

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Екатеринбург 2025

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Уральский государственный лесотехнический университет» (ФГБОУ ВО «УГЛТУ»).

Научный консультант: **Гороховский Александр Григорьевич**
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет»

Официальные оппоненты: **Козлов Вячеслав Геннадиевич**
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», заведующий кафедрой эксплуатации транспортных и технологических машин

Виноградов Алексей Юрьевич
доктор технических наук, доцент, генеральный директор ООО Научно-производственное объединение «Гидротехпроект», профессор кафедры промышленного транспорта ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова»

Еналеева – Бандура Ирина Михайловна
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева», профессор кафедры лесного инжиниринга

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова»

Защита диссертации состоится «23» октября 2025 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.424.01 при ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», 620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37, аудитория 1-401.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», <http://www.usfeu.ru/>.

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор



Шишкина Елена Евгеньевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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.

Задачи исследования:

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.

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); «Лесозэксплуатация 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель, научная новизна работы, а также теоретическая и практическая значимость исследований. Раскрываются научные положения, выносимые на защиту, методология и методы исследований. Содержатся данные об апробации работы, структуре и объеме диссертации.

В первой главе проведен анализ особенностей конструирования и устройства лесовозных лесных дорог, представлены технологии укрепления грунтов химическими методами, рассмотрены современные аспекты дисперсного армