренко, К. В. Талантовой, Р. Р. Сахибгареева, А. Ю. Ковалева, В. Б. Бабаева, А. Н. Зотова, А. А. Берлина, Д. М. Карпиноса, С. Т. Милейко, Ф. Н. Рабиновича, И. А. Лобанова, Л. В. Моргуна, В. Ю. Лезова, А. Ф. Серенко, P. S. Mangm, R. N. Swamy и др. [8, 9, 20, 22, 38, 44, 48, 75, 77, 91, 97, 130, 134, 143, 149, 156, 255, 276, 281].

Разработки и исследования дисперсно армированных цементных композиций связаны прежде всего с фибробетоном. В работах [77, 97, 98, 130] установлено, что волокна приводят к изменению капиллярно-поровой структуры материала, значительно увеличивая долю замкнутых пор в объеме порового пространства, приводя к улучшению эксплуатационных характеристик и повышению долговечности дисперсно армированных бетонов. При этом стоит отметить, что основным фактором в улучшении структуры порового пространства фибробетонов является степень дисперсности армирования, определяемая

степенью насыщения матрицы материала одинаковыми по размеру армирующими волокнами. Согласно данным исследований [48] свойства дисперсно армированных бетонов изменяются прямо пропорционально степени объемного насыщения и обратно пропорционально диаметру фибр. Также, согласно источникам [132, 133, 255] прочность на растяжение и трещиностойкость дисперсно армированных бетонов зависит от среднего расстояния между геометрическими центрами фибр, критическое значение которого при заданном сечении фибр является функцией объемного коэффициента армирования, а при равном содержании фибр оно зависит их от диаметра, причем для повышения трещиностойкости следует уменьшать диаметр фибр.

Анализ результатов исследований [130] свидетельствует, что дисперсное армирование как высокомодульными, так и низкомодульными волокнами значительно повышает раннюю прочность бетона. Стоит отметить, что низкомодульные волокна на начальном этапе набора прочности бетона являются высокомодульными по отношению к матрице, что объясняет их значительное воздействие на ее прочность. При использовании низкомодульных волокон могут быть получены композиты с высокой прочностью и вязкостью разрушения. Данный эффект является результатом упрочняющего и модифицирующего действия фибровых включений, улучшающих структуру и физико-механические характеристики цементобетонной матрицы.

Известно [59], что свойства дисперсно армированных бетонов зависят от длины фибр, которые показывают эффективную работу при условии надежного сцепления с бетоном. Поэтому большое влияние на прочностные показатели дисперсно армированных бетонов оказывают геометрические параметры, в том числе показатель отношения длины фибры к ее диаметру. Исследованиями [156] установлено, что прочность на сжатие фибробетонов в основном зависит от характеристик бетонной матрицы. Поэтому улучшение условий формирования дисперсной и однородной структуры бетонной матрицы в присутствии волокон фибры будет способствовать повышению физико-механических свойств дисперсно армированных бетонов.

Согласно результатам исследований [268] прочность фибробетонов на растяжение при изгибе и растяжение при раскалывании в значительной степени зависит от микроструктуры и качества пленки цементного теста, обволакивающего фибру. При этом величина прочности сцепления фибры с цементным камнем определяет показатель прочности фибробетонов на растяжение при изгибе и растяжение при раскалывании. На начальном этапе набора прочности фибробетонных смесей волокна оказывают структурирующее действие, увеличивая внутреннее трение, повышая связность смеси и ограничивая перемещения заполнителей матрицы, а также влияют на процессы гидратации цементного камня. Установлено [267], что на поверхности фибры опережающим темпом формируется плотный прочный слой цементного камня, оказывающий при условии оптимального насыщения смеси волокнами существенное влияние на прочностные и деформационные характеристики фибробетона. Таким образом, фиброволокно выступает в качестве подложки для кристаллизации продуктов гидратации клинкерных материалов. Исследованиями [130] установлено, что данный эффект вызван поверхностными явлениями в системе «волокно – вода – цемент». На развитой поверхности волокон протекают процессы структурирования молекул воды, адсорбция других молекул и ионов из жидкой фазы, а также адгезия более крупных частиц цемента. При этом согласно выражению (2.4) минеральные зерна могут иметь более тесную связь с поверхностью волокна, осуществляемую посредством капиллярных сил, чем с друг с другом [136]:

$$F = \frac{A \cdot r}{m \cdot H^n} \tag{2.4}$$

где: $F -$ сила притяжения между частицами;

$H -$ расстояние между частицами;

$r -$ радиус шарообразной частицы;

$A -$ константа, характеризующая суммарное действие ориентационного и дисперисионного факторов;

$m, n -$ коэффициенты, равные соответственно: 12 и 2
при взаимодействии шарообразных частиц; 6 и 2
при взаимодействии шарообразной частицы с полоской.

Таким образом, волокна фибры в процессе твердения портландцемента позволяют активизировать процессы гидратации минерального вяжущего и способствуют формированию прочной цементогрунтовой матрицы. Учитывая, что продукты гидратации клинкерных материалов образуются опережающим темпом на поверхности волокон фибры, это способствует более прочному их удерживанию в цементной матрице на ранних стадиях твердения.

Исследованиями [48] установлено, что значительное влияние на процесс структурообразования и физико-механические свойства оказывает наличие в дисперсно армированной бетонной смеси крупного заполнителя и количество волокон фибры. С увеличением содержания крупного заполнителя линейно уменьшается оптимальный объем волокон фибры. Кроме того, влияние крупного заполнителя на свойства материала может оказаться негативным в случае армирования волокнами малых диаметров. Прочность дисперсно армированных цементных композиций возрастает с увеличением соотношения длины и диаметра фибры, содержания волокон и модуля их упругости.

Таким образом, дисперсное армирование волокнами фибры цементных композиций позволяет увеличить эффективность процессов структурообразования материала и повысить в конечном итоге его физико-механические свойства. При этом важным является обеспечение рецептурных факторов при формировании оптимальных составов дисперсно армированных цементных композиций, включая: гранулометрический состав минерального заполнителя, содержание портландцемента и волокон, вид и геометрические размеры фибры. Учитывая схожие принципы, данные аспекты являются также актуальными при рассмотрении процессов структурообразования фиброцементогрунтовых композиций. Принимая во внимание особенности структурообразования в системе «глинистый грунт – портландцемент – вода» и

свойств цементогрунтовой матрицы, дисперсное армирование волокнами фибры цементогрунтовых композиций позволит повысить эффективность формирования их внутренней структуры и конечные физико-механические свойства фиброцементогрунта.

2.3 Влияние волокон на структурообразование фиброцементогрунтовых композиций

Исследованиям свойств дисперсно армированных укрепленных грунтов посвящены научные работы ученых: S. Shukla, F. Changizi, M. Maher, M. Chen, M. Abdi, A. Estabragh, M. Mirzababaei, A. Hamidi, N. Consoli, L. Festugato, M. Chauhan, B. Lian, N. Bakir, K. Abbeche и др. [216, 218, 225–227, 231, 234, 236, 243, 253, 254, 259, 272]. По результатам данных работ установлено, что основные эксплуатационные свойства фиброцементогрунтов определяются на стадии формирования структуры материала. Структура фиброцементогрунта – это конструкция в виде полидисперсной, гетерогенной системы цементогрунтовой матрицы из кристаллогидратов, контактов между ними, недогидратированных частиц вяжущего, системы нескольких рангов пор, грунтовых частиц и фиброволокон, во взаимосвязи их свойств.

Образование оптимального фиброцементогрунтового каркаса определяет однородность структуры композиционного материала и обеспечивает его максимальные прочностные и деформационные показатели при воздействии внешних нагрузок, которые можно определить по характеру изменения прочности фиброцементогрунта. При оптимальном содержании волокон фиброцементогрунт будет иметь наибольшие физико-механические показатели [178, 240, 278]. Основными преимуществами фиброцементогрунтов в конструкциях дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог являются не только прочностные, но и высокие деформационные показатели, в том числе трещиностойкость материала, которые выражаются прежде всего в сопротивлении сдвиговым нагрузкам [185, 262, 269]

Исследованиями Tang [277–279] особенностей микромеханического взаимодействия между частицами грунта и армирующими волокнами установлено, что сопротивление сдвигу на границе раздела «волокно – грунт» зависит главным образом от сопротивления перегруппировке частиц грунта, эффективной площади контакта на границе раздела, шероховатости поверхности волокна и гранулометрического состава грунта. Учитывая изложенное и принимая во внимание, что требованиями нормативно-технической документации (ГОСТ 70452-2022) содержание крупного заполнителя в грунтах, укрепленных неорганическими вяжущими, ограничено размерами частиц до 45 мм, при этом частиц фракций от 31,5 до 45 мм должно быть не более 10%, то при соблюдении данных требований фиброцементогрунтовые композиции изготавливаются на основе мелкодисперсной матрицы и формирование структуры материала будет происходить оптимально для достижения заданных прочностных и деформационных показателей материала.

Качественные показатели фиброцементогрунта определяются оптимальностью решений, принимаемых на стадии проектирования состава с учетом условий и режимов проведения технологического процесса. Анализ структурно-технологических моделей дисперсно армированных цементных композиций [149, 178, 185–188, 190, 192, 275, 282] показывает, что независимо от характеристик исходных компонентов, включая дисперсную арматуру, для получения фиброцементогрунта с высокими показателями качества необходимы:

– равномерное распределение армирующих волокон в объеме цементогрунтовой матрицы с образованием пространственного фиброцементогрунтового каркаса, обеспечивающего формирование однородной структуры материала и заданных физико-механических характеристик;

– плотная упаковка компонентов фиброцементогрунтовой смеси;

– качественное сцепление армирующих волокон с цементогрунтовой матрицей, что обеспечивается тесным взаимодействием на границе раздела фаз;

– благоприятные условия твердения уложенного и уплотненного фиброцементогрунта.

Важной особенностью фиброцементогрунта является наличие в его составе дисперсной арматуры, способной существенно изменять структуру и свойства данного материала. Кроме того, эффект дисперсного армирования при укреплении грунтов различных видов, гранулометрического и минералогического состава, проявляется в различной степени.

При проектировании составов фиброцементогрунтовых смесей следует учитывать следующие особенности фибры, оказывающие существенное влияние на технологические характеристики композиционного материала:

– фибра, взаимодействуя с цементной составляющей, служит в качестве подложки для формирования контактных зон повышенной плотности и прочности на границе раздела фаз;

– фибра создает определенный поверхностный потенциал, благодаря развитой поверхности, и оказывает влияние на величину адгезии цементных зерен;

– фибра образует пространственный каркас при условии достаточного насыщения, и в рационально подобранной смеси с заполнителями формирует минимальную пустотность, сокращает расход минерального вяжущего, обеспечивает механическую устойчивость и ускоренный набор пластической прочности фиброцементогрунтовой смеси;

– высокая дисперсность и непрерывность пространственной каркасной структуры, позволяет фибре создавать энергетический барьер при воздействии сдвиговых нагрузок на пути распространения трещин в фиброцементогрунте;

– фибра выполняет значительную роль упрочнителя фиброцементогрунтов, благодаря тесному взаимодействию с минеральной частью по поверхности раздела, обеспечивая надежное сцепление между компонентами.

Поэтому задача проектирования сводится к рациональному выбору фибр и их параметров в соответствии с характеристиками укрепляемого грунта,

назначению оптимального соотношения компонентов смеси, обеспечивающего получение заданных свойств фиброцементогрунта. При этом оптимальной следует считать рецептуру, при которой в структуре материала образуется фиброцементогрунтовый каркас, гарантирующую стабильность и повторяемость качественных результатов в производственных условиях.

Согласно теории кинетики гидратации, молекулы воды способны проникать к поверхности цементных зерен и непосредственно химически взаимодействовать с дальнейшим диффузионным отводом образовавшихся продуктов из поверхностного слоя в окружающую среду. Учитывая то, что диффузионные процессы протекают значительно медленнее непосредственного взаимодействия реагентов на границе раздела фаз, концентрация новообразований возникает выше у поверхности цементных зерен, чем в окружающем их объеме жидкой фазы. В связи с содержанием в цементогрунтовых смесях небольшого количества воды, соответствующей показателю оптимальной влажности, достаточной для их максимального уплотнения, перемешивание компонентов в начальный период гидратации не может привести к значимому эффекту диффузионного отвода продуктов гидратации с поверхности зерен цемента. Кроме того, в фибробетонных смесях не вся вода находится в движении. В исследованиях Бернея И. И. [21] установлено, что между зернами цемента, адгезированными на волокне, вода образует застойные зоны – области Прандтля, в которых остается неподвижной даже в случае интенсивного перемешивания. Таким образом, концентрация новообразований в зонах контакта цемента с волокнами остается выше средней в смеси и поэтому в жидкой фазе контактных зон образуется пересыщенный раствор, необходимый для начала процесса кристаллизации минерального вяжущего. В результате процессов накопления в жидкости зародышей новой фазы происходит образование пространственной коагуляционной структуры, которая по мере затвердевания цементного теста, постепенно превращается в окружающее волокно прочную структуру цементного камня. Вследствие более глубокой гидратации вяжущего происходит уплотнение структуры фиброцементогрунта за счет формирования новообразований и

кристаллических сростков на границе раздела фаз, что позволяет улучшить механическое сцепление и анкеровку фибры. Таким образом, фибра является структурообразующим элементом как в период формирования структуры, так и в дальнейшем при работе материала. Волокна фибры способствуют устранению размеров внутренних дефектов в цементогрунтовой матрице и снижают концентрацию напряжений в краях внутренних трещин.

На основании изложенных особенностей процессов структурообразования можно заключить, что фиброцементогрунт – это гетерогенное полиструктурное капиллярно-пористое тело, в котором на каждом структурном уровне могут быть выделены две фазы, взаимодействующие между собой по поверхности раздела через зону контакта на всех стадиях структурообразования и последующей работы материала:

– дисперсная фаза, представленная армирующими волокнами;

– дисперсионная среда, представленная цементогрунтовой матрицей, претерпевающий значительные изменения в процессе формирования структуры и свойств композиционного материала.

При этом, на начальном этапе набора прочности минерального вяжущего важным является процесс образования структурных агрегатов, состоящих из волокна, окруженного плотным и прочным слоем цементных новообразований. Высокая энергия взаимодействия частиц внутри системы позволяет считать такие агрегаты самостоятельными структурными элементами, взаимодействующими с дисперсионной средой через поверхности раздела фаз. Поэтому свойства фиброцементогрунта определяются степенью анизотропности каркаса, энергией взаимодействия и объемной концентрацией фаз, протяженностью внутренних поверхностей раздела, что в свою очередь зависит от вида и дисперсности исходных компонентов, состава и принятой технологии приготовления материала.

Учитывая изложенное, в процессе структурообразования фиброцементогрунта в конструкциях лесовозных лесных дорог можно выделить следующие периоды.

1. Индукционный период, в рамках которого происходят процессы гидратации (выкристаллизовывания) новообразований. При этом фиброволокно выступает в качестве подложки для кристаллизации продуктов гидратации клинкерных материалов, которые образуются опережающим темпом на поверхности волокон.

2. Период структурообразования, в рамках которого происходит возникновение в твердой суспензии сплошного каркаса кристаллизационной структуры, объединяющей в единую прочную структуру цементогрунтовую матрицу и распределенные волокна фибры.

3. Период развития и интенсивного нарастания прочности дисперсно армированной структуры. В начале данного периода наряду с ростом кристаллов новообразований и прорастанием возникающих дендритных новообразований друг в друга, образуются новые кристаллизационные контакты, объединяющие волокна фибры друг с другом и цементогрунтовой матрицей. В завершающей стадии гидратации происходит рост кристаллов и дальнейшее образование контактов переплетения и прорастания между ними.

Таким образом, дисперсное армирование волокнами фибры в процессе твердения портландцемента позволяет активизировать процессы гидратации минерального вяжущего и способствует формированию прочной цементогрунтовой матрицы. Однако, дисперсное армирование цементогрунтов волокнами фибры не позволяет производить нейтрализацию глинистых частиц, сокращая с их поверхности сорбционную воду и минимизируя реакции изоморфного замещения, что особенно актуально для применения данной технологии в условиях лесной зоны. Поэтому получение высокой структурной плотности и интенсификация процессов структурообразования цементогрунтовой матрицы фиброцементогрунтов с возникновением между кристаллами гидратных новообразований прочных кристаллизационных контактов срастания, в условиях переувлажнённых глинистых грунтов лесной зоны также является актуальной задачей.

2.4 Формирование фиброцементогрунтовых композиций с высокой структурной плотностью

Оптимальные условия для образования кристаллизационных контактов срастания в процессе твердения портландцемента путем обеспечения высокой структурной плотности цементогрунтовой матрицы наиболее эффективно создавать, воздействуя на глинистые частицы по нейтрализации их поверхностного заряда и сокращения оболочки сорбционной воды. Данный эффект возможен при действии на глинистые частицы полиэлектролитов, одним из которых полиДМДААХ.

ПолиДМДААХ – высокомолекулярный сильноосновной катионный полимер линейно-циклической структуры. Полиэлектролит при введении в фиброцементогрунтовую смесь в виде раствора диссоциирует с образованием сложного полимерного органического катиона (рис. 2.1), который активно взаимодействует с ацидоидами глинистого грунта.

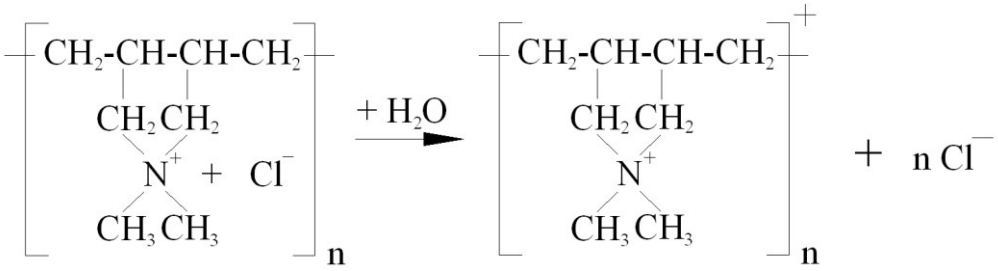


Рисунок 2.1 – Схема диссоциации полиэлектролита (полиДМДААХ)

Действие полиэлектролита на глинистые частицы основано на адсорбции макромолекул на поверхности твердых частиц, сопровождаясь вытеснением ионов простых электролитов [138, 196]. Согласно данному принципу, катионный полиэлектролит способен закрепляться на поверхности глинистых минералов, имеющих отрицательный заряд своей кристаллической структуры, не только с помощью электростатических сил, но и удерживаться водородными и

молекулярными силами. При этом, проникая во внутрь пакетов кристаллической структуры минералов, катионы полиэлектролита обеспечивают их более прочную связь между собой [177]. В результате адсорбции макромолекул полиэлектролита на поверхности глинистых частиц, происходит нейтрализация их поверхностного отрицательного заряда с уменьшением электрокинетического потенциала (ζ – потенциала).

На основании вышеизложенного, механизм структурообразования фиброцементогрунтовых композиций с добавкой полиэлектролита, будет состоять из следующих периодов.

1. Индукционный период, в рамках которого в результате действия полиэлектролита происходит нейтрализация поверхностного заряда глинистых частиц, значительное сокращение их водной оболочки. При этом на поверхности глинистых частиц происходит необратимое прекращение процесса сорбции воды. В результате сжатия диффузной части двойного электрического слоя глинистых мицелл, возникают условия для сближения и слипания частиц под действием молекулярных сил притяжения. При этом, согласно представлениям Ла Мера [193], макромолекула полиэлектролита способна сорбироваться на поверхности двух или более коллоидных частиц с образованием между ними «мостиков», что приводит к образованию в дисперсии крупных быстро седиментирующих агрегатов. В результате данных процессов добавка полиэлектролита изменяет структуру фиброцементогрунта, придавая ей большую плотность, дисперсность и однородность, способствуя тем самым равномерному распределению вяжущего в системе «фибра – цемент – грунт».

2. Период структурообразования фиброцементогрунтовой смеси характеризуется началом процесса срастания возникающих кристаллов новообразований. На данном этапе происходит активное взаимодействие электромагнитных полей катионов полиэлектролита и окружающих их диполей воды. Вследствие данных процессов изменяются условия трансляционного движения диполей воды вблизи катионов [131]. При положительной гидратации вблизи катиона упорядочиваются диполи воды, которые становятся менее

активными, что оказывает замедляющее действие на индукционный период структурообразования портландцемента. Механизм такого действия полиэлектролита заключается в интенсивном образовании поляризованных структур, молекулярных комплексов типа $K^{+}(H_2O)_n$, состоящих из центрального иона и многослойных соединений водородной связью гидратных оболочек [179]. Таким образом, изменяя свойства воды, полиэлектролит снижает скорость индукционного периода структурообразования, а, следовательно, увеличивает время между технологическими операциями перемешивания и уплотнения цементогрунтовых смесей.

3. Период развития и упрочнения кристаллизационной структуры является основной фазой формирования прочной дисперсной структуры фиброцементогрунта. За счет направленного действия полиэлектролита на нейтрализацию поверхностного заряда, происходит значительное сокращение водной оболочки глинистых коллоидов и формируются условия для максимального сближения глинистых частиц, способствуя тем самым высокой структурной плотности цементогрунта. Кроме того, вследствие нейтрализации поверхностного заряда, процессы изоморфного замещения глинистыми частицами минимизируются. Поэтому в процессе структурообразования фиброцементогрунтов с добавкой полиэлектролита на основе кислых глинистых грунтов не происходит изоморфного связывания извести глинистыми минералами, что благоприятно влияет на условия устойчивого повышенного пересыщения дисперсионной среды что, согласно выражению 2.1, обеспечивает возникновение прочных кристаллизационных контактов срастания и формирование прочной цементогрунтовой структуры материала.

Следует отметить, что эффект пресыщения дисперсионной среды и высокой структурной плотности фиброцементогрунта способствует существенному повышению реакционной способности частиц, в состав которых входит диоксид кремния и глинозема [13]. Растворившийся таким образом материал способен соединяться с ионами кальция и образовывать дополнительное

цементирующее вяжущее, увеличивающее структурную прочность фиброцементогрунта.

Кроме того, условия стабильного повышенного пресыщения дисперсионной среды улучают процесс гидратации портландцемента. В данной среде активно образовываются устойчивые высокоосновные гидросиликаты кальция $C_2SH(II)$, участвующие в формировании кристаллизационного каркаса фиброцементогрунта с высокими прочностными и деформационными показателями.

Учитывая особенности взаимодействия полиэлектролита с грунтовыми частицами, исследованиями [180, 199] установлено, что данные процессы проходят наиболее существенно в грунтах с высокой удельной поверхностью, которые соответственно могут иметь мощные оболочки связанной воды. Таким образом, эффективность применения полиэлектролита возрастает в направлении от супесей к суглинкам и глинам. В песчаных и щебеночно-гравийных грунтах эффективность применения полиэлектролита будет незначительной.

Исследованиями [181, 182, 195] также установлено, что эффективная работа полиэлектролита зависит от его оптимального содержания. При повышении содержания полиэлектролита происходит постепенное снижение ζ – потенциала глинистых частиц до нуля с последующей их перезарядкой и увеличением ζ – потенциала, причем нулевые значения ζ – потенциала соответствуют оптимальным дозам полиэлектролита. Повышенное количество полиэлектролита может привести к снижению взаимосвязи между частицами и отрицательно повлияет на процессы структурообразования фиброцементогрунта.

Учитывая изложенное, добавка полиДМДААХ в результате процессов по нейтрализации глинистых частиц, сокращения с их поверхности сорбционной воды и минимизации реакций изоморфного замещения, активно изменяет структуру фиброцементогрунта. Данная структура, характеризуемая большой дисперсностью и однородностью на стадии смешения и высокой плотностью при уплотнении, обеспечивает благоприятные условия для возникновения прочных кристаллизационных контактов срастания, образования дополнительного цементирующего вяжущего и устойчивых высокоосновных гидросиликатов

кальция. Кроме того, плотная структура цементогрунтовой матрицы способствует более прочному удерживанию волокон фибры за счет поверхностного сцепления и тем самым увеличивает эффективность дисперсного армирования фиброцементогрунтов. Очевидно, что структура фиброцементогрунта с добавкой полиэлектролита, обеспечивает конструктивным слоям лесовозных лесных дорог повышенные прочностные, деформационные и транспортно-эксплуатационные показатели при эксплуатации в сложных природных условиях и высоких нагрузках от лесотранспорта [197].

Величина прочностных и деформационных характеристик дисперсно армированных укрепленных грунтов в значительной степени зависит от сопротивления сдвигу на границе раздела фаз «волокно – цементогрунтовая матрица», на который влияют следующие факторы: трение, сцепление и морфология поверхности раздела. В результате приложения нагрузки к фиброцементогрунту, в зависимости от силы сцепления, обусловленной цементацией, частицы цементогрунтовой матрицы могут иметь тенденцию к вращению, что снижает сопротивление сдвигу на границе раздела «волокно – цементогрунтовая матрица». Добавление полиэлектролита – полиДМДААХ, вызывающего флокуляцию глинистых части грунта и приводящего к образованию более крупных агрегатов в цементогрунтовой матрице, способствует более плотному закреплению кристаллизационной структуры на поверхности волокна, препятствующее вращению частиц на границе и, следовательно, повышая сопротивление сдвиговым нагрузкам.

2.5 Структурные взаимодействия компонентов фиброцементогрунта

Распределенные по всему объему фиброцементогрунта волокна фибры прочно удерживаются внутри цементогрунтовой матрицы и дисперсно армируют материал, воспринимая посредством своего осевого растяжения воздействие внешних нагрузок и увеличивая таким образом структурные прочностные показатели: угол внутреннего трения и удельный коэффициент сцепления [178,

185, 190, 272, 283], что обеспечивает прежде всего увеличение трещиностойкости и прочности материала на сдвиг.

Для оценки вклада армирования волокнами фибры в увеличении прочности фиброцементогрунта на сдвиг, в том числе и трещиностойкости, рассмотрим цементогрунт, дисперсно армированный волокнами, расположенными на равную длину по обе стороны от потенциальной плоскости сдвига (рис. 2.2).

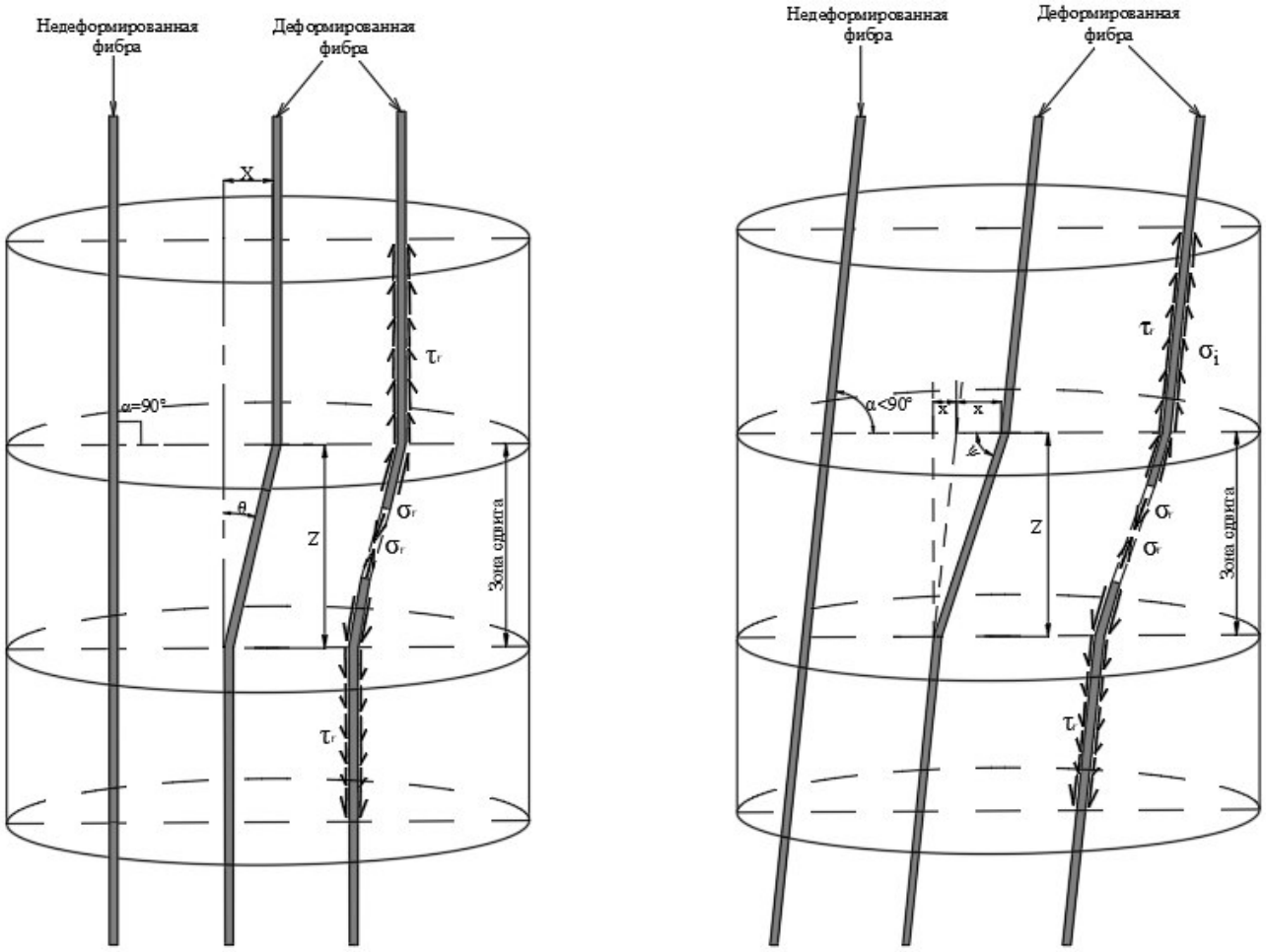


Рисунок 2.2 – Модель фиброцементогрунта, дисперсно армированного волокнами в зоне сдвига:

а) ориентация волокон перпендикулярно плоскости сдвига ($\alpha = 90°$);

б) ориентация волокон под произвольным углом к горизонтали ($\alpha < 90°$).

Волокна фибры могут быть изначально ориентированы перпендикулярно плоскости сдвига ($\alpha = 90°$), либо под произвольным углом к горизонтали ($\alpha <$

90°). Сдвиг приводит к деформированию волокна, возникновению в нем осевого напряжения, тем самым повышая прочность на сдвиг материала. Растягивающее волокно усилие можно разделить на составляющие, перпендикулярные и касательные к плоскости сдвига. Нормальная составляющая увеличивает ограничивающее напряжение в плоскости сдвига, тем самым создавая дополнительное сопротивление сдвигу, в то время как тангенциальная составляющая непосредственно противостоит сдвигу.

Поскольку сопротивление сдвигу оказывают множество волокон, содержащихся в фиброцементогрунте, их общая концентрация (A_r) выражается в виде отношения общей площади поперечного сечения всех волокон (A_f), находящихся в плоскости сдвига или разрушения материала, к общей площади поперечного сечения плоскости сдвига или разрушения (A), включающей цементогрунтовую матрицу и волокна фибры (рис. 2.2).

$$A_r = \frac{A_f}{A} \tag{2.5}$$

где: A_r – общая концентрация волокон фибры, находящихся в плоскости сдвига или разрушения фиброцементогрунта;

A_f – общая площадь поперечного сечения волокон фибры, находящихся в плоскости сдвига или разрушения фиброцементогрунта;

A – общая площадь поперечного сечения плоскости сдвига или разрушения фиброцементогрунта.

Основываясь на полученную модель (рис. 2.2) увеличение прочности на сдвиг фиброцементогрунта за счет дисперсного армирования волокнами (ΔS), соответствующее разности прочности на сдвиг дисперсно армированного (S_R) и не дисперсно армированного цементогрунта (S) (2.6) можно оценить по выражению (2.7) для случая ориентации волокон перпендикулярно плоскости

сдвига и по выражению (2.8) для случая ориентации волокон под произвольным углом к плоскости сдвига:

$$\Delta S = S_R - S \tag{2.6}$$

где: ΔS – увеличение прочности на сдвиг фиброцементогрунта за счет дисперсного армирования волокнами фибры;

S_R – прочность на сдвиг фиброцементогрунта, дисперсно армированного волокнами фибры;

S – прочность на сдвиг цементогрунта, не дисперсно армированного волокнами фибры (или цементогрунтовой матрицы).

$$\Delta S = \sigma_R(sin\theta + cos\theta \cdot tg\varphi) \tag{2.7}$$

где: σ_R – напряжение, возникающее на границе раздела фаз «волокно-цементогрунтовая матрица» на счет осевого растяжения волокон фибры под действием сдвиговой нагрузки;

θ – угол наклона от вертикальной плоскости при деформации фибры под действием сдвиговой нагрузки;

φ – угол внутреннего трения цементогрунтовой матрицы.

$$\begin{aligned}\Delta S = \sigma_R(\sin(90° - \psi) + \cos(90° - \psi) \cdot tg\varphi) \\ = \sigma_R(cos(\psi) + \sin(\psi) \cdot tg\varphi)\end{aligned} \tag{2.8}$$

где: σ_R – напряжение, возникающее на границе раздела фаз «волокно-цементогрунтовая матрица» на счет осевого растяжения волокон фибры под действием сдвиговой нагрузки;

ψ – угол наклона от горизонтальной плоскости при деформации фибры под действием сдвиговой нагрузки (2.9);

φ – угол внутреннего трения цементогрунтовой матрицы.

$$\psi = tg^{-1}\left(\frac{z}{x + x'}\right) \tag{2.9}$$

где: z – толщина зоны сдвига;

$x + x'$ – горизонтальное смещение фибры при сдвиге (2.10).

$$x' = z \cdot ctg\ \alpha \tag{2.10}$$

Принимая коэффициент деформации при сдвиге $k = x/z$, выражение 2.9 примет вид (2.11):

$$\psi = tg^{-1}\left(\frac{1}{k + ctg\alpha}\right) \tag{2.11}$$

Напряжение, возникающее на границе раздела фаз «волокно – цементогрунтовая матрица» за счет осевого растяжения волокон фибры под действием сдвиговой нагрузки может быть определено по выражению (2.12):

$$\sigma_R = A_r\sigma_f = \left(\frac{A_f}{A}\right)\sigma_f \tag{2.12}$$

где: σ_f – максимальное растягивающее напряжение, возникающее в волокне в плоскости сдвига.

Учитывая изложенное, для достижения максимального эффекта дисперсного армирования, волокна должны иметь достаточную длину и иметь достаточную силу трения, чтобы избежать вытягивания, а напряжение, возникающее на границе раздела фаз «волокно – цементогрунтовая матрица» за счет осевого растяжения волокон фибры под действием сдвиговой нагрузки должно быть достаточно высоким, чтобы усилия вытягивания не превосходили поверхностного трения вдоль волокна. При этом следует отметить, что растягивающее волокно напряжение достигает максимума в плоскости сдвига и уменьшается до нуля на концах волокон. С учетом изложенного, максимальное растягивающее напряжение, возникающее в волокне в плоскости сдвига может быть определено по выражению (2.13):

$$\sigma_f = \left(\frac{4E_f\tau_f}{D}\right)^{1/2} (z(sec\theta - 1))^{1/2} \quad (2.13)$$

где: $E_f -$ модуль упругости волокна;

$\tau_f -$ напряжение поверхностного трения вдоль волокна;

$D -$ диаметр волокна.

При условии параболического распределения растягивающего напряжения (σ_f) в плоскости сдвига, данный показатель будет определяться по выражению (2.14):

$$\sigma_f = \left(\frac{8E_f\tau_f}{3D}\right)^{1/2} (z(sec\theta - 1))^{1/2} \quad (2.14)$$

Таким образом, увеличение прочности на сдвиг фиброцементогрунта за счет дисперсного армирования волокнами фибры для случая ориентации волокон перпендикулярно плоскости сдвига можно оценить по выражению (2.15) при условии линейного распределения растягивающего напряжения в плоскости сдвига и по выражению (2.16) при условии параболического распределения растягивающего напряжения в плоскости сдвига:

$$\Delta S = \left(\frac{A_f}{A}\right) \cdot \left(\frac{4E_f\tau_f}{D}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot (z(sec\theta - 1))^{\frac{1}{2}} \cdot (sin\theta + cos\theta \cdot tg\varphi) \quad (2.15)$$

$$\Delta S = \left(\frac{A_f}{A}\right) \cdot \left(\frac{8E_f\tau_f}{3D}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot (z(sec\theta - 1))^{\frac{1}{2}} \cdot (sin\theta + cos\theta \cdot tg\varphi) \quad (2.16)$$

Увеличение прочности на сдвиг фиброцементогрунта за счет дисперсного армирования волокнами фибры для случая ориентации волокон под произвольным углом к горизонтали можно оценить по выражению (2.17) при

условии линейного распределения растягивающего напряжения в плоскости сдвига и по выражению (2.18) при условии параболического распределения растягивающего напряжения в плоскости сдвига:

$$\Delta S = \left(\frac{A_f}{A}\right) \cdot \left(\frac{4E_f\tau_f}{D}\right)^{1/2} (z(sec\theta - 1))^{1/2} \cdot (cos(\psi) + \sin(\psi) \cdot tg\varphi) \qquad (2.17)$$

$$\Delta S = \left(\frac{A_f}{A}\right) \cdot \left(\frac{8E_f\tau_f}{3D}\right)^{1/2} (z(sec\theta - 1))^{1/2} \cdot (cos(\psi) + \sin(\psi) \cdot tg\varphi) \qquad (2.18)$$

Таким образом, основываясь на полученные выражения (2.15 – 2.18) можно сделать следующие выводы:

1. На увеличение прочности на сдвиг фиброцементогрунта оказывают влияние параметры фибры: диаметр, длина и модуль упругости волокон, а также их сила сцепления с цементогрунтовой матрицей.

2. На увеличение прочности на сдвиг фиброцементогрунта оказывает влияние угол наклона от вертикальной плоскости при деформации фибры под действием сдвиговой нагрузки. При этом в зависимости от угла наклона фибры, увеличение прочности на сдвиг фиброцементогрунта при деформации фибры может увеличивается более чем в 7,5 раз. Поэтому особенно важным для дисперсного армирования фиброцементогрунтов является применение нежестких, эластичных волокон фибры, способных деформироваться под воздействием сдвиговых нагрузок и увеличивать прочность материала на сдвиг.

3. На увеличение прочности на сдвиг фиброцементогрунта оказывает влияние начальная ориентация волокон фибры к плоскости сдвига. Максимальное значение увеличения прочности на сдвиг достигается при значении $\psi = 30°$. Таким образом, максимальное увеличение прочности на сдвиг фиброцементогрунта достигается при условии расположения волокон фибры под углом $60°$ к плоскости сдвига.

Согласно выражению 2.6, прочность на сдвиг фиброцементогрунта, дисперсно армированного волокнами фибры, складывается из значения прочности на сдвиг цементогрунтовой матрицы и показателя увеличения прочности на сдвиг фиброцементогрунта за счет дисперсного армирования волокнами фибры:

$$S_R = S + \Delta S \tag{2.19}$$

где: $\Delta S -$ увеличение прочности на сдвиг фиброцементогрунта за счет дисперсного армирования волокнами фибры;

$S_R -$ прочность на сдвиг фиброцементогрунта, дисперсно армированного волокнами фибры;

$S -$ прочность на сдвиг цементогрунта, не дисперсно армированного волокнами фибры или цементогрунтовой матрицы.

Прочность на сдвиг цементогрунта, не дисперсно армированного волокнами фибры или цементогрунтовой матрицы может быть представлена выражением (2.20) [272]:

$$S = \sigma \cdot tg\varphi \tag{2.20}$$

где:

$\sigma -$ общее нормальное ограничивающее напряжение в цементогрунтовой матрице, приложенное к плоскости сдвига;

Для случая ориентации волокон в фиброцементогрунте под произвольным углом к плоскости сдвига, учитывая выражения 2.8 и 2.20, прочность на сдвиг фиброцементогрунта, дисперсно армированного волокнами фибры можно оценить по выражению (2.21):

$$\begin{aligned} S_R &= \sigma \cdot tg\varphi + \sigma_R(cos(\psi) + \sin(\psi) \cdot tg\varphi) \\ &= \sigma_R\, cos(\psi) + (\sigma + \sigma_R \sin(\psi))tg\varphi \end{aligned} \tag{2.21}$$

Учитывая выражения 2.5 и 2.12, выразим растягивающее напряжение, возникающее в волокне на единицу площади фиброцементогрунта:

$$\sigma_f \times \left(\frac{\pi}{4} D^4\right) = \left(\left(\frac{L}{2} \times \pi D\right)(\sigma_i)\right) tg\varphi_i \sin\alpha \qquad (2.22)$$

где: L – длина волокна;

σ_i – нормальное напряжение в волокне, ориентированном под углом α к горизонтали;

φ_i – угол внутреннего трения на границе раздела фаз «волокно – цементогрунтовая матрица»;

α – угол наклона волокна к горизонтальной плоскости.

Таким образом, из равенства 2.22 получим выражение 2.23:

$$\sigma_f = 2\sigma_i \left(\frac{L}{D}\right) tg\varphi_i \sin\alpha \qquad (2.23)$$

Отношение длины волокна (L) к его диаметру (D) обозначим за $a_r = \left(\frac{L}{D}\right)$, тогда выражение 2.23 примет вид (2.24): a_r

$$\sigma_f = 2\sigma_i a_r tg\varphi_i \sin\alpha \qquad (2.24)$$

Таким образом, из выражения 2.24 можно сделать вывод, что максимальное значение растягивающего напряжения, возникающего в волокне, при воздействии касательного напряжения, в том числе и при образовании трещин в фиброцементогрунте, будет возникать при угле наклона волокна к плоскости сдвига $\alpha = 90°$, при котором $\sin 90° = 1$. При угле наклона волокна к плоскости сдвига $\alpha = 0°$ $\sin 0° = 0$, поэтому растягивающее напряжение в волокне будет $\sigma_f = 0$.

Согласно данным [272] нормальное напряжение в волокне, ориентированном под углом α к горизонтали, можно оценить по выражению (2.25):

$$\sigma_i = \left(\frac{1 - sin\varphi \cdot \sin(\varphi - 2\alpha)}{cos^2\varphi}\right)\sigma \tag{2.25}$$

С учетом выражения 2.25, уравнение 2.24 примет вид (2.26):

$$\sigma_f = 2\sigma a_r tg\varphi_i \sin\alpha \left(\frac{1 - sin\varphi \cdot \sin(\varphi - 2\alpha)}{cos^2\varphi}\right) \tag{2.26}$$

Подставляя уравнения и 2.12 и 2.21 в уравнение 2.26 получаем выражение по определению прочности на сдвиг фиброцементогрунта, дисперсно армированного волокнами фибры (2.27):

$$\begin{aligned} S_R &= 2A_r\sigma a_r tg\varphi_i \sin\alpha \left(\frac{1 - sin\varphi \cdot \sin(\varphi - 2\alpha)}{cos^2\varphi}\right) cos(\psi) \\ &+ \left(\sigma + 2A_r\sigma a_r tg\varphi_i \sin\alpha \left(\frac{1 - sin\varphi \cdot \sin(\varphi - 2\alpha)}{cos^2\varphi}\right) \sin(\psi)\right) tg\varphi \\ &= \sigma \left((2A_r a_r tg\varphi_i \sin\alpha \left(\frac{1 - sin\varphi \cdot \sin(\varphi - 2\alpha)}{cos^2\varphi}\right) (cos(\psi) \right. \\ &\left. + (\sin(\psi)\, tg\varphi)) + tg\varphi\right) \end{aligned} \tag{2.27}$$

Таким образом, фиброцементогрунт, дисперсно армированный волокнами фибры, в сравнении с неармированным цементогрунтом, имеет более высокие значения прочности на сдвиг, в том числе и трещиностойкости, за счет показателей: концентрации волокон фибры; отношения длины волокна к его диаметру; угла внутреннего трения на границе раздела фаз «волокно – цементогрунтовая матрица»; начальном расположении волокон фибры под углом к плоскости сдвига и их деформации под воздействием нагрузки.

Выразим значение повышения прочности фиброцементогрунта на сдвиг за счет его дисперсного армирования волокнами фибры через коэффициент прочности на сдвиг ($K_{\text{пр}}^{\text{сдв}}$):

$$K_{\text{пр}}^{\text{сдв}} = \frac{S_R}{S} \tag{2.28}$$

Учитывая выражения 2.20 и 2.26 коэффициент прочности на сдвиг выразим в виде уравнения (2.29):

$$\begin{aligned} K_{\text{пр}}^{\text{сдв}} &= \frac{\sigma \left((2A_r a_r tg\varphi_i \sin\alpha \left(\frac{1 - sin\varphi \cdot \sin(\varphi - 2\alpha)}{cos^2\varphi} \right) (cos(\psi) + (\sin(\psi)\, tg\varphi)) \right) + tg\varphi \right)}{\sigma \cdot tg\varphi} \\ &= 2A_r a_r tg\varphi_i \sin\alpha \left(\frac{1 - sin\varphi \cdot \sin(\varphi - 2\alpha)}{cos^2\varphi} \right) \left(\frac{cos(\psi)}{tg\varphi} + \sin(\psi) \right) + 1 \end{aligned} \tag{2.29}$$

Уравнение 2.29 также свидетельствует о том, что дисперсное армирование волокнами фибры позволяет повысить прочности фиброцементогрунта на сдвиг в зависимости от показателей: концентрации волокон фибры; отношения длины волокна к его диаметру; угла внутреннего трения на границе раздела фаз «волокно – цементогрунтовая матрица»; начальном расположении волокон фибры под углом к плоскости сдвига и их деформации под воздействием нагрузки.

Выделим тонкий элемент из фиброцементогрунтового образца, имеющий в объеме цементогрунтовой матрицы случайно распределенные волокна фибры (рис. 2.3). Примем за $A_{f1}, A_{f2}, A_{f3}, \dots A_{fn}$ – площади поперечного сечения волокон в плоскости сдвига, A_{csm} – площадь цементогрунтовой матрицы, включая поры в плоскости сдвига, ΔL – толщина элемента, измеренная перпендикулярно плоскости сдвига.

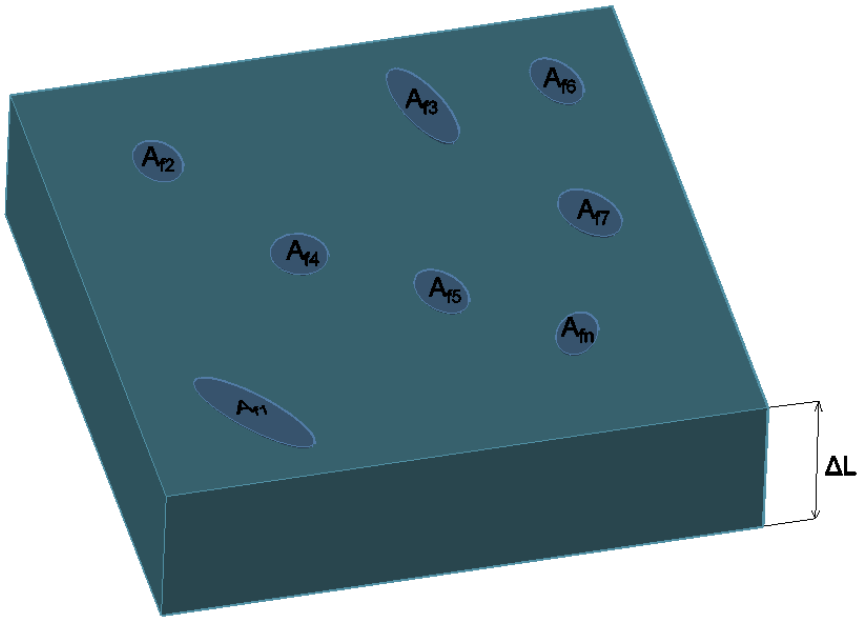


Рисунок 2.3 – Модель элемента из фиброцементогрунтового образца

Согласно полученной модели элемента из фиброцементогрунтового образца, общая концентрация волокон (A_r) согласно выражению 2.5 примет вид:

$$A_r = \frac{A_f}{A} = \frac{A_{f1} + A_{f2} + A_{f3} + \cdots + A_{fn}}{\left(A_{f1} + A_{f2} + A_{f3} + \cdots + A_{fn}\right) + A_{csm}} \times \frac{\Delta L}{\Delta L} = \frac{V_f}{V_f + V_{csm}} \qquad (2.30)$$

где: A_{fn} – площади поперечного сечения волокон в плоскости сдвига;

A_{csm} – площадь цементогрунтовой матрицы, включая поры в плоскости сдвига;

ΔL – толщина элемента фиброцементогрунта, измеренная перпендикулярно плоскости сдвига;

V_f – объем волокон фибры;

V_{csm} – объем цементогрунтовой матрицы, включая поры.

Преобразовав уравнение 2.30, получим:

$$\frac{V_f}{V_{csm}} = \frac{A_r}{1 - A_r} \qquad (2.31)$$

Содержание волокон фибры в элементе фиброцементогрунтового образца (p_f) может быть выражено как отношение массы волокон (M_f) к массе твердых частиц цементогрунтовой матрицы (M_{ss}):

$$p_f = \frac{M_f}{M_{ss}} = \frac{V_f G_f \gamma_w}{V_{ss} G_{ss} \gamma_w} = \frac{V_f G_f (1 + e_s)}{V_{csm} G_{ss}} \tag{2.32}$$

где: $G_f -$ плотность волокон фибры;

$G_{ss} -$ плотность твердых частиц цементогрунтовой матрицы;

$V_{ss} -$ объем твердых частиц цементогрунтовой матрицы;

$\gamma_w -$ плотность воды (9,81кН/м^3);

$e_s -$ коэффициент пустотности цементогрунтовой матрицы.

Учитывая выражение 2.31, уравнение 2.32 примет вид:

$$p_f = \frac{G_f (1 + e_s)}{G_{ss}} \left(\frac{A_r}{1 - A_r} \right) \tag{2.33}$$

Таким образом, общую концентрацию волокон (A_r) можно определить по выражению (2.34):

$$A_r = \frac{p_f \left(\frac{G_{ss}}{G_f (1 + e_s)} \right)}{1 + p_f \left(\frac{G_{ss}}{G_f (1 + e_s)} \right)} \tag{2.34}$$

Подставив уравнение 2.34 в уравнения 2.29, получаем:

$$K_{\text{пр}}^{\text{сдв}} = 1 + 2a_r tg\varphi_i \sin\alpha \left(\frac{p_f \left(\frac{G_{ss}}{G_f(1+e_s)} \right)}{1 + p_f \left(\frac{G_{ss}}{G_f(1+e_s)} \right)} \right) \left(\frac{1 - sin\varphi \cdot \sin(\varphi - 2\alpha)}{cos^2\varphi} \right) \left(\frac{cos(\psi)}{tg\varphi} + \sin(\psi) \right) \quad (2.35)$$

Учитывая равномерное распределение деформаций, соотношение напряжение-деформация для волокон может быть выражено следующим образом (2.36):

$$\sigma_f = E_f \left(\frac{\sqrt{(x+x')^2 + z^2} - \sqrt{x'^2 + z^2}}{\sqrt{x'^2 + z^2}} \right) \quad (2.36)$$

Учитывая выражения 2.9 и 2.10 получаем:

$$\sigma_f = E_f \left(\frac{\sqrt{z^2 + z^2 ctg^2\psi}}{\sqrt{z^2} + z^2 ctg^2\alpha} - 1 \right) = E_f \left(\frac{\sin\alpha}{\sin\psi} - 1 \right) \quad (2.37)$$

Сравнивая выражения 2.27 и 2.36 получаем:

$$\sin\psi = \frac{\sin\alpha}{1 + 2a_r tg\varphi_i \sin\alpha \left(\frac{\sigma}{E_f} \right) \left(\frac{1 - sin\varphi \cdot \sin(\varphi - 2\alpha)}{cos^2\varphi} \right)} \quad (2.38)$$

$$cos\psi = \frac{\sqrt{cos^2\alpha + 4a_r tg\varphi_i \sin\alpha \left(\frac{\sigma}{E_f} \right) \left(\frac{1 - sin\varphi \cdot \sin(\varphi - 2\alpha)}{cos^2\varphi} \right) \left(1 + a_r tg\varphi_i \sin\alpha \left(\frac{\sigma}{E_f} \right) \left(\frac{1 - sin\varphi \cdot \sin(\varphi - 2\alpha)}{cos^2\varphi} \right) \right)}}{1 + 2a_r tg\varphi_i \sin\alpha \left(\frac{\sigma}{E_f} \right) \left(\frac{1 - sin\varphi \cdot \sin(\varphi - 2\alpha)}{cos^2\varphi} \right)} \quad (2.39)$$

Подставив выражения 2.38 и 2.39 в уравнение 2.35 получаем:

$$K_{\text{пр}}^{\text{сдв}} = 1 + 2\beta_1\beta_2\left(\frac{p_f\left(\frac{G_{ss}}{G_f(1+e_s)}\right)}{1+p_f\left(\frac{G_{ss}}{G_f(1+e_s)}\right)}\right)\left(\frac{\sin\alpha}{1+2\beta_1\beta_2(\frac{\sigma}{E_f})} + \frac{\sqrt{cos^2\alpha + 4\beta_1\beta_2(\frac{\sigma}{E_f})\left(1+\beta_1\beta_2\left(\frac{\sigma}{E_f}\right)\right)}}{\left(1+2\beta_1\beta_2(\frac{\sigma}{E_f})\right)tg\varphi}\right) \quad (2.40)$$

где: $\beta_1 = a_r tg\varphi_i \sin\alpha$

$$\beta_2 = \frac{1 - sin\varphi \cdot \sin(\varphi - 2\alpha)}{cos^2\varphi}$$

Таким образом, на основании полученного выражения 2.40 следует, дисперсное армирование волокнами фибры в значительной степени повышает прочность фиброцементогрунта на сдвиг, при этом следует отметить следующие закономерности:

1. Содержание волокон фибры влияет на прочность фиброцементогрунта на сдвиг. Так, при увеличении содержания волокон с 0,25% до 1,5%, коэффициент прочности фиброцементогрунта на сдвиг увеличивается в 2,7 раза.

2. Ориентация волокон к плоскости сдвига влияет на прочность фиброцементогрунта на сдвиг. При угле наклона волокон фибры к плоскости сдвига 60° показатель коэффициента прочности фиброцементогрунта на сдвиг является максимальным.

3. При дисперсном армировании цементогрунтовых смесей модуль упругости фибры незначительно влияет на прочность фиброцементогрунта на сдвиг. Так, при двухкратном увеличении модуля упругости фибры, коэффициент прочности фиброцементогрунта на сдвиг увеличивается на 3,4%. Таким образом, это свидетельствует об эффективном применении низкомодульных волокон фибры в составах фиброцементогрунтовых композиций.

4. Показатель отношения длины волокна к его диаметру на прочность фиброцементогрунта на сдвиг. При увеличении показателя отношения длины волокна к его диаметру, коэффициент прочности фиброцементогрунта на сдвиг также увеличивается в 2 раза.

Учитывая результаты теоретических исследований, следует отметить, что дисперсное армирование волокнами фибры позволяет увеличить прочностные и деформационные показатели фиброцементогрунта в условиях сплошного деформирования, что также свидетельствует о повышении трещиностойкости материала. В момент образования и раскрытия трещин в фиброцементогрунтовых композициях условия работы волокон, пересекающих трещину в матрице, отличаются от условий их работы при сплошном деформировании материала. В частности, вблизи берегов трещины имеет место потеря сцепления волокон, пересекающих ее. На участках длины волокон, потерявших сцепление, адгезионный механизм взаимодействия волокон и матрицы сменяется фрикционным. При этом зона в матрице между волокном и берегом трещины испытывает сильное перенапряжение и локально разрушается вследствие низкой прочности и хрупкости материала матрицы. В результате некоторый участок волокна выходит из контакта с матрицей и принимает ориентацию, отличающуюся от исходной. Разрушение фиброцементогрунтовых композиций обычно связано с вытягиванием волокон, потерявших сцепление, из цементогрунтовой матрицы. По мере разрушения матрицы сопротивление фиброцементогрунта все в большей мере обеспечивается силовым вкладом волокон, пересекающих разрушаемое сечение, воспринимающих и передающих нагрузку через поверхность раздела волокон и матрицы.

2.6 Выводы по второй главе

1. Процесс структурообразования грунтов, укрепленных портландцементом, основан на образовании и активном росте фазовых контактов, пронизывающих уплотненную коагуляционную или псевдоконденсационную

структуру грунта при выделении дисперсной фазы из пересыщенного раствора. К основным факторам образования кристаллизационных контактов относятся сочетание условий пересыщения гидратными новообразованиями в окружающей среде и повышенной структурной плотности материала. Данные факторы не обеспечиваются при укреплении глинистых грунтов в условиях лесной зоны, поскольку глинистые частицы обладают высокой гидрофильностью и способны удерживать на своей поверхности мощные оболочки сорбционной воды, в результате чего не обеспечивается плотная упаковка частиц и не достигается высокая структурная плотность цементогрунтовой матрицы, а также в результате изоморфного связывания извести глинистыми минералами в процессе гидратационного твердения портландцемента снижается величина пересыщения дисперсионной среды. Учитывая компонентный состав и условия формирования, характерной структурной особенностью цементогрунтовых слоев конструкций лесовозных лесных дорог является высокая трещиностойкость, обусловленная низкими деформационными характеристиками и прочностью цементогрунта на сдвиг.

2. Волокна фибры в процессе твердения портландцемента позволяют активизировать процессы гидратации минерального вяжущего и способствуют формированию прочной цементогрунтовой матрицы. Продукты гидратации клинкерных материалов образуются опережающим темпом на поверхности волокон фибры, это способствует более прочному их удерживанию на ранних стадиях твердения в цементной матрице. Дисперсное армирование волокнами фибры позволяет существенным образом повысить эффективность процессов структурообразования фиброцементогрунта и увеличить в конечном итоге его физико-механические показатели.

3. На основании предложенного механизма процесса структурообразования фиброцементогрунта фибра является структурообразующим элементом как в период формирования цементогрунтовой матрицы, так и в дальнейшем при работе материала. Волокна фибры способствуют устранению размеров внутренних дефектов в цементогрунтовой матрице и снижают концентрацию

напряжений в краях внутренних трещин, что в конечном итоге повышает трещиностойкость, прочностные и деформационные характеристики фиброцементогрунта.

4. Добавка полиэлектролита – полиДМДААХ в результате процессов по нейтрализации глинистых частиц, сокращения с их поверхности сорбционной воды и минимизации реакций изоморфного замещения, активно изменяет структуру фиброцементогрунта. Данная структура, характеризуемая большой дисперсностью и однородностью на стадии смешения и высокой плотностью при уплотнении, обеспечивает благоприятные условия для возникновения прочных кристаллизационных контактов срастания, образования дополнительного цементирующего вяжущего и устойчивых высокоосновных гидросиликатов кальция. Кроме того, плотная структура цементогрунтовой матрицы способствует более прочному удерживанию волокон фибры за счет поверхностного сцепления и тем самым увеличивает эффективность дисперсного армирования фиброцементогрунтов, повышая сопротивление сдвиговым нагрузкам.

5. Предложенная математическая модель фиброцементогрунта отражает взаимодействие основных структурообразующих элементов и их взаимосвязь со свойствами получаемого материала. Преимущественным для дисперсного армирования фиброцементогрунта является применение нежестких, эластичных волокон фибры, способных деформироваться под воздействием сдвиговых нагрузок и увеличивать прочность материала на сдвиг. На основании аналитических вычислений дисперсное армирование волокнами фибры в значительной степени повышает прочность фиброцементогрунта на сдвиг, при этом к наиболее значимым факторам относятся:

- содержание волокон фибры в составе фиброцементогрунта;
- ориентация волокон, характеризуемая оптимальным углом 60° к плоскости сдвига;
- геометрические характеристики волокон, характеризуемые показателем отношения их длины к диаметру.

ГЛАВА 3
МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Структурно-логическая схема и методические основы проведения экспериментальных исследований

В соответствии с выводами и результатами изучения литературных источников, а также теоретических исследований установлено, что совокупность конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов комплексно влияют на транспортно-эксплуатационные качества лесовозных лесных дорог на основе фиброцементогрунтовых композиций. Учитывая изложенное, схема причинно-следственных связей Исикавы формирования и эксплуатации конструкций лесовозных лесных дорог на основе фиброцементогрунтовых композиций представлена на рис. 3.1. С учетом выявленных закономерностей, структурно-логическая схема построения диссертационной работы представлена на рис. 3.2. Конкретизированная схема экспериментальной части диссертационного исследования представлена на рис. 3.3.

Исследование физико-механических свойств конструкций лесовозных лесных дорог на основе фиброцементогрунтовых композиций в настоящей диссертационной работе проводилось в соответствии с известными нормативными методиками, дающими воспроизводимые результаты с меньшими вероятностью и величиной ошибок:

1. Оптимальная влажность и максимальная плотность каждого состава фиброцементогрунтовых смесей определялась в соответствии с ГОСТ Р 70456-2022. Для проведения исследований предварительно подготавливался 5% и 10% раствор полиэлектролита – полиДМДААХ, после чего расчетное количество раствора смешивалось с водой в количестве, необходимом для доведения фиброцементогрунтовой смеси до оптимальной влажности.

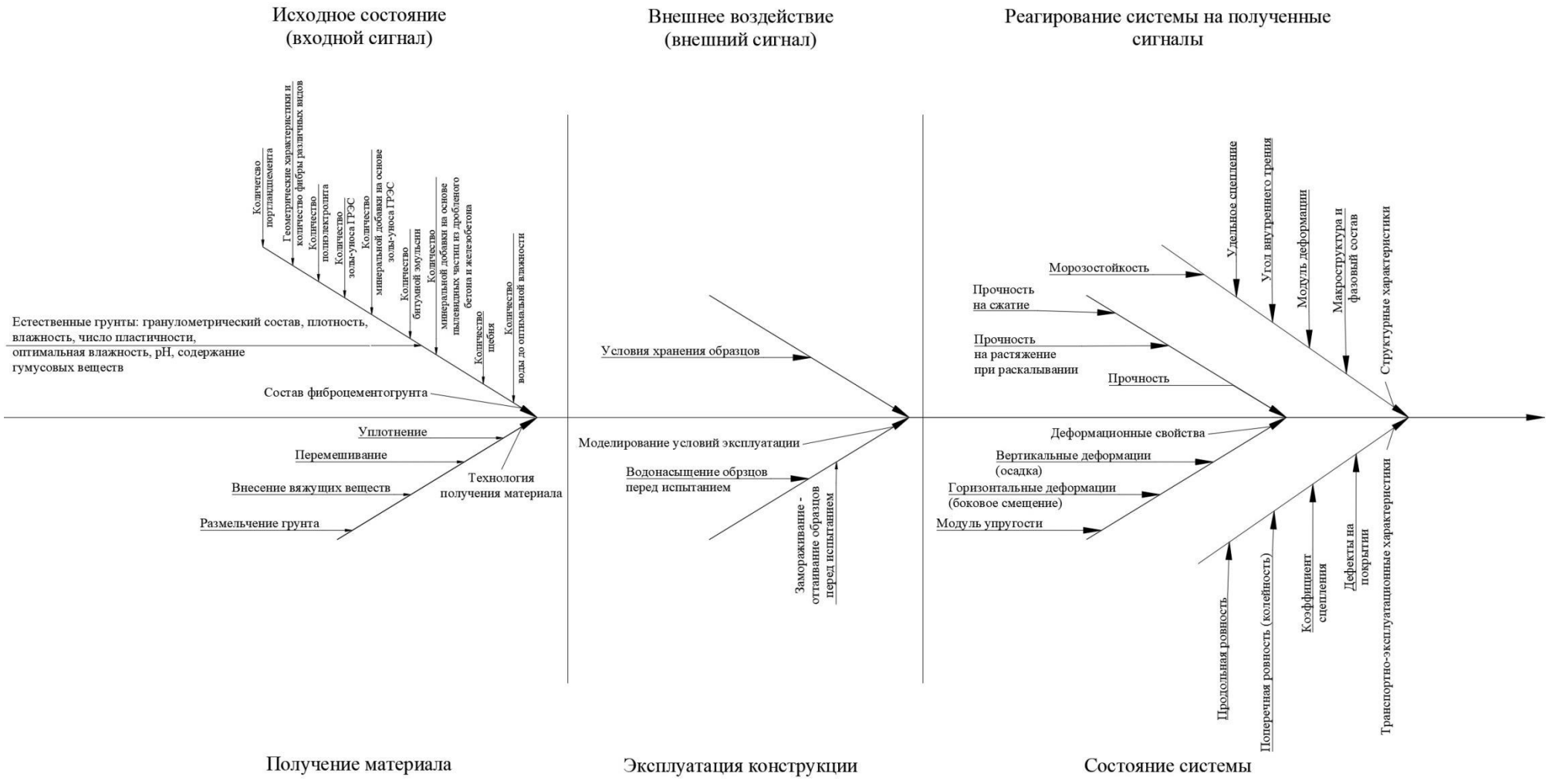


Рисунок 3.1 – Схема причинно-следственных связей Исикавы формирования и эксплуатации конструкций лесовозных лесных дорог на основе фиброцементогрунтовых композиций

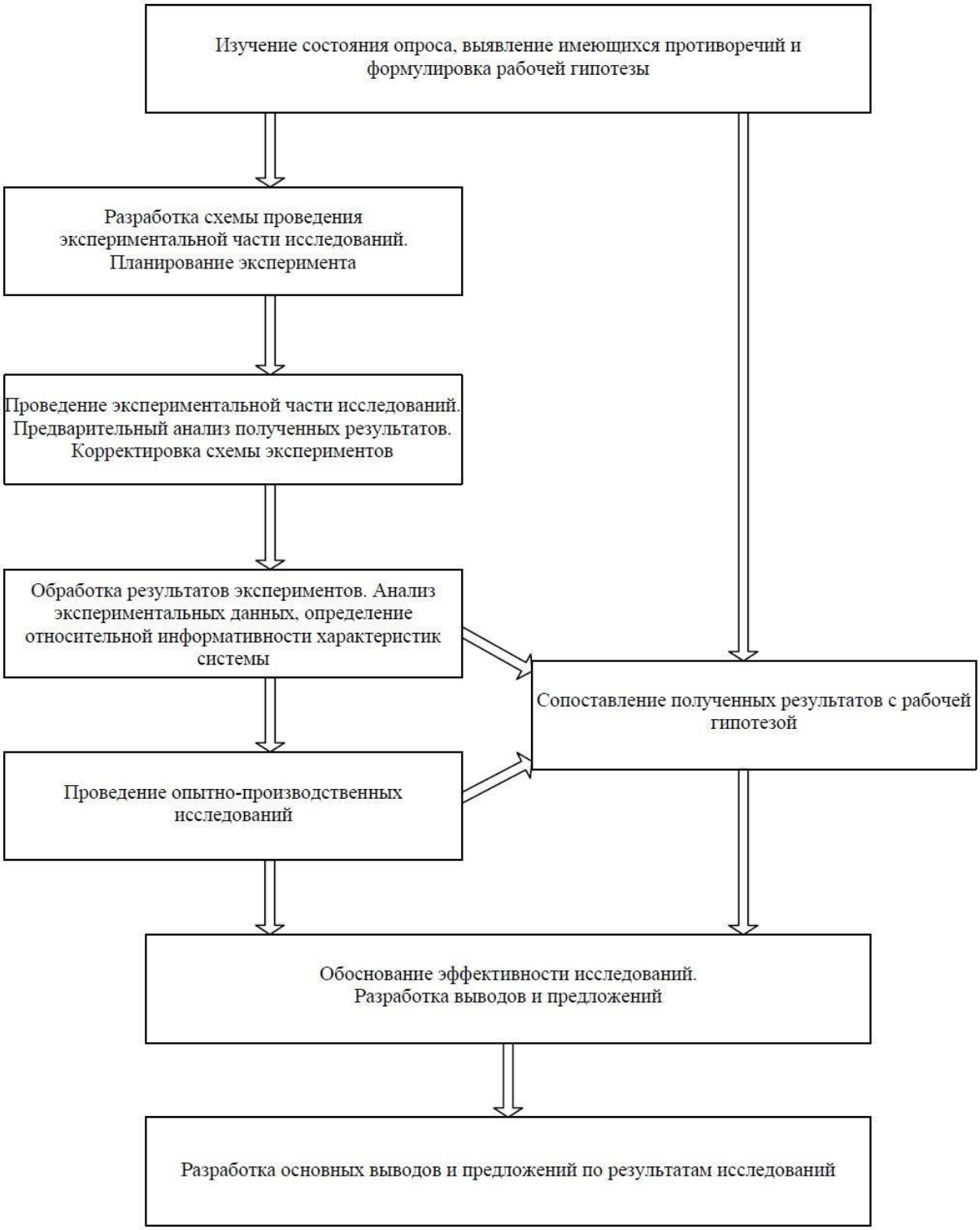


Рисунок 3.2 – Структурно-логическая схема построения диссертационной работы

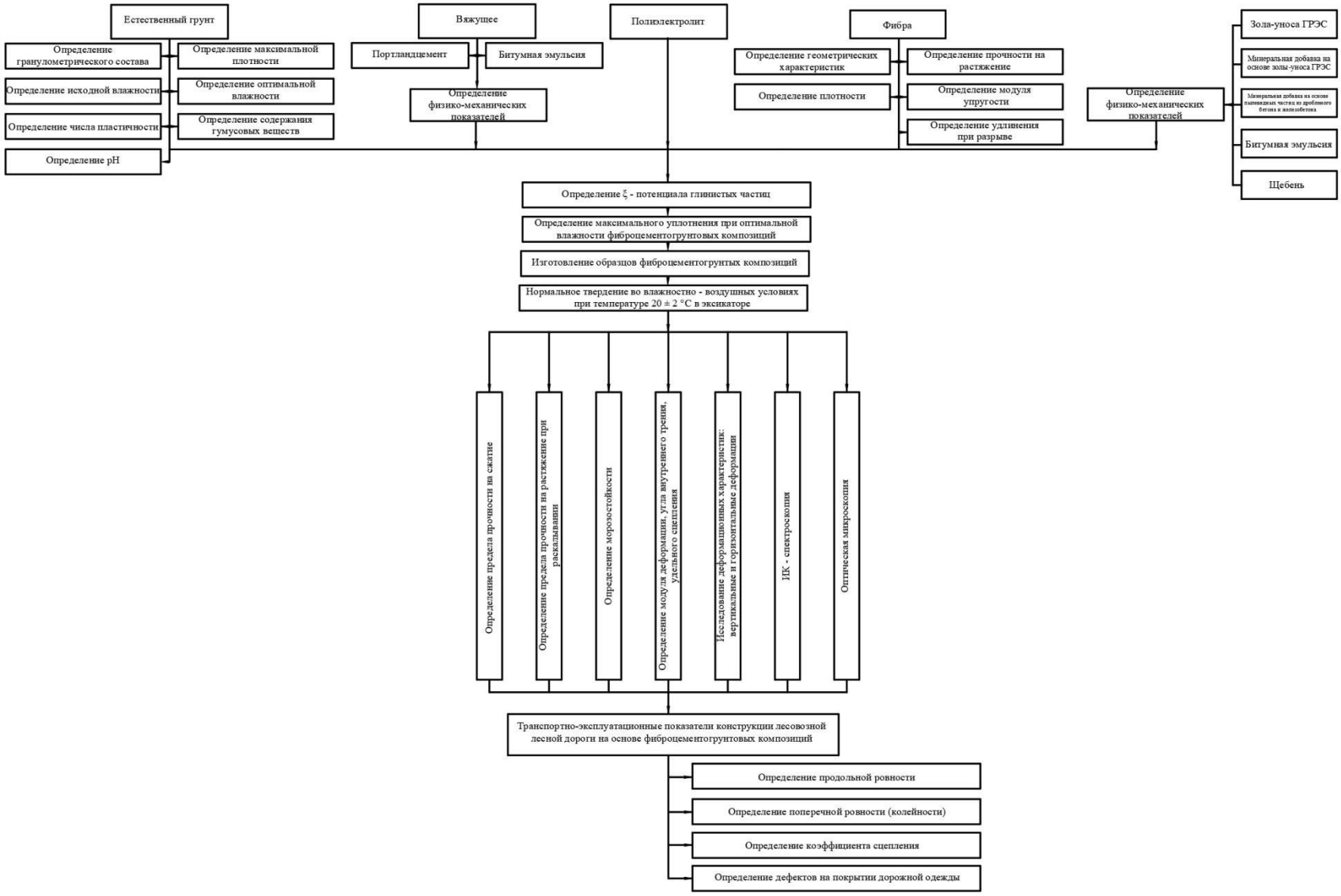


Рисунок 3.3 – Структурно-логическая схема экспериментальных исследований

3. Определение ζ – потенциала и средневзвешенного диаметра коллоидных частиц осуществлялось методом электрофоретического рассеяния света. Испытания проводились с различным содержанием полиэлектролита – полиДМДААХ на растворах глинистой суспензии при одинаковых пропорциях глины и воды.

4. Изготовление образцов для проведения лабораторных исследований производилось на уплотнителе Проктора типа А по ГОСТ Р 70456-2022 и ГОСТ Р 70452-2022, с применением формы типа А, количеством слоев при уплотнении – 5, количеством ударов на слой – 25.

5. Испытания фиброцементогрунтовых композиций по определению прочности на сжатие, на растяжение при раскалывании и морозостойкости проводились в соответствии с ГОСТ Р 70452-2022. Перед испытаниями образцы фиброцементогрунтовых композиций подвергались полному водонасыщению. Коэффициент морозостойкости определялся при 25 циклах замораживания – оттаивания образцов.

6. Исследования по изучению угла внутреннего трения и удельного сцепления проводились в соответствии с ГОСТ 12248.1-2020 по 3 образцам на каждый состав укрепленного грунта, нагруженных нормальной к плоскости среза нагрузкой, увеличиваемой ступенями: 0,1 МПа; 0,2 МПа; 0,3 МПа.

7. Исследования по изучению модуля деформации проводились в соответствии с ГОСТ 12248.3-2020.

Расчетное моделирование деформационных характеристик конструкций дорожной одежды лесовозных лесных дорог производилось с использованием программного комплекса геотехнических расчетов «PLAXIS 2D» (Bentley Systems Inc., США) по методу конечных элементов. Расчет прочностных показателей конструкций дорожной одежды лесовозных лесных дорог производился с использованием программного комплекса «КРЕДО РАДОН 4.2» (Кредо-Диалог СП ООО, Беларусь) в соответствии с методикой ГОСТ Р 71404-2024.

3.2 Характеристика оборудования и контрольно-измерительной аппаратуры

В целях получения точных и достоверных данных, исследования в настоящей диссертационной работе проводились на поверенном оборудовании и контрольно-измерительной аппаратуре на базе лабораторий: ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» кафедры «Автомобильных дорог, мостов и тоннелей», кафедры «Физико-химической технологии защиты биосферы» и кафедры «Технологий целлюлозно-бумажных производств и переработки полимеров»; Уральского филиала ОАО «ГИПРОДОРНИИ»; Уральского филиала ФАУ «РОСДОРНИИ», ООО «Уральский дорожный научно-исследовательский центр», ГКУ Свердловской области «Управление автомобильных дорог» и ООО «УРАЛТИСИЗ».

При выполнении исследований использовалось следующее оборудование:

1. Определение ζ – потенциала и средневзвешенного диаметра коллоидных частиц проводилось на приборе Particle Size Analyzer Brookhaven Zeta Plus фирмы «Brookhaven» (США).

2. Подготовка исходных компонентов и приготовление фиброцементогрунтовых смесей осуществлялось с использованием: шкафа сушильного ШСП-0,25-60 (Россия); электропечи лабораторной SNOL 7,2/900 (Россия); весов лабораторных ВЛТЭ-1100 (Россия), ВЛТЭ-2200 (Россия); весов электронных ТВ-30К-МВ (Россия).

3. Формование образцов производилось на автоматическом уплотнителе Проктора 10-18550 фирмы InfraTest (Германия) с применением формы типа А. Набор прочности и водонасыщение образцов осуществлялось в эксикаторах с водяным затвором при температуре 22±2 °С.

4. Испытания образцов по определению предела прочности на сжатие и предела прочности на растяжение при раскалывании проводились с использованием пресса испытательного ДТС-06-50/100 фирмы Testsystems (Россия).

5. При испытании на морозостойкость использовалась камера тепла-холода КТХ-74-65/165 (Россия).

6. Исследования по изучению угла внутреннего трения и удельного сцепления проводились на установке одноплоскостного среза ГТ 0.2.1 (Россия).

7. Исследования по изучению модуля деформации проводились на установке компрессионного и трехосного сжатия ГТ 1.3.11 (Россия).

8. Исследование фиброцементогрунтовых композиций, а также их исходных компонентов: портландцемента, естественного грунта и фибры, производилось на приборе ИК-Фурье спектрометр IRAffinity-1S (Shimadzu, Япония) с помощью приставки нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) Quest в диапазоне 4000 – 400 $см^{-1}$.

9. Исследования структуры фиброцементогрунтовых композиций проводились с помощью цифрового оптического микроскопа Levenhuk DTX 500 LCD (США) с увеличением от 20 до 500 крат и матрицей 5 Мп.

3.3 Исходные материалы и их характеристика

Естественные грунты

Лабораторные исследования фиброцементогрунтовых композиций проводились с использованием естественных грунтов, отобранных из земляного полотна лесовозных лесных дорог в Свердловской области на территории ГКУ СО «Алапаевское лесничество»; ГКУ СО «Карпинское лесничество» и ГКУ СО «Ирбитское лесничество». Отбор, упаковка, транспортирование и хранение грунтов проводилась в соответствии с требованиями ГОСТ 12071-2014. Виды и методика испытаний грунтов представлены в табл. 3.1. Характеристика грунтов представлена в табл. 3.5.

Таблица 3.1 – Виды и методика испытаний естественных грунтов

№ п/п	Виды испытаний	Методика испытаний
1	Гранулометрический состав	ГОСТ 12536-2014
2	Естественная влажность	ГОСТ 5180-2015
3	Естественная плотность	ГОСТ 5180-2015
4	Пределы пластичности	ГОСТ 5180-2015
5	Оптимальная влажность и максимальная плотность	ГОСТ Р 70456-2022
6	Кислотность водной вытяжки	ГОСТ 26423-85
7	Содержание органических (гумусовых) веществ	ГОСТ 23740-2016

Портландцемент

Для проведения лабораторных исследований использовался портландцемент ЦЕМ II/В-И 32,5Б по ГОСТ 31108-2020 производства ООО «СЛК Цемент» (г. Сухой Лог, Свердловская область). Минералогический и химический состав портландцементного клинкера представлен в табл. 3.2 и 3.3, физико-механические показатели портландцемента представлены в табл. 3.4 на основании данных, предоставленных предприятием – изготовителем.

Таблица 3.2 – Минералогический состав портландцементного клинкера

Название цемента	Алит	Белит	Трехкальциевый алюминат	Алюмоферит
	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
	Проценты			
Портландцемент ЦЕМ II/В-И 32,5Б производства ООО «СЛК Цемент»	61,7	14,9	5,6	12,6

Таблица 3.3 – Химический состав портландцементного клинкера

Название цемента	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	SO_3
	Проценты					
Портландцемент ЦЕМ II/В-И 32,5Б производства ООО «СЛК Цемент»	58,8	15,8	3,3	3,1	3,7	2,9

Таблица 3.4 – Физико-механические показатели портландцемента

№ п/п	Наименование показателей	Значение показателей портландцемента ЦЕМ II/В-И 32,5Б производства ООО «СЛК Цемент»	Требования ГОСТ 31108-2020, ГОСТ 30515-2013
1	Тонкость помола (остаток на сите № 009), %	0,6	не нормируется
2	Сроки схватывания: начало, мин. конец, мин.	 177 236	 не ранее 75 не нормируется
3	Равномерность изменения объема (расширение), мм	0,60	не более 10
4	Нормальная густота, %	25,0	не нормируется
5	Предел прочности при изгибе в возрасте 2 суток, МПа в возрасте 28 суток, МПа	 4,3 8,0	 не нормируется не нормируется
6	Предел прочности при сжатии в возрасте 2 суток, МПа в возрасте 28 суток, МПа	 17,9 43,3	 не менее 10 не менее 32,5 не более 52,5

Фибра

Учитывая изученный опыт дисперсного армирования конструкционных материалов, а также проведенные в настоящей диссертационной работе теоретические исследования, лабораторные и опытно-производственные эксперименты фиброцементогрунтовых композиций проводились на основе низкомодульных волокон фибры различных видов.

1. Фибра на основе базальтового волокна из отходов производства теплоизоляционных плит «Тизол» в г. Нижняя Тура Свердловской области.

Горные породы базальтовой группы являются сырьем для производства базальтовых теплоизоляционных плит. Технологический процесс получения теплоизоляционных плит заключается в расплавлении сырья, извлечении базальтовых волокон, формировании минераловатного ковра, термообработке, резке и упаковке продукции.

Таблица 3.5 – Характеристика естественных грунтов

№ п/п	Наименование грунта	Место отбора	Гранулометрический состав, %, размерами, мм				Естественная плотность, г/см^3	Естественная влажность, %	Число пластичности	Оптимальная влажность, %	Максимальная плотность сухого грунта, г/см^3	pH грунта	Содержание гумусовых веществ, %
			Более 2	2-0,05	0,05-0,002	Менее 0,002							
1	Суглинок тяжелый песчанистый	ГКУ СО «Карпинское лесничество»	15,1	48,3	27,4	9,2	1,48	15	13	15	1,74	6,5	1,8
2	Суглинок тяжелый пылеватый	ГКУ СО «Ирбитское лесничество»	12,9	39,5	34,7	12,9	1,49	16	15	17	1,77	6,4	1,5
3	Суглинок легкий пылеватый	ГКУ СО «Алапаевское лесничество»	25,6	38,6	31,4	4,4	1,46	12	11	14	1,69	6,1	1,7
4	Суглинок тяжелый пылеватый	ГКУ СО «Алапаевское лесничество»	13,39	37,71	36,7	12,2	1,49	17	15	18	1,76	6,2	1,6

Отходы в виде базальтовых волокон образуются на различных стадиях изготовления теплоизоляционных плит, являются биологически неактивными, имеют высокую прочность на растяжение, химическую стойкость в кислотно-щелочных средах, устойчивы к высоким температурам и огню. Характеристики используемой в исследованиях фибры на основе базальтового волокна из отходов производства теплоизоляционных плит «Тизол» в г. Нижняя Тура Свердловской области приведены в табл. 3.6, на основании данных лабораторных испытаний ООО «Уральский дорожный научно-исследовательский центр» при непосредственном участии автора [107].

Таблица 3.6 – Характеристики фибры на основе базальтового волокна из отходов производства теплоизоляционных плит «Тизол» в г. Нижняя Тура Свердловской области

№ п/п	Характеристики фибры на основе базальтового волокна из отходов производства теплоизоляционных плит	Значение
1	Длина волокна, мм	0,001 – 3,0
2	Диаметр волокна, мкм	1,0
3	Плотность, кг/м^3	2541,1

2. Базальтовая фибра.

Характеристики используемой в исследованиях базальтовой фибры приведены в табл. 3.7, на основании данных лабораторных испытаний ООО «Уральский дорожный научно-исследовательский центр» при непосредственном участии автора [107].

Таблица 3.7 – Характеристики базальтовой фибры

№ п/п	Характеристики базальтовой фибры	Значение
1	Длина волокна, мм	5 – 45 мм
2	Диаметр волокна, мкм	17
3	Плотность, кг/м^3	2653,0
4	Прочность на растяжение, МПа	2676,8
5	Модуль упругости, МПа	8254,0
6	Удлинение при разрыве, %	2,2

3. Стеклянная фибра.

Характеристики используемой в исследованиях стеклянной фибры приведены в табл. 3.8, на основании данных лабораторных испытаний ООО «Уральский дорожный научно-исследовательский центр» при непосредственном участии автора [107].

Таблица 3.8 – Характеристики стеклянной фибры

№ п/п	Характеристики стеклянной фибры	Значение
1	Длина волокна, мм	5 – 45 мм
2	Диаметр волокна, мкм	24,0
3	Плотность, кг/м^3	2574,1
4	Прочность на растяжение, МПа	2214,9
5	Модуль упругости, МПа	7374,4
6	Удлинение при разрыве, %	2,1

4. Полипропиленовая фибра.

Характеристики используемой в исследованиях полипропиленовой фибры приведены в табл. 3.9, на основании данных лабораторных испытаний ООО «Уральский дорожный научно-исследовательский центр» при непосредственном участии автора [107].

Таблица 3.9 – Характеристики полипропиленовой фибры

№ п/п	Характеристики полипропиленовой фибры	Значение
1	Длина волокна, мм	5 – 45 мм
2	Диаметр волокна, мкм	25
3	Плотность, кг/м^3	904,7
4	Прочность на растяжение, МПа	714,1
5	Модуль упругости, МПа	4741,4
6	Удлинение при разрыве, %	17,1

Полиэлектролит

Для проведения исследований различных составов фиброцементогрунтовых композиций применялся полиэлектролит – поли-N,N-диметил-N,N-диаллиламмоний хлорид (полиДМДААХ), являющийся побочным продуктом

производства синтетического глицерина, производимый под маркой ВПК-402 ООО «Научно-производственная «Камская химическая компания» (г. Пермь, Пермский край) в соответствии с ТУ 2227-184-00203312-98 изм. 1, 2, 3, 4.

ПолиДМДААХ – высокомолекулярный сильноосновной катионный полимер линейно-циклической структуры. Данный полимер получают путем путем радикальной полимеризации мономера диметилдиаллиламмонийхлорида, который изготавливают из аллилхлорида и диметиламина нагреванием в щелочной среде (рис. 3.4) [161].

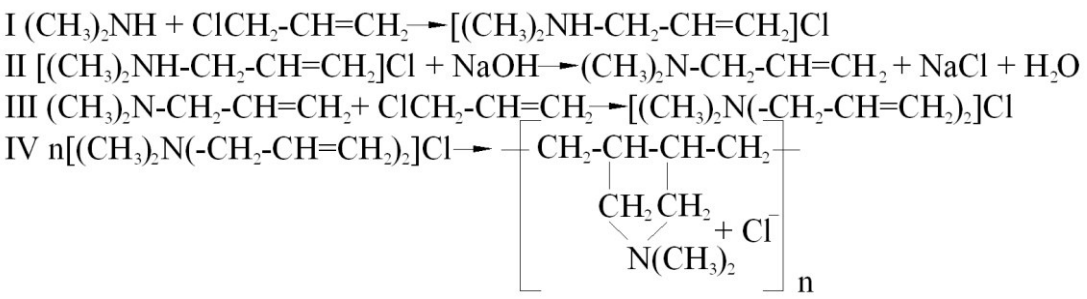


Рисунок 3.4 – Химические реакции синтеза полиДМДААХ

Молекулярная масса полиДМДААХ: $3 \cdot 10^5$. Химическая формула элементарной ячейки: $-(C_8H_{16}NCl)_n-$. Молекулярная масса элементарной ячейки: 161,7 а.е.м. Физико-механические свойства полиДМДААХ представлены в табл. 3.10 на основании данных, предоставленных предприятием – изготовителем.

Таблица 3.10 – Физико-химические свойства полиДМДААХ

№ п/п	Наименование показателя	Значение	
		Требуемый	Фактический
1	Внешний вид	Бесцветная до желтого цвета, однородная по консистенции жидкость без посторонних включений	
2	Массовая доля основного вещества, % не менее	25	37,3
3	Массовая доля хлористого натрия, %, не более	10	6
4	Плотность при 20°С, $г/см^3$	1,14 – 1,15	1,14
5	Вязкость, $мм^2/с$ не менее	2	2,5
6	Водородный показатель, pH	5-8	7,1

Зола-уноса ГРЭС

Зола-уноса ГРЭС представляет собой сухой тонкодисперсный материал, образуемый в результате сжигания твердого топлива и улавливаемый электрофильтрами. Для проведения исследований использовалась зола-уноса Рефтинской ГРЭС. Характеристики используемой в исследованиях золы-уноса Рефтинской ГРЭС приведены в табл. 3.11, табл. 3.12, табл. 3.13 на основании данных лабораторных испытаний ООО «Уральский дорожный научно-исследовательский центр» при непосредственном участии автора [108].

Таблица 3.11 – Гранулометрический состав золы-уноса Рефтинской ГРЭС

Гранулометрический состав, % (Частные остатки на ситах)								
Всего > 2 мм	Фракции песка, мм				Всего песка	Фракции пыли, мм		Фракции глины, мм
	2 – 0,5	0,5 – 0,25	0,25 – 0,1	0,1 – 0,05		0,05 – 0,01	0,01 – 0,002	< 0,002
0,0	0,1	3,1	16,6	16,9	36,7	53,9	6,1	3,3

Таблица 3.12 – Физические свойства золы-уноса Рефтинской ГРЭС

№ п/п	Наименование показателя	Значение
1	Влажность, %	0,14
2	Потери при прокаливании, %	2,32
3	Насыпная плотность, кг/м^3	720
4	Истинная плотность, кг/м^3	2241

Таблица 3.13 – Показатели количественного химического состава золы-уноса Рефтинской ГРЭС

Определяемые элементы	Содержание, % по массе
Al_2O_3	31,56
SiO_2	56,92
CaO	4,40
Fe_2O_3	0,84

Минеральная добавка на основе золы-уноса ГРЭС

Минеральная добавка на основе золы-уноса ГРЭС получена в ООО «Уральский дорожный научно-исследовательский центр» с помощью сухой магнитной и коронно-электростатической сепарации золы-уноса Рефтинской ГРЭС при непосредственном участии автора [109]. При электросепарации происходит разделение материала на концентрат окислов металлов и минеральную часть. Минеральная часть использовалась в исследованиях в качестве минеральной добавки в составе фиброцементогрунтовых композиций. Характеристики используемой в исследованиях минеральной добавки на основе золы-уноса Рефтинской ГРЭС приведены в табл. 3.14, табл. 3.15, табл. 3.16 на основании данных лабораторных испытаний ООО «Уральский дорожный научно-исследовательский центр» при непосредственном участии автора [109].

Таблица 3.14 – Гранулометрический состав минеральной добавки на основе золы-уноса ГРЭС

Гранулометрический состав, % (Частные остатки на ситах)								
Всего > 2 мм	Фракции песка, мм				Всего песка	Фракции пыли, мм		Фракции глины, мм
	2 – 0,5	0,5 – 0,25	0,25 – 0,1	0,1 – 0,05		0,05 – 0,01	0,01 – 0,002	< 0,002
0,0	0,0	3,4	18,3	18,6	40,3	59,7	0,0	0,0

Таблица 3.15 – Физические свойства минеральной добавки на основе золы-уноса ГРЭС

№ п/п	Наименование показателя	Значение
1	Влажность, %	0,14
2	Потери при прокаливании, %	2,34
3	Насыпная плотность, кг/м^3	718
4	Истинная плотность, кг/м^3	2235

Таблица 3.16 – Показатели количественного химического состава минеральной добавки на основе золы-уноса ГРЭС

Определяемые элементы	Содержание, % по массе
Al_2O_3	23,9
SiO_2	61,1
CaO	5,60
Fe_2O_3	0,65

Битумная эмульсия

Исследования составов фиброцементогрунтовых композиций с добавкой битумной эмульсии проводились с использованием катионной битумной эмульсии марки ЭБДК С по ГОСТ Р 58952.1-2020, производства АБЗ «Исток» (Свердловская область, Белоярский район, промышленный район «Прохладный»). Характеристики применяемой в исследованиях битумной эмульсии марки ЭБДК С приведены в табл. 3.17 на основании данных, предоставленных предприятием – изготовителем.

Таблица 3.17 – Характеристики битумной эмульсии марки ЭБДК С

Наименование показателя	Нормативная документация на методы испытаний	Фактические значения	Требования ГОСТ Р 58952.1-2020
Индекс распада	ГОСТ Р 58952.4-2020	228	201-260
Содержание вяжущего с эмульгатором, %	ГОСТ Р 58952.5-2020	50	46-65
Условная вязкость (50 мл, 40°С, диаметр отверстия 4 мм) С, не более	ГОСТ Р 58952.6-2020	5	60
Остаток на сите 0,14 мм, % не более	ГОСТ Р 58952.7-2020	0,10	0,25
Остаток на сите 0,14 мм, после хранения 7 суток, %, не более	ГОСТ Р 58952.8-2020	0,15	0,30
Устойчивость к расслоению, при хранении 7 суток, %, не более	ГОСТ Р 58952.9-2020	2	5
Адгезия к минеральному материалу, %, не менее	ГОСТ Р 58952.10-2020	90	50

Минеральная добавка на основе пылевидных частиц из дробленого бетона и железобетона

Минеральная добавка представляет собой порошок, размером частиц менее 0,05 мм, полученный путем рассева из вторичного бетона и железобетона. Работы по получению вторичных инертных материалов из бетона и железобетона проводились ООО «Ремонтно-строительная группа» (г. Екатеринбург) с помощью дробильного ковша в рамках научно-исследовательской работы [110] при непосредственном участии автора. Характеристики используемой в исследованиях минеральной добавки на основе пылевидных частиц из дробленого бетона и железобетона приведены в табл. 3.18, 3.19 на основании данных лабораторных испытаний ООО «Уральский дорожный научно-исследовательский центр» при непосредственном участии автора [110].

Таблица 3.18 – Гранулометрический состав минеральной добавки на основе пылевидных частиц из дробленого бетона и железобетона

Гранулометрический состав, % (Частные остатки на ситах)		
Фракции, мм		
0,05 – 0,01	0,01 – 0,002	< 0,002
77,8	17,4	4,8

Таблица 3.19 – Физические свойства минеральной добавки на основе пылевидных частиц из дробленого бетона и железобетона

№ п/п	Наименование показателя	Значение
1	Удельная поверхность, $см^2/г$	2747
2	Влажность, %	0,37
3	Потери при прокаливании, %	0,71
4	Насыпная плотность, $кг/м^3$	1151
5	Истинная плотность, $кг/м^3$	2714
6	Кислотность, pH	12,1

Щебень

Исследования составов фибробитумоцементогрунтовых композиций проводились с использованием щебня фракции 16-31,5 мм по ГОСТ 32703-2014

марки по дробимости не ниже М1000, произведенного на Северном участке Горнощитского месторождения серпентинитов ООО «Горнощитский щебень».

Вода

Для приготовления фиброцементогрунтовых смесей в рамках исследований в соответствии с требованиями ГОСТ Р 70452-2022 использовалась питьевая вода по ГОСТ 51232-98.

3.4 Методика статистической обработки экспериментальных данных

С целью получения достоверных результатов лабораторных экспериментов были выполнены поисковые исследования по установлению минимально необходимого числа параллельных образцов при определении физико-механических показателей фиброцементогрунтовых композиций: предела прочности на сжатие и предела прочности на растяжение при раскалывании. Статистическая обработка полученных экспериментальных данных выполнялась по известным методикам для малого числа наблюдений [4, 5, 92]. Определение минимально необходимого числа параллельных образцов для каждого значения определяемого показателя представлено в приложении 1.

На основании полученных данных установлено, что для получения достоверных результатов лабораторных экспериментов по определению показателей предела прочности на сжатие и предела прочности на растяжение при раскалывании фиброцементогрунтовых композиций достаточно 3 образца.

С целью создания экспериментально-статистических моделей исследуемых процессов и их анализа использовалось математическое планирование эксперимента (DOE), состоящее из следующих этапов:

1. Выбор и обоснование план эксперимента.

2. Проведение экспериментов в соответствии с выбранным планом и необходимым количеством повторов.

3. Математическая обработка результатов экспериментов с целью получения регрессионных зависимостей.

4. Анализ полученных зависимостей.

Для двух переменных факторов, принимаемых в исследованиях физико-механических характеристик фиброцементогрунтовых композиций, принят полный факторный план $3^{(2)}$ эксперимента.

Для трех переменных факторов, принимаемых в исследованиях физико-механических характеристик фиброцементогрунтовых композиций, принят трехфакторный план Бокса $B_{3,}$ включающий 14 опытов, который обладает приемлемыми статистическими характеристиками при небольшом числе опытов [122, 124]. В соответствии с планом B_3 экспериментов, матрица плана в безразмерных кодированных величинах представлена в табл. 3.20.

Таблица 3.20 – Матрица планирования экспериментов по плану B_3

№ опыта, i	Кодированные значения факторов		
	X_1	X_2	X_3
1	1	1	1
2	-1	1	1
3	1	-1	1
4	-1	-1	1
5	1	1	-1
6	-1	1	-1
7	1	-1	-1
8	-1	-1	-1
9	1	0	0
10	-1	0	0
11	0	1	0
12	0	-1	0
13	0	0	1
14	0	0	-1

Для четырех переменных факторов, принимаемых в исследованиях физико-механических характеристик фиброцементогрунтовых композиций, принят дробный факторный план $3^{(4-1)}$. В соответствии с дробным факторным планом

$3^{(4-1)}$ экспериментов, матрица плана в безразмерных кодированных величинах представлена в табл. 3.21.

Таблица 3.21 – Матрица планирования экспериментов по плану $3^{(4-1)}$

№ опыта, i	Кодированные значения факторов			
	X_1	X_2	X_3	X_4
1	-1	-1	-1	-1
2	-1	-1	0	1
3	-1	-1	1	0
4	-1	0	-1	1
5	-1	0	0	0
6	-1	0	1	-1
7	-1	1	-1	0
8	-1	1	0	-1
9	-1	1	1	1
10	0	-1	-1	1
11	0	-1	0	0
12	0	-1	1	-1
13	0	0	-1	0
14	0	0	0	-1
15	0	0	1	1
16	0	1	-1	-1
17	0	1	0	1
18	0	1	1	0
19	1	-1	-1	0
20	1	-1	0	-1
21	1	-1	1	1
22	1	0	-1	-1
23	1	0	0	1
24	1	0	1	0
25	1	1	-1	1
26	1	1	0	0
27	1	1	1	-1

Статистический анализ и визуализация полученных результатов лабораторных исследований осуществлялось в программном комплексе Statistica 10 (TIBCO Software Inc., США). Для изучения связи между зависимой и независимыми переменными проводился регрессионный анализ. Для оценки значимости полученных коэффициентов регрессионного уравнения использовался t-критерий Стьюдента. Кроме того, исследовалась значимость

регрессии и адекватность построенной модели исходным данным. Для оценки степени адекватности построенной модели проводился анализ остатков модели (разность между наблюдаемыми значениями исследуемого показателя и предсказываемыми) при помощи нормальной вероятности исследуемого показателя. Адекватность уравнения регрессии эксперименту проверялась по F-критерию Фишера [6].

3.5 Выводы по третьей главе

1. На основе результатов исследований комплексного влияния конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов на транспортно-эксплуатационные качества дорожных покрытий разработана схема причинно-следственных связей Исикавы формирования и эксплуатации лесовозных лесных дорог на основе фиброцементогрунтовых композиций. С учетом выявленных закономерностей созданы структурно-логическая схема построения диссертационной работы и конкретизированная схема экспериментальной части исследований. На основе полученных схем представлена методика проведения экспериментальных исследований, характеристика применяемого оборудования и контрольно-измерительной аппаратуры.

2. Свойства исходных компонентов в первую очередь влияют на рецептурные характеристики и качественные показатели фиброцементогрунтовых композиций. В связи с этим, представлены методики и результаты лабораторных исследований свойств исходных компонентов фиброцементогрунтовых композиций: естественных грунтов, портландцемента, фибры различных видов, полиэлектролита – полиДМДААХ, золы-уноса ГРЭС, минеральной добавки на основе золы-уноса ГРЭС, битумной эмульсии, минеральной добавки на основе пылевидных частиц из дробленого бетона и железобетона, щебня и воды.

3. На основании предварительных поисковых исследований установлено, что для получения достоверных результатов лабораторных экспериментов по определению показателей предела прочности на сжатие и предела прочности на

растяжение при раскалывании фиброцементогрунтовых композиций достаточно 3 образца.

4. С целью создания экспериментально-статистических моделей исследуемых процессов и их анализа использовалось математическое планирование эксперимента (DOE). В исследованиях физико-механических характеристик фиброцементогрунтовых композиций для двух переменных факторов принят полный факторный план $3^{(2)}$ эксперимента, для трех переменных факторов – трехфакторный план Бокса B_3, для четырех переменных факторов – дробный факторный план $3^{(4-1)}$. Для проведения статистического анализа и визуализации полученных результатов лабораторных исследований использован программный комплекс Statistica 10 (TIBCO Software Inc., США).

ГЛАВА 4
ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ФИБРОЦЕМЕНТОГРУНТОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ В КОНСТРУКЦИЯХ ЛЕСОВОЗНЫХ ЛЕСНЫХ ДОРОГ

4.1 Прочностные показатели и морозостойкость фиброцементогрунтовых композиций на основе базальтовых волокон

С целью создания и анализа экспериментально-статистических моделей исследования прочностных показателей и морозостойкости фиброцементогрунтовых композиций на основе базальтовых волокон использовалось математическое планирование эксперимента (DOE). В качестве критериев исследования приняты: предел прочности на сжатие; предел прочности на растяжение при раскалывании; коэффициент морозостойкости.

Прочностные показатели и морозостойкость фиброцементогрунтовых композиций определялись по стандартной методике ГОСТ 70452-2022, при соблюдении единых требований проведения экспериментальных исследований и характеристик исходных материалов (см. главу 3). В качестве переменных факторов при определении прочностных показателей были приняты следующие: длина базальтового волокна; содержание базальтового волокна; содержание портландцемента; число пластичности глинистого грунта.

При определении коэффициента морозостойкости в составе фиброцементогрунтовых смесей использовалось базальтовое волокно длиной 25 мм и портландцемент в количестве 8 % от массы сухого грунта. В качестве переменных факторов были приняты: содержание базальтового волокна и число пластичности глинистого грунта.

Учитывая изложенное, целевые функции имеют вид:

$$R_{сж} = f(L_{бв}, Q_{бв}, Q_{пц}, I_р) \rightarrow max$$

$$R_р = f(L_{бв}, Q_{бв}, Q_{пц}, I_р) \rightarrow max$$

$$К_{мрз} = f(Q_{бв}, I_р) \rightarrow max$$

где: $R_{сж}$ – предел прочности на сжатие, МПа (y);

$R_р$ – предел прочности на растяжение при раскалывании, МПа (у);

$К_{мрз}$ – коэффициент морозостойкости, ед. (у);

$L_{бв}$ – длина базальтового волокна, мм (X_1);

$Q_{бв}$ – содержание базальтового волокна, % от массы сухого грунта (X_2);

$Q_{пц}$ – содержание портландцемента, % от массы сухого грунта (X_3);

$I_р$ – число пластичности грунта, ед. (X_4).

В соответствии с дробным факторным планом $3^{(4-1)}$ эксперимента по определению прочностных показателей фиброцементогрунтовых композиций, координаты центра плана, интервалы варьирования и уровни исследования приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1 – Уровни варьирования переменных факторов эксперимента по определению прочностных показателей фиброцементогрунтовых композиций

Факторы	Размерность	Обозначение факторов	Основной уровень	Шаг варьирования	Верхний уровень	Нижний уровень
			z_j^0	Δz_j	+1	-1
Длина базальтового волокна, $L_{бв}$	мм	X_1	25	20	45	5
Содержание базальтового волокна (от массы сухого грунта), $Q_{бв}$	%	X_2	2	2	4	0
Содержание портландцемента (от массы сухого грунта), $Q_{пц}$	%	X_3	6	2	8	4
Число пластичности грунта, $I_р$	ед.	X_4	13	2	15	11

В соответствии с полным факторным планом $3^{(2)}$ эксперимента по определению коэффициента морозостойкости фиброцементогрунтовых композиций координаты центра плана, интервалы варьирования и уровни исследования приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2 – Уровни варьирования переменных факторов эксперимента по определению коэффициента морозостойкости фиброцементогрунтовых композиций

Факторы	Размер-ность	Обозна-чение факторов	Основ-ной уро-вень	Шаг варьиро-вания	Верхний уровень	Нижний уровень
			z_j^0	Δz_j	+1	-1
Содержание базальтового волокна (от массы сухого грунта), $Q_{бв}$	%	X_2	2	2	4	0
Число пластичности грунта, I_p	ед.	X_4	13	2	15	11

В ходе проведения и обработки результатов экспериментов получены уравнения регрессии со статистически значимыми их параметрами.

Уравнение регрессии предела прочности на сжатие в зависимости от переменных факторов в натуральных обозначениях имеет вид:

$$R_{сж} = -0{,}625 - 0{,}0003{L_{бв}}^2 - 0{,}089{Q_{бв}}^2 - 0{,}027{Q_{пц}}^2 + 0{,}433Q_{бв} + 0{,}839Q_{пц} + 0{,}018L_{бв} - 0{,}043I_p \quad (4.1)$$

Для более подробного исследования влияния факторов на результат экспериментально-статистической модели использован метод графической интерпретации. Графическая интерпретация уравнения регрессии выполнена в виде построенных поверхностей отклика (рис. 4.1 – 4.5), которые представляют собой объемную наглядную картину совместного влияния содержания компонентов фиброцементогрунтовой смеси на ее прочность на сжатие.

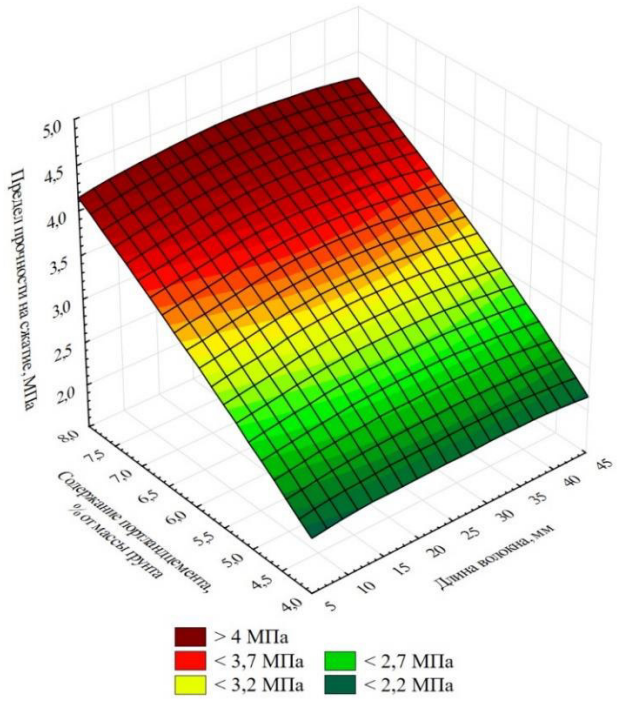


Рисунок 4.1 – Поверхность отклика предела прочности на сжатие в зависимости от длины волокна и содержания портландцемента

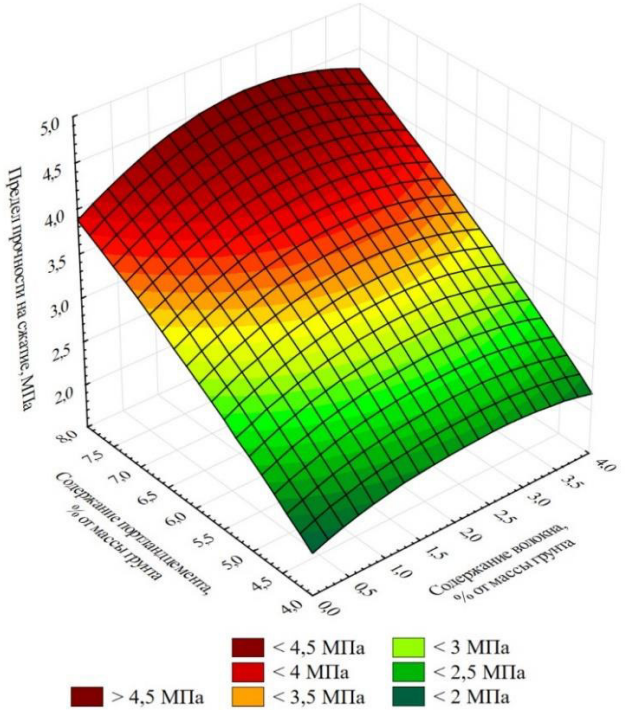


Рисунок 4.2 – Поверхность отклика предела прочности на сжатие в зависимости от содержания волокна и содержания портландцемента

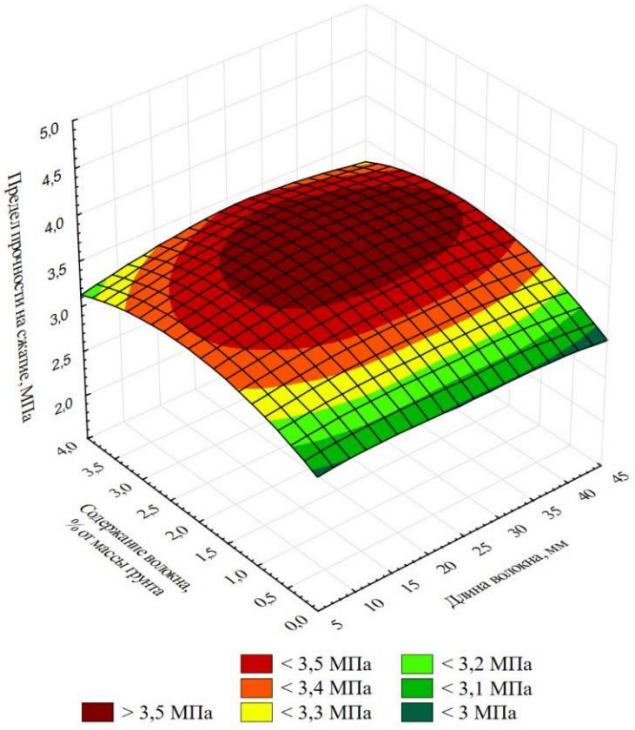


Рисунок 4.3 – Поверхность отклика предела прочности на сжатие в зависимости от длины и содержания волокна

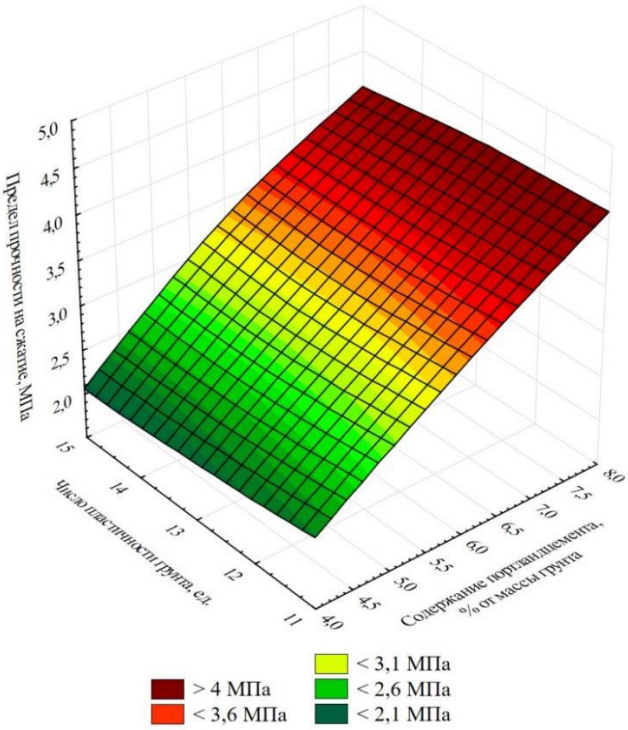


Рисунок 4.4 – Поверхность отклика предела прочности на сжатие в зависимости от содержания портландцемента и числа пластичности грунта

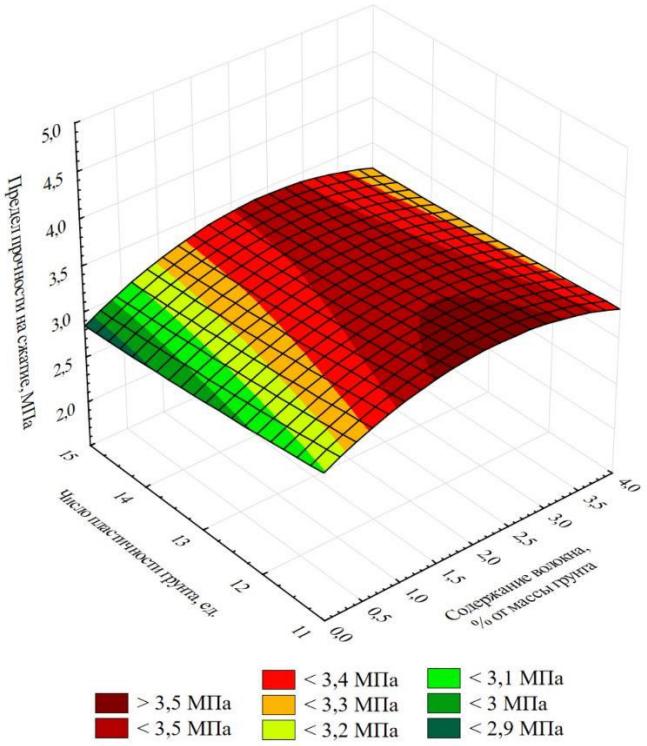


Рисунок 4.5 – Поверхность отклика предела прочности на сжатие в зависимости от содержания волокна и числа пластичности грунта

Анализ поверхностей отклика (рис. 4.1 – 4.5) показывает, что эффективность дисперсного армирования базальтовой фиброй фиброцементогрунтовых композиций зависит от содержания и длины волокон. Максимальные показатели предела прочности на сжатие фиброцементогрунтовых композиций достигаются при содержании базальтовой фибры 2,0 – 2,5 % от массы сухого грунта и длине волокон 25 мм.

Дисперсное армирование базальтовой фиброй позволяет увеличить предел прочности на сжатие фиброцементогрунтов в среднем на 21,4 % по сравнению с цементогрунтами, имеющими аналогичное содержание минерального вяжущего. Повышение количества добавки портландцемента с 4 % до 8 % приводит к увеличению предела прочности на сжатие фиброцементогрунтовых образцов в среднем на 95,7 %. При этом эффективность действия минерального вяжущего возрастает в среднем на 8,9 % при снижении числа пластичности исходных грунтов с 15 до 11. Дисперсное армирование базальтовыми волокнами позволяет

обеспечить стабильные максимальные показатели прочности на сжатие фиброцементогрунта, отличающиеся в среднем на 5,2 % при различных значениях числа пластичности глинистых грунтов.

Уравнение регрессии предела прочности на растяжение при раскалывании в зависимости от переменных факторов в натуральных обозначениях имеет вид:

$$R_{\text{р}} = 0{,}192 - 0{,}001{I_p}^2 - 0{,}028{Q_{\text{бв}}}^2 + 0{,}0005L_{\text{бв}}Q_{\text{бв}} + 0{,}006Q_{\text{бв}}Q_{\text{пц}} + 0{,}004Q_{\text{пц}}I_p + 0{,}096Q_{\text{бв}} + 0{,}039Q_{\text{пц}} \quad (4.2)$$

Графическая интерпретация уравнения регрессии выполнена в виде построенных поверхностей отклика (рис. 4.6 – 4.10), которые представляют собой объемную наглядную картину совместного влияния содержания компонентов фиброцементогрунтовой смеси на ее прочность на растяжение при раскалывании.

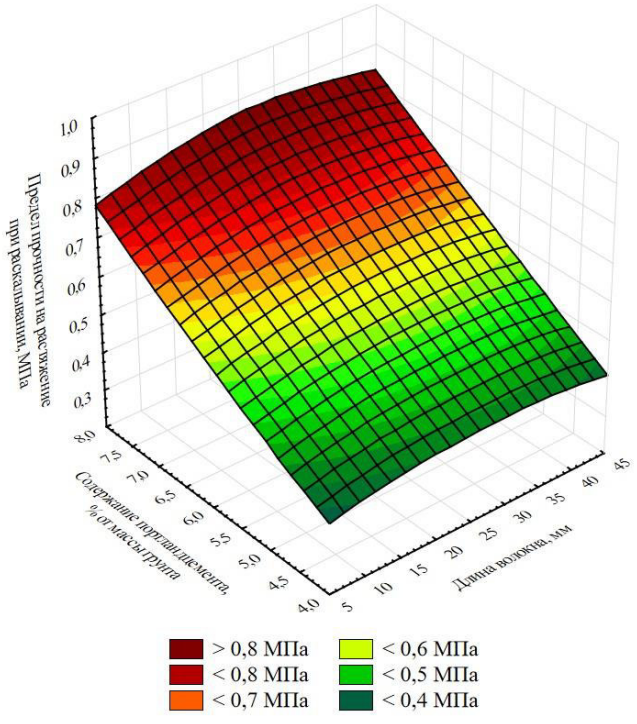


Рисунок 4.6 – Поверхность отклика предела прочности на растяжение при раскалывании в зависимости от длины волокна и содержания портландцемента

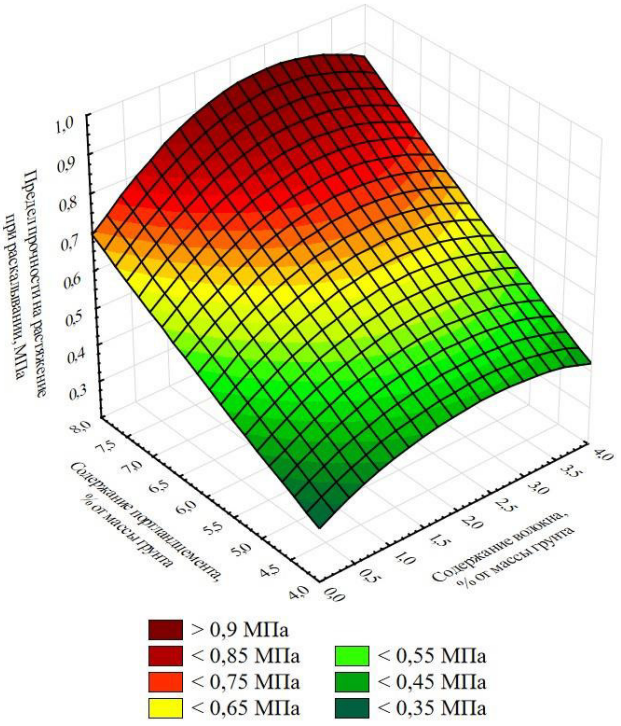


Рисунок 4.7 – Поверхность отклика предела прочности на растяжение при раскалывании в зависимости от содержания волокна и портландцемента

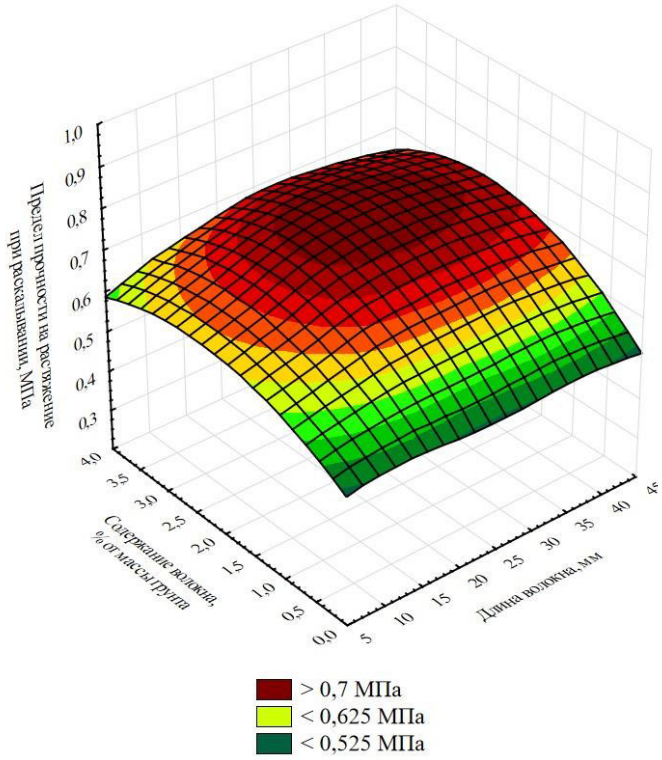


Рисунок 4.8 – Поверхность отклика предела прочности на растяжение при раскалывании в зависимости от длины и содержания волокна

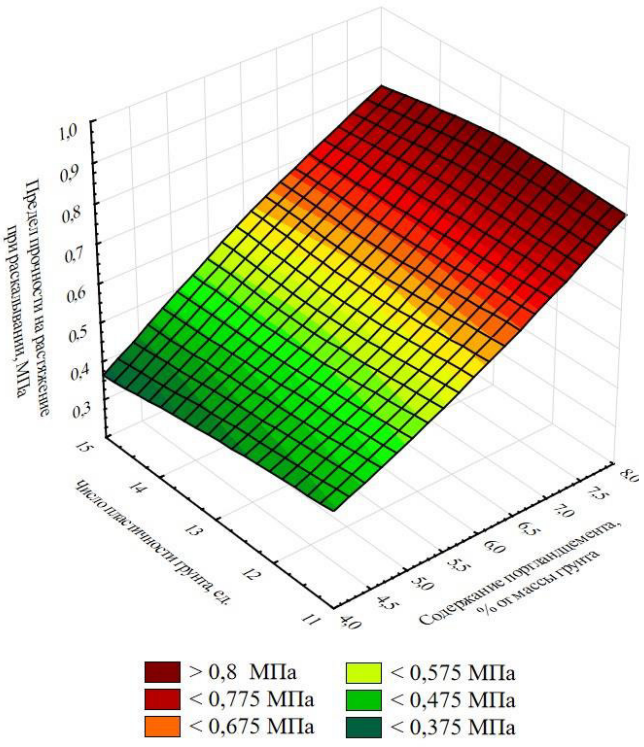


Рисунок 4.9 – Поверхность отклика предела прочности на растяжение при раскалывании в зависимости от содержания портландцемента и числа пластичности грунта

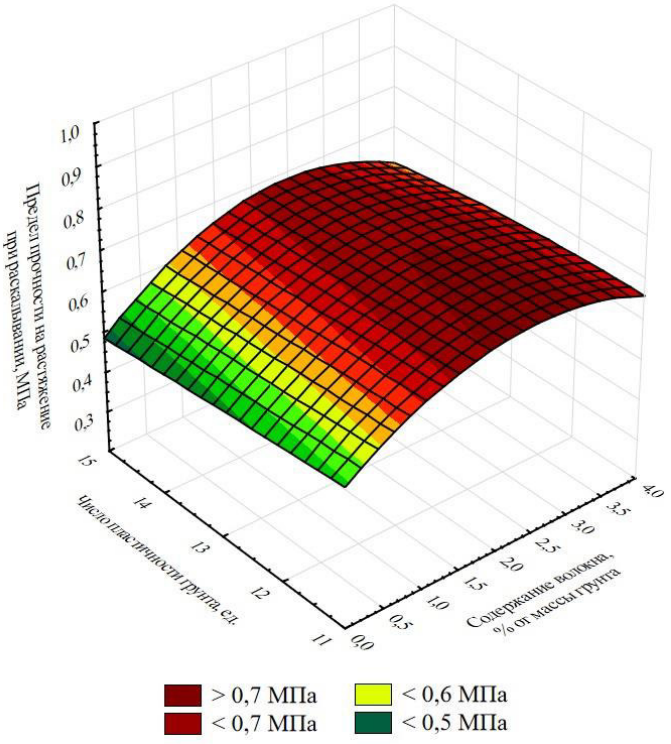


Рисунок 4.10 – Поверхность отклика предела прочности на растяжение при раскалывании в зависимости от содержания волокна и числа пластичности грунта

Анализ поверхностей отклика (рис. 4.6 – 4.8) показывает, что максимальные показатели предела прочности на растяжение при раскалывании фиброцементогрунтовых композиций достигаются при содержании базальтовой фибры 2,0 – 2,5 % от массы сухого грунта и длине волокон 25 мм.

Дисперсное армирование базальтовой фиброй позволяет увеличить предел прочности на растяжение при раскалывании фиброцементогрунтов в среднем на 42,4 % по сравнению с цементогрунтами, имеющими аналогичное содержание минерального вяжущего. Повышение количества добавки портландцемента с 4 % до 8 % приводит к увеличению предела прочности на растяжении при раскалывании фиброцементогрунтовых образцов в среднем на 104,2 %. При этом эффективность действия минерального вяжущего возрастает в среднем на 12,7 % при снижении числа пластичности исходных грунтов с 15 до 11. Дисперсное армирование базальтовыми волокнами позволяет обеспечить стабильные максимальные показатели прочности на растяжение при раскалывании фиброцементогрунта, отличающиеся в среднем на 5,5 % при различных значениях числа пластичности глинистых грунтов.

Уравнение регрессии коэффициента морозостойкости в зависимости от переменных факторов в натуральных обозначениях имеет вид:

$$R_{\text{мрз}} = 0{,}734 - 0{,}033{Q_{\text{бв}}}^2 - 0{,}0004{I_p}^2 + 0{,}153\, Q_{\text{бв}} \qquad (4.3)$$

Графическая интерпретация уравнения регрессии выполнена в виде построенной поверхности отклика (рис. 4.11), которая представляет собой объемную наглядную картину совместного влияния содержания компонентов фиброцементогрунтовой смеси на ее коэффициент морозостойкости. Анализ поверхности отклика показывает, что максимальные значения коэффициента морозостойкости (0,83 – 0,86) при фиксированных показателях числа пластичности грунта достигаются при содержании базальтовой фибры 2,0 – 2,5 % от массы сухого грунта.

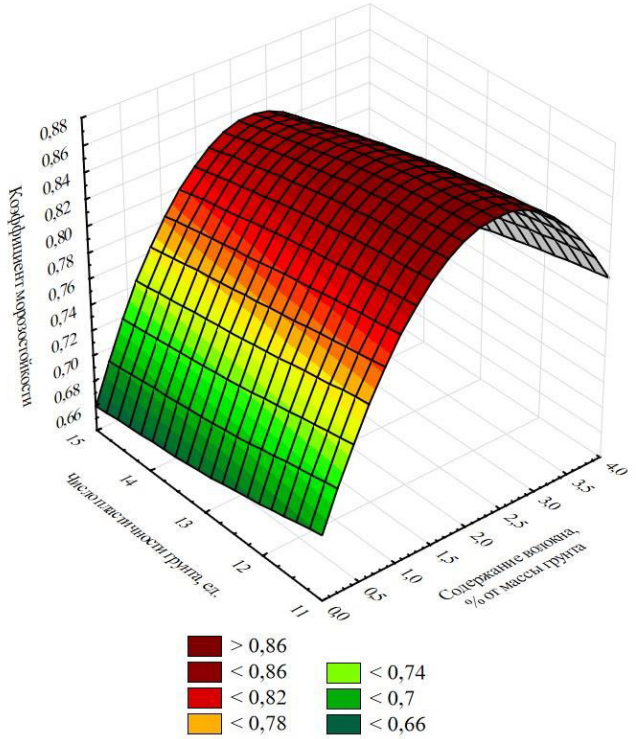


Рисунок 4.11 – Поверхность отклика коэффициента морозостойкости в зависимости от содержания волокна и числа пластичности грунта

Результаты исследования свидетельствуют, что глинистые грунты с числом пластичности от 11 до 15, укрепленные портландцементом в количестве 8 % от массы сухого грунта без добавки фибры достигают коэффициента морозостойкости в среднем 0,67, который менее нормативного значения – 0,8, предусмотренного ГОСТ 70452-2022 для применения в конструкциях лесовозных лесных дорог. При содержании базальтовых волокон 2,0 – 2,5 % от массы сухого грунта с длинной волокон 25 мм в фиброцементогрунтовых композициях аналогичного состава, коэффициент морозостойкости составляет в среднем 0,85 что на 25,7 % выше аналогичного показателя (0,67) у цементогрунтов без добавки базальтовых волокон.

4.2 Разработка и анализ интеллектуальных систем для определения прочностных показателей фиброцементогрунтовых композиций на основе базальтовых волокон

С целью создания интеллектуальных систем определения прочностных показателей фиброцементогрунтовых композиций в зависимости от содержания компонентов: портландцемента и базальтовой фибры с заданной длиной волокон, разработаны нейро-нечеткие сети ANFIS (Adaptive Network Neuron Fuzzy Interference System), в основе которых специфика задачи заключается в некоторой неопределенности входных и выходных параметров [147, 148, 267].

Для получения исходных данных, прочностные показатели фиброцементогрунтовых композиций определялись по стандартной методике ГОСТ 70452-2022, при соблюдении единых требований проведения экспериментальных исследований и характеристик исходных материалов (см. главу 3). Фиброцементогрунтовые композиции изготовлялись на основе природного грунта – суглинка тяжелого пылеватого, отобранного из земляного полотна лесовозной автомобильной дороги на территории ГКУ СО «Алапаевское лесничество» в Свердловской области (см. табл. 3.5).

В качестве входных параметров для построения нейро-нечетких сетей выбраны следующие: портландцемент (P), % от массы сухого грунта; базальтовое волокно (F), % от массы сухого грунта; длина базальтового волокна (L), мм.

При формировании входных лингвистических переменных в приведенных задачах использованы следующие терм-множества:

- $P = \{Min, M, Max\} = \{4, 6, 8\}$;
- $F = \{Min, M, Max\} = \{0, 2, 4\}$;
- $L = \{Min, M, Max\} = \{5, 25, 45\}$.

В качестве выходных переменных в нейронных сетях приняты: предел прочности на сжатие ($R_{сж}$) и предел прочности на растяжение при раскалывании ($R_{р}$). С учетом изложенного, формально постановка задач определения предела

прочности на сжатие примет вид (4.4) и определения предела прочности на растяжение при раскалывании примет вид (4.5):

$$R_{\text{сж}} = f(P, F, L) \quad (4.4)$$

$$R_{\text{р}} = f(P, F, L) \quad (4.5)$$

Пакет Neuro-Fuzzy Designer приложения Matlab позволил выполнить обучение методом обратного распространения ошибки. В разработанных нейронных сетях значение среднеквадратической ошибки RMSE равно 0,000002, что свидетельствует о их корректной настройке на этапе генерации.

Проверка адекватности нейронных сетей на примерах из тестовой выборки проводилась с использованием процедуры RuleViewer. Расчет абсолютной ошибки работы нейронной сети для тестовых выборок предела прочности на сжатие показал точность работы 99,368 % (средняя абсолютная ошибка работы нейронной сети MAPE = 0,632 %), что свидетельствует о ее корректной настройке на итоговом этапе проверки адекватности. Расчет абсолютной ошибки работы нейронной сети для тестовых выборок предела прочности на растяжение при раскалывании показал точность работы 93,153 % (средняя абсолютная ошибка работы нейронной сети MAPE = 4,847 %), что свидетельствует о ее корректной настройке на итоговом этапе проверки адекватности.

На основании анализа полученных с помощью интеллектуальных систем данных прочностных показателей фиброцементогрунта, содержащего 4 % портландцемента и базальтовое волокно (рис. 4.12, 4.13), установлено снижение прочности материала, дисперсно армированного фиброй со средней длиной волокон менее 10 мм. При средней длине волокон от 10 мм до 45 мм, добавка базальтовой фибры приводит к росту прочностных показателей фиброцементогрунта. Максимальные показатели прироста предела прочности на сжатие на 19 – 20 % и прироста предела прочности на растяжение при раскалывании на 37 – 38 % у фиброцементогрунта относительно цементогрунта без фибры установлен при содержании базальтовой фибры 2,0 – 2,5 % от массы сухого грунта при средней длине волокон 25 мм, что подтверждает результаты исследований, изложенных в разделе 4.1.

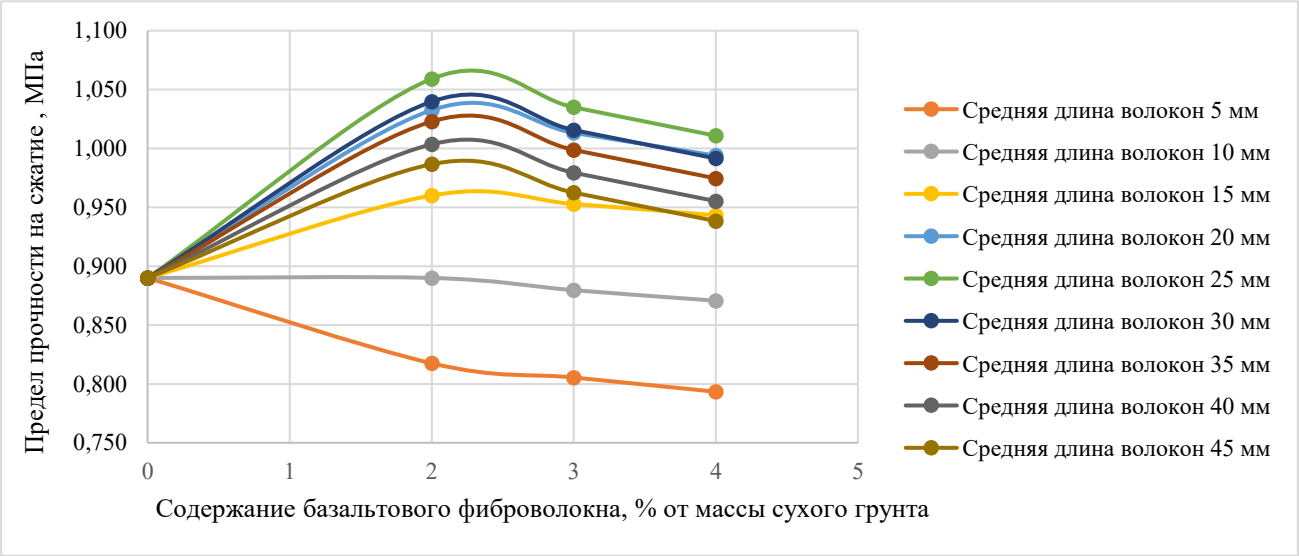


Рисунок 4.12 – Зависимость предела прочности на сжатие фиброцементогрунта, содержащего 4% портландцемента и базальтовую фибру с различной длиной волокон

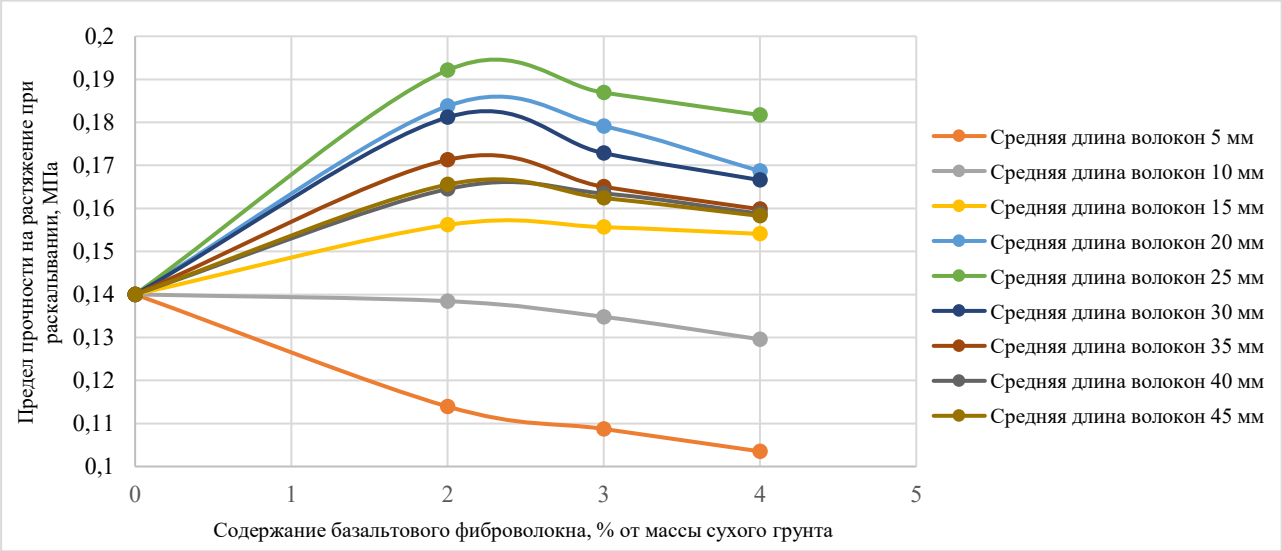


Рисунок 4.13 – Зависимость предела прочности на растяжение при раскалывании фиброцементогрунта, содержащего 4% портландцемента и базальтовую фибру с различной длиной волокон

Указанная зависимость снижения прочности фиброцементогрунта, содержащего 4 % портландцемента и волокна со средней длинной менее 10 мм объясняется эффектом недостаточной устойчивости цементогрунтовой матрицы для удержания фиброволокон небольшой длины в результате малого количества

минерального вяжущего в материале. Поэтому фиброволокна в данных условиях не воспринимают внешние нагрузки за счет своего осевого растяжения, и при этом лишь нарушают однородность цементогрунтовой матрицы, снижая прочностные показатели фиброцементогрунта. При увеличении содержания портландцемента более 4 % и средней длины фиброволокон более 10 мм в составе фиброцементогрунтовых смесей, возникают условия для эффективного дисперсного армирования материала и, соответственно, увеличение его прочностных показателей.

Графики зависимости прочностных показателей фиброцементогрунтовых композиций, содержащих 8 % портландцемента и базальтовое волокно (рис. 4.14, 4.15) показывают, что при средней длине фибры от 5 мм до 45 мм, ее добавка приводит к увеличению прочности материала. Максимальные показатели прироста предела прочности на сжатие на 21 – 22 % и прироста предела прочности на растяжение при раскалывании на 41 – 42 % у фиброцементогрунта относительно цементогрунта без фибры, наблюдается при содержании фиброволокна 2,0 –2,5 % от массы сухого грунта при длине волокон 25 мм.

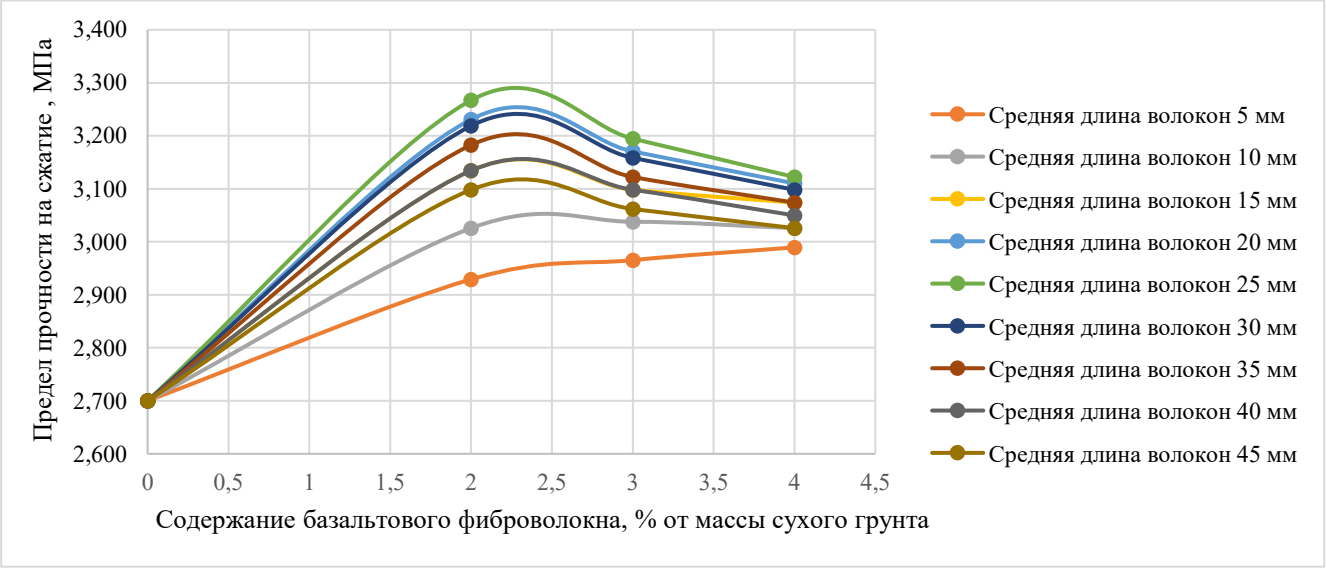


Рисунок 4.14 – Зависимость предела прочности на сжатие фиброцементогрунта, содержащего 8% портландцемента и базальтовую фибру с различной длиной волокон

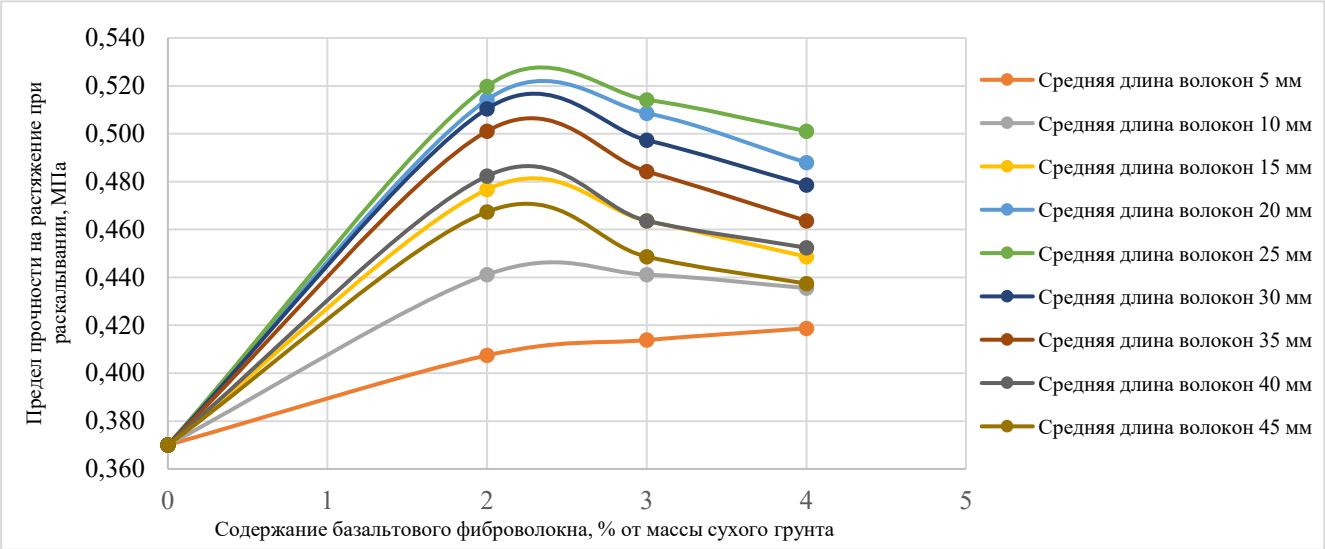


Рисунок 4.15 – Зависимость предела прочности на растяжение при раскалывании фиброцементогрунта, содержащего 8% портландцемента и базальтовую фибру с различной длиной волокон

На основе разработанных интеллектуальных систем возможно производить оперативный и высокоточный расчет прочностных показателей фиброцементогрунта в зависимости от содержания портландцемента 4 – 8 % от массы сухого грунта и базальтового фиброволокна от 0 – 4 % от массы сухого грунта с различной диной фибры от 5 мм до 45 мм в целях конструирования и расчета конструкций лесовозных лесных дорог. На основе полученных данных установлен показатель оптимального содержания добавки базальтовой фибры в составе фиброцементогрунтовых композиций: 2,0 – 2,5 % от массы сухого грунта при средней длине волокон 25 мм.

4.3 Прочностные показатели и морозостойкость фиброцементогрунтовых композиций на основе базальтовых волокон из отходов производства теплоизоляционных плит

В современных условиях устойчивое функционирование и развитие промышленного производства должно базироваться на принципах бережливого отношения к природным ресурсам и улучшении экологического состояния

природной среды. В этой связи, вторичное использование техногенных отходов в строительной сфере является актуальным.

Как известно [165], при промышленном производстве теплоизоляционных плит образуется большое количество отходов: некондиционная продукция, обрезки и т.п. Среднестатистическое количество отходов оценивается в среднем в объеме 8 – 10 % от всего объем производства продукции из минеральной ваты. Данные техногенные отходы занимают значительные площади на территории предприятий, наносят вред окружающей среде и подлежат утилизации или вторичной переработке.

Опыт отечественных и зарубежных производителей базальтовых теплоизоляционных плит показывает, что основным способом утилизации отходов является их возврат в производство в качестве вторичного сырья, путем переплавки в плавильных печах. Однако такой способ имеет существенный недостаток, связанный с низкой экономической эффективностью, поскольку отходы имеют низкую плотность в сравнении с плотностью исходной руды, при этом нарушается дозирование компонентов, снижается полезный объем загрузки печей и общая производительность технологической линии в целом.

Результаты проведенных лабораторных исследований (см. раздел 4.1) показали эффективность применения базальтовой фибры для дисперсного армирования фиброцементогрунтовых композиций. В связи с этим, проведение исследований дисперсного армирования фиброцементогрунтовых композиций фиброй на основе отходов производства базальтовых теплоизоляционных плит является актуальной задачей, позволяющей разработать технологию устройства конструкций лесовозных лесных дорог с использованием данного техногенного отхода.

С целью создания и анализа экспериментально-статистических моделей исследования прочностных показателей и морозостойкости фиброцементогрунтовых композиций на основе базальтовых волокон из отходов производства теплоизоляционных плит использовалось математическое планирование эксперимента (DOE). В качестве критериев исследования приняты:

предел прочности на сжатие; предел прочности на растяжение при раскалывании; коэффициент морозостойкости.

Прочностные показатели и морозостойкость фиброцементогрунтовых композиций определялись по стандартной методике ГОСТ 70452-2022, при соблюдении единых требований проведения экспериментальных исследований и характеристик исходных материалов (см. главу 3). Принимая во внимание, что фибра на основе базальтового волокна из отходов производства теплоизоляционных плит представляет собой смесь волокон различной длины от 0,001 до 3,0 мм, в качестве переменных факторов при определении прочностных показателей были приняты следующие: содержание волокна; содержание портландцемента; число пластичности глинистого грунта.

При определении коэффициента морозостойкости в составе фиброцементогрунтовых смесей использовался портландцемент в количестве 8 % от массы сухого грунта. В качестве переменных факторов были приняты: содержание волокна и число пластичности глинистого грунта.

Учитывая изложенное, целевые функции имеют вид:

$$R_{сж} = f(Q_{бв(тп)}, Q_{пц}, I_р) \rightarrow max$$

$$R_р = f(Q_{бв(тп)}, Q_{пц}, I_р) \rightarrow max$$

$$К_{мрз} = f(Q_{бв(тп)}, I_р) \rightarrow max$$

где: $R_{сж}$ – предел прочности на сжатие, МПа (y);

$R_р$ – предел прочности на растяжение при раскалывании, МПа (y);

$К_{мрз}$ – коэффициент морозостойкости, ед. (y);

$Q_{бв(тп)}$ – содержание базальтового волокна, % от массы сухого грунта (X_1);

$Q_{пц}$ – содержание портландцемента, % от массы сухого грунта (X_2);

$I_р$ – число пластичности грунта, ед. (X_3).

В соответствии с трехфакторным планом Бокса B_3 эксперимента по определению прочностных показателей фиброцементогрунтовых композиций, координаты центра плана, интервалы варьирования и уровни исследования приведены в табл. 4.3.

Таблица 4.3 – Уровни варьирования переменных факторов эксперимента по определению прочностных показателей фиброцементогрунтовых композиций

Факторы	Размерность	Обозначение факторов	Основной уровень	Шаг варьирования	Верхний уровень	Нижний уровень
			z_j^0	Δz_j	+1	-1
Содержание базальтового волокна (от массы сухого грунта), $Q_{бв(тп)}$	%	X_1	1,5	1,5	3,0	0
Содержание портландцемента (от массы сухого грунта), $Q_{пц}$	%	X_2	6	2	8	4
Число пластичности грунта, I_p	ед.	X_3	13	2	15	11

В соответствии с полным факторным планом $3^{(2)}$ эксперимента по определению коэффициента морозостойкости фиброцементогрунтовых композиций координаты центра плана, интервалы варьирования и уровни исследования приведены в табл. 4.4.

Таблица 4.4 – Уровни варьирования переменных факторов эксперимента по определению коэффициента морозостойкости фиброцементогрунтовых композиций

Факторы	Размерность	Обозначение факторов	Основной уровень	Шаг варьирования	Верхний уровень	Нижний уровень
			z_j^0	Δz_j	+1	-1
Содержание базальтового волокна (от массы сухого грунта), $Q_{бв(тп)}$	%	X_1	1,5	1,5	3,0	0
Число пластичности грунта, I_p	ед.	X_3	13	2	15	11

В ходе проведения и обработки результатов экспериментов получены уравнения регрессии со статистически значимыми их параметрами.

Уравнение регрессии предела прочности на сжатие в зависимости от переменных факторов в натуральных обозначениях имеет вид:

$$R_{сж} = -0{,}017 - 0{,}108{Q_{бв(тп)}}^2 + 0{,}376Q_{бв(тп)} + 0{,}618Q_{пц} - 0{,}009Q_{пц}I_p \qquad (4.6)$$

Для более подробного исследования влияния факторов на результат экспериментально-статистической модели использован метод графической интерпретации. Графическая интерпретация уравнения регрессии выполнена в виде построенных поверхностей отклика (рис. 4.16 – 4.18), которые представляют собой объемную наглядную картину совместного влияния содержания компонентов фиброцементогрунтовой смеси на ее прочность на сжатие.

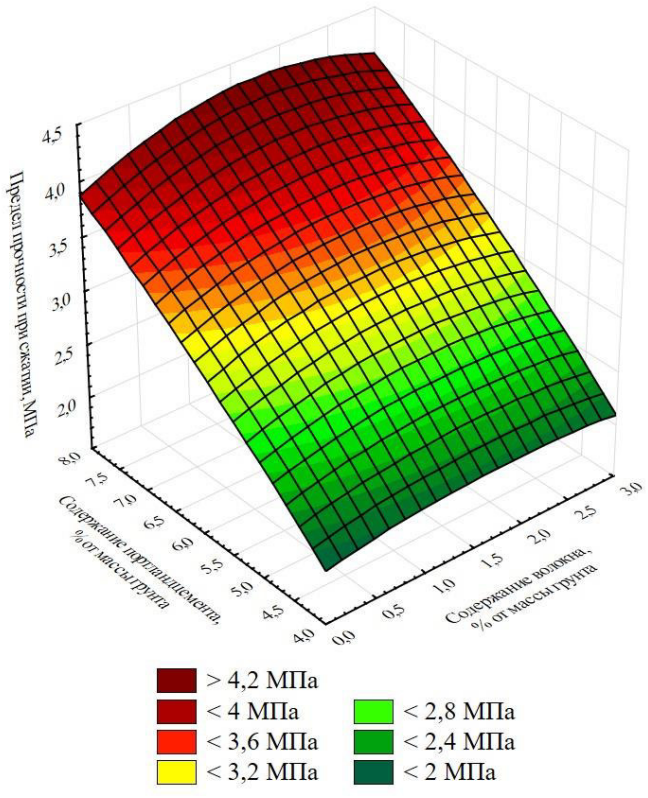


Рисунок 4.16 – Поверхность отклика предела прочности на сжатие в зависимости от содержания волокна и портландцемента

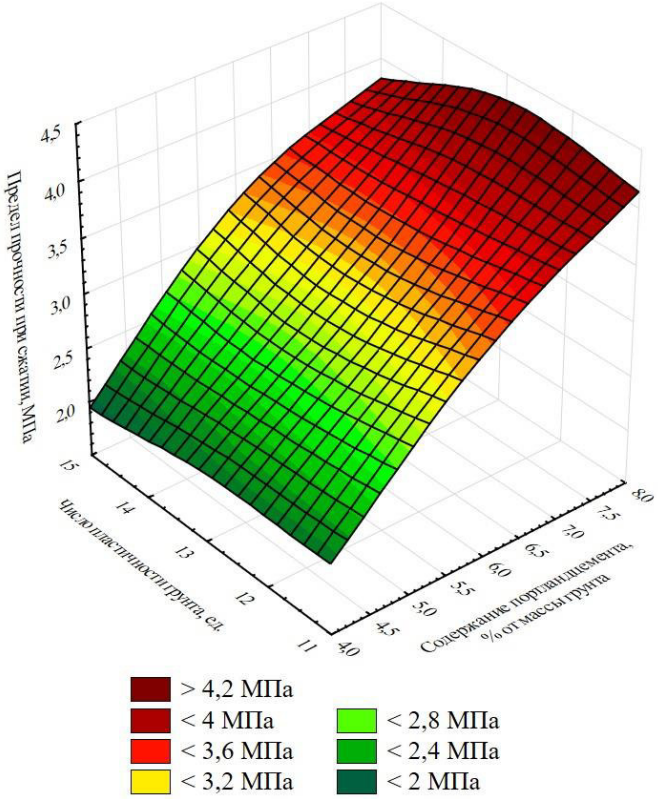


Рисунок 4.17 – Поверхность отклика предела прочности на сжатие в зависимости от содержания портландцемента и числа пластичности грунта

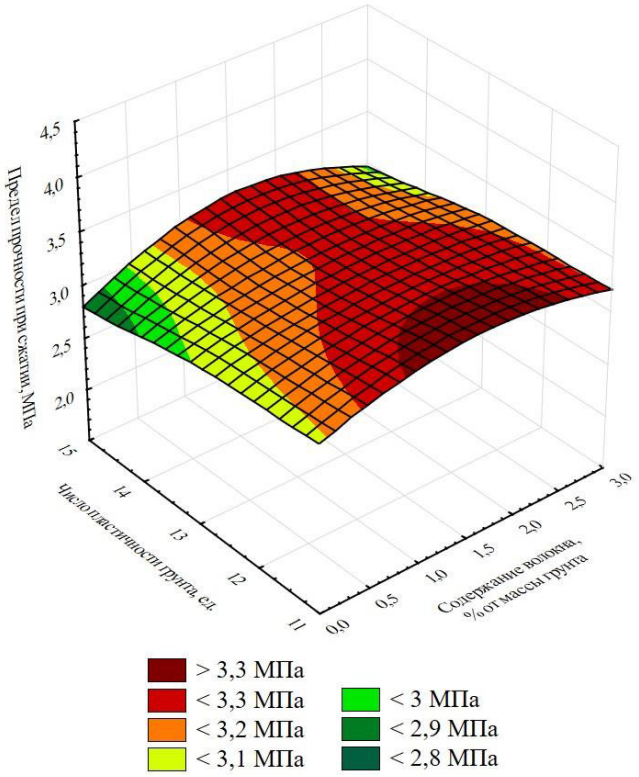


Рисунок 4.18 – Поверхность отклика предела прочности на сжатие в зависимости от содержания волокна и числа пластичности грунта

Анализ поверхности отклика (рис. 4.16 – 4.18) показывает, что эффективность дисперсного армирования базальтовыми волокнами на основе отходов производства теплоизоляционных плит зависит от содержания фибры. Максимальные показатели предела прочности на сжатие фиброцементогрунтовых композиций достигаются при содержании волокон 1,5 % от массы сухого грунта.

Дисперсное армирование базальтовыми волокнами на основе отходов производства теплоизоляционных плит позволяет увеличить предел прочности на сжатие фиброцементогрунтов в среднем на 10,2 % по сравнению с цементогрунтами, имеющими аналогичное содержание минерального вяжущего. Повышение количества добавки портландцемента с 4 % до 8 % приводит к увеличению предела прочности на сжатие фиброцементогрунтовых образцов в среднем на 96,1 %. При этом эффективность действия минерального вяжущего возрастает в среднем на 8,9 % при снижении числа пластичности исходных грунтов с 15 до 11. Дисперсное армирование базальтовыми волокнами на основе

отходов производства теплоизоляционных плит позволяет обеспечить стабильные максимальные показатели прочности на сжатие фиброцементогрунта, отличающиеся в среднем на 3,5 % при различных значениях числа пластичности глинистых грунтов.

Уравнение регрессии предела прочности на растяжение при раскалывании в зависимости от переменных факторов в натуральных обозначениях имеет вид:

$$R_{\text{р}} = 0{,}445 - 0{,}039{Q_{\text{бв(тп)}}}^2 - 0{,}001\ {I_p}^2 + 0{,}127Q_{\text{бв(тп)}} + 0{,}094Q_{\text{пц}} \qquad (4.7)$$

Графическая интерпретация уравнения регрессии выполнена в виде построенных поверхностей отклика (рис. 4.19 – 4.21), которые представляют собой объемную наглядную картину совместного влияния содержания компонентов фиброцементогрунтовой смеси на ее прочость на растяжение при раскалывании.

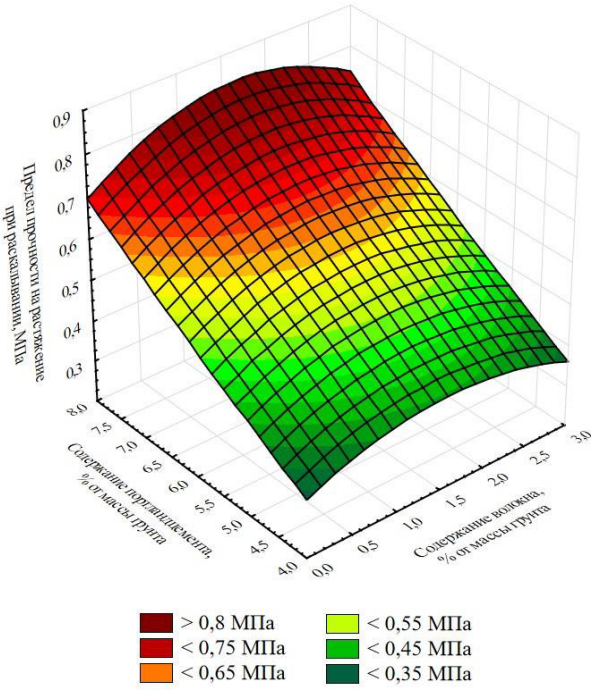


Рисунок 4.19 – Поверхность отклика предела прочности на растяжение при раскалывании в зависимости от содержания волокна и портландцемента

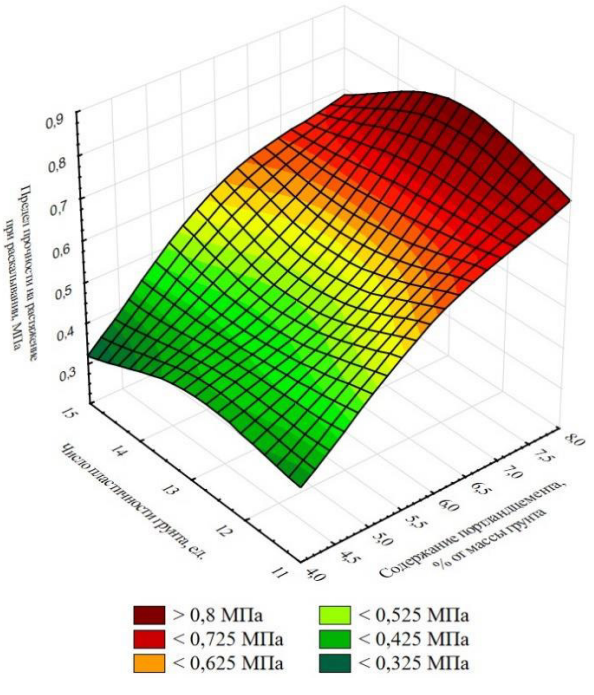


Рисунок 4.20 – Поверхность отклика предела прочности на растяжение при раскалывании в зависимости от содержания портландцемента и числа пластичности грунта

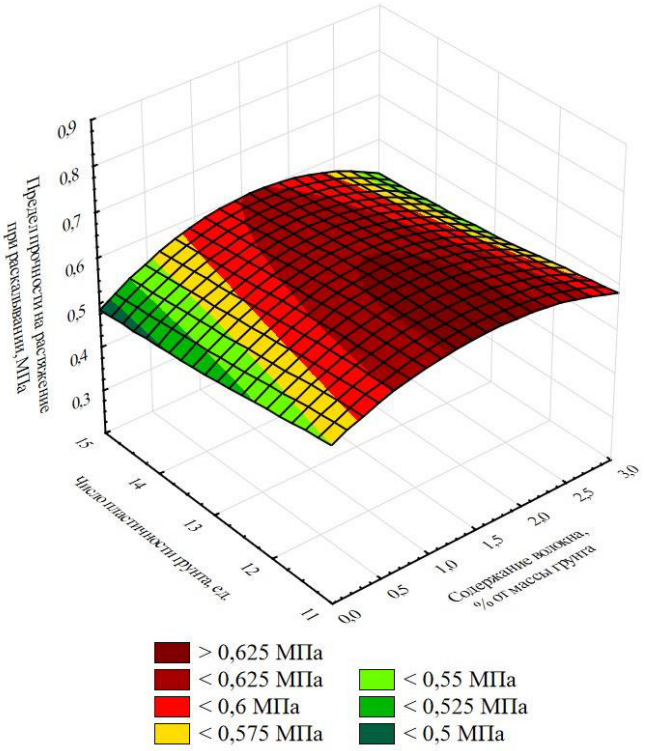


Рисунок 4.21 – Поверхность отклика предела прочности на растяжение при раскалывании в зависимости от содержания волокна и числа пластичности грунта

Анализ поверхностей отклика (рис. 4.19 – 4.21) показывает, что максимальные показатели предела прочности на растяжение при раскалывании фиброцементогрунтовых композиций достигаются при содержании фибры 1,5 % от массы сухого грунта.

Дисперсное армирование базальтовыми волокнами на основе отходов производства теплоизоляционных плит позволяет увеличить предел прочности на растяжение при раскалывании фиброцементогрунтов в среднем на 20,3 % по сравнению с цементогрунтами, имеющими аналогичное содержание минерального вяжущего. Повышение количества добавки портландцемента с 4 % до 8 % приводит к увеличению предела прочности на сжатие фиброцементогрунтовых образцов в среднем на 102 %. При этом эффективность действия минерального вяжущего возрастает в среднем на 12,7 % при снижении числа пластичности исходных грунтов с 15 до 11. Дисперсное армирование базальтовыми волокнами на основе отходов производства теплоизоляционных

плит позволяет обеспечить стабильные максимальные показатели прочности на сжатие фиброцементогрунта, отличающиеся в среднем на 3,7 % при различных значениях числа пластичности глинистых грунтов.

Уравнение регрессии коэффициента морозостойкости в зависимости от переменных факторов в натуральных обозначениях имеет вид:

$$R_{\text{мрз}} = 0{,}776 - 0{,}053{Q_{\text{бв(тп)}}}^2 + 0{,}201Q_{\text{бв(тп)}} - 0{,}003Q_{\text{бв(тп)}}I_p \qquad (4.8)$$

Графическая интерпретация уравнения регрессии выполнена в виде построенной поверхности отклика (рис. 4.22), которая представляет собой объемную наглядную картину совместного влияния содержания компонентов фиброцементогрунтовой смеси на ее коэффициент морозостойкости. Анализ поверхности отклика показывает, что максимальные значения коэффициента морозостойкости (0,78 – 0,83) при фиксированных показателях числа пластичности грунта достигаются при содержании базальтовых волокон на основе отходов производства теплоизоляционных плит 1,5 % от массы сухого грунта.

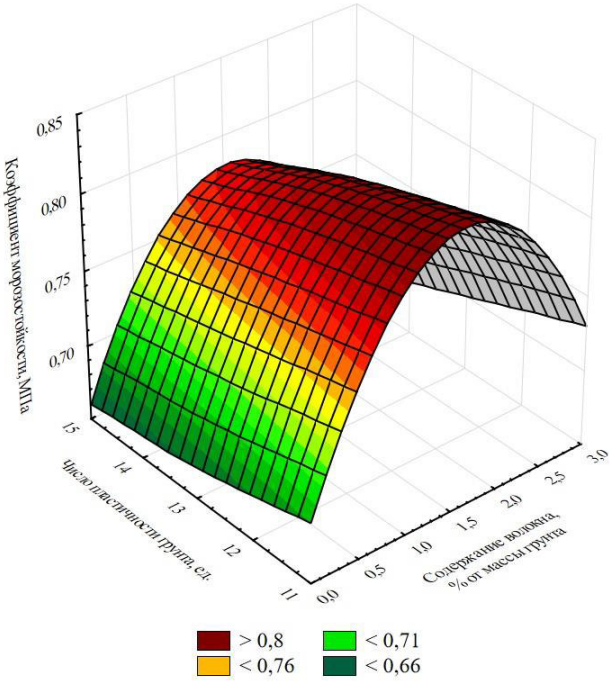


Рисунок 4.22 – Поверхность отклика коэффициента морозостойкости в зависимости от содержания волокна и числа пластичности грунта

Результаты исследования свидетельствуют, что глинистые грунты с числом пластичности от 11 до 15, укрепленные портландцементом в количестве 8 % от массы сухого грунта без добавки фибры достигают коэффициента морозостойкости в среднем 0,67, который менее нормативного значения – 0,8, предусмотренного ГОСТ 70452-2022 для применения в конструкциях лесовозных лесных дорог. При содержании базальтовых волокон на основе отходов производства теплоизоляционных плит 1,5 % от массы сухого грунта в фиброцементогрунтовых композициях аналогичного состава, коэффициент морозостойкости составляет в среднем 0,81 что на 19,8 % выше аналогичного показателя (0,67) у цементогрунтов без добавки базальтовых волокон.

4.4 Прочностные показатели и морозостойкость фиброцементогрунтовых композиций на основе стеклянных волокон

С целью создания и анализа экспериментально-статистических моделей исследования прочностных показателей и морозостойкости фиброцементогрунтовых композиций на основе стеклянных волокон использовалось математическое планирование эксперимента (DOE). В качестве критериев исследования приняты: предел прочности на сжатие; предел прочности на растяжение при раскалывании; коэффициент морозостойкости.

Прочностные показатели и морозостойкость фиброцементогрунтовых композиций определялись по стандартной методике ГОСТ 70452-2022, при соблюдении единых требований проведения экспериментальных исследований и характеристик исходных материалов (см. главу 3). В качестве переменных факторов при определении прочностных показателей были приняты следующие: длина стеклянного волокна; содержание стеклянного волокна; содержание портландцемента; число пластичности глинистого грунта.

При определении коэффициента морозостойкости в составе фиброцементогрунтовых смесей использовалось стеклянное волокно длиной 25 мм и портландцемент в количестве 8 % от массы сухого грунта. В качестве

переменных факторов были приняты: содержание стеклянного волокна и число пластичности глинистого грунта.

Учитывая изложенное, целевые функции имеют вид:

$$R_{сж} = f(L_{св}, Q_{св}, Q_{пц}, I_р) \rightarrow max$$

$$R_р = f(L_{св}, Q_{св}, Q_{пц}, I_р) \rightarrow max$$

$$К_{мрз} = f(Q_{св}, I_р) \rightarrow max$$

где: $R_{сж}$ – предел прочности на сжатие, МПа (у);

$R_р$ – предел прочности на растяжение при раскалывании, МПа (у);

$К_{мрз}$ – коэффициент морозостойкости, ед. (у);

$L_{св}$ – длина стеклянного волокна, мм (X_1);

$Q_{св}$ – содержание стеклянного волокна, % от массы сухого грунта (X_2);

$Q_{пц}$ – содержание портландцемента, % от массы сухого грунта (X_3);

$I_р$ – число пластичности грунта, ед. (X_4).

В соответствии с дробным факторным планом $3^{(4-1)}$ эксперимента по определению прочностных показателей фиброцементогрунтовых композиций, координаты центра плана, интервалы варьирования и уровни исследования приведены в табл. 4.5.

Таблица 4.5 – Уровни варьирования переменных факторов эксперимента по определению прочностных показателей фиброцементогрунтовых композиций

Факторы	Размерность	Обозначение факторов	Основной уровень	Шаг варьирования	Верхний уровень	Нижний уровень
			z_j^0	Δz_j	+1	-1
Длина стеклянного волокна, $L_{св}$	мм	X_1	25	20	45	5
Содержание стеклянного волокна (от массы сухого грунта), $Q_{св}$	%	X_2	2	2	4	0
Содержание портландцемента (от массы сухого грунта), $Q_{пц}$	%	X_3	6	2	8	4
Число пластичности грунта, $I_р$	ед.	X_4	13	2	15	11

В соответствии с полным факторным планом $3^{(2)}$ эксперимента по определению коэффициента морозостойкости фиброцементогрунтовых композиций координаты центра плана, интервалы варьирования и уровни исследования приведены в табл. 4.6.

Таблица 4.6 – Уровни варьирования переменных факторов эксперимента по определению коэффициента морозостойкости фиброцементогрунтовых композиций

Факторы	Размер-ность	Обозна-чение факторов	Основ-ной уро-вень	Шаг варьиро-вания	Верхний уровень	Нижний уровень
			z_j^0	Δz_j	+1	-1
Содержание стеклянного волокна (от массы сухого грунта), $Q_{бв}$	%	X_2	2	2	4	0
Число пластичности грунта, I_p	ед.	X_4	13	2	15	11

В ходе проведения и обработки результатов экспериментов получены уравнения регрессии со статистически значимыми их параметрами.

Уравнение регрессии предела прочности на сжатие в зависимости от переменных факторов в натуральных обозначениях имеет вид:

$$R_{сж} = -0{,}052 - 0{,}0002{L_{св}}^2 - 0{,}085{Q_{св}}^2 - 0{,}026{Q_{пц}}^2 + 0{,}013Q_{св}Q_{пц} + 0{,}001L_{св}I_p + 0{,}323Q_{св} + 0{,}799Q_{пц} - 0{,}068I_p \quad (4.9)$$

Графическая интерпретация уравнения регрессии выполнена в виде построенных поверхностей отклика (рис. 4.23 – 4.27), которые представляют собой объемную наглядную картину совместного влияния содержания компонентов фиброцементогрунтовой смеси на ее прочность на сжатие.

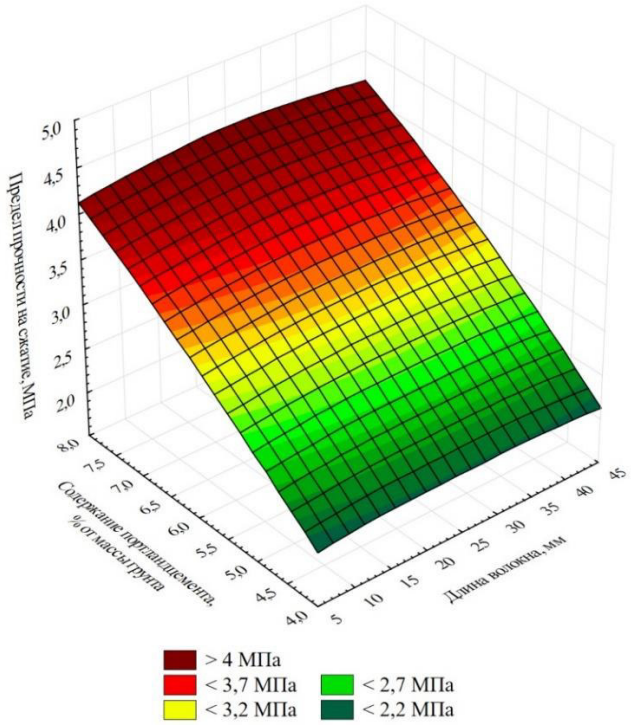


Рисунок 4.23 – Поверхность отклика предела прочности на сжатие в зависимости от длины волокна и содержания портландцемента

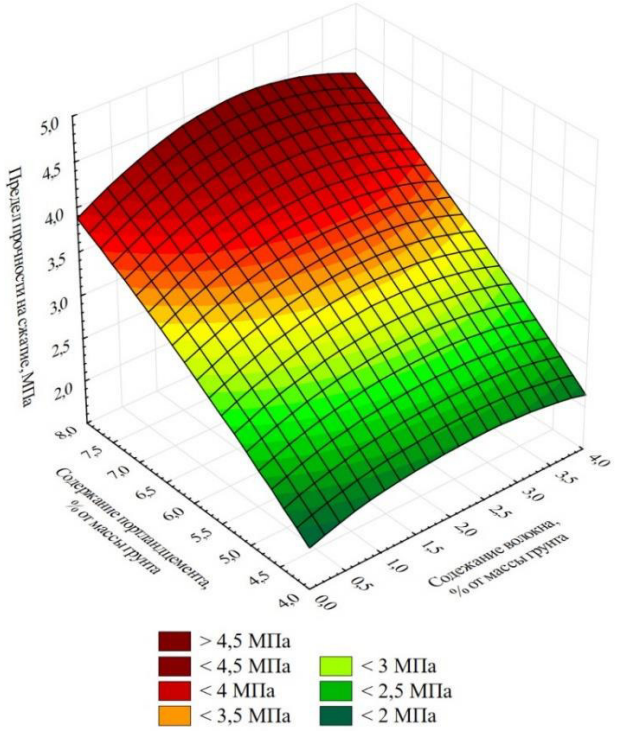


Рисунок 4.24 – Поверхность отклика предела прочности на сжатие в зависимости от содержания волокна и портландцемента

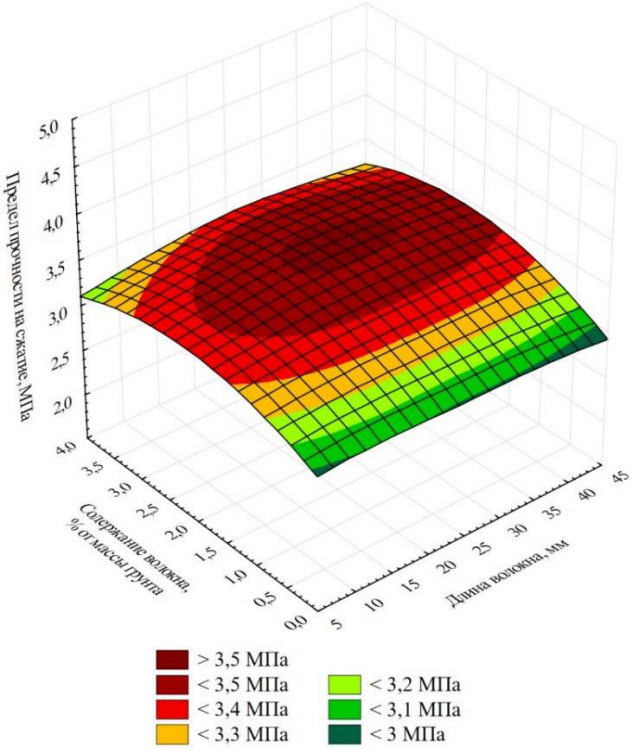


Рисунок 4.25 – Поверхность отклика предела прочности на сжатие в зависимости от длины и содержания волокна

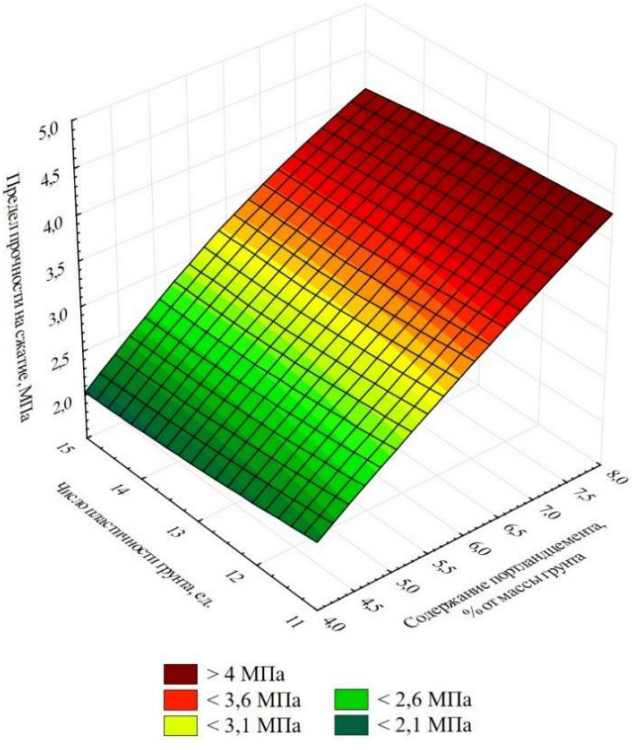


Рисунок 4.26 – Поверхность отклика предела прочности на сжатие в зависимости от содержания портландцемента и числа пластичности грунта

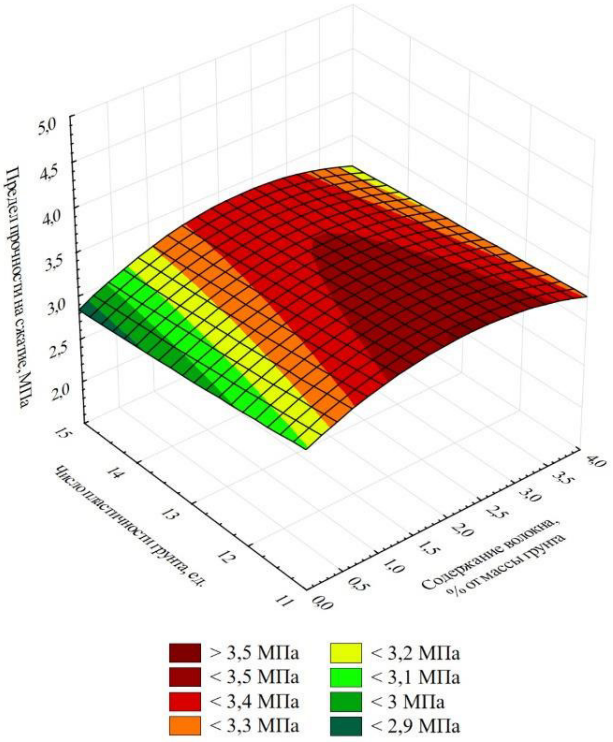


Рисунок 4.27 – Поверхность отклика предела прочности на сжатие в зависимости от содержания волокна и числа пластичности грунта

Анализ поверхностей отклика (рис. 4.23 – 4.27) показывает, что эффективность дисперсного армирования стеклянной фиброй фиброцементогрунтовых композиций зависит от содержания и длины волокон. Максимальные показатели предела прочности на сжатие фиброцементогрунтовых композиций достигаются при содержании стеклянной фибры 2,0 – 2,5 % от массы сухого грунта и длине волокон 25 мм.

Дисперсное армирование стеклянной фиброй позволяет увеличить предел прочности на сжатие фиброцементогрунтов в среднем на 19,4 % по сравнению с цементогрунтами, имеющими аналогичное содержание минерального вяжущего. Повышение количества добавки портландцемента с 4 % до 8 % приводит к увеличению предела прочности на сжатие фиброцементогрунтовых образцов в среднем на 97,4 %. При этом эффективность действия минерального вяжущего возрастает в среднем на 8,9 % при снижении числа пластичности исходных грунтов с 15 до 11. Дисперсное армирование стеклянными волокнами позволяет обеспечить стабильные максимальные показатели прочности на сжатие

фиброцементогрунта, отличающиеся в среднем на 4,9 % при различных значениях числа пластичности глинистых грунтов.

Уравнение регрессии предела прочности на растяжение при раскалывании в зависимости от переменных факторов в натуральных обозначениях имеет вид:

$$R_{\text{р}} = 0{,}173 - 0{,}026\,{Q_{\text{св}}}^2 - 0{,}001{I_p}^2 + 0{,}0004 L_{\text{св}} Q_{\text{св}} + 0{,}005 Q_{\text{св}} Q_{\text{пц}} + 0{,}004 Q_{\text{пц}} I_p + 0{,}088 Q_{\text{св}} + 0{,}045 Q_{\text{пц}} \quad (4.10)$$

Графическая интерпретация уравнения регрессии выполнена в виде построенных поверхностей отклика (рис. 4.28 – 4.32), которые представляют собой объемную наглядную картину совместного влияния содержания компонентов фиброцементогрунтовой смеси на ее прочность на растяжение при раскалывании.

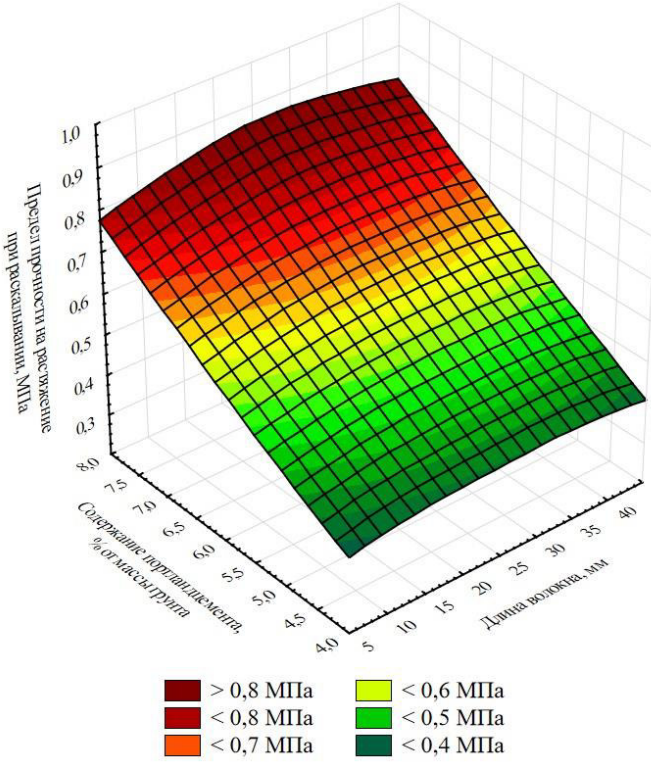


Рисунок 4.28 – Поверхность отклика предела прочности на растяжение при раскалывании в зависимости от длины волокна и содержания портландцемента

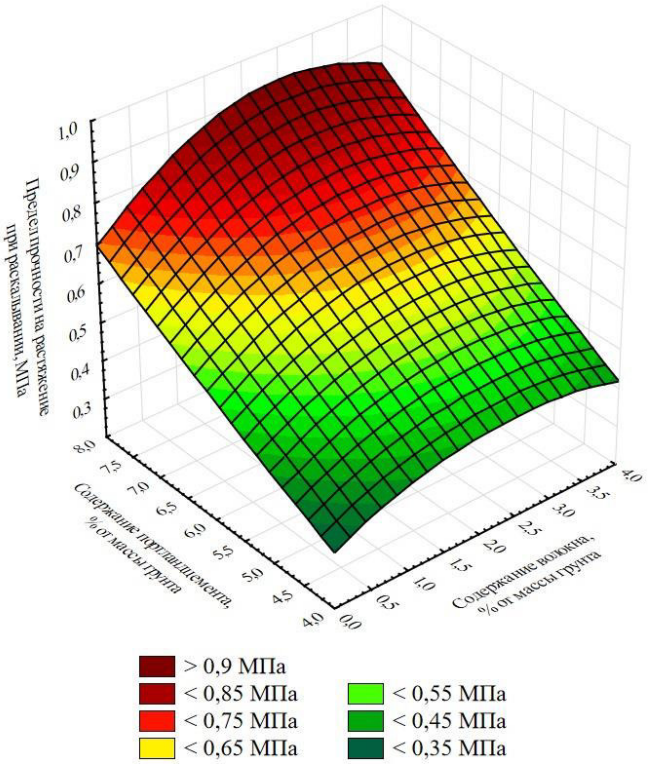


Рисунок 4.29 – Поверхность отклика предела прочности на растяжение при раскалывании в зависимости от содержания волокна и портландцемента

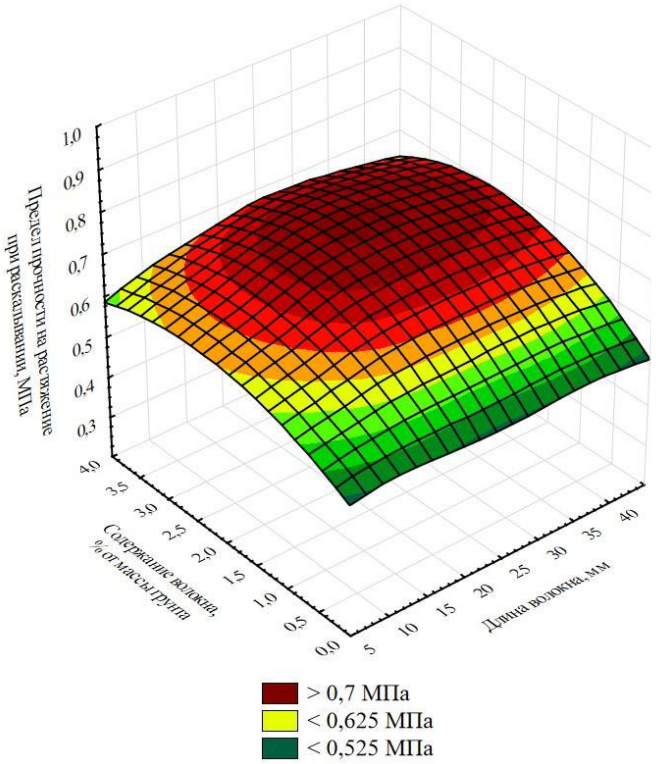


Рисунок 4.30 – Поверхность отклика предела прочности на растяжение при раскалывании в зависимости от длины и содержания волокна

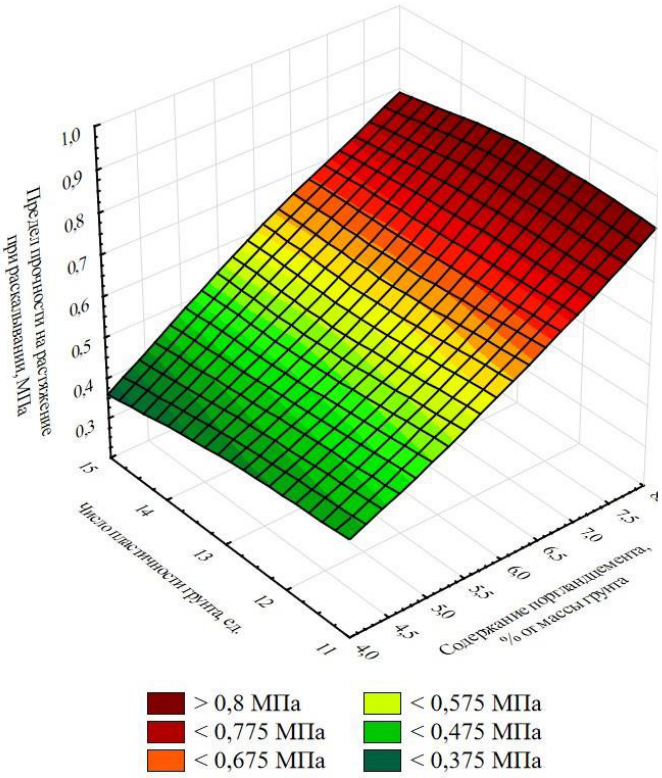


Рисунок 4.31 – Поверхность отклика предела прочности на растяжение при раскалывании в зависимости от содержания портландцемента и числа пластичности грунта

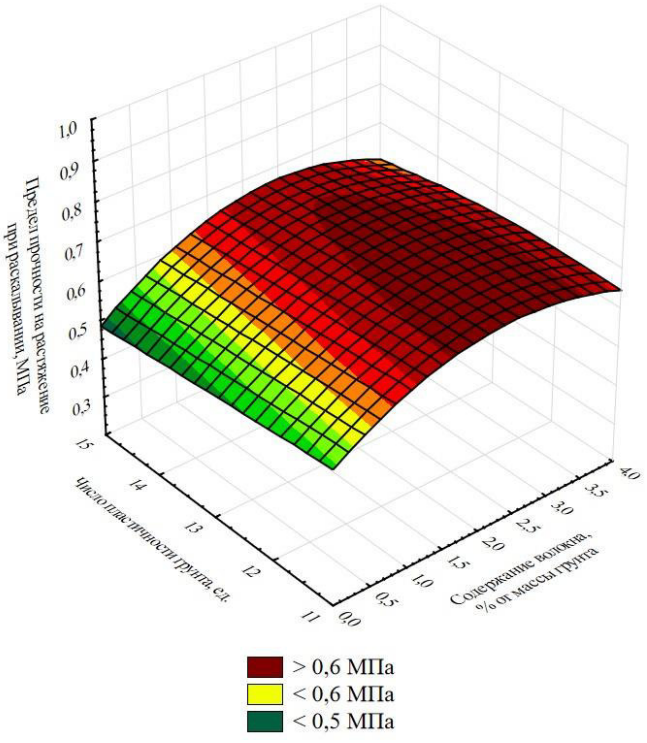


Рисунок 4.32 – Поверхность отклика предела прочности на растяжение при раскалывании в зависимости от содержания волокна и числа пластичности грунта

Анализ поверхностей отклика (рис. 4.28 – 4.32) показывает, что максимальные показатели предела прочности на растяжение при раскалывании фиброцементогрунтовых композиций достигаются при содержании стеклянной фибры 2,0 – 2,5 % от массы сухого грунта и длине волокон 25 мм.

Дисперсное армирование стеклянной фиброй позволяет увеличить предел прочности на растяжение при раскалывании фиброцементогрунтов в среднем на 39,8 % по сравнению с цементогрунтами, имеющими аналогичное содержание минерального вяжущего. Повышение количества добавки портландцемента с 4 % до 8 % приводит к увеличению предела прочности на растяжении при раскалывании фиброцементогрунтовых образцов в среднем на 104 %. При этом эффективность действия минерального вяжущего возрастает в среднем на 12,7 % при снижении числа пластичности исходных грунтов с 15 до 11. Дисперсное армирование стеклянными волокнами позволяет обеспечить стабильные максимальные показатели прочности на растяжение при раскалывании фиброцементогрунта, отличающиеся в среднем на 7,8 % при различных значениях числа пластичности глинистых грунтов.

Уравнение регрессии коэффициента морозостойкости в зависимости от переменных факторов в натуральных обозначениях имеет вид:

$$R_{\text{мрз}} = 0{,}793 - 0{,}032{Q_{\text{св}}}^2 + 0{,}146Q_{\text{св}} - 0{,}009I_p \qquad (4.11)$$

Графическая интерпретация уравнения регрессии выполнена в виде построенной поверхности отклика (рис. 4.33), которая представляет собой объемную наглядную картину совместного влияния содержания компонентов фиброцементогрунтовой смеси на ее коэффициент морозостойкости. Анализ поверхности отклика показывает, что максимальные значения коэффициента морозостойкости (0,82 – 0,85) при фиксированных показателях числа пластичности грунта достигаются при содержании стеклянной фибры 2,0 – 2,5 % от массы сухого грунта.

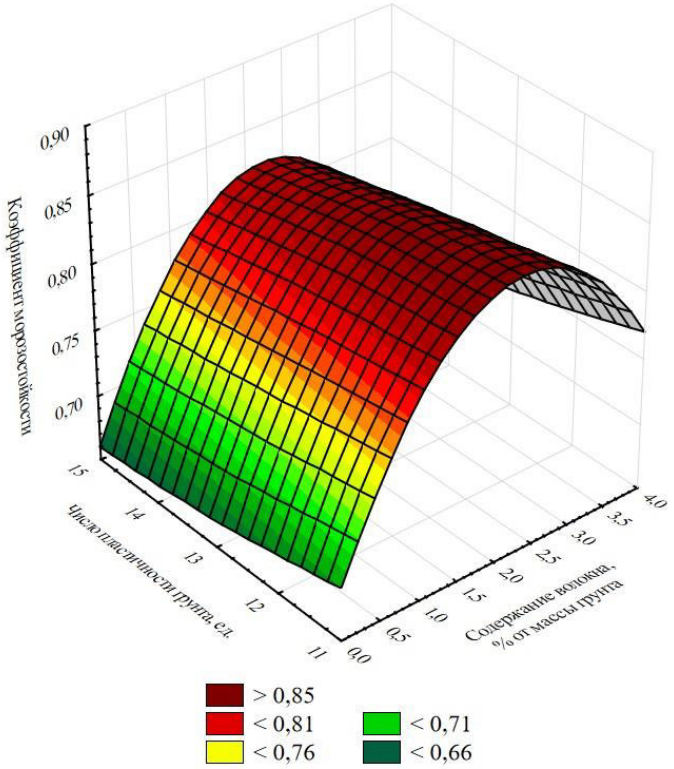


Рисунок 4.33 – Поверхность отклика коэффициента морозостойкости в зависимости от содержания волокна и числа пластичности грунта

Результаты исследования свидетельствуют, что глинистые грунты с числом пластичности от 11 до 15, укрепленные портландцементом в количестве 8 % от массы сухого грунта без добавки фибры достигают коэффициента морозостойкости в среднем 0,67, который менее нормативного значения – 0,8, предусмотренного ГОСТ 70452-2022 для применения в конструкциях лесовозных лесных дорог. При содержании стеклянных волокон 2,0 – 2,5 % от массы сухого грунта с длинной волокон 25 мм в фиброцементогрунтовых композициях аналогичного состава, коэффициент морозостойкости составляет в среднем 0,84 что на 24,3 % выше аналогичного показателя (0,67) у цементогрунтов без добавки стеклянных волокон.

4.5 Прочностные показатели и морозостойкость фиброцементогрунтовых композиций на основе полипропиленовых волокон

С целью создания и анализа экспериментально-статистических моделей исследования прочностных показателей и морозостойкости фиброцементогрунтовых композиций на основе полипропиленовых волокон использовалось математическое планирование эксперимента (DOE). В качестве критериев исследования приняты: предел прочности на сжатие; предел прочности на растяжение при раскалывании; коэффициент морозостойкости.

Прочностные показатели и морозостойкость фиброцементогрунтовых композиций определялись по стандартной методике ГОСТ 70452-2022, при соблюдении единых требований проведения экспериментальных исследований и характеристик исходных материалов (см. главу 3). В качестве переменных факторов при определении прочностных показателей были приняты следующие: длина полипропиленового волокна; содержание полипропиленового волокна; содержание портландцемента; число пластичности глинистого грунта.

При определении коэффициента морозостойкости в составе фиброцементогрунтовых смесей использовалось полипропиленовое волокно длиной 25 мм и портландцемент в количестве 8 % от массы сухого грунта. В качестве переменных факторов были приняты: содержание полипропиленового волокна и число пластичности глинистого грунта.

Учитывая изложенное, целевые функции имеют вид:

$$R_{сж} = f(L_{пв}, Q_{пв}, Q_{пц}, I_р) \rightarrow max$$

$$R_р = f(L_{пв}, Q_{пв}, Q_{пц}, I_р) \rightarrow max$$

$$К_{мрз} = f(Q_{пв}, I_р) \rightarrow max$$

где: $R_{сж}$ – предел прочности на сжатие, МПа (y);

$R_р$ – предел прочности на растяжение при раскалывании, МПа (y);

$К_{мрз}$ – коэффициент морозостойкости, ед. (y);

$L_{пв}$ – длина полипропиленового волокна, мм (X_1);

$Q_{пв}$ – содержание полипропиленового волокна, % от массы сухого грунта (X_2);

$Q_{пц}$ – содержание портландцемента, % от массы сухого грунта (X_3);

$I_р$ – число пластичности грунта, ед. (X_4).

В соответствии с дробным факторным планом $3^{(4-1)}$ эксперимента по определению прочностных показателей фиброцементогрунтовых композиций, координаты центра плана, интервалы варьирования и уровни исследования приведены в табл. 4.7.

Таблица 4.7 – Уровни варьирования переменных факторов эксперимента по определению прочностных показателей фиброцементогрунтовых композиций

Факторы	Размерность	Обозначение факторов	Основной уровень	Шаг варьирования	Верхний уровень	Нижний уровень
			z_j^0	Δz_j	+1	-1
Длина полипропиленового волокна, $L_{пв}$	мм	X_1	25	20	45	5
Содержание полипропиленового волокна (от массы сухого грунта), $Q_{пв}$	%	X_2	1,5	1,5	3	0
Содержание портландцемента (от массы сухого грунта), $Q_{пц}$	%	X_3	6	2	8	4
Число пластичности грунта, $I_р$	ед.	X_4	13	2	15	11

В соответствии с полным факторным планом $3^{(2)}$ эксперимента по определению коэффициента морозостойкости фиброцементогрунтовых композиций координаты центра плана, интервалы варьирования и уровни исследования приведены в табл. 4.8.

Таблица 4.8 – Уровни варьирования переменных факторов эксперимента по определению коэффициента морозостойкости фиброцементогрунтовых композиций

Факторы	Размер-ность	Обозна-чение факторов	Основ-ной уро-вень	Шаг варьиро-вания	Верхний уровень	Нижний уровень
			z_j^0	Δz_j	+1	-1
Содержание полипропиленового волокна (от массы сухого грунта), $Q_{пв}$	%	X_2	1,5	1,5	3	0
Число пластичности грунта, I_p	ед.	X_4	13	2	15	11

В ходе проведения и обработки результатов экспериментов получены уравнения регрессии со статистически значимыми их параметрами.

Уравнение регрессии предела прочности на сжатие в зависимости от переменных факторов в натуральных обозначениях имеет вид:

$$R_{сж} = -0{,}082 - 0{,}0003{L_{пв}}^2 - 0{,}225{Q_{пв}}^2 - 0{,}028{Q_{пц}}^2 + 0{,}001L_{пв}Q_{пв} + 0{,}001L_{пв}I_p + 0{,}037\,Q_{пв}Q_{пц} + 0{,}012Q_{пв}I_p + 0{,}452Q_{пв} + 0{,}827Q_{пц} - 0{,}086I_p \quad (4.12)$$

Для более подробного исследования влияния факторов на результат экспериментально-статистической модели использован метод графической интерпретации. Графическая интерпретация уравнения регрессии выполнена в виде построенных поверхностей отклика (рис. 4.34 – 4.38), которые представляют собой объемную наглядную картину совместного влияния содержания компонентов фиброцементогрунтовой смеси на ее прочность на сжатие.

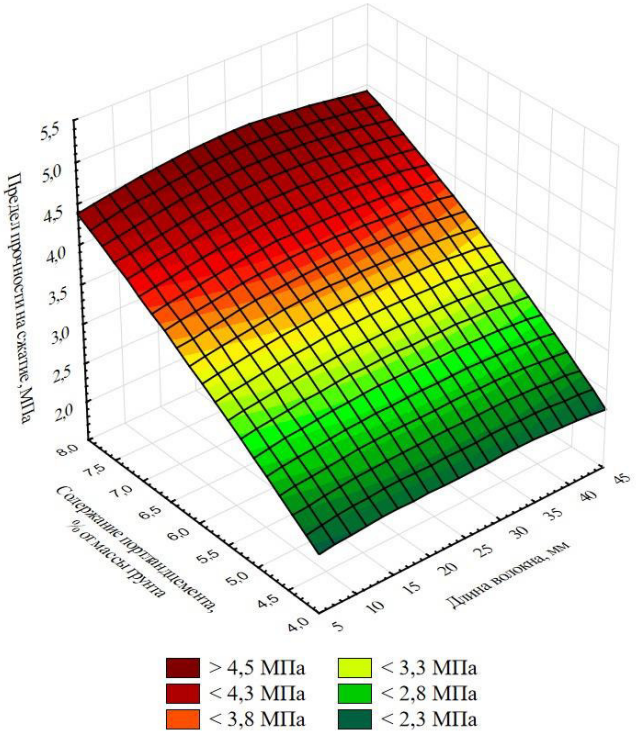


Рисунок 4.34 – Поверхность отклика предела прочности на сжатие в зависимости от длины волокна и содержания портландцемента

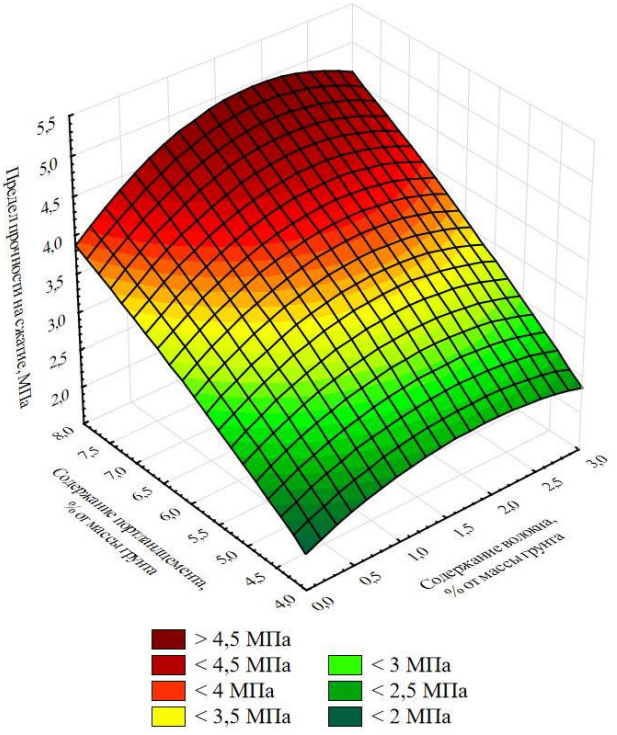


Рисунок 4.35 – Поверхность отклика предела прочности на сжатие в зависимости от содержания волокна и портландцемента

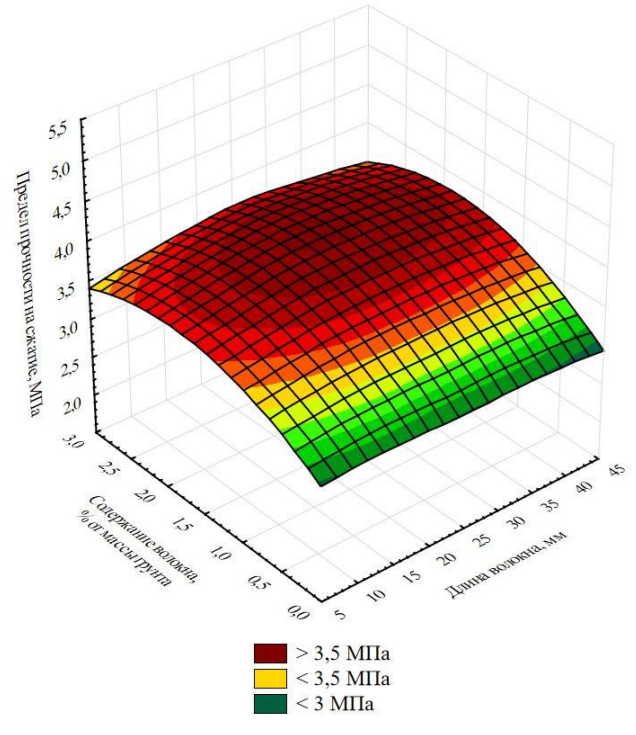


Рисунок 4.36 – Поверхность отклика предела прочности на сжатие в зависимости от длины и содержания волокна

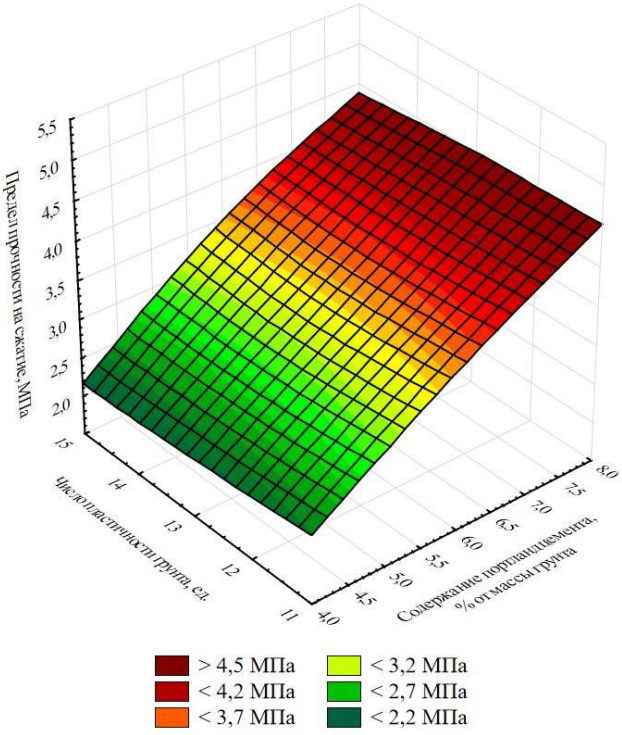


Рисунок 4.37 – Поверхность отклика предела прочности на сжатие в зависимости от содержания портландцемента и числа пластичности грунта

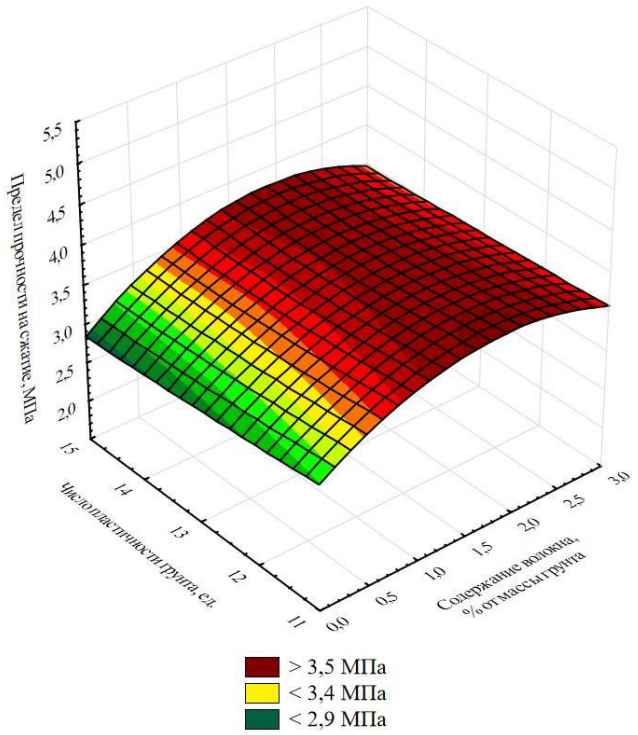


Рисунок 4.38 – Поверхность отклика предела прочности на сжатие в зависимости от содержания волокна и числа пластичности грунта

Анализ поверхностей отклика (рис. 4.34 – 4.38) показывает, что эффективность дисперсного армирования полипропиленовой фиброй фиброцементогрунтовых композиций зависит от содержания и длины волокон. Максимальные показатели предела прочности на сжатие фиброцементогрунтовых композиций достигаются при содержании полипропиленовой фибры 1,5 – 2,0 % от массы сухого грунта и длине волокон 25 мм.

Дисперсное армирование полипропиленовой фиброй позволяет увеличить предел прочности на сжатие фиброцементогрунтов в среднем на 31,8 % по сравнению с цементогрунтами, имеющими аналогичное содержание минерального вяжущего. Повышение количества добавки портландцемента с 4 % до 8 % приводит к увеличению предела прочности на сжатие фиброцементогрунтовых образцов в среднем на 97,3 %. При этом эффективность действия минерального вяжущего возрастает в среднем на 8,9 % при снижении числа пластичности исходных грунтов с 15 до 11. Дисперсное армирование полипропиленовыми волокнами позволяет обеспечить стабильные максимальные

показатели прочности на сжатие фиброцементогрунта, отличающиеся в среднем на 3,1 % при различных значениях числа пластичности глинистых грунтов.

Уравнение регрессии предела прочности на растяжение при раскалывании в зависимости от переменных факторов в натуральных обозначениях имеет вид:

$$R_{\text{р}} = 0{,}260 - 0{,}0002{L_{\text{пв}}}^2 - 0{,}070{Q_{\text{пв}}}^2 - 0{,}002{I_p}^2 + 0{,}001L_{\text{пв}}Q_{\text{пв}} + 0{,}012Q_{\text{пв}}Q_{\text{пц}} + 0{,}008Q_{\text{пц}}I_p + 0{,}013L_{\text{пв}} + 0{,}172Q_{\text{пв}} - 0{,}015Q_{\text{пц}} \quad (4.13)$$

Графическая интерпретация уравнения регрессии выполнена в виде построенных поверхностей отклика (рис. 4.39 – 4.43), которые представляют собой объемную наглядную картину совместного влияния содержания компонентов фиброцементогрунтовой смеси на ее прочность на растяжение при раскалывании.

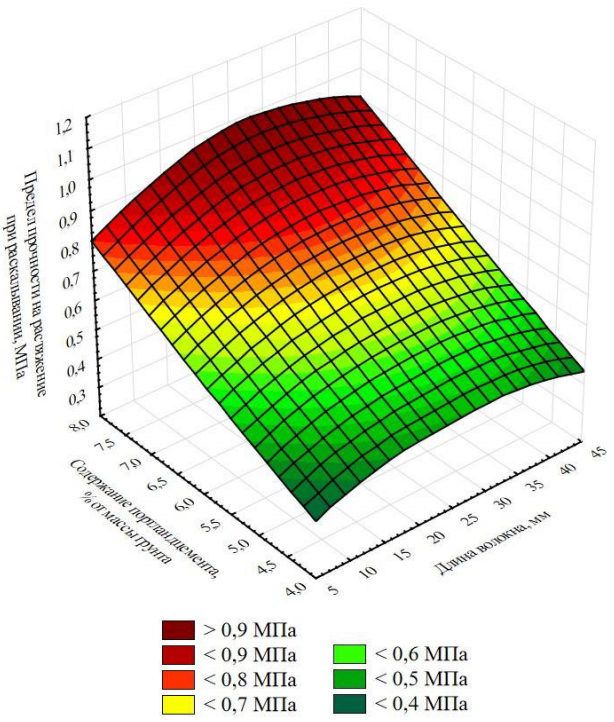


Рисунок 4.39 – Поверхность отклика предела прочности на растяжение при раскалывании в зависимости от длины волокна и содержания портландцемента

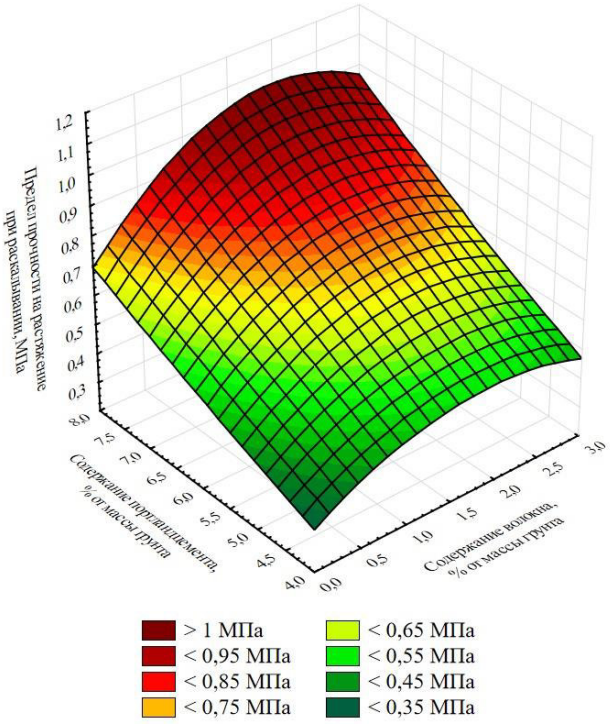


Рисунок 4.40 – Поверхность отклика предела прочности на растяжение при раскалывании в зависимости от содержания волокна и портландцемента

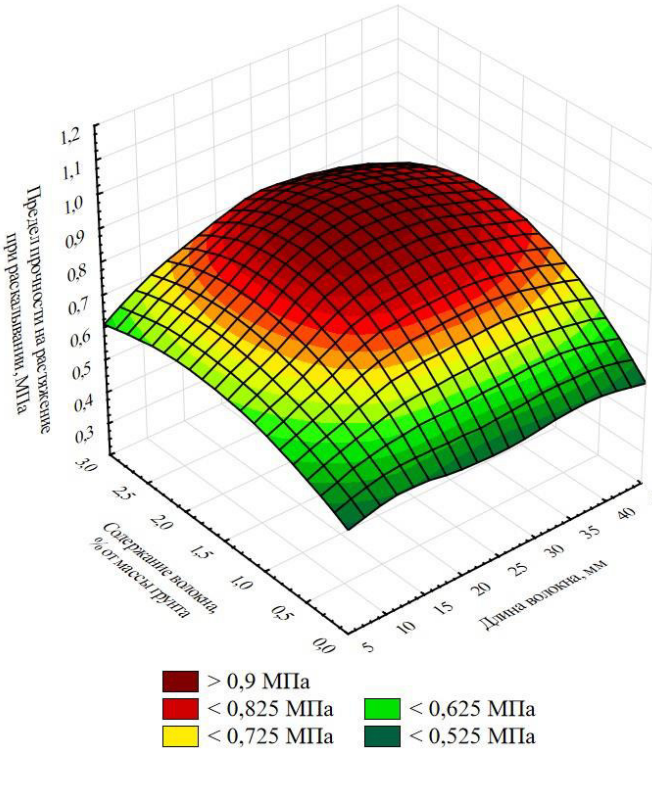


Рисунок 4.41 – Поверхность отклика предела прочности на растяжение при раскалывании в зависимости от длины и содержания волокна

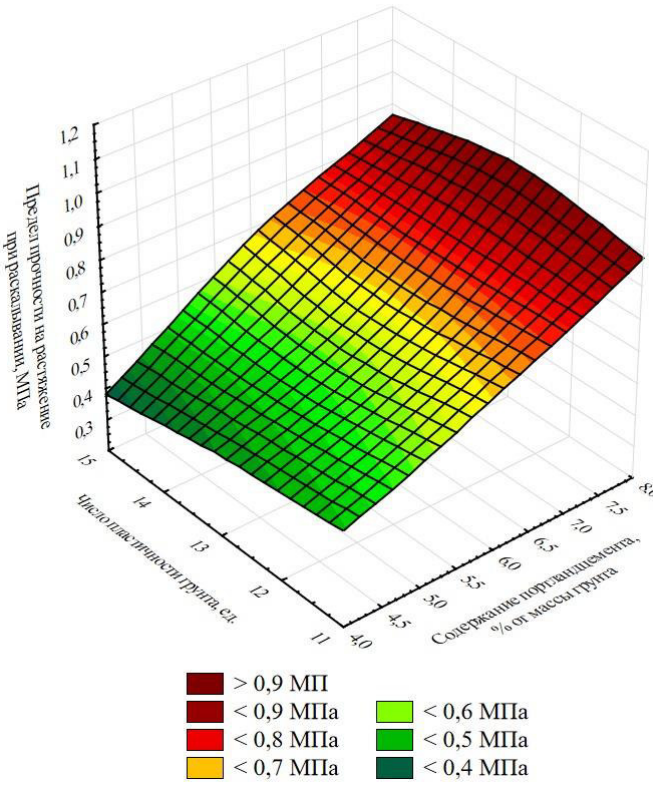


Рисунок 4.42 – Поверхность отклика предела прочности на растяжение при раскалывании в зависимости от содержания портландцемента и числа пластичности грунта

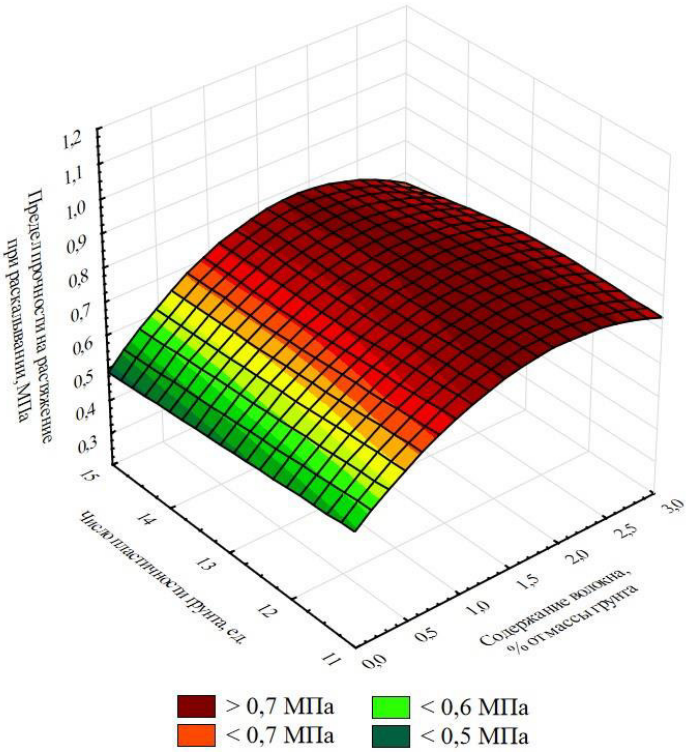


Рисунок 4.43 – Поверхность отклика предела прочности на растяжение при раскалывании в зависимости от содержания волокна и числа пластичности грунта

Анализ поверхностей отклика (рис. 4.39 – 4.43) показывает, что максимальные показатели предела прочности на растяжение при раскалывании фиброцементогрунтовых композиций достигаются при содержании полипропиленовой фибры 1,5 – 2,0 % от массы сухого грунта и длине волокон 25 мм.

Дисперсное армирование полипропиленовой фиброй позволяет увеличить предел прочности на растяжение при раскалывании фиброцементогрунтов в среднем на 70,5 % по сравнению с цементогрунтами, имеющими аналогичное содержание минерального вяжущего. Повышение количества добавки портландцемента с 4 % до 8 % приводит к увеличению предела прочности на растяжении при раскалывании фиброцементогрунтовых образцов в среднем на 104,4 %. При этом эффективность действия минерального вяжущего возрастает в среднем на 12,7 % при снижении числа пластичности исходных грунтов с 15 до 11. Дисперсное армирование полипропиленовыми волокнами позволяет обеспечить стабильные максимальные показатели прочности на растяжение при раскалывании фиброцементогрунта, отличающиеся в среднем 7,0 % при различных значениях числа пластичности глинистых грунтов.

Уравнение регрессии коэффициента морозостойкости в зависимости от переменных факторов в натуральных обозначениях имеет вид:

$$R_{\text{мрз}} = 0{,}782 - 0{,}07{Q_{\text{пв}}}^2 + 0{,}236Q_{\text{пв}} - 0{,}008I_p \qquad (4.14)$$

Графическая интерпретация уравнения регрессии выполнена в виде построенной поверхности отклика (рис. 4.44), которая представляет собой объемную наглядную картину совместного влияния содержания компонентов фиброцементогрунтовой смеси на ее коэффициент морозостойкости. Анализ поверхности отклика показывает, что максимальные значения коэффициента морозостойкости (0,86 – 0,88) при фиксированных показателях числа пластичности грунта достигаются при содержании полипропиленовой фибры 1,5 – 2,0 % от массы сухого грунта.

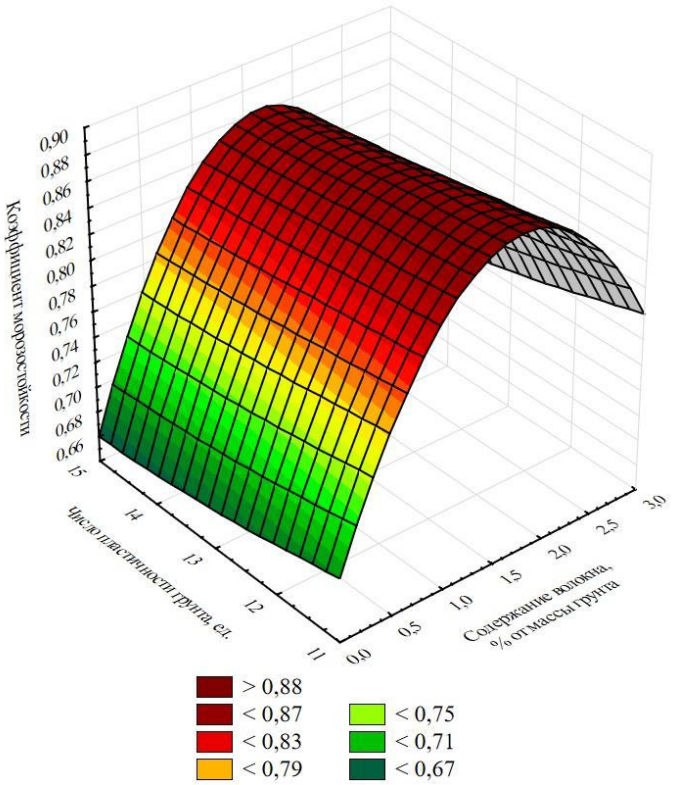


Рисунок 4.44 – Поверхность отклика коэффициента морозостойкости в зависимости от содержания волокна и числа пластичности грунта

Результаты исследования свидетельствуют, что глинистые грунты с числом пластичности от 11 до 15, укрепленные портландцементом в количестве 8 % от массы сухого грунта без добавки фибры достигают коэффициента морозостойкости в среднем 0,67, который менее нормативного значения – 0,8, предусмотренного ГОСТ 70452-2022 для применения в конструкциях лесовозных лесных дорог. При содержании полипропиленовых волокон 1,5 – 2,0 % от массы сухого грунта с длинной волокон 25 мм в фиброцементогрунтовых композициях аналогичного состава, коэффициент морозостойкости составляет в среднем 0,87 что на 29,2 % выше аналогичного показателя (0,67) у цементогрунтов без добавки полипропиленовых волокон.

4.6 Влияние геометрических характеристик волокон на прочностные показатели фиброцементогрунтовых композиций

С целью исследования влияния геометрических характеристик волокон: диаметра и длины, на прочностные показатели фиброцементогрунта: прочность на сжатие и на растяжение при раскалывании, на примере полипропиленовой фибры были проведены соответствующие лабораторные испытания. Для создания и анализа экспериментально-статистических моделей использовалось математическое планирование эксперимента (DOE).

Прочностные показатели фиброцементогрунтовых композиций определялись по стандартной методике ГОСТ 70452-2022, при соблюдении единых требований проведения экспериментальных исследований и характеристик исходных материалов (см. главу 3). Приготовление фиброцементогрунтовых смесей осуществлялось на базе естественных глинистых грунтов (см. табл. 3.5), отобранных из земляного полотна лесовозных лесных дорог с добавлением портландцемента в количестве 8 % от массы сухого грунта. В качестве переменных факторов были приняты следующие: длина полипропиленового волокна; диаметр полипропиленового волокна, содержание полипропиленового волокна; число пластичности глинистого грунта.

Учитывая изложенное, целевые функции имеют вид:

$$R_{сж} = f(L_{пв}, D_{пв}, Q_{пв}, I_р) \rightarrow max$$

$$R_р = f(L_{пв}, D_{пв}, Q_{пв}, I_р) \rightarrow max$$

где: $R_{сж}$ – предел прочности на сжатие, МПа (y);

$R_р$ – предел прочности на растяжение при раскалывании, МПа (y);

$L_{пв}$ – длина полипропиленового волокна, мм (X_1);

$D_{пв}$ – диаметр полипропиленового волокна, мм (X_2);

$Q_{пв}$ – содержание полипропиленового волокна, % от массы сухого грунта (X_3);

$I_р$ – число пластичности грунта, ед. (X_4).

В соответствии с дробным факторным планом $3^{(4-1)}$ эксперимента, координаты центра плана, интервалы варьирования и уровни исследования приведены в табл. 4.9.

Таблица 4.9 – Уровни варьирования переменных факторов

Факторы	Размерность	Обозначение факторов	Основной уровень	Шаг варьирования	Верхний уровень	Нижний уровень
			z_j^0	Δz_j	+1	-1
Длина полипропиленового волокна, $L_{пв}$	мм	X_1	25	20	45	5
Диаметр полипропиленового волокна, $D_{пв}$	мкм	X_2	125	100	225	25
Содержание полипропиленового волокна (от массы сухого грунта), $Q_{пв}$	%	X_3	1,5	1,5	3,0	0
Число пластичности грунта, I_p	ед.	X_4	13	2	15	11

В ходе проведения и обработки результатов экспериментов получены уравнения регрессии со статистически значимыми их параметрами.

Уравнение регрессии прочности на сжатие в натуральных обозначениях факторов имеет вид:

$$R_{сж} = 3{,}969 - 0{,}0006{L_{пв}}^2 - 0{,}086{Q_{пв}}^2 - 0{,}003D_{пв}Q_{пв} - 0{,}009Q_{пв}I_p + 0{,}061L_{пв} - 0{,}003D_{пв} + 0{,}627Q_{пв} - 0{,}014I_p \quad (4.15)$$

Для более подробного исследования влияния факторов на результат экспериментально-статистической модели использован метод графической интерпретации. Графическая интерпретация уравнения регрессии представлена в виде построенных поверхностей отклика (рис. 4.45 – 4.47), которые представляют

собой объемную наглядную картину совместного влияния содержания компонентов фиброцементогрунтовой смеси на ее прочность на сжатие.

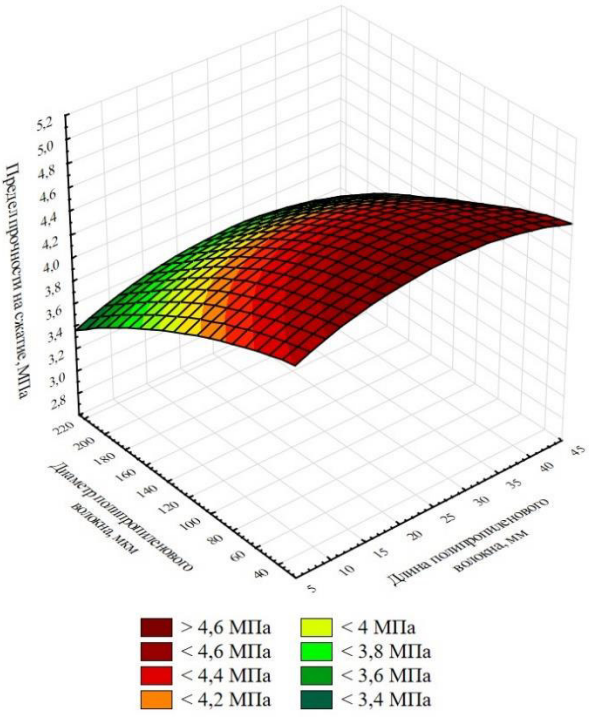


Рисунок 4.45 – Поверхность отклика предела прочности на сжатие в зависимости от длины и диаметра полипропиленового волокна

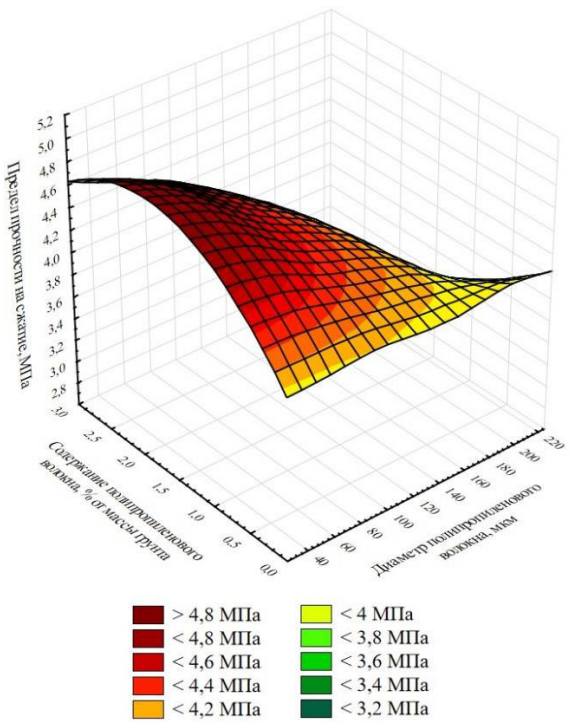


Рисунок 4.46 – Поверхность отклика предела прочности на сжатие в зависимости от диаметра и содержания полипропиленового волокна

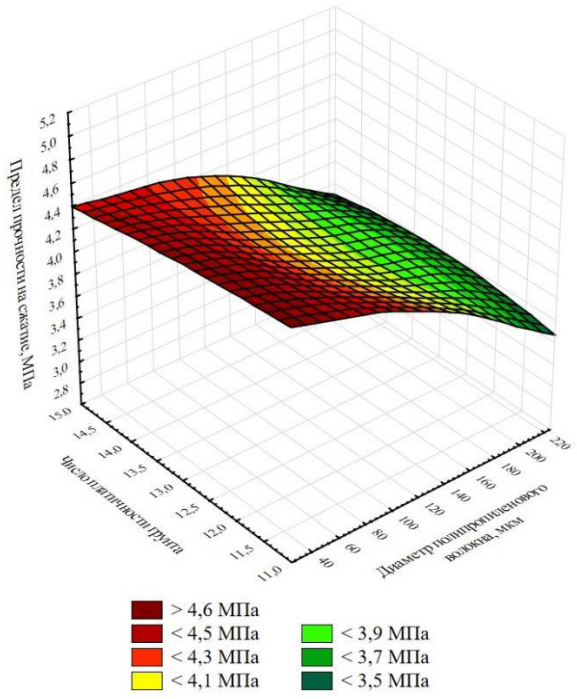


Рисунок 4.47 – Поверхность отклика предела прочности на сжатие в зависимости от диаметра полипропиленового волокна и числа пластичности грунта

Анализ поверхностей отклика (рис. 4.45 – 4.47) показывает, что геометрические характеристики волокон существенно влияют на показатель прочности на сжатие фиброцементогрунта. Максимальные показатели предела прочности на сжатие фиброцементогрунтовых композиций достигаются при содержании полипропиленовой фибры 1,5 – 2,0 % с длиной волокон 25 мм и диаметром 25 мкм. Данные геометрические характеристики полипропиленовой фибры позволяют увеличить в среднем на 31,8 % предел прочности на сжатие по сравнению с цементогрунтами, имеющими аналогичное содержание минерального вяжущего на базе естественных грунтов с различным числом пластичности. Увеличение диаметра полипропиленовой фибры более 25 мкм приводит к снижению прочностных показателей фиброцементогрунта.

Уравнение регрессии прочности на растяжение при раскалывании в натуральных обозначениях факторов имеет вид:

$$R_{\text{р}} = 1{,}264 - 0{,}0003{L_{\text{пв}}}^2 - 0{,}041{Q_{\text{пв}}}^2 - 0{,}0006D_{\text{пв}}Q_{\text{пв}} + 0{,}025L_{\text{пв}} - 0{,}003D_{\text{пв}} + 0{,}257Q_{\text{пв}} - 0{,}083I_p \quad (4.16)$$

Для более подробного исследования влияния факторов на результат экспериментально-статистической модели использован метод графической интерпретации. Графическая интерпретация уравнения регрессии представлена в виде построенных поверхностей отклика (рис. 4.48 – 4.50), которые представляют собой объемную наглядную картину совместного влияния содержания компонентов фиброцементогрунтовой смеси на ее предел прочности на растяжение при раскалывании.

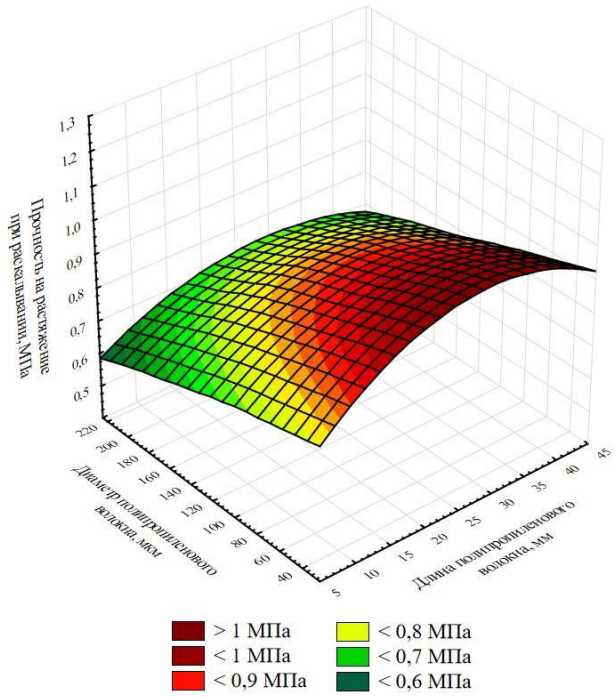


Рисунок 4.48 – Поверхность отклика прочности на растяжение при раскалывании в зависимости от длины и диаметра полипропиленового волокна

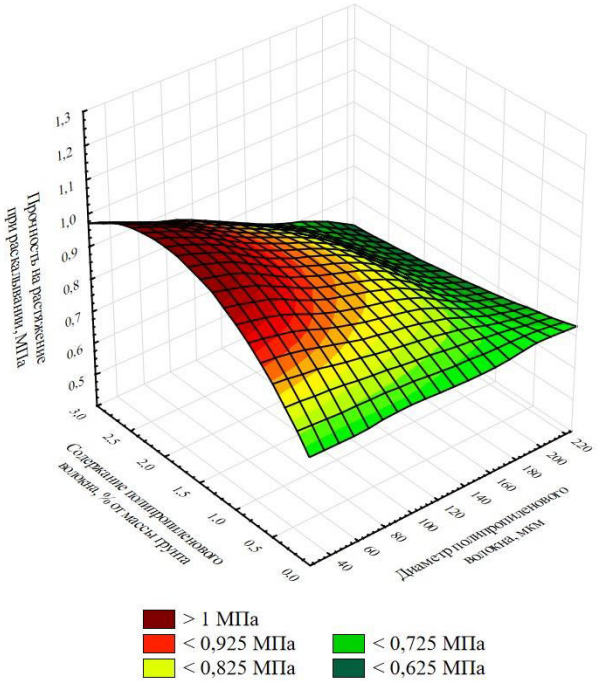


Рисунок 4.49 – Поверхность отклика прочности на растяжение при раскалывании в зависимости от диаметра и содержания полипропиленового волокна

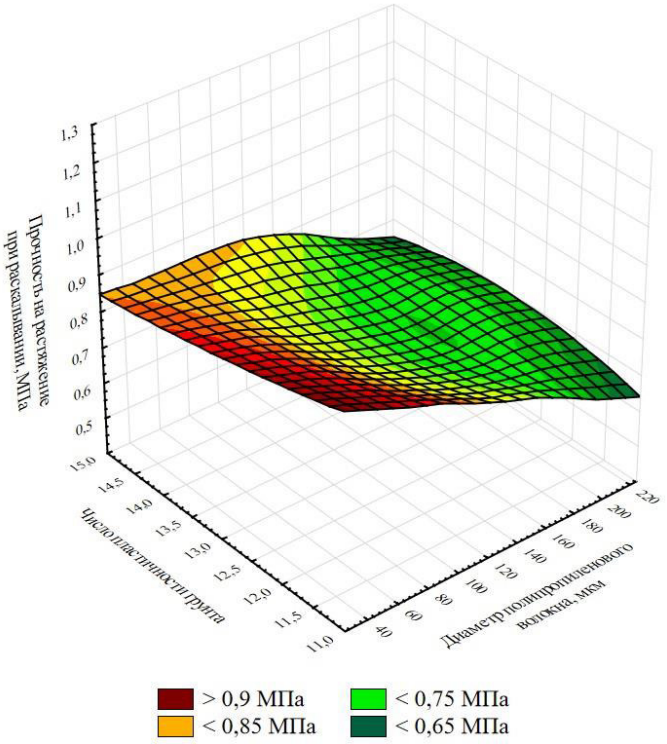


Рисунок 4.50 – Поверхность отклика прочности на растяжение при раскалывании в зависимости от диаметра полипропиленового волокна и числа пластичности грунта

Анализ поверхностей отклика (рис. 4.48 – 4.50) показывает, что геометрические характеристики волокон существенно влияют на показатель прочности на растяжение при раскалывании фиброцементогрунта. Максимальные показатели предела прочности растяжение при раскалывании фиброцементогрунтовых композиций достигаются при содержании базальтовой фибры 1,5 – 2,0 % с длиной волокон 25 мм и диаметром 25 мкм. Данные геометрические характеристики полипропиленовой фибры позволяют увеличить в среднем на 70,5 % предел прочности на растяжение при раскалывании по сравнению с цементогрунтами, имеющими аналогичное содержание минерального вяжущего на базе естественных грунтов с различным числом пластичности. Увеличение диаметра полипропиленовой фибры более 25 мкм приводит к снижению прочностных показателей фиброцементогрунта.

Результаты лабораторных испытаний подтверждают теоретические исследования особенностей структурообразования фиброцементогрунтовых композиций, изложенные в главе 2 диссертационной работы. Оптимальные геометрические параметры и содержание волокон фибры обеспечивают их прочное удерживание в цементогрунтовой матрице и увеличение прочностных показателей фиброцементогрунта, в особенности на растяжение при изгибе, а, следовательно, трещиностойкость конструктивных слоев лесовозных лесных дорог.

Учитывая результаты исследования и принимая во внимание требования п. 4.3.1.2 ГОСТ 70452-2022: размер частиц крупнообломочных грунтов при укреплении не должен превышать 45 мм, при этом частиц фракции от 31,5 до 45 мм должно быть не более 10 %, можно заключить, что на основании полученных экспериментально-статистических моделей (п. 4.1 – 4.7) зависимость оптимального соотношения длины фибры к ее диаметру для достижения максимальных прочностных показателей фиброцементогрунтов $L_в$ / $D_в$ = 1000 – 1800 справедлива для всех типов глинистых грунтов, распространенных в лесной зоне.

4.7 Структурные прочностные характеристики фиброцементогрунтовых композиций

Моделирование, конструирование и расчет конструкций лесовозных лесных дорог с учетом природных факторов лесной зоны и нагрузок от лесотранспортных машин основывается на характеристиках структурной прочности дорожно-строительного материала: угла внутреннего трения и удельного сцепления. Поэтому исследование данных показателей у фиброцементогрунта с учетом различного содержания в его составе портландцемента и фиброволокна является актуальным.

С целью создания и анализа экспериментально-статистических моделей структурных прочностных характеристик фиброцементогрунтовых композиций на основе базальтового волокна из отходов производства теплоизоляционных плит использовано математическое планирование эксперимента (DOE) [185]. В качестве переменных факторов при определении структурных прочностных характеристик были приняты следующие: содержание портландцемента; содержание базальтового волокна.

Лабораторные исследования проводились на образцах фиброцементогрунта различных составов, изготовленных в соответствии с ГОСТ Р 70452-2022 при соблюдении единых требований проведения экспериментальных исследований и характеристик исходных материалов (см. главу 3). На каждый состав фиброцементогрунтовой смеси подготовлено по 3 образца диаметром 71 мм и высотой 35 мм (рис. 4.51). Для приготовления фиброцементогрунтовых смесей использовался природный грунт – суглинок тяжелый песчанистый (см. табл. 3.5), взятый из земляного полотна лесовозной лесной дороги на территории ГКУ СО «Карпинское лесничество» в Свердловской области, обслуживаемой ООО «ОУС Леском» и базальтовое волокно из отходов производства теплоизоляционных плит.



Рисунок 4.51 – Образцы для проведения испытаний:
1 (образец № 1.3) – цементогрунт с содержанием 2% портландцемента от массы сухого грунта, без фибры;
2 (образец № 2.9) – фиброцементогрунт с содержанием 4% портландцемента и 1,5% фиброволокна от массы сухого грунта;
3 (образец № 3.7) – фиброцементогрунт с содержанием 6% портландцемента и 1,5% фиброволокна от массы сухого грунта.

Учитывая изложенное, целевые функции имеют вид:

$$C = f(Q_{пц}, Q_{бв}) \rightarrow max$$

$$\varphi = f(Q_{пц}, Q_{бв}) \rightarrow max$$

где: C – удельное сцепление, кПа (у);

φ – угол внутреннего трения, градусы (у);

$Q_{пц}$ – содержание портландцемента, % от массы сухого грунта (X_1);

$Q_{бв(тп)}$ – содержание базальтового волокна на основе отходов производства теплоизоляционных плит, % от массы сухого грунта (X_2);

В соответствии с полным факторным планом 3^2 эксперимента по определению структурных прочностных характеристик фиброцементогрунтовых композиций, координаты центра плана, интервалы варьирования и уровни исследования приведены в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Уровни варьирования переменных факторов эксперимента

Факторы	Размерность	Обозначение факторов	Основной уровень	Шаг варьирования	Верхний уровень	Нижний уровень
			0		+1	-1
Содержание портландцемента (от массы сухого грунта), $Q_{пц}$	%	X_1	4	2	6	2
Содержание базальтового волокна (от массы сухого грунта), $Q_{бв}$	%	X_2	0,75	0,75	1,5	0

В ходе проведения и обработки результатов экспериментов получены уравнения регрессии со статистически значимыми их параметрами.

Уравнение регрессии удельного сцепления в зависимости от переменных факторов в натуральных обозначениях имеет вид:

$$C = -117{,}434 + 0{,}379{Q_{пц}}^2 + 16{,}99{Q_{бв(тп)}}^2 + 44{,}783Q_{пц}Q_{бв(тп)} + 118{,}339Q_{пц} - 121{,}64Q_{бв(тп)} \quad (4.17)$$

Для более подробного исследования влияния факторов на результат экспериментально-статистической модели использован метод графической интерпретации. Графическая интерпретация уравнения регрессии выполнена в виде построенной поверхности отклика (рис. 4.52), которая представляют собой объемную наглядную картину совместного влияния содержания компонентов на показатель удельного сцепления фиброцементогрунта. Согласно полученным результатам, показатель удельного сцепления фиброцементогрунта с содержанием 2 % портландцемента и 1,5 % фиброволокна составляет 108,7 кПа, что на 8 % меньше, чем у аналогичных образцов цементогрунта без фиброволокна. Показатель удельного сцепления фиброцементогрунта с содержанием 4 % портландцемента и 1,5 % фиброволокна составляет 487,70 кПа,

что на 34 % больше, чем у аналогичных образцов цементогрунта без фиброволокна. Показатель удельного сцепления фиброцементогрунта с содержанием 6 % портландцемента и 1,5 % фиброволокна составляет 866,0 кПа, что на 43 % больше, чем у аналогичных образцов цементогрунта без фиброволокна.

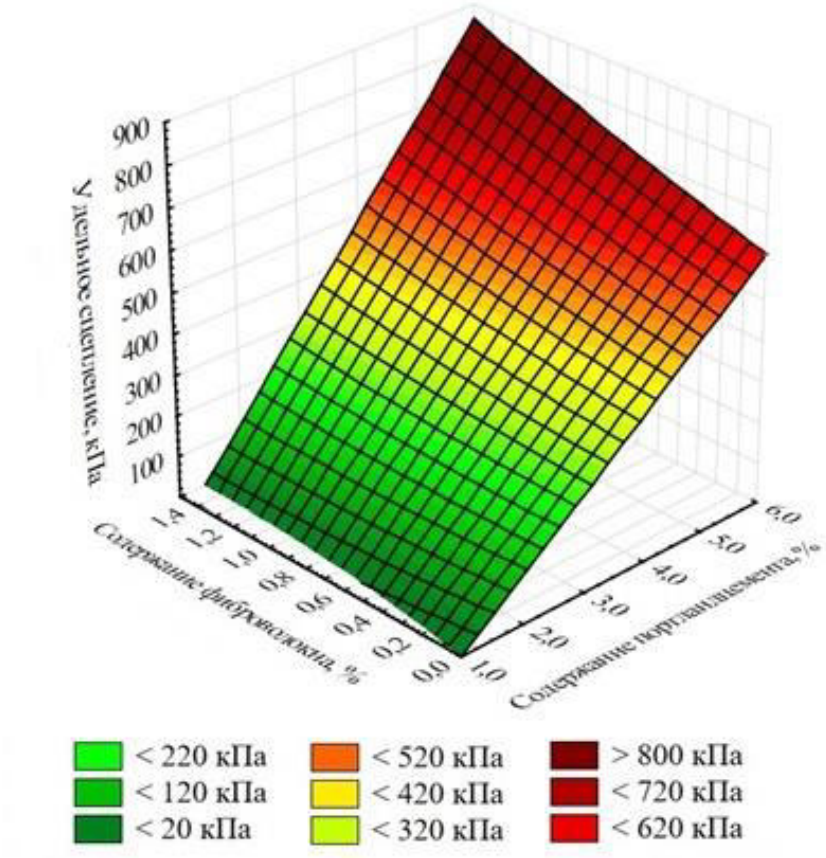


Рисунок 4.52 – Поверхность отклика удельного сцепления фиброцементогрунта в зависимости от содержания портландцемента и фиброволокна

Уравнение регрессии угла внутреннего трения в зависимости от переменных факторов в натуральных обозначениях имеет вид:

$$\varphi = 15{,}874 - 0{,}122{Q_{\text{пц}}}^2 + 0{,}299{Q_{\text{бв(тп)}}}^2 + 0{,}367Q_{\text{пц}}Q_{\text{бв(тп)}} + 2{,}353Q_{\text{пц}} - 1{,}695Q_{\text{бв(тп)}} \quad (4.18)$$

Графическая интерпретация уравнения регрессии выполнена в виде построенной поверхности отклика (рис. 4.53), которая представляют собой

объемную наглядную картину совместного влияния содержания компонентов на показатель угла внутреннего трения фиброцементогрунта.

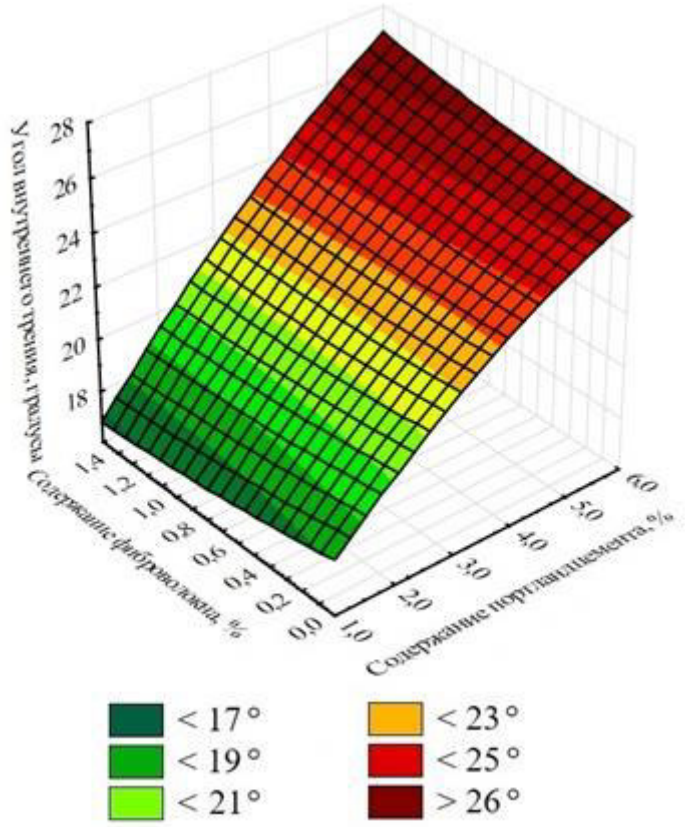


Рисунок 4.53 – Поверхность отклика угла внутреннего трения фиброцементогрунта в зависимости от содержания портландцемента и фиброволокна

Согласно полученным результатам, показатель угла внутреннего трения фиброцементогрунта с содержанием 2 % портландцемента и 1,5 % фиброволокна составляет 19°, что на 1 % меньше, чем у аналогичных образцов цементогрунта без фиброволокна. Показатель угла внутреннего трения фиброцементогрунта с содержанием 4 % портландцемента и 1,5 % фиброволокна составляет 24°, что на 4 % больше, чем у аналогичных образцов цементогрунта без фиброволокна. Показатель угла внутреннего трения фиброцементогрунта с содержанием 6 % портландцемента и 1,5 % фиброволокна составляет 27°, что на 8 % больше, чем у аналогичных образцов цементогрунта без фиброволокна.

Таким образом, на основании проведенных исследований структурных прочностных характеристик фиброцементогрунтовых композиций установлено, что дисперсное армирование эффективно при содержании портландцемента более 2 % от массы сухого грунта. В данных условиях волокна эффективно удерживаются в цементогрунтовой матрице (рис. 4.54) и за счет своего осевого растяжения воспринимает внешние нагрузки, способствуя увеличению структурных прочностных характеристик фиброцементогрунта. При этом эффективность фиброволокна повышается с ростом содержания минерального вяжущего в составе фиброцементогрунта.

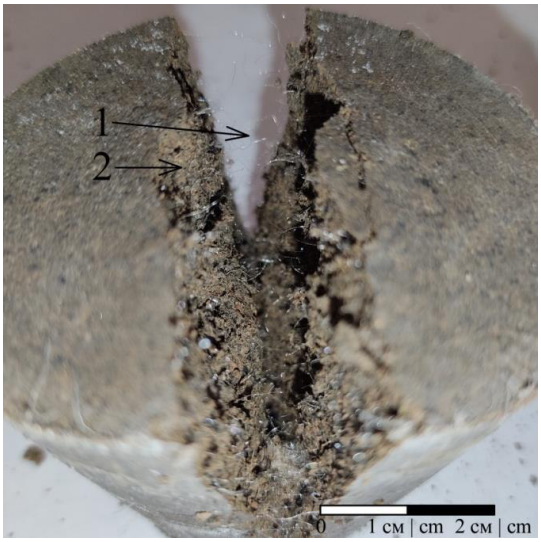


Рисунок 4.54 – Макроструктура фиброцементогрунта с содержанием портландцемента 6 % и фиброволокна 1,5 % от массы сухого грунта: 1 – фиброволокно; 2 – цементогрунтовая матрица

Результаты лабораторных испытаний подтверждают теоретические исследования особенностей структурообразования фиброцементогрунтовых композиций, изложенные в главе 2 диссертационной работы, а также результаты экспериментов [220, 222, 233]. Дисперсное армирование волокнами фибры позволяет увеличить структурную прочность фиброцементогрунтовых композиций, что обеспечивает конструкции лесовозных лесных дорог высокие физико-механические и транспортно-эксплуатационные показатели в условиях

слабых и переувлажненных оснований, и значительных нагрузок от лесотранспортных машин [240, 262].

4.8 Расчетное моделирование деформационных характеристик конструкций лесовозных лесных дорог на основе фиброцементогрунтовых композиций

На основании полученных зависимостей структурных прочностных показателей фиброцементогрунтовых композиций произведено расчетное моделирование деформационных характеристик конструкций лесовозных лесных дорог с учетом нагрузок от лесотранспортных машин при различной консистенции связного грунта основания земляного полотна [190]. С целью оценки эффективности, исследование деформационных характеристик конструкции лесовозной лесной дороги по типу 2 на основе фиброцементогрунта проводилось в сравнении с равнопрочной конструкцией по типу 1 из цементогрунта без добавки фиброволокна (рис. 4.55) и конструкцией по типу тип 3 из каменных материалов (рис. 4.56).

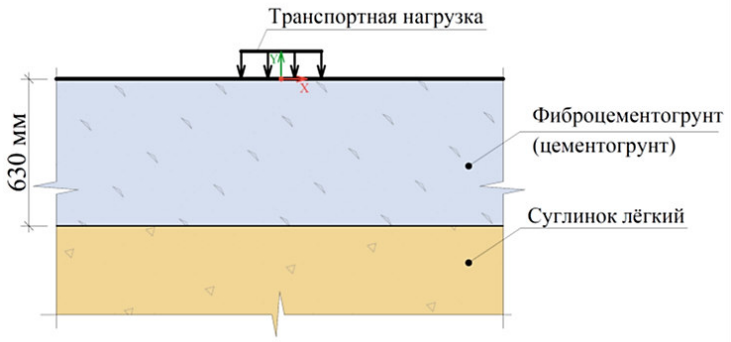


Рисунок 4.55 – Расчетная схема конструкций дорожной одежды по типу 1 и 2

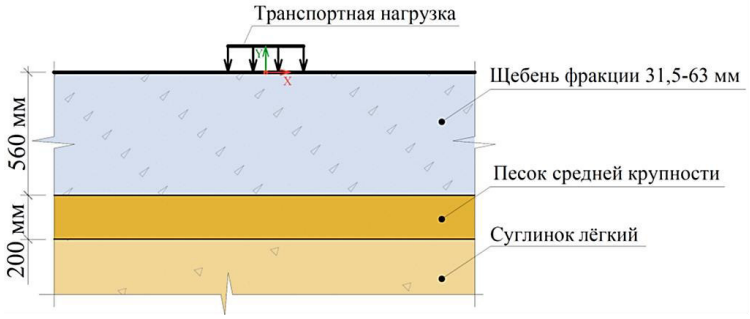


Рисунок 4.56 – Расчетная схема конструкции дорожной одежды по типу 3

Подбор оптимальных составов цементогрунтовой и фиброцементогрунтовой смесей, соответствующих марке М60 А, производился по стандартной методике ГОСТ 70452-2022 на основе природного грунта – суглинка легкого пылеватого, отобранного из земляного полотна лесовозной лесной дороги на территории ГКУ СО «Алапаевское лесничество» в Свердловской области, при соблюдении единых требований проведения экспериментальных исследований и характеристик исходных материалов (см. главу 3). Показатели структурных прочностных характеристик фиброцементогрунта и цементогрунта оптимальных составов, полученных в ходе лабораторных исследований, представлены в табл. 4.11. Аналогичные характеристики щебня (E = 100 МПа , φ =45°) и песка (E = 30 МПа, φ =30°) приняты согласно СП 22.13330.2011.

Таблица 4.11 – Показатели структурных прочностных характеристик укрепленных грунтов

Показатель	Фиброцементогрунт	Цементогрунт
Модуль деформации (E), МПа	55	47
Удельное сцепление (C), кПа	866,0	607,3
Угол внутреннего трения (φ), градус	27	25

Для моделирования деформационных характеристик конструкций лесовозных лесных дорог принималась стандартная нагрузка от колеса груженого лесовоза – 55 кН/м^2. Прочностные и деформационные характеристики связного грунта основания земляного полотна (суглинка легкого пылеватого) различной консистенции: текучепластичной, мягкопластичной и твердой, приняты согласно СП 22.13330.2011.

На основании результатов проведенных исследований получены зависимости деформационных показателей конструкций лесовозных лесных дорог различных типов от консистенции грунта основания под действием нагрузки от лесотранспортных машин (табл. 4.12), а также эпюры главных напряжений (рис. 4.57 – 4.59).

Таблица 4.12 – Деформационные показатели конструкций лесовозных лесных дорог

Показатель	Грунт основания, E/C/ϕ (кПа/кПа/ °)	Типы покрытия дорожной одежды		
		Цементогрунт (тип 1)	Фиброцементогрунт (тип 2)	Щебень (тип 3)
Вертикальные деформации (осадка), мм	5/12/8	1,107	1,027	0,7982
Горизонтальные деформации (боковое смещение), мм		0,1854	0,1678	0,146
Вертикальные деформации (осадка), мм	20/14/18	0,6513	0,5818	0,4884
Горизонтальные деформации (боковое смещение), мм		0,1233	0,1085	0,09377
Вертикальные деформации (осадка), мм	40/60/30	0,5595	0,4923	0,4305
Горизонтальные деформации (боковое смещение), мм		0,1112	0,09703	0,08124

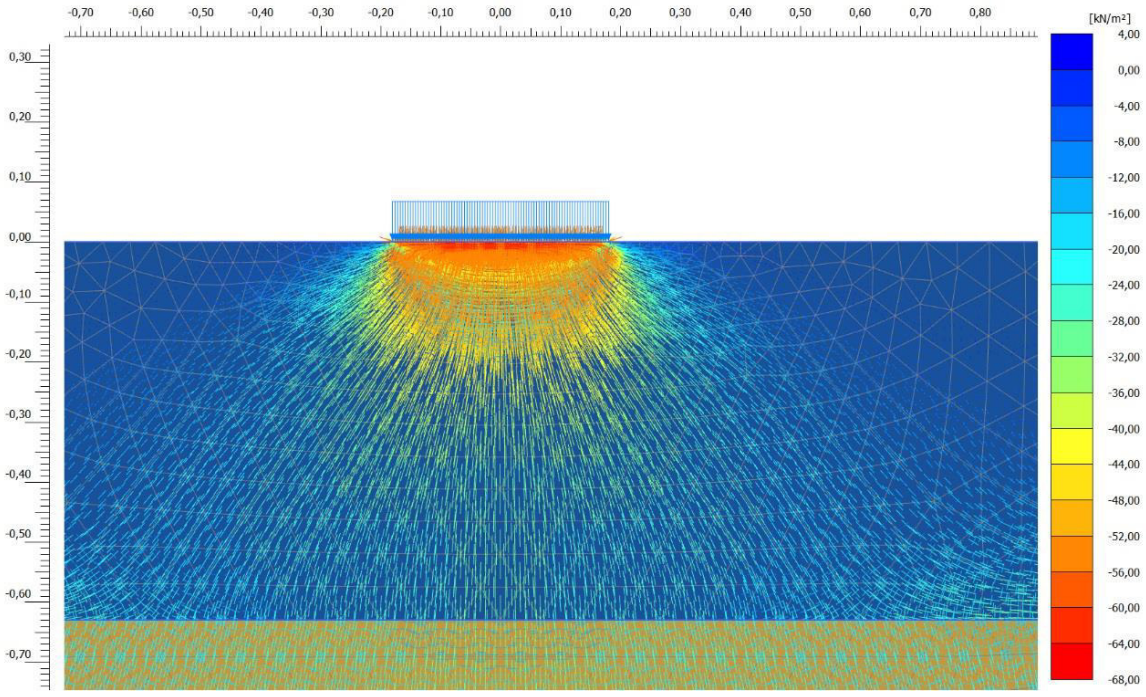


Рисунок 4.57 – Эпюра главных напряжений конструкции дорожной одежды по типу 1 от лесотранспортной нагрузки на основании из суглинка легкого пылеватого текучепластичной консистенции

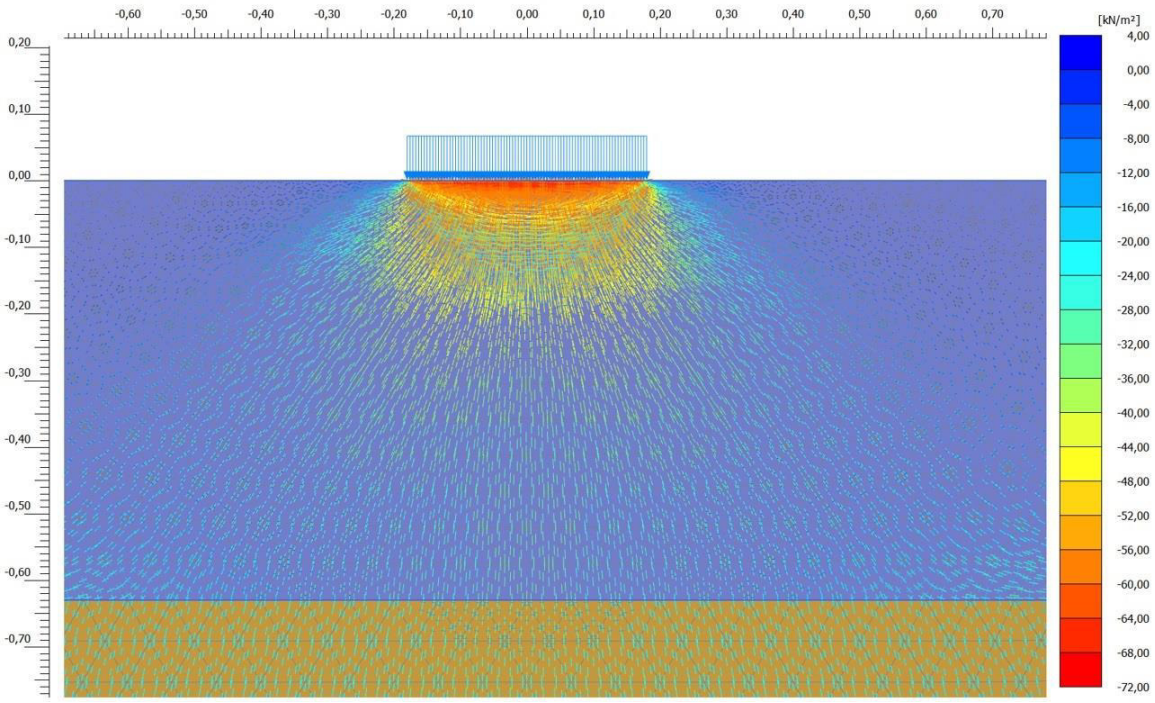


Рисунок 4.58 – Эпюра главных напряжений в конструкции дорожной одежды по типу 2 от лесотранспортной нагрузки на основании из суглинка легкого пылеватого текучепластичной консистенции

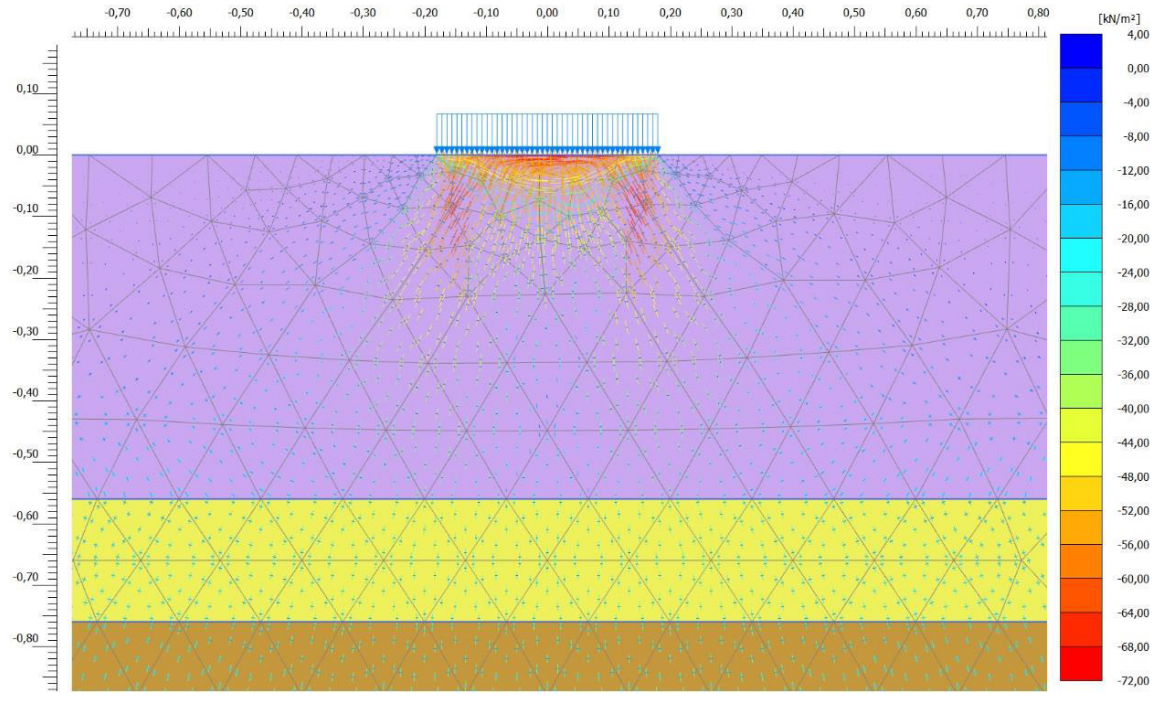


Рисунок 4.59 – Эпюра главных напряжений конструкции дорожной одежды по типу 3 от лесотранспортной нагрузки на основании из суглинка легкого пылеватого текучепластичной консистенции

По полученным зависимостям величины деформации конструкций дорожной одежды различных типов и консистенции грунта основания построены поверхности отклика вертикальной деформации (осадки) (рис. 4.60) и горизонтальной деформации (боковое смещение) (рис. 4.61).

На основании результатов исследований установлено, что в дорожной одежде из фиброцементогрунта на слабом основании из суглинка легкого пылеватого тягучепластичной консистенции возникают напряжения на 5 % больше, чем у цементогрунта, что способствует уменьшению деформаций конструкции лесовозной лесной дороги от нагрузки лесотранспортных машин. Так, показатели осадки конструкции из фиброцементогрунта меньше по сравнению с цементогрунтом на 12,0 % на грунте твердой консистенции, меньше на 10,6 % на грунте мягкопластичной консистенции и меньше на 7,2 % на грунте тягучепластичной консистенции. Показатели горизонтальных деформаций конструкции из фиброцементогрунта также меньше по сравнению с цементогрунтом на 12,7 % на грунте твердой консистенции, меньше на 12,0 % на грунте магкопластичной консистенции и меньше на 9,5 % на грунте тягучепластичной консистенции.

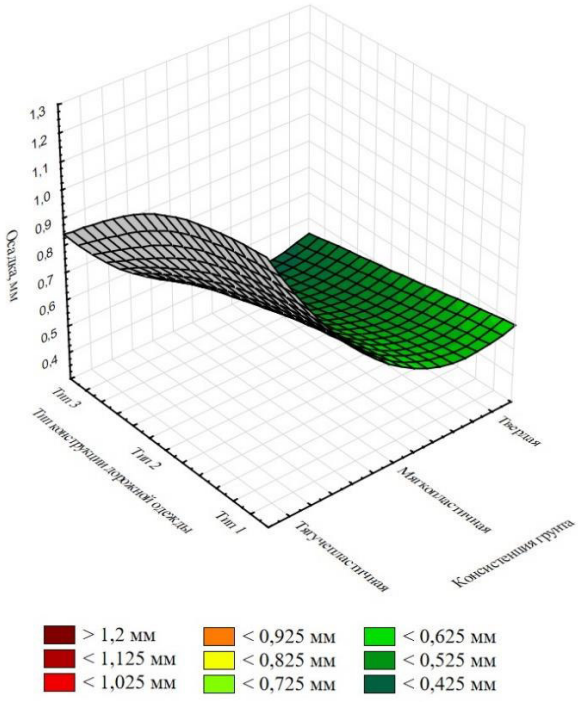


Рисунок 4.60 – Поверхность отклика вертикальной деформации (осадки) от консистенции грунта основания и типа конструкции дорожной одежды

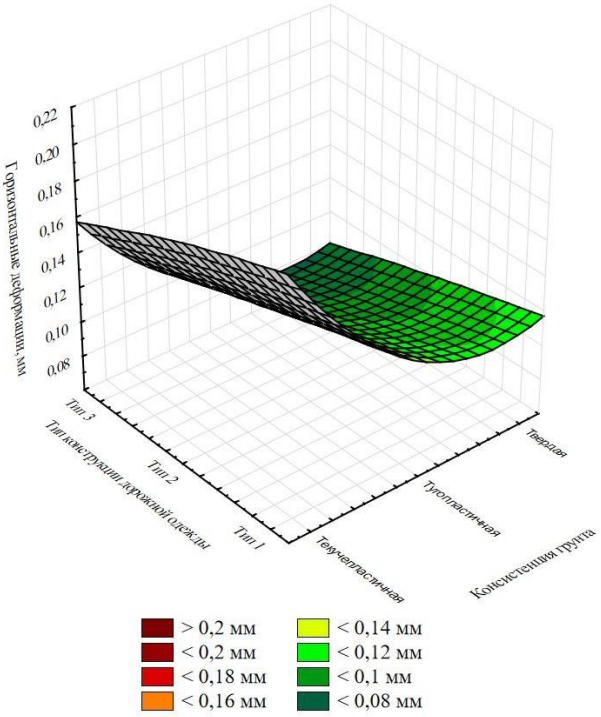


Рисунок 4.61 – Поверхность отклика горизонтальной деформации (боковое смещение) от консистенции грунта основания и типа конструкции дорожной одежды

Согласно полученным данным, напряжения в дорожной одежде из щебня выше, чем у фиброцементогрунта на 7 %. Показатели осадки конструкции из щебня меньше по сравнению с фиброцементогрунтом на 12,5 % на грунте твердой консистенции, меньше на 16,0 % на грунте мягкопластичной консистенции и меньше на 22,3 % на грунте тягучепластичной консистенции. Показатели горизонтальных деформаций конструкции из щебня также меньше по сравнению с фиброцементогрунтом на 16,3 % на грунте твердой консистенции, меньше на 13,6 % на грунте мягкопластичной консистенции и меньше на 13,0 % на грунте тягучепластичной консистенции. На основании изложенного, эффективность применения щебня в конструкциях лесовозных лесных дорог в сравнении с фиброцементогрунтом повышается на слабых основаниях по критерию осадки, но уменьшается по критерию горизонтальных деформаций. Данная зависимость объясняется тем, что при равных прочностных характеристиках, дорожная одежда из щебня, содержащая нижний слой из песка, имеет большую толщину, чем

конструкция из укрепленного грунта, что повышает ее деформационные показатели, однако требует использования значительных объемов каменных инертных материалов, и поэтому является менее экономически эффективной в особенности в лесосырьевых районах.

Фиброцементогрунт в составе конструкций лесовозных лесных дорог в сравнении с цементогрунтом позволяет уменьшить вертикальные и горизонтальные деформации, причем эффективность возрастает с увеличением прочностных и деформационных характеристик грунта основания. Снижение деформаций в конструкции дорожной одежды при действии нагрузок от лесовозного транспорта позволяет обеспечить нормативные транспортно-эксплуатационные показатели в условиях слабых оснований и увеличить срок службы покрытия лесовозных лесных дорог.

4.9 Исследование структуры фиброцементогрунтовых композиций методом оптической микроскопии

С целью изучения структурных особенностей фиброцементогрунтовых композиций на основе различных видов волокон проведены исследования методом оптической микроскопии. Фиброцементогрунтовые композиции были приготовлены на основе естественного грунта – суглинка тяжелого пылеватого, отобранного из земляного полотна лесовозной лесной дороги на территории ГКУ СО «Ирбитское лесничество» с добавлением компонентов согласно табл. 4.13, при соблюдении единых характеристик исходных материалов (см. главу 3). Исследование структуры проводилось в различные сроки набора прочности фиброцементогрунтовых композиций: 16 часов; 3 суток; 7 суток и 28 суток, после испытаний образцов по определению прочности на растяжение при раскалывании.

Таблица 4.13 – Составы фиброцементогрунтовых композиций

№ п/п	Наименование материала	Содержание материала (% от массы сухого грунта)
Серия образцов № 1		
1	Портландцемент	8
Серия образцов № 2		
1	Портландцемент	8
2	Фибра на основе базальтового волокна из отходов производства теплоизоляционных плит	1,5
Серия образцов № 3		
1	Портландцемент	8
2	Базальтовая фибра	2,0
Серия образцов № 4		
1	Портландцемент	8
2	Полипропиленовая фибра	1,5
Серия образцов № 5		
1	Портландцемент	8
2	Стеклянная фибра	2,0

Из рисунка 4.62 видно, что цементогрунт в возрасте 28 суток имеет однородную дисперсную структуру. Цементогрунтовая матрица (2) сформирована глинистыми коллоидами, пылеватыми и песчаными частицами, обросшими и скрепленными между собой кристаллами портландцемента. В связи с тем, что исследование структуры цементогрунта происходило после испытаний по определению прочности на растяжении при раскалывании, на образце наблюдается сеть микротрещин (1).

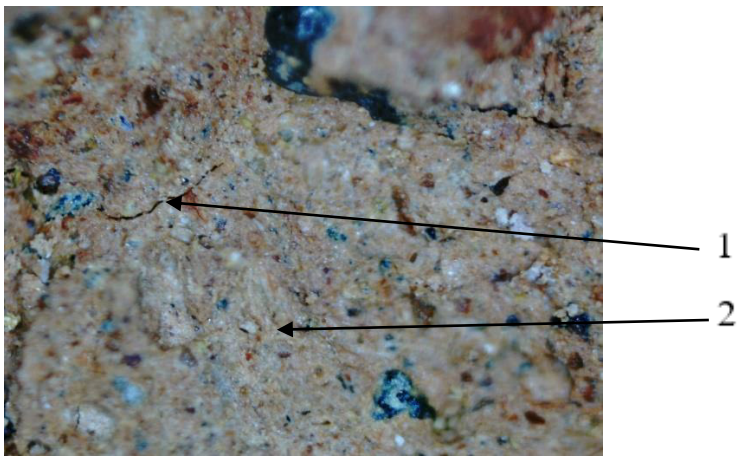


Рисунок 4.62 – Изображение структуры цементогрунта в возрасте 28 суток твердения: 1 – микротрещина; 2 – цементогрунтовая матрица

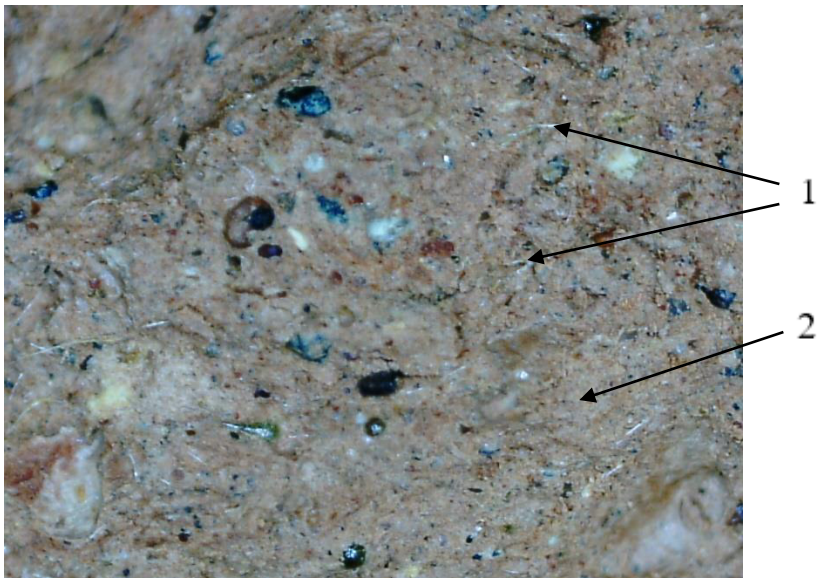


Рисунок 4.63 – Изображение структуры фиброцементогрунта в возрасте 28 суток твердения: 1 – волокна из отходов производства базальтовых теплоизоляционных плит; 2 – цементогрунтовая матрица

Согласно рис. 4.63 фибра из отходов производства теплоизоляционных плит (1) хорошо различима на фотоизображении, однако в результате небольшой длины, удерживаемые в цементогрунтовой матрице (2) волокна незначительно выступают на поверхности фиброцементогрунта.

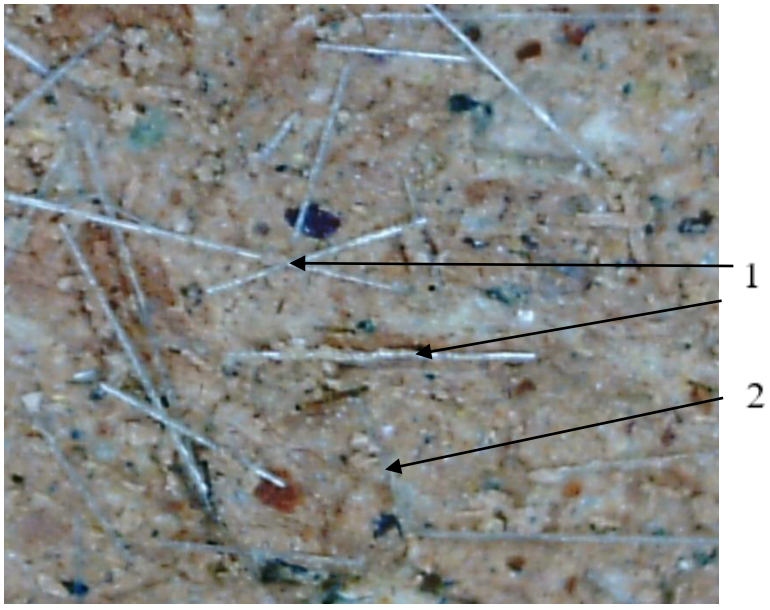


Рисунок 4.64 – Изображение структуры фиброцементогрунта в возрасте 28 суток твердения: 1 – базальтовые волокна; 2 – цементогрунтовая матрица

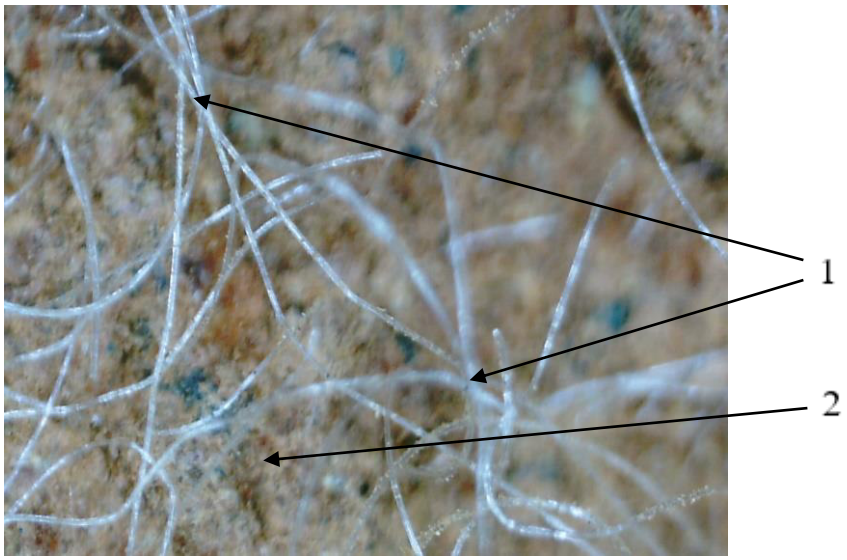


Рисунок 4.65 – Изображение структуры фиброцементогрунта в возрасте 28 суток твердения: 1 – полипропиленовые волокна; 2 – цементогрунтовая матрица

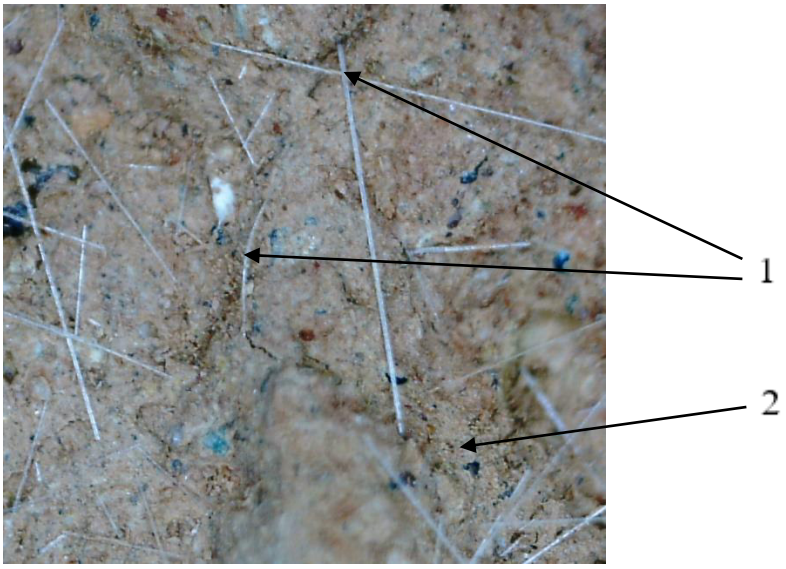


Рисунок 4.66 – Изображение структуры фиброцементогрунта в возрасте 28 суток твердения: 1 – стеклянные волокна; 2 – цементогрунтовая матрица

Из рисунков 4.64 – 4.66 видно, что фиброцементогрунт с добавкой базальтовых, полипропиленовых и стеклянных волокон имеет однородную дисперсную структуру, сформированную глинистыми коллоидами, пылеватыми и песчаными частицами, обросшими и скрепленными между собой кристаллами портландцемента, удерживающими равномерно распределенные в объеме фиброволокна. Базальтовые и стеклянные волокна (1) хорошо различимы на рис. 4.64 и 4.66, имеют прямолинейную по длине форму и удерживается в

цементогрунтовой матрице (2), значительно выступая на поверхности фиброцементогрунта. Полипропиленовые волокна (1) также хорошо различимы на рис. 4.65, имеют криволинейную по длине форму, и удерживаются в цементогрунтовой матрице (2). В исследуемых образцах волокна распределены в объеме фиброцементогрунта хаотично, перекрещиваясь между собой и формируя дисперсный армоскелет материала. Несмотря на то, что исследование структуры фиброцементогрунта происходило после испытаний по определению прочности на растяжение при раскалывании, микротрещины на поверхности образцов не наблюдались.

Анализ структурных особенностей фиброцементогрунтовых композиций в различные сроки набора прочности показал, что волокна различных видов активно влияют на процесс формирования кристаллической структуры, являясь центрами кристаллообразования. В первые 16 часов твердения портландцемента в силу незначительных размеров кристаллические новообразования цементационной природы на поверхности базальтовых волокон и фибры из отходов производства базальтовых теплоизоляционных плит трудно различимы методом оптической микроскопии (рис. 4.67, 4.68).

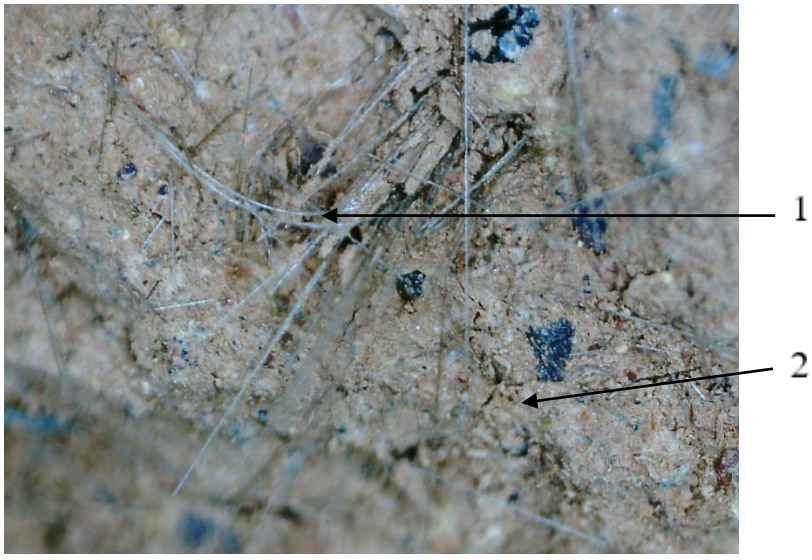


Рисунок 4.67 – Изображение структуры фиброцементогрунта в возрасте 16 часов твердения: 1 – базальтовые волокна; 2 – цементогрунтовая матрица

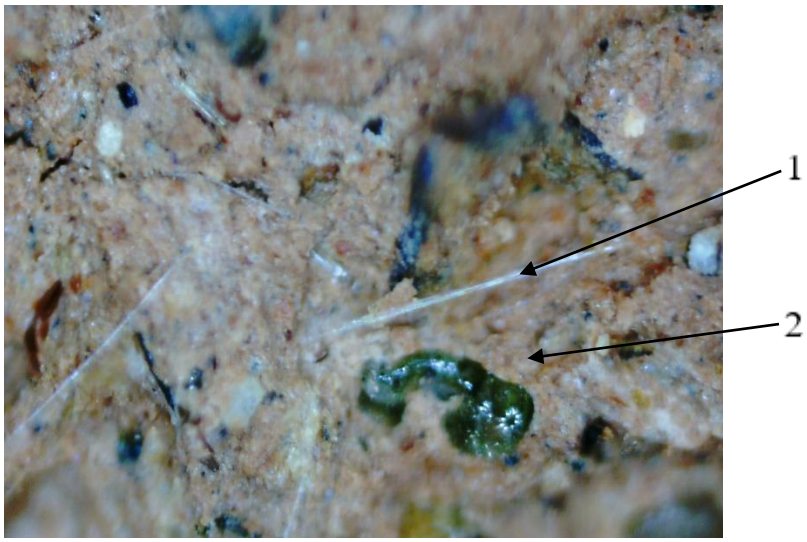


Рисунок 4.68 – Изображение структуры фиброцементогрунта в возрасте 16 часов твердения: 1 – волокна из отходов производства базальтовых теплоизоляционных плит; 2 – цементогрунтовая матрица

Однако уже в первые 16 часов твердения портландцемента наблюдаются локальные зоны гидратных новообразований цементационной природы на поверхности стеклянных и полипропиленовых волокон (рис. 4.69, 4.70).

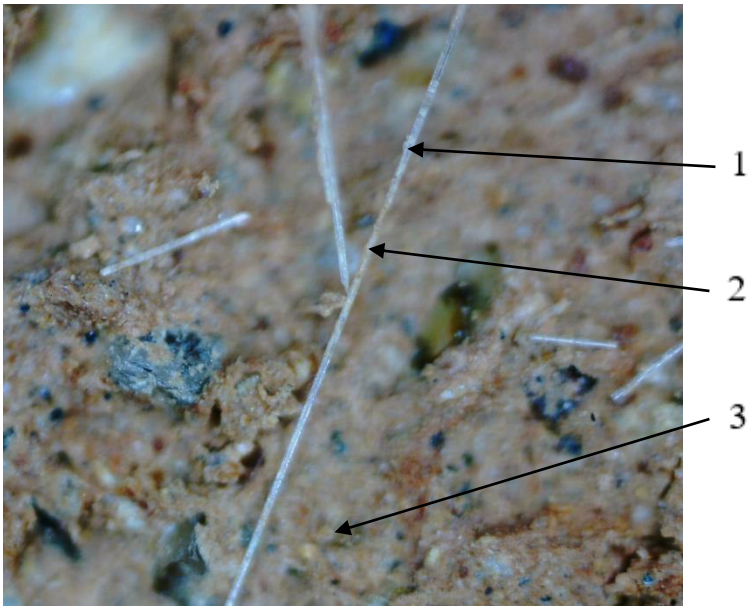


Рисунок 4.69 – Изображение структуры фиброцементогрунта в возрасте 16 часов твердения: 1 – стеклянные волокна; 2 – кристаллы гидратных новообразований на поверхности волокон; 3 – цементогрунтовая матрица

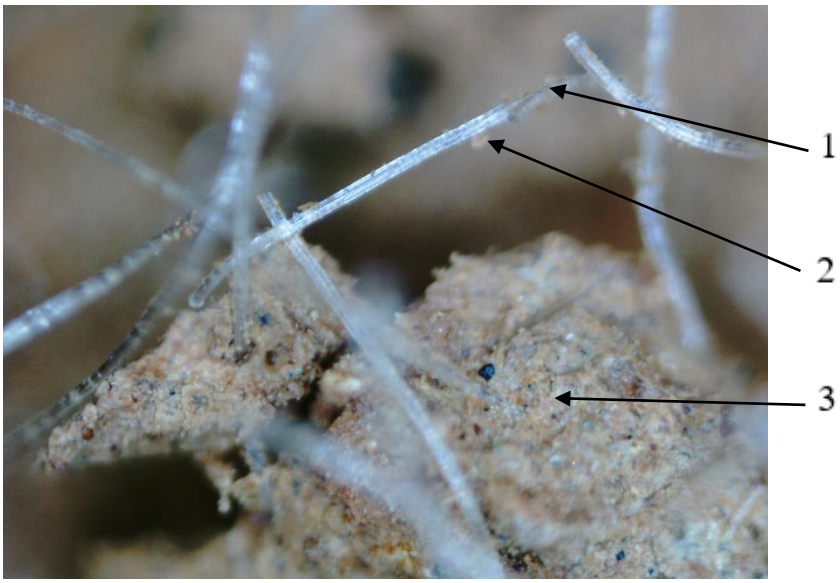


Рисунок 4.70 – Изображение структуры фиброцементогрунта в возрасте 16 часов твердения: 1 – полипропиленовые волокна; 2 – кристаллы гидратных новообразований на поверхности волокон; 3 – цементогрунтовая матрица

Через 3 суток твердения фиброцементогрунтовых композиций отчетливо видны кристаллические новообразования, удерживающие глинистые коллоиды и пылеватые частицы грунта, на поверхностях всех видов волокон (рис. 4.71 – 4.74).

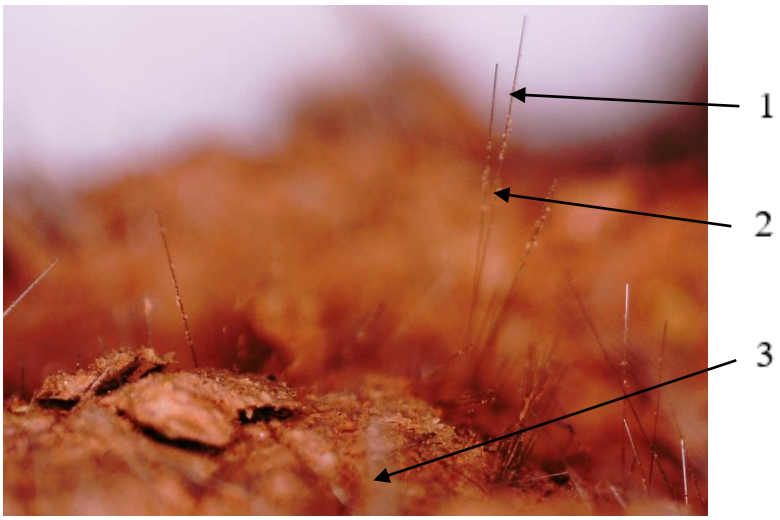


Рисунок 4.71 – Изображение структуры фиброцементогрунта в возрасте 3 суток твердения: 1 – базальтовые волокна; 2 – кристаллы гидратных новообразований на поверхности волокон; 3 – цементогрунтовая матрица

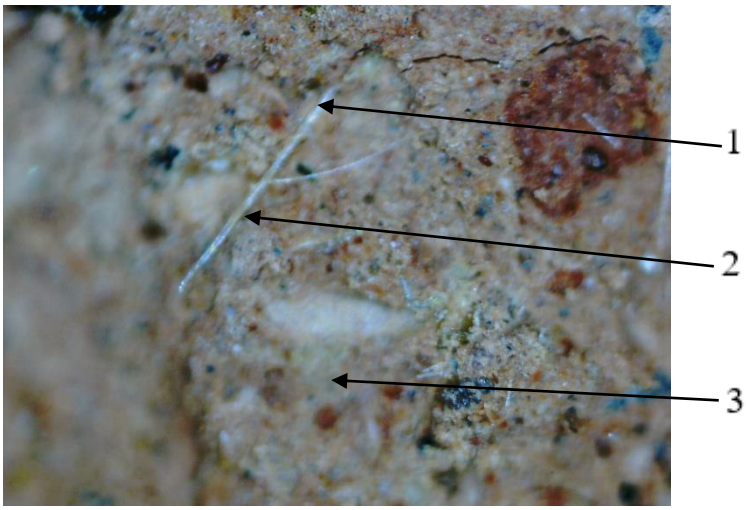


Рисунок 4.72 – Изображение структуры фиброцементогрунта в возрасте 3 суток твердения: 1 – волокна из отходов производства базальтовых теплоизоляционных плит; 2 – кристаллы гидратных новообразований на поверхности волокон; 3 – цементогрунтовая матрица

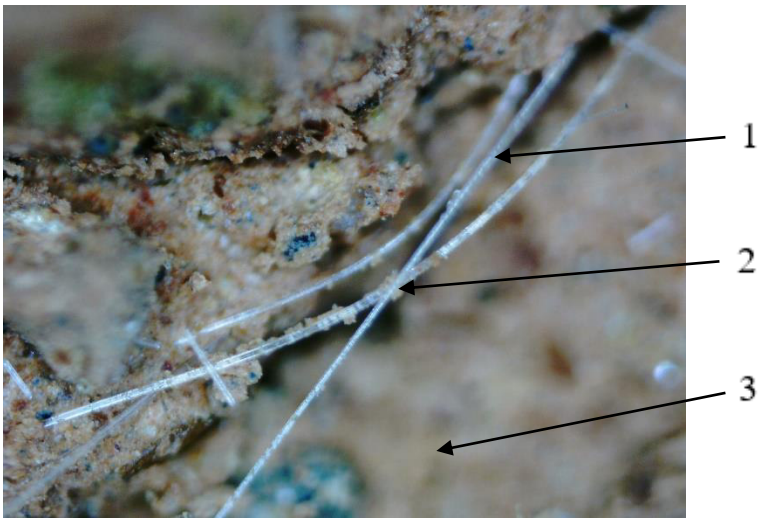


Рисунок 4.73 – Изображение структуры фиброцементогрунта в возрасте 3 суток твердения: 1 – стеклянные волокна; 2 – кристаллы гидратных новообразований на поверхности волокон; 3 – цементогрунтовая матрица

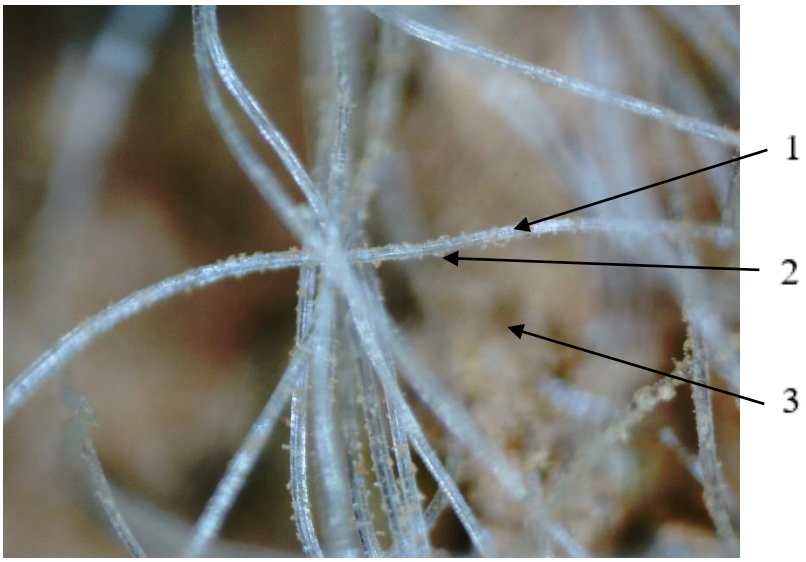


Рисунок 4.74 – Изображение структуры фиброцементогрунта в возрасте 3 суток твердения: 1 – полипропиленовые волокна; 2 – кристаллы гидратных новообразований на поверхности волокон; 3 – цементогрунтовая матрица

Согласно изображениям (рис. 4.75 – 4.78), через 7 суток твердения на поверхности всех видов волокон видны крупные кристаллические новообразования цементационной природы, срастающиеся между собой, а также обволакивающие и скрепляющие рядом расположенные фиброволокна.

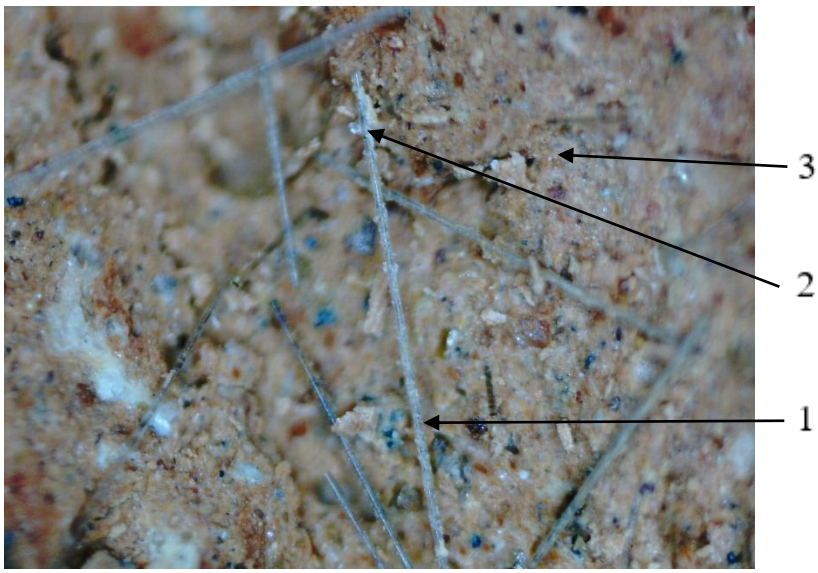


Рисунок 4.75 – Изображение структуры фиброцементогрунта в возрасте 7 суток твердения: 1 – базальтовые волокна; 2 – кристаллы гидратных новообразований на поверхности волокон; 3 – цементогрунтовая матрица

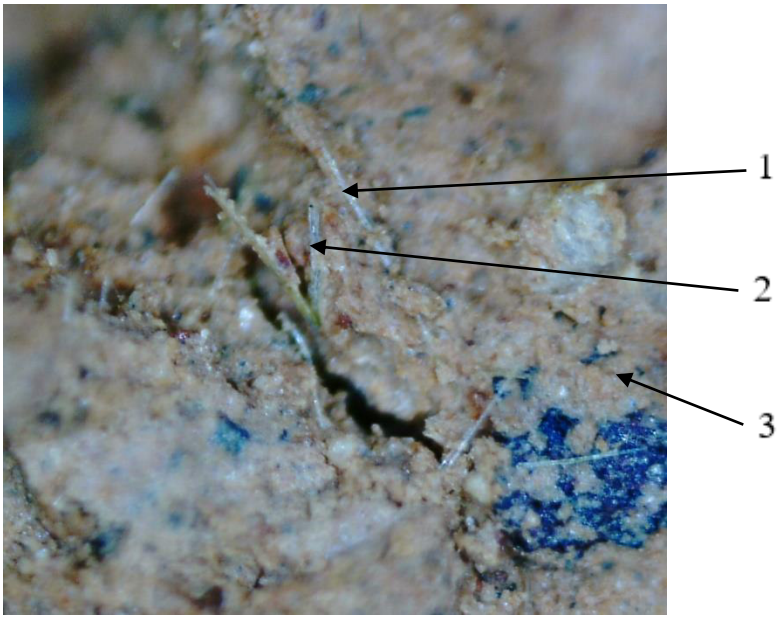


Рисунок 4.76 – Изображение структуры фиброцементогрунта в возрасте 7 суток твердения: 1 – волокна из отходов производства базальтовых теплоизоляционных плит; 2 – кристаллы гидратных новообразований на поверхности волокон; 3 – цементогрунтовая матрица

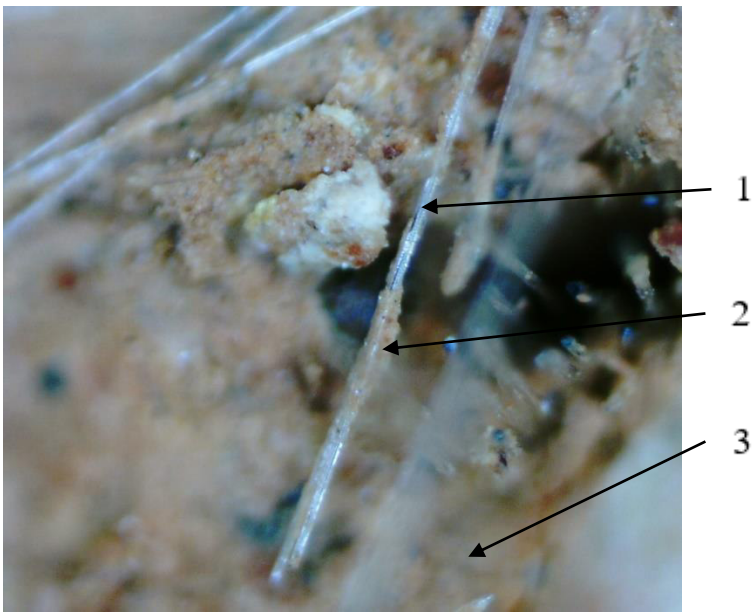


Рисунок 4.77 – Изображение структуры фиброцементогрунта в возрасте 7 суток твердения: 1 – стеклянные волокна; 2 – кристаллы гидратных новообразований на поверхности волокон; 3 – цементогрунтовая матрица



Рисунок 4.78 – Изображение структуры фиброцементогрунта в возрасте 7 суток твердения: 1 – полипропиленовые волокна; 2 – кристаллы гидратных новообразований на поверхности волокон; 3 – цементогрунтовая матрица

Через 28 суток твердения размеры кристаллических новообразований цементационной природы на поверхности фибры достигают еще больших размеров (рис. 4.79 – 4.82).

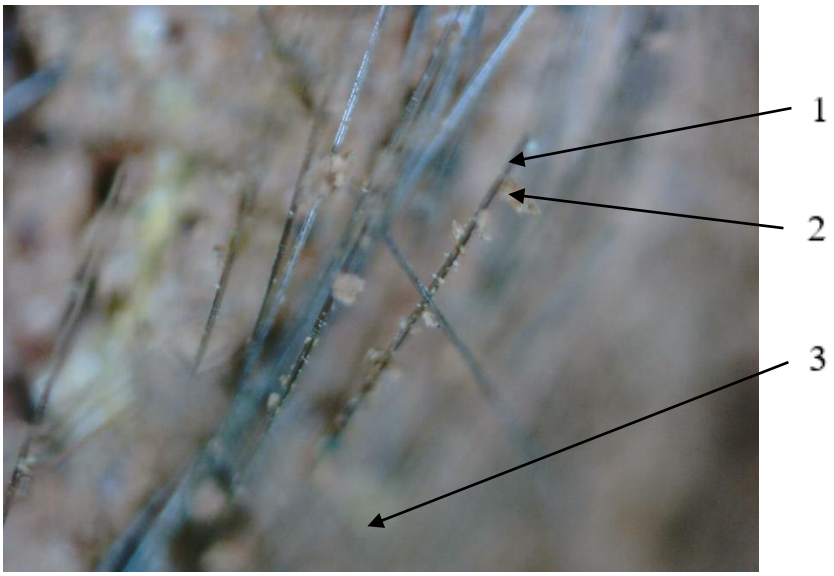


Рисунок 4.79 – Изображение структуры фиброцементогрунта в возрасте 28 суток твердения: 1 – базальтовые волокна; 2 – кристаллы гидратных новообразований на поверхности волокон; 3 – цементогрунтовая матрица

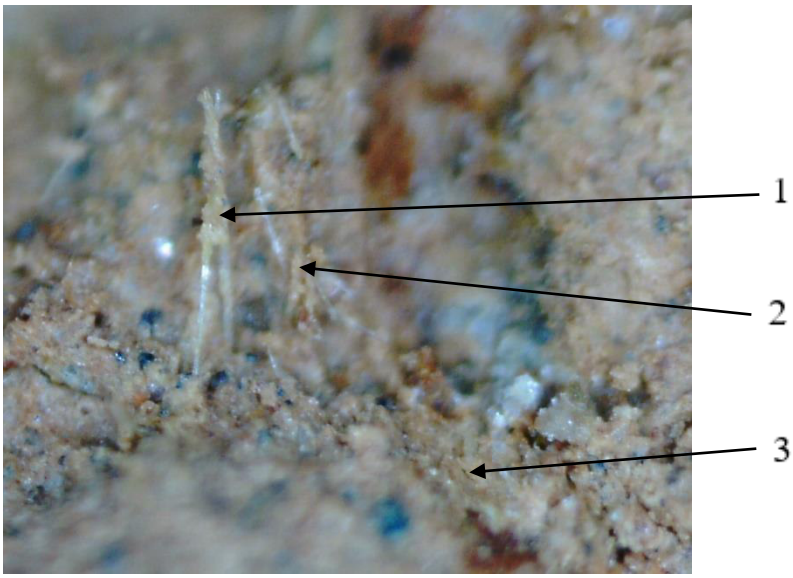


Рисунок 4.80 – Изображение структуры фиброцементогрунта в возрасте 28 суток твердения: 1 – волокна из отходов производства базальтовых теплоизоляционных плит; 2 – кристаллы гидратных новообразований на поверхности волокон; 3 – цементогрунтовая матрица

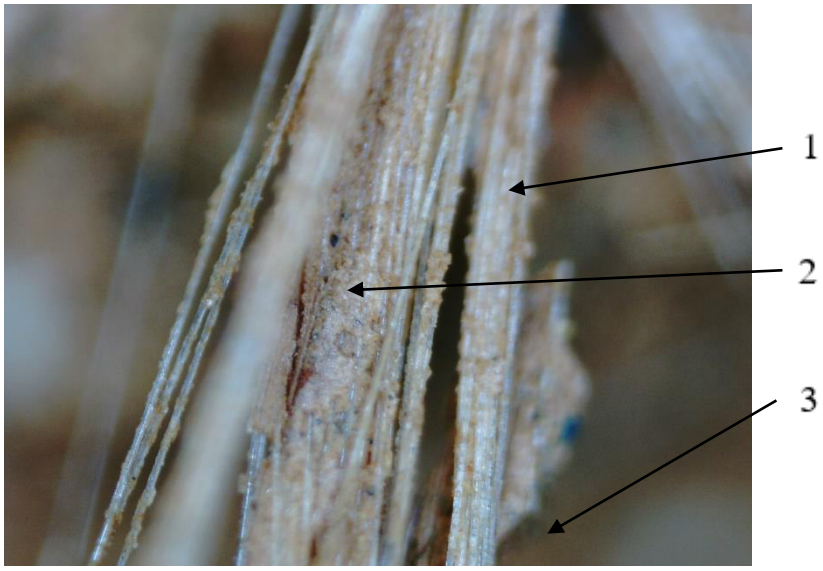


Рисунок 4.81 – Изображение структуры фиброцементогрунта в возрасте 28 суток твердения: 1 – стеклянные волокна; 2 – кристаллы гидратных новообразований на поверхности волокон; 3 – цементогрунтовая матрица



Рисунок 4.82 – Изображение структуры фиброцементогрунта в возрасте 28 суток твердения: 1 – полипропиленовые волокна; 2 – кристаллы гидратных новообразований на поверхности волокон; 3 – цементогрунтовая матрица

Благодаря значительному сцеплению цементогрунтовой матрицы с полипропиленовыми волокнами, даже после полного разрушения материала, агломераты цементогрунта продолжают удерживаться фиброй (рис. 4.83).

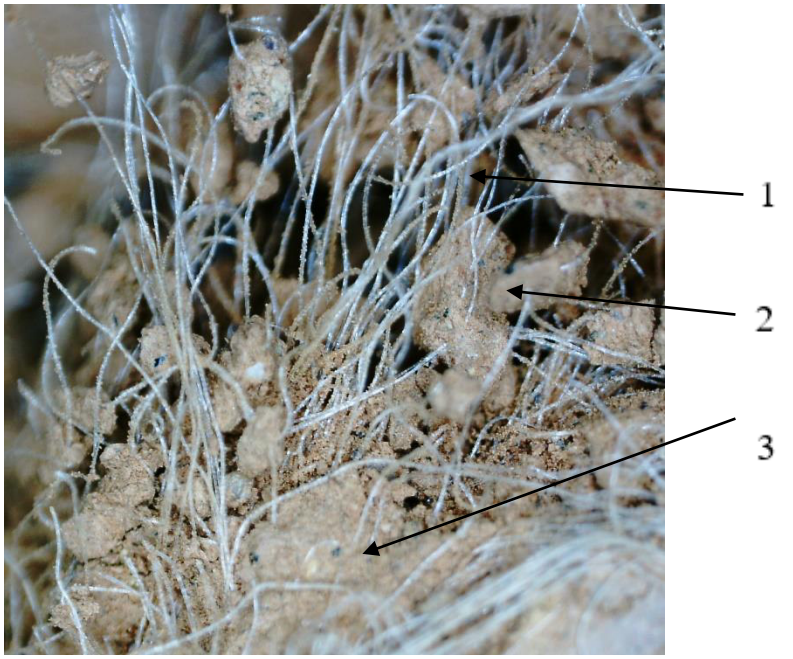


Рисунок 4.83 – Изображение структуры после разрушения фиброцементогрунта: 1 – полипропиленовые волокна; 2 – агломераты цементогрунта, удерживаемые на волокнах; 3 – цементогрунтовая матрица

Таким образом, на основании результатов исследования установлено, что продукты гидратации клинкерных материалов в процессе твердения портландцемента образуются и развиваются опережающим темпом на поверхности волокон фибры. Это способствует более прочному удерживанию волокон на ранних стадиях твердения в цементогрунтовой матрице, а также формированию однородной и развитой кристаллической структуры, обеспечивая высокие физико-механические показатели и трещиностойкость конструкции лесовозных лесных дорог. Данные результаты подтверждают выводы теоретических исследований настоящей диссертационной работы (см. главу 2), а также научных публикаций [268].

4.10 Исследование кинетики структурообразования фиброцементогрунтовых композиций

Учитывая активное влияние волокон на формирование кристаллической структуры фиброцементогрунтовых композиций, проведено исследование процессов структурообразования по кинетике набора прочности. В качестве исследуемых параметров физико-механических характеристик фиброцементогрунтовых композиций (табл. 4.14) были определены: прочность на сжатие и прочность на растяжение при раскалывании, при различных сроках набора прочности образцов: 7, 28 и 56 суток.

Таблица 4.14 – Составы фиброцементогрунтовых композиций

Компоненты составов	Содержание компонентов, % от массы сухого грунта		
	№ 1	№ 2	№ 3
Портландцемент ЦЕМ II/В-И 32,5Б	8,0	8,0	8,0
Фибра на основе базальтового волокна из отходов производства теплоизоляционных плит	0	1,5	3,0

Фиброцементогрунтовые композиции были изготовлены на основе естественного грунта – суглинка тяжелого песчанистого (см. табл. 3.5), отобранного из земляного полотна лесовозной лесной дороги на территории ГКУ Свердловской области «Карпинское лесничество», обслуживаемой ООО «ОУС Леском». Прочностные показатели определялись по стандартной методике ГОСТ 70452-2022, при соблюдении единых требований проведения экспериментальных исследований и характеристик исходных материалов (см. главу 3).

На основании результатов проведенных исследований установлено, что при содержании добавки базальтовых волокон на основе отходов производства теплоизоляционных плит в количестве 1,5 % от массы сухого грунта, через 7 суток прочность на сжатие фиброцементогрунтовых образцов составила 2,64 МПа, что на 7,3 % выше прочности на сжатие цементогрунтовых образцов без добавки фибры. Через 28 суток твердения фиброцементогрунтовых образцов прочность на сжатие составила 4,29 МПа, что на 10,9 % выше прочности на сжатие цементогрунтовых образцов без добавки фибры. Через 56 суток твердения фиброцементогрунтовых образцов прочность на сжатие составила 4,53 МПа, что на 10,5 % выше прочности на сжатие цементогрунтовых образцов без добавки фибры (рис. 4.84).

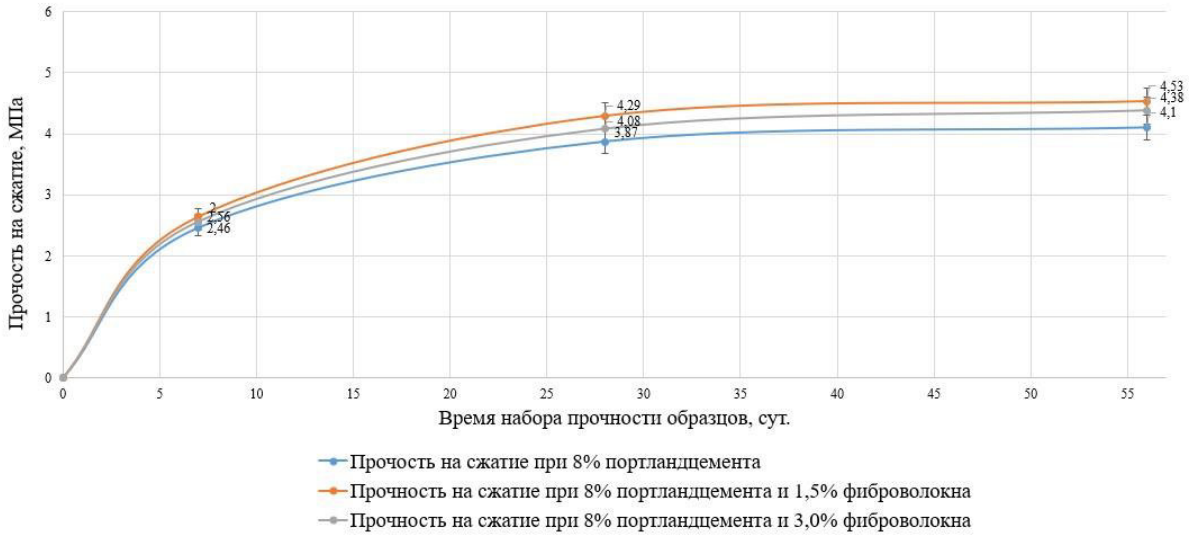


Рисунок 4.84 – Изменение прочности на сжатие фиброцементогрунтовых композиций в зависимости от времени твердения

Сравнительный анализ результатов изменения прочности на сжатие фиброцементогрунтовых композиций при содержании добавки базальтовых волокон на основе отходов производства теплоизоляционных плит в количестве 3,0 % от массы сухого грунта показал меньшую прочность от 3,1 % до 5,2 % по сравнению с фиброцементогрунтовыми образцами с добавкой фибры в количестве 1,5 % от массы сухого грунта в пределах всего рассматриваемого периода твердения от 7 до 56 суток (рис. 4.85).

Лабораторные исследования изменения прочности на растяжение при раскалывании от времени твердения фиброцементогрунтовых композиций также показало, что при добавке базальтовых волокон на основе отходов производства теплоизоляционных плит в количестве 1,5 % от массы сухого грунта через 7 суток прочность составила 0,54 МПа, что на 19,8 % выше данного показателя цементогрунтовых образцов без добавки фибры. Через 28 суток прочность на растяжение при раскалывании фиброцементогрунтовых образцов составила 0,83 МПа, что на 20,3 % выше прочности цементогрунтовых образцов без добавки фибры. Через 56 суток прочность на растяжение при раскалывании фиброцементогрунтовых образцов составила 0,89 МПа, что на 21,4 % выше данного показателя цементогрунтовых образцов без добавки фибры (рис. 4.86).

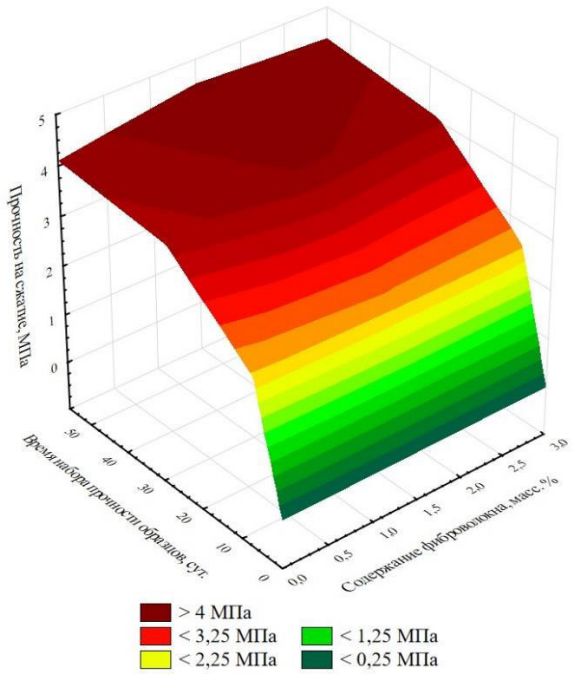


Рисунок 4.85 – Поверхность отклика прочности на сжатие в зависимости от содержания фиброволокна и времени твердения

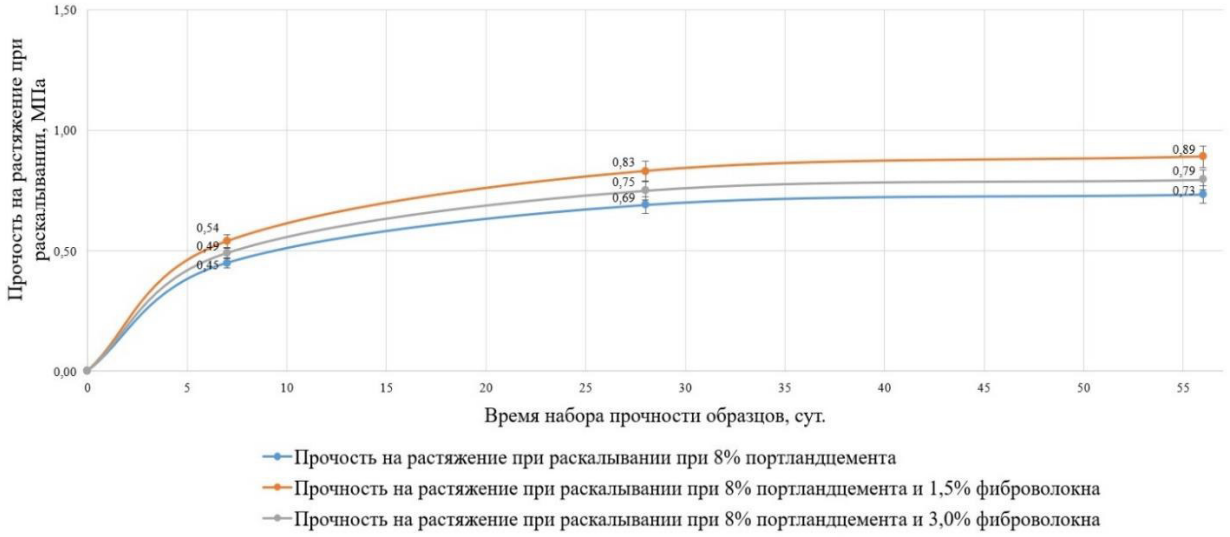


Рисунок 4.86 – Изменение прочности на растяжение при раскалывании фиброцементогрунтовых композиций в зависимости от времени твердения

Полученные значения прочности на растяжение при раскалывании в зависимости при содержании добавки базальтовых волокон на основе отходов производства теплоизоляционных плит в количестве 3,0 % от массы сухого грунта показал меньшую прочность от 9,7 % до 12,0 % по сравнению с фиброцементогрунтовыми образцами с добавкой фибры в количестве 1,5 % от массы сухого грунта в пределах всего рассматриваемого периода твердения от 7 до 56 суток (рис. 4.87).

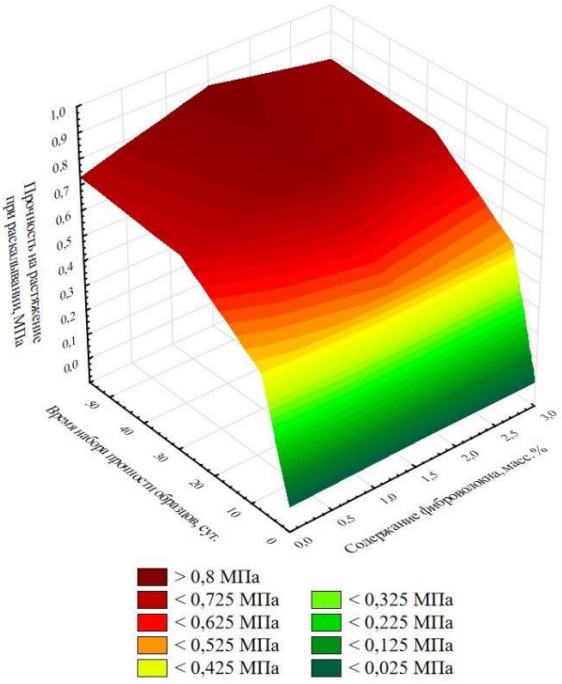


Рисунок 4.87 – Поверхность отклика прочности на растяжение при раскалывании в зависимости от содержания фиброволокна и времени твердения

Таким образом, на основании результатов исследований установлено, что добавка фиброволокна позволяет увеличить прочностные показатели фиброцементогрунта, в особенности прочность на растяжение при раскалывании до 21 % по сравнению с цементогрунтом, способствуя высокой трещиностойкости фиброцементогрунтовых покрытий дорожных одежд лесовозных лесных дорог. При этом максимальные прочностные показатели достигаются при содержании добавки базальтовых волокон на основе отходов производства теплоизоляционных плит в составе фиброцементогрунтовой смеси в количестве 1,5 % от массы сухого грунта.

Учитывая, что в период с 7 до 56 суток твердения зарегистрирован более интенсивный рост прочности фиброцементогрунта по сравнению с цементогрунтом без добавки фибры, это свидетельствует о более эффективном и динамичном процессе структурообразования фиброцементогрунтовых композиций. Эффект увеличения скорости структурообразования фиброцементогрунтовых композиций особенно важен при устройстве и эксплуатации новых конструктивных слоев, поскольку ускоренный набор прочности позволяет обеспечить безопасное движение тяжеловесных лесотранспортных машин в условиях слабых грунтовых оснований при сохранении требуемых транспортно-эксплуатационных показателей в течение заданного срока службы конструкций лесовозных лесных дорог.

4.11 Исследование процессов структурообразования фиброцементогрунтовых композиций методом ИК-спектроскопии

Исследование процессов структурообразования фиброцементогрунтовых композиций при различных сроках набора прочности: 16 часов; 3 суток; 7 суток и 28 суток, производилось методом ИК-спектроскопии [54, 103]. Фиброцементогрунтовые композиции были изготовлены на основе естественного грунта – суглинка тяжелого пылеватого (см. табл. 3.5), отобранного из земляного полотна лесовозной лесной дороги на территории ГКУ СО «Ирбитское

лесничество» в Свердловской области с добавлением компонентов согласно табл. 4.13, при соблюдении единых характеристик исходных материалов (см. главу 3).

ИК (ATR) – спектры цементогрунтовых образов серии № 1, приготовленных без добавления фибры при различных сроках набора прочности представлены на рис. 4.88. Спектр поглощения цементогрунта в возрасте 16 часов твердения характеризуется исчезновением пиков ИК-спектра минералов силикатной группы C_3S и C_2S, минералов группы C_3A *и* C_4AF и двуводного гипса. Вместе с тем остаются пики ИК-спектра, характерные для минералов каолинитовой группы: 621 $см^{-1}$; 692 $см^{-1}$; 910 $см^{-1}$; 1001 $см^{-1}$; 1024 $см^{-1}$. На ИК-спектре также наблюдаются полосы поглощения сульфатов кальция в диапазоне волновых чисел 950 $см^{-1}$ – 1300 $см^{-1}$. В возрасте 3 суток твердения цементогрунта ИК-спектр поглощения характеризуется повышением диффузности в результате уменьшения количества негидратированного портландцемента и неупорядоченности структуры гидратных новообразований. О таких новообразованиях можно судить по появлению в ИК-спектре поглощения полос в области волновых чисел 1543 $см^{-1}$ – 1655 $см^{-1}$ и 3587 $см^{-1}$ – 3753 $см^{-1}$. Спектры поглощения цементогрунта в возрасте 7 и 28 суток твердения характеризуются наличием интенсивных полос поглощения в области волновых чисел 3620 $см^{-1}$ – 3691 $см^{-1}$, характерных для гидратных новообразований, что говорит о протекании активных процессов гидратации портландцемента.

ИК (ATR) – спектры фиброцементогрунтовых образов серии № 2, приготовленных с добавлением фибры на основе базальтового волокна из отходов производства теплоизоляционных плит, при различных сроках набора прочности представлены на рис. 4.89.

ИК (ATR) – спектр поглощения фибоцементогрунта с фиброй на основе базальтового волокна из отходов производства теплоизоляционных плит в возрасте 16 часов твердения в целом имеет близкую сходимость с цементогрунтом и характеризуется исчезновением пиков ИК-спектра минералов силикатной группы C_3S и C_2S, минералов группы C_3A, C_4AF и двуводного гипса. Вместе с тем остаются пики ИК-спектра, характерные для минералов каолинитовой группы: 621 $см^{-1}$; 692 $см^{-1}$; 910 $см^{-1}$; 1001 $см^{-1}$; 1024 $см^{-1}$.

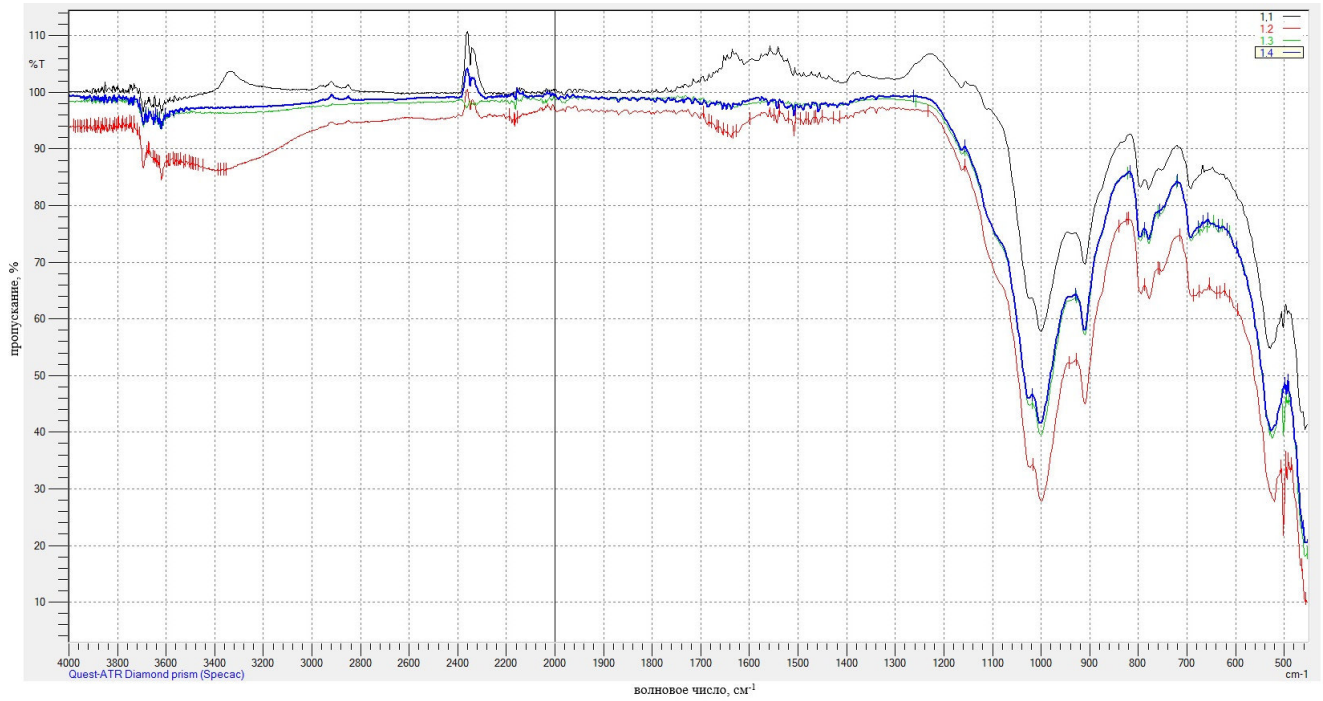


Рис. 4.88 – ИК (ATR) – спектры цементогрунтовых образцов при различных сроках набора прочности: 1.1 – 16 часов твердения; 1.2 – 3 суток твердения; 1.3 – 7 суток твердения; 1.4 – 28 суток твердения

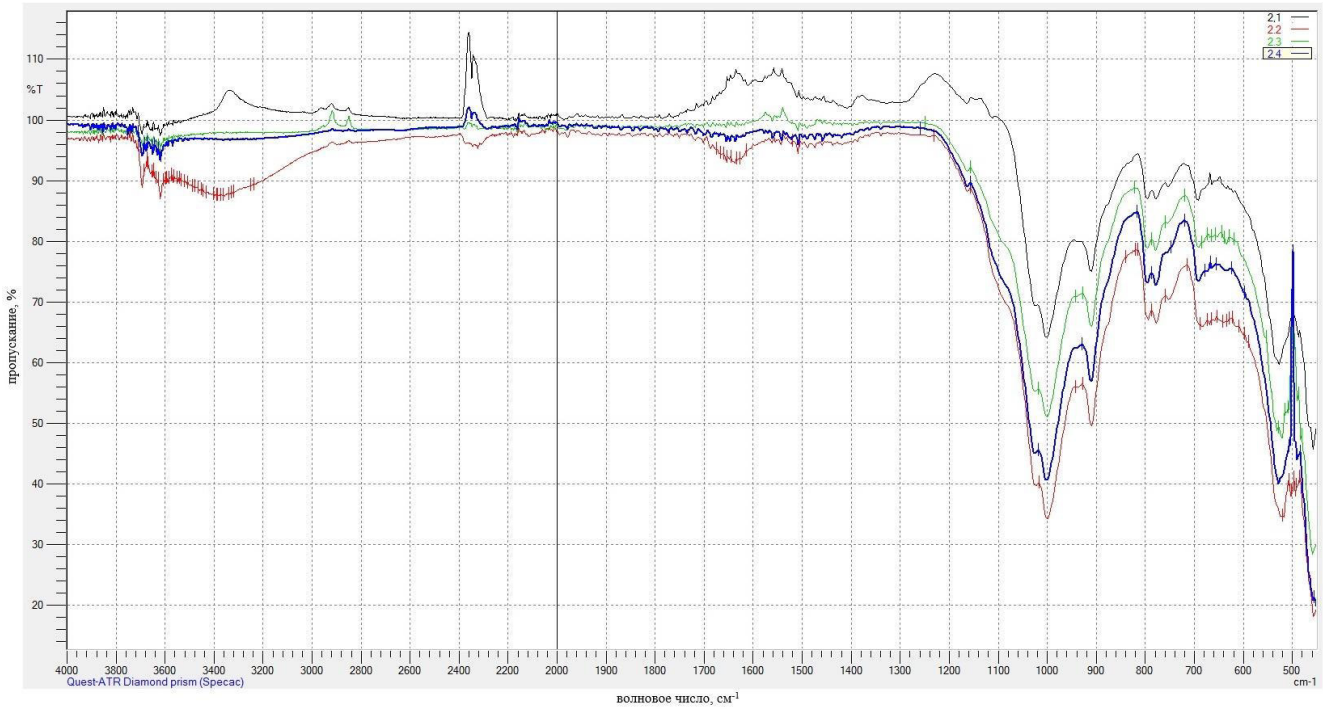


Рис. 4.89 – ИК (ATR) – спектры фиброцементогрунтовых образцов с фиброй на основе базальтового волокна из отходов производства теплоизоляционных плит при различных сроках набора прочности: 2.1 – 16 часов твердения; 2.2 – 3 суток твердения; 2.3 – 7 суток твердения; 2.4 – 28 суток твердения

Таким образом, введение фибры на основе базальтового волокна из отходов производства теплоизоляционных плит на ранних сроках твердения (до 16 часов) фиброцементогрунта не влияет на динамику процессов структурообразования.

В возрасте 3 суток твердения фиброцементогрунта ИК-спектр поглощения характеризуется повышением диффузности в результате уменьшения количества негидратированного портландцемента и неупорядоченности структуры гидратных новообразований. О таких новообразованиях можно судить по появлению в ИК-спектре поглощения полос в области волновых чисел 1508 $см^{-1}$ – 1655 $см^{-1}$ и 3587 $см^{-1}$ – 3691 $см^{-1}$. Анализ количественного состава фаз, производимый путем сопоставления площадей отражения при одинаковой длине волны, свидетельствует о сравнительно одинаковом количестве новообразований при гидратации портландцемента в образцах цементогрунта и фиброцементогрунта. Таким образом, введение фибры на основе базальтового волокна из отходов производства теплоизоляционных плит на ранних сроках твердения (до 3 суток) фиброцементогрунта не влияет на динамику процессов структурообразования.

ИК (ATR) – спектры поглощения фиброцементогрунта с фиброй на основе базальтового волокна из отходов производства теплоизоляционных плит в возрасте 7 и 28 суток твердения характеризуются наличием интенсивных полос поглощения в области волновых чисел 1500 $см^{-1}$ – 1600 $см^{-1}$ и 3620 $см^{-1}$ – 3750 $см^{-1}$, характерных для гидратных новообразований, что говорит о протекании активных процессов гидратации портландцемента. Анализ количественного состава фаз, производимый путем сопоставления площадей отражения при одинаковой длине волны, свидетельствует о большем на 6 % и на 7 % количестве новообразований при гидратации портландцемента в образцах фиброцементогрунта в возрасте 7 и 28 суток твердения соответственно в сравнении с цементогрунтом. Таким образом, введение фибры на основе базальтового волокна из отходов производства теплоизоляционных плит при сроке твердения от 3 суток до 28 суток увеличивает интенсивность протекания процессов структурообразования фиброцементогрунта.

ИК (ATR) – спектры фиброцементогрунтовых образов серии № 3, приготовленных с добавлением базальтовой фибры, при различных сроках набора прочности представлены на рис. 4.90.

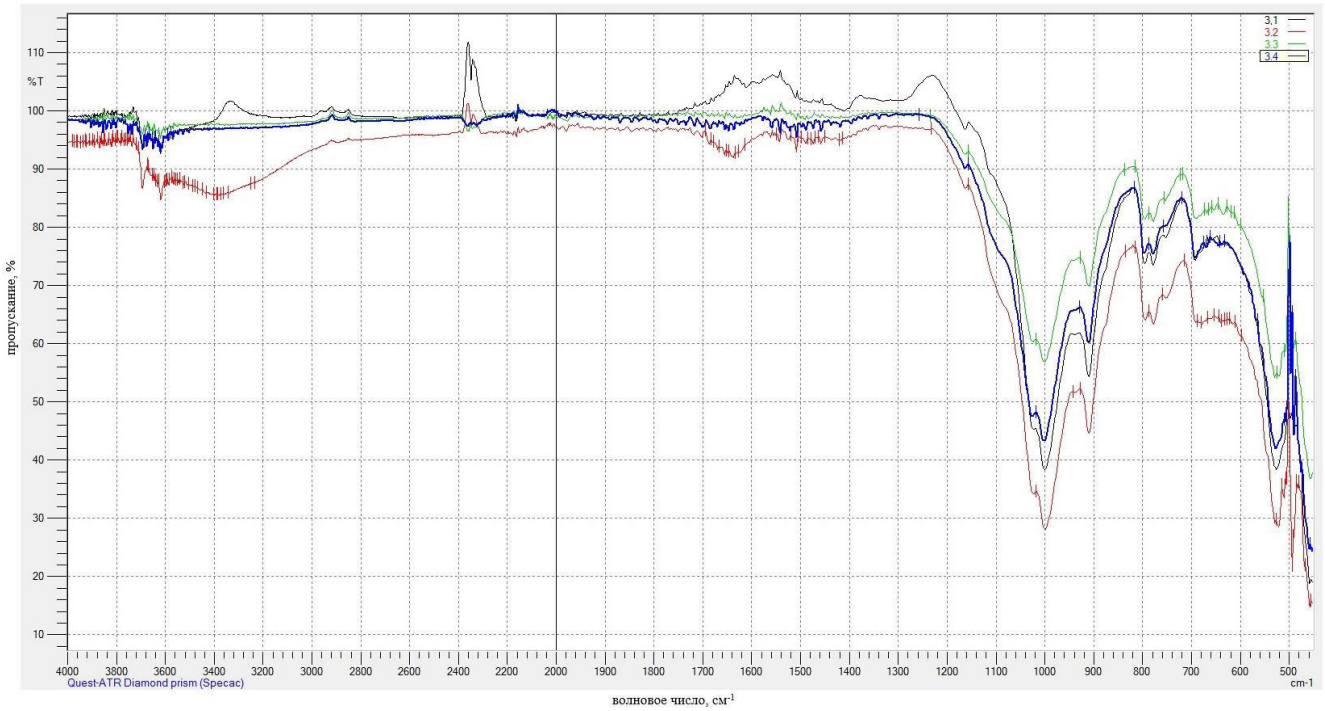


Рис. 4.90 – ИК (ATR) – спектры фиброцементогрунтовых образцов с базальтовой фиброй при различных сроках набора прочности: 3.1 – 16 часов твердения; 3.2 – 3 суток твердения; 3.3 – 7 суток твердения; 3.4 – 28 суток твердения

ИК (ATR) – спектр поглощения фибоцементогрунта в возрасте 16 часов твердения в целом имеет близкую сходимость с цементогрунтом и характеризуется исчезновением пиков ИК-спектра минералов силикатной группы C_3S и C_2S, минералов группы C_3A *и* C_4AF и двуводного гипса. Вместе с тем остаются пики ИК-спектра, характерные для минералов каолинитовой группы: 621 см$^{-1}$; 634 см$^{-1}$; 692 см$^{-1}$; 910 см$^{-1}$; 1001 см$^{-1}$. Следует отметить в ИК-спектре наличие полос в области 3600 см$^{-1}$ – 3700 см$^{-1}$, свидетельствующих о новообразованиях в процессе гидратации портландцемента, которые на данном сроке набора прочности не проявляются в образцах цементогрунта без добавки фибры. Таким образом, введение базальтовой фибры на раннем сроке твердения

(до 16 часов) увеличивает интенсивность протекания процессов структурообразования фиброцементогрунта.

В возрасте 3 суток твердения фиброцементогрунта ИК-спектр поглощения характеризуется повышением диффузности в результате уменьшения количества негидратированного портландцемента и неупорядоченности структуры гидратных новообразований. О таких новообразованиях можно судить по появлению в ИК-спектре поглощения полос в области волновых чисел 1508 $см^{-1}$ – 1655 $см^{-1}$ и 3587 $см^{-1}$ – 3693 $см^{-1}$. Анализ количественного состава фаз, производимый путем сопоставления площадей отражения при одинаковой длине волны, свидетельствует о большем на 6 % количестве новообразований при гидратации портландцемента в образцах фиброцементогрунта в сравнении с цементогрунтом. Таким образом, введение базальтовой фибры при сроке твердения до 3 суток увеличивает интенсивность протекания процессов структурообразования фиброцементогрунта.

ИК (ATR) – спектры поглощения фиброцементогрунта с базальтовой фиброй в возрасте 7 и 28 суток твердения характеризуются наличием интенсивных полос поглощения в области волновых чисел 1500 $см^{-1}$ – 1600 $см^{-1}$ и 3620 $см^{-1}$ – 3750 $см^{-1}$, характерных для гидратных новообразований, что говорит о протекании активных процессов гидратации портландцемента. Анализ количественного состава фаз, производимый путем сопоставления площадей отражения при одинаковой длине волны, свидетельствует о большем на 8 % и на 9 % количестве новообразований при гидратации портландцемента в образцах фиброцементогрунта в возрасте 7 и 28 суток твердения соответственно в сравнении с цементогрунтом. Таким образом, введение фибры на основе базальтового волокна при сроке твердения до 28 суток увеличивает интенсивность протекания процессов структурообразования фиброцементогрунта.

ИК (ATR) – спектры фиброцементогрунтовых образов серии № 4, приготовленных с добавлением полипропиленовой фибры, при различных сроках набора прочности представлены на рис. 4.91.

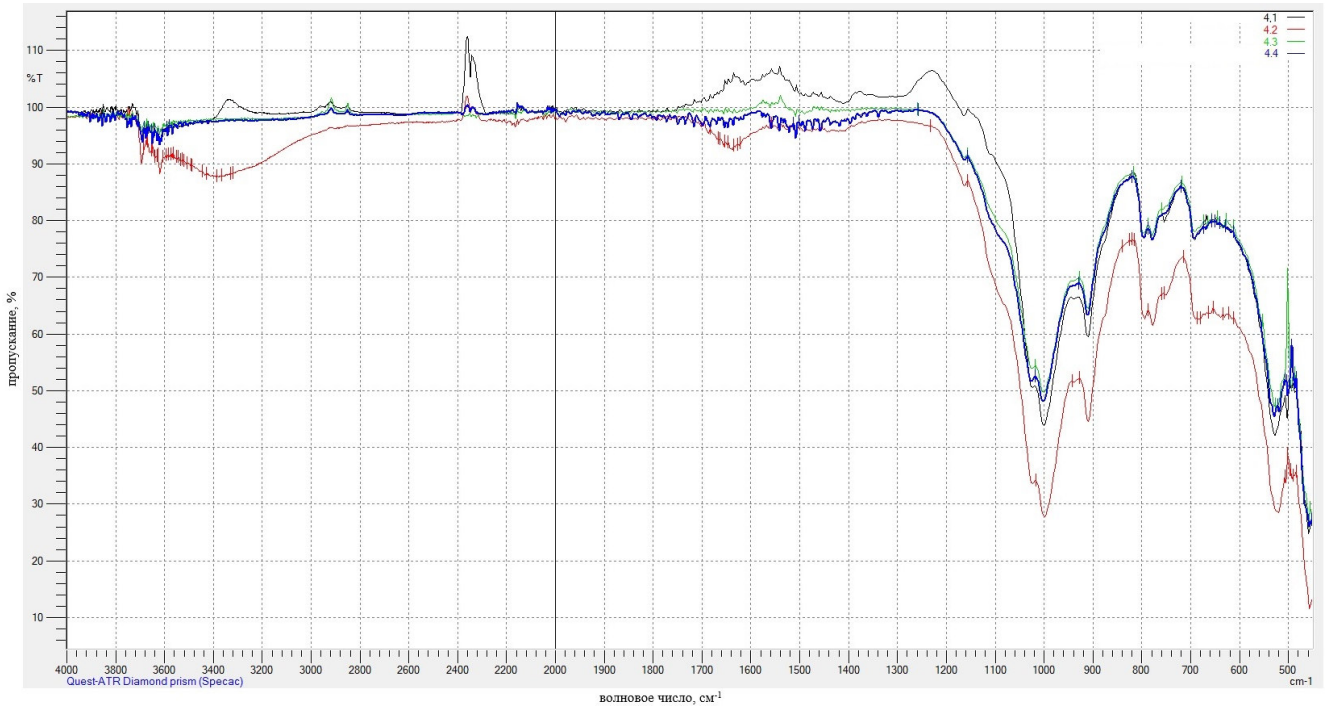


Рис. 4.91 – ИК (ATR) – спектры фиброцементогрунтовых образцов с полипропиленовой фиброй при различных сроках набора прочности: 4.1 – 16 часов твердения; 4.2 – 3 суток твердения; 4.3 – 7 суток твердения; 4.4 – 28 суток твердения

ИК (ATR) – спектры поглощения фибоцементогрунта в возрасте 16 часов твердения характеризуется исчезновением пиков ИК-спектра минералов силикатной группы C_3S и C_2S, минералов группы C_3A *и* C_4AF и двуводного гипса. Вместе с тем остаются пики ИК-спектра, характерные для минералов каолинитовой группы: 692 см$^{-1}$; 754 см$^{-1}$; 910 см$^{-1}$; 1001 см$^{-1}$; 1024 см$^{-1}$. Следует отметить в ИК-спектре наличие полос поглощения в области волновых чисел 3620 см$^{-1}$ – 3690 см$^{-1}$, характерных для гидратных новообразований, которые на данном сроке набора прочности не проявляются в образцах цементогрунта без добавки фибры. Таким образом, введение полипропиленовой фибры на раннем сроке твердения (до 16 часов) увеличивает интенсивность протекания процессов структурообразования фиброцементогрунта.

В возрасте 3 суток твердения фиброцементогрунта ИК-спектр поглощения характеризуется повышением диффузности в результате уменьшения количества

негидратированного портландцемента и неупорядоченности структуры гидратных новообразований. О таких новообразованиях можно судить по появлению в ИК-спектре поглощения полос в области волновых чисел 1620 $см^{-1}$ – 1670 $см^{-1}$ и 3580 $см^{-1}$ – 3693 $см^{-1}$. Анализ количественного состава фаз, производимый путем сопоставления площадей отражения при одинаковой длине волны, свидетельствует о большем на 8 % количестве новообразований при гидратации портландцемента в образцах фиброцементогрунта с добавлением полипропиленовой фибры в сравнении с цементогрунтом. Таким образом, введение полипропиленовой фибры при сроке твердения до 3 суток увеличивает интенсивность протекания процессов структурообразования фиброцементогрунта.

ИК (ATR) – спектры поглощения фиброцементогрунта с полипропиленовой фиброй в возрасте 7 и 28 суток твердения характеризуются наличием интенсивных полос поглощения в области волновых чисел 1500 $см^{-1}$ – 1600 $см^{-1}$ и 3620 $см^{-1}$ – 3750 $см^{-1}$, характерных для гидратных новообразований, что говорит о протекании активных процессов гидратации портландцемента. Анализ количественного состава фаз, производимый путем сопоставления площадей отражения при одинаковой длине волны, свидетельствует о большем на 13 % и на 15 % количестве новообразований при гидратации портландцемента в образцах фиброцементогрунта в возрасте 7 и 28 суток твердения соответственно в сравнении с цементогрунтом. Таким образом, введение фибры на основе полипропиленового волокна при сроке твердения до 28 суток увеличивает интенсивность протекания процессов структурообразования фиброцементогрунта.

ИК (ATR) – спектры фиброцементогрунтовых образов серии № 5, приготовленных с добавлением стеклянной фибры, при различных сроках набора прочности представлены на рис. 4.92.

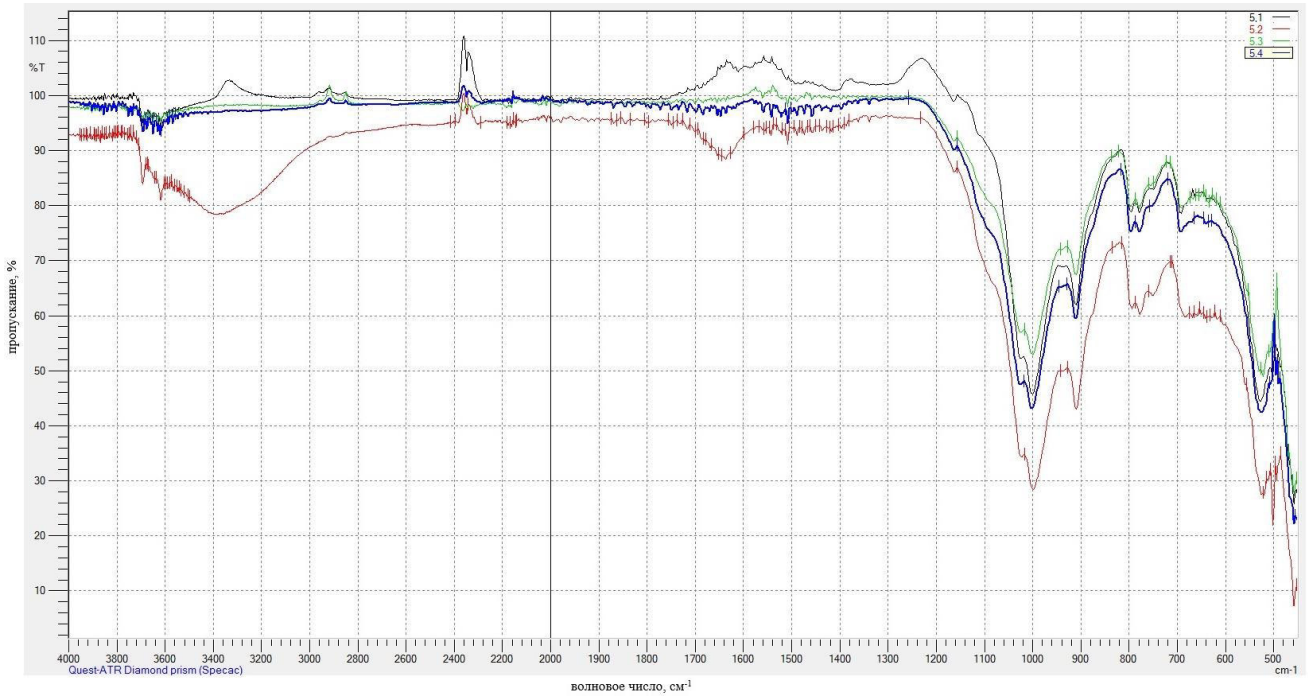


Рис. 4.92 – ИК (ATR) – спектры фиброцементогрунтовых образцов со стеклянной фиброй при различных сроках набора прочности: 5.1 – 16 часов твердения; 5.2 – 3 суток твердения; 5.3 – 7 суток твердения; 5.4 – 28 суток твердения

ИК (ATR) – спектр поглощения фибоцементогрунта в возрасте 16 часов твердения в целом имеет близкую сходимость с цементогрунтом и характеризуется исчезновением пиков ИК-спектра минералов силикатной группы C_3S и C_2S, минералов группы C_3A *и* C_4AF и двуводного гипса. Вместе с тем остаются пики ИК-спектра, характерные для минералов каолинитовой группы: 634 см$^{-1}$; 692 см$^{-1}$; 910 см$^{-1}$; 1001 см$^{-1}$; 1024 см$^{-1}$. Следует отметить в ИК-спектре наличие полос поглощения в области волновых чисел 3620 см$^{-1}$ – 3690 см$^{-1}$, характерных для гидратных новообразований, которые на данном сроке набора прочности не проявляются в образцах цементогрунта без добавки фибры. Таким образом, введение стеклянной фибры на раннем сроке твердения (до 16 часов) увеличивает интенсивность протекания процессов структурообразования фиброцементогрунта.

В возрасте 3 суток твердения фиброцементогрунта ИК-спектр поглощения характеризуется повышением диффузности в результате уменьшения количества негидратированного портландцемента и неупорядоченности структуры гидратных

новообразований. О таких новообразованиях можно судить по появлению в ИК-спектре поглощения полос в области волновых чисел 1400 $см^{-1}$ – 1600 $см^{-1}$ и 3500 $см^{-1}$ – 3700 $см^{-1}$. Анализ количественного состава фаз, производимый путем сопоставления площадей отражения при одинаковой длине волны, свидетельствует о большем на 6 % количестве новообразований при гидратации портландцемента в образцах фиброцементогрунта с добавлением стеклянной фибры в сравнении с цементогрунтом. Таким образом, введение стеклянной фибры при сроке твердения до 3 суток увеличивает интенсивность протекания процессов структурообразования фиброцементогрунта.

ИК (ATR) – спектры поглощения фиброцементогрунта со стеклянной фиброй в возрасте 7 и 28 суток твердения характеризуются наличием интенсивных полос поглощения в области волновых чисел 1500 $см^{-1}$ – 1600 $см^{-1}$ и 3640 $см^{-1}$ – 3800 $см^{-1}$, характерных для гидратных новообразований, что говорит о протекании активных процессов гидратации портландцемента. Анализ количественного состава фаз, производимый путем сопоставления площадей отражения при одинаковой длине волны, свидетельствует о большем на 9 % и на 10 % количестве новообразований при гидратации портландцемента в образцах фиброцементогрунта в возрасте 7 и 28 суток твердения соответственно в сравнении с цементогрунтом. Таким образом, введение фибры на основе стеклянного волокна при сроке твердения до 28 суток увеличивает интенсивность протекания процессов структурообразования фиброцементогрунта.

Таким образом, на основании результатов проведенных исследований методом ИК-спектроскопии установлено, волокна активно влияют на процессы структурообразования фиброцементогрунтовых композиций, позволяя увеличивать количество новообразований при гидратации портландцемента от 6 % до 15 % в сравнении с цементогрунтом при различных сроках набора прочности и видах используемой фибры. Эффективный и динамичный процесс структурообразования фиброцементогрунта способствует ускоренному набору заданных физико-механических характеристик дорожной одежды для безопасного движения тяжеловесных лесотранспортных машин, что обеспечивает

требуемые транспортно-эксплуатационные показатели конструкции лесовозных лесных дорог в условиях слабых грунтовых оснований.

4.12 Выводы по четвертой главе

1. Результаты лабораторных испытаний установили особенности свойств фиброцементогрунтовых композиций для применения в конструкциях лесовозных лесных дорог и подтвердили выводы теоретических исследований процессов их структурообразования, изложенные во 2 главе настоящей диссертационной работы. Установлено, что фибра является структурообразующим элементом как в период формирования цементогрунтовой матрицы, так и в дальнейшем при работе фиброцементогрунта. Продукты гидратации клинкерных материалов в процессе твердения портландцемента образуются и развиваются опережающим темпом на поверхности волокон фибры. Это способствует более прочному удерживанию волокон на ранних стадиях твердения в цементогрунтовой матрице, а также формированию однородной и развитой кристаллической структуры, обеспечивая высокие физико-механические показатели и трещиностойкость конструктивным слоям лесовозных лесных дорог.

2. На основе результатов исследований разработаны интеллектуальные системы и экспериментально-статистические модели изменения прочностных показателей и морозостойкости фиброцементогрунтовых композиций в зависимости от содержания компонентов, позволяющие осуществлять подбор оптимальных составов материала для устройства конструкций лесовозных лесных дорог. Установлены оптимальные значения соотношения длины фибры к ее диаметру L / D = 1000 – 1800 при содержании базальтовой и стеклянной фибры 2,0 – 2,5 % от массы сухого грунта, полипропиленовой фибры 1,5 % – 2,0 % от массы сухого грунта и фибры на основе отходов производства базальтовых теплоизоляционных плит 1,5 % от массы сухого грунта, обеспечивающие максимальные показатели прочности на сжатие, прочности на растяжение при

раскалывании и коэффициента морозостойкости фиброцементогрунтовых композиций в конструкциях лесовозных лесных дорог.

3. Выявлены закономерности и разработаны экспериментально-статистические модели структурных прочностных характеристик фиброцементогрунтовых композиций оптимального состава, обосновывающие увеличение удельного сцепления на 43 % и угла внутреннего трения на 8 % по сравнению с не армированным цементогрунтом, имеющим аналогичное содержание минерального вяжущего. Установлено, что дисперсное армирование эффективно при содержании портландцемента более 2 % от массы сухого грунта, при этом с ростом содержания минерального вяжущего в составе фиброцементогрунтовых композиций действенность фиброволокна повышается.

4. Выявлены закономерности и разработаны конечно-элементные модели деформационных характеристик конструкций лесовозных лесных дорог из фиброцементогрунта на основании из глинистых грунтов различной консистенции. Установлено, что фиброцементогрунт в сравнении с цементогрунтом позволяет уменьшить вертикальные деформации от 7,2 % до 12,0 % и горизонтальные деформации от 9,2 % до 12,7 % в зависимости от консистенции глинистых грунтов в основании дорожной одежды, что обосновывает повышение транспортно-эксплуатационных качеств конструкций лесовозных лесных дорог.

5. Выявлены закономерности кинетики структурообразования конструкций лесовозных лесных дорог из фиброцементогрунта. Установлено, что в период с 7 суток до 56 суток твердения происходит более интенсивный рост прочности фиброцементогрунта по сравнению с цементогрунтом. В период набора прочности до 28 суток добавка фибры способствует увеличению интенсивности протекания процессов структурообразования, при этом в зависимости от вида волокон количество новообразований при гидратации портландцемента в образцах фиброцементогрунта больше от 6 % до 15 % в сравнении с цементогрунтом.

ГЛАВА 5
УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ УСТРОЙСТВА КОНСТРУКЦИЙ ЛЕСОВОЗНЫХ ЛЕСНЫХ ДОРОГ НА ОСНОВЕ ФИБРОЦЕМЕНТОГРУНТОВЫХ КОМПОИЗИЦИЙ

На основании результатов теоретических и лабораторных исследований выявлены закономерности процессов комплексного взаимодействия компонентов в процессе структурообразования фиброцементогрунтовых композиций различных составов для разработки практических рекомендаций по проектированию составов и технологии устройства конструктивных слоев лесовозных лесных дорог.

Устройство конструкций на основе фиброцементогрунтовых композиций оптимального состава в зависимости от условий их эксплуатации, является важным требованием для обеспечения заданных транспортно-эксплуатационных показателей лесовозных лесных дорог. Кроме того, соблюдение технологических условий приготовления, устройства и ухода позволяет достичь конструктивным слоям лесовозных лесных дорог из фиброцементогрунта требуемые уровень и однородность качественных показателей в течение заданного срока службы и снизить стоимость производства работ [160].

5.1 Разработка конструкций лесовозных лесных дорог на основе фиброцементогрунтовых композиций с заданными свойствами

В целях повышения качественных показателей конструкций лесовозных лесных дорог для особых природных факторов лесной зоны и условий эксплуатации разработаны специализированные составы фиброцементогрунтовых композиций: фиброцементогрунтовая смесь с добавкой полиДМДААХ; фибробитумоцементогрунтовая смесь [118]; фиброзолоцементогрунтовая смесь [119] и фибоминералогрунтовая смесь [120]. Типовые конструкции лесовозных лесных дорог на основе фиброцементогрунтовых композиций с заданными свойствами представлены в приложении 2.

5.1.1 Исследование свойств конструкций лесовозных лесных дорог на основе фиброцементогрунтовых композиций с добавкой полиДМДААХ

С целью изучения прочностных показателей и морозостойкости конструкций лесовозных лесных дорог на основе фиброцементогрунтовых композиций с добавкой полиэлектролита – полиДМДААХ использовалось математическое планирование эксперимента (DOE). В качестве критериев исследования приняты: предел прочности на сжатие; предел прочности на растяжение при раскалывании; коэффициент морозостойкости.

Прочностные показатели и морозостойкость фиброцементогрунтовых композиций определялись по стандартной методике ГОСТ 70452-2022, при соблюдении единых требований проведения экспериментальных исследований и характеристик исходных материалов (см. главу 3). Приготовление фиброцементогрунтовых композиций осуществлялось на базе суглинка тяжелого песчанистого (см. табл. 3.5), отобранного из земляного полотна лесовозной лесной дороги на территории ГКУ СО «Карпинское лесничество», с использованием базальтового волокна длиной 25 мм и портландцемента в количестве 8,0 % от массы сухого грунта. В качестве переменных факторов были приняты следующие: содержание базальтового волокна и содержание полиДМДААХ.

Учитывая изложенное, целевые функции имеют вид:

$$R_{сж} = f(Q_{бв}, Q_{пэ}) \rightarrow max$$

$$R_{р} = f(Q_{бв}, Q_{пэ}) \rightarrow max$$

$$К_{мрз} = f(Q_{бв}, Q_{пэ}) \rightarrow max$$

где: $R_{сж}$ – предел прочности на сжатие, МПа (y_1);

$R_{р}$ – предел прочности на растяжение при раскалывании, МПа (y_2);

$К_{мрз}$ – коэффициент морозостойкости, ед. (y_3);

$Q_{бв}$ – содержание базальтового волокна, % от массы сухого грунта (X_1);

$Q_{пэ}$ – содержание полиДМДААХ, % от массы сухого грунта (X_2).

В соответствии с полным факторным планом $3^{(2)}$ эксперимента, координаты центра плана, интервалы варьирования и уровни исследования приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1 – Уровни варьирования переменных факторов

Факторы	Размер-ность	Обозна-чение факторов	Основ-ной уро-вень	Шаг варьиро-вания	Верхний уровень	Нижний уровень
			z_j^0	Δz_j	+1	-1
Содержание базальтового волокна (от массы сухого грунта), $Q_{бв}$	%	X_1	2	2	4	0
Содержание полиДМДААХ (от массы сухого грунта), $Q_{пэ}$	%	X_2	0,3	0,3	0,6	0

В ходе проведения и обработки результатов экспериментов получены уравнения регрессии в натуральных обозначениях факторов со статистически значимыми их параметрами: прочности на сжатие (5.1); прочности на растяжение при раскалывании (5.2) и коэффициента морозостойкости (5.3).

$$R_{сж} = 3{,}839 - 0{,}157{Q_{бв}}^2 - 7{,}193{Q_{пэ}}^2 + 0{,}76Q_{бв} + 4{,}874Q_{пэ} \quad (5.1)$$

$$R_{р} = 0{,}681 - 0{,}051{Q_{бв}}^2 - 1{,}155{Q_{пэ}}^2 + 0{,}26Q_{бв} + 0{,}77Q_{пэ} \quad (5.2)$$

$$R_{мрз} = 0{,}667 - 0{,}035{Q_{бв}}^2 - 0{,}758{Q_{пэ}}^2 + 0{,}164Q_{бв} + 0{,}506Q_{пэ} \quad (5.3)$$

Для более подробного исследования влияния факторов на результат экспериментально-статистических моделей использован метод графической интерпретации. Графическая интерпретация уравнений регрессии представлена в виде построенных поверхностей отклика (рис. 5.1 – 5.3).

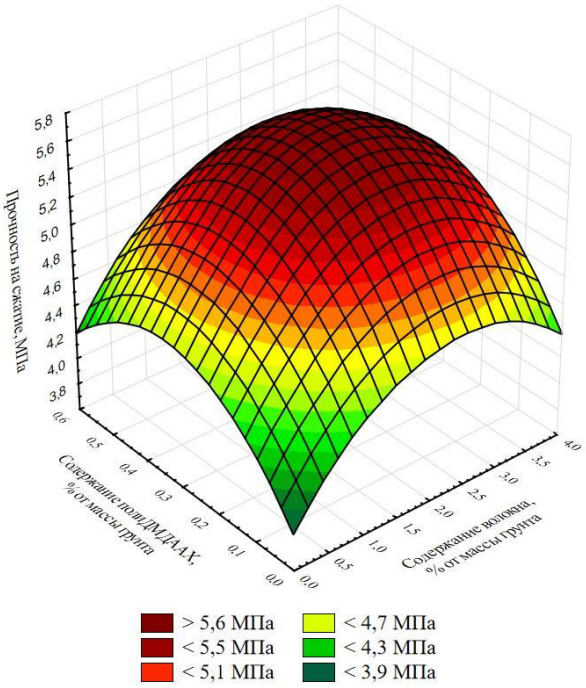


Рисунок 5.1 – Поверхность отклика прочности на сжатие в зависимости от содержания волокна и полиДМДААХ

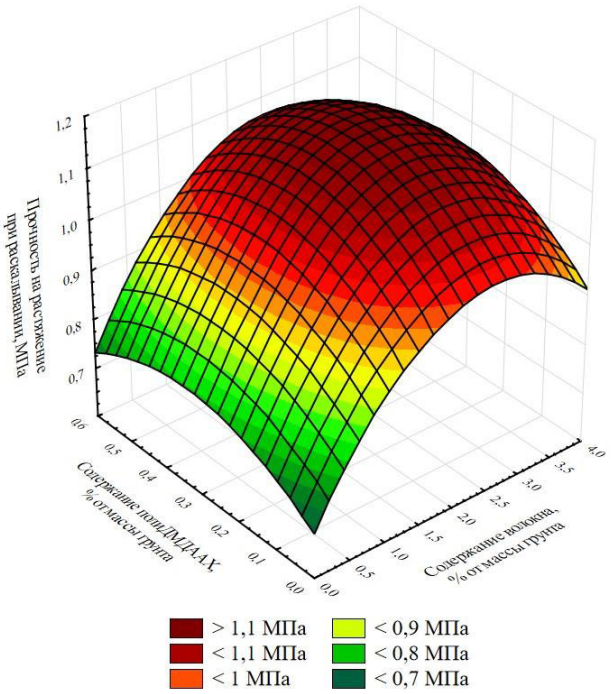


Рисунок 5.2 – Поверхность отклика прочности на растяжение при раскалывании в зависимости от содержания волокна и полиДМДААХ

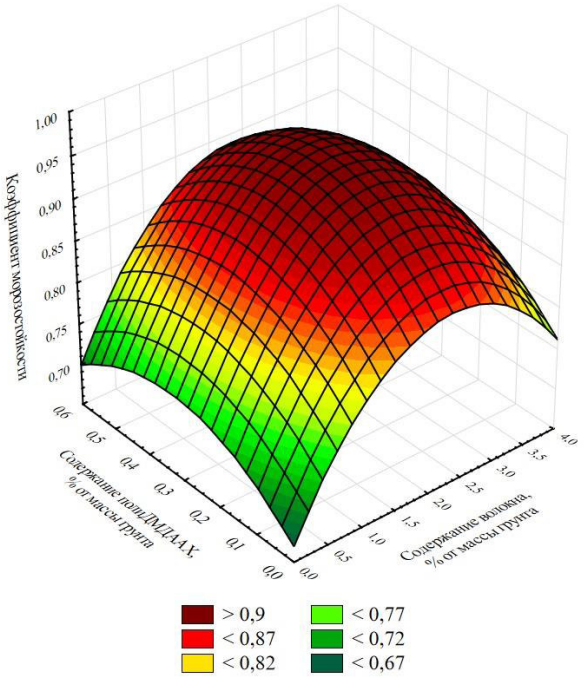


Рисунок 5.3 – Поверхность отклика коэффициента морозостойкости в зависимости от содержания волокна и полиДМДААХ

На поверхностях отклика прослеживается зона рационального содержания базальтовых волокон 2,0 – 2,5 % от массы грунта и полиДМДААХ 0,3 % от массы грунта, при которой достигаются: максимальное значение прочности на сжатие 5,6 МПа, которое на 44,6 % выше аналогичного показателя (3,87 МПа) цементогрунтовых образцов и на 19,3 % выше аналогичного показателя (4,69 МПа) фиброцементогрунтовых образцов без добавки полиДМДААХ; максимальное значение прочности на растяжение при раскалывании 1,14 МПа, которое на 65,0 % выше аналогичного показателя (0,69 МПа) цементогрунтовых образцов и на 15,0 % выше аналогичного показателя (0,99 МПа) фиброцементогрунтовых образцов без добавки полиДМДААХ; максимальное значение коэффициента морозостойкости 0,94, которое на 40,8 % выше аналогичного показателя (0,67) цементогрунтовых образцов и на 11,0 % выше аналогичного показателя (0,85) фиброцементогрунтовых образцов без добавки полиДМДААХ.

Таким образом, полученные экспериментальные данные соответствуют выводам теоретических исследований, изложенных в главе 2 диссертационной работы. Добавка полиДМДААХ в результате процессов по нейтрализации глинистых частиц, сокращения с их поверхности сорбционной воды и минимизации реакций изоморфного замещения способствует формированию плотной, однородной и дисперсной структуры цементогрунтовой матрицы. Данная структура обеспечивает благоприятные условия для возникновения прочных кристаллизационных контактов срастания, образования дополнительного цементирующего вяжущего и устойчивых высокоосновных гидросиликатов кальция, и кроме того, более прочное удерживание волокон фибры и усиление эффективности дисперсного армирования фиброцементогрунтовых композиций, значительно увеличивая прочностные характеристики и морозостойкость. В связи с изложенным применение конструкций лесовозных лесных дорог на основе фиброцементогрунтовых композиций с добавкой полиДМДААХ наиболее эффективно в условиях преобладания переувлажненных глинистых грунтов в лесной зоне.

5.1.2 Исследование свойств конструкций лесовозных лесных дорог на основе фибробитумоцементогрунтовых композиций

Одним из важнейших транспортно-эксплуатационных показателей, обеспечивающих безопасное движение, в особенности в условиях высокой интенсивности тяжеловесной техники на опасных участках лесовозных лесных дорог является коэффициент сцепления колеса автомобиля с покрытием дорожной одежды. В связи с изложенным, разработка конструкций лесовозных лесных дорог на основе фиброцементогрунтовых композиций с повышенным коэффициентом сцепления является актуальной задачей.

Техническая задача достигается тем, что для увеличения макрошероховатости и коэффициента сцепления покрытия дорожной одежды в состав фиброцементогрунтвой композиции дополнительно вводится щебень и битумная эмульсия [118]. Щебень в составе фибробитумоцементогрунтовой смеси создает на поверхности покрытия шероховатую макроструктуру, благодаря которой обеспечиваются высокие показатели коэффициента сцепления. Надежное сцепление и удерживание каменных зерен в фиброцементогрунтовой обойме обеспечивается благодаря комплексному вяжущему из портландцемента и битумной эмульсии. Кроме того, портландцемент и битумная эмульсия в составе фибробитумоцементогрунтовой смеси способствует проявлению пластических свойств, обеспечивая высокие прочностные показатели и трещиностойкость конструкции лесовозных лесных дорог. Также битумная эмульсия кольматирует внутренние поры цементогрунтовой матрицы, что обеспечивает снижение водонасыщения и повышение коэффициента морозостойкости.

С целью изучения прочностных показателей и морозостойкости конструкций лесовозных лесных дорог на основе фибробитумоцементогрунтовых композиций использовалось математическое планирование эксперимента (DOE). В качестве критериев исследования приняты: предел прочности на сжатие; предел прочности на растяжение при раскалывании; коэффициент морозостойкости.

Прочностные показатели и морозостойкость фиброцементогрунтовых композиций определялись по стандартной методике ГОСТ 70452-2022, при соблюдении единых требований проведения экспериментальных исследований и характеристик исходных материалов (см. главу 3). Приготовление фиброцементогрунтовых композиций осуществлялось на базе суглинка тяжелого песчанистого (см. табл. 3.5), отобранного из земляного полотна лесовозной лесной дороги на территории ГКУ СО «Карпинское лесничество», с использованием базальтового волокна длиной 25 мм в количестве 2,0 % от массы сухого грунта и портландцемента в количестве 8,0 % от массы сухого грунта. В качестве переменных факторов были приняты следующие: содержание битумной эмульсии и содержание щебня.

Учитывая изложенное, целевые функции имеют вид:

$$R_{сж} = f(Q_{бэ}, Q_{щеб}) \rightarrow max$$

$$R_{р} = f(Q_{бэ}, Q_{щеб}) \rightarrow max$$

$$К_{мрз} = f(Q_{бэ}, Q_{щеб}) \rightarrow max$$

где: $R_{сж}$ – предел прочности на сжатие, МПа (y_1);

$R_{р}$ – предел прочности на растяжение при раскалывании, МПа (y_2);

$К_{мрз}$ – коэффициент морозостойкости, ед. (y_3);

$Q_{бэ}$ – содержание битумной эмульсии, % от массы сухого грунта (X_1);

$Q_{щеб}$ – содержание щебня, % от массы сухого грунта (X_2);

В соответствии с полным факторным планом $3^{(2)}$ эксперимента, координаты центра плана, интервалы варьирования и уровни исследования приведены в табл. 5.2.

В ходе проведения и обработки результатов экспериментов получены уравнения регрессии в натуральных обозначениях факторов со статистически значимыми их параметрами: прочности на сжатие (5.4); прочности на растяжение при раскалывании (5.5) и коэффициента морозостойкости (5.6).

Таблица 5.2 – Уровни варьирования переменных факторов

Факторы	Размерность	Обозначение факторов	Основной уровень	Шаг варьирования	Верхний уровень	Нижний уровень
			z_j^0	Δz_j	+1	-1
Содержание битумной эмульсии (от массы сухого грунта), $Q_{бэ}$	%	X_1	7	7	14	0
Содержание щебня (от массы сухого грунта), $Q_{щеб}$	%	X_2	25	25	50	0

$$R_{сж} = 4{,}64 - 0{,}009Q_{бэ}^{\ 2} - 0{,}001Q_{щеб}^{\ 2} + 0{,}001Q_{бэ}Q_{щеб} + 0{,}054Q_{щеб} \quad (5.4)$$

$$R_{р} = 0{,}984 - 0{,}003Q_{бэ}^{\ 2} - 0{,}0002Q_{щеб}^{\ 2} + 0{,}0002Q_{бэ}Q_{щеб} + 0{,}022Q_{бэ} + 0{,}008Q_{щеб} \quad (5.5)$$

$$R_{мрз} = 0{,}849 - 0{,}002Q_{бэ}^{\ 2} - 0{,}0002Q_{щеб}^{\ 2} + 0{,}0002Q_{бэ}Q_{щеб} + 0{,}017Q_{бэ} + 0{,}005Q_{щеб} \quad (5.6)$$

Для более подробного исследования влияния факторов на результат экспериментально-статистических моделей использован метод графической интерпретации. Графическая интерпретация уравнений регрессии представлена в виде построенных поверхностей отклика (рис. 5.4 – 5.6).

На поверхностях отклика прослеживается зона рационального содержания битумной эмульсии 7,0 % от массы сухого грунта и щебня 25,0 % от массы сухого грунта, при которой достигаются: максимальное значение прочности на сжатие 5,09 МПа, которое на 8,5 % выше аналогичного показателя (4,69 МПа) фиброцементогрунтовых образцов; максимальное значение прочности на растяжение при раскалывании 1,10 МПа, которое на 10,7 % выше аналогичного показателя (0,99 МПа) фиброцементогрунтовых образцов; максимальное значение коэффициента морозостойкости 0,91, которое на 7,0 % выше аналогичного показателя (0,85 МПа) фиброцементогрунтовых образцов и соответствует

нормативным значениям коэффициента морозостойкости (не менее 0,8) по ГОСТ 70452 -2022.

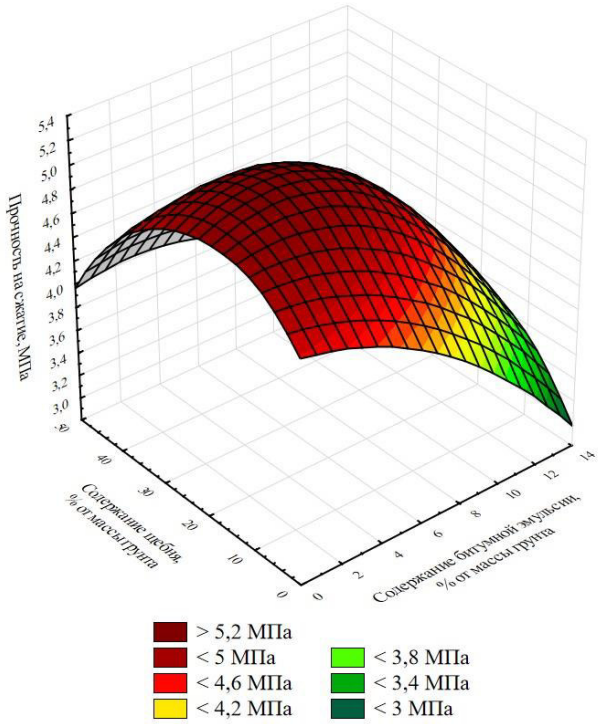


Рисунок 5.4 – Поверхность отклика прочности на сжатие в зависимости от содержания битумной эмульсии и щебня

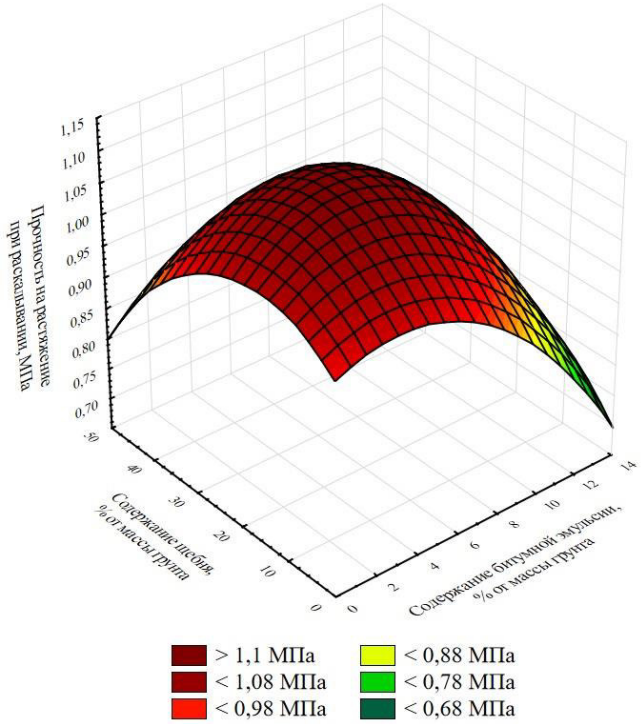


Рисунок 5.5 – Поверхность отклика прочности на растяжение при раскалывании в зависимости от содержания битумной эмульсии и щебня

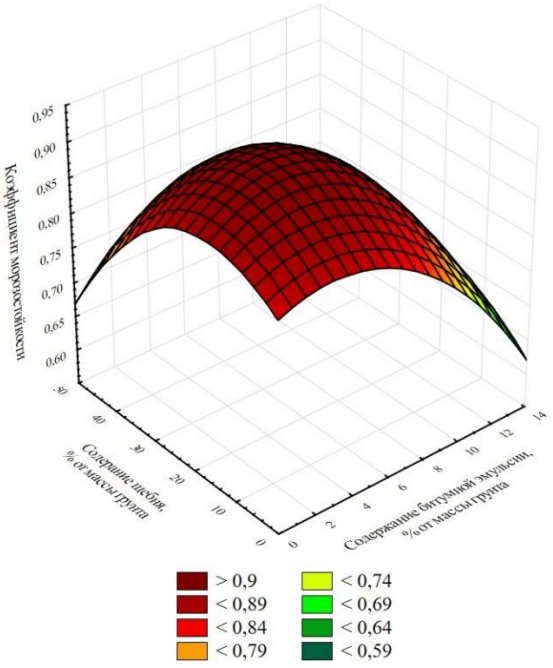


Рисунок 5.6 – Поверхность отклика коэффициента морозостойкости в зависимости от содержания битумной эмульсии и щебня

В целях определения фактических показателей коэффициента сцепления конструкции дорожной одежды на основе фибробитумоцементогрунта на лесовозной лесной дороге с грузооборотом 0,18 млн т нетто / год (IIIл категории) на территории ГКУ СО «Карпинское лесничество» в августе 2023 года в границах опытного участка № 4 было произведено устройство покрытия из данного материала на площади 9 м^2. С помощью портативного прибора для измерения коэффициента сцепления дорожных покрытий типа ППК-Ф в сентябре 2023 года были произведены сравнительные исследования на покрытиях из фиброцементогрунта и фибробитумоцементогрунта (табл. 5.3).

Таблица 5.3 – Результаты измерений коэффициента сцепления дорожных покрытий из фиброцементогрунта и фибробитумоцементогрунта

№ состава	Компоненты состава фиброцементогрунта (№ 1) и фибробитумоцементогрунта (№ 2)					Коэффициент сцепления
	Портландцемент, % от массы грунта	Базальтовая фибра, % от массы грунта	Битумная эмульсия ЭБДК С, % от массы грунта	Щебень фракции 16-31,5 мм, % от массы грунта	Вода, % от массы грунта	
1	8,0	2,0	-	-	17,0	0,23
2	8,0	2,0	7,0	25,0	-	0,32

На основании полученных экспериментальных данных, фибробитумоцементогрунтовое покрытие лесовозной лесной дороги имеет коэффициент сцепления 0,32, что на 39,1 % выше, чем аналогичный показатель на фиброцементогрунтовом покрытии (0,23).

Таким образом, введение портландцемента в сочетании с фиброволокном, щебнем и битумной эмульсией в составе фибробитумоцементогрунтовой смеси на основе естественных грунтов позволяет обеспечить формирование прочной битумо-цементогрунтовой структуры с включениями каменного материала,

связанной волокнами фибры, которая обладает повышенным коэффициентом сцепления, а также прочностными характеристиками и высокой морозостойкостью. Данные показатели позволяют использовать фибробитумоцементогрунт в верхнем слое покрытия дорожной одежды в особенности для обеспечения безопасности движения в условиях высокой интенсивности на сложных участках лесовозных лесных дорог.

5.1.3 Исследование свойств конструкций лесовозных лесных дорог на основе фиброзолоцементогрунтовых композиций

В соответствии с Распоряжением Правительства Российской Федерации от 15.06.2022 г. № 1557-р об утверждении комплексного плана по повышению объемов утилизации золошлаковых отходов V класса опасности, на территории освоения лесосырьевых баз в особенности на расстоянии до 130 км от мест размещения золошлаковых отходов при разработке технологий строительства лесовозных лесных дорог следует отдавать преимущество исследованиям по применению данного вторичного сырья. Перспективным направлением использования золошлаковых отходов является технология укрепления грунтов для строительства конструкций дорожных одежд [194]. Благодаря своим свойствам зола-уноса позволяет уменьшить содержание портландцемента и улучить структурно-механические свойства укрепленных грунтов. Поэтому в настоящей диссертационной работе проведены исследования свойств конструкций лесовозных лесных дорог на основе фиброцементогрунтовых композиций с минеральной добавкой на основе золы-уноса тепловой электростанции. В качестве минеральной добавки использован минеральный порошок, полученный с помощью сухой электросепарации золы-уноса Рефтинской ГРЭС (см. разд. 3.3).

Минеральная добавка, полученная с помощью сухой электросепарации золы-уноса Рефтинской ГРЭС, имеет незначительное содержание оксидов железа

(0,65 % по массе), что не приводит к снижению активности портландцемента и его прочностных свойств. В основе минеральной добавки содержится оксид кальция (CaO) (5,6 % по массе), оксид алюминия (Al_2O_3) (23,9 % по массе) и оксид кремния (SiO_2) (61,1 % по массе), в связи с этим, минеральная добавка не только активно нейтрализует кислотную среду грунтов лесной зоны, обеспечивая благоприятные условия для гидратации и гидролиза портландцемента, но и проявляет самостоятельные свойства минерального вяжущего, формируя прочную кристаллическую структуру. Кроме того, благодаря высокому содержанию минеральных компонентов (CaO, Al_2O_3, SiO_2) и незначительному содержанию оксидов железа в процессе кристаллообразования совместно с портландцементом происходит формирование однородной цементогрунтовой матрицы, которая эффективно удерживает фиброволокна, дисперсно армирующие фиброзолоцементогрунт. Благодаря прочному удерживанию фиброволокон в кристаллической матрице, значительно возрастают прочностные показатели и морозостойкость укрепленных грунтов, что обеспечивает высокие транспортно-эксплуатационные показатели лесовозных лесных дорог в условиях кислых глинистых грунтов лесной зоны [119].

С целью изучения прочностных показателей и морозостойкости конструкций лесовозных лесных дорог на основе фиброзолоцементогрунтовых композиций использовалось математическое планирование эксперимента (DOE). В качестве критериев исследования приняты: предел прочности на сжатие; предел прочности на растяжение при раскалывании; коэффициент морозостойкости.

Прочностные показатели и морозостойкость фиброцементогрунтовых композиций определялись по стандартной методике ГОСТ 70452-2022, при соблюдении единых требований проведения экспериментальных исследований и характеристик исходных материалов (см. главу 3). Приготовление фиброцементогрунтовых композиций осуществлялось на базе суглинка тяжелого песчанистого (см. табл. 3.5), отобранного из земляного полотна лесовозной лесной дороги на территории ГКУ СО «Карпинское лесничество», с использованием базальтового волокна длиной 25 мм в количестве 2,0 % от массы

сухого грунта и портландцемента в количестве 8,0 % от массы сухого грунта. В качестве переменных факторов были приняты следующие: содержание минеральной добавки на основе золы-уноса ГРЭС и показатель кислотности (pH) грунта. Кислотность грунта искусственно изменялась в лабораторных условиях путем добавления в грунт 10 % раствора соляной кислоты (HCl).

Учитывая изложенное, целевые функции имеют вид:

$$R_{сж} = f(Q_{мдз}, pH) \rightarrow max$$

$$R_р = f(Q_{мдз}, pH) \rightarrow max$$

$$К_{кмз} = f(Q_{мдз}, pH) \rightarrow max$$

где: $R_{сж}$ – предел прочности на сжатие, МПа (y_1);

$R_р$ – предел прочности на растяжение при раскалывании, МПа (y_2);

$К_{мрз}$ – коэффициент морозостойкости, ед. (y_3);

$Q_{мдз}$ – содержание минеральной добавки на основе золы-уноса ГРЭС, % от массы сухого грунта (X_1);

pH – кислотность грунта, ед. (X_2).

В соответствии с полным факторным планом $3^{(2)}$ эксперимента, координаты центра плана, интервалы варьирования и уровни исследования приведены в табл. 5.4.

Таблица 5.4 – Уровни варьирования переменных факторов

Факторы	Размер-ность	Обозна-чение факторов	Основ-ной уро-вень	Шаг варьиро-вания	Верхний уровень	Нижний уровень
			z_j^0	Δz_j	+1	-1
Содержание минеральной добавки на основе золы-уноса ГРЭС (от массы сухого грунта), $Q_{мдз}$	%	X_1	2,5	2,5	5,0	0
Кислотность грунта, pH	%	X_2	5,5	1	6,5	4,5

В ходе проведения и обработки результатов экспериментов получены уравнения регрессии в натуральных обозначениях факторов со статистически значимыми их параметрами: прочности на сжатие (5.7); прочности на растяжение при раскалывании (5.8) и коэффициента морозостойкости (5.9).

$$R_{сж} = 0{,}616 - 0{,}035(pH)^2 - 0{,}049Q_{мдз}(pH) + 0{,}444Q_{мдз} + 0{,}855(pH) \quad (5.7)$$

$$R_{р} = 0{,}219 - 0{,}001{Q_{мдз}}^2 - 0{,}01Q_{мдз}(pH) + 0{,}097Q_{мдз} + 0{,}115(pH) \quad (5.8)$$

$$К_{мрз} = 0{,}628 + 0{,}003{Q_{мдз}}^2 + 0{,}005(pH)^2 - 0{,}001Q_{мдз}(pH) + 0{,}013Q_{мдз} + 0{,}001(pH) \quad (5.9)$$

Для более подробного исследования влияния факторов на результат экспериментально-статистических моделей использован метод графической интерпретации. Графическая интерпретация уравнений регрессии представлена в виде построенных поверхностей отклика (рис. 5.7 – 5.9).

Как видно на рис. 5.7, повышение кислотности грунта (pH) с 6,5 до 4,5 приводит к снижению прочности фиброзолоцементогрунтовых конструкций на 19,8 %, но повышение содержания минеральной добавки на основе золы-уноса ГРЭС увеличивает их прочностные показатели. Так, при содержании минеральной добавки на основе золы-уноса ГРЭС 2,5 % от массы сухого грунта в условиях повышения кислотности грунта (pH) с 6,5 до 4,5 показатель прочности на сжатие снижается на 14,3 %. При содержании минеральной добавки на основе золы-уноса ГРЭС 5,0 % от массы сухого грунта в условиях повышения кислотности грунта (pH) с 6,5 до 4,5 показатель прочности на сжатие снижается на 8,3 %. Также стоит отметить, что эффективность действия минеральной добавки увеличивается при повышении кислотности укрепляемых грунтов. Так, при кислотности грунта pH = 6,5, содержание минеральной добавки на основе золы-уноса ГРЭС 5,0 % от массы сухого грунта увеличивает прочность на сжатие фиброзолоцементогрунтовых конструкций на 11,6 %. При увеличении кислотности грунта до pH = 4,5, содержание минеральной добавки на основе золы-уноса ГРЭС 5,0 % от массы сухого грунта позволяет увеличить прочность на сжатие фиброзолоцементогрунтовых конструкций на 27,4 %.

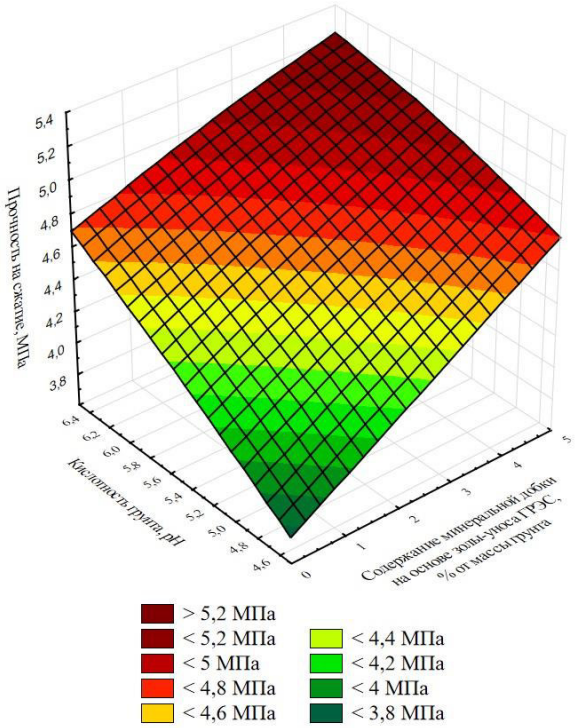


Рисунок 5.7 – Поверхность отклика прочности на сжатие в зависимости от содержания минеральной добавки на основе золы-уноса ГРЭС и кислотности грунта (pH)

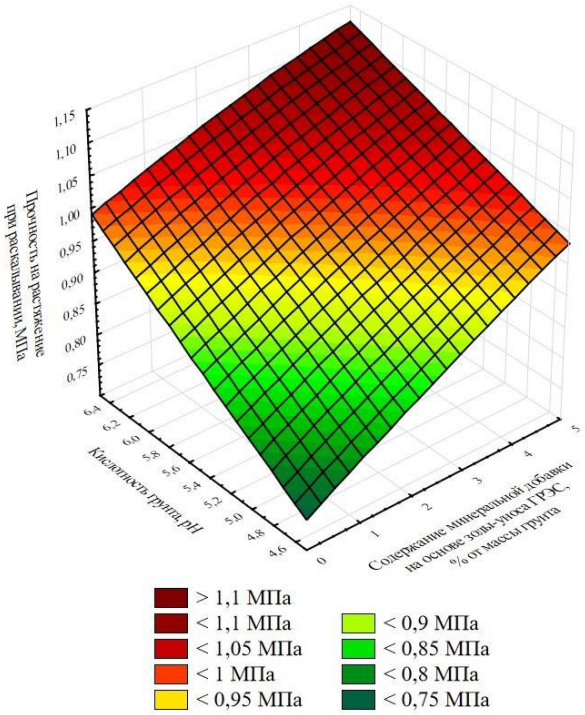


Рисунок 5.8 – Поверхность отклика прочности на растяжение при раскалывании в зависимости от содержания минеральной добавки на основе золы-уноса ГРЭС и кислотности грунта (pH)

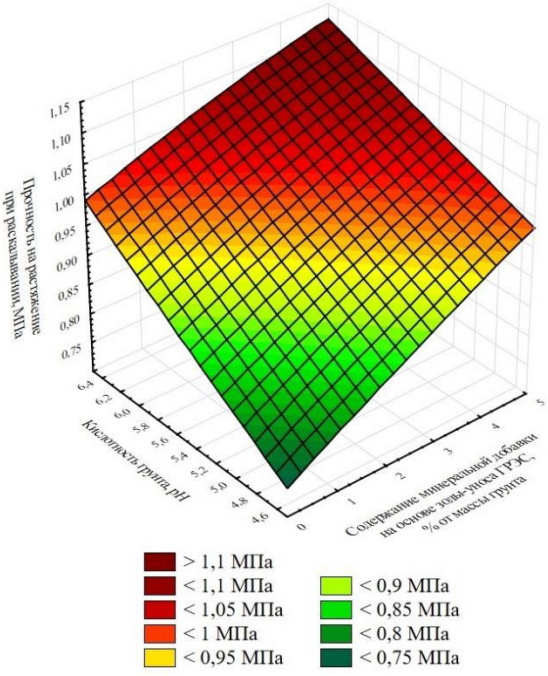


Рисунок 5.9 – Поверхность отклика коэффициента морозостойкости в зависимости от содержания минеральной добавки на основе золы-уноса ГРЭС и кислотности грунта (pH)

Как видно на рис. 5.8, повышение кислотности грунта (pH) с 6,5 до 4,5 приводит к снижению прочности на растяжение при раскалывании фиброзолоцементогрунтовых конструкций на 24,3 %, но повышение содержания минеральной добавки на основе золы-уноса ГРЭС увеличивает их прочностные показатели. Так, при содержании минеральной добавки на основе золы-уноса ГРЭС 2,5 % от массы сухого грунта в условиях повышения кислотности грунта (pH) с 6,5 до 4,5 показатель прочности на растяжение при раскалывании снижается на 18,4 %. При содержании минеральной добавки на основе золы-уноса ГРЭС 5,0 % от массы сухого грунта в условиях повышения кислотности грунта (pH) с 6,5 до 4,5 показатель прочности на растяжение при раскалывании снижается на 12,7 %. Также стоит отметить, что эффективность действия минеральной добавки увеличивается при повышении кислотности укрепляемых грунтов. Так, при кислотности грунта pH = 6,5, содержание минеральной добавки на основе золы-уноса ГРЭС 5,0 % от массы сухого грунта увеличивает прочность на растяжение при раскалывании фиброзолоцементогрунтовых конструкций на 13,6 %. При увеличении кислотности грунта до pH = 4,5, содержание минеральной добавки на основе золы-уноса ГРЭС 5,0 % от массы сухого грунта позволяет увеличить прочность на растяжение при раскалывании фиброзолоцементогрунтовых конструкций на 31,1 %.

Как видно на рис. 5.9, повышение кислотности грунта (pH) с 6,5 до 4,5 приводит к снижению коэффициента морозостойкости фиброзолоцементогрунтовых конструкций на 21,7 %, но повышение содержания минеральной добавки на основе золы-уноса ГРЭС увеличивает их морозостойкость. Так, при содержании минеральной добавки на основе золы-уноса ГРЭС 2,5 % от массы сухого грунта в условиях повышения кислотности грунта (pH) с 6,5 до 4,5 коэффициент морозостойкости снижается на 15,5 %. При содержании минеральной добавки на основе золы-уноса ГРЭС 5,0 % от массы сухого грунта в условиях повышения кислотности грунта (pH) с 6,5 до 4,5 коэффициент морозостойкости снижается на 9,5 %. Также стоит отметить, что эффективность действия минеральной добавки увеличивается при повышении

кислотности укрепляемых грунтов. Так, при кислотности грунта pH = 6,5, содержание минеральной добавки на основе золы-уноса ГРЭС 5,0 % от массы сухого грунта увеличивает коэффициент морозостойкости фиброзолоцементогрунтовых конструкций на 12,6 %. При увеличении кислотности грунта до pH = 4,5, содержание минеральной добавки на основе золы-уноса ГРЭС 5,0 % от массы сухого грунта позволяет увеличить коэффициент морозостойкости фиброзолоцементогрунтовых конструкций на 30,0 %.

Таким образом, результаты исследований подтверждают, что минеральная добавка на основе золы-уноса ГРЭС в составе фиброзолоцементогрунтовой смеси позволяет обеспечить формирование прочной кристаллической структуры материала, связанной внутри волокнами фибры. Благодаря этому конструкции лесовозных лесных дорог на основе фиброзолоцементогрунтовых композиций обладают повышенными прочностными характеристиками и морозостойкостью, что способствует высоким транспортно-эксплуатационным показателям в условиях естественных кислых грунтов, распространенных в лесной зоне.

5.1.4 Исследование свойств конструкций лесовозных лесных дорог на основе фиброминералогрунтовых композиций

Одним из распространённых технологических факторов, снижающих эффективность устройства конструктивных слоев лесовозных лесных дорог из фиброцементогрунтовых композиций, является повышенная естественная влажность местных грунтов. Эффективным решением данной технической задачи является применение в составе фиброцементогрунтовой смеси минеральной добавки. Данная минеральная добавка представляет собой минеральный порошок размером частиц менее 0,05 мм, полученный из дробленого бетона и железобетона путем рассева (см. разд. 3.3).

Минеральная добавка на основе пылевидных частиц из дробленого бетона и железобетона, имеет удельную поверхность не менее 2500 $см^2/г$, поэтому она

способна сорбировать своей поверхностью избыточную воду в укрепляемом грунте и таким образом эффективно снижать естественную влажность до оптимальных значений, обеспечивающих максимальную плотность при уплотнении фиброминералогрунта. Благодаря химическому составу, показатель кислотности минеральной добавки pH не менее 12, в связи с этим минеральная добавка создает щелочную среду, способствующую благоприятным условиям для кристаллообразования портландцемента, увеличивая прочностные показатели и морозостойкость фиброминералогрунта. Кроме того, основу минеральной добавки составляют диоксид кремния (SiO_2), гидросиликаты кальция (C-S-H), гидроксид кальция ($Ca(OH)_2$), которые эффективно кольматируют поры, а также, взаимодействуя при гидратации и гидролизе портландцемента, формируют прочную и однородную цементогрунтовую матицу, эффективно удерживающую фиброволокна. Благодаря кольматации пор, фиброминералогрунт приобретает высокую морозостойкость. Кроме того, прочное удерживание фиброволокон в цементогрунтовой матрице способствует увеличению прочностных показателей и трещиностойкости конструкций лесовозных лесных дорог из фиброминералогрунта [120].

С целью изучения прочностных показателей и морозостойкости конструкций лесовозных лесных дорог на основе фиброминералогрунтовых композиций использовалось математическое планирование эксперимента (DOE). В качестве критериев исследования приняты: прочность на сжатие; прочность на растяжение при изгибе; коэффициент морозостойкости.

Прочностные показатели и морозостойкость фиброминералогрунтовых композиций определялись по стандартной методике ГОСТ 70452-2022, при соблюдении единых требований проведения экспериментальных исследований и характеристик исходных материалов (см. главу 3). Приготовление фиброминералогрунтовых композиций осуществлялось на базе суглинка тяжелого песчанистого (см. табл. 3.5), отобранного из земляного полотна лесовозной лесной дороги на территории ГКУ СО «Карпинское лесничество», с использованием базальтового волокна длиной 25 мм в количестве 2,0 % от массы

сухого грунта и портландцемента в количестве 8,0 % от массы сухого грунта. В качестве переменных факторов были приняты следующие: содержание минеральной добавки на основе пылевидных частиц из дробленого бетона и железобетона, и естественная влажность грунта.

Учитывая изложенное, целевые функции имеют вид:

$$R_{сж} = f(Q_{мд}, W) \rightarrow max$$

$$R_р = f(Q_{мд}, W) \rightarrow max$$

$$К_{мрз} = f(Q_{мд}, W) \rightarrow max$$

где: $R_{сж}$ – предел прочности на сжатие, МПа (y_1);

$R_р$ – предел прочности на растяжение при раскалывании, МПа (y_2);

$К_{мрз}$ – коэффициент морозостойкости, ед. (y_3);

$Q_{мд}$ – содержание минеральной добавки на основе пылевидных частиц из дробленого бетона и железобетона, % от массы сухого грунта (X_1);

W – естественная влажность грунта, % (X_2).

В соответствии с полным факторным планом $3^{(2)}$ эксперимента, координаты центра плана, интервалы варьирования и уровни исследования приведены в табл. 5.5.

Таблица 5.5 – Уровни варьирования переменных факторов

Факторы	Размер-ность	Обозна-чение факторов	Основ-ной уро-вень	Шаг варьиро-вания	Верхний уровень	Нижний уровень
			z_j^0	Δz_j	+1	-1
Содержание минеральной добавки на основе пылевидных частиц из дробленого бетона и железобетона (от массы сухого грунта), $Q_{мд}$	%	X_1	12,0	12,0	24,0	0
Естественная влажность грунта, %	%	X_2	28,0	15,0	43,0	13,0

В ходе проведения и обработки результатов экспериментов получены уравнения регрессии в натуральных обозначениях факторов со статистически значимыми их параметрами: прочности на сжатие (5.10); прочности на растяжение при раскалывании (5.11) и коэффициента морозостойкости (5.12).

$$R_{сж} = 5{,}261 - 0{,}003{Q_{мд}}^2 + 0{,}002Q_{мд}W + 0{,}066Q_{мд} - 0{,}044W \quad (5.10)$$

$$R_{р} = 1{,}167 - 0{,}001{Q_{мд}}^2 + 0{,}0004Q_{мд}W + 0{,}008Q_{мд} - 0{,}014W \quad (5.11)$$

$$R_{мрз} = 0{,}975 - 0{,}0005{Q_{мд}}^2 + 0{,}0004Q_{мд}W + 0{,}009Q_{мд} - 0{,}01W \quad (5.12)$$

Для более подробного исследования влияния факторов на результат экспериментально-статистических моделей использован метод графической интерпретации. Графическая интерпретация уравнений регрессии представлена в виде построенных поверхностей отклика (рис. 5.10 – 5.12).

Как видно на рис. 5.10 повышение естественной влажности грунта с 13,0 % до 43,0 % приводит к снижению прочности на 34,7 %, но увеличение содержания минеральной добавки повышает прочностные показатели конструкций лесовозных лесных дорог из фиброминералогрунта. Так, при содержании минеральной добавки 12,0 % от массы сухого грунта в условиях повышения естественной влажности грунта с 13,0 % до 43,0 % показатель прочности на сжатие снижается на 15,6 %. При содержании минеральной добавки 24,0 % от массы сухого грунта в условиях повышения естественной влажности грунта с 13,0 % до 43,0 % показатель прочности на сжатие снижается на 6,3 %. Также стоит отметить, что эффективность действия минеральной добавки увеличивается при повышении естественной влажности грунта. Так, при естественной влажности грунта 13 %, содержание минеральной добавки 24,0 % от массы сухого грунта увеличивает прочность на сжатие на 6,7 %. При увеличении естественной влажности грунта до 43 %, содержание минеральной добавки 24,0 % от массы сухого грунта позволяет увеличить прочность на сжатие на 52,9 %.

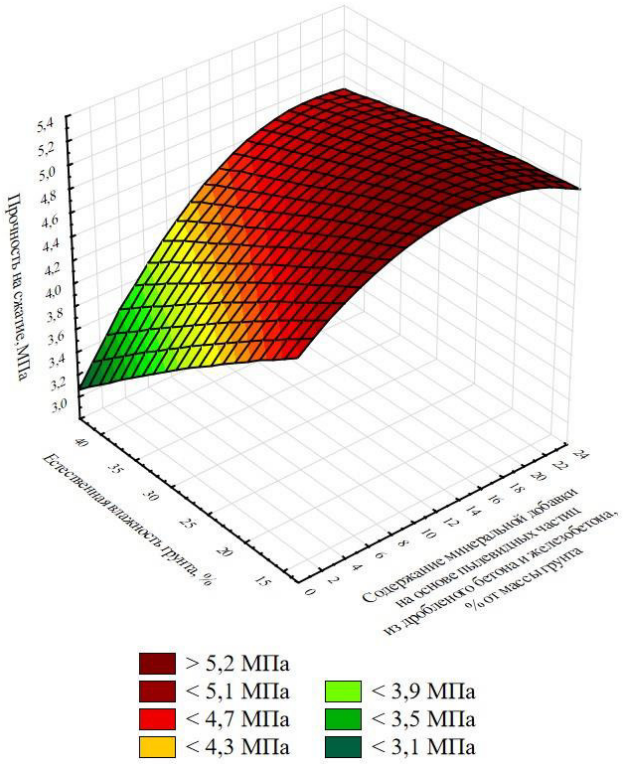


Рисунок 5.10 – Поверхность отклика прочности на сжатие в зависимости от содержания минеральной добавки и естественной влажности грунта

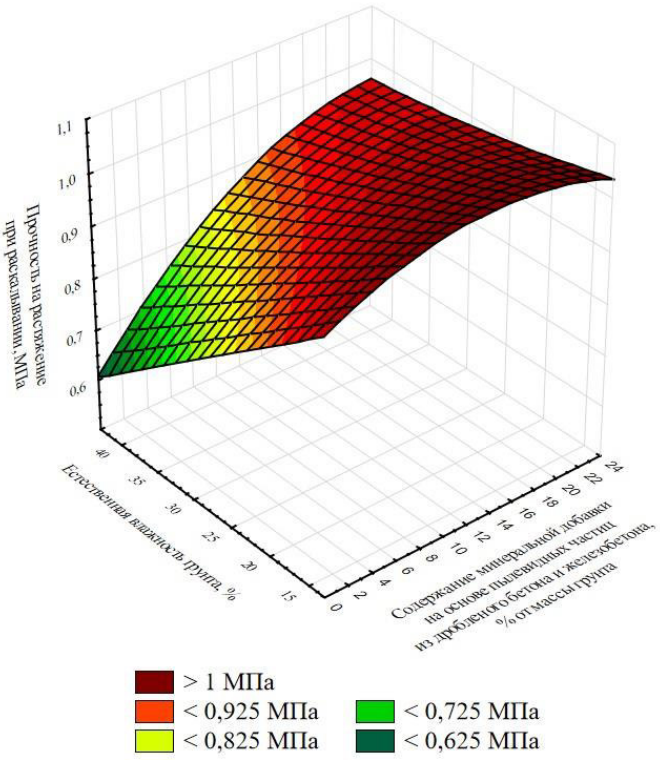


Рисунок 5.11 – Поверхность отклика прочности на растяжение при раскалывании в зависимости от содержания минеральной добавки и естественной влажности грунта

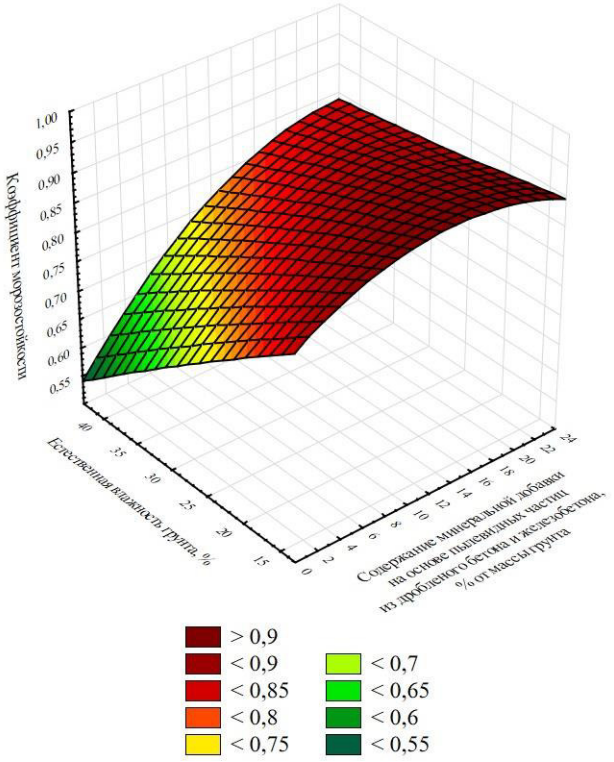


Рисунок 5.12 – Поверхность отклика коэффициента морозостойкости в зависимости от содержания минеральной добавки и естественной влажности грунта

Как видно на рис. 5.11 повышение естественной влажности грунта с 13,0 % до 43,0 % приводит к снижению прочности на растяжение при раскалывании на 38,8 %, но увеличение содержания минеральной добавки повышает прочностные показатели конструкций лесовозных лесных дорог из фиброминералогрунта. Так, при содержании минеральной добавки 12,0 % от массы сухого грунта в условиях повышения естественной влажности грунта с 13,0 % до 43,0 % показатель прочности на растяжение при раскалывании материала снижается на 19,5 %. При содержании минеральной добавки 24,0 % от массы сухого грунта в условиях повышения естественной влажности грунта с 13,0 % до 43,0 % показатель прочности на растяжение при раскалывании снижается на 7,3 %. Также стоит отметить, что эффективность действия минеральной добавки увеличивается при повышении естественной влажности грунта. Так, при естественной влажности грунта 13 %, содержание минеральной добавки 24,0 % от массы сухого грунта увеличивает прочность на растяжение при раскалывании на 4,7 %. При увеличении естественной влажности грунта до 43 %, содержание минеральной добавки 24,0 % от массы сухого грунта позволяет увеличить прочность на растяжение при раскалывании на 58,4 %.

Как видно на рис. 5.12 повышение естественной влажности грунта с 13,0 % до 43,0 % приводит к снижению коэффициента морозостойкости на 36,3 %, но увеличение содержания минеральной добавки повышает морозостойкость конструкций лесовозных лесных дорог из фиброминералогрунта. Так, при содержании минеральной добавки 12,0 % от массы сухого грунта в условиях повышения естественной влажности грунта с 13,0 % до 43,0 % коэффициент морозостойкости снижается на 18,5 %. При содержании минеральной добавки 24,0 % от массы сухого грунта в условиях повышения естественной влажности грунта с 13,0 % до 43,0 % коэффициент морозостойкости снижается на 6,3 %. Также стоит отметить, что эффективность действия минеральной добавки увеличивается при повышении естественной влажности грунта. Так, при естественной влажности грунта 13 %, содержание минеральной добавки 24,0 % от массы сухого грунта увеличивает коэффициент морозостойкости на 5,3 %. При

увеличении естественной влажности грунта до 43 %, содержание минеральной добавки 24,0 % от массы сухого грунта позволяет увеличить коэффициент морозостойкости на 55,0 %.

Таким образом, результаты исследований подтверждают, что минеральная добавка на основе пылевидных частиц из дробленого бетона и железобетона в составе фибоминералогрунтовой смеси в условиях переувлажненных местных грунтов лесной зоны позволяет обеспечить формирование прочной кристаллической структуры материала, связанной внутри волокнами фибры. Благодаря этому конструкции лесовозных лесных дорог на основе фибоминералогрунтовых композиций обладают повышенными прочностными характеристиками и морозостойкостью, что способствует высоким транспортно-эксплуатационным показателям в условиях переувлажненных естественных грунтов, распространенных в лесной зоне.

5.2 Особенности технологических факторов устройства конструкций лесовозных лесных дорог на основе фиброцементогрунтовых композиций

Учитывая особенности структурообразования и характеристик фиброцементогрунтовых композиций к наиболее значимым технологическим факторам, влияющим на конечные транспортно-эксплуатационные показатели и долговечность при устройстве конструкций лесовозных лесных дорог, относятся:

– обеспечение требуемой однородности и дисперсности естественных грунтов при измельчении;

– обеспечение точного дозирования и равномерного распределения волокон в цементогрунтовой смеси;

– обеспечение очередности внесения волокон и вяжущих материалов при приготовлении фиброцементогрунтовой смеси;

– контроль и регулирование влажности естественных грунтов при приготовлении фиброцементогрунтовой смеси;

– соблюдение длительности технологического периода от замеса до уплотнения фиброцементогрунтовой смеси;

– обеспечение требуемой степени уплотнения фиброцементогрунтовой смеси;

– обеспечение ухода за свежеуложенным слоем фиброцементогрунта.

Соблюдение технологических правил приготовления фиброцементогрунтовых смесей играет важную роль для устройства конструкций лесовозных лесных дорог, поскольку на этой стадии должна обеспечиваться однородность смеси, равномерность распределения волокон в объеме цементогрунтовой матрицы и оптимальные условия процессов структурообразования материала. В зависимости от типа ведущей машины существует два способа приготовления фиброцементогрунтовых смесей: в стационарных смесительных установках и непосредственно на земляном полотне лесовозной лесной дороги с помощью горизонтальных грунтовых смесителей (ресайклеров или стабилизеров). Стоит отметить, что в настоящий момент большую популярность получили компактные многофункциональные прицепные ресайклеры, позволяющие оптимизировать и сократить количество технологических операций.

Для приготовления фиброцементогрунтовых смесей важным фактором является обеспечение требуемой однородности и дисперсности естественных грунтов при измельчении. Наличие крупных фракций инертных заполнителей ухудшает равномерность распределения волокон в фиброцементогрунтовых смесях и, соответственно, снижает прочностные показатели материала. Снижение эффективности дисперсного армирования в присутствии крупных грунтовых агломератов объясняется тем, что волокна не равномерно распределяются в объеме цементогрунтовой матрицы, преимущественно располагаются в зонах вокруг частиц грунта с ориентацией вдоль их поверхности. В связи с изложенным частиц грунта при приготовлении фиброцементогрунтовых смесей размером более 4 мм должно быть не более 25 % по массе, в том числе частиц размером более 8 мм – не более 10 % по массе.

Для приготовления фиброцементогрунтовых смесей наиболее технологически сложным является равномерное распределение фибры в объеме цементогрунтовой матрицы. В зависимости от типа ведущей машины с этой целью могут быть использованы два основных технологических приема:

1. Введение и распределение волокон непосредственно в стационарной смесительной установке в процессе приготовления фиброцементогрунтовой смеси.

2. Введение и распределение волокон в смеси ресайклером в процессе перемешивания с грунтом и портландцементом на земляном полотне лесовозной лесной дороги.

На основании опыта проведения лабораторных исследований и строительства участков лесовозных лесных дорог на основе фиброцементогрунтовых композиций, наиболее эффективными для достижения равномерности распределения и дозирования волокон являются конструкции смесителей с быстро вращающимся вертикальным валом. При смешении фиброцементогрунтовой смеси на земляном полотне быстро вращающийся ротор грунтового смесителя обеспечивает достаточную распушку волокон. При приготовлении фиброцементогрунтовых композиций в стационарных грунтовых смесительных установках, рекомендуется применение специальных турбулентных смесителей [19, 21] и устройств для дозирования и подачи фибр в смеситель [130]. Также непосредственно в смесительные камеры волокна фибры могут подаваться вручную, что влияет на экономическую составляющую себестоимости производства фиброцементогрунтовых смесей.

Важным технологическим фактором, влияющим на равномерное распределение волокон в цементогрунтовой матрице, является очередность введения фибры. В случае использования стационарной смесительной установки все компоненты фиброцементогрунтовой смеси вводятся и перемешиваются одновременно. В случае использования ресайклера перемешивание волокон следует производить с готовой цементогрунтовой смесью, либо одновременно при смешении грунта и портландцемента. Перемешивание фибры с грунтом и

дальнейшее смешение смеси с портландцементом не рекомендуется в связи с возникающими при этом процессами комкования волокон.

При использовании ресайклера перемешивание фибры осуществляется путем ее предварительного распределения по поверхности цементогрунтовой смеси. При использовании полипропиленовой фибры возможно ее предварительное гидрораспушение, путем перемешивания с водой, с дальнейшим распределением по поверхности цементогрунтовой смеси. Для получения суспензии воды и фибры целесообразно использовать метод вихревого перемешивания. За счет кругового перемешивания при вихре-турбулентном движении происходит смачивание поверхности волокон и дальнейшее отделение их друг от друга, в результате чего фибра равномерно распределяются в объеме воды.

Процесс уплотнения конструкций лесовозных лесных дорог на основе фиброцементогрунтовых композиций следует производить при оптимальной влажности смеси, при которой обеспечивается максимальное уплотнение материала и активация реакций гидратации и гидролиза портландцемента. При недостатке или избытке воды наблюдается недостаточное уплотнение, нарушение структуры, образование дефектов и высокой пористости фиброцементогрунта, что приводит к снижению прочностных и деформационных показателей дорожной одежды. Поэтому важным является контроль за соблюдением показателя оптимальной влажности фиброцементогрунтовой смеси, регулируемой за счет введения добавки воды. В случае значительного превышения естественной влажности грунтов, приготовление фиброцементогрунта следует проводить после предварительной их просушки естественным путем, посредством фрезерования и организации технологического перерыва до снижения влажности до допустимых значений. Кроме того, в данных случаях целесообразно применять специальные конструкции лесовозных лесных дорог на основе фиброцементогрунтовых композиций: фиброцементогрунта с добавкой полиДМДААХ или фибоминералогрунта, отличающихся высокой эффективностью в условиях высокой влажности естественных грунтов.

В соответствии с результатами проведенных лабораторных и опытно-производственных исследований кинетики структурообразования, уплотнение конструкций лесовозных лесных дорог из фиброцементогрунтовых композиций до максимальной плотности должно быть закончено не позднее чем за 3 часа после замеса и не позднее чем через 5 часов при температурах воздуха ниже 10 °С.

Процесс твердения является одним из важнейших этапов в технологии устройства конструкций лесовозных лесных дорог на основе фиброцементогрунтовых композиций, поскольку в этот период происходит формирование структуры композиционного материала и контактных зон на поверхности раздела фаз армирующих волокон и матрицы цементогрунта. Учитывая изложенное, обеспечение благоприятных условий твердения фиброцементогрунтовых слоев определяет их прочностные, транспортно-эксплуатационные показатели и долговечность. Благоприятные условия твердения фиброцементогрунтовых композиций обеспечиваются следующими факторами: максимальное уплотнение при оптимальной влажности и уход за свежеуложенным слоем в течение заданного периода времени.

Максимальное уплотнение при оптимальной влажности фиброцементогрунтовых слоев обеспечивает их высокую структурную плотность и эффективную работу фибры по увеличению прочностных и деформационных показателей конструкций лесовозных лесных дорог. Учитывая изложенное, коэффициент уплотнения фиброцементогрунтовых слоев должен быть не менее 0,98.

В целях создания оптимальных условий структурообразования после уплотнения фиброцементогрунта, для ухода за свежеуложенным слоем требуется распределять по его поверхности органические вяжущие, например битумную эмульсию, в количестве 0,5-0,8 л/м^2, либо другие пленкообразующие материалы аналогичного действия. После окончания уплотнения фиброцементогрунтовых слоев конструкций лесовозных лесных дорог, соответствующих марке по прочности М40 и выше и толщиной не менее 15 см или марке по прочности М20

и толщиной не менее 20 см, движение построечного транспорта следует открывать не ранее чем через 5 суток. При толщине фиброцементогрунтовых слоев менее указанных значений и марке по прочности М10, движение построечного транспорта следует открывать не ранее чем через 7 суток. Открытие движение лесотранспортных машин по конструктивным слоям из фиброцементогрунта разрешается открывать не ранее чем через 20 суток.

В целях обеспечения соблюдения технологических требований, а также контроля качества работ, разработан технологический регламент на устройство конструкций лесовозных лесных дорог из фиброцементогрунтовых композиций с высокими транспортно-эксплуатационными показателями (приложение 3).

5.3 Технология регенерации цементогрунтовых конструкций рекультивируемых лесовозных лесных дорог

После освоения участков лесосырьевых баз транспортная инфраструктура – лесовозные лесные дороги подлежат рекультивации [128]. Для эффективного использования дорожно-строительных ресурсов целесообразным является повторное использование имеющихся материалов рекультивируемых лесовозных лесных дорог для строительства новых конструктивных слоев на не освоенных лесных участках. В случае строительства лесовозных лесных дорог из цементогрунта, технология регенерации цементогрунтовых слоев конструкций рекультивируемых дорожных одежд позволит сократить затраты на строительство не только за счет отсутствия необходимости в применении инертных каменных материалов, но и за счет сокращения количества применяемого портландцемента [117]. Кроме того, полный демонтаж и вывоз конструктивных слоев из цементогрунта для последующей регенерации создаст благоприятные условия для биологической рекультивации лесовозных дорог на освоенных лесных участках.

Регенерация цементогрунтовых слоев конструкций лесовозных лесных дорог – это технология переработки старого цементогрунтового материала, путем

его измельчения и внесения вяжущих компонентов, в целях восстановления и улучшения его характеристик для повторного использования в конструкции новой дорожной одежды [187]. В связи с изложенным, разработка технологии регенерации цементогрунтовых конструкций рекультивируемых лесовозных лесных дорог является актуальной. С целью изучения прочностных показателей и морозостойкости конструкций лесовозных лесных дорог из регенерированных грунтовых смесей на основе гранулята, полученного после фрезерования старых цементогрунтовых слоев были проведены лабораторные исследования.

Цементогрунтовый гранулят представляет собой измельченный грунт, укрепленный портландцементом, в конструкции дорожной одежды в соответствии с ГОСТ 23558-94 и ГОСТ Р 70452-2022. При этом гранулометрический состав цементогрунтового гранулята должен соответствовать: не более 25 % по массе частиц размером более 5 мм и не более 10 % по массе частиц размером более 10 мм. Для получения данных гранулометрических характеристик цементогрунтового гранулята могут применяться ресайклеры, в том числе имеющие технологическую возможность внесения воды и перемешивания материала с вяжущими компонентами.

На основании предварительных поисковых исследований, для улучшения условий структурообразования в составе регенерированной цементогрунтовой смеси предусмотрена добавка золы-уноса ГРЭС. Золы-уноса ГРЭС проявляют, как правило, слабую вяжущую способность, но благодаря наличию в их составе оксида кальция, в процессе взаимодействия с глинистыми частицами грунтов золы-уноса способны насыщать их обменный комплекс и создавать благоприятные условия для гидратации и гидролиза портландцемента. Поэтому формирование кристаллической структуры регенерированной цементогрунтовой смеси с добавкой золы-уноса ГРЭС происходит более эффективно, что позволяет получать высокие прочностные показатели и морозостойкость конструкциям лесовозных лесных дорог и снижать необходимое количество добавки портландцемента. Для увеличения объемов регенерированной цементогрунтовой смеси при устройстве новых слоев дорожных одежд в состав вводится добавка

местного природного глинистого грунта. В целях дисперсного армирования цементогрунтовой матрицы в составе регенерированной цементогрунтовой смеси предусмотрена добавка фиброволокон. Фиброволокна, равномерно распределяясь по всему объему регенерируемой цементогрунтовой смеси, воспринимают за счет осевого растяжения внешние нагрузки и значительно увеличивают прочностные показатели и морозостойкость материала.

Для создания математических моделей исследования и их статистического анализа использовалось математическое планирование эксперимента (DOE). В качестве критериев исследования приняты: предел прочности на сжатие; предел прочности на растяжение при изгибе; коэффициент морозостойкости.

Прочностные показатели и морозостойкость регенерированных фиброцементогрунтовых композиций определялись по стандартной методике ГОСТ 70452-2022, при соблюдении единых требований проведения экспериментальных исследований и характеристик исходных материалов (см. главу 3). Для проведения исследований использовался цементогрунт марки М40 А, с коэффициентом морозостойкости 0,80 при 30 циклах замораживания – оттаивания. Цементогрунт был изготовлен на основе естественного грунта – суглинка тяжелого песчанистого (см. табл. 3.5), отобранного из земляного полотна лесовозной лесной дороги на территории ГКУ СО «Карпинское лесничество». Исходный цементогрунт был высушен до воздушно-сухого состояния при температуре 105 °С и измельчен с показателем содержания в получившемся цементогрунтовом грануляте частиц размером более 5 мм – 15,4 % по массе и частиц размером более 10 мм – 5,5 % по массе.

Для приготовления регенерированных фиброцементогрунтовых смесей использовались следующие компоненты: суглинок тяжелый песчанистый в количестве 12,0 % от массы сухого цементогрунтового гранулята; базальтовое волокно длиной 25 мм, добавляемое в количестве 2,0 % от массы сухого цементогрунтового гранулята, портландцемент, зола-уноса ГРЭС и вода, добавляемая до значения оптимальной влажности смеси. В качестве переменных

факторов были приняты следующие: содержание портландцемента и содержание золы-уноса ГРЭС.

Учитывая изложенное, целевые функции имеют вид:

$$R_{сж} = f(Q_{пц}, Q_{зу}) \rightarrow max$$

$$R_{р} = f(Q_{пц}, Q_{зу}) \rightarrow max$$

$$К_{мрз} = f(Q_{пц}, Q_{зу}) \rightarrow max$$

где: $R_{сж}$ – предел прочности на сжатие, МПа (y_1);

$R_{р}$ – предел прочности на растяжение при раскалывании, МПа (y_2);

$К_{мрз}$ – коэффициент морозостойкости, ед. (y_3);

$Q_{пц}$ – содержание портландцемента, % от массы сухого цементогрунтового гранулята (X_1);

$Q_{зу}$ – содержание золы-уноса ГРЭС, % от массы сухого цементогрунтового гранулята (X_2).

В соответствии с полным факторным планом $3^{(2)}$ эксперимента, координаты центра плана, интервалы варьирования и уровни исследования приведены в табл. 5.6.

Таблица 5.6 – Уровни варьирования переменных факторов

Факторы	Размер-ность	Обозна-чение факторов	Основ-ной уро-вень	Шаг варьиро-вания	Верхний уровень	Нижний уровень
			z_j^0	Δz_j	+1	-1
Содержание портландцемента (от массы сухого цементогрунтового гранулята), $Q_{пц}$	%	X_1	3	3	6	0
Содержание золы-уноса ГРЭС (от массы сухого цементогрунтового гранулята), $Q_{зу}$	%	X_2	8	8	16	0

В ходе проведения и обработки результатов экспериментов получены уравнения регрессии в натуральных обозначениях факторов со статистически значимыми их параметрами: прочности на сжатие (5.13); прочности на растяжение при раскалывании (5.14) и коэффициента морозостойкости (5.15).

$$R_{сж} = -0{,}022 - 0{,}013{Q_{пц}}^2 + 0{,}002Q_{пц}Q_{зу} + 0{,}761Q_{пц} + 0{,}026Q_{зу} \quad (5.13)$$

$$R_{р} = -0{,}009 - 0{,}004{Q_{пц}}^2 - 0{,}0004{Q_{зу}}^2 + 0{,}0004Q_{пц}Q_{зу} + 0{,}166Q_{пц} + 0{,}007Q_{зу} \quad (5.14)$$

$$R_{мрз} = -0{,}005 - 0{,}004{Q_{пц}}^2 - 0{,}0003{Q_{зу}}^2 + 0{,}0003Q_{пц}Q_{зу} + 0{,}146Q_{пц} + 0{,}005Q_{зу} \quad (5.15)$$

Для более подробного исследования влияния факторов на результат экспериментально-статистических моделей использован метод графической интерпретации. Графическая интерпретация уравнений регрессии представлена в виде построенных поверхностей отклика (рис. 5.13 – 5.15).

Как видно на поверхностях отклика, увеличение содержания портландцемента позволяет существенно повысить прочностные показатели и морозостойкость регенерированного цементогрунта. При этом на графиках прослеживается зона рационального содержания золы-уноса ГРЭС 8,0 % от массы сухого цементогрунтового гранулята, при которой прочность на сжатие регенерированного фиброцементогрунта возросла на 10,0 %; прочность на растяжение при раскалывании возросла на 9,0 % и коэффициент морозостойкости увеличился на 10,0 % в сравнении с образцами без добавки данного компонента. Таким образом, результаты экспериментальных исследований показали, что для получения максимальных прочностных показателей и морозостойкости регенерированного фиброцементогрунта требуется оптимальное содержание вводимых в смесь добавок, таких как базальтовое фиброволокно 2,0 % и золы-уноса ГРЭС 8,0 % от массы сухого цементогрунтового гранулята.

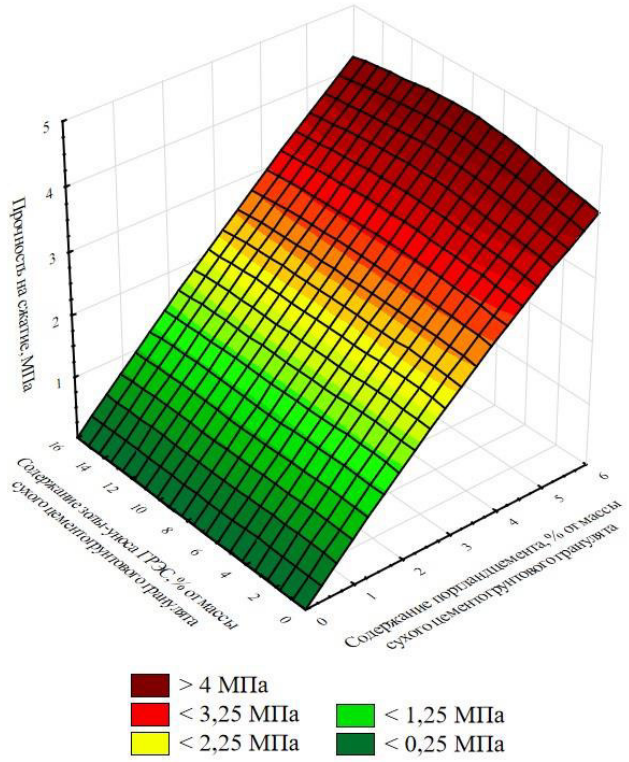


Рисунок 5.13 – Поверхность отклика прочности на сжатие в зависимости от содержания портландцемента и золы-уноса ГРЭС

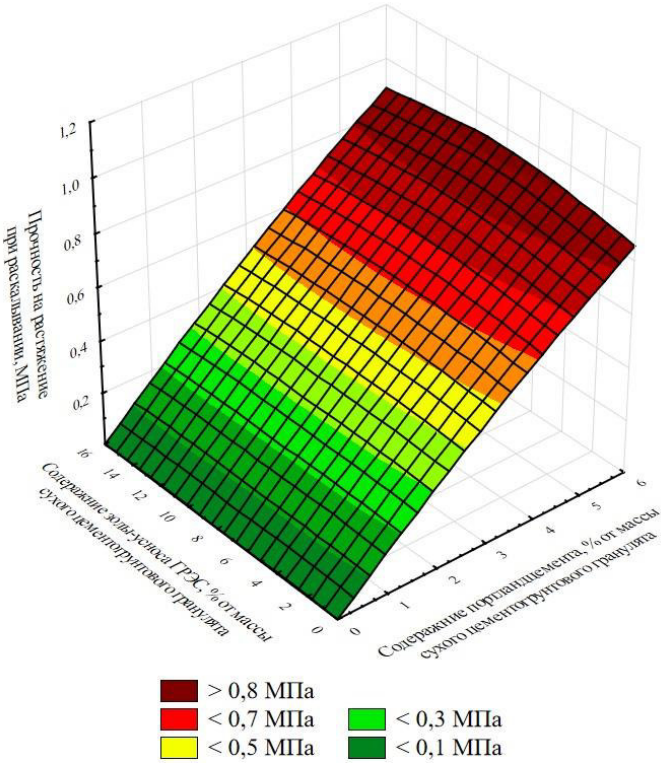


Рисунок 5.14 – Поверхность отклика прочности на растяжение при раскалывании в зависимости от содержания портландцемента и золы-уноса ГРЭС

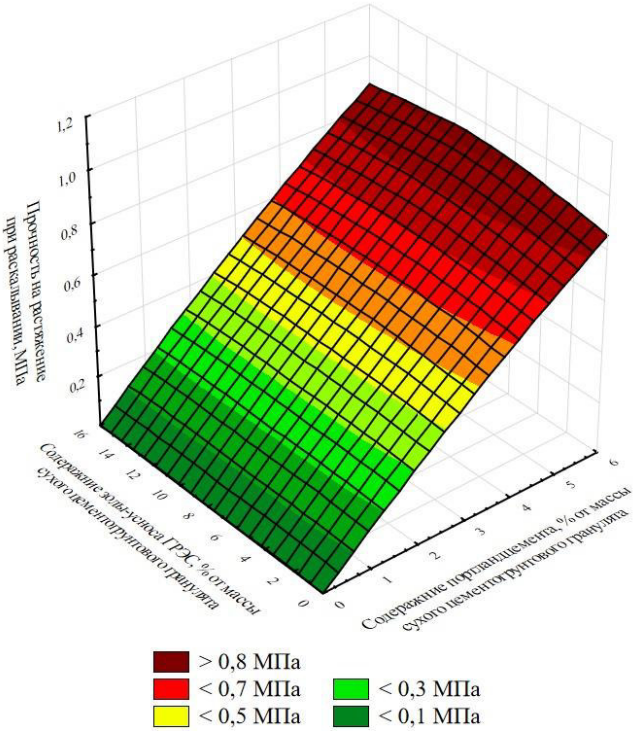


Рисунок 5.15 – Поверхность отклика коэффициента морозостойкости в зависимости от содержания портландцемента и золы-уноса ГРЭС

Для получения регенерируемым фиброцементогрунтам требуемых физико-механических показателей и коэффициента морозостойкости, удовлетворяющих нормативно-техническим требованиям по условиям применения и минимальной стоимости устраиваемых конструкций дорожных одежд лесовозных лесных дорог из данного материала, необходим лабораторный подбор оптимального состава всех компонентов регенерируемых цементогрунтовых смесей, включая портландцемент, местный глинистый грунт и воду. Оптимальный состав регенерированной фиброцементогрунтовой смеси, содержащий добавки: грунт (суглинок тяжелый песчанистый) – 12,0 %; портландцемент – 6,0 %; зола-уноса ГРЭС – 8,0 %; базальтовое фиброволокно – 2,0 % и вода 17,5 %, добавляемая до значения оптимальной влажности смеси, обеспечивают материалу марку по прочности М40 А и коэффициент морозостойкости 0,80, что соответствует данным характеристикам фиброцементогрунта, приготовленного на базе естественного грунта с содержанием портландцемента 8,0 %. Таким образом, применение технологии регенерации цементогрунтовых конструкций лесовозных лесных дорог позволяет уменьшить применение минерального вяжущего в составе фиброцементогрунтовых композиций на 25 %.

Результаты исследований свидетельствуют об эффективности использования регенерируемых цементогрунтовых конструкций рекультивируемых лесовозных лесных дорог. Добавка золы-уноса ГРЭС существенно улучшает условия структурообразования портландцемента, а волокна фибры, распределенные в объеме цементогрунтовой матрицы, эффективно воспринимают воздействующие внешние нагрузки, что значительно увеличивает прочностные показатели и морозостойкость регенерированных фиброцементогрунтов, обеспечивая высокие транспортно-эксплуатационные характеристики дорожных одежд лесовозных лесных дорог. Требования по устройству фиброцементогрунтовых конструкций методом регенерации цементогрунтовых слоев рекультивируемых лесовозных лесных дорог изложены в технологическом регламенте (приложение 3).

5.4 Выводы по пятой главе

1. В целях повышения эффективности устройства и эксплуатации дорожных одежд, учитывающих условия преобладания в лесной зоне кислых, переувлажненных грунтов и требования по обеспечению высоких транспортно-эксплуатационных качеств, разработаны и обоснованы конструкции лесовозных лесных дорог на основе фиброцементогрунтовых композиций: фиброцементогрунт с добавкой полиэлектролита полиДМДААХ, фибробитумоцементогрунт, фиброзолоцементогрунт, фиброминералогрунт.

2. На основании экспериментально-статистических моделей установлено, что конструкция лесовозных лесных дорог на основе фиброцементогрунтовых композиций с добавкой полиДМДААХ обладает повышенными прочностными показателями и морозостойкостью, и наиболее эффективна в условиях преобладания переувлажненных глинистых грунтов.

3. На основании экспериментально-статистических моделей установлено, что конструкция лесовозных лесных дорог на основе фибробитумоцементогрунтовой смеси обладает коэффициентом сцепления на 39,1 % выше, чем аналогичный показатель на фиброцементогрунтовом покрытии, и более высокими прочностными характеристиками и морозостойкостью. Данные показатели позволяют использовать фибробитумоцементогрунт в верхнем слое покрытия дорожной одежды в особенности для обеспечения безопасности движения в условиях высокой интенсивности на сложных участках лесовозных лесных дорог.

4. На основании экспериментально-статистических моделей установлено, что конструкция лесовозных лесных дорог на основе фиброзолоцементогрунтовой смеси обладает повышенными прочностными показателями и морозостойкостью, и наиболее эффективна в условиях кислых глинистых грунтов, распространенных в лесной зоне.

5. На основании экспериментально-статистических моделей установлено, что конструкция лесовозных лесных дорог на основе фиброминералогрунтовой

смеси обладает повышенными прочностными характеристиками и морозостойкостью, и наиболее эффективна в условиях преобладания переувлажненных глинистых грунтов.

6. Разработан технологический регламент по устройству конструкций лесовозных лесных дорог с высокими транспортно-эксплуатационными показателями, учитывающие процессы приготовления оптимальных составов, укладки и ухода за фиброцементогрунтовым слоем.

7. Разработаны и обоснованы технологические требования по устройству фиброцементогрунтовых конструкций методом регенерации цементогрунтовых слоев рекультивируемых лесовозных лесных дорог, а именно: гранулометрический состав цементогрунтового гранулята и используемая техника для его получения; подготовка оптимального состава, укладка и уход за регенерированным фиброцементогрунтом. На основании экспериментально-статистических моделей установлено, что регенерированный фиброцементогрунт обладает требуемыми прочностными показателями и морозостойкостью при содержании портландцемента на 25 % ниже в сравнении с исходным цементогрунтом.

ГЛАВА 6
ОПЫТНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕСОВОЗНЫХ ЛЕСНЫХ ДОРОГ НА ОСНОВЕ ФИБРОЦЕМЕНТОГРУНТОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ

В целях опытно-производственных исследований технологических и транспортно-эксплуатационных показателей конструкций дорожных одежд на основе фиброцементогрунтовых композиций были построены опытные участки на лесовозных лесных дорогах. В августе 2023 года на лесовозной лесной дороге IIIл категории на территории ГКУ СО «Карпинское лесничество» были построены опытные участки № 1, № 2, № 3, № 4, № 5, протяженностью 25 м каждый, с покрытием дорожной одежды из фиброцементогрунта. В июне 2024 года на лесовозной лесной дороге IIIл категории на территории ГКУ СО «Ирбитское лесничество» были построены опытные участки № 6, № 7, № 8, № 9, № 10, протяженностью 25 м каждый, с покрытием дорожной одежды из фиброцементогрунта (приложение 4).

Оценка прочности конструкций лесовозных лесных дорог на опытных участках производилась по критерию модуля упругости прибором ZORN ZSG 02. С помощью комплекса измерительной передвижной дорожной лаборатории ТРАССА 123000089000 (зав. № 737) проведена диагностика и определение транспортно-эксплуатационных показателей покрытия на опытных участках по критериям: продольная ровность по международной системе IRI; поперечная ровность (колейность), путем измерения просветов под трех метровой рейкой по полосам наката; регистрация дефектов на дорожном покрытии балльным способом в соответствии с ОДМ 218.4.039.

Модуль упругости конструкций лесовозных лесных дорог на опытных участках №№ 1 – 5 определялся через 7, 28, 56, 365 суток и на опытных участках №№ 6 – 10 определялся через 7, 28, 56, 84 и 112 суток набора прочности укрепленного грунта.

Полевые испытания опытных участков №№ 1-5 проводились в августе, сентябре, октябре 2023 года и в августе 2024 года. Полевые испытания опытных участков №№ 6-10 проводились в июне, июле, августе, сентябре и октябре 2024 года. Основные показатели эксплуатации опытных участков на время проведения полевых испытаний представлены в табл. 6.1 и табл. 6.2.

Таблица 6.1 – Основные показатели эксплуатации опытных участков № 1-5

№ участка	Показатели эксплуатации			
	Дата испытаний			
	Август 2023	Сентябрь 2023	Октябрь 2023	Август 2024
1. Срок эксплуатации на время проведения испытаний, мес.				
1-5	0	1	2	12
2. Грузооборот, тыс. м^3/год				
1-5	105			
3. Интенсивность движения, авт./сут.				
1-5	71			
4. Интенсивность движения, приведенная к расчетной нагрузке, груз. ед. /сут.				
1-5	39			

Таблица 6.2 – Основные показатели эксплуатации опытных участков № 6-10

№ участка	Показатели эксплуатации				
	Дата испытаний				
	Июнь 2024	Июль 2024	Август 2024	Сентябрь 2024	Октябрь 2024
1. Срок эксплуатации на время проведения испытаний, мес.					
6-10	0	1	2	3	4
2. Грузооборот, тыс. м^3/год					
6-10	134				
3. Интенсивность движения, авт./сут.					
6-10	87				
4. Интенсивность движения, приведенная к расчетной нагрузке, груз. ед. /сут.					
6-10	48				

6.1 Конструктивные характеристики опытных участков

Дорожная одежда на опытных участках представляет собой однослойную конструкцию из укрепленного грунта: цементогрунта (участки № 1 и № 6) и фиброцементогрунта (участки №№ 2 – 5; №№ 7 – 10), толщиной 0,25 м, уложенного на естественный грунт земляного полотна: из суглинка тяжелого песчанистого – на участках №№ 1 – 5; из суглинка тяжелого пылеватого – на участках №№ 6 – 10. Конструктивная схема дорожной одежды на опытных участках №№ 1 – 10 представлена на рис. 6.1.

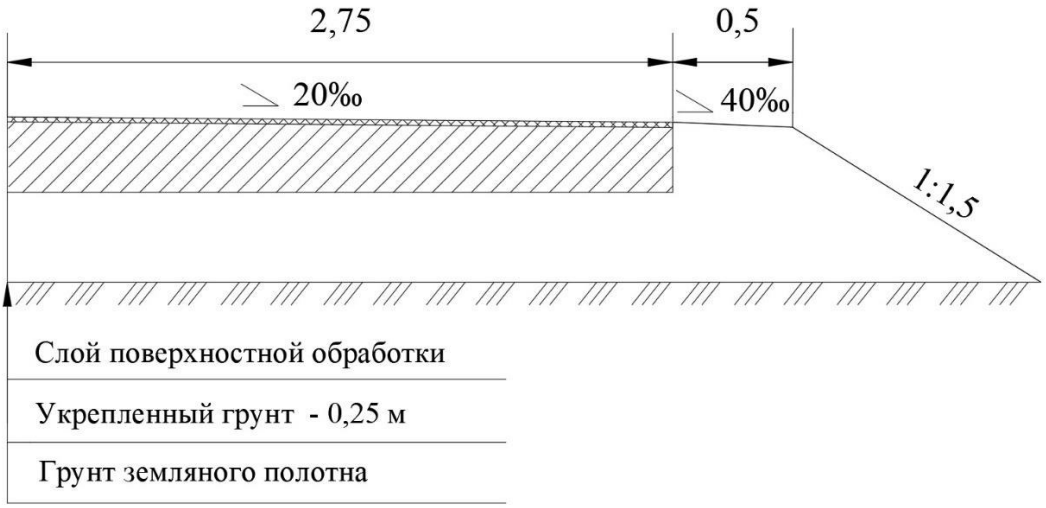


Рисунок 6.1 – Поперечный профиль конструкции дорожной одежды на опытных участках №№ 1 – 10

Для приготовления составов фиброцементогрунтовых композиций на опытных участках использованы следующие компоненты (см. главу 3):

– портландцемент;

– фибра на основе базальтового волокна из отходов производства теплоизоляционных плит;

– базальтовая фибра;

– стеклянная фибра;

– полипропиленовая фибра;

– полиэлектролит полиДМДААХ.

Прочностные показатели и морозостойкость фиброцементогрунтовых композиций определялись по стандартной методике ГОСТ 70452-2022, при соблюдении единых требований проведения экспериментальных исследований и характеристик исходных материалов. Компонентные составы и основные характеристики фиброцементогрунтовых композиций представлены в табл. 6.3.

Таблица 6.3 – Компонентные составы и основные характеристики фиброцементогрунтовых композиций

№ участка	Портландцемент, % от массы грунта	Фибра, % от массы грунта	ПолиДМДААХ, % от массы грунта	Марка по ГОСТ Р 70452-2022	Коэффициент морозостойкости по ГОСТ Р 70452-2022
1	8	0	0	М40 А	0,82
Фибра на основе базальтового волокна из отходов производства теплоизоляционных плит					
2	8	1,5	0	М40 А	0,87
3	8	1,5	0,2	М60 А	0,88
Базальтовая фибра					
4	8	2,0	0	М60 А	0,85
5	8	2,0	0,2	М70 А	0,91
6	9	0	0	М40 А	0,81
Стеклянная фибра					
7	9	2,0	0	М60 А	0,87
8	9	2,0	0,3	М70 А	0,89
Полипропиленовая фибра					
9	9	1,5	0	М70 А	0,91
10	9	1,5	0,3	М80 А	0,93

Расчет значений модуля упругости конструкций лесовозных лесных дорог на опытных участках произведен в программном комплексе «КРЕДО РАДОН 4.2» (Кредо-Диалог СП ООО, Беларусь) в соответствии с методикой ГОСТ Р 71404-2024. На основе проведенных расчетов теоретические значения модуля упругости конструкций лесовозных лесных дорог на опытных участках со слоем покрытия из укрепленного грунта представлены в табл. 6.4.

Таблица 6.4 – Расчетные значения модуля упругости дорожной одежды на опытных участках лесовозных автомобильных дорог

№ участка	Портландцемент, % от массы грунта	Фибра, % от массы грунта	ПолиДМДААХ, % от массы грунта	Расчетное значение модуля упругости дорожной одежды по ГОСТ Р 71404-2024, МПа
1	8	0	0	118
Фибра на основе базальтового волокна из отходов производства теплоизоляционных плит				
2	8	1,5	0	126
3	8	1,5	0,2	131
Базальтовая фибра				
4	8	2,0	0	138
5	8	2,0	0,2	146
6	9	0	0	124
Стеклянная фибра				
7	9	2,0	0	139
8	9	2,0	0,3	145
Полипропиленовая фибра				
9	9	1,5	0	149
10	9	1,5	0,3	154

6.2 Технология строительства опытных участков

Ведущей машиной при строительстве опытных участков №№ 1 – 5 являлся горизонтальный смеситель на базе колесного мини-погрузчика CASE SV300B. Ведущей машиной при строительстве опытных участков №№ 6 – 10 являлась дорожная фреза. В связи с тем, что дорожная одежда на опытных участках представляет собой однослойную конструкцию из укрепленного грунта, работы по ее устройству проводились в технологической последовательности, представленной в табл. 6.2.

Слой поверхностной обработки из щебня фракции 5-10 мм, пропитанного битумом БНД 100/130, укладывался через 5 суток после окончательного уплотнения слоя укрепленного грунта битумощебнераспределителем (чипсиллером) ДС-180.

Таблица 6.2 – Технологическая последовательность устройства конструкции дорожной одежды из укрепленного грунта на опытных участках

№	Описание рабочих операций в порядке их технологической последовательности
Технологическая последовательность устройства конструкции дорожной одежды из укрепленного грунта на опытных участках №№ 1 – 5	
1	Предварительная планировка земляного полотна автогрейдером ЧСДМ ДЗ-98 и уплотнение катком SDLG RS8140 массой 14 т до коэффициента 0,85-0,90 за 8 проходов по одному следу
2	Размельчение грунта одним проходом горизонтального смесителя по одному следу. При ширине укрепляемого слоя 5500 мм горизонтальный смеситель обрабатывал 5 смежных полос с перекрытием 125 мм
3	Подвозка портландцемента и загрузка бункера распределителя BOMAG BS 12000 на базе трактора Т-150К
4	Распределение портландцемента распределителем BOMAG BS 12000 на базе трактора Т-150 на поверхность грунта
5	Подвозка волокон фибры и загрузка бункера распределителя BOMAG BS 12000 на базе трактора Т-150К
6	Распределение волокон фибры распределителем BOMAG BS 12000 на базе трактора Т-150К на поверхность грунта
7	Перемешивание волокон фибры и портландцемента с грунтом за один проход горизонтального смесителя по одному следу
8	Приготовление раствора полиДМДААХ и воды в соотношении 1:30
9	Розлив раствора полиДМДААХ на поверхность грунтовой смеси комбинированной машиной КО-806-21 до оптимальной влажности
10	Перемешивание раствора полиДМДААХ, волокон фибры и портландцемента с грунтом за один проход горизонтального смесителя по одному следу
11	Предварительная подкатка смеси укрепленного грунта катком SDLG RS8140 за 2 прохода по одному следу
12	Профилирование прикатанной смеси и обочин автогрейдером ЧСДМ ДЗ-98
13	Окончательное уплотнение профилированного слоя и обочин катком SDLG RS8140 до коэффициента 0,98 за 14 проходов по одному следу
14	Розлив на поверхность дорожной одежды и обочин битумной эмульсии ЭБДК С автогудронатором АС-65115 в количестве 0,5-0,8 л/м^2
Технологическая последовательность устройства конструкции дорожной одежды из укрепленного грунта на опытных участках №№ 6 – 10	
1	Предварительная планировка земляного полотна автогрейдером XCMG GR 165 и уплотнение катком XCMG XS183J массой 18 т до коэффициента 0,85-0,90 за 6 проходов по одному следу
2	Размельчение грунта одним проходом дорожной фрезы по одному следу. При ширине укрепляемого слоя 5500 мм дорожная фреза обрабатывала 3 смежных полосы с перекрытием 250 мм
3	Подвозка портландцемента и загрузка бункера распределителя BOMAG BS 12000 на базе трактора Т-150К

Продолжение таблицы 6.2

№	Описание рабочих операций в порядке их технологической последовательности
4	Распределение портландцемента распределителем BOMAG BS 12000 на базе трактора Т-150 на поверхность грунта
5	Подвозка волокон фибры и загрузка бункера распределителя BOMAG BS 12000 на базе трактора Т-150К
6	Распределение волокон фибры распределителем BOMAG BS 12000 на базе трактора Т-150К на поверхность грунта
7	Перемешивание волокон фибры и портландцемента с грунтом за один проход дорожной фрезы по одному следу
8	Приготовление раствора полиДМДААХ и воды в соотношении 1:30
9	Розлив раствора полиДМДААХ на поверхность грунтовой смеси комбинированной машиной КО-806-24 до оптимальной влажности
10	Перемешивание раствора полиДМДААХ, волокон фибры и портландцемента с грунтом за один проход дорожной фрезы по одному следу
11	Предварительная подкатка смеси укрепленного грунта катком XCMG XS183J за 2 прохода по одному следу
12	Профилирование прикатанной смеси и обочин автогрейдером XCMG GR 165
13	Окончательное уплотнение профилированного слоя и обочин катком XCMG XS183J до коэффициента 0,98 за 10 проходов по одному следу
14	Розлив на поверхность дорожной одежды и обочин битумной эмульсии ЭБДК С автогудронатором ДС-142Б в количестве 0,5-0,8 л/м^2

Примечание:

1. При строительстве опытных участков № 1 и № 6:
   - операции №№ 5 – 6 и № 8 не проводятся;
   - при выполнении операции № 9 вместо раствора полиДМДААХ производится розлив воды;
   - при выполнении операции № 10 производится перемешивание портландцемента с грунтом за один проход горизонтального смесителя по одному следу.
2. При строительстве опытных участков № 2, № 4, № 7, № 9:
   - операция № 8 не проводится;
   - при выполнении операции № 9 вместо раствора полиДМДААХ производится розлив воды;
   - при выполнении операции № 10 производится перемешивание волокон фибры и портландцемента с грунтом за один проход горизонтального смесителя по одному следу.

В ходе строительства опытных участков № 3, № 5, № 8 № 10 было отмечено, что фиброцементогрунтовая смесь с добавкой полиДМДААХ имеет более однородное, гомогенное и мелкодисперсное состояние по сравнению с опытными участками без полиэлектролита. Также в ходе строительства опытных участков было отмечено, что для достижения коэффициента уплотнения 0,98 от

максимальной плотности грунта потребовалось 18 проходов катка по одном следу на участках № 1, № 2, № 4 и 14 проходов на участках № 6, № 7, № 9, когда как для достижения аналогичной степени уплотнения потребовалось 14 проходов катка по одном следу на участках № 3, № 5 и 10 походов на участках № 8, № 10. Таким образом, добавка полиДМДААХ активно изменяет структуру укрепляемого грунта, позволяющую быстрее достигать заданного уплотнения при меньшем количестве проходов катка.

6.3 Исследования транспортно-эксплуатационных показателей конструкций лесовозных лесных дорог

6.3.1 Модуль упругости конструкций дорожных одежд

Прочностные и деформационные свойства конструкции дорожной одежды должны соответствовать интенсивности, составу и грузоподъемности движущегося грузового транспорта в течение заданного срока службы лесовозной лесной дороги, обеспечивая требуемые транспортно-эксплуатационные показатели. Процесс структурообразования фиброцементогрунтовых композиций происходит при взаимодействии грунтовой основы, цементного камня и волокон фибры, поэтому исследование динамики набора прочности по изменению модуля упругости конструкции дорожной одежды при непосредственном на нее воздействии транспорта и погодных условий является актуальным. Результаты исследований модуля упругости конструкций лесовозных лесных дорог в различные сроки набора прочности фиброцементогрунтовых композиций на опытных участках №№ 1-10 представлены в приложении 5.

На основании результатов исследований на опытных участках №№ 1-3 с увеличением времени набора прочности фиброцементогрунта установлен планомерный рост показателя модуля упругости. В нормативный срок набора прочности (28 суток) модуль упругости покрытия из фиброцементогрунта без добавки полиДМДААХ составил 133 МПа, что на 5 % выше расчетного значения,

а с добавкой полиДМДААХ составил 139 МПа, что на 6 % выше расчетного значения. При этом, через 365 суток набора прочности модуль упругости покрытия из фиброцементогрунта без добавки полиДМДААХ составил 140 МПа, что на 10 % выше расчетного значения, а с добавкой полиДМДААХ составил 147 МПа, что на 11 % выше расчетного значения (см. рис. П.5.1).

Модуль упругости на опытных участках №№ 1-3 с покрытием из фиброцементогрунта при содержании фибры на основе базальтового волокна из отходов производства теплоизоляционных плит в количестве 1,5 % от массы сухого грунта без добавки полиДМДААХ в пределах всего рассматриваемого периода набора прочности до 365 суток имеет большее значение – от 7,0 % до 12,0 % по сравнению с показателями модуля упругости цементогрунтового покрытия (см. рис. П.5.2). При этом, модуль упругости дорожной одежды с покрытием из фиброцементогрунта с добавкой полиДМДААХ в пределах всего рассматриваемого периода набора прочности до 365 суток имеет большее значение – от 4,9 % до 5,0 % по сравнению с показателями модуля упругости аналогичного фиброцементогрунтового покрытия без добавки полиДМДААХ (см рис. П.5.3).

На основании результатов исследований на опытных участках №№ 1, 4, 5 с увеличением времени набора прочности фиброцементогрунта установлен планомерный рост показателя модуля упругости. В нормативный срок набора прочности (28 суток) модуль упругости покрытия из фиброцементогрунта без добавки полиДМДААХ составил 147 МПа, что на 6 % выше расчетного значения, а с добавкой полиДМДААХ составил 156 МПа, что также на 6 % выше расчетного значения. При этом, через 365 суток набора прочности модуль упругости покрытия из фиброцементогрунта без добавки полиДМДААХ составил 152 МПа, что на 9 % выше расчетного значения, а с добавкой полиДМДААХ составил 165 МПа, что на 12 % выше расчетного значения (см. рис. П.5.4).

Модуль упругости на опытных участках №№ 1, 4, 5 с покрытием из фиброцементогрунта при содержании базальтовой фибры в количестве 2,0 % от массы сухого грунта без добавки полиДМДААХ в пределах всего

рассматриваемого периода набора прочности до 365 суток имеет большее значение – от 14,0 % до 21,6 % по сравнению с показателями модуля упругости цементогрунтового покрытия (см. рис. П.5.5). При этом, модуль упругости дорожной одежды с покрытием из фиброцементогрунта с добавкой полиДМДААХ в пределах всего рассматриваемого периода набора прочности до 365 суток имеет большее значение – от 8,6 % до 9,2 % по сравнению с показателями модуля упругости аналогичного фиброцементогрунтового покрытия без добавки полиДМДААХ (см рис. П.5.6).

На основании результатов исследований на опытных участках №№ 6-8 с увеличением времени набора прочности фиброцементогрунта установлен планомерный рост показателя модуля упругости. В нормативный срок набора прочности (28 суток) модуль упругости покрытия из фиброцементогрунта без добавки полиДМДААХ составил 145 МПа, что на 4 % выше расчетного значения, а с добавкой полиДМДААХ составил 153 МПа, что также на 5 % выше расчетного значения. При этом, через 112 суток набора прочности модуль упругости покрытия из фиброцементогрунта без добавки полиДМДААХ составил 149 МПа, что на 7 % выше расчетного значения, а с добавкой полиДМДААХ составил 161 МПа, что на 10 % выше расчетного значения (см. рис. П.5.7).

Модуль упругости на опытных участках №№ 6-8 с покрытием из фиброцементогрунта при содержании стеклянной фибры в количестве 2,0 % от массы сухого грунта без добавки полиДМДААХ в пределах всего рассматриваемого периода набора прочности до 112 суток имеет большее значение – от 11,9 % до 13,9 % по сравнению с показателями модуля упругости цементогрунтового покрытия (см. рис. П.5.8). При этом, модуль упругости дорожной одежды с покрытием из фиброцементогрунта с добавкой полиДМДААХ в пределах всего рассматриваемого периода набора прочности до 112 суток имеет большее значение – от 5,5 % до 8,1 % по сравнению с показателями модуля упругости аналогичного фиброцементогрунтового покрытия без добавки полиДМДААХ (см. рис. П.5.9).

На основании результатов исследований на опытных участках №№ 6, 9, 10 с увеличением времени набора прочности фиброцементогрунта установлен планомерный рост показателя модуля упругости. В нормативный срок набора прочности (28 суток) модуль упругости покрытия из фиброцементогрунта без добавки полиДМДААХ составил 157 МПа, что на 5 % выше расчетного значения, а с добавкой полиДМДААХ составил 160 МПа, что также на 4 % выше расчетного значения. При этом, через 112 суток набора прочности модуль упругости покрытия из фиброцементогрунта без добавки полиДМДААХ составил 160 МПа, что на 7 % выше расчетного значения, а с добавкой полиДМДААХ составил 166 МПа, что также на 7 % выше расчетного значения (см. рис. П.5.10).

Модуль упругости на опытных участках №№ 6, 9, 10 с покрытием из фиброцементогрунта при содержании полипропиленовой фибры в количестве 1,5 % от массы сухого грунта без добавки полиДМДААХ в пределах всего рассматриваемого периода набора прочности до 112 суток имеет большее значение – от 20,6 % до 22,9 % по сравнению с показателями модуля упругости цементогрунтового покрытия (см. рис. П.5.11). При этом, модуль упругости дорожной одежды с покрытием из фиброцементогрунта с добавкой полиДМДААХ в пределах всего рассматриваемого периода набора прочности до 112 суток имеет большее значение – от 1,9 % до 4,4 % по сравнению с показателями модуля упругости аналогичного фиброцементогрунтового покрытия без добавки полиДМДААХ (см. рис. П.5.12).

6.3.2 Продольная ровность дорожных покрытий

Показатель продольной ровности дорожного покрытия является одной из важных транспортно-эксплуатационных характеристик, которая непосредственно влияет на безопасность, скорость движения, ресурс безотказной работы, а также стоимость перевозки лесоматериалов и сроки амортизации лесотранспортных машин. Оценка продольной ровности дорожных покрытий на опытных участках лесовозных лесных дорог проводилась по международной системе IRI с помощью

комплекса измерительной передвижной дорожной лаборатории ТРАССА 123000089000 (зав. № 737). Результаты фактических измерений продольной ровности покрытий лесовозных лесных дорог на опытных участках №№ 1-5 представлены в табл. 6.3 и на рис. 6.2, на опытных участках №№ 6-10 представлены в табл. 6.4 и на рис. 6.3.

Таблица 6.3 – Результаты фактических измерений продольной ровности дорожных покрытий на опытных участках №№ 1-5

№ участка	Показатели продольной ровности IRI, мм/км				
	Дата испытаний				Нормативное значение по ГОСТ Р 50597-2017
	Август 2023	Сентябрь 2023	Октябрь 2023	Август 2024	
1	4,9	5,0	5,0	5,7	не более 7,5
2	4,9	5,0	5,0	5,3	
3	4,9	4,9	5,0	5,2	
4	4,9	4,9	5,0	5,1	
5	4,9	4,9	4,9	5,1	

Таблица 6.4 – Результаты фактических измерений продольной ровности дорожных покрытий на опытных участках №№ 6-10

№ участка	Показатели продольной ровности IRI, мм/км					
	Дата испытаний					Нормативное значение по ГОСТ Р 50597-2017
	Июнь 2024	Июль 2024	Август 2024	Сентябрь 2024	Октябрь 2024	
6	5,1	5,2	5,3	5,4	5,6	не более 7,5
7	5,1	5,2	5,2	5,3	5,4	
8	5,1	5,1	5,2	5,3	5,3	
9	5,1	5,1	5,1	5,2	5,2	
10	5,1	5,1	5,1	5,1	5,2	

На основании результатов исследований на всех опытных участках лесовозных лесных дорог №№ 1-10 международный показатель продольной ровности покрытия дорожной одежды IRI соответствует нормативным требованиям ГОСТ Р 50597-2017 – не более 7,5 мм/км. Однако динамика изменений данного показателя с течением времени на каждом из опытных участков различна и зависит от состава укрепленного грунта в конструкции дорожной одежды.

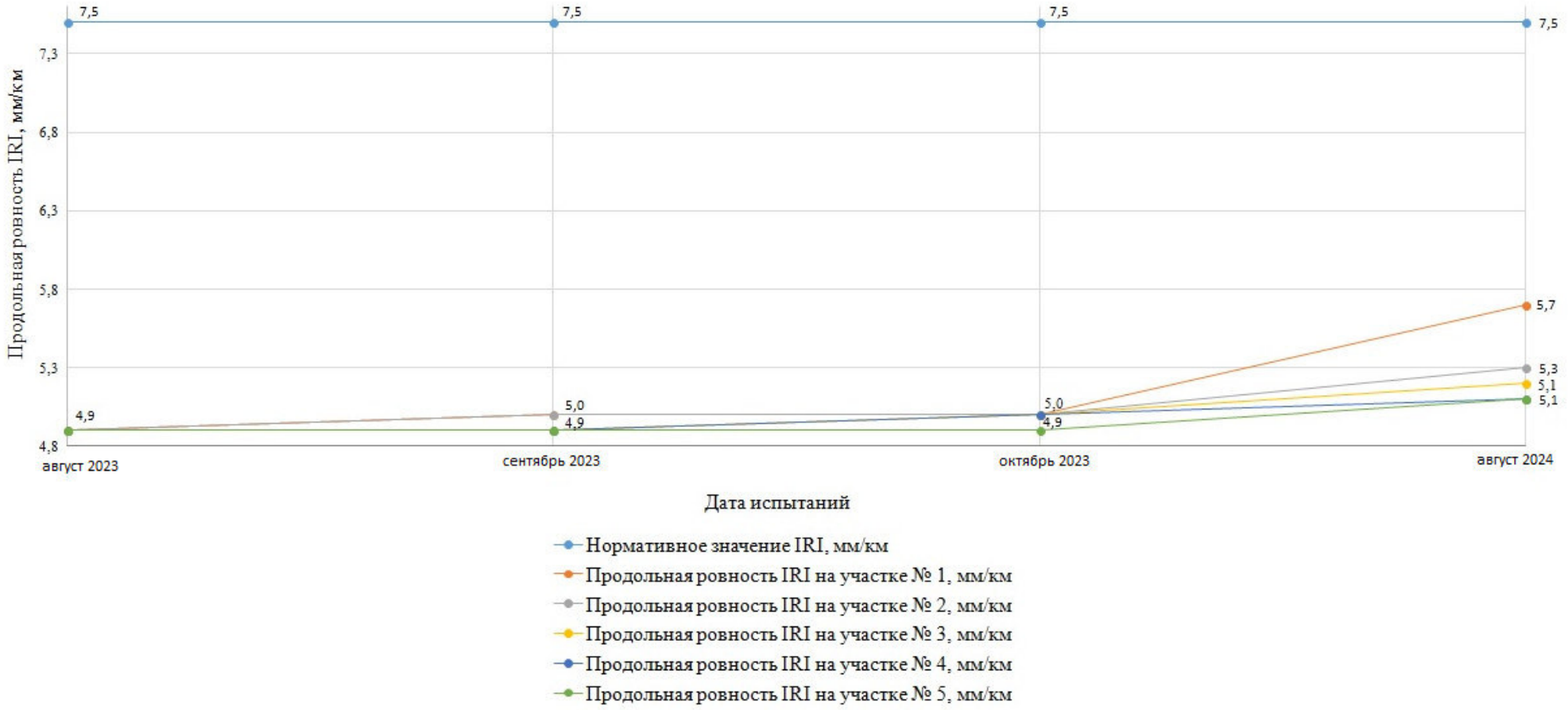


Рисунок 6.2 – Показатели продольной ровности покрытия дорожной одежды на опытных участках №№ 1-5

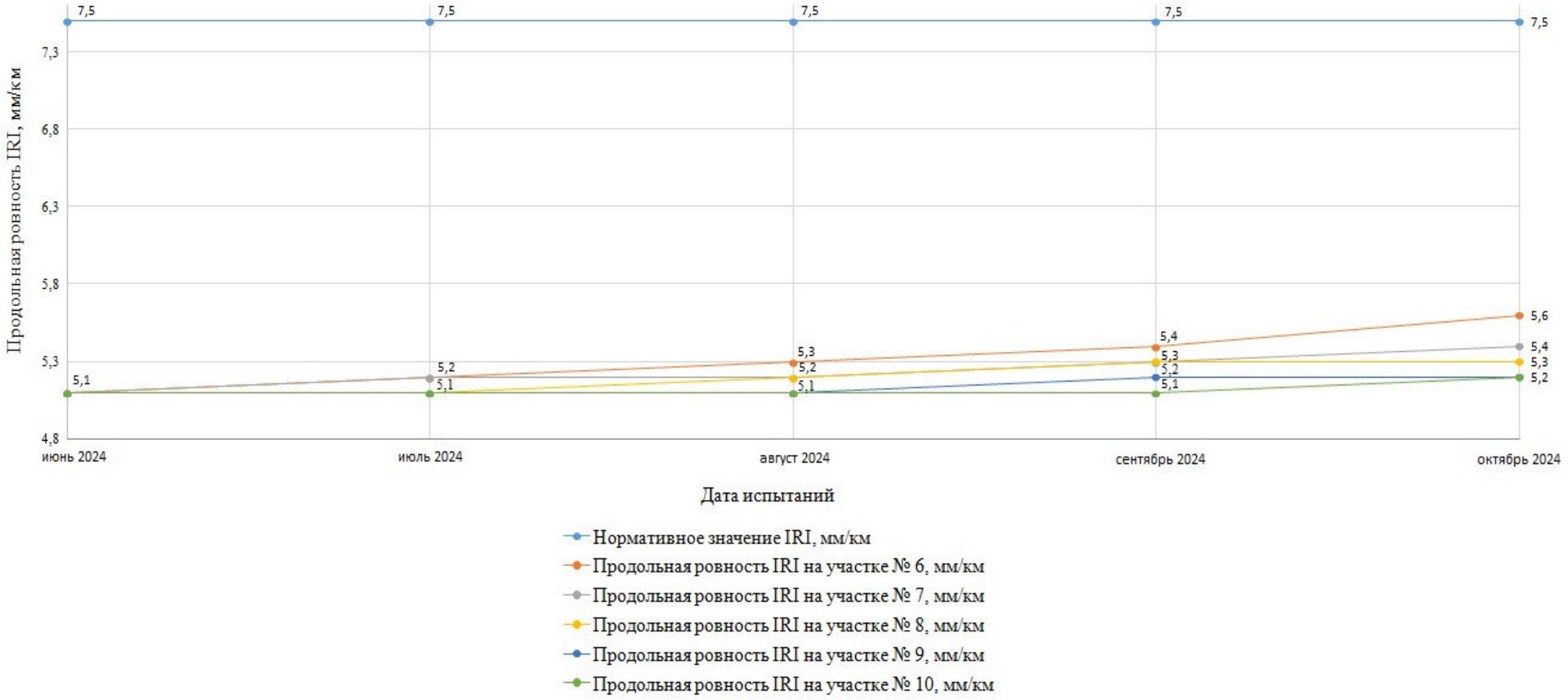


Рисунок 6.3 – Показатели продольной ровности покрытия дорожной одежды на опытных участках №№ 6-10

За 1 год эксплуатации лесовозной лесной дороги на опытном участке № 1 с покрытием из цементогрунта показатель IRI увеличился на 16,3 %; на опытном участке № 2 с покрытием из фиброцементогрунта с добавкой фибры на основе базальтового волокна из отходов производства теплоизоляционных плит показатель IRI увеличился на 8,2 %, при этом на участке № 3 с покрытием из фиброцементогрунта в добавками фибры на основе базальтового волокна из отходов производства теплоизоляционных плит и полиДМДААХ показатель IRI увеличился на 6,12 %. На участках № 4 и № 5 с покрытием из фиброцементогрунта на основе базальтовой фибры показатель IRI увеличился на 4,08 %.

За 4 месяца эксплуатации лесовозной лесной дороги на опытном участке № 6 с покрытием из цементогрунта показатель IRI увеличился на 9,8 %; на опытном участке № 7 с покрытием из фиброцементогрунта с добавкой фибры на основе стеклянного волокна показатель IRI увеличился на 5,9 %, при этом на участке № 8 с покрытием из фиброцементогрунта с добавками фибры на основе стеклянного волокна и полиДМДААХ показатель IRI увеличился на 3,9 %. На участках № 9 и № 10 с покрытием из фиброцементогрунта на основе полипропиленовой фибры показатель IRI увеличился на 1,96 %.

6.3.3 Поперечная ровность дорожных покрытий

Проявление остаточных деформаций на дорожном покрытии в виде колейности в значительной степени ухудшает транспортно-эксплуатационные показатели лесовозных лесных дорог. С целью определения динамики образования колейности на дорожных покрытиях опытных участков лесовозных лесных дорог были проведены соответствующие полевые исследования.

Поперечная ровность (колейность) дорожных покрытий на опытных участках измерялась с помощью дорожной трехметровой рейки РДУ-Кондор с клиновым промерником. Результаты фактических измерений колейности на

опытных участках №№ 1-5 представлены в табл. 6.5 и на рис. 6.4, на опытных участках №№ 6-10 представлены в табл. 6.6 и на рис. 6.5.

Таблица 6.5 – Результаты фактических измерений поперечной ровности (колейности) покрытия дорожной одежды на опытных участках №№ 1-5

№ участка	Средняя глубина колеи, мм				
	Дата испытаний				Нормативное значение по ГОСТ Р 50597-2017
	Август 2023	Сентябрь 2023	Октябрь 2023	Август 2024	
1	0	0	3	23	не более 50
2	0	0	2	18	
3	0	0	1	17	
4	0	0	1	15	
5	0	0	1	14	

Таблица 6.6 – Результаты фактических измерений поперечной ровности (колейности) покрытия дорожной одежды на опытных участках №№ 6-10

№ участка	Средняя глубина колеи, мм					
	Дата испытаний					Нормативное значение по ГОСТ Р 50597-2017
	Июнь 2024	Июль 2024	Август 2024	Сентябрь 2024	Октябрь 2024	
6	0	0	2	3	5	не более 50
7	0	0	1	2	4	
8	0	0	1	2	3	
9	0	0	1	1	2	
10	0	0	0	1	2	

На основании результатов исследований на всех опытных участках лесовозных лесных дорог №№ 1-10 допустимые значения колеи на покрытии дорожной одежды соответствует нормативным требованиям ГОСТ Р 50597-2017 – не более 50 мм. Однако динамика изменений данного показателя с течением времени на каждом из опытных участков различна и зависит от состава укрепленного грунта в конструкции дорожной одежды.

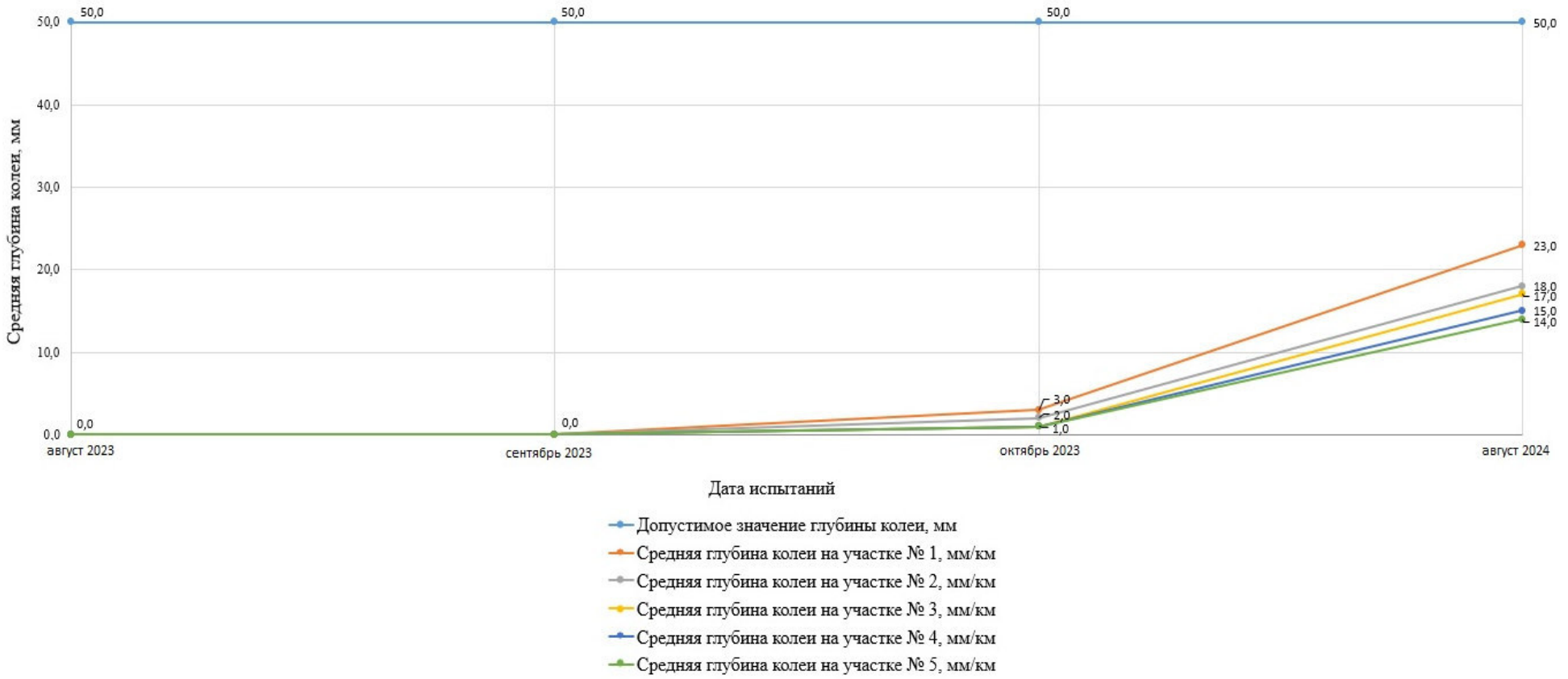


Рисунок 6.4 – Показатели поперечной ровности (колейности) покрытия дорожной одежды на опытных участках №№ 1-5

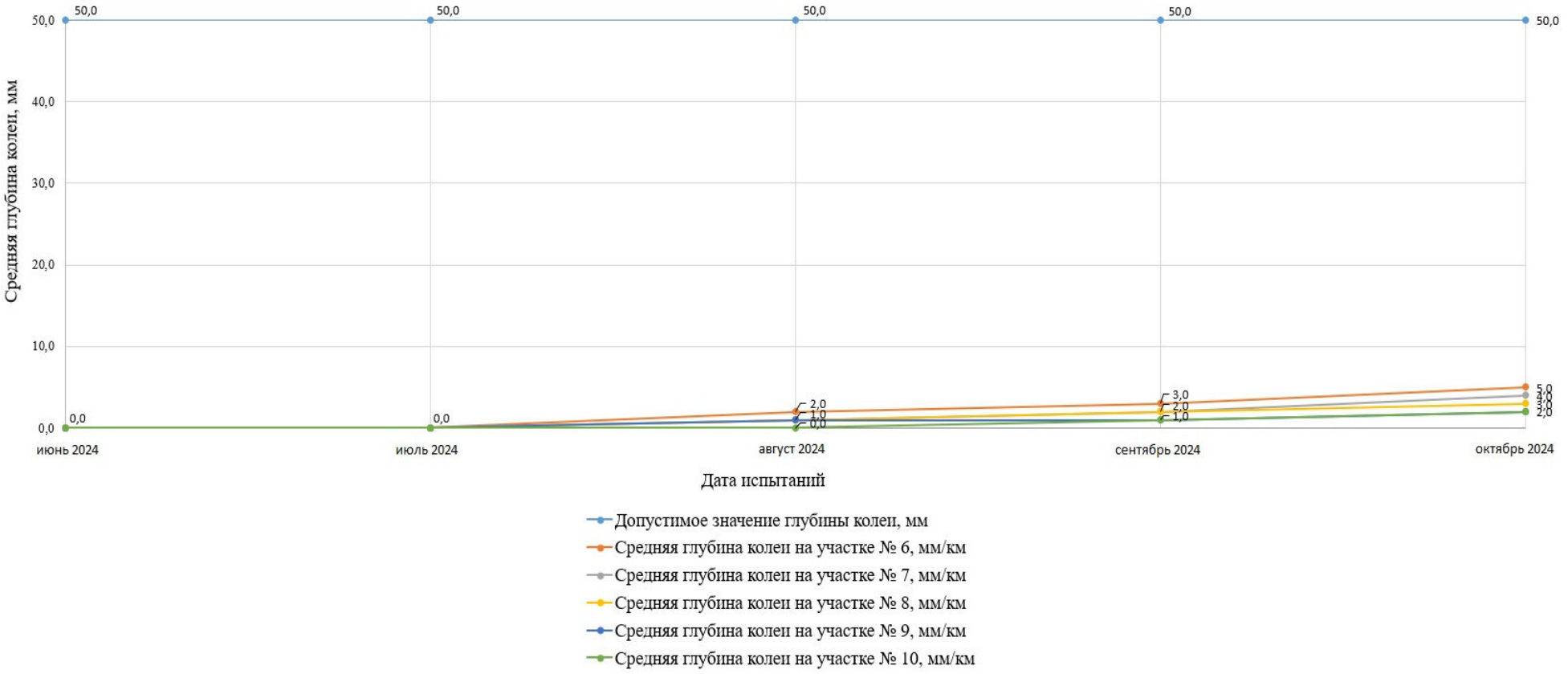


Рисунок 6.5 – Показатели поперечной ровности (колейности) покрытия дорожной одежды на опытных участках №№ 6-10

За 1 год эксплуатации лесовозной лесной дороги на опытном участке № 1 с покрытием из цементогрунта показатель поперечной ровности (колейности) составил 23,0 мм. В сравнении с опытным участком № 1, на опытном участке № 2 с покрытием из фиброцементогрунта с добавкой фибры на основе базальтового волокна из отходов производства теплоизоляционных плит показатель поперечной ровности ниже на 21,7 %; на опытном участке № 3 с покрытием из фиброцементогрунта с добавками фибры на основе базальтового волокна из отходов производства теплоизоляционных плит и полиДМДААХ показатель поперечной ровности ниже на 26,1 %; на опытном участке № 4 с покрытием из фиброцементогрунта на основе базальтовой фибры показатель поперечной ровности ниже на 34,78 %; на опытном участке № 5 с покрытием из фиброцементогрунта с добавками базальтовой фибры и полиДМДААХ показатель поперечной ровности ниже на 39,13 %.

За 4 месяца эксплуатации лесовозной лесной дороги на опытном участке № 6 с покрытием из цементогрунта показатель поперечной ровности (колейности) составил – 5,0 мм. В сравнении с опытным участком № 6, на опытном участке № 7 с покрытием из фиброцементогрунта с добавкой фибры на основе стеклянного волокна показатель поперечной ровности ниже на 20,0 %, на опытном участке № 8 с покрытием из фиброцементогрунта с добавками фибры на основе стеклянного волокна и полиДМДААХ показатель поперечной ровности ниже на 40,0 %, на опытных участках № 9 и № 10 с покрытием из фиброцементогрунта на основе полипропиленового волокна показатель поперечной ровности ниже на 60,0 %.

6.3.4 Регистрация дефектов на дорожных покрытиях

Регистрация и исследование динамики образования видимых дефектов на дорожных покрытиях является важным способом, косвенно характеризующим прочностные и деформационные показатели, а также срок службы конструкций лесовозных лесных дорог на основе фиброцементогрунтовых композиций.

Регистрация дефектов осуществлялась в соответствии с методикой ОДМ 218.4.039 балльным способом. Результаты исследования дефектов на опытных участках №№ 1-5 представлены в табл. 6.7 и на рис. 6.6, на опытных участках №№ 6-10 представлены в табл. 6.8 и на рис. 6.7.

Таблица 6.7 – Результаты исследования дефектов на покрытии дорожной одежды на опытных участках №№ 1-5

Дата испытаний	Вид дефекта	Протяженность микроучастка с одинаковым состоянием дорожной одежды, м	Баллы	Средневзвешенный балл
Опытный участок № 1				
Август 2023	Без дефектов	25	5,0	5,0
Сентябрь 2023	Без дефектов	25	5,0	5,0
Октябрь 2023	Поперечные одиночные трещины на расстоянии 20-40 м	25	4,9	4,9
Август 2024	Поперечные одиночные трещины на расстоянии 10-20 м	25	4,6	4,6
Опытный участок № 2				
Август 2023	Без дефектов	25	5,0	5,0
Сентябрь 2023	Без дефектов	25	5,0	5,0
Октябрь 2023	Без дефектов	25	5,0	5,0
Август 2024	Поперечные одиночные трещины на расстоянии 20-40 м	25	4,9	4,9
Опытные участки № 3, 4, 5				
Август 2023	Без дефектов	25	5,0	5,0
Сентябрь 2023	Без дефектов	25	5,0	5,0
Октябрь 2023	Без дефектов	25	5,0	5,0
Август 2024	Без дефектов	25	5,0	5,0

Таблица 6.8 – Результаты исследования дефектов на покрытии дорожной одежды на опытных участках №№ 6-10

Дата испытаний	Вид дефекта	Протяженность микроучастка с одинаковым состоянием дорожной одежды, м	Баллы	Средневзвешенный балл
Опытный участок № 6				
Июнь 2024	Без дефектов	25	5,0	5,0
Июль 2024	Без дефектов	25	5,0	5,0
Август 2024	Поперечные одиночные трещины на расстоянии 20-40 м	25	4,9	4,9
Сентябрь 2024	Поперечные одиночные трещины на расстоянии 20-40 м	25	4,9	4,9
Октябрь 2024	Поперечные одиночные трещины на расстоянии 20-40 м	25	4,9	4,9
Опытные участки № 7, 8, 9, 10				
Июнь 2024	Без дефектов	25	5,0	5,0
Июль 2024	Без дефектов	25	5,0	5,0
Август 2024	Без дефектов	25	5,0	5,0
Сентябрь 2024	Без дефектов	25	5,0	5,0
Октябрь 2024	Без дефектов	25	5,0	5,0

На основании полученных результатов установлено, что средневзвешенные баллы при исследовании дефектов на опытных участках лесовозных лесных дорог №№ 1-10 имеют различные показатели и зависят от состава укрепленного грунта в конструкции дорожной одежды.

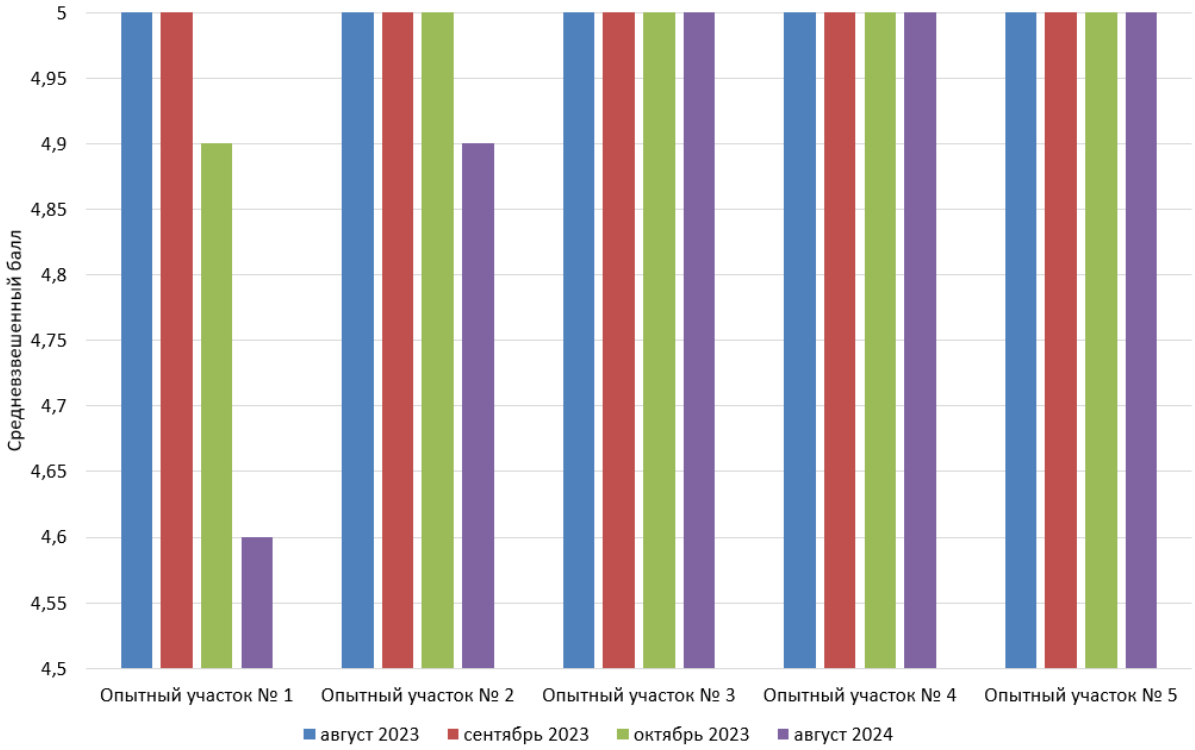


Рисунок 6.6 – Показатели изменения средневзвешенных баллов при исследовании дефектов на покрытии дорожной одежды на опытных участках №№ 1-5

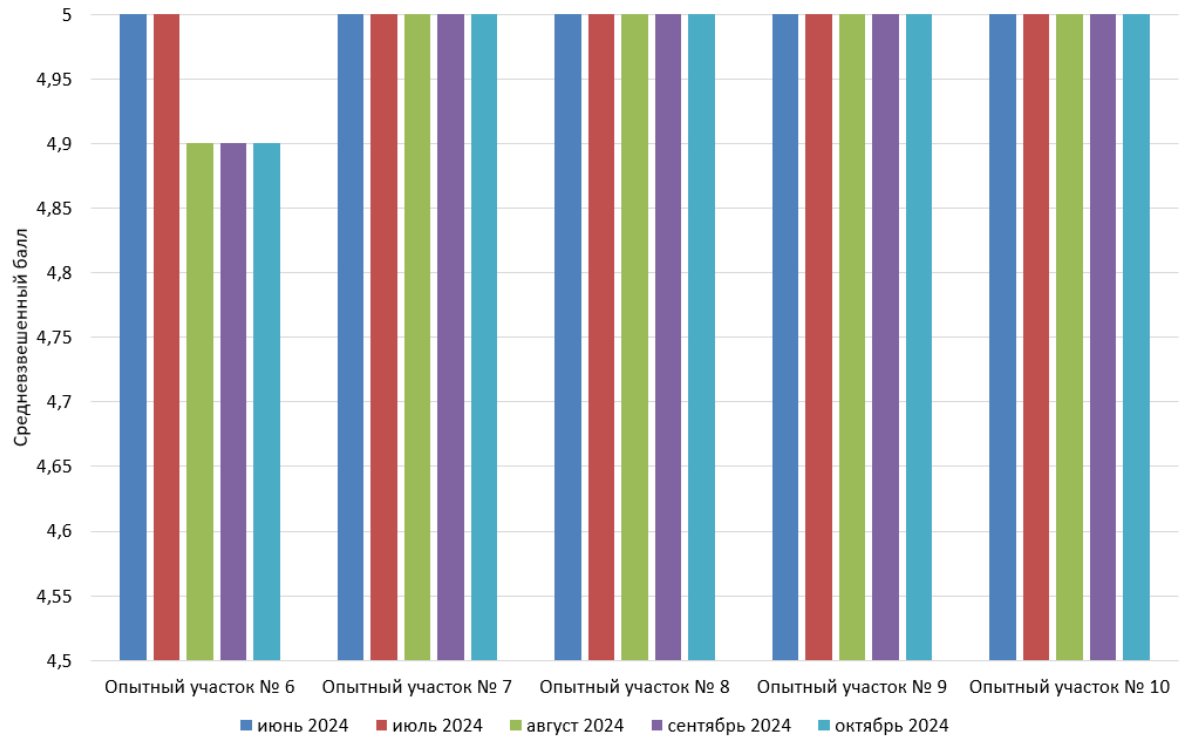


Рисунок 6.7 – Показатели изменения средневзвешенных баллов при исследовании дефектов на покрытии дорожной одежды на опытных участках №№ 6-10

На опытном участке № 1 с покрытием дорожной одежды из цементогрунта снижение средневзвешенного балла до 4,9 наблюдается уже через 2 месяца эксплуатации лесовозной лесной дороги за счет образования поперечных одиночных трещин. При этом через 1 год эксплуатации данного участка средневзвешенный балл снижается до 4,6 также за счет образования поперечных одиночных трещин. На опытном участке № 2 с покрытием дорожной одежды из фиброцементогрунта с добавкой фибры на основе базальтового волокна из отходов производства теплоизоляционных плит средневзвешенный балл снижается до 4,9 через 1 год эксплуатации за счет образования поперечных одиночных трещин. На всех остальных опытных участках №№ 3 – 5 в периоды проведения исследований видимых дефектов на фиброцементогрунтовом покрытии зарегистрировано не было и средневзвешенный балл имеет максимальное значение – 5,0.

На опытном участке № 6 с покрытием дорожной одежды из цементогрунта снижение средневзвешенного балла до 4,9 наблюдается уже через 2 месяца эксплуатации лесовозной лесной дороги за счет образования поперечных одиночных трещин и сохраняется на данном уровне на протяжении всех последующих исследований дефектов. На всех остальных опытных участках №№ 7 – 10 в периоды проведения исследований видимых дефектов на фиброцементогрунтовом покрытии зарегистрировано не было и средневзвешенный балл имеет максимальное значение – 5,0.

6.4 Выводы по шестой главе

1. Строительство опытных участков лесовозных лесных дорог №№ 1 – 10 на территории ГКУ СО «Карпинское лесничество» и ГКУ СО «Ирбитское лесничество» и проведенные полевые исследования транспортно-эксплуатационных показателей доказали техническую и технологическую возможность, а также высокую эффективность устройства конструкций дорожных одежд на основе фиброцементогрунтовых композиций.

2. Разработаны и апробированы рациональные технологические процессы по устройству конструкций дорожных одежд на основе фиброцементогрунтовых композиций с различным компонентным составом. Строительство опытных участков доказало, что для устройства конструкций лесовозных лесных дорог на основе фиброцементогрунтовых композиций возможно эффективно использовать малогабаритную навесную технику на базе мини-погрузчиков, а также дорожные фрезы в качестве самоходных горизонтальных грунтовых смесительных машин.

3. Опытно-производственные испытания подтвердили результаты теоретических и лабораторных исследований свойств фиброцементогрунтовых композиции с различными видами фибры: базальтовой, стеклянной, полипропиленовой, волокон из отходов производства базальтовых теплоизоляционных плит и добавкой полиДМДААХ, обеспечивающие высокие транспортно-эксплуатационные качества покрытий дорожных одежд в реальных условиях эксплуатации лесовозных лесных дорог.

4. Результаты натурных исследований установили, что конструкции лесовозных лесных дорог на основе фиброцементогрунтовых композиций позволяют обеспечить высокие показатели модуля упругости. В сравнении с цементогрунтом, за время набора прочности 365 суток, введение фибры на основе базальтового волокна из отходов производства теплоизоляционных плит позволяет увеличить модуль упругости фиброцементогрунта до 12,0 %; введение базальтовой фибры – до 21,6 %. В сравнении с цементогрунтом, за время набора прочности 112 суток, введение стеклянной фибры позволяет увеличить модуль упругости фиброцементогрунта до 13,9 %; введение полипропиленовой фибры – до 22,9 %. При этом, за время набора прочности 365 суток, введение добавки полиДМДААХ позволяет увеличить модуль упругости фиброцементогрунта на основе базальтового волокна из отходов производства теплоизоляционных плит до 5 % и увеличить модуль упругости фиброцементогрунта на основе базальтового волокна до 9,2 %. За время набора прочности 112 суток, введение добавки полиДМДААХ позволяет увеличить модуль упругости фиброцементогрунта на основе стеклянного волокна до 8,1 % и увеличить модуль

упругости фиброцементогрунта на основе полипропиленового волокна до 4,4 %. На всех опытных участках дорожной одежды из фиброцементогрунтовых композиций после нормативного периода набора прочности (28 суток) показатели модуля упругости превышают расчетные значения от 4 % до 6 % и планомерно увеличиваются в диапазоне от 7 % до 12 % в течение всего периода исследований.

5. Результаты исследований подтверждают высокие прочностные и деформационные показатели конструкций лесовозных лесных дорог на основе фиброцементогрунтовых композиций, обеспечивающие замедление более чем на 66 % динамики проявления продольных деформаций и от 20 % до 60 % динамики проявления поперечных деформаций (колейности) в сравнении с цементогрунтовым покрытием.

6. По результатам исследований установлено, что цементогрунтовые покрытия дорожных одежд лесовозных лесных дорог имеют низкую трещиностойкость, проявляющуюся образованием поперечных одиночных трещин. Конструкции лесовозных лесных дорог на основе фиброцементогрунтовых композиций обеспечивают замедление проявления трещин и других видимых дефектов в сравнении с цементогрунтовым покрытием и демонстрируют высокие транспортно-эксплуатационные качества.

ГЛАВА 7
ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕСОВОЗНЫХ ЛЕСНЫХ ДОРОГ НА ОСНОВЕ ФИБРОЦЕМЕНТОГРУНТОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ

Лесовозные лесные дороги составляют основу транспортной инфраструктуры, обеспечивая эффективность функционирования и развития предприятий лесопромышленного комплекса. Поэтому к лесовозным лесным дорогам должны предъявляться высокие требования к надежности и транспортно-эксплуатационным показателям в течение заданного срока их службы. Указанные требования возможно достичь путем обоснованного конструирования, расчета и выбора дорожно-строительных материалов для устройства конструктивных слоев дорожных одежд, соответствующих местным природно-климатическим, геологическим и гидрометеорологическим условиям лесной зоны, воздействующим нагрузкам от лесотранспорта, заданного срока службы и с учетом минимальной сметной стоимости строительно-монтажных работ. Данные задачи эффективно решаются с использованием новых теоретических подходов, основанных на достижениях математики и информационных технологий.

Наиболее распространёнными и традиционно используемыми строительными материалами для устройства конструкций лесовозных лесных дорог являются инертные каменные материалы: щебень, гравий, щебеночно-песчаные смеси и гравийно-песчаные смеси. Данные дорожно-строительные материалы технологичны в производстве и имеют высокие физико-механические показатели, однако стоимость их применения в значительной степени зависит от транспортных затрат на доставку от места производства до объекта строительства. На территории большинства лесосырьевых баз России существует недостаток мест производства каменных материалов, поэтому их применение для строительства лесовозных лесных дорог ограничивают высокие транспортные затраты.

В данных условиях эффективным для устройства дорожных одежд лесовозных лесных дорог с высокими качественными показателями, долговечностью и минимальной стоимостью является применение фиброцементогрунта. Технико-экономический эффект от применения фиброцементогрунта в конструкциях лесовозных лесных дорог достигается за счет минимизации единовременной стоимости применяемых дорожно-строительных материалов и транспортных затрат, поскольку в качестве основного компонента используется местный грунт при незначительном содержании добавок портландцемента и фиброволокна.

Учитывая конъюнктуру рынка поставщиков инертных материалов и компонентов фиброцементогрунтовых смесей, на стадии принятия экономически-эффективных проектных решений, сравнение альтернативных вариантов конструкций лесовозной автомобильной дороги должно основываться не только на результатах прочностных расчетов, но и на сметной стоимости работ. В связи с изложенным, для возможности оперативного и высокоточного анализа технико-экономической эффективности строительства лесовозных лесных дорог из фиброцементогрунта в сравнении с применением каменных материалов разработана тепловая карта на примере территории Свердловской области. В основе математического аппарата заложены модели интеллектуальных систем в виде нейро-нечетких сетей для расчета сметной стоимости строительства лесовозных лесных дорог в зависимости от дальности транспортировки материалов дорожных одежд от 30 км до 500 км со средней абсолютной ошибкой MAPE менее 0,15 %.

7.1 Разработка и анализ интеллектуальных систем для расчета стоимости строительства лесовозных лесных дорог

С целью создания интеллектуальных систем расчета стоимости строительства лесовозных лесных дорог с конструкциями дорожной одежды из фиброцементогрунта и каменных материалов, разработаны нейро-нечеткие сети

ANFIS [145, 146, 184, 267]. В качестве объекта исследований для расчета объемов работ принята лесовозная лесная дорога Iл категории в условиях Свердловской области протяженностью 1 км.

В результате расчета по методике ГОСТ Р 71404-2024 в программном комплексе «КРЕДО РАДОН 4.2» (Кредо-Диалог СП ООО, г. Минск) приняты две равнопрочные конструкции дорожной одежды:

1. Конструкция дорожной одежды из фиброцементогрунта марки М60 А по ГОСТ 70452-2022, толщиной 63 см.

2. Конструкция дорожной одежды из каменных материалов: верхний слой – щебень трудноуплотняемый фракции 31,5-63 мм по ГОСТ 32703-2014 с заклинкой фракционным мелким щебнем, толщиной 56 см; нижний слой – песок средней крупности с содержанием пылевато-глинистой фракции 5 % по ГОСТ 32824-2014, толщиной 20 см.

Состав фиброцементогрунта марки М60 А с коэффициентом морозостойкости 0,91 при 15 циклах замораживания – оттаивания для II дорожно-климатической зоны подобран в лабораторных условиях на основе естественного грунта – суглинка тяжелого песчанистого, отобранного из земляного полотна лесовозной лесной дороги на территории ГКУ СО «Карпинское лесничество» в Свердловской области при соблюдении единых требований проведения экспериментальных исследований и характеристик исходных материалов (см. главу 3), с содержанием компонентов: портландцемент – 7 % от массы сухого грунта; фибра на основе базальтовых волокон из отходов производства теплоизоляционных плит – 1,5 % от массы сухого грунта.

На основании полученных характеристик конструкций дорожной одежды из фиброцементогрунта и из каменных материалов произведены расчеты объемов и сметной стоимости работ на строительство лесовозной лесной дороги Iл категории, протяженностью 1 км. Расчет сметной стоимости произведен базисно-индексным методом с применением федеральной сметно-нормативной базы ФСНБ-2001 в редакции 2020 года (с Изм. 1-9) в программе ГРАНД-Смета (МГК «ГРАНД» ООО, г. Пермь) в соответствии с Методикой определения сметной

стоимости строительства [89] в зависимости от различных вариантов транспортно-логистической схемы доставки материалов. Для условий Свердловской области приняты следующие параметры доставки материалов от места их производства до объекта строительства лесовозной лесной дороги:

– портландцемент и щебень: 30 км; 50 км; 100 км; 150 км; 200 км; 250 км; 300 км; 350 км; 400 км; 450 км; 500 км;

– базальтовое фиброволокно и песок: 30 км; 100 км; 200 км; 300 км; 400 км; 500 км.

В расчет приняты следующие стоимости дорожно-строительных материалов в текущем уровне цен: портландцемент 10000 руб. за 1 тонну; базальтовое фиброволокно (фибра на основе базальтовых волокон, полученных из отходов производства теплоизоляционных плит) 3000 руб. за 1 тонну; щебень 2079 руб./ м^3; песок 1210 руб./ м^3.

В качестве входных параметров для построения нейро-нечетких сетей выбраны следующие: расстояние доставки портландцемента (P), км; расстояние доставки фиброволокна (F), км; расстояние доставки щебня (M), км и расстояние доставки песка (S), км. В качестве выходных переменных в нейронных сетях принята стоимость строительства лесовозной лесной дороги с учетом доставки материалов (C).

С учетом изложенного, формально постановка задач определения сметной стоимости строительства лесовозных лесных дорог примет вид (7.1, 7.2):

$$C = f(P, F) \tag{7.1}$$

$$C = f(S, M) \tag{7.2}$$

В приложении 6 (табл. П.6.1, П.6.4) приведены результаты расчетов в виде обучающих выборок для создания нейронных сетей по определению сметной стоимости строительства лесовозной лесной дороги с конструкциями из фиброцементогрунта и каменных материалов.

Для определения адекватности определена точность настройки нейронных сетей. Результаты расчетов абсолютной ошибки настройки нейронных сетей с использованием процедуры RuleViewer представлены в приложении 6 (табл.

П.6.2, П.6.5). Средние абсолютные ошибки настройки нейронных сетей по определению сметной стоимости строительства лесовозной лесной дороги составили: с конструкцией из фиброцементогрунта MAPE = 0,015 %, с конструкцией из каменных материалов MAPE = 0,146 %, что свидетельствует о корректной настройке интеллектуальных систем на этапе генерации.

Достоверность работы нейронных сетей проверялась на дополнительных тестовых выборках, которые не вошли в обучающие, по величине точности работы. Проверка проводилась аналогично в процедуре RuleViewer. Расчет абсолютной ошибки работы нейронной сети по определению сметной стоимости строительства лесовозной лесной дороги с конструкцией из фиброцементогрунта для тестовых выборок (приложение 6, табл. П.6.3) показал точность работы 99,856 % (средняя абсолютная ошибка работы нейронной сети MAPE = 0,144%), что свидетельствует о ее корректной настройке на итоговом этапе проверки адекватности. Расчет абсолютной ошибки работы нейронной сети по определению сметной стоимости строительства лесовозной лесной дороги с конструкцией из каменных материалов для тестовых выборок (приложение 6, табл. П.6.6) показал точность работы 99,915 % (средняя абсолютная ошибка работы нейронной сети MAPE = 0,085 %), что свидетельствует о ее корректной настройке на итоговом этапе проверки адекватности.

На основании анализа полученных с помощью интеллектуальных систем данных, можно сделать вывод, что расстояние доставки компонентов фиброцементогрунтовой смеси оказывает существенное влияние на общую стоимость строительства лесовозных лесных дорог (рис. 7.1). В связи с тем, что количество портландцемента в составе фиброцементогрунтовой смеси выше, чем базальтового волокна, то показатели среднего расстояния доставки минерального вяжущего в большей степени оказывают влияние на увеличение общей стоимости, чем фибры (рис. 7.2).

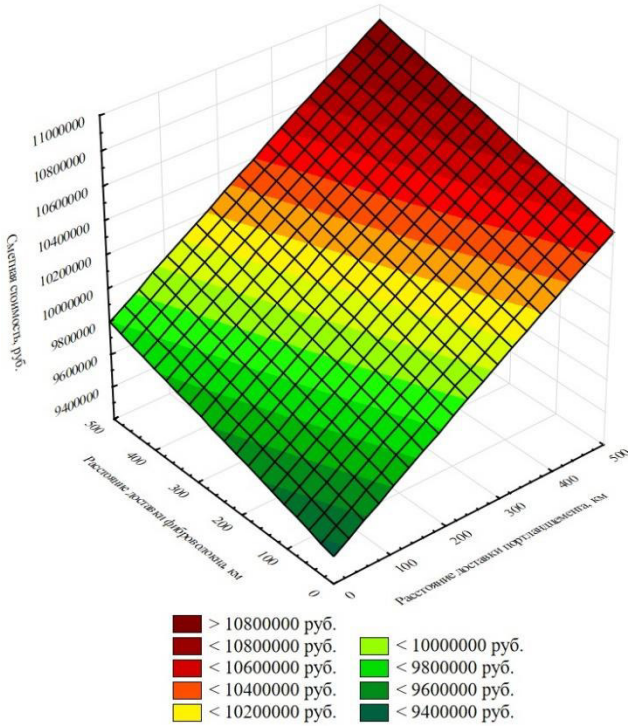


Рисунок 7.1 – Поверхность отклика стоимости строительства 1 км лесовозной лесной дороги из фиброцементогрунта от расстояния доставки портландцемента и фиброволокна

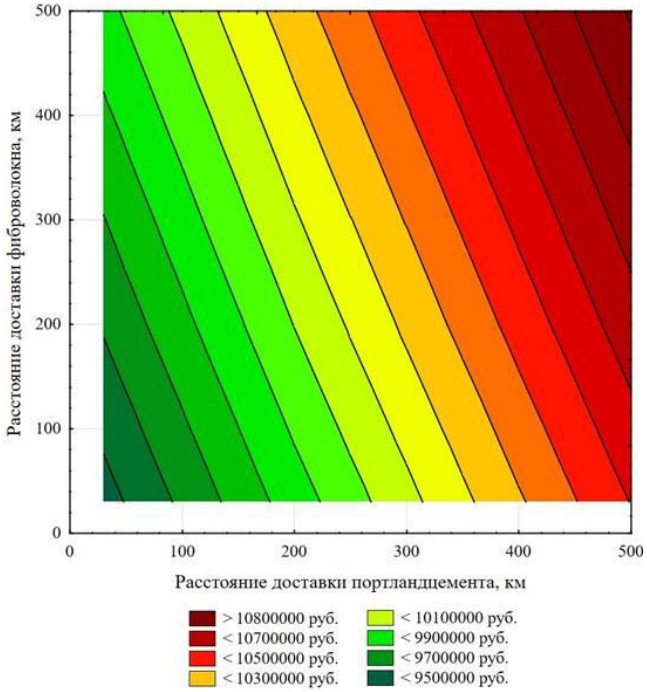


Рисунок 7.2 – Изохронограмма стоимости строительства 1 км лесовозной лесной дороги из фиброцементогрунта от расстояния доставки портландцемента и фиброволокна

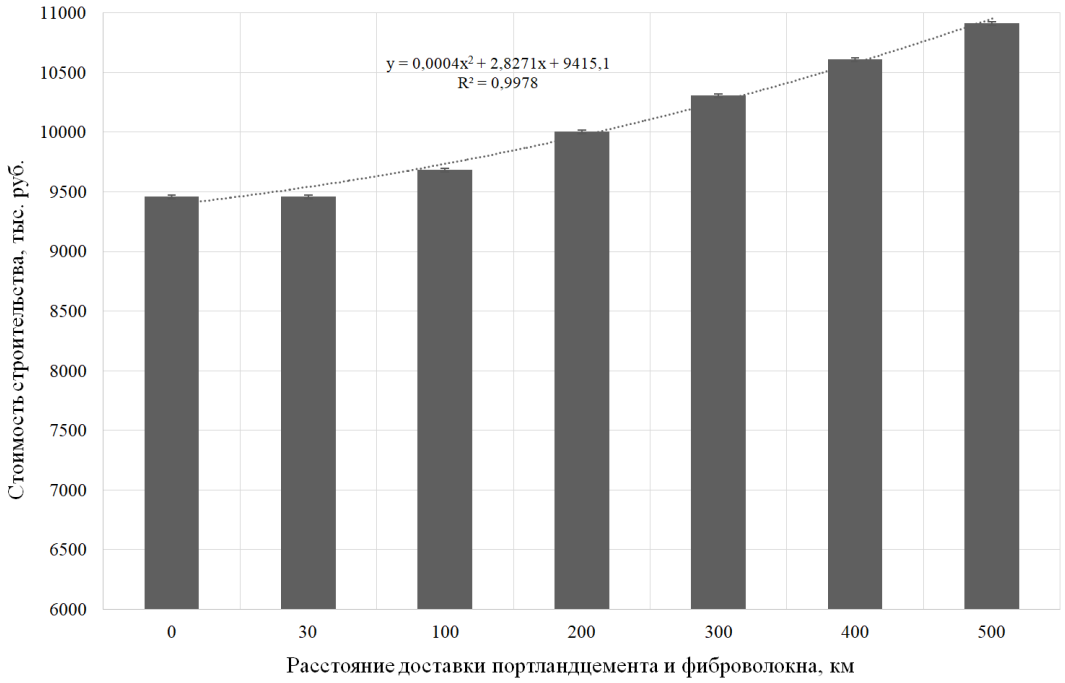


Рисунок 7.3 – Гистограмма зависимости стоимости строительства 1 км лесовозной лесной дороги из фиброцементогрунта от расстояния доставки портландцемента и фиброволокна

Минимальная стоимость строительства 1 км лесовозной лесной дороги Iл категории из фиброцементогрунта составляет 9458,7 тыс. руб. при дальности доставки портландцемента и базальтового фиброволокна 30 км. При увеличении расстояния доставки портландцемента и базальтового фиброволокна до 500 км, стоимость строительства также увеличится на 15 % и составит 10911,3 тыс. руб. (см. рис. 7.3).

На основании анализа полученных с помощью интеллектуальных систем данных, можно сделать вывод, что расстояние доставки каменных материалов оказывает существенное влияние на общую стоимость строительства лесовозных лесных дорог (рис. 7.4). В связи с тем, что в рассматриваемой конструкции дорожной одежды количество щебня выше, чем песка, то показатели среднего расстояния доставки щебня в большей степени оказывают влияние на увеличение общей стоимости, чем песка (рис. 7.5).

Минимальная стоимость строительства 1 км лесовозной лесной дороги Iл категории из инертных каменных материалов составляет 9539,0 тыс. руб. при дальности доставки щебня и песка 30 км. При увеличении расстояния доставки щебня и песка до 500 км, стоимость строительства также увеличится более чем в 3,33 раза и составит 31811,5 тыс. руб. (рис. 7.6).

Разработанные интеллектуальные системы в среде Matlab позволяют достаточно точно решать задачи определения стоимости строительства 1 км лесовозной лесной дороги Iл категории из фиброцементогрунта и инертных каменных материалов в условиях Свердловской области и автоматизировать этот трудоемкий процесс. Программная реализация нейро-нечетких сетей и их достаточная адекватность позволяют рекомендовать результаты для использования при технико-экономическом обосновании вариантов конструкций дорожных одежд и снижении стоимости строительства лесовозных лесных дорог из фиброцементогрунта и инертных каменных материалов в зависимости от транспортно-логистической схемы доставки дорожно-строительных материалов в диапазоне расстояний от 30 км до 500 км.

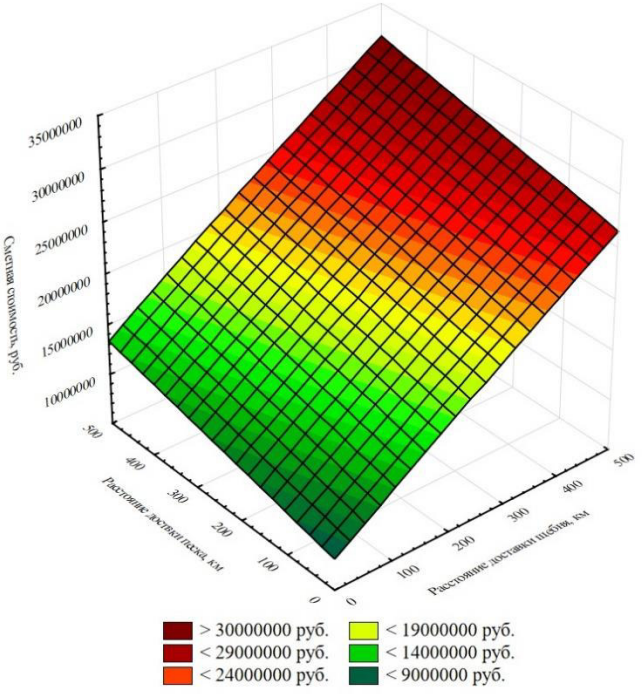


Рисунок 7.4 – Поверхность отклика сметной стоимости строительства 1 км лесовозной лесной дороги от расстояния доставки щебня и песка

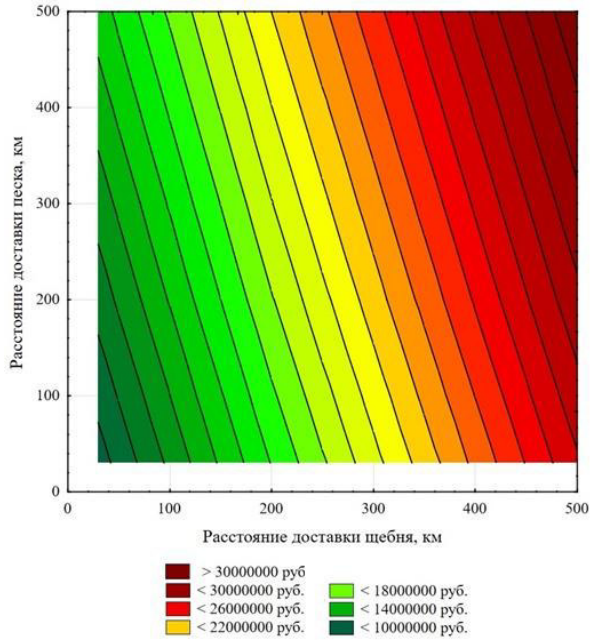


Рисунок 7.5 – Изохронограмма сметной стоимости строительства 1 км лесовозной лесной дороги от расстояния доставки щебня и песка

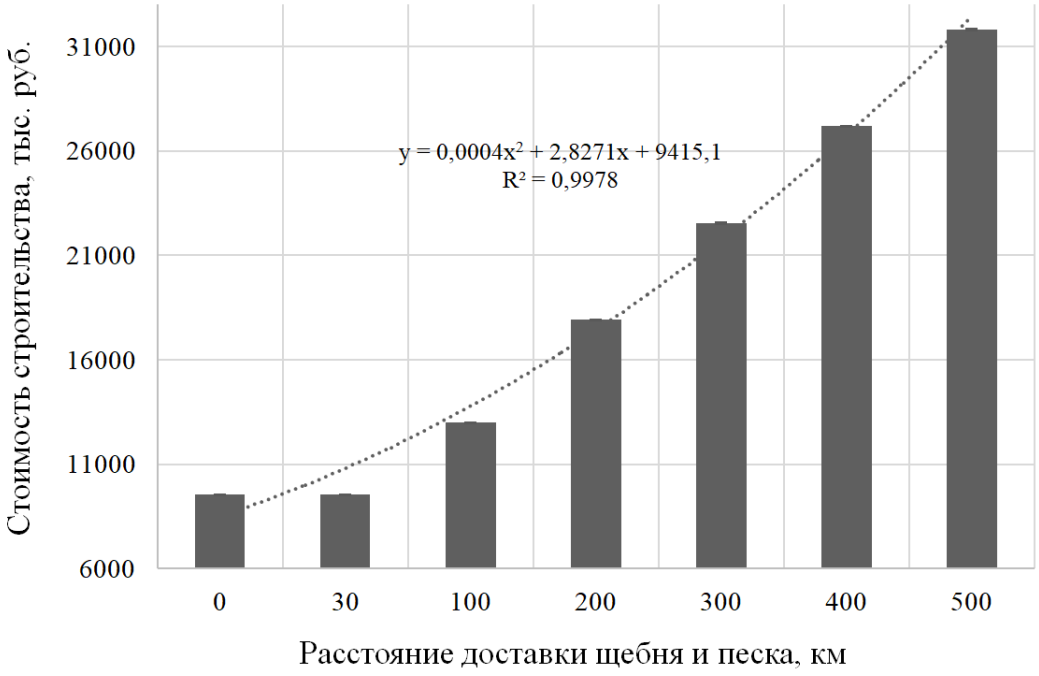


Рисунок 7.6 – Гистограмма зависимости стоимости строительства 1 км лесовозной лесной дороги от расстояния доставки щебня и песка

7.2 Оценка технико-экономической эффективности строительства лесовозных лесных дорог на основе фиброцементогрунтовых композиций на примере Свердловской области

Для оперативного и высокоточного анализа технико-экономической эффективности строительства лесовозных лесных дорог на основе фиброцементогрунтовых композиций рационально использовать изохронограмму по типу тепловой карты [189, 191]. Поэтому целью исследования являлась разработка тепловой карты технико-экономической эффективности строительства лесовозных лесных дорог с конструкцией дорожной одежды из фиброцементогрунта в сравнении с конструкцией из каменных материалов на территории Свердловской области.

Разработка тепловой карты технико-экономической эффективности проводилась в следующей последовательности.

1. Создание интеллектуальных систем в виде нейро-нечетких сетей по определению стоимости строительства 1 км лесовозной лесной дороги с альтернативными равнопрочными конструкциями дорожной одежды и различной дальностью доставки материалов. Разработка тепловой карты технико-экономической эффективности проводилась на основе интеллектуальных систем в виде нейро-нечетких сетей в среде Matlab по определению стоимости строительства 1 км лесовозной лесной дороги Iл категории в условиях Свердловской области с конструкциями дорожной одежды из фиброцементогрунта и из щебня и песка, в зависимости от различной дальности доставки материалов от 30 км до 500 км. Последовательность разработки интеллектуальных систем изложена в разделе 7.1.

2. Проведение конъюнктурного анализа поставщиков дорожно-строительных материалов. Конъюнктурный анализ поставщиков песка, щебня, портландцемента и базальтовых теплоизоляционных плит, побочным продуктом при производстве которых является фибра на основе базальтовых волокон, был

проведен на территории Свердловской области с получением данных о местонахождении, номенклатуре и стоимости выпускаемых материалов.

3. Разработка картографической основы рассматриваемой территории с нанесением поставщиков дорожно-строительных материалов. Разработка в программном комплексе AutoCAD (Autodesk, Inc., USA) картографической основы территории Свердловской области с нанесением производителей портландцемента, щебня, песка и базальтового волокна представлена в приложении 7 (табл. П.7.1 – П.7.5).

4. Равномерное распределение на картографической основе рассматриваемой территории матрицы точек тяготения грузопотоков совместно с дислокацией производителей и поставщиков дорожно-строительных материалов. Распределение на картографической основе Свердловской области матрицы из 300 точек тяготения грузопотоков со средним расстоянием друг от друга 19,5 км осуществлялось с помощью картографической поисково-информационной системы «Яндекс Карты» (Яндекс, ООО, Россия). Результаты разработки матрицы тяготения грузопотоков на территории Свердловской области совместно с дислокацией производителей и поставщиков песка, инертных каменных материалов, портландцемента и базальтовых теплоизоляционных плит представлены в приложении 7 (табл. П.7.6 – П.7.10).

5. Расчет для каждой точки матрицы тяготения грузопотоков минимального расстояния доставки от ближайших производителей дорожно-строительных материалов. Расчет транспортной схемы доставки портландцемента, щебня, песка и базальтового волокна осуществлялся с учетом существующей сети автомобильных дорог общего пользования и лесовозных лесных дорог с использованием картографической поисково-информационной системы «Яндекс Карты».

6. С помощью разработанных интеллектуальных систем в виде нейро-нечетких сетей для каждой точки матрицы тяготения грузопотоков расчет сметной стоимости строительства 1 км лесовозной лесной дороги с альтернативными конструкциями дорожной одежды. Для территории

Свердловской области в зависимости от параметров транспортной схемы доставки материалов, произведен расчет сметной стоимости строительства 1 км лесовозной лесной дороги Iл категории с различными конструкциями дорожной одежды: из фиброцементогрунта и из щебня и песка.

7. С учетом стоимостных данных для каждой точки матрицы тяготения грузопотоков расчет технико-экономической эффективности строительства лесовозных лесных дорог из фиброцементогрунта по формуле 7.3.

$$Э = \frac{З_{до1} - З_{до2}}{З_{до1}} \times 100\% \quad (7.3)$$

где: $Э$ – экономический эффект от строительства лесовозной лесной дороги из фиброцементогрунта, %;

$З_{до1}$ – стоимость строительства лесовозной лесной дороги из каменных материалов, тыс. руб./1 км.

$З_{до2}$ – стоимость строительства лесовозной лесной дороги из фиброцементогрунта, тыс. руб./1 км.

Результаты расчета минимальных расстояний доставки дорожно-строительных материалов, стоимости и экономической эффективности строительства лесовозных лесных дорог из фиброцементогрунта в каждой точке матрицы тяготения грузопотоков на территории Свердловской области представлены в приложении 14.

8. Интерполяция показателей экономической эффективности строительства лесовозных лесных дорог из фиброцементогрунта в точках матрицы тяготения грузопотоков на территории Свердловской области, вычерчивание в программном комплексе AutoCAD границ и выделение цветовых областей тепловой карты технико-экономической эффективности в диапазонах: менее 0%; от 0% до 10%; от 10% до 20%; от 20% до 30%; от 30% до 40%; от 40% до 50%; от 50% до 60%; от 60% до 66% (рис. 7.7).

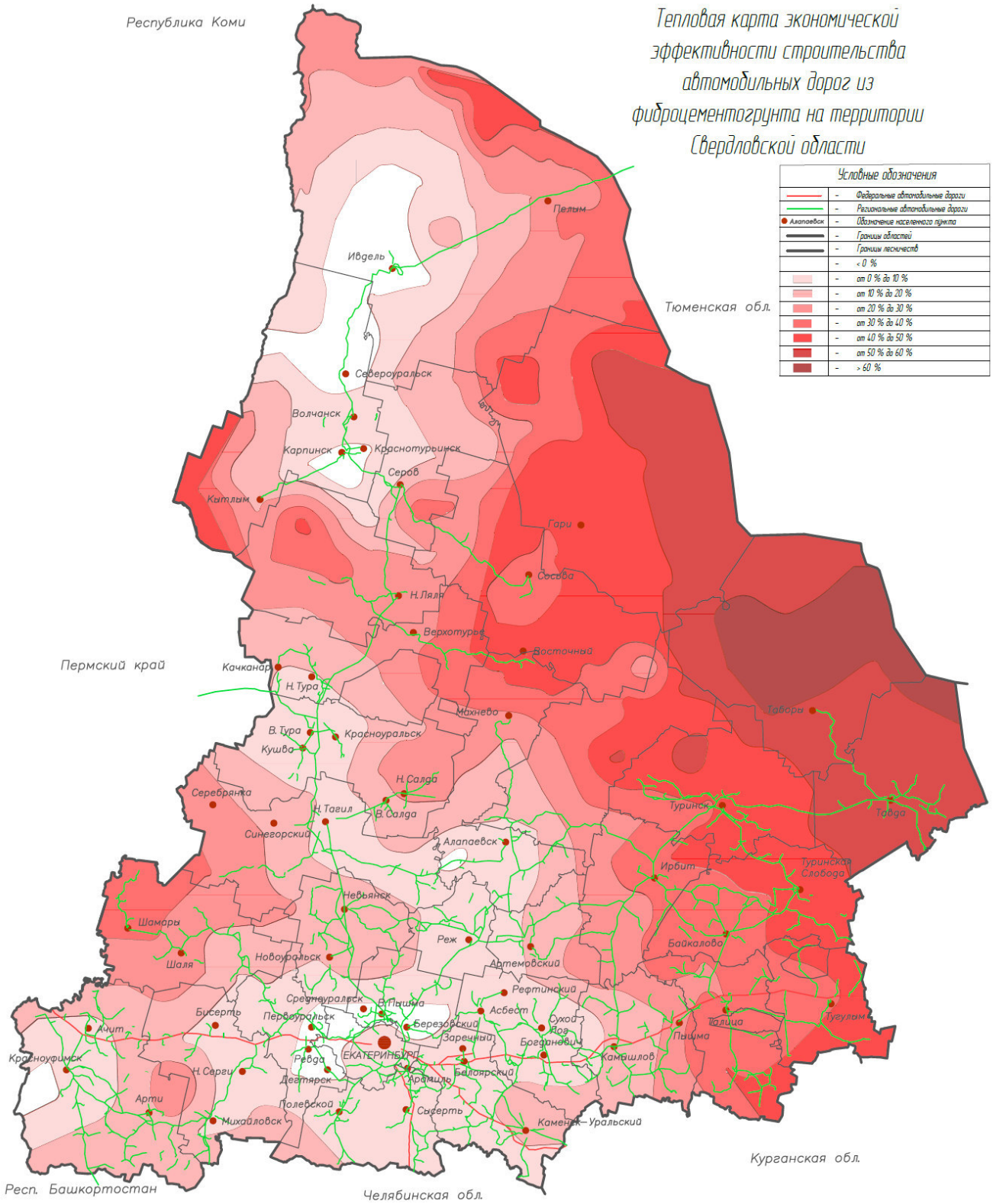


Рисунок 7.7 – Тепловая карта технико-экономической эффективности строительства лесовозных лесных дорог из фиброцементогрунта на территории Свердловской области

На основании результатов конъюнктурных исследований и анализа транспортных схем доставки установлено, что производители дорожно-строительных материалов: щебня, песка, портландцемента и базальтовой фибры, расположены не равномерно по территории Свердловской области. Средние расстояния доставки материалов до объектов строительства лесовозных лесных дорог по Свердловской области составляют: щебень – 137,56 км; песок – 161,20 км; портландцемент – 313,49 км; базальтовая фибра – 249,01 км.

Анализ полученных результатов (рис. 7.8) позволил установить, что для условий Свердловской области максимальное значение технико-экономической эффективности строительства лесовозных лесных дорог из фиброцементогрунта составляет 66 % и достигается при дальности доставки дорожно-строительных материалов 500 км. При этом увеличение расстояния доставки щебня и портландцемента в большей степени оказывает влияние на увеличение экономического эффекта, чем расстояние по доставке песка и фиброволокна в связи с меньшим содержанием данных компонентов в конструкции дорожной одежды и составе фиброцементогрунтовых композиций (рис. 7.9).

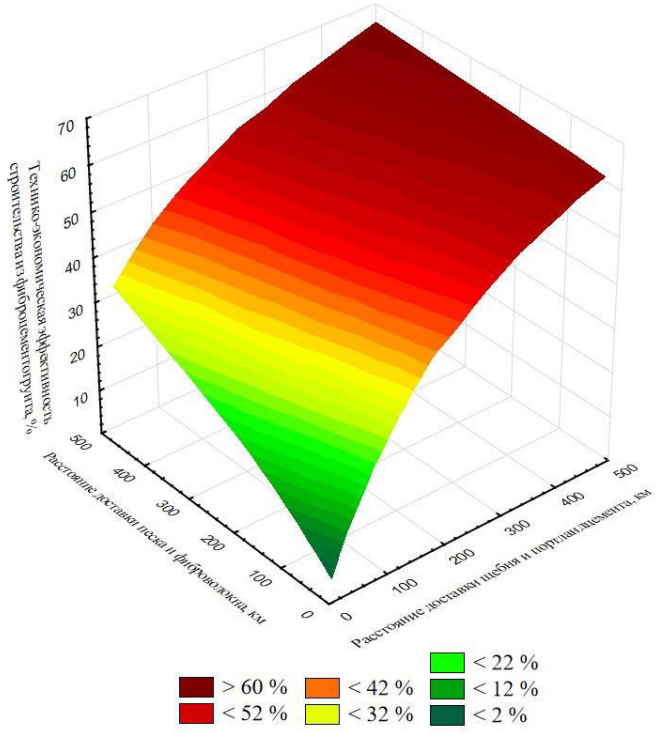


Рисунок 7.8 – Поверхность отклика технико-экономической эффективности строительства лесовозных лесных дорог из фиброцементогрунта от расстояния доставки дорожно-строительных материалов

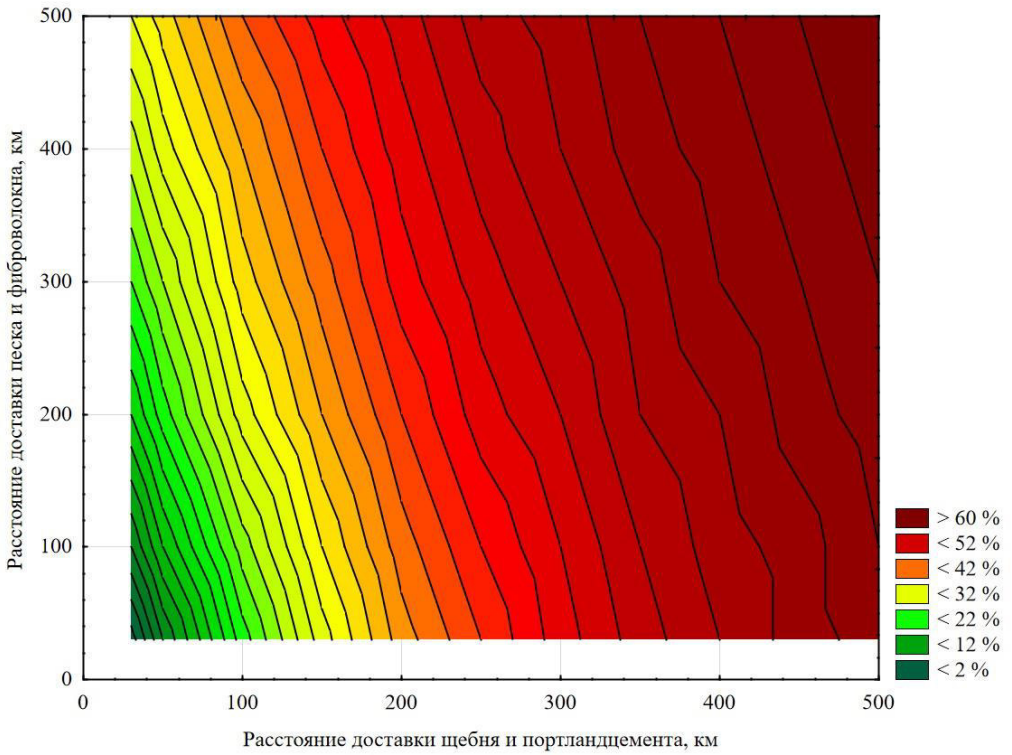


Рисунок 7.9 – Изохронограмма технико-экономической эффективности строительства лесовозных лесных дорог из фиброцементогрунта от расстояния доставки дорожно-строительных материалов

Средняя стоимость строительства лесовозной лесной дороги Iл категории на территории Свердловской области составляет: из инертных каменных материалов – 15073,65 тыс. руб./1 км; из фиброцементогрунта – 10291,41 тыс. руб./1 км. Таким образом, экономический эффект при строительстве лесовозных лесных дорог из фиброцементогрунта на территории Свердловской области в среднем составляет 31,7 %, в сравнении с использованием в дорожной одежде инертных каменных материалов. Однако, основываясь на результатах разработки тепловой карты (см. рис. 7.7), при различных транспортно-логистических схемах доставки дорожно-строительных материалов показатели технико-экономической эффективности строительства лесовозных лесных дорог из фиброцементогрунта распределены по территории лесосырьевых баз Свердловской области не равномерно и изменяются от 32 % до 66 % по сравнению с традиционной технологией строительства с использованием инертных каменных материалов.

7.3 Выводы по седьмой главе

1. Разработана интеллектуальная система на основе нейро-нечеткой сети, позволяющая производить расчет стоимости строительства 1 км лесовозной лесной дороги Iл категории из фиброцементогрунта в зависимости от дальности доставки основных компонентов: портландцемента и фиброволокна в диапазоне расстояний от 30 км до 500 км со средней абсолютной ошибкой MAPE = 0,144 %.

2. Разработана интеллектуальная система на основе нейро-нечеткой сети, позволяющая производить расчет стоимости строительства 1 км лесовозной лесной дороги Iл категории из инертных каменных материалов в зависимости от дальности доставки основных компонентов: щебня и песка в диапазоне расстояний от 30 км до 500 км со средней абсолютной ошибкой MAPE = 0,085 %.

3. Программная реализация нейро-нечетких сетей и их достаточная адекватность позволяют рекомендовать результаты для использования при технико-экономическом обосновании вариантов конструкций дорожных одежд и снижении стоимости строительства лесовозных автомобильных дорог из фиброцементогрунта в зависимости от транспортно-логистической схемы доставки дорожно-строительных материалов.

4. Установлено, что транспортные затраты при устройстве дорожных одежд из инертных каменных материалов значительно превышают аналогичные затраты при устройстве дорожных одежд из фиброцементогрунта и приводят к большему увеличению общей сметной стоимости строительно-монтажных работ лесовозных лесных дорог при возрастании расстояния доставки данных дорожно-строительных материалов.

5. Разработана комплексная методика технико-экономического обоснования технологии транспортного освоения лесосырьевых баз с использованием интеллектуальных систем на базе нейро-нечетких сетей, позволяющих производить оперативный и высокоточный анализ единовременных затрат на устройство конструкций лесовозных лесных дорог в зависимости от транспортно-логистической схемы доставки материалов.

6. Разработана тепловая карта технико-экономической эффективности строительства лесовозных лесных дорог из фиброцементогрунта на территории Свердловской области с использованием интеллектуальных систем для расчета сметной стоимости в зависимости от транспортно-логистической схемы доставки материалов в диапазоне расстояний от 30 км до 500 км со средней абсолютной ошибкой MAPE менее 0,15 %.

7. Установлено, что технико-экономическая эффективность устройства конструкций лесовозных лесных дорог из фиброцементогрунтовых композиций на территории лесосырьевых баз Свердловской области составляет от 32 % до 66 % по сравнению с традиционной технологией строительства с использованием инертных каменных материалов, позволяя существенно снизить финансовые затраты на создание и развитие транспортной инфраструктуры лесной отрасли. Для устройства фиброцементогрунтовых слоев дорожных одежд требуются сравнительно меньшие объемы портландцемента и фиброволокна, чем щебня и песка, что с учетом отдаленности лесозаготовительных районов от мест производства инертных каменных материалов и сети автомобильных дорог общего пользования, делает технологию строительства лесовозных лесных дорог на основе фиброцементогрунтовых композиций более экономически эффективной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана математическая модель структуры фиброцементогрунта, учитывающая напряженно-деформационные характеристики волокон в плоскости сдвига, которые влияют на физико-механические свойства материала. Установлена высокая эффективность от применения низкомодульных волокон, ориентированных к плоскости сдвига на 60° при увеличении показателей содержания фибры и отношения длины волокна к его диаметру.

2. Создана концепция механизма структурообразования фиброцементогрунта с добавкой полиэлектролита полиДМДААХ, обосновывающая увеличение поверхностного трения на границе раздела фаз «волокно-цементогрунтовая матрица» при оптимальных условиях возникновения прочных кристаллизационных контактов срастания, образования дополнительного цементирующего вяжущего и устойчивых высокоосновных гидросиликатов кальция.

3. Выявлены закономерности и разработаны экспериментально-статистические модели прочностных показателей и морозостойкости фиброцементогрунтовых композиций в конструкциях лесовозных лесных дорог в зависимости от содержания компонентов, различного вида и геометрических характеристик волокон. Установлены оптимальные значения соотношения длины фибры к ее диаметру L / D = 1000 – 1800 при содержании базальтовой и стеклянной фибры 2,0 – 2,5 % от массы сухого грунта, полипропиленовой фибры 1,5 % – 2,0 % от массы сухого грунта и фибры на основе отходов производства базальтовых теплоизоляционных плит 1,5 % от массы сухого грунта, обеспечивающие максимальные показатели прочности на сжатие, прочности на растяжение при изгибе и коэффициента морозостойкости фиброцементогрунтовых композиций в конструкциях лесовозных лесных дорог.

4. Выявлены закономерности и разработаны экспериментально-статистические модели структурных прочностных характеристик фиброцементогрунтовых композиций оптимального состава, обосновывающие увеличение удельного сцепления на 43 % и угла внутреннего трения на 8 % по сравнению с не армированным цементогрунтом, имеющим аналогичное содержание минерального вяжущего. Установлено, что дисперсное армирование эффективно при содержании портландцемента более 2 % от массы сухого грунта, при этом с ростом содержания минерального вяжущего в составе фиброцементогрунтовых композиций действенность фиброволокна повышается.

5. Выявлены закономерности и разработаны конечно-элементные модели деформационных характеристик конструкций лесовозных лесных дорог из фиброцементогрунта на основании из глинистых грунтов различной консистенции. Установлено, что фиброцементогрунт в сравнении с цементогрунтом позволяет уменьшить вертикальные деформации от 7,2 % до 12,0 % и горизонтальные деформации от 9,2 % до 12,7 % в зависимости от консистенции глинистых грунтов в основании дорожной одежды, что обосновывает повышение транспортно-эксплуатационных качеств конструкций лесовозных лесных дорог.

6. Выявлены закономерности кинетики структурообразования конструкций лесовозных лесных дорог из фиброцементогрунта. Установлено, что в период с 7 суток до 56 суток твердения происходит более интенсивный рост прочности фиброцементогрунта по сравнению с цементогрунтом. В период набора прочности до 28 суток добавка фибры способствует увеличению интенсивности протекания процессов структурообразования. В зависимости от вида волокон количество новообразований при гидратации портландцемента в образцах фиброцементогрунта больше от 6 % до 15 % в сравнении с цементогрунтом, при этом продукты гидратации клинкерных материалов образуются и развиваются опережающим темпом на поверхности волокон.

7. Разработаны и обоснованы рациональные конструкции лесовозных лесных дорог на основе фиброцементогрунтовых композиций: фиброцементогрунт с добавкой полиэлектролита полиДМДААХ, фибробитумоцементогрунт, фиброзолоцементогрунт, фиброминералогрунт, учитывающие условия преобладания в лесной зоне кислых, переувлажненных грунтов и требования по обеспечению высоких транспортно-эксплуатационных качеств.

8. Разработан технологический регламент на устройство конструкций лесовозных лесных дорог с высокими транспортно-эксплуатационными показателями, учитывающий процессы приготовления оптимальных составов, укладки и ухода за фиброцементогрунтовым слоем.

9. Разработаны и обоснованы технологические требования по устройству фиброцементогрунтовых конструкций методом регенерации цементогрунтовых слоев рекультивируемых лесовозных лесных дорог. На основании экспериментально-статистических моделей установлено, что регенерированный фиброцементогрунт обладает требуемыми прочностными показателями и морозостойкостью при содержании портландцемента на 25 % ниже в сравнении с исходным цементогрунтом.

10. В результате исследований транспортно-эксплуатационных показателей слоев покрытия на опытных участках лесовозных лесных дорог установлено, что конструкции из фиброцементогрунтовых композиций позволяют обеспечить:

– увеличение модуля упругости от 12,0 % до 22,9 % в зависимости от вида используемой фибры в сравнении с цементогрунтовым покрытием;

– повышение транспортно-эксплуатационных качеств дорожной конструкции путем замедления более чем на 66 % динамики проявления продольных деформаций и от 20 % до 60 % динамики проявления поперечных деформаций в сравнении с цементогрунтовым покрытием;

– повышение трещиностойкости дорожной конструкции, связанной с замедлением проявления трещин и других видимых дефектов в сравнении с цементогрунтовым покрытием.

11. Разработана комплексная методика технико-экономического обоснования технологии транспортного освоения лесосырьевых баз с использованием интеллектуальных систем на базе нейро-нечетких сетей, позволяющих производить оперативный и высокоточный анализ единовременных затрат на устройство конструкций лесовозных лесных дорог в зависимости от транспортно-логистической схемы доставки материалов. Установлено, что технико-экономическая эффективность устройства конструкций лесовозных лесных дорог из фиброцементогрунтовых композиций на территории лесосырьевых баз Свердловской области составляет от 32 % до 66 % по сравнению с традиционной технологией строительства с использованием инертных каменных материалов, позволяя существенно снизить финансовые затраты на создание и развитие транспортной инфраструктуры лесной отрасли.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аболиньш, Д. С. Сопротивление фибробетона изгибу и растяжению / Д. С. Аболиньш, В. К. Кравинскис // Расчет и оптимизация строительных конструкций. – Рига, 1974. – С. 47–54.

2. Абрамова, Т. Т. Стабилизаторы грунтов в отечественном дорожном и аэродромном строительстве / Т. Т. Абрамова, А. И. Босов, К. Э. Валиева // Дороги и мосты. – 2013. – № 2(30). – С. 60–85.

3. Автомобильные дороги и мосты : обзор. информ. Строительство конструктивных слоев дорожных одежд из грунтов, укрепленных вяжущими материалами / С. Г. Фурсов. – М. : ФГУП «Информавтодор», 2007. 81 с.

4. Алябьев, В. И. Оптимизация производственных процессов на лесозоготовках / В. И. Алябьев. – М. : Лесная промышленность, 1977. 232 с.

5. Алябьев, В. И. Основы математического моделирования лесопромышленных процессов : пособие аспирантам / В. И. Алябьев. – М. : ЦНИИМЭ, 1990. 398 с.

6. Андреев, В. Н. Принятие оптимальных решений: теория и применение в лесном комплексе / В. Н. Андреев, Ю. Ю. Герасимов. – Финляндия: Изд-во ун-та Йоэнсуу, 1999. 200 с.

7. Антонова, Е. Особенности применения технологии стабилизации и укрепления грунтов в Российской Федерации / Е. Антонова, А. Босов // Дорожники. – 2015. – № 5(5). – С. 25–34.

8. Арончик, В. Б. Исследование работы армирующего волокна в фибробетоне : дисс. … канд. техн. наук : 05.23.01 / Арончик Владимир Бенционович. – Рига, 1982. 216 с.

9. Бабаев, В. Б. Мелкозернистый цементобетон с использованием базальтового волокна для дорожного строительства : дисс. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / Бабаев Виктор Борисович. – Белгород, 2013. 180 с.

10. Баранов, А. И. Исследование прочности лесовозных автодорог с покрытиями из стабилизированных грунтов / А. И. Баранов, Н. С. Колбас // 7 сб. – М., 1966. – С. 111–116.

11. Безрук, В. М. Дорожные основания и покрытия из укрепленных грунтов / В. М. Безрук [и др]. – М. : Транспорт, 1966. 128 с.

12. Безрук, В. М. Комплексные методы укрепления грунтов цементом и добавками неорганических веществ / В. М. Безрук, И. Л. Горячков, Л. Д. Тимофеева // Труды Союздорнии. – М., 1970. – С. 4–47.

13. Безрук, В. М. Методы комплексного укрепления грунтов цементом с добавками извести и электролитов / В. М. Безрук. – М. : Автотрансиздат, 1958. 17 с.

14. Безрук, В. М. Современные методы строительства дорожных оснований и покрытий из грунтов, укрепленных цементом, известью, битумом, дегтем / В. М. Безрук [и др.]. – М. : Автотрансиздат, 1960. 200 с.

15. Безрук, В. М. Теоретические основы укрепления грунтов цементом / В. М. Безрук. – М. : Автотрансиздат, 1956. 86 с.

16. Безрук, В. М. Технология и механизация укрепления грунтов в дорожном строительстве / под. ред. проф. В. М. Безрука. – М. : Транспорт, 1976. 232 с.

17. Безрук, В. М. Укрепление грунтов / В. М. Безрук. – М. : Транспорт, 1965. 340 с.

18. Безрук, В. М. Укрепленные грунты / В. М. Безрук, И. Л. Гурячков, Т. М. Луканина, Р. А. Агапова. – М. : Транспорт, 1982. 231 с.

19. Беркович, Т. М. Основы технологии асбестоцемента / Т. М. Беркович. – М. : Стройиздат, 1979. 233 с.

20. Берлин, А. А. Полимерные композиционные материалы / А. А. Берлин, С. Л. Баженов, А. А. Кульков [и др.] // Прочность и технология. – Долгопрудный : Изд. Дом «Интеллект». – 2009. 352 с.

21. Берней, И. И. Технология асбестоцементных изделий : учеб. пособие для вузов / И. И. Берней. – М. : Высш. школа, 1977. 230 с.

22. Билозир, В. В. Образование и раскрытие трещин в нормальных сечениях изгибаемых сталефибробетонных элементов на фибре из листа : дисс. … канд. техн. наук : 05.23.01 / Билозир Виталий Владимирович. – Москва, 1991. 163 с.

23. Бируля, А. К. Прочность дорожных одежд облегченных конструкций / А. К. Бируля, С. Л. Голованенко, С. И. Михович // Исследование прочности дорожных одежд. – М. : Автотрансиздат, 1959. – С. 71–75.

24. Бондаренко, С. Н. Комплексное минерального вяжущее для укрепления грунтов : дисс. … канд. техн. наук : 2.1.5 / Бондаренко Светлана Николаевна. – Белгород, 2023. 223 с.

25. Булдаков, С. И. Исследования по укреплению грунтов цементом с добавкой черного сульфатного щелока для строительства лесовозных дорог : дис. … канд. техн. наук : 05.21.01 / Булдаков Сергей Иванович. – Ленинград, 1977. 168 с.

26. Вдовин, Е. А. Пути повышения эффективности укрепления грунтов для строительства дорожных одежд / Е. А. Вдовин, Л. Ф. Мавлиев, В. Ф. Строганов // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2013. – № 1(29). – С. 52–58.

27. Влияние некоторых характеристик отрезков стальной проволоки на свойства бетона, армированного этими отрезками. Реф. информ. / ЦИНИС. Строит. и архитект. Серия 7. Строительные материалы и изделия. – М., 1974. – вып. 17. – С. 6–8.

28. Вознесенский, Е. А. Динамическая неустойчивость грунтов : монография, 2-е изд. – М. : ЛЕНАНД, 2014. 264 с.

29. Воробьев, Х. С. Дисперсно-армированный ячеистый бетон / Х. С. Воробьев, В. Г. Бортников, С. Г. Данилова // Дисперсно-армированные бетоны и конструкции из них. – Рига : ЛатИНТИ, 1975. – С. 39–43.

30. Вырко, Н. П. Дорожное грунтоведение с основами механики грунтов / Н. П. Вырко, И. И. Леонович // Учебник для студентов лесотехнических

специальностей высших учебных заведений – Минск : Вышэйшая школа, 1977. 224 с.

31. Глазырина, Н. С. Связные грунты Урала / Н. С. Глазырина, О. Н. Грязнов, Н. В. Рубан // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2015. – № 2. – С. 150–161.

32. Голубева, Е. А. Регулирование свойств дорожного цементогрунта методом модифицирования полимерными добавками : автореф. дисс. … канд. техн. наук : 05.23.05 / Голубева Елена Анатольевна. – Улан-Удэ, 2009. 21 с.

33. Гулимова, Е. В. Исследование коррозионной стойкости арматуры в сталефибробетоне : автореф. дис. … канд. техн. наук / Гулимова Е. В. – Ленинград, 1980. 23 с.

34. Дмитриева, Т. В. Стабилизированные глинистые грунты КМА для дорожного строительства : дис. … канд. техн. наук : 05.23.05 / Дмитриева Татьяна Владимировна. – Белгород, 2011. 202 с.

35. Дудкин, А. С. Исследование методов регулирования длительности технологического разрыва при устройстве дорожных оснований из цементогрунтов : автореф. дисс. … канд. техн. наук : 05.21.01 / Дудкин А. С. – Московская обл., 1974. 23 с.

36. Егоров, Г. В. Укрепление местных грунтов стабилизатором при строительстве автомобильных дорог в условиях Севера / Г. В. Егоров, А. В. Андреева, О. Н. Буренина // Дороги и мосты. – 2013. – № 1(29). – С. 21–28.

37. Епишкин, В. В. Применение стабилизаторов глинистых грунтов / В. В. Епишкин // Автомобильные дороги. – 1995. – № 7–8. – С. 67–84.

38. Зотов, А. Н. Структура и свойства модифицированных мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй : дисс. … канд. техн. наук : 05.23.05 / Зотов Александр Николаевич. – Кострома, 2016. 263 с.

39. Зубарев, С. Методы укрепления и стабилизации слабых оснований дорожного полотна: все плюсы и минусы / С. Зубарев // Дороги. Инновации в строительстве. – 2016. – № 53. – С. 102–109.

40. Зубова, О. В. Исследование процессов структурообразования при укреплении органических осадков промывных вод ГУП «Водоканал» комплексным вяжущим / О. В. Зубова, В. В. Силецкий, Л. Я. Громская [и др.] // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2019. – № 227. – С. 209–223.

41. Жуков, Ю. Г. Укрепление грунтов как способ увеличения жизненного цикла автомобильных дорог / Ю. Г. Жуков // Автомобильные дороги. – 2018. – № 8. – С. 106–108.

42. Иванкович, А. С. Опыт строительства автомобильных лесовозных дорог / А. С. Иванкович, Р. И. Водосова. – М. : Лесная промышленность, 1969. 136 с.

43. Ильин, С. В. Технологии усиления слабых грунтов оснований, применяемые на объектах Государственной компании «Автодор» / С. В. Ильин, И. И. Жевжиков // Дорожники. – 2017. – № 2(10). – С. 6–11.

44. Карпинос Д. М. Новые композиционные материалы / Д. М. Карпинос, Л. И. Тучинский, Л. Р. Вишняков. – Киев : Вища школа. – 1977. 312 с.

45. Кириченко, В. И. Применение укрепленных грунтов для покрытия лесовозных автомобильных дорог / В. И. Кириченко // реферативная информация ВНИПИЭИЛеспром «Лесоэксплуатация и лесосплав». – 1976. – № 9 – С. 10–11.

46. Клековкина, М. П. Инновационные материалы – добавки и стабилизаторы для укрепления грунтов / М. П. Клековкина, К. В. Филиппова // Техника. Технологии. Инженерия. – 2017. – № 3(5). – С. 31–34.

47. Ковалев, Р. Н. Исследования по применению нефтеизестесмологрунтов на лесовозных дорогах : автореф. дисс. … канд. техн. наук : 05.21.01 / Ковалев Рудольф Николаевич. – Ленинград, 1976. 19 с.

48. Ковалева, А. Ю. Формирование макроструктуры сталефибробетонов : дис. … канд. техн. наук : 05.23.05 / Ковалева Анна Юрьевна. – Санкт-Петербург, 2001. 135 с.

49. Колбаско, И. А. Базальтофибробетон на основе шлакощелочного вяжущего / И. А. Колбаско, Л. В. Лавриненко, В. Ф. Ваквал // Фибробетон: свойства, технология, конструкция. Тезисы. докл. респ. научно-техн. совещания. – Рига : ЛатНИИстроительства, 1988. – С. 131–134.

50. Комолов, В. ООО «Полимеравтодор»: методы стабилизации грунта / В. Комолов // Дорожники. – 2017. – № 2(10). – С. 14–17.

51. Копацкий, А. В. Влияние диаметра фибровой арматуры на ее коррозионную стойкость / А. В. Колацкий, В. М. Ефимова // Исследование тонкостенных пространственных конструкций и технология их изготовления : Сб. научн. трудов. – Л. : ЛенЗНИИЭП. – 1980. – С. 112–116.

52. Копацкий, А. В. Коррозионная стойкость сталефибробетонных конструкций / А. В. Копацкий, В. М. Ефремова // Применение фибробетона в строительстве. – Л. : ЛДНТП. – 1980. – С. 51–54.

53. Копытин, В. П. Ударная вязкость дисперсно-армированного бетона / В. П. Копытин // Дисперсно-армированные бетоны и конструкции из них. – Рига : ЛатИНТИ, 1975. – С. 86–90.

54. Коровкин, М. В. Инфракрасная спектроскопия карбонатных минералов: учебное пособие / М. В. Коровкин, Л. Г. Ананьева // Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2016. 96 с.

55. Корчунов, Н. Г. Применение цементогрунтовых покрытий на лесовозных автомобильных дорогах / Н. Г. Корчунов [и др.] // Лесоэксплуатация и лесосплав. – 1969. – № 19. – С. 10–12.

56. Корчунов, Н. Г. Укрепление проезжей части лесовозных автодорог / Н. Г. Корчунов // Труды ЛТА им. С. М. Кирова. – 1957. – № 77 – С. 13–29.

57. Кострико, М. Т. Вопросы гидрофобизации грунтов / М. Т. Кострико. – М. : Изд-во МГУ, 1964. 115 с.

58. Кочеткова, Р. Г. Опыт применения стабилизаторов-полифилизаторов при реконструкции автомобильных дорог / Р. Г. Кочеткова, О. А. Горбунов // Автомобильные дороги. – 2018. – № 8. – С. 120–123.

59. Кравинскис, В. К. Исследование прочности и деформативности иглобетона при статическом нагружении : автореф. дисс. … канд. техн. наук / Кравинскис В. К. – Рига, 1974. 21 с.

60. Кравченко, И. А. Повышение прочности вяжущих путем армирования шлаковыми волокнами / И. А. Кравченко, В. Д. Горобинская, Н. И. Губарени, Э. З. Гитер // Фибробетон: свойства, технология, конструкция. Тезисы докл. респ. науч.-техн. совещания. – Рига : ЛатНИИстроительства, 1988. – С. 143–145.

61. Кручинин, И. Н. Транспортная инфраструктура лесов : учебное пособие / И. Н. Кручинин // Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Уральский государственный лесотехнический университет. – Екатеринбург, 2022. 134 с.

62. Крылов, В. Н. Строительство лесовозных автомобильных дорог с покрытием из укрепленных грунтов / В. Н. Крылов. – Сыктывкар, 1965. 134 с.

63. Кувалдин, Б. И. Проектирование лесовозных автомобильных дорог : учебное пособие / Б. И. Кувалдин, С. А. Морозов. – М : Гослесбумиздат, 1962. 331 с.

64. Кулачкин, Е. И. Фундаментальные основы новой механики грунта и его геотехники / Е. И. Кулачкин, А. А. Митькин, А. И. Радкевич [и др.] // Автомобильные дороги. – 2016. – № 10 – С. 35–38.

65. Курбатов, Л. Г. Некоторые вопросы технологии и технико-экономической эффективности сталефибробетона / Л. Г. Курбатов // Производство строительных изделий и конструкций: Межвуз. темат. сб. тр. / ЛИСИ. Л., 1979. – С. 38–42.

66. Курбатов, Л. Г. Об эффективности бетонов, армированных стальными фибрами / Л. Г. Курбатов, Ф. Н. Рабинович // Бетон и железобетон. 1980. – № 3. – С. 6–8.

67. Курбатов, Л. Г. Опыт применения сталефибробетона в инженерных сооружениях / Л. Г. Курбатов, М. Я. Хазанов, А. Н. Шустов. – Ленинград : ЛДНТП, 1982. 28 с.

68. Курьянов, В. К. Технология и организация строительства лесовозных автомобильных дорог : учебное пособие / В. К. Курьянов, В. Н. Макеев, В. И. Алябьев. – Воронеж : Изд-во Воронеж. ун-та, 1995. 166 с.

69. Курьянов, В. К. Лесотехнические особенности лесовозных дорог / В. К. Курьянов. – Воронеж : ВЛТИ, 1985. 85 с.

70. Курьянов, В. К. Строительство лесовозных автомобильных дорог: учебное пособие / В. К. Курьянов, В. Н. Макеев, В. В. Черников. – Воронеж : ВЛТИ, 1992. 76 с.

71. Курьянов, В. К. Повышение транспортно-эксплуатационных качеств автомобильных дорог лесопромышленного комплекса / В. К. Курьянов, Д. Н. Афоничев, О. Н. Бурмистрова [и др.]. – Воронеж : Воронежский государственный университет, 2002. 176 с.

72. Ладейщиков, К. В. Технологии строительства лесных дорог круглогодичного действия / К. В. Ладейщиков, С. А. Чудинов // Транспорт и логистика: актуальные вопросы, проектные решения и инновационные достижения : материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Красноярск: Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, 2023. – С. 103–108.

73. Ладейщиков, Н. В. Управление жизненным циклом лесовозных дорог из укрепленного грунта / Н. В. Ладейщиков, С. А. Чудинов // Наука и инновации в строительстве : Сборник докладов VII Международной научно-практической конференции / Том 1. – Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. – С. 221–224.

74. Ладейщиков, Н. В. Исследование гранулометрического состава грунтов для строительства лесных дорог по технологии укрепления / Н. В. Ладейщиков, С. А. Чудинов // Лесоэксплуатация и комплексное использование древесины : сборник статей Всероссийской научно-практической конференции. – Красноярск : Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева, 2023. – С. 43–46.

75. Лезов, В. Ю. Технология и свойства мелкозернистых бетонов, армированных синтетическими волокнами : автореф. дис. … канд. техн. наук / Лезов В. Ю. – Ленинград, 1991. 20 с.

76. Лесной кодекс Российской Федерации от 04.12.2006 № 200-ФЗ (ред. от 26.12.2024) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2025). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64299/01fbae25b3040955277cbd70aa1b907cceda878e (дата обращения: 07.05.2025). Режим доступа: свободный.

77. Лобанов, И. А. Безавтоклавные ячеистые бетоны, армированные синтетическими волокнами / И. А. Лобанов, Ю. В. Пухаренко, Л. В. Моргун // Бетон и железобетон, 1983. – № 8. – С. 28–30.

78. Лобанов, И. А. Основы технологии дисперсно-армированных бетонов: фибробетонов : автореф. дис. … д-ра техн. наук : 05.23.05 / Лобанов Игорь Александрович. – Ленинград, 1982. 34 с.

79. Лобанов, И. А. Рекомендации по изготовлению изделий из безавтоклавного фибробетона для сельского строительства / И. А. Лобанов, Л. В. Моргун, Ю. В. Пухаренко, Л. В. Барилов // СевкавЗНИИЭПсельстрой. Ростов н/Д, 1984. 34 с.

80. Логачев, В. Н. Повышение транспортно-эксплуатационных качеств лесовозных автомобильных дорог в условиях ограниченных ресурсов : автореф. дисс. … канд. техн. наук : 05.21.01 / Логачев Виктор Никитович. – Мытищи, 2015. 16 с.

81. Любимова, Т. Ю. О процессах структурообразования в грунтах, укрепленных цементом / Т. Ю. Любимова // Труды совещания по теоретическим основам технической мелиорации грунтов. – М. : Изд-во МГУ, 1961. – С. 13–12.

82. Максимов, А. Н. Фибробетон, армированный волокнами минеральной ваты / А. Н. Максимов // Фибробетон и его применение в строительстве: сборник научных трудов. – М. : НИИЖБ, 1979. – С. 46–51.

83. Мамулат, С. Л. «Акцент на внедрение технологий ресайклинга и применение местных материалов» // Дорожная держава. – 2019. – № 91. – С. 52–57.

84. Мануковский, А. Ю. Прочностные характеристики укрепления золошлаковых смесей ТЭЦ неорганическими вяжущими материалами на лесовозных дорогах / А. Ю. Мануковский, Д. П. Курдюков, Р. П. Курдюков [и др.] // Циркулярная экономика для целей устойчивого развития отраслей и территорий : Материалы Национальной научно-практической конференции, Воронеж, 14–15 мая 2024 года. – Воронеж : Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова, 2024. – С. 215–223.

85. Мануковский, А. Ю. Расчет количества требуемого вяжущего для выполнения стабилизации грунтов при строительстве лесовозных дорог / А. Ю. Мануковский, Д. П. Курдюков, Р. П. Курдюков [и др.] // Перспективные ресурсосберегающие технологии развития лесопромышленного комплекса : Материалы Международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов, Воронеж, 29 сентября 2023 года. – Воронеж : Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова, 2023. – С. 162–166.

86. Марков, Л. А. Улучшение свойств грунтов поверхностно-активными и структурообразующими веществами / Л. А. Марков [и др.]. – М. : Автотрансиздат, 1963. 176 с.

87. Марков, Л. А. Химическая стабилизация грунтов / Л. А. Марков, Н. Е. Огнева, А. П. Парфенов [и др.]. – М., 1960. 78 с.

88. Матвеев, П. В. Дорожные покрытия из цементогрунта / П. В. Матвеев, А. А. Самойлов // Лесная промышленность. – 1972. – № 6 – С. 28–29.

89. Методика определения сметной стоимости строительства, реконструкции, капитального ремонта, сноса объектов капитального строительства, работ по сохранению объектов культурного наследия (памятников истории и культуры) народов Российской Федерации на территории Российской Федерации (Утв. приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 04.08.2020 № 421/пр). URL: https://minstroyrf.gov.ru/docs/74853 (дата обращения: 07.05.2025). Режим доступа: свободный.

90. Методические рекомендации «Проектирование, строительство и эксплуатация лесных дорог» (Утверждены Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, 2018). URL: https://meganorm.ru/Data2/1/4293727/4293727703.pdf (дата обращения: 07.05.2025). Режим доступа: свободный.

91. Милейко С. Т. Оценка долговечности в условиях ползучести / С. Т. Милейко // Инж. Журнал Механика твердого тела. – 1968. – № 5. – С. 82–87.

92. Митропольский, А. К. Техника статистических вычислений / А. К. Митропольский. – М. : Наука, 1971. 257 с.

93. Михайлов, В. В. Влияние дисперсного армирования минеральными волокнами на свойства напрягающего бетона / В. В. Михайлов, О. А. Звездин // Исследование и применение напрягающего бетона и самонапряжённых железобетонных конструкций: сб. науч. тр. / под ред. В. В. Михайлова. – М. : Стройиздат, 1984. – С. 39–47.

94. Мищенко, Н. Ф. Химическое укрепление грунтов в аэродромном и дорожном строительстве / Н. Ф. Мищенко [и др.]. – М. : Транспорт, 1967. 160 с.

95. Могилевич, В. М. Дорожные одежды из цементогрунта / В. М. Могилевич, Р. П. Щербакова, О. В. Тюменцева. – М. : Транспорт, 1973. 207 с.

96. Мокрушин, Н. Ю. Совершенствование технологии укрепления грунтов для строительства дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог / Н. Ю. Мокрушин, С. А. Чудинов // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. – Пермь : Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2023. – Т. 1. – С. 300–303.

97. Моргун Л. В. Свойства фибропенобетонов, армированных полиамидными волокнами : автореф. дис. … канд. техн. наук : 05.23.05 / Моргун Любовь Васильевна. – Ленинград, 1986. 25 с.

98. Морозов, Н. М. Эффективность применения фибробетона в конструкциях при динамических воздействиях / Н. М. Морозов // Вестник МГСУ. – 2014. – № 3. – С. 189–196.

99. Морозов, С. А. Строительство лесовозных автомобильных дорог из стабилизированного грунта / С. А. Морозов. – М. : Гослесбумиздат, 1960. 199 с.

100. Морозов, С. С. Зависимость физических и механических свойств грунтов от состава обменных катионов / С. С. Морозов // Ученые записки МГУ. – 1964. – вып. 105 – С. 50–71.

101. Неволин, Д. Г. Инновационные технологии проектирования и строительства автомобильных дорог : монография / Д. Г. Неволин, В. Н. Дмитриев, Е. В. Кошкаров, С. А. Чудинов [и др.] ; под ред. Д. Г. Неволина, В. Н. Дмитриева. – Екатеринбург : Уральский государственный университет путей сообщения, 2015. 192 с.

102. Носов, В. П. Эффективность применения цементобетона при строительстве автомобильных дорог / В. П. Носов, М. С. Коганзон, Л. А. Феднер [и др.] // Наука и техника в дорожной отрасли. – 1999. – № 1. – С. 16–18.

103. Никамото, К. ИК-спектры и спектры КР неорганических и координационных соединений: Пер. с англ. / К. Никамото – М. : Мир, 1991. 536 с.

104. Овчаренко, Ф. Д. Адсорбция на глинистых минералах / Ф. Д. Овчаренко, Ю. И. Тарасевич. – Киев, 1975. 98 с.

105. Ольховиков, В. М. Опыт использования стабилизатора глинистых грунтов / В. М. Ольховиков // Автомобильные дороги. – 1994. – № 3. – С. 23–27.

106. Опыт и перспективы строительства автомобильных дорог с использованием местных материалов : сб. ст. / отв. ред. проф. В. И. Могилевич. – Омск : Западно-Сибирское книжное издательство, 1968. – 173 с.

107. Отчет по результатам научно-исследовательской работы на тему: Исследование физико-механических характеристик волокон фибры различных видов // ООО «УралДорНИЦ». Екатеринбург, 2022. 36 с.

108. Отчет по результатам научно-исследовательской работы на тему: Разработка и оформление нормативно-технической, типовой проектной и типовой технологической документации на золоминеральную смесь (Рефт-1) и минеральный порошок (Рефт-2) на основе золы-уноса Рефтинской ГРЭС для

применения в дорожном строительстве // ООО «УралДорНИЦ». Екатеринбург, 2020. 58 с.

109. Отчет по результатам научно-исследовательской работы на тему: Проведение тестовых испытаний с целью исследования технических показателей золы-уноса Рефтинской ГРЭС // ООО «УралДорНИЦ». Екатеринбург, 2022. 15 с.

110. Отчет по результатам научно-исследовательской работы на тему: Исследование характеристик щебня, песка и песчано-щебеночных смесей из дробленого бетона для строительства автомобильных дорог с разработкой альбома типовых проектных решений конструкций дорожных одежд. 1–1.1–НИОКР // ФГБОУ ВО «УГЛТУ». Екатеринбург, 2023. 22 с.

111. Парфенов, В. А. Укрепление грунтов гидросиликатом / В. А. Парфенов, В. П. Подпилская // Автомоб. дороги. – 1960. – № 10. – С. 32–38.

112. Патент № 47-36686 Япония. Укрепление грунта с использованием цементирующего состава, содержащего регулятор реакции / Изобретение за рубежом. – 1973. – № 14. 4 с.

113. Патент № 50-34842 Япония. Способ укрепления грунта / Изобретение за рубежом. – 1976. – № 4. 4 с.

114. Патент на полезную модель № 84858 U1 Российская Федерация, МПК E01C 3/00. Дорожная одежда : № 2009109929/22 : заявл. 18.03.2009 : опубл. 20.07.2009 / С. И. Булдаков, С. А. Чудинов, О. С. Булдаков ; заявитель ГОУ ВПО «Уральский государственный лесотехнический университет».

115. Патент № 2400593 C1 Российская Федерация, МПК E01C 7/36. Грунтовая смесь : № 2009123941/03 : заявл. 23.06.2009 : опубл. 27.09.2010 / С. И. Булдаков, В. В. Свиридов, А. В. Свиридов, С. А. Чудинов ; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский государственный лесотехнический университет».

116. Патент № 2785742 C1 Российская Федерация, МПК E02D 3/12, E01C 3/04, E01C 7/36. Фиброцементогрунтовая смесь : № 2022105876 : заявл. 05.03.2022 : опубл. 12.12.2022 / С. А. Чудинов ; заявитель Федеральное государственное

бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный лесотехнический университет».

117. Патент № 2792506 C1 Российская Федерация, МПК E01C 7/36. Регенерируемая грунтовая смесь : № 2022125200 : заявл. 27.09.2022 : опубл. 22.03.2023 / С. А. Чудинов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный лесотехнический университет».

118. Патент № 2820381 C1 Российская Федерация, МПК C09K 17/34, E02D 3/12. Фибробитумоцементогрунтовая смесь : № 2023130221 : заявл. 21.11.2023 : опубл. 03.06.2024 / С. А. Чудинов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный лесотехнический университет».

119. Патент № 2816939 C1 Российская Федерация, МПК E01C 3/04, E01C 7/36, E02D 3/12. Фиброзолоцементогрунтовая смесь : № 2023123960 : заявл. 18.09.2023 : опубл. 08.04.2024 / С. А. Чудинов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный лесотехнический университет».

120. Патент № 2833614 C1 Российская Федерация, МПК E01C 7/36, E02D 3/12, E01C 3/04. Фибоминералогрунтовая смесь : заявл. 16.10.2023 : опубл. 27.01.2025 / С. А. Чудинов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный лесотехнический университет».

121. Пащенко А. А. Стеклоцементные композиционные материалы / А. А. Пащенко, В. П. Сербин, В. Р. Бондарь. – Киев : О-во Знание УССР, 1979. 20 с.

122. Пен, Р. З. Статистические методы моделирования и оптимизации процессов ЦБП / Р. З. Пен. – Красноярск: Изд. Красноярского университета, 1982. 191 с.

123. Пермяков, В. Б. Исследование структурообразования цементогрунтов в технологическом процессе : автореф. дис. … канд. техн. наук : 05.21.01 / Пермяков Владислав Борисович. – Омск, 1969. 29 с.

124. Пижурин, А. А. Исследования процессов деревообработки / А. А. Пижурин, М. С. Роезнблит. – М. : Лесн. пром-ст, 1984. 140 с.

125. Порин, В. О. Современный опыт и перспективы развития технологии укрепления грунтов в строительстве автомобильных дорог лесного комплекса / В. О. Порин, Д. М. Маринских, С. А. Чудинов // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России : материалы XX Всероссийской (национальной) научно-технической конференции. – Екатеринбург : Уральский государственный лесотехнический университет, 2024. – С. 937–940.

126. Предложения по комплексным методам укрепления грунтов, применяемых при строительстве дорог II–IV категорий в различных климатических условиях / Государственный всесоюзный дорожный научно-исследовательский институт (СоюздорНИИ). – М. : СоюздорНИИ, 1967. 48 с.

127. Предложения по укреплению глинистых грунтов с размельчением их с помощью добавок поверхностно-активных веществ и извести / Государственный всесоюзный дорожный научно-исследовательский институт (СоюздорНИИ). – М. : СоюздорНИИ, 1970. 29 с.

128. Приказ Минприроды России от 05.08.2020 № 565 «Об утверждении Порядка проектирования, создания, содержания и эксплуатации объектов лесной инфраструктуры» (Зарегистрировано в Минюсте России 20.11.2020 № 61050). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_368482 (дата обращения: 07.05.2025). Режим доступа: свободный.

129. Прочность на излом бетона, армированного волокнами. Реф. инф. / ЦИНИС. Строит. и архитект. Серия 7. Строительные изделия и конструкции. – 1980. – вып. 10. – С. 4–6.

130. Пухаренко, Ю. В. Научные и практические основы формирования структуры и свойств фибробетонов : дисс. д-ра. техн. наук : 05.23.05 / Пухаренко Юрий Владимирович. – Санкт-Петербург, 2004. 315 с.

131. Пшеничный, Г. Н. Исследование процесса схватывания портландцемента и действия добавок-электролитов / Г. Н. Пшеничный // Приволжский научный журнал. – 2008. – № 2. – С. 30–37.

132. Рабинович, Ф. Н. Бетоны, дисперсно-армированные волокнами / Ф. Н. Рабинович // Строительные материалы. – 1975. – № 4. – С. 36–37.

133. Рабинович, Ф. Н. Дисперсно-армированные бетоны. – М. : Стройиздат, 1989. 176 с.

134. Рабинович, Ф. Н. Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции / Ф. Н. Рабинович // Монография : Издательство АСВ, 2004. 560 с.

135. Ребиндер, П. А. Поверхностно-активные вещества / Всесоюз. о-во по распространению полит. и науч. знаний. – М. : Знание, 1961. 46 с.

136. Ребиндер, П. А. Процессы структурообразования в дисперсных системах / П. А. Ребиндер // Физико-химическая механика почв, грунтов, глин и строительных материалов. – Ташкент: Изд-во «Фан», 1966. – С. 9–25.

137. Ребиндер, П. А. Структурообразование и самопроизвольное диспергирование в суспензиях / П. А. Ребиндер // Труды третьей Всесоюзной конференции по коллоидной химии. – М. : Изд-во АН СССР. – С. 7–18.

138. Ребиндер, П. А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика. Избранные труды / П. А. Ребиндер. М. : Наука, 1979. 384 с.

139. Ребиндер, П. А. Физико-химическая механика как основа укрепления грунтов в дорожном строительстве и производстве строительных материалов на основе грунтов. Труды совещания по теоретическим основам технической мелиорации грунтов / П. А. Ребиндер. – М. : Изд-во МГУ, 1961. – С. 4–12.

140. Рекомендации по строительству лесовозных автомобильных дорог с покрытиями из укреплённых грунтов – М. : Ротапринт ВНИПИЭИлеспрома, 1972. 87 с.

141. Романов, В. П. К вопросу о пределе трещиностойкости фибробетона на растяжение / В. П. Романов // Исследование новых типов пространственных

конструкций гражданских зданий и сооружений: Сб. науч. тр. – Л. : ЛенЗНИИЭП. – 1977. – С. 96–105.

142. Сари, М. Армированные волокнами вяжущие композиционные материалы: вклад полиамидных волокон / М. Сари, Дж. Лекселлент // Современные технологии сухих смесей в строительстве. Сб. докладов 3-й Международной научно-практической конференции. – СПб., 2001. – С. 48–60.

143. Сахибгареев, Р. Р. Управление процессами структурообразования модифицированных цементных бетонов : дисс. д-ра. техн. наук : 05.23.05 / Сахибгареев Ринат Рашидович. – Уфа, 2010. 367 с.

144. Свойства волокон и бетона, армированного волокнами. Реф. Информ. / ЦИНИС. Строит. и архитект. Серия 7. Строит. материалы и изделия. – М., 1974. – вып. 14. – С. 12–15.

145. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024615981 Российская Федерация. Нейронечёткая сеть для определения сметной стоимости устройства дорожной одежды лесовозной автомобильной дороги из фиброцементогрунта : № 2024614305 : заявл. 04.03.2024 : опубл. 14.03.2024 / С. А. Чудинов, И. А. Карабутова ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный лесотехнический университет».

146. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024614256 Российская Федерация. Нейронечеткая сеть для определения сметной стоимости устройства дорожной одежды лесовозной автомобильной дороги из инертных материалов : № 2024613206 : заявл. 21.02.2024 : опубл. 21.02.2024 / С. А. Чудинов, И. А. Карабутова ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный лесотехнический университет».

147. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024619019 Российская Федерация. Нейронечеткая сеть для определения прочности на растяжение при раскалывании фиброцементогрунта : № 2024618096 : заявл. 15.04.2024 : опубл. 18.04.2024 / С. А. Чудинов, И. А. Карабутова ;

заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный лесотехнический университет».

148. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024660038 Российская Федерация. Нейронечеткая сеть для определения прочности на сжатие фиброцементогрунта : № 2024618681 : заявл. 22.04.2024 : опубл. 02.05.2024 / С. А. Чудинов, И. А. Карабутова ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный лесотехнический университет».

149. Серенко, А. Ф. Дисперсно-армированные бетоны высокой морозостойкости с добавками ПАВ : автореф. дис. … канд. техн. наук : 05.23.05 / Серенко А. Ф. – Ленинград, 1989. 21 с.

150. Силецкий, В. В. Обоснование технологии строительства лесных автомобильных дорог с применением нефелинового шлама, активированного добавками : дисс. … канд. техн. наук : 4.3.4 / Силецкий Вадим Витальевич. – Санкт-Петербург, 2024. 239 с.

151. Силуков, Ю. Д. Транспорт леса : учебник для лесотехнических техникумов / Ю. Д. Силуков, Н. Д. Тагильцев, С. А. Пашкин [и др.]. – М. : Лесная промышленность, 1986. 206 с.

152. Соловьев, Б. В. Плиты дорожных и аэродромных покрытий с фибровым армированием / Б. В. Соловьев, А. Г. Зива, В. Е. Анисимов // Применение сталефибробетона в строительстве: материалы краткосрочного семинара. – Л. : ЛДНТП, 1985. – С. 73–78.

153. Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года» (Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 11.02.2021 № 312-р). URL: https://docs.cntd.ru/document/573658653 (дата обращения: 07.05.2025). Режим доступа: свободный.

154. Строкова, В. В. Феноменологическая модель стабилизации глинистых грунтов низкомолекулярными органическими комплексами / В. В. Строкова,

И. В. Жерновский, Т. В. Дмитриева // Строительные материалы. – 2011. – № 10. – С. 64–66.

155. Струков, А. А. Опыт применения стабилизатора дорожного основания «Дорзин» наобъектах дорожного строительства / А. А. Струков, Д. Л. Хусид // Дороги и мосты. – 2015. – № 1(33). – С. 84–90.

156. Талантова, К. В. Строительные конструкции с заданными свойствами на основе сталефибробетона : дис. … д-ра техн. наук : 05.23.01 / Талантова Клара Васильевна. – Барнаул, 2009. 469 с.

157. Таскаев, О. Г. Грунт, укрепленный известью, гидрофобизированной отходом электродной промышленности : автореф. дис. … канд. техн. наук : 05.23.05 / Таскаев Олег Геннадьевич. – Новосибирск, 2004. 25 с.

158. Тверитнев, О.Н. Укрепление грунтов при строительстве лесовозных автомобильных дорог : дисс. … канд. техн. наук : 4.3.4 / Тверитнев Олег Николаевич. – Воронеж, 2023. 130 с.

159. Технические указания по проектированию лесовозных автомобильных дорог с покрытием из укрепленных грунтов – М. : Ротапринт ВНИПИЭИлеспрома, 1972. – 38 с.

160. Тимофеев, В. А. Повышение однородности и прочности укрепленных грунтов при строительстве лесовозных автомобильных дорог : дисс. … канд. техн. наук : 4.3.4 / Тимофеев Вадим Александрович. – Архангельск, 2023. 157 с.

161. Ткаченко, О. Н. Разработка технологии получения обессоленного поли-N,N-диметил-N,N-диаллиламмоний хлорида / О. Н. Ткаченко, Ю. К. Дмитриев, В. И. Левашова // Успехи современного естествознания. – 2004. – № 9. – С. 96–97.

162. Федеральный закон «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в части совершенствования использования лесов и земель для осуществления видов деятельности в сфере охотничьего хозяйства» от 23.06.2016 № 206-ФЗ (последняя редакция). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_200013 (дата обращения: 07.05.2025). Режим доступа: свободный.

163. Федулов, А. А. Применение поверхностно-активных веществ (стабилизаторов) для улучшения свойств связных грунтов в условиях дорожного строительства : автореф. дис. … канд. техн. наук : 05.23.11 / Федулов Андрей Александрович. – Москва, 2005. 22 с.

164. Физико-химическая механика дисперсных структур : Сборник статей / Акад. наук СССР ; Отв. ред. акад. П. А. Ребиндер. – М. : Наука, 1966. 400 с.

165. Фирсов, В. В. Переработка отходов минераловатного производства / В. В. Фирсов, В. В. Самойленко, А. Н. Блазнов [и др.] // Ползуновский вестник. – 2015. – № 4–2. – С. 61–65.

166. Фомичева, Е. Н. К методике определения констант ионного обмена на глинистых минералах / Е. Н. Фомичева, Е. Н. Самарин // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2006. – № 3. – С. 251–263.

167. Фурсов, С. Г. Стабилизаторы грунтов / С. Г. Фурсов // Автомобильные дороги. – 2015. – № 6. – С. 89–91.

168. Фурсов, С. Г. Еще раз о технологии стабилизации грунтов / С. Г. Фурсов // Автомобильные дороги. – 2019. – № 4. – С. 116–119.

169. Фурсов, С. Г. К вопросу о способах укрепления грунтов / С. Г. Фурсов // Транспортное строительство. – 2017. – № 7. – С. 19–22.

170. Фурсов, С. Г. Прогрессивные технологии укрепления грунтов / С. Г. Фурсов // Транспортное строительство. – 2011. – № 2. – С. 10–14.

171. Фурсов, С. Г. Строительство конструктивных слоёв дорожных одежд из грунтов, укреплённых вяжущими материалами / С. Г. Фурсов // Автомобильные дороги и мосты : обзор. информ. – М. : Информавтодор, 2007. 76 с.

172. Фурсов, С. Г. Современные технологии укрепления грунтов / С. Г. Фурсов // Автомобильные дороги. – 2008. – № 5. – С. 123–124.

173. Фурсов, С. Г. Технологии стабилизации и укрепления грунтов / С. Г. Фурсов // Автомобильные дороги. – 2017. – № 5. – С. 78–82.

174. Фурсов, С. Г. Эффект модификатора «ДорЦем ДС-1» / С. Г. Фурсов, Д. В. Кондратюк, П. Л. Федоров, Д. Н. Бубнов // Автомобильные дороги. – 2011. – № 5. – С. 134–139.

175. Цуканова, О. А. Применение химических добавок при укреплении грунтов в конструктивных слоях автомобильных дорог / О. А. Цуканова // Дорожники. – 2017. – № 2(10). – С. 12–13.

176. Черных, Р. А. Обоснование транспортных схем лесных дорог для эффективного освоения лесов (на примере предприятий Нижнего Приангарья) : дис. … канд. техн. наук : 05.21.01 / Черных Роман Александрович. – Красноярск, 2017. 113 с.

177. Чудинов, С. А. Повышение качества цементогрунтовых слоев конструкций лесовозных автомобильных дорог : дисс. канд. техн. наук : 05.21.01 / Чудинов Сергей Александрович. – Екатеринбург, 2011. 248 с.

178. Чудинов, С. А. Фиброцементогрунт в устройстве дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог / С. А. Чудинов // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2024. – № 2(398). – С. 118–127. – DOI 10.37482/0536-1036-2024-2-118-127.

179. Чудинов, С. А. Теоретические исследования процессов структурообразования глинистых грунтов, укрепленных портландцементом с добавкой полиэлектролита / С. А. Чудинов, С. И. Булдаков // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2010. – № 5. – С. 82–88.

180. Чудинов, С. А. Исследование влияния технологических факторов на прочность цементогрунтов / С. А. Чудинов // Вестник Марийского государственного технического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. – 2010. – № 1. – С. 46–52.

181. Чудинов, С. А. Адаптационные технологии в строительстве лесовозных дорог в условиях изменения климата / С. А. Чудинов // Вестник Марийского государственного технического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. – 2010. – № 2. – С. 76–81.

182. Чудинов, С. А. Производственные испытания грунтов, укрепленных портландцементом с добавкой полиэлектролита / С. А. Чудинов // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2011. – № 6(324). – С. 58–61.

183. Чудинов, С. А. Повышение эффективности укрепления грунтов портландцементом со стабилизирующей добавкой / С. А. Чудинов // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5. – С. 163.

184. Чудинов, С. А. Нейронечеткая сеть для расчета стоимости строительства лесовозной автомобильной дороги из фиброцементогрунта / С. А. Чудинов, И. А. Карабутова // Системы. Методы. Технологии. – 2024. – № 1(61). – С. 154–162. – DOI 10.18324/2077-5415-2024-1-154-162.

185. Чудинов, С. А. Структурные прочностные характеристики фиброцементогрунта в дорожной одежде лесовозных автомобильных дорог Свердловской области / С. А. Чудинов // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14, № 1(53). – С. 116–133. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2024.1/7.

186. Чудинов, С. А. Исследование набора прочности фиброцементогрунта в дорожной одежде лесовозной автомобильной дороги / С. А. Чудинов // Resources and Technology. – 2024. – Т. 21, № 2. – С. 1–14. – DOI 10.15393/j2.art.2024.7443.

187. Чудинов, С. А. Регенерация цементогрунтовых слоев конструкций рекультивируемых лесовозных автомобильных дорог / С. А. Чудинов // Системы. Методы. Технологии. – 2024. – № 2(62). – С. 129–137. – DOI 10.18324/2077-5415-2024-2-129-137.

188. Чудинов, С. А. Исследование прочностных показателей фиброцементогрунта для устройства конструктивных слоев лесовозных автомобильных дорог / С. А. Чудинов // Системы. Методы. Технологии. – 2024. – № 2(62). – С. 138–144. – DOI 10.18324/2077-5415-2024-2-138-144.

189. Чудинов, С. А. Тепловая карта технико-экономической эффективности строительства лесовозных дорог / С. А. Чудинов // Аграрный научный журнал. – 2024. – № 6. – С. 150–156. – DOI 10.28983/asj.y2024i6pp150-156.

190. Чудинов, С. А. Исследование деформационных характеристик фиброцементогрунтовых конструкций лесовозных автомобильных дорог / С. А. Чудинов, Е. Г. Васильев, Н. В. Ладейщиков, К. В. Ладейщиков // Resources and Technology. – 2024. – Т. 21, № 3. – С. 1–16. – DOI 10.15393/j2.art.2024.7703.

191. Чудинов, С. А. Оценка технико-экономической эффективности строительства лесовозных автомобильных дорог из фиброцементогрунта / С. А. Чудинов // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2024. – № 249. – С. 230–243. – DOI 10.21266/2079-4304.2024.249.230-243.

192. Чудинов, С. А. Интеллектуальная система определения прочности фиброцементогрунта / С. А. Чудинов, И. А. Карабутова // Аграрный научный журнал. – 2024. – № 9. – С. 155–161. – DOI 10.28983/asj.y2024i9pp155-161.

193. Чудинов, С. А. Укрепленные грунты в строительстве лесовозных автомобильных дорог : монография / С. А. Чудинов. – Екатеринбург : Уральский государственный лесотехнический университет, 2020. 174 с.

194. Чудинов, С. А. Совершенствование технологии укрепления грунтов в строительстве автомобильных дорог лесного комплекса : монография / С. А. Чудинов // Екатеринбург : Уральский государственный лесотехнический университет, 2022. 164 с.

195. Чудинов, С. А. Инновационные технологии транспортного освоения лесосырьевых баз и строительства автомобильных дорог общего пользования : монография / С. А. Чудинов, В. Н. Дмитриев, Е. Н. Халилова [и др.] // Екатеринбург : Уральский государственный лесотехнический университет, 2024. 181 с.

196. Чудинов, С. А. Влияние добавок-электролитов на кинетику структурообразования цементогрунтов конструкций лесовозных автомобильных дорог / С. А. Чудинов, С. И. Булдаков // Научное творчество молодежи - лесному комплексу России : материалы VII Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов и конкурса по программе "Умник". – Екатеринбург : Уральский государственный лесотехнический университет, 2011. – С. 73–75.

197. Чудинов, С. А. К вопросу укрепления переувлажненных грунтов на лесовозных автомобильных дорогах / С. А. Чудинов, А. В. Шумилов // Формирование регионального лесного кластера: социально-экономические и экологические проблемы и перспективы лесного комплекса : материалы VIII Международной научно-технической конференции. – Екатеринбург : Уральский государственный лесотехнический университет, 2011. – С. 79–81.

198. Чудинов, С. А. Повышение эффективности укрепления глинистых грунтов портландцементом с добавкой полиэлектролита / С. А. Чудинов // Актуальные вопросы проектирования автомобильных дорог. Сборник научных трудов ОАО ГИПРОДОРНИИ. – 2013. – № 4(63). – С. 121–129.

199. Чудинов, С. А. Повышение качества цементогрунтовых покрытий лесовозных дорог / С. А. Чудинов // Образование. Транспорт. Инновации. Строительство : сборник материалов II Национальной научно-практической конференции. – Омск : Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2019. – С. 459–462.

200. Чудинов, С. А. Современные добавки для стабилизации грунтов при строительстве лесовозных автомобильных дорог / С. А. Чудинов, А. А. Катнова, Е. Е. Чупров // Фундаментальные и прикладные исследования молодых учёных : сборник материалов IV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. – Омск : Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2020. – С. 174–177.

201. Чудинов, С. А. Технико-экономическое обоснование эффективности применения укрепленных грунтов / С. А. Чудинов, Е. Н. Шаламова // Эффективный ответ на современные вызовы с учетом взаимодействия человека и природы, человека и технологий: социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса : материалы XIII Международной научно-технической конференции. – Екатеринбург : Уральский государственный лесотехнический университет, 2021. – С. 469–472.

202. Чудинов, С. А. Повышение эффективности строительства и эксплуатации лесовозных автомобильных дорог / С. А. Чудинов,

Ю. О. Емельянова // Инновационное развитие техники и технологий наземного транспорта : сборник статей. – Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2021. – С. 30–31.

203. Чудинов, С. А. Повышение надежности лесовозных дорог в условиях изменения климата / С. А. Чудинов, О. Н. Байц // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XI Международной научно-практической конференции / Том Часть 2. – Гомель Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», 2021. – С. 46–48.

204. Чудинов, С. А. Влияние времени суток на технологию укрепления грунтов лесовозных дорог на основе цемента и пластифицирующих добавок / С. А. Чудинов, Н. В. Ладейщиков // Состояние и перспективы развития лесного комплекса в странах СНГ : сборник статей II Международной научно-технической конференции. – Минск : Белорусский государственный технологический университет, 2022. – С. 106–109.

205. Чудинов, С. А. Укрепление грунтов портландцементом с добавлением комплексной добавки, продлевающей строительный период / С. А. Чудинов, Н. В. Ладейщиков // Инновационный транспорт. – 2022. – № 4(46). – С. 48–51. – DOI 10.20291/2311-164X-2022-4-48-51.

206. Чудинов, С. А. К вопросу об организации подготовительных работ строительства транспортно-логистических путей освоения лесосырьевых баз / С. А. Чудинов, Н. В. Ладейщиков // Логистические системы в глобальной экономике. – 2023. – № 13. – С. 149–154.

207. Чудинов, С. А. Повышение эффективности строительства лесных автомобильных дорог из укрепленных грунтов / С. А. Чудинов, Н. В. Ладейщиков // Приоритетные и перспективные направления научно-технического развития Российской Федерации : материалы VI Всероссийской научно-практической конференции / Том Выпуск 1. – Москва : Государственный университет управления, 2023. – С. 182–184.

208. Чудинов, С. А. Комплексное изменение свойств грунтов при строительстве лесовозных магистралей / С. А. Чудинов, Н. В. Ладейщиков // Леса

России: политика, промышленность, наука, образование : материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова, 2023. – С. 567–570.

209. Чудинов, С. А. Физическая модификация укрепленных грунтов при строительстве лесовозных дорог / С. А. Чудинов, Н. В. Ладейщиков // Химия. Экология. Урбанистика : материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Пермь, 2023. – Т. 2. – С. 196–200.

210. Чудинов, С. А. Особенности строительства лесовозных дорог из цементогрунтов / С. А. Чудинов, Н. В. Ладейщиков // Инновационное развитие транспортного и строительного комплексов : материалы Международной научно-практической конференции / в 2-х частях. – Гомель : Белорусский государственный университет транспорта, 2023. – С. 428–430.

211. Чудинов, С. А. Эффективное использование местных материалов при строительстве лесовозных дорог / С. А. Чудинов, Н. В. Ладейщиков // Транспорт: логистика, строительство, эксплуатация, управление : сборник трудов Международной научно-практической конференции / Том Выпуск 7 (255). – Екатеринбург : Уральский государственный университет путей сообщения, 2023. – С. 131–134.

212. Чудинов, С. А. К вопросу повышения эффективности структурообразования цементогрунтов для устройства дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог / С. А. Чудинов, С. М. Морозов // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации : сборник материалов VIII Международной научно-практической конференции. – Омск : Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2023. – С. 498–501.

213. Чудинов, С. А. Ресурсосберегающая технология строительства дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог из укрепленных грунтов / С. А. Чудинов, Д. М. Маринских, П. А. Маринских // Эффективный ответ на современные вызовы с учетом взаимодействия человека и природы, человека и

технологий : материалы XV Международной научно-технической конференции. – Екатеринбург: Уральский государственный лесотехнический университет, 2024. – С. 448–450.

214. Шелгунов, Ю. В. Лесоэксплуатация и транспорт леса : учеб. для вузов / Ю. В. Шелгунов, А. К. Горюнов, И. В. Ярцев. – М. : Лесн. пром-сть, 1989. 517 с.

215. Юмашев, В. М. Возможности применения стабилизаторов, предлагаемых зарубежными фирмами / В. М. Юмашев, С. Г. Фурсов, В. С. Исаев // Автомобильные дороги. – 1995. – № 3–4. – С. 23–56.

216. Abbeche, K. Study of the effect of waste glass fibers incorporation on the collapsible soil stability behavior / K. Abbeche, G. Panczer, L. Belagraa // KnE Eng. – 2020.

217. Abdel, H. N. Utilization of polymer fibers and crushed limestone sand for stabilization of expansive clays in Amman area / H. N. Abdel // Int J Geotech Eng. – 2016. – 10 (5). – pp. 428–434.

218. Abdi, M. R. Effects of discrete short polypropylene fibers on behavior of artificially cemented kaolinite / M. R. Abdi, H. Mirzaeifar // Int J Civil Eng. – 2016. – 14 (4). – pp. 253–262.

219. Al-Akhras, N. M. Influence of fibers on swelling properties of clayey soil / N. M. Al-Akhras, M. F. Attom, K. M. Al-Akhras [et al.] // Geosynth Int. – 2008. – 15 (4). – pp. 304–309.

220. Ali, M. A. Carbon fibre reinforcement of cement / M. A. Ali, A. J. Majumdar, D. L. Raumen // Cement and Concrete Research. 1972. – pp. 201–212.

221. Ali, M. Engineering properties of expansive soil treated with polypropylene fibers / M. Ali, M. Aziz, M. Hamza // Geomech Eng. – 2020. – pp. 227–236.

222. Ayeldeen, M. The use of fiber to improve the characteristics of collapsible soil stabilized with cement / M. Ayeldeen, W. Azzam, M. G. Arab // Geotech Geol Eng. – 2022. – 40. – pp. 1873–1885.

223. Bakir, N. Experimental study of the effect of the glass fibers on reducing collapse of a collapsible soil / N. Bakir, K. Abbeche, G. Panczer // Geomech Eng. – 2017. – 12 (1). – pp. 71–83.

224. Beeghly, J. Dredge Material Stabilization Using the Pozzolanic or Sulfo-Pozzolanic Reaction of Lime By-Products to Make an Engineered Structural Fill / J. Beeghly, M. Schröck // International Journal of Soil, Sediment and Water. 2010. – vol. 3. iss.1. art. no. 6.

225. Changizi, F. Strength properties of soft clay treated with mixture of nano-SiO2 and recycled polyester fiber. / F. Changizi, A. Haddad // J. Rock Mech. Geotech. Eng. – 2015. – 7 (4). – pp. 367–378.

226. Chauhan, M. S. Performance evaluation of silty sand subgrade reinforced with fly ash and fibre / M. S. Chauhan, S. Mittal, B. Mohanty // Geotext Geomembr. – 2008. – 26 (5). – pp. 429–435.

227. Chen, M. Laboratory evaluation on the effectiveness of polypropylene fibers on the strength of fiber-reinforced and cement-stabilized Shanghai soft clay / M. Chen, S. L. Shen, A. Arulrajah [et al.] // Geotext Geomembr. – 2015. – 43 (6). – pp. 515–523.

228. Chudinov, S. Improving the physical and mechanical properties of fortified soil for road construction in the forest zone / S. Chudinov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, St. Petersburg, 2019. – St. Petersburg, 2020. – P. 012007. – DOI 10.1088/1757-899X/817/1/012007.

229. Chudinov, S. The use of ash-mineral mixtures for the construction of high-strength coatings of forest roads / S. Chudinov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : 5, Policy, Industry, Science and Education, Saint Petersburg, 2020. – Saint Petersburg, 2020. – P. 012010. – DOI 10.1088/1755-1315/574/1/012010.

230. Consoli, N. C. Effect of fiber reinforcement on the isotropic compression behavior of a sand / N. C. Consoli, M. D. Casagrande, M. R. Coop // J. Geotech. Geoenviron. Eng. – 2005. – 131 (11). – pp. 1434–1436.

231. Consoli, N. C. Fiber reinforcement effects on sand considering a wide cementation range / N. C. Consoli, M. A. Vendruscolo, A. Fonini [et al.] // Geotext Geomembr. – 2009. – 27(3). – pp. 196–203.

232. De Jesús Arrieta Baldovino, J. Geopolymers based on recycled glass powder for soil stabilization / J. De Jesús Arrieta Baldovino, R. Dos Santos Izzo, J. L. Rose // Geotechn Geolog Eng. – 2020. – 38(4). – pp. 4013–4031.

233. Elkhebu, A. Effect of incorporating multifilament polypropylene fibers into alkaline activated fly ash soil mixtures / A. Elkhebu, A. Zainorabidi, A. Asadi [et al.] // Soils Found. – 2019. – 59. – pp. 2144–2154.

234. Estabragh, A. R. Behavior of cement-stabilized clay reinforced with nylon fiber / A. R. Estabragh, P. Namdar, A. A. Javadi // Geosynth Int. – 2012. – 19 (1). – pp. 85–92.

235. Fatahi, B. Shrinkage properties of soft clay treated with cement and geofibers / B. Fatahi, T. M. Le, B. Fatahi [et al.] // Geotech. Geol. Eng. – 2013. – 31. – pp. 1421–1435.

236. Festugato, L. Cyclic shear response of fibre-reinforced cemented paste backfill / L. Festugato, A. Fourie, N. C. Consoli // Geotech Lett. – 2013. – 3. – pp. 5–12.

237. Fowlar, D. Civil Eng / D. Fowlar // 1974. – pp. 731–736.

238. Fwa, T. F. Properties of fibre reinforced concrete for rigid pavement / T. F. Fwa, P. Paramasivam // Proc. Int. Symp. Fibre Reinforced Concr. – Rotterdam, 1987. – pp. 5.17–5.27.

239. Garg, A. Investigation of mechanical factor of soil reinforced with four types of fibers: An integrated experimental and extreme learning machine approach / A. Garg, S. Bordoloi, S. Mondal [et al.] // J. Nat. Fibers. – 2020. – 17 (5). – pp. 650–664.

240. Ghorbani, A. Prediction of UCS and CBR of microsilica-lime stabilized sulfate silty sand using ANN and EPR models; application to the deep soil mixing / A. Ghorbani, H. Hasanzadehshooiili // Soils Found. – 2018. – 58. – pp. 34–49.

241. Godoy, V. B. Effects of curing temperature on sand-ash-lime mixtures with fibres and NaCl / V. B. Godoy, L. F. Tomas, M. Benetti [et al.] // Geotech Geol Eng. – 2023. – 3. – pp. 1–15.

242. Gong, Y. Stability analysis of soil embankment slope reinforced with polypropylene fiber under freeze-thaw cycles / Y. Gong, Y. He, C. Han [et al.] // Adv Mater Sci Eng. – 2019. – P. 10.

243. Hamidi, A. Effect of fiber reinforcement on triaxial shear behavior of cement treated sand / A. Hamidi, M. Hooresfand // Geotext Geomembr. – 2013. – 36. – pp. 1–9.

244. Hannant, D. J. Cornposites / D. J. Hannant, J. J. Zensveld, D. C. Hughes // 1978. 83 p.

245. Hejazi, S. M. A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers / S. M. Hejazi, M. Sheikhzadeh, S. M. Abtahi [et al.] // Constr. Build. Mater. – 2012. – 30. – pp. 100–116.

246. Jejcic, D. Mortiers et cimente armes de fibres / D. Jejcic, F. Zanghellini // Annales de institute technique du batiment et des travaux pubics. 1977. – pp. 315–317.

247. Johnston, C. D. Steel fibre – reinforced concrete: present and future in ingineering construction / C. D. Johnston // Composist. – 1982. – Vol. 13, № 2. – pp. 113–121.

248. Jones, C. Soil Consolidation and Strengthening Using Electrokinetic Geosynthetics. Concepts and Analysis / C. Jones // Geosynthetics. – 2006. pp. 411–414.

249. Kawamura, M. A Function of free Lime and Characteristics of Cement Hydration in Compacted Clay-Cement Mixtures / M. Kawamura, S. Hasaba // Proc. of JSCE, July 1971. – 1971. – No 191. – pp. 128–137.

250. Khan, M. A. A Study of Multilayer Soil-Fly Ash Layered System under Cyclic Loading / M. A. Khan, A. Usmani, S. S. Shah, H. Abbas // International Journal of Civil Engineering. – 2008. – vol. 6. no. 2. – pp. 73–89.

251. Kohei, S. Hardening Treatment of Muddy Soil with Coal Fly Ashes / Sawa Kohei, Seishi Tomohisa [and etc.] // J. Soc. Mat. Sci., Japan. – Vol. 49, No. 3. – pp. 348–351.

252. Lee, Seong Tatt. Modification and Stabilization of Residual Soil with Cement Additive / Seong Tatt Lee, Faisal Haji Ali // Universiti Malaya pada 11 dan 12 Mac 2003. Prosiding Seminar Penyelidikan Jangka Pendek. – 2003. – pp. 141–150.

253. Lian, B. Effect of randomly distributed fibre on triaxial shear behavior of loess / B. Lian, J. Peng, H. Zhan, X. Cui // Bull Eng Geol Env. – 2019.

254. Maher, M. Mechanical properties of kaolinite/fibre soil composite / M. Maher, Y. Ho // J. Geotech. Eng. – 1994. – 120 (8). – pp. 1381–1393.

255. Mangm, P. S. Compatibility of steel fibre reinforced concrete / P. S. Mangm, R. N. Swamy // Concrete. – 1974. – № 5. – pp. 34–35.

256. Mavliev, L. Road Soil Cement with Complex Additives Based on Organosilicon Compounds and Electrolytes / L. Mavliev, P. Bulanov, E. Vdovin, V. Zaharov, A. Gimazov // ZKG: Zement-Kalk-Gips International. – 2016. – no. 9 (69). – pp. 49–54.

257. Mazhar, S. Stabilization of expansive clay by fibre-reinforced alkali-activated binder: an experimental investigation and prediction modeling / S. Mazhar, A. GuhaRay // Int J Geotech Eng. – 2021. – 15. – pp. 977–993.

258. McChesney, M. Inst. Min. Metall / M. McChesney, J. S. Afr // 1976. 114 p.

259. Mirzababaei, M. Effect of fiber reinforcement on shear strength and void ratio of soft clay / M. Mirzababaei, A. Arulrajah, A. Haque [et al.] // Geosynth Int. – 2018. – 25 (4). – pp. 471–480.

260. Moghal, A. A. B. Effect of polypropylene fibre reinforcement on the consolidation, swell and shrinkage behaviour of lime-blended expansive soil / A. A. B. Moghal, C. S. Bhaskar, B. Chittoori [et al.] // Int. J. Geotech. Eng. – 2017. – 12 (5). – P. 1297002.

261. Mohan, M. A study on stabilization of subgrade soil using natural fibers (coir and jute) / M. Mohan // Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol. – 2017. – 10. – P. 15680.

262. Mousavi, F. Unconfined compression strength of polymer stabilized forest soil clay / F. Mousavi, E. Abdi // Geotech Geol Eng. – 2022. – № 40. – pp. 4095–4107.

263. Muñoz, Y. O. The Behavior of Stabilized Reinforced Soil for Road Embankments Application / Y. O. Muñoz, J. L. de Almeida, A. J. E. V. Mora // Geotech Geol Eng. – 2023. – pp. 2599–2628.

264. Nezhad, M. G. Effect of natural and synthetic fibers reinforcement on California bearing ratio and tensile strength of clay / M. G. Nezhad, A. Tabarsa, N. Latifi // J Rock Mech Geotech Eng. – 2021. – 13. – pp. 626–642.

265. Olgun, M. Effects of polypropylene fiber inclusion on the strength and volume change characteristics of cement-fly ash stabilized clay soil / M. Olgun // Geosynth. Int. – 2013. – 20 (4). – pp. 26–275.

266. Ordoñez Muñoz, Y. The role of rice husk ash, cement and polypropylene fibers on the mechanical behavior of a soil from Guabirotuba formation / Y. Ordoñez Muño, L. dos Santos, R. Izzo [et al.] // Transp Geotech. – 2021. – 31. – P. 100673.

267. Piegat, A. Fuzzy Modeling and Control / A. Piegat. – Physica-Verlag, 2001. 760 p.

268. Pinchin, D. J. Interfacial Phenomena in Steel Fibre Reinforced Cement. Structure and Strength of the Interfacial Region / D. J. Pinchin, D. Tabor // 1978. – 8. – pp. 15–24.

269. Prabakar, J. Influence of Fly Ash on Strength Behavior of Typical Soil / J. Prabakar, N. Dendorkar, R. K. Morchhale // Construction and Building Materials. – 2004. – vol. 18. – pp. 263–267.

270. Reinsdorf, S. Gasfaserbewehrter Mortel und Beton // Bauforschung Baupraxis. – 1985. – № 154. – pp. 1–49.

271. Shen, D. Effect of polypropylene plastic fibers length on cracking resistance of high performance concrete at early age / D. Shen, X. Liu, X. Zeng [et al.] // Constr Build Mater. – 2020. – 244. – P. 117874.

272. Shukla, S. K. Fundamentals of Fibre-Reinforced Soil Engineering / S. K. Shukla // Springer. – 2017.

273. Sooraj, P. Soil stabilization using bottom ash and areca fiber: Experimental investigations and reliability analysis / P. Sooraj // Am. Soc. Civ. Eng. – 2018. – 10. – P. 1061.

274. Sukontasukkul, P. Use of steel and polypropylene fibers to improve flexural performance of deep soil-cement column / P. Sukontasukkul, P. Jamsawang // Const Build Mater. – 2012. – 29. – pp. 201–205.

275. Swamy, R. N. Infinence of fiber geometry on the properties of steel fiber reinforced concrete / R. N. Swamy, P. S. Mangat // Cement and concrete research. – 1974. – Vol. 4, № 3. – pp. 451–465.

276. Swamy, R. N. Some statistical consideration of steel fiber composites / R. N. Swamy, H. Stavrides // Cement and Concrete Research. – 1976. – V. 6.12. – pp. 201–206.

277. Tang, C. S. Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil / C. S. Tang, B. Shi, Y. J. Cui [et al.] // Geotext. Geomembranes. – 2007. – 25 (3). – pp. 194–202.

278. Tang, C. S. Desiccation cracking behavior of polypropylene fiberreinforced clayey soil / C. S. Tang, B. Shi, Y. J. Cui [et al.] // Can. Geotech. J. – 2012. – 49 (9). – pp. 1088–1101.

279. Tang, C. S. Tensile strength of fiber reinforced soil / C. S. Tang, D. Y. Wang, Y. J. Cui [et al.] // J. Mater. Civ. Eng. – 2016. – 28 (7).

280. Tiwari, N. Effect of curing on micro-physical performance of polypropylene fiber reinforced and silica fume stabilized expansive soil under freezing thawing cycles / N. Tiwari, N. Satya, K. Singh // Sci Rep. – 2020. – 10. – P. 6724.

281. Vandewalle, M. The use of fiber reinforsed concrete in road constructions / M. Vandewalle, N. V. Bekaert // Proc. Int. Symp. Fibre Reinforced Concr. – Rotterdam, 1988. – pp. 6.111–6.119.

282. Vijayan, D. S. Effect of Solid Waste Based Stabilizing Material for Strengthening of Expansive Soil – A Review / D. S. Vijayan // Environmental Technology & Innovation. – 2020. – vol. 20. – P. 101108.

283. Wei, H. Engineering and environmental evaluation of silty clay modified by waste fly ash and oil shale ash as a road subgrade material / H. Wei, Y. Zhang, J. Cui [et al.] // Constr Build Mater. – 2019. – 196. – pp. 204–213.

284. Yadav, J. S. Strength behaviour of clayey soil mixed with pond ash, cement and randomly distributed fibres / J. S. Yadav, S. K. Tiwar, P. Shekhwat // Transp Infrastruct Geotechnol. – 2018. – 5. – pp. 191–209.

285. Zentar, R. Comparative study of stabilization/solidification of dredged sediments with ordinary Portland cement and calcium sulfo-aluminate cement in the framework of valorization in road construction material / R. Zenta, H. Wan, D. Wang // Constr Build Mater. – 2021. – 279. – P. 122447.

Приложение 1

Определение минимально необходимого числа параллельных образцов при проведении лабораторных исследований

При условии обеспечения точности измерений 5% и уровне надежности результатов 0,95, необходимое количество образцов при определении физико-механических показателей фиброцементогрунтовых композиций устанавливалось по формуле [5]:

$$n = \frac{u^2 S_n N}{(N-1)\Delta^2 + u^2 {S_n}^2} \qquad (П.1.1)$$

где: n – необходимое число наблюдений;

S_n – дисперсия выборки;

N – число проведенных предварительных испытаний;

Δ – допустимое отклонение от среднего значения;

U – табличная величина отклонения, выбираемая для заданного уровня достоверности p при двухстороннем критерии (2Q) (при p=0,95, u=1,96).

На основании результатов лабораторных исследований (табл. П.1.1), определено необходимое количество образцов при определении таких физико-механических показателей фиброцементогрунтовых композиций, как предел прочности на сжатие (опыт № 1) и предел прочности на растяжение при раскалывании (опыт № 2).

Вычисление среднего значения результатов из n измерений выполнялось по формуле:

$$\bar{y}_n = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i \qquad (П.1.2)$$

где: $\bar{y}_n$ – среднее значение результатов опыта;

n – количество образцов в опыте;

y_i – единичный результат наблюдения в опыте.

Оценка дисперсии выборки из n значений определялось по формуле:

$$S_n = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \cdot \sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y}_n)^2} \qquad \text{(П.1.3)}$$

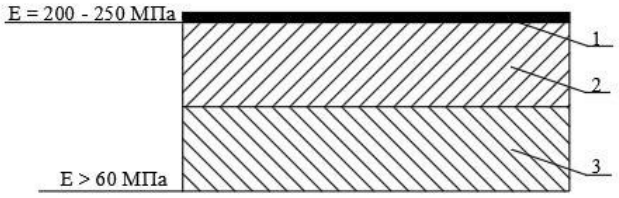
Таблица П.1.1 – Статистическая обработка результатов лабораторных испытаний при определении минимально необходимого числа параллельных образцов

№	Результаты наблюдений, МПа			Число измерений, N	Средне-арифметическое значение, $\bar{y}_n$, МПа	Оценка дисперсии, S_n	Число необходимых наблюдений
1	2,74	2,73	2,76	15	2,722	0,03649	2,64
	2,70	2,69	2,68				
	2,68	2,72	2,69				
	2,74	2,75	2,72				
	2,67	2,77	2,79				
2	1,03	1,01	1,07	15	1,039	0,0464	2,96
	1,07	1,08	0,98				
	1,09	1,10	1,01				
	1,08	1,05	0,97				
	1,06	1,04	0,95				

Приложение 2

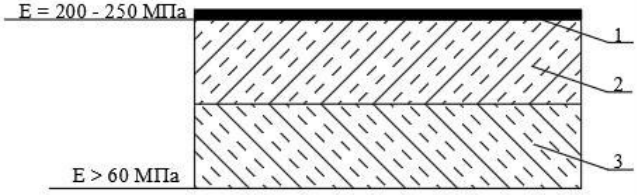
Типовые конструкции лесовозных лесных дорог на основе фиброцементогрунтовых композиций

1. Лесовозные лесные дороги с грузооборотом более 0,35 млн. т нетто / год (Iл категория)



Тип 1.1

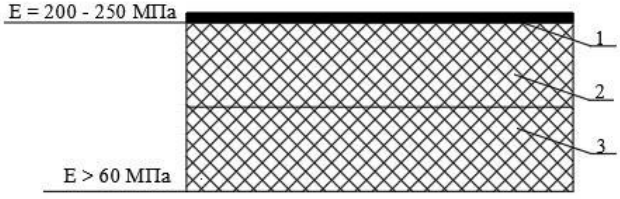
1 - поверхностная обработка с использованием щебня фракции 5-10 мм и битума БНД 100/130, h = 10-20 мм;
2 - фиброцементогрунт, h ≥ 250 мм (по расчету);
3 - фиброцементогрунт, h ≥ 250 мм (по расчету)



Тип 1.2

в условиях переувлажнённых естественных грунтов

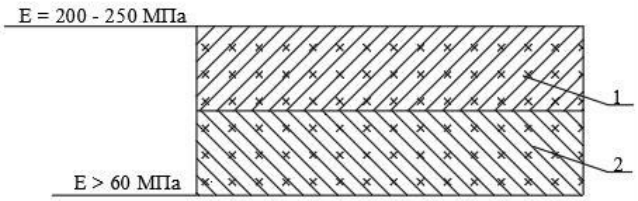
1 - поверхностная обработка с использованием щебня фракции 5-10 мм и битума БНД 100/130, h = 10-20 мм;
2 - фиброцементогрунт с добавкой полиДМДААХ, h ≥ 250 мм (по расчету);
3 - фиброцементогрунт с добавкой полиДМДААХ, h ≥ 250 мм (по расчету)



Тип 1.3

в условиях переувлажнённых естественных грунтов

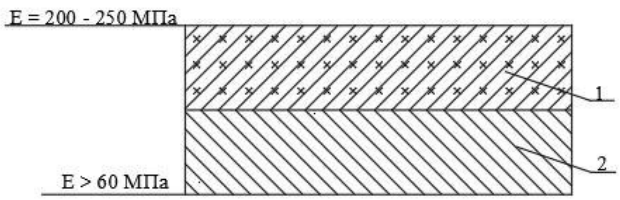
1 - поверхностная обработка с использованием щебня фракции 5-10 мм и битума БНД 100/130, h = 10-20 мм;
2 - фибоминералогрунт, h ≥ 250 мм (по расчету);
3 - фибоминералогрунт, h ≥ 250 мм (по расчету)



Тип 1.4

на опасных участках с повышенным коэффициентом сцепления

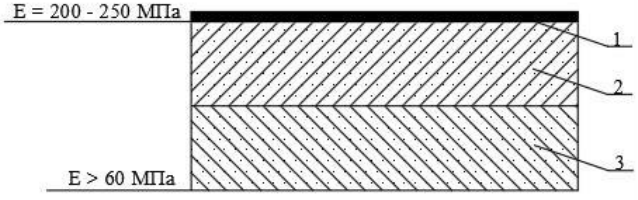
1 - фибробитумоцементогрунт, h ≥ 250 мм (по расчету);
2 - фибробитумоцементогрунт, h ≥ 250 мм (по расчету)



Тип 1.5

на опасных участках с повышенным коэффициентом сцепления

1 - фибробитумоцементогрунт, h ≥ 250 мм (по расчету)
2 - фиброцементогрунт, h ≥ 250 мм (по расчету)

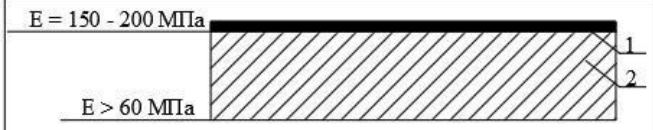


Тип 1.6

в условиях кислых естественных грунтов, pH < 6

1 - поверхностная обработка с использованием щебня фракции 5-10 мм и битума БНД 100/130, h = 10-20 мм;
2 - фиброзолоцементогрунт, h ≥ 250 мм (по расчету);
3 - фиброзолоцементогрунт, h ≥ 250 мм (по расчету)

2. Лесовозные лесные дороги с грузооборотом от 0,14 до 0,35 млн. т нетто / год (IIл категория)



Тип 2.1

1 - поверхностная обработка с использованием щебня фракции 5-10мм и битума БНД 100/130, h = 10-20 мм;
2 - фиброцементогрунт, h ≥ 250 мм (по расчету)



Тип 2.2

в условиях переувлажнённых естественных грунтов

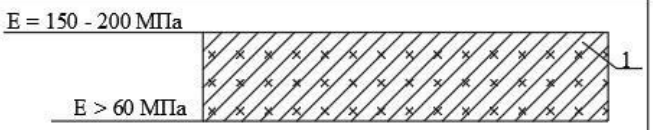
1 - поверхностная обработка с использованием щебня фракции 5-10 мм и битума БНД 100/130, h = 10-20 мм;
2 - фиброцементогрунт с добавкой полиДМДААХ, h ≥ 250 мм (по расчету)



Тип 2.3

в условиях переувлажнённых естественных грунтов

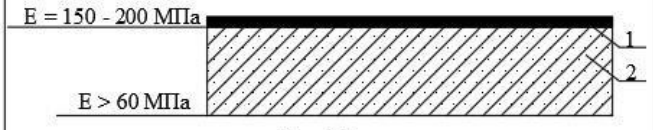
1 - поверхностная обработка с использованием щебня фракции 5-10 мм и битума БНД 100/130, h = 10-20 мм;
2 - фибоминералогрунт, h ≥ 250 мм (по расчету)



Тип 2.4

на опасных участках с повышенным коэффициентом сцепления

1 - фибробитумоцементогрунт, h ≥ 250 мм (по расчету)

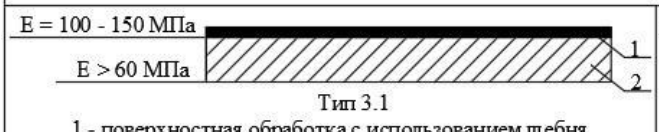


Тип 2.5

в условиях кислых естественных грунтов, pH<6

1 - поверхностная обработка с использованием щебня фракции 5-10 мм и битума БНД 100/130, h = 10-20 мм;
2 - фиброзолоцементогрунт, h ≥ 250 мм (по расчету)

3. Лесовозные лесные дороги с грузооборотом менее 0,14 млн. т нетто / год (IIIл категория)



Тип 3.1

1 - поверхностная обработка с использованием щебня фракции 5-10 мм и битума БНД 100/130, h = 10-20 мм;
2 - фиброцементогрунт, h ≥ 200 мм (по расчету)



Тип 3.2

в условиях переувлажнённых естественных грунтов

1 - поверхностная обработка с использованием щебня фракции 5-10 мм и битума БНД 100/130, h = 10-20 мм;
2 - фиброцементогрунт с добавкой полиДМДААХ, h ≥ 200 мм (по расчету)



Тип 3.3

в условиях переувлажнённых естественных грунтов

1 - поверхностная обработка с использованием щебня фракции 5-10 мм и битума БНД 100/130, h = 10-20 мм;
2 - фибоминералогрунт, h ≥ 200 мм (по расчету)



Тип 3.4

на опасных участках с повышенным коэффициентом сцепления

1 - фибробитумоцементогрунт, h ≥ 200 мм (по расчету)



Тип 3.5

в условиях кислых естественных грунтов, pH < 6

1 - поверхностная обработка с использованием щебня фракции 5-10 мм и битума БНД 100/130, h = 10-20 мм;
2 - фиброзолоцементогрунт, h ≥ 200 мм (по расчету)

Приложение 3

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Уральский государственный лесотехнический университет»

СОГЛАСОВАНО

Свердловское региональное отраслевое некоммерческое объединение работодателей «Уральский союз лесопромышленников»
Президент Союза

_____ Мехренцев А.В.
«24» апреля 2025 года

РАЗРАБОТАНО

Инженерно-технический институт Уральского государственного лесотехнического университета
Проректор по НРиИД

_____ Фомин В.В.
«17» апреля 2025 года

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РЕГЛАМЕНТ

на устройство конструкций лесовозных лесных дорог из фиброцементогрунтовых композиций с высокими транспортно-эксплуатационными показателями

Руководитель темы,
заведующий кафедрой
автомобильных дорог, мостов
и тоннелей, к.т.н., доцент _____ С. А. Чудинов

Екатеринбург
2025

Взаим. инв.
Подпись и дата
Инв.№ подл.

Приложение 4

ООО «ОУС Леском» Российская Федерация

Общество с ограниченной ответственностью «ОУС Леском»
624980, г. Серов, Свердловская область, ул. Орджоникидзе, 81
Тел.: 8 (34385) 6-89-83, 6-89-88, 89089230014, Email: polus-1@mail.ru
ИНН 6632019864 КПП 668001001

УТВЕРЖДАЮ:
Директор ООО «ОУС Леском»
_____ Е.В. Куликова
«30» августа 2023 г.

АКТ

о строительстве опытных участков на лесовозной лесной дороге с покрытиями из фиброцементогрунтовых композиций

Комиссия в составе заместителя директора по лесопользованию ООО «ОУС Леском» Крохмалева А.П., начальника передвижной лаборатории ООО «Уральский дорожный научно-исследовательский центр» Ивонина М.А., заведующего кафедрой «Автомобильных дорог, мостов и тоннелей» ФГБОУ ВО «УГЛТУ» к.т.н., доцента Чудинова С.А. составили настоящий акт по результатам строительства опытных участков № 1, № 2, № 3, № 4, № 5, построенных ООО «ОУС Леском» на лесовозной лесной дороге III-л категории на территории ГКУ СО «Карпинское лесничество».

Характеристика опытных участков

Протяженность каждого из опытных участков №№ 1-5 составляет 25 м. Дорожная одежда представляет собой конструкцию из слоя поверхностной обработки, уложенного на слой фиброцементогрунта, толщиной 0,25 м.

В период строительства участки имели хорошее состояние, земляное полотно было предварительно спрофилировано и уплотнено.

Строительство проходило в условиях переменной облачности, температура воздуха +21°С, влажность воздуха 63%.

Строительство опытных участков производилось с использованием следующей дорожно-строительной техники: горизонтальный смеситель на базе колесного мини-погрузчика CASE SV300B; каток SDLG RS8140; распределитель вяжущего BOMAG BS 12000 на базе трактора Т-150К;

комбинированная дорожная машина КО-806-21; автогрейдер ЧСДМ ДЗ-98; автогрудронатор АС-65115; битумощебнераспределитель (чипсиллер) ДС-180; комплекс измерительной передвижной дорожной лаборатории ТРАССА 123000089000. Зав. № 737.

Коэффициент уплотнения на всех опытных участках составил 0,98.

На всех опытных участках с целью создания оптимальных условий структурообразования на поверхность фиброцементогрунта разливалась битумная эмульсия ЭБДК С в количестве 0,5-0,8 л/м^2.

Устройство поверхностной обработки осуществлялось через 5 суток после окончательного уплотнения фиброцементогрунта битумощебнераспределителем ДС-180.

Заместитель директора по лесопользованию ООО «ОУС Леском» А.П. Крохмалев

Начальник передвижной лаборатории ООО «Уральский дорожный научно-исследовательский центр» М. А. Ивонин

Заведующий кафедрой «Автомобильных дорог, мостов и тоннелей» ФГБОУ ВО «УГЛТУ», к.т.н. доцент С. А. Чудинов

Проспект

УТВЕРЖДАЮ:

Директор ООО «Проспект »

_____Анчугов Е.П.

«28» июня 2024 г.

АКТ

о строительстве опытных участков на лесовозной лесной дороге

с покрытиями из фиброцементогрунтовых композиций

Комиссия в составе Ведущего инженера ПТО ООО «Проспект» Михайловой Н.Л., начальника передвижной лаборатории ООО «Уральский дорожный научно-исследовательский центр» Ивонина М.А., заведующего кафедрой «Автомобильных дорог, мостов и тоннелей» ФГБОУ ВО «УГЛТУ» к.т.н., доцента Чудинова С.А. составили настоящий акт по результатам строительства опытных участков № 6, № 7, № 8, № 9, № 10, построенных ООО «Проспект» на лесовозной лесной дороге III-л категории на территории ГКУ СО «Ирбитское лесничество».

Характеристика опытных участков

Протяженность каждого из опытных участков №№ 6-10 составляет 25 м. Дорожная одежда представляет собой конструкцию из слоя поверхностной обработки, уложенного на слой фиброцементогрунта, толщиной 0,25 м.

В период строительства участки имели хорошее состояние, земляное полотно было предварительно спрофилировано и уплотнено.

Строительство проходило в условиях переменной облачности, температура воздуха +22°С, влажность воздуха 54%.

Строительство опытных участков производилось с использованием следующей дорожно-строительной техники: дорожная фреза TSM XM2005; каток XCMG XS183J; распределитель вяжущего BOMAG BS 12000 на базе трактора Т-150К; комбинированная дорожная машина КО-806-24; автогрейдер XCMG

GR165; автогрудронатор ДС-142Б; битумощебнераспределитель (чипсиллер) ДС-180; комплекс измерительной передвижной дорожной лаборатории ТРАССА 123000089000. Зав. № 737.

Коэффициент уплотнения на всех опытных участках составил 0,98.

На всех опытных участках с целью создания оптимальных условий структурообразования на поверхность фиброцементогрунта разливалась битумная эмульсия ЭБДК С в количестве 0,5-0,8 л/м^2.

Устройство поверхностной обработки осуществлялось через 5 суток после окончательного уплотнения фиброцементогрунта битумощебнераспределителем ДС-180.

Ведущий инженер ПТО

ООО «Проспект» Н.Л. Михайлова

Начальник передвижной лаборатории

ООО «Уральский дорожный научно-исследовательский центр»

М. А. Ивонин

Заведующий кафедрой

«Автомобильных дорог, мостов и тоннелей»
ФГБОУ ВО «УГЛТУ», к.т.н. доцент

С. А. Чудинов

Приложение 5

Результаты исследований модуля упругости конструкций лесовозных лесных дорог в различные сроки набора прочности фиброцементогрунтовых композиций

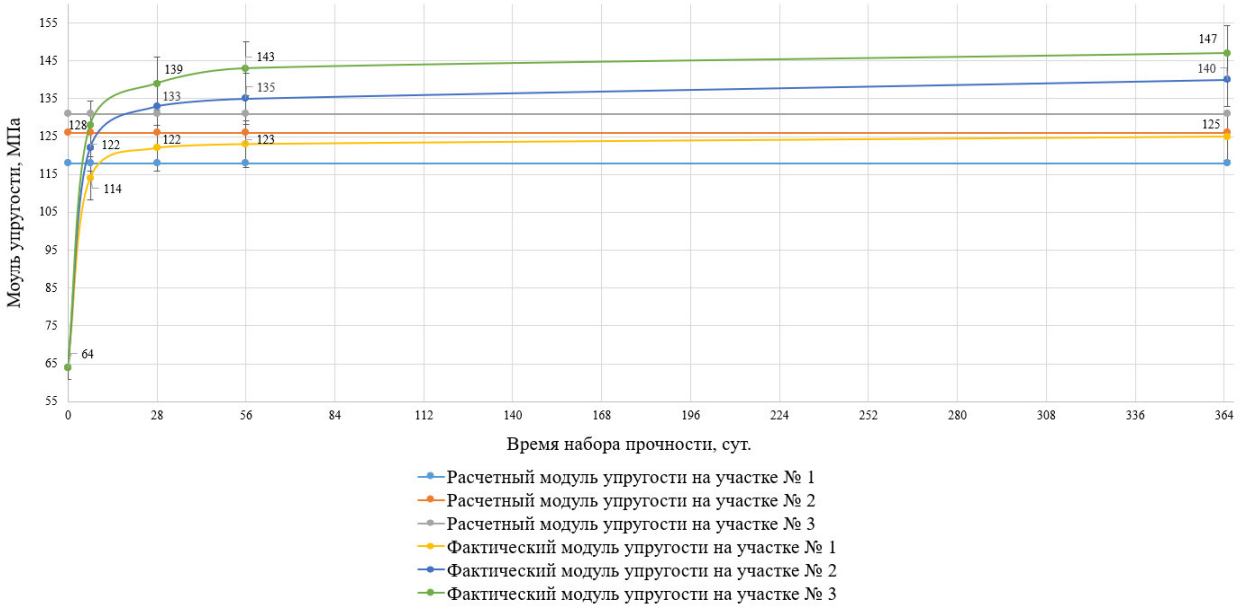


Рисунок П.5.1 – Изменение модуля упругости на опытных участках №№ 1-3 в зависимости от времени набора прочности

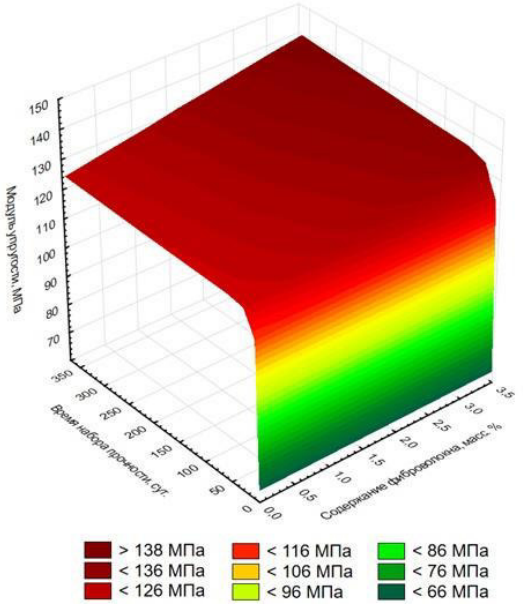


Рисунок П.5.2 – Поверхность отклика модуля упругости покрытия из фиброцементогрунта в зависимости от содержания фибры на основе базальтового волокна из отходов производства теплоизоляционных плит и времени набора прочности

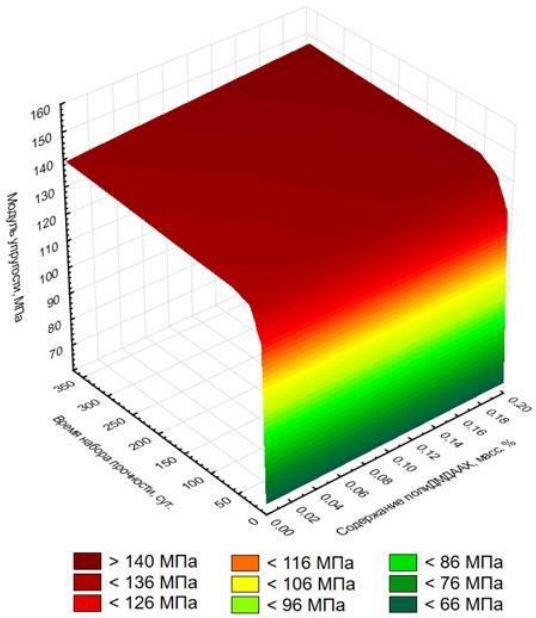


Рисунок П.5.3 – Поверхность отклика модуля упругости покрытия из фиброцементогрунта на основе базальтового волокна из отходов производства теплоизоляционных плит в зависимости от содержания полиДМДААХ и времени набора прочности

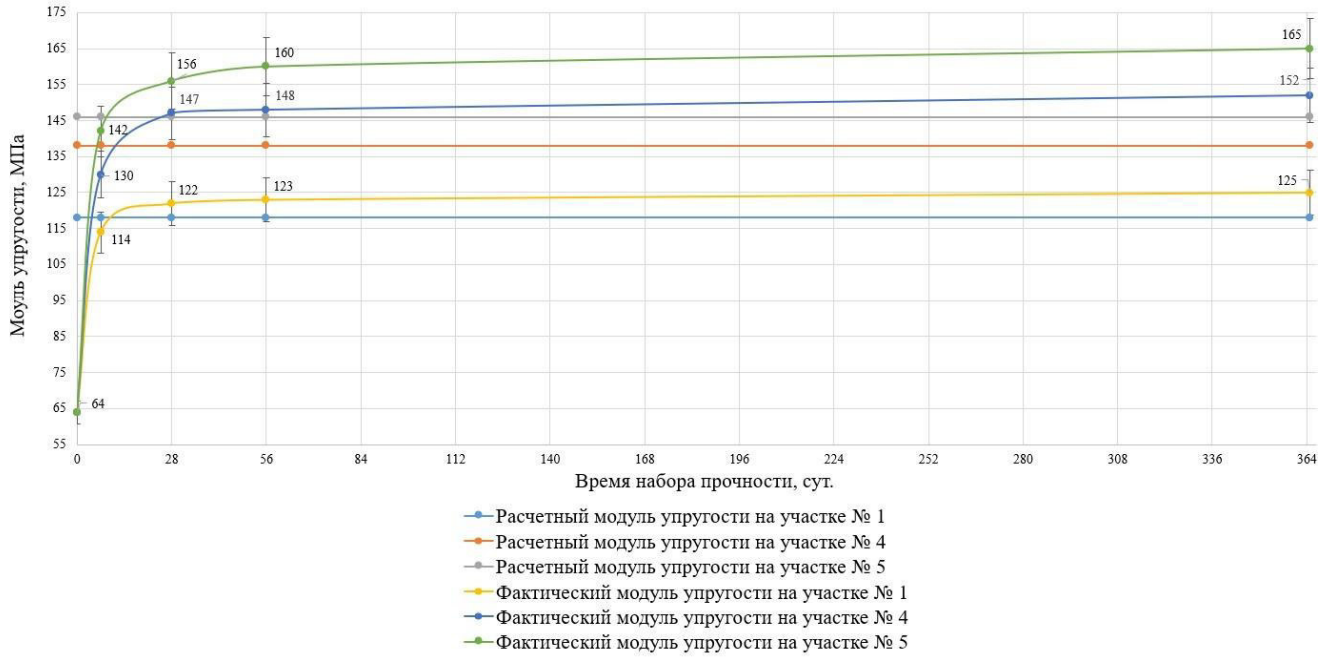


Рисунок П.5.4 – Изменение модуля упругости на опытных участках №№ 1, 4, 5 в зависимости от времени набора прочности

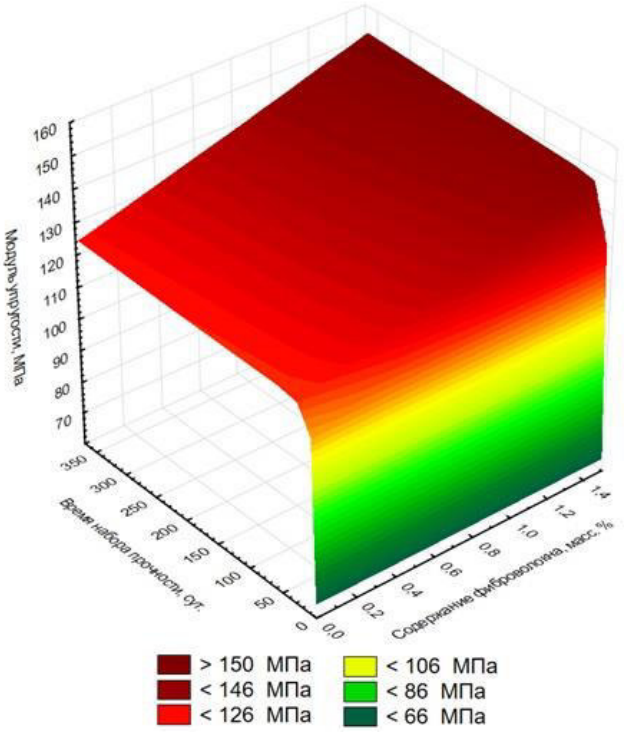


Рисунок П.5.5 – Поверхность отклика модуля упругости покрытия из фиброцементогрунта в зависимости от содержания базальтовой фибры и времени набора прочности

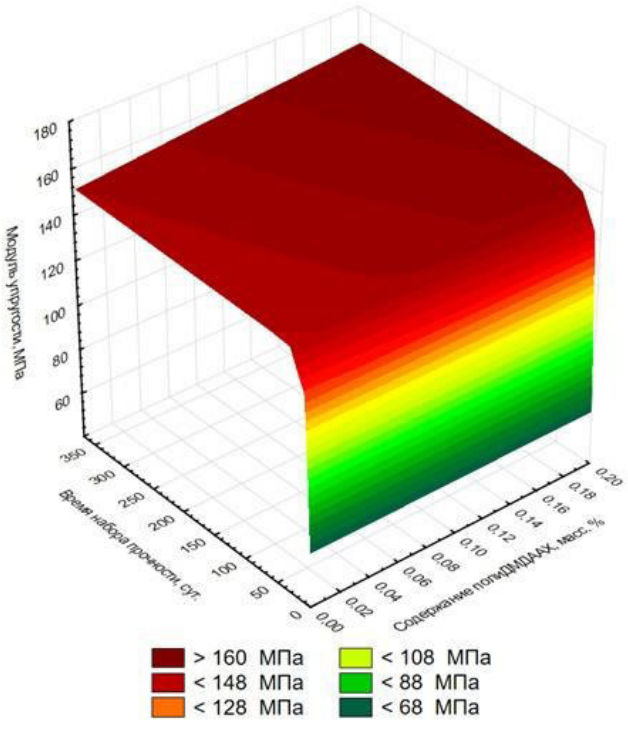


Рисунок П.5.6 – Поверхность отклика модуля упругости покрытия из фиброцементогрунта на основе базальтового волокна в зависимости от содержания полиДМДААХ и времени набора прочности

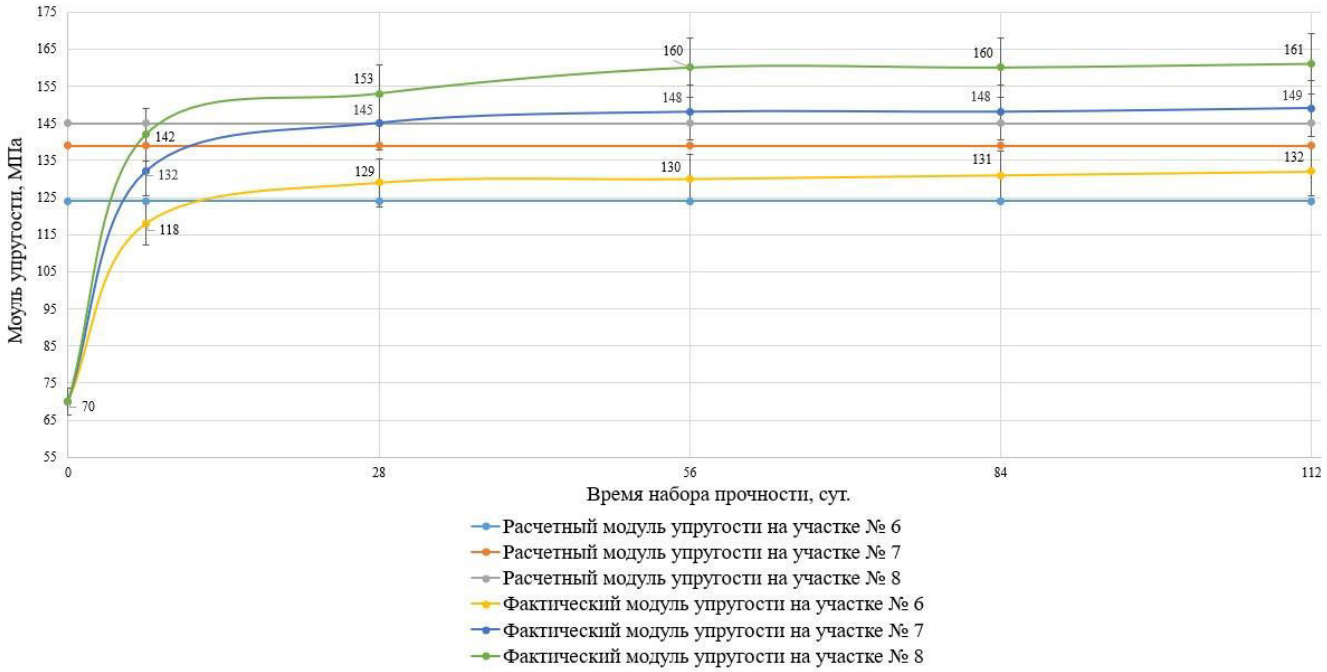


Рисунок П.5.7 – Изменение модуля упругости на опытных участках №№ 6-8 в зависимости от времени набора прочности

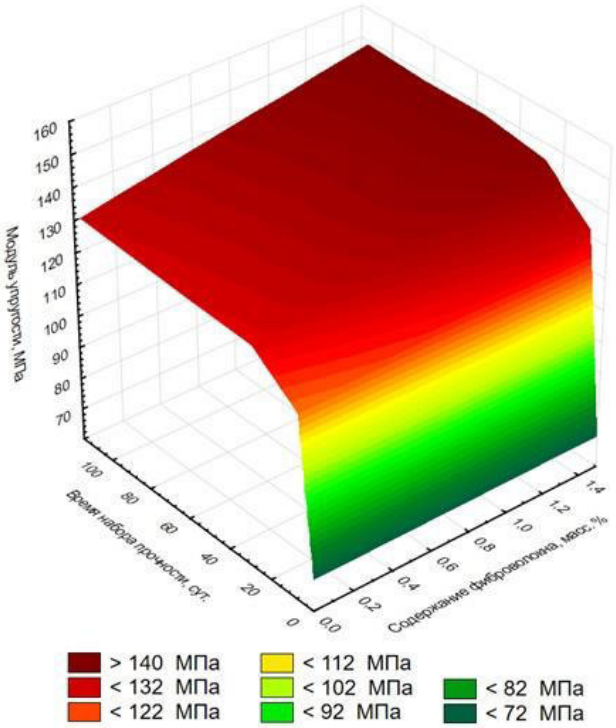


Рисунок П.5.8 – Поверхность отклика модуля упругости покрытия из фиброцементогрунта в зависимости от содержания стеклянной фибры и времени набора прочности

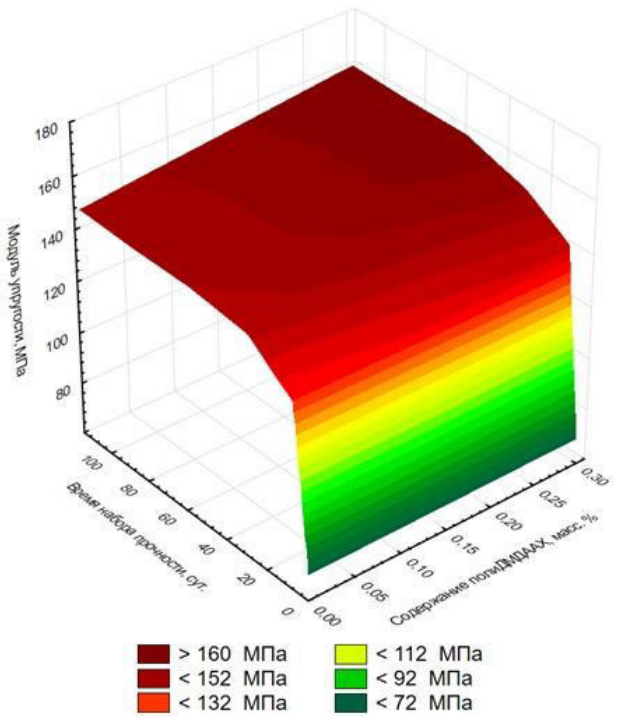


Рисунок П.5.9 – Поверхность отклика модуля упругости покрытия из фиброцементогрунта на основе стеклянного волокна в зависимости от содержания полиДМДААХ и времени набора прочности

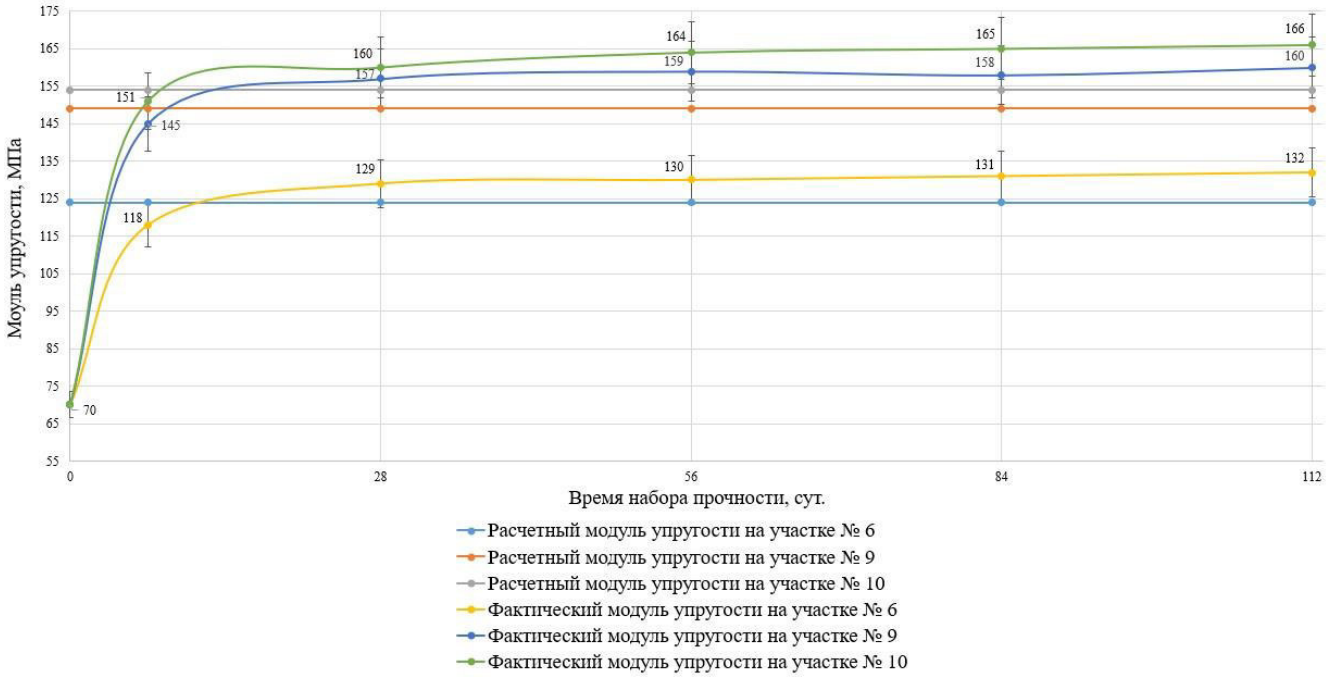


Рисунок П.5.10 – Изменение модуля упругости на опытных участках №№ 6, 9, 10 в зависимости от времени набора прочности

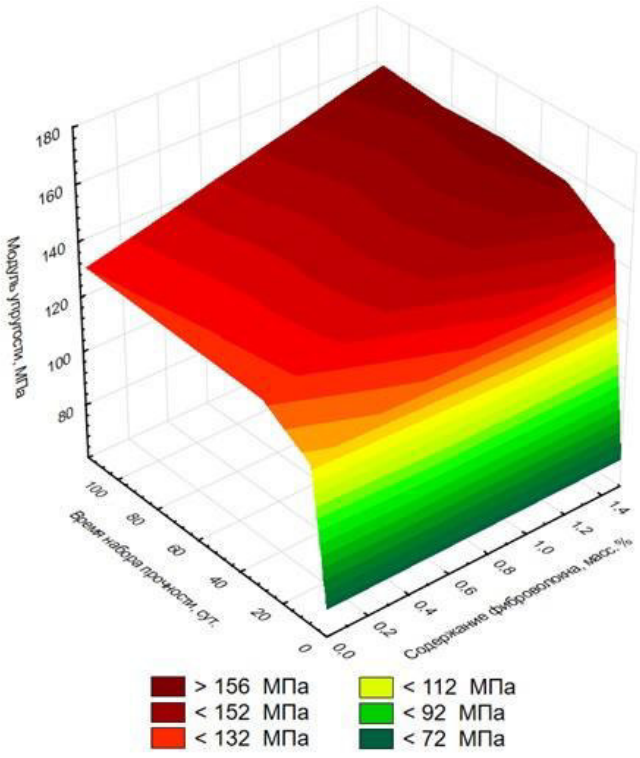


Рисунок П.5.11 – Поверхность отклика модуля упругости покрытия из фиброцементогрунта в зависимости от содержания полипропиленовой фибры и времени набора прочности

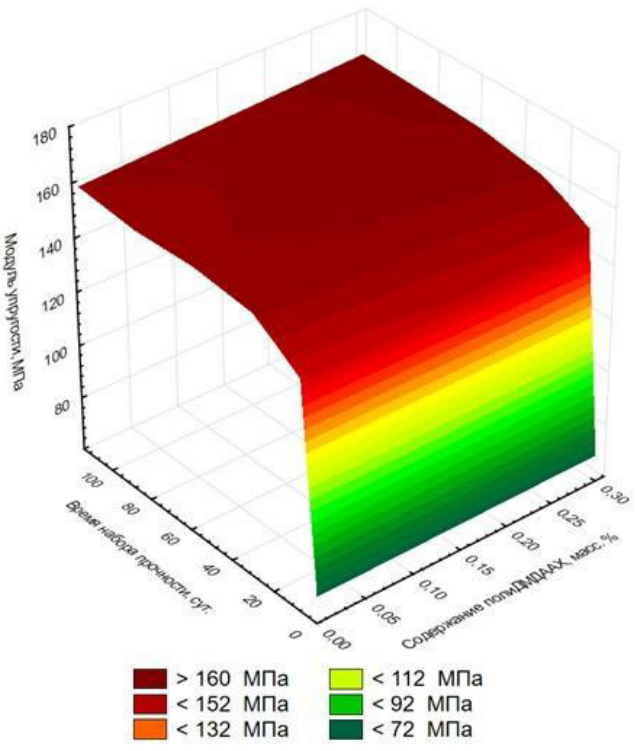


Рисунок П.5.12 – Поверхность отклика модуля упругости покрытия из фиброцементогрунта на основе полипропиленового волокна в зависимости от содержания полиДМДААХ и времени набора прочности

Приложение 6

Результаты расчетов для создания нейронных сетей по определению сметной стоимости строительства лесовозной лесной дороги

Таблица П.6.1 – Обучающая выборка для создания нейронной сети по определению сметной стоимости строительства лесовозной лесной дороги с конструкцией из фиброцементогрунта

№ п/п	Расстояние доставки портландцемента, км	Расстояние доставки фиброволокна, км	Сметная стоимость, руб.
1	30	30	9458705,20
2	50	30	9504887.86
3	100	30	9620134.87
4	150	30	9735465.65
5	200	30	9850796.58
6	250	30	9959757.32
7	300	30	10068718.25
8	350	30	10177678.99
9	400	30	10286639.90
10	500	30	10504561.40
11	30	100	9521483.28
12	50	100	9567665.94
13	100	100	9682912.96
14	150	100	9798243.73
15	200	100	9913574.66
16	250	100	10022535.41
17	300	100	10131496.33
18	400	100	10349417.99
19	450	100	10458378.73
20	500	100	10567339.49
21	30	200	9611184.83
22	50	200	9657367.49
23	100	200	9772614.50
24	150	200	9887945.28
25	200	200	10003276.21
26	250	200	10112236.96
27	300	200	10221197.88
28	350	200	10330158.62
29	450	200	10548080.28
30	500	200	10657041.04
31	30	300	9695932.00
32	50	300	9742114.66
33	100	300	9857361.67
34	150	300	9972692.45
35	200	300	10088023.38

Продолжение табл. П.6.1

№ п/п	Расстояние доставки портландцемента, км	Расстояние доставки фиброволокна, км	Сметная стоимость, руб.
36	250	300	10196984.12
37	350	300	10414905.79
38	400	300	10523866.70
39	450	300	10632827.45
40	500	300	10741788.20
41	30	400	9780679.00
42	50	400	9826861.66
43	150	400	10057439.45
44	200	400	10172770.38
45	250	400	10281731.12
46	300	400	10390692.05
47	350	400	10499652.79
48	400	400	10608613.70
49	450	400	10717574.45
50	500	400	10826535.20
51	30	500	9865426.16
52	50	500	9911608.82
53	100	500	10026855.84
54	150	500	10142186.62
55	200	500	10257517.55
56	250	500	10366478.29
57	350	500	10584399.96
58	400	500	10693360.87
59	450	500	10802321.62
60	500	500	10911282.37

Таблица П.6.2 – Расчет абсолютной ошибки настройки нейронной сети по определению сметной стоимости строительства лесовозной лесной дороги с конструкцией из фиброцементогрунта

№ п/п	Расстояние доставки портландцемента, км	Расстояние доставки фиброволокна, км	Сметная стоимость, руб.	Сметная стоимость по расчетам нейросети, руб.	Абсолютная ошибка, %
1	30	30	9458705,2	9460800	0,022
2	50	30	9504887,86	9506300	0,015
3	100	30	9620134,87	9620100	0,000
4	150	30	9735465,65	9733900	0,016
5	200	30	9850796,58	9847600	0,032
6	250	30	9959757,32	9961400	0,016
7	300	30	10068718,3	10071000	0,023
8	350	30	10177679	10179000	0,013
9	400	30	10286639,9	10288000	0,013

Продолжение табл. П.6.2

№ п/п	Расстояние доставки портландцемента, км	Расстояние доставки фиброволокна, км	Сметная стоимость, руб.	Сметная стоимость по расчетам нейросети, руб.	Абсолютная ошибка, %
10	500	30	10504561,4	10504000	0,005
11	30	100	9521483,28	9522800	0,014
12	50	100	9567665,94	9568300	0,007
13	100	100	9682912,96	9682100	0,008
14	150	100	9798243,73	9796000	0,023
15	200	100	9913574,66	9909800	0,038
16	250	100	10022535,4	10024000	0,015
17	300	100	10131496,3	10133000	0,015
18	400	100	10349418	10350000	0,006
19	450	100	10458378,7	10458000	0,004
20	500	100	10567339,5	10566000	0,013
21	30	200	9611184,83	9611300	0,001
22	50	200	9657367,49	9656900	0,005
23	100	200	9772614,5	9770800	0,019
24	150	200	9887945,28	9884700	0,033
25	200	200	10003276,2	9998600	0,047
26	250	200	10112237	10112000	0,002
27	300	200	10221197,9	10222000	0,008
28	350	200	10330158,6	10330000	0,002
29	450	200	10548080,3	10547000	0,010
30	500	200	10657041	10655000	0,019
31	30	300	9695932	9698300	0,024
32	50	300	9742114,66	9743900	0,018
33	100	300	9857361,67	9857800	0,004
34	150	300	9972692,45	9971800	0,009
35	200	300	10088023,4	10086000	0,020
36	250	300	10196984,1	10200000	0,030
37	350	300	10414905,8	10417000	0,020
38	400	300	10523866,7	10526000	0,020
39	450	300	10632827,5	10634000	0,011
40	500	300	10741788,2	10742000	0,002
41	30	400	9780679	9782400	0,018
42	50	400	9826861,66	9828000	0,012
43	150	400	10057439,5	10056000	0,014
44	200	400	10172770,4	10170000	0,027
45	250	400	10281731,1	10284000	0,022
46	300	400	10390692,1	10393000	0,022
47	350	400	10499652,8	10501000	0,013
48	400	400	10608613,7	10610000	0,013
49	450	400	10717574,5	10718000	0,004
50	500	400	10826535,2	10826000	0,005
51	30	500	9865426,16	9866500	0,011
52	50	500	9911608,82	9912000	0,004

Продолжение табл. П.6.2

№ п/п	Расстояние доставки портландцемента, км	Расстояние доставки фиброволокна, км	Сметная стоимость, руб.	Сметная стоимость по расчетам нейросети, руб.	Абсолютная ошибка, %
53	100	500	10026855,8	10026000	0,009
54	150	500	10142186,6	10140000	0,022
55	200	500	10257517,6	10254000	0,034
56	250	500	10366478,3	10368000	0,015
57	350	500	10584400	10586000	0,015
58	400	500	10693360,9	10694000	0,006
59	450	500	10802321,6	10802000	0,003
60	500	500	10911282,4	10910000	0,012
Средняя абсолютная ошибка MAPE					0,015

Таблица П.6.3 – Расчет абсолютной ошибки работы нейронной сети по определению сметной стоимости строительства лесовозной лесной дороги с конструкцией из фиброцементогрунта

№ п/п	Расстояние доставки портландцемента, км	Расстояние доставки фиброволокна, км	Сметная стоимость, руб.	Сметная стоимость по расчетам нейросети, руб.	Абсолютная ошибка, %
1	450	30	10395600,7	10396000	0,004
2	350	100	10240457,1	10242000	0,015
3	400	200	10439119,5	10438000	0,011
4	300	300	10305945,1	10390000	0,816
5	100	400	9942108,67	9941900	0,002
6	300	500	10475439,2	10477000	0,015
Средняя абсолютная ошибка MAPE					0,144

Таблица П.6.4 – Обучающая выборка для создания нейронной сети по определению сметной стоимости строительства лесовозной лесной дороги с конструкцией из каменных материалов

№ п/п	Расстояние доставки щебня, км	Расстояние доставки песка, км	Сметная стоимость, тыс. руб.
1	30	30	9539,0
2	50	30	10305,0
3	100	30	12220,4
4	150	30	14136,7
5	200	30	16052,1
6	250	30	17852,6

Продолжение табл. П.6.4

№ п/п	Расстояние доставки щебня, км	Расстояние доставки песка, км	Сметная стоимость, тыс. руб.
7	300	30	19653,1
8	350	30	21453,7
9	400	30	23254,2
10	500	30	26855,3
11	30	100	10306,5
12	50	100	11072,4
13	100	100	12987,8
14	150	100	14904,2
15	200	100	16819,5
16	250	100	18620,1
17	300	100	20420,6
18	400	100	24021,7
19	450	100	25822,2
20	500	100	27622,7
21	30	200	11403,2
22	50	200	12169,2
23	100	200	14084,5
24	150	200	16000,9
25	200	200	17916,3
26	250	200	19716,8
27	300	200	21517,3
28	350	200	23317,8
29	450	200	26918,9
30	500	200	28719,4
31	30	300	12433,9
32	50	300	13199,8
33	100	300	15115,2
34	150	300	17031,6
35	200	300	18946,9
36	250	300	20747,5
37	350	300	24348,5
38	400	300	26149,1
39	450	300	27949,6
40	500	300	29750,1
41	30	400	13464,6
42	50	400	14230,5
43	150	400	18062,3
44	200	400	19977,6
45	250	400	21778,2
46	300	400	23578,7
47	350	400	25379,2
48	400	400	27179,8
49	450	400	28980,3
50	500	400	30780,8
51	30	500	14495,3
52	50	500	15261,2

Продолжение табл. П.6.4

№ п/п	Расстояние доставки щебня, км	Расстояние доставки песка, км	Сметная стоимость, тыс. руб.
53	100	500	17176,6
54	150	500	19093,0
55	200	500	21008,3
56	250	500	22808,9
57	350	500	26409,9
58	400	500	28210,5
59	450	500	30011,0
60	500	500	31811,5

Таблица П.6.5 – Расчет абсолютной ошибки настройки нейронной сети по определению сметной стоимости строительства лесовозной лесной дороги с конструкцией из каменных материалов

№ п/п	Расстояние доставки щебня, км	Расстояние доставки песка, км	Сметная стоимость, тыс. руб.	Сметная стоимость по расчетам нейросети, руб.	Абсолютная ошибка, %
1	30	30	9539	9573,2	0,359
2	50	30	10305	10329,0	0,233
3	100	30	12220,4	12217,0	0,028
4	150	30	14136,7	14105,0	0,224
5	200	30	16052,1	15993,0	0,368
6	250	30	17852,6	17881,0	0,159
7	300	30	19653,1	19695,0	0,213
8	350	30	21453,7	21483,0	0,137
9	400	30	23254,2	23271,0	0,072
10	500	30	26855,3	26845,0	0,038
11	30	100	10306,5	10331,0	0,238
12	50	100	11072,4	11086,0	0,123
13	100	100	12987,8	12975,0	0,099
14	150	100	14904,2	14863,0	0,276
15	200	100	16819,5	16751,0	0,407
16	250	100	18620,1	18639,0	0,102
17	300	100	20420,6	20453,0	0,159
18	400	100	24021,7	24029,0	0,030
19	450	100	25822,2	25816,0	0,024
20	500	100	27622,7	27603,0	0,071
21	30	200	11403,2	11414,0	0,095
22	50	200	12169,2	12169,0	0,002
23	100	200	14084,5	14057,0	0,195
24	150	200	16000,9	15945,0	0,349
25	200	200	17916,3	17834,0	0,459
26	250	200	19716,8	19722,0	0,026

Продолжение табл. П.6.5

№ п/п	Расстояние доставки щебня, км	Расстояние доставки песка, км	Сметная стоимость, тыс. руб.	Сметная стоимость по расчетам нейросети, руб.	Абсолютная ошибка, %
27	300	200	21517,3	21536,0	0,087
28	350	200	23317,8	23323,0	0,022
29	450	200	26918,9	26899,0	0,074
30	500	200	28719,4	28686,0	0,116
31	30	300	12433,9	12475,0	0,331
32	50	300	13199,8	13230,0	0,229
33	100	300	15115,2	15118,0	0,019
34	150	300	17031,6	17006,0	0,150
35	200	300	18946,9	18895,0	0,274
36	250	300	20747,5	20783,0	0,171
37	350	300	24348,5	24385,0	0,150
38	400	300	26149,1	26172,0	0,088
39	450	300	27949,6	27960,0	0,037
40	500	300	29750,1	29747,0	0,010
41	30	400	13464,6	13496,0	0,233
42	50	400	14230,5	14252,0	0,151
43	150	400	18062,3	18028,0	0,190
44	200	400	19977,6	19916,0	0,308
45	250	400	21778,2	21805,0	0,123
46	300	400	23578,7	23618,0	0,167
47	350	400	25379,2	25406,0	0,106
48	400	400	27179,8	27194,0	0,052
49	450	400	28980,3	28981,0	0,002
50	500	400	30780,8	30769,0	0,038
51	30	500	14495,3	14518,0	0,157
52	50	500	15261,2	15273,0	0,077
53	100	500	17176,6	17162,0	0,085
54	150	500	19093	19050,0	0,225
55	200	500	21008,3	20938,0	0,335
56	250	500	22808,9	22826,0	0,075
57	350	500	26409,9	26428,0	0,069
58	400	500	28210,5	28216,0	0,019
59	450	500	30011	30003,0	0,027
60	500	500	31811,5	31790,0	0,068
Средняя абсолютная ошибка MAPE					0,146

Таблица П.6.6 – Расчет абсолютной ошибки работы нейронной сети по определению сметной стоимости строительства лесовозной лесной дороги с конструкцией из каменных материалов

№ п/п	Расстояние доставки щебня, км	Расстояние доставки песка, км	Сметная стоимость, руб.	Сметная стоимость по расчетам нейросети, руб.	Абсолютная ошибка, %
1	450	30	25054,7	25058,0	0,013
2	350	100	22221,1	22241,0	0,090
3	400	200	25118,4	25111,0	0,029
4	300	300	22548,0	22597,0	0,217
5	100	400	16145,9	16140,0	0,037
6	300	500	24609,4	24640,0	0,124
Средняя абсолютная ошибка MAPE					0,085

Приложение 7



Рисунок П.7.1 – Схема производителей дорожно-строительных материалов на территории Свердловской области

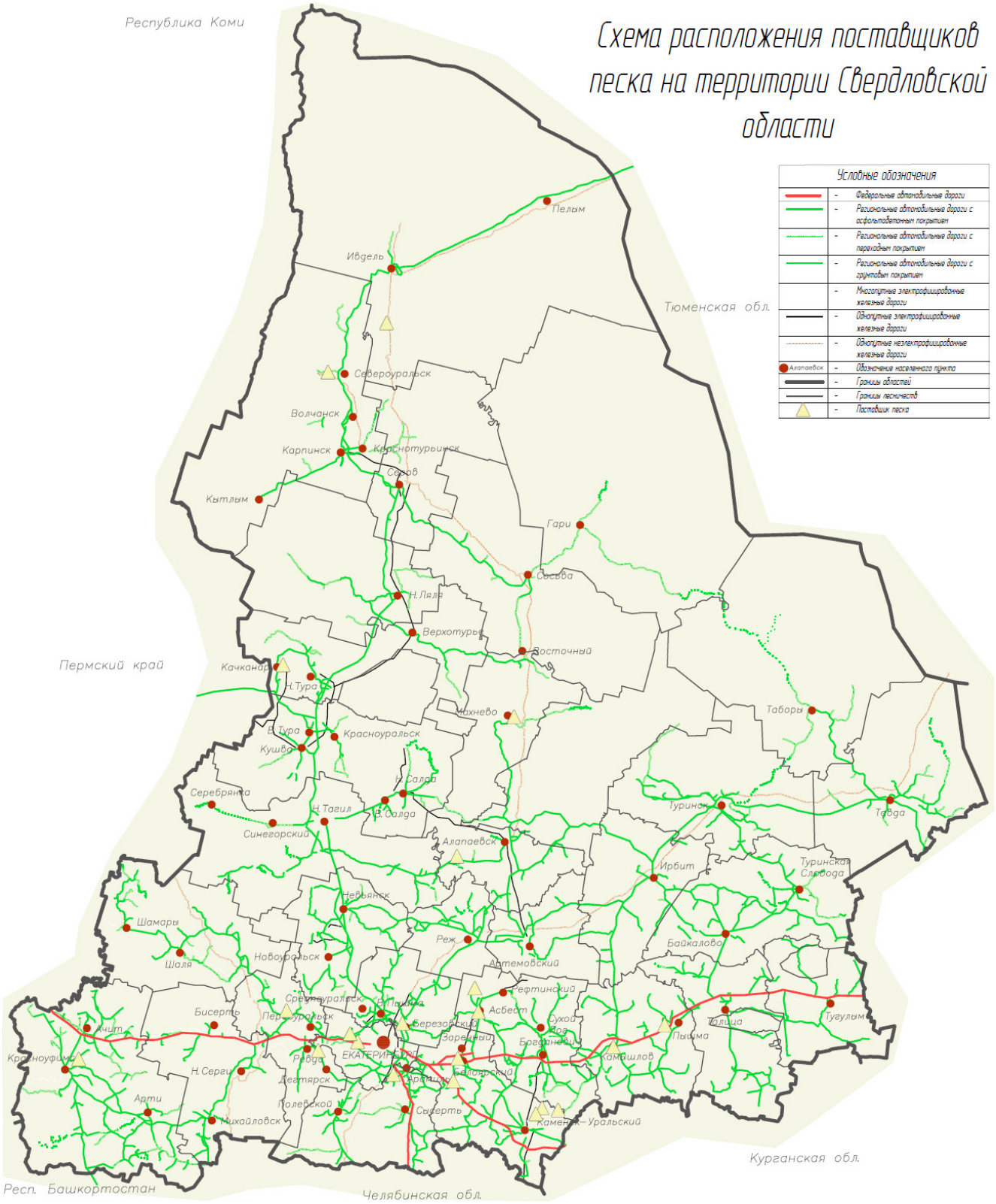


Рисунок П.7.2 – Схема расположения поставщиков песка на территории Свердловской области

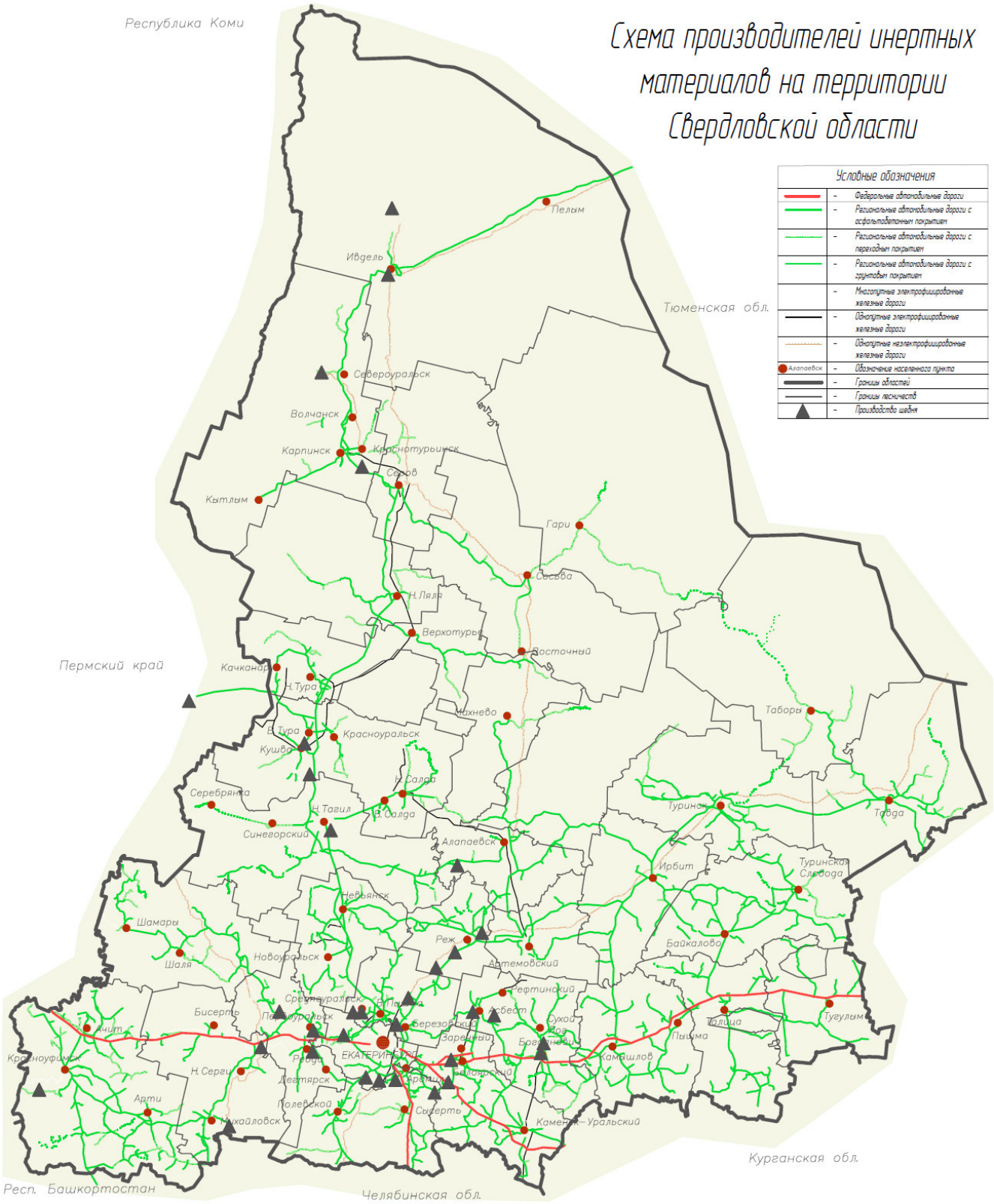


Рисунок П.7.3 – Схема производителей инертных каменных материалов на территории Свердловской области



Рисунок П.7.4 – Схема производителей портландцемента на территории Свердловской области

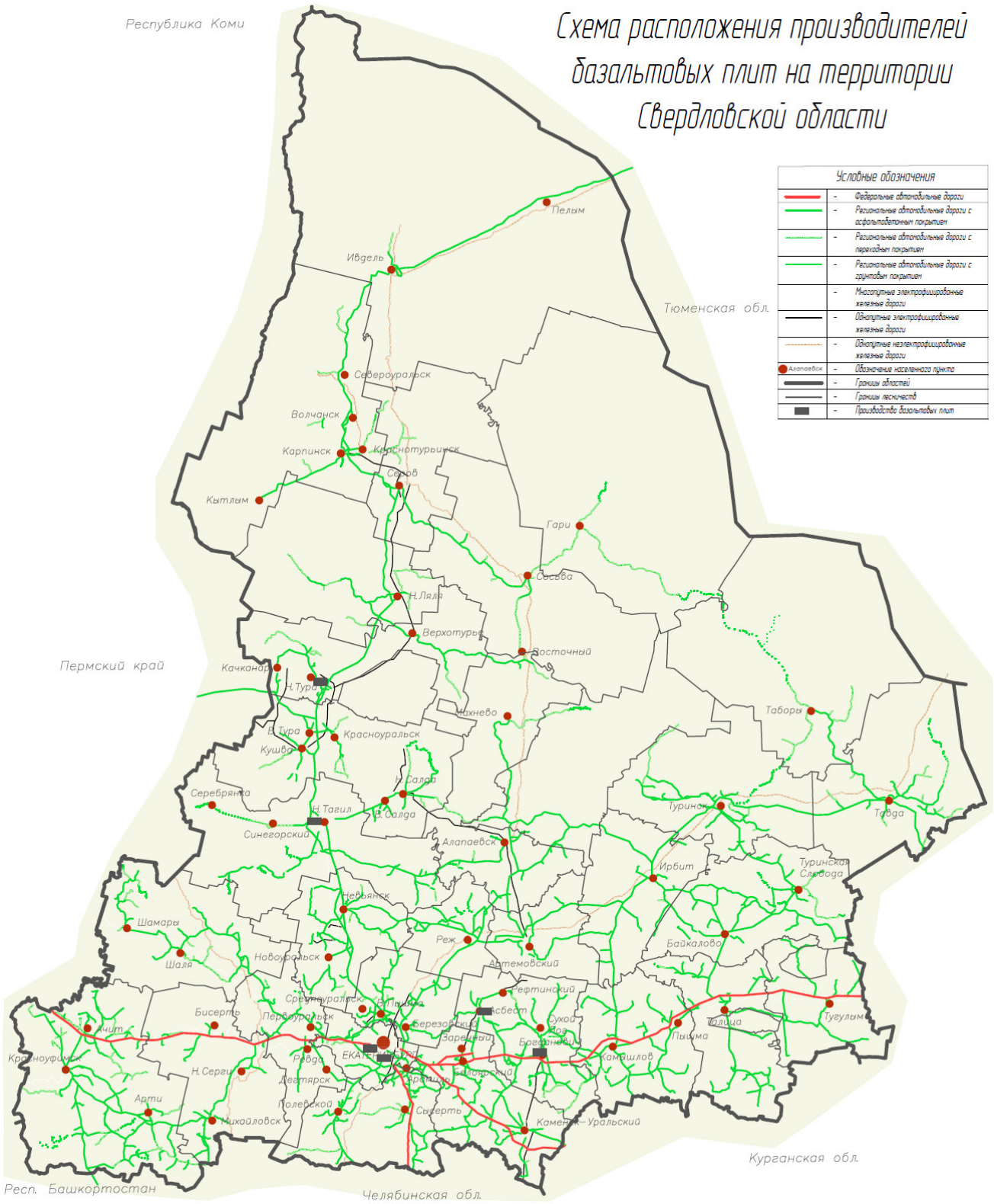


Рисунок П.7.5 – Схема производителей базальтовых теплоизоляционных плит на территории Свердловской области

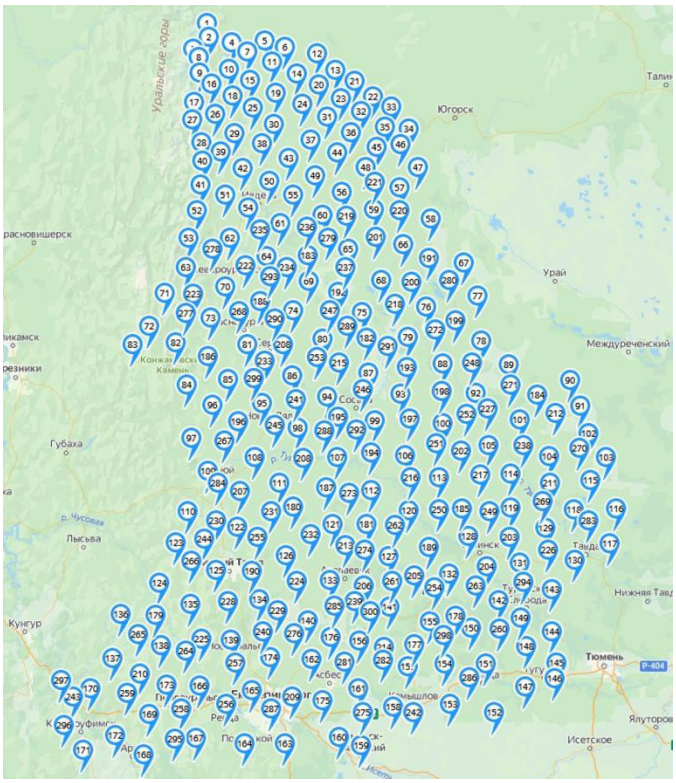


Рисунок П.7.6 – Матрица точек тяготения грузопотоков на территории Свердловской области

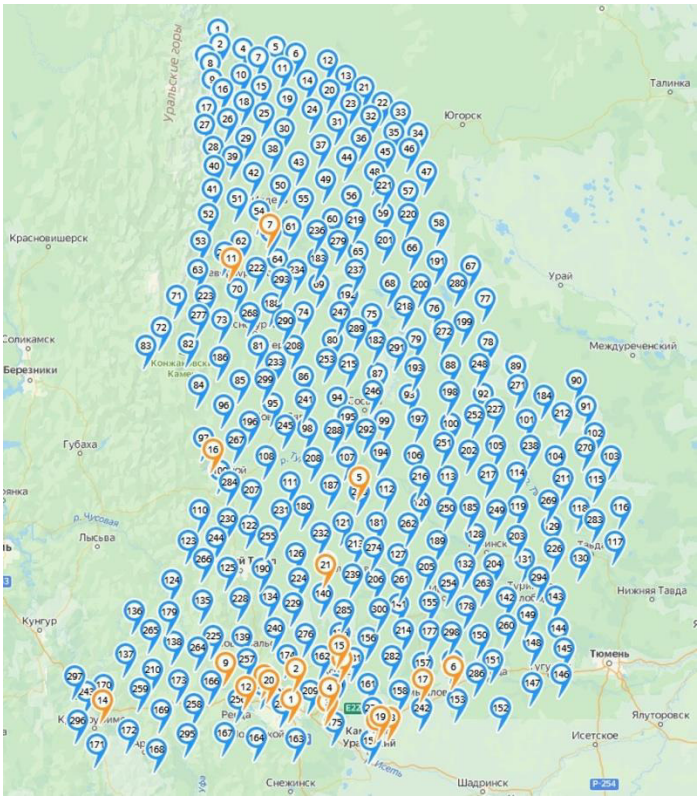


Рисунок П.7.7 – Матрица точек тяготения грузопотоков и поставщиков песка на территории Свердловской области

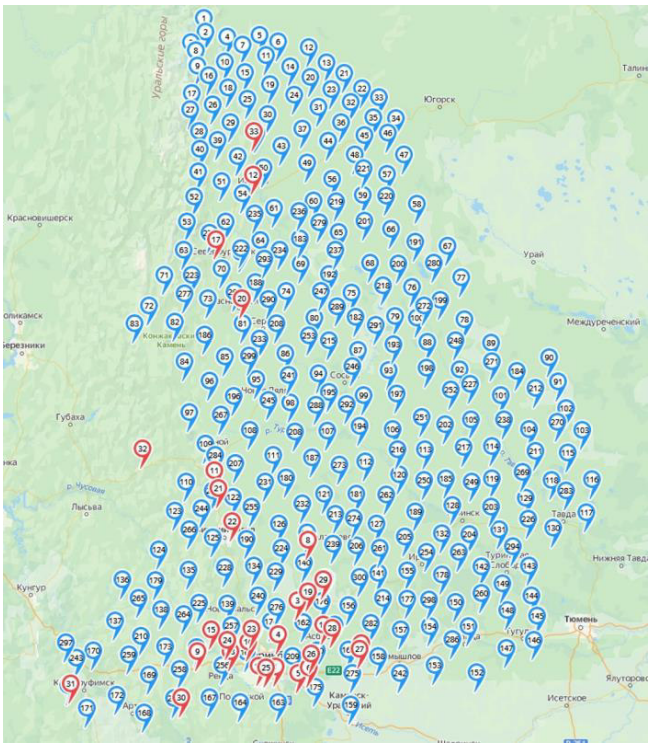


Рисунок П.7.8 – Матрица точек тяготения грузопотоков и производителей инертных каменных материалов на территории Свердловской области

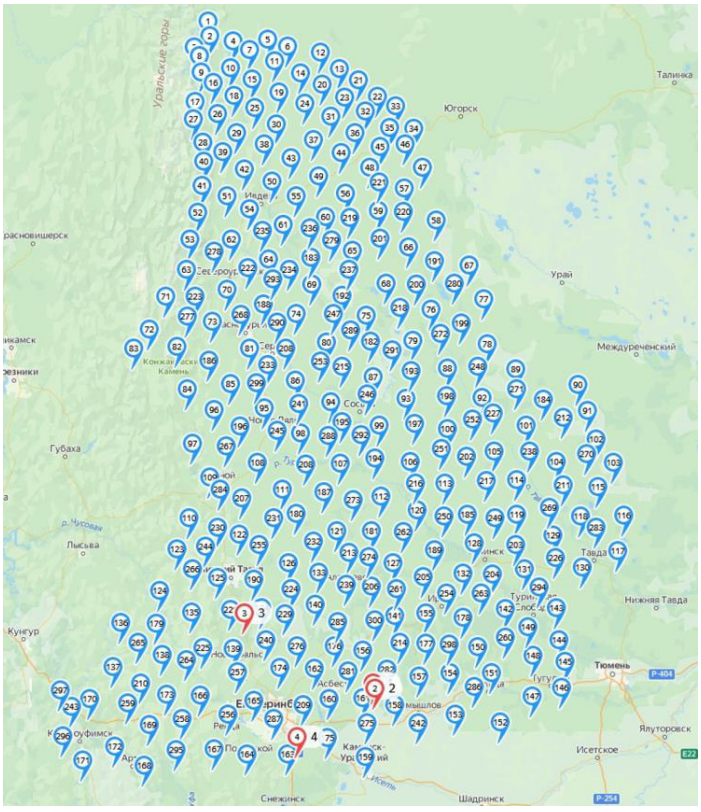


Рисунок П.7.9 – Матрица точек тяготения грузопотоков и производителей портландцемента на территории Свердловской области

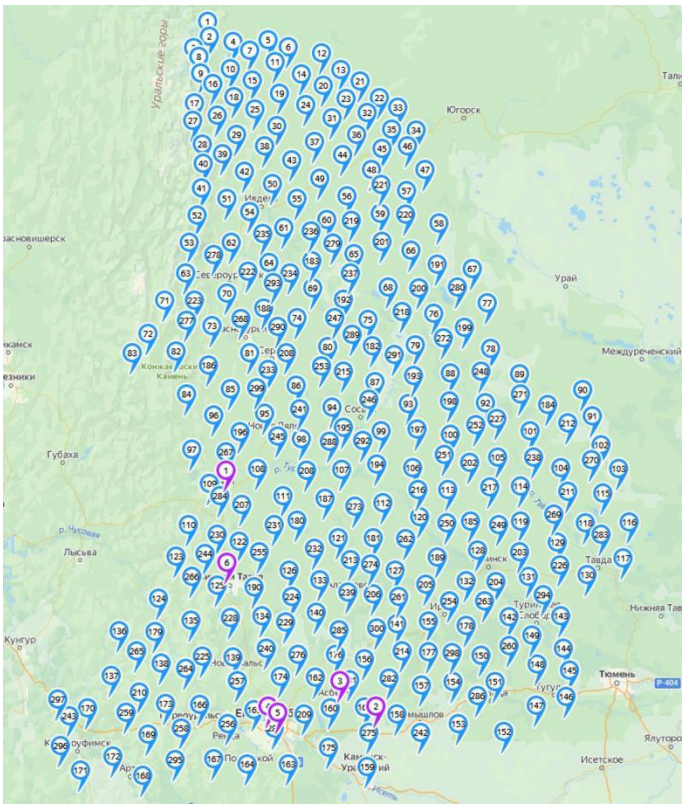


Рисунок П.7.10 – Матрица точек тяготения грузопотоков и производителей базальтовых теплоизоляционных плит на территории Свердловской области

Приложение 8

Таблица П.8.1 – Результаты расчета минимальных расстояний доставки дорожно-строительных материалов, стоимости и экономической эффективности строительства лесовозных лесных дорог из фиброцементогрунта в точках матрицы тяготения грузопотоков на территории Свердловской области

№ точки	Расстояние доставки от ближайшего поставщика, км				Стоимость строительства		Экономический эффект от строительства из фиброцементогрунта, %
	Портландцемент	Базальтовая фибра	Щебень	Песок	из фиброцементогрунта, тыс. руб./1 км	из каменных материалов, тыс. руб./1 км	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	500	465	127	232	10881,0	15423,0	29,4
2	500	458	119	218	10875,0	14970,0	27,4
3	500	463	110	230	10879,0	14760,0	26,3
4	500	436	104	202	10856,0	14230,0	23,7
5	500	431	97	197	10852,0	13911,0	22,0
6	500	500	264	328	10910,0	21598,0	49,5
7	500	450	97	209	10868,0	14041,0	22,6
8	500	460	61	218	10876,0	12779,0	14,9
9	500	455	89	193	10872,0	13566,0	19,9
10	500	412	78	177	10836,0	12977,0	16,5
11	500	413	77	179	10837,0	12961,0	16,4
12	500	500	243	305	10910,0	20570,0	47,0
13	500	500	242	306	10910,0	20542,0	46,9
14	500	423	85	187	10845,0	13350,0	18,8
15	500	407	68	158	10832,0	12394,0	12,6
16	500	417	73	177	10840,0	12788,0	15,2
17	500	411	77	175	10835,0	12918,0	16,1
18	500	391	56	155	10818,0	11908,0	9,2
19	500	394	54	156	10821,0	11844,0	8,6
20	500	500	253	318	10910,0	21080,0	48,2
21	500	500	212	271	10910,0	19052,0	42,7
22	500	448	143	208	10866,0	15768,0	31,1
23	500	437	134	197	10857,0	15309,0	29,1
24	500	396	56	160	10822,0	11962,0	9,5

Продолжение табл. П.8.1

1	2	3	4	5	6	7	8
25	500	372	34	136	10802,0	10872,0	0,6
26	500	391	54	153	10818,0	11811,0	8,4
27	500	397	72	134	10823,0	12285,0	11,9
28	500	353	68	117	10786,0	11950,0	9,7
29	500	361	23	121	10793,0	10558,0	-2,2
30	500	363	25	127	10795,0	10623,0	-1,6
31	500	395	105	196	10822,0	14203,0	23,8
32	500	432	134	195	10853,0	15287,0	29,0
33	500	442	148	207	10861,0	15946,0	31,9
34	500	447	143	207	10865,0	15757,0	31,0
35	500	420	121	180	10843,0	14634,0	25,9
36	500	395	95	156	10822,0	13392,0	19,2
37	496	366	63	126	10789,0	11859,0	9,0
38	472	342	2	99	10717,0	10320,0	-3,8
39	500	335	43	92	10771,0	10735,0	-0,3
40	500	346	55	107	10780,0	11351,0	5,0
41	467	328	54	89	10694,0	11118,0	3,8
42	441	322	24	82	10633,0	10136,0	-4,9
43	500	379	73	141	10808,0	12399,0	12,8
44	500	372	78	139	10802,0	12566,0	14,0
45	500	452	153	210	10870,0	16167,0	32,8
46	500	441	143	200	10860,0	15681,0	30,7
47	500	464	170	222	10880,0	16939,0	35,8
48	500	400	112	173	10826,0	14218,0	23,9
49	493	361	63	127	10778,0	11870,0	9,2
50	450	310	18	75	10642,0	10060,0	-5,8
51	446	316	34	73	10638,0	10190,0	-4,4
52	421	287	77	65	10560,0	11727,0	10,0
53	414	273	41	46	10533,0	10162,0	-3,7
54	423	288	59	25	10565,0	10668,0	1,0
55	476	335	42	100	10719,0	10784,0	0,6
56	500	391	112	176	10818,0	14251,0	24,1
57	500	479	180	244	10892,0	17555,0	38,0
58	500	500	210	256	10910,0	18817,0	42,0
59	500	445	142	205	10864,0	15697,0	30,8
60	500	390	90	250	10817,0	14221,0	23,9
61	495	305	91	20	10735,0	11877,0	9,6
62	380	239	26	26	10430,0	9573,2	-8,9
63	372	238	76	77	10412,0	11819,0	11,9
64	354	218	62	117	10355,0	11724,0	11,7
65	500	500	213	280	10910,0	19181,0	43,1
66	500	386	310	380	10814,0	23772,0	54,5
67	500	500	301	348	10910,0	23123,0	52,8
68	500	500	140	313	10910,0	16762,0	34,9

Продолжение табл. П.8.1

1	2	3	4	5	6	7	8
69	375	221	74	132	10403,0	12339,0	15,7
70	342	203	50	78	10316,0	10848,0	4,9
71	424	295	120	121	10573,0	13957,0	24,2
72	393	271	100	146	10486,0	13473,0	22,2
73	340	200	48	86	10909,0	10859,0	-0,5
74	347	212	55	115	10334,0	11438,0	9,7
75	464	305	256	182	10668,0	19753,0	46,0
76	491	331	258	320	10748,0	21289,0	49,5
77	500	367	300	368	10798,0	23292,0	53,6
78	500	374	296	360	10804,0	23067,0	53,2
79	450	286	210	275	10622,0	19017,0	44,1
80	353	217	118	182	10352,0	14542,0	28,8
81	310	131	30	95	10183,0	10277,0	0,9
82	370	233	81	118	10403,0	12452,0	16,5
83	434	345	227	300	10637,0	19914,0	46,6
84	288	152	127	126	10154,0	14276,0	28,9
85	252	115	153	153	10042,0	15550,0	35,4
86	252	116	84	160	10580,0	13020,0	18,7
87	375	235	159	272	10415,0	17060,0	39,0
88	482	322	251	360	10721,0	21434,0	50,0
89	500	395	313	450	10822,0	24594,0	56,0
90	500	435	365	500	10855,0	26964,0	59,7
91	500	500	460	500	10910,0	30361,0	64,1
92	500	362	287	350	10794,0	22643,0	52,3
93	467	307	231	295	10676,0	20014,0	46,7
94	354	216	175	240	10353,0	17323,0	40,2
95	213	76	98	118	9918,1	13094,0	24,3
96	204	59	102	64	9882,5	12660,0	21,9
97	192	46	75	17	9843,6	11273,0	12,7
98	229	92	125	132	9968,7	14265,0	30,1
99	324	183	207	222	10259,0	18336,0	44,0
100	357	250	244	293	10390,0	20485,0	49,3
101	457	467	420	440	10789,0	28318,0	61,9
102	338	449	390	425	10517,0	27092,0	61,2
103	337	435	414	400	10503,0	27695,0	62,1
104	500	500	394	480	10910,0	27797,0	60,8
105	434	287	430	269	10588,0	26928,0	60,7
106	321	214	195	77	10280,0	16313,0	37,0
107	289	154	179	170	10157,0	16716,0	39,2
108	263	47	78	85	10006,0	11981,0	16,5
109	148	22	42	39	9729,3	10124,0	3,9
110	147	79	40	104	9770,5	10752,0	9,1
111	159	91	67	113	9808,5	11869,0	17,4
112	245	252	156	55	10147,0	14602,0	30,5

Продолжение табл. П.8.1

1	2	3	4	5	6	7	8
113	316	316	273	95	10357,0	19433,0	46,7
114	404	417	395	400	10633,0	27015,0	60,6
115	356	422	350	310	10533,0	24487,0	57,0
116	350	353	320	300	10462,0	23312,0	55,1
117	350	352	310	299	10461,0	22944,0	54,4
118	350	360	320	310	10468,0	23414,0	55,3
119	395	267	226	214	10487,0	18967,0	44,7
120	298	301	265	280	10306,0	21143,0	51,3
121	193	180	83	79	9964,9	12105,0	17,7
122	94	34	30	106	9610,0	10396,0	7,6
123	112	53	64	149	9667,8	12145,0	20,4
124	140	106	105	190	9778,5	14138,0	30,8
125	70	33	35	120	9554,5	10736,0	11,0
126	96	62	53	132	9639,3	11546,0	16,5
127	177	183	87	93	9931,1	12408,0	20,0
128	206	210	171	159	10021,0	16295,0	38,5
129	310	314	270	259	10343,0	21102,0	51,0
130	342	349	310	295	10441,0	22903,0	54,4
131	243	246	235	150	10137,0	18614,0	45,5
132	201	203	200	153	10004,0	17325,0	42,3
133	120	118	9	2	9743,6	9573,2	-1,8
134	18	70	61	100	9496,2	11502,0	17,4
135	66	118	92	92	9620,7	12586,0	23,6
136	262	212	154	154	10150,0	15598,0	34,9
137	277	208	100	69	10180,0	12639,0	19,5
138	196	144	90	90	9939,8	12489,0	20,4
139	78	87	48	48	9620,5	10448,0	7,9
140	89	126	35	48	9680,1	9956,9	2,8
141	150	153	76	104	9843,0	12112,0	18,7
142	191	192	180	99	9971,0	15985,0	37,6
143	253	256	242	157	10169,0	18954,0	46,3
144	211	213	216	127	10035,0	17648,0	43,1
145	195	197	195	113	9984,5	16703,0	40,2
146	214	209	218	123	10038,0	17680,0	43,2
147	201	194	197	112	9995,5	16768,0	40,4
148	192	195	167	81	9975,9	15299,0	34,8
149	216	219	220	135	10052,0	17885,0	43,8
150	144	146	135	50	9823,1	13755,0	28,6
151	133	136	140	55	9789,2	13998,0	30,1
152	194	197	200	115	9982,3	16913,0	41,0
153	117	107	106	46	9727,1	12617,0	22,9
154	97	99	96	15	9674,4	12066,0	19,8
155	142	145	115	92	9817,7	13454,0	27,0
156	45	52	53	37	9514,4	10518,0	9,5

Продолжение табл. П.8.1

1	2	3	4	5	6	7	8
157	72	70	67	20	9591,8	10971,0	12,6
158	37	29	30	32	9476,7	9594,9	1,2
159	93	85	60	25	9652,9	10706,0	9,8
160	61	36	12	12	9536,6	9573,2	0,4
161	25	16	18	40	9460,8	9681,5	2,3
162	91	60	24	34	9626,2	9616,5	-0,1
163	28	63	48	50	9490,0	10470,0	9,4
164	104	63	46	66	9658,4	10567,0	8,6
165	72	21	22	11	9556,4	9573,2	0,2
166	122	70	39	31	9705,6	9923,9	2,2
167	164	110	76	68	9836,7	11722,0	16,1
168	233	181	67	91	10057,0	11631,0	13,5
169	195	148	132	99	9941,0	14172,0	29,9
170	227	174	51	24	10037,0	10366,0	3,2
171	280	223	69	63	10199,0	11403,0	10,6
172	241	185	65	58	10079,0	11198,0	10,0
173	166	112	38	72	9843,0	10330,0	4,7
174	85	41	21	22	9595,7	9573,2	-0,2
175	60	84	47	48	9576,9	10410,0	8,0
176	109	74	35	47	9679,6	9946,1	2,7
177	100	101	110	63	9683,0	12952,0	25,2
178	191	192	153	101	9971,0	14987,0	33,5
179	177	144	92	94	9896,5	12608,0	21,5
180	130	86	77	145	9738,0	12593,0	22,7
181	212	166	95	67	9995,7	12429,0	19,6
182	450	289	187	250	10624,0	17884,0	40,6
183	380	205	92	151	10400,0	13225,0	21,4
184	475	489	340	350	10847,0	24538,0	55,8
185	330	339	296	275	10407,0	22198,0	53,1
186	303	146	201	205	10181,0	17925,0	43,2
187	241	228	125	36	10117,0	13226,0	23,5
188	332	190	35	91	10283,0	10422,0	1,3
189	218	230	123	134	10066,0	14211,0	29,2
190	54	39	31	66	9523,4	10001,0	4,8
191	500	386	310	380	10814,0	23772,0	54,5
192	380	230	92	152	10422,0	13235,0	21,3
193	440	278	207	272	10594,0	18873,0	43,9
194	310	171	210	214	10218,0	18363,0	44,4
195	329	187	174	221	10273,0	17079,0	39,9
196	205	62	104	64	9887,4	12736,0	22,4
197	350	211	247	254	10340,0	20193,0	48,8
198	483	324	252	320	10725,0	21063,0	49,1
199	500	357	274	340	10790,0	22076,0	51,1
200	500	352	282	350	10785,0	22464,0	52,0

Продолжение табл. П.8.1

1	2	3	4	5	6	7	8
201	500	474	176	233	10888,0	17284,0	37,0
202	483	338	301	290	10737,0	22530,0	52,3
203	247	256	220	208	10155,0	18675,0	45,6
204	257	266	217	177	10187,0	18227,0	44,1
205	172	182	139	126	9918,8	14729,0	32,7
206	148	164	56	66	9848,2	10945,0	10,0
207	129	49	27	73	9702,9	10039,0	3,3
208	263	127	159	115	10077,0	15365,0	34,4
209	76	32	21	21	9567,2	9573,2	0,1
210	203	150	81	99	9961,0	12246,0	18,7
211	390	390	350	350	10580,0	24895,0	57,5
212	500	500	500	500	10910,0	31790,0	65,7
213	167	167	55	55	9894,1	10788,0	8,3
214	117	119	112	71	9737,7	13114,0	25,7
215	352	220	223	189	10352,0	18583,0	44,3
216	300	292	192	68	10303,0	16103,0	36,0
217	293	278	245	256	10276,0	20139,0	49,0
218	500	304	185	298	10745,0	18308,0	41,3
219	500	447	144	203	10865,0	15751,0	31,0
220	500	458	157	222	10875,0	16448,0	33,9
221	500	423	126	184	10845,0	14866,0	27,0
222	350	205	49	38	10335,0	10377,0	0,4
223	360	219	66	93	10369,0	11615,0	10,7
224	91	75	34	32	9639,5	9745,9	1,1
225	172	123	67	67	9866,5	11371,0	13,2
226	279	297	278	265	10261,0	21452,0	52,2
227	484	494	470	450	10870,0	30207,0	64,0
228	35	75	68	109	9512,0	11864,0	19,8
229	44	93	57	86	9548,4	11199,0	14,7
230	95	36	13	91	9614,0	10234,0	6,1
231	133	88	81	150	9746,6	12798,0	23,8
232	133	87	79	94	9745,7	12117,0	19,6
233	244	106	59	122	10015,0	11664,0	14,1
234	372	203	71	134	10381,0	12247,0	15,2
235	424	291	60	10	10570,0	10706,0	1,3
236	500	259	106	130	10707,0	13526,0	20,8
237	500	500	231	289	10910,0	19953,0	45,3
238	430	430	400	380	10700,0	26990,0	60,4
239	132	146	37	74	9795,8	10314,0	5,0
240	43	85	76	79	9539,1	11841,0	19,4
241	263	227	110	165	10166,0	14056,0	27,7
242	69	69	69	36	9584,1	11111,0	13,7
243	267	213	50	31	10162,0	10339,0	1,7
244	87	34	46	137	9594,0	11336,0	15,4

Продолжение табл. П.8.1

1	2	3	4	5	6	7	8
245	216	79	112	121	9927,6	13655,0	27,3
246	344	241	141	205	10354,0	15660,0	33,9
247	326	188	67	160	10268,0	12378,0	17,0
248	500	359	283	350	10791,0	22500,0	52,0
249	242	244	204	193	10133,0	17909,0	43,4
250	269	272	232	221	10219,0	19269,0	47,0
251	332	256	59	289	10341,0	13457,0	23,2
252	361	273	325	325	10418,0	23746,0	56,1
253	330	195	98	163	10283,0	13581,0	24,3
254	164	166	129	117	9886,4	14254,0	30,6
255	78	35	28	120	9574,4	10547,0	9,2
256	105	73	25	25	9669,6	9573,2	-1,0
257	116	57	19	30	9680,4	9573,2	-1,1
258	158	102	38	60	9816,0	10200,0	3,8
259	199	143	76	74	9945,7	11787,0	15,6
260	182	192	178	92	9950,5	15834,0	37,2
261	169	176	82	119	9906,7	12500,0	20,7
262	209	253	142	152	10066,0	15124,0	33,4
263	189	199	160	107	9972,7	15316,0	34,9
264	156	105	53	52	9814,1	10680,0	8,1
265	206	171	120	112	9986,5	13860,0	27,9
266	107	47	67	145	9651,1	12215,0	21,0
267	180	35	77	38	9806,6	11435,0	14,2
268	310	170	20	61	10217,0	9908,8	-3,1
269	367	378	330	320	10520,0	23874,0	55,9
270	498	428	390	380	10845,0	26632,0	59,3
271	500	493	322	420	10904,0	24610,0	55,7
272	473	337	263	330	10714,0	21580,0	50,4
273	222	208	105	34	10056,0	12449,0	19,2
274	375	169	69	70	10357,0	11479,0	9,8
275	98	86	73	30	9665,2	11197,0	13,7
276	129	84	51	55	9734,0	10637,0	8,5
277	360	226	73	112	10375,0	12085,0	14,1
278	383	241	11	12	10438,0	9573,2	-9,0
279	500	482	183	240	10895,0	17625,0	38,2
280	500	358	303	330	10791,0	23011,0	53,1
281	57	42	44	30	9532,8	10102,0	5,6
282	29	35	31	61	9465,2	9946,6	4,8
283	330	340	310	290	10408,0	22852,0	54,5
284	134	42	20	58	9708,1	9876,3	1,7
285	93	107	2	74	9672,4	10050,0	3,8
286	163	195	190	105	9909,9	16428,0	39,7
287	56	19	3	18	9519,9	9573,2	0,6
288	295	158	190	200	10174,0	17456,0	41,7

Продолжение табл. П.8.1

1	2	3	4	5	6	7	8
289	368	305	197	200	10461,0	17720,0	41,0
290	283	146	49	114	10137,0	11200,0	9,5
291	430	270	197	261	10656,0	18381,0	42,0
292	303	166	190	207	10198,0	17532,0	41,8
293	344	206	54	113	10323,0	11378,0	9,3
294	218	228	216	130	10064,0	17680,0	43,1
295	192	134	12	119	9921,8	10537,0	5,8
296	285	247	7	49	10231,0	9778,9	-4,6
297	290	234	73	51	10231,0	11424,0	10,4
298	161	173	163	77	9885,8	15105,0	34,6
299	240	102	90	140	10003,0	13030,0	23,2
300	141	150	55	113	9819,8	11416,0	14,0
Сумма	94048	74704	41269	48360	3087422,4	4522095,3	31,7
Среднее значение	313,49	249,01	137,56	161,20	10291,41	15073,65	31,7

Приложение 9

УТВЕРЖДАЮ
Директор
ООО «ЛЕСПРОЕКТ»
_____ Чащин Ф.Ю.
«12» декабря 2024 г.

Акт о внедрении результатов научно-исследовательской работы

ООО «ЛЕСПРОЕКТ» подтверждает, что заведующий кафедрой «Автомобильных дорог, мостов и тоннелей» ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» (ФГБОУ ВО «УГЛТУ»), к.т.н., доцент Чудинов С.А. обосновал и предоставил компании технические и технологические решения по проектированию и строительству дорожных одежд лесовозных лесных дорог на основе фиброцементогрунтовых композиций, обладающих высокими прочностными показателями, трещиностойкостью и морозостойкостью в сложных условиях лесной зоны и значительных транспортных нагрузок от лесотранспортных машин. Строительство дорожных одежд из фиброцементогрунта производится на основе местных грунтов с добавкой портландцемента и волокон фибры, при этом не требуется применение традиционно используемых каменных материалов, что делает данную технологию экономически эффективной по отношению к существующим технологиям строительства лесовозных лесных дорог.

Полученные результаты ООО «ЛЕСПРОЕКТ» использует для проектирования лесовозных лесных дорог в районах освоения лесосырьевых баз для круглогодичной транспортировки лесоматериалов.

Заместитель директора
ООО «ЛЕСПРОЕКТ» С.В. Торопов

Заведующий кафедрой
«Автомобильных дорог, мостов и тоннелей»
ФГБОУ ВО «УГЛТУ», к.т.н., доцент» С. А. Чудинов

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ООО «Уральский дорожный научно-исследовательский центр»
_____ В. Н. Дмитриев
«18» сентября 2024 г.

Акт о внедрении результатов научно-исследовательской работы

ООО «Уральский дорожный научно-исследовательский центр» подтверждает, что заведующий кафедрой «Автомобильных дорог, мостов и тоннелей» ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» (ФГБОУ ВО «УГЛТУ»), к.т.н., доцент Чудинов С.А. обосновал и представил компании современные и эффективные проектные и технологические решения по устройству фиброцементогрунтовых конструкций дорожных одежд лесовозных лесных дорог. По результатам теоретических, лабораторных и опытно-экспериментальных исследований доказано, что дисперсное армирование волокнами фибры цементогрунтовой матрицы позволяет значительно увеличить физико-механические показатели, трещиностойкость и морозостойкость фиброцементогрунта. Поэтому данный материал наиболее эффективно применять в конструкциях дорожных одежд лесовозных лесных дорог в условиях слабых оснований и высоких нагрузок от лесотранспорта.

Устройство дорожных одежд из фиброцементогрунтовых композиций производится на основе местных грунтов с добавкой портландцемента и волокон фибры, при этом не требуется применение каменных материалов, что обеспечивает высокую экономическую эффективность на стадии строительства и эксплуатации лесовозных лесных дорог.

Результаты исследований используются в ООО «Уральский дорожный научно-исследовательский центр» при проектировании лесовозных лесных дорог с конструкцией дорожной одежды из фиброцементогрунтовых композиций, позволяя снизить издержки на строительство и эксплуатацию, и обеспечивая долговечность и надежность функционирования дорожно-транспортной инфраструктуры лесосырьевых баз.

Начальник отдела проектирования,
внедрения новых материалов и технологий – ГИП
ООО «Уральский дорожный
научно-исследовательский центр» А. Г. Горбунов

Заведующий кафедрой
«Автомобильных дорог, мостов и тоннелей»
ФГБОУ ВО «УГЛТУ», к.т.н., доцент С. А. Чудинов

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора
ООО «ТД Гекса-Урал»
по УрФО Абатурова Л.А.

«24» 09 2024 г.

Акт о внедрении результатов научно-исследовательской работы

ООО «ТД Гекса-Урал» подтверждает, что заведующий кафедрой «Автомобильных дорог, мостов и тоннелей» ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» (ФГБОУ ВО «УГЛТУ»), к.т.н., доцент Чудинов С.А. обосновал и представил компании проектные и технологические решения по применению фиброцементогрунтовых композиций для устройства конструкций дорожных одежд лесовозных лесных дорог. Теоретическим и экспериментальным путем доказано, что дисперсное армирование позволяет значительно увеличить прочностные и деформационные показатели, трещиностойкость и морозостойкость укрепленных грунтов, что обеспечивает длительный срок службы лесовозных автомобильных дорог в отдаленных районах освоения лесосырьевых баз, со сложными природными условиями и высокими транспортными нагрузками.

Строительство дорожных одежд из фиброцементогрунта производится на основе местных грунтов с добавкой портландцемента и волокон фибры, при этом не требуется применение традиционно используемых каменных материалов, что обеспечивает высокую экономическую эффективность по отношению к существующим технологиям строительства лесовозных автомобильных дорог.

Результаты исследований используются в ООО «ТД Гекса-Урал» при разработке современных конструктивных решений дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог на основе фиброцементогрунтовых композиций, эксплуатирующихся в условиях круглогодичной транспортировки лесоматериалов.

Главный инженер
ООО «ТД Гекса-Урал» Е.Г. Васильев

Заведующий кафедрой
«Автомобильных дорог, мостов и тоннелей»
ФГБОУ ВО «УГЛТУ», к.т.н., доцент» С. А. Чудинов

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель генерального директора
По строительству ООО «Союз Автодор»
_____ Осокин Д.А.
«08» ноября 2024 г.

Акт о внедрении результатов научно-исследовательской работы

ООО «Союз Автодор» подтверждает, что доцент ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» (ФГБОУ ВО «УГЛТУ») Чудинов С.А. обосновал и представил компании технические и технологические решения по строительству дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог на основе дисперсно-армированных композиций из укрепленных грунтов. Данная ресурсосберегающая технология позволяет производить строительство лесовозных автомобильных дорог в отдаленных районах освоения лесосырьевых баз, характеризующихся сложными природными условиями и отсутствием местных каменных материалов, что обеспечило разработку лесных насаждений и транспортировку лесоматериалов потребителям с наименьшими эксплуатационными затратами.

Предлагаемая технология строительства лесовозных автомобильных дорог позволяет повысить эффективность укрепления грунтов портландцементом для достижения высоких прочностных показателей, трещиностойкости и морозостойкости фиброцементогрунтовых слоев конструкций дорожных одежд, которые доказаны теоретическим и экспериментальным путем. Строительство дорожных одежд из фиброцементогрунта производится на основе местных грунтов с добавкой портландцемента и волокон фибры, при этом не требуется применение традиционно используемых каменных материалов. Таким образом, разработанная Чудиновым С.А. технология устройства дорожных одежд на основе дисперсно-армированных цементогрунтовых композиций является наиболее экономически эффективной по отношению к существующим технологиям строительства лесовозных автомобильных дорог.

Результаты исследований используются в ООО «Союз Автодор» при строительстве сети лесовозных автомобильных дорог для круглогодичной транспортировки лесоматериалов, в том числе из труднодоступных районов освоения лесосырьевых баз.

Заместитель главного инженера
ООО «Союз Автодор» Красников А.А.

Доцент
ФГБОУ ВО «УГЛТУ» Чудинов С.А.
«08» ноября 2024 г.

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе
ФГБОУ ВО «Уральский государственный
лесотехнический университет»
_____ Безгина Ю.Н.
21 апреля 2025 г.

АКТ
о внедрении результатов научных исследований в учебный процесс

Комиссия в составе представителей кафедры технологии и оборудования лесопромышленного производства федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный лесотехнический университет» (ФГБОУ ВО УГЛТУ): заведующего кафедрой Мехренцева А.В., доцента Солдатова А.В., доцента Курдышевой Е.В. и заведующего кафедрой автомобильных дорог, мостов и тоннелей ФГБОУ ВО УГЛТУ Чудинова С.А. составила настоящий акт о том, что результаты научных исследований, выполненных заведующим кафедрой автомобильных дорог, мостов и тоннелей Чудиновым С.А., используются в учебном процессе кафедры технологии и оборудования лесопромышленного производства при подготовке бакалавров по направлению 35.03.02 «Технология лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств»; магистров по направлению 35.04.02 «Технология лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств».

Внедрение по учебным дисциплинам: «Технология и машины лесосечных работ», «Технология и оборудование лесных складов и деревообрабатывающих цехов», «Проектирование лесозаготовительных и деревообрабатывающих производств», «Логистика лесопромышленного производства», «Основы энергосбережения в лесопромышленном производстве».

В учебном процессе используются: транспортно-технологические схемы поставки древесины потребителям, функционирующие на базе лесовозных лесных дорог с конструкцией дорожной одежды из фиброцементогрунта; аналитические зависимости структурных прочностных характеристик фиброцементогрунта в дорожной одежде лесовозных автомобильных дорог в зависимости от компонентного состава; аналитические зависимости для подбора оптимальных составов фиброцементогрунтовых композиций в конструкциях дорожных одежд; типовые проектные решения и методика конструирования и расчета дорожных одежд из фиброцементогрунта; технологические требования по устройству и эксплуатации фиброцементогрунтовых слоев конструкций лесовозных лесных дорог; технологические особенности рекультивации и повторного использования цементогрунтовых слоев для устройства новых дорожных одежд из фиброцементогрунта; методика расчета технико-экономической эффективности строительства лесовозных автомобильных дорог из фиброцементогрунта.

Использование представленных результатов научных исследований в учебном процессе способствует повышению качества образования и совершенствованию профессиональной подготовки обучающихся.

Мехренцев А.В.
Солдатов А.В.
Курдышева Е.В.
Чудинов С.А.

21.04.2025 г.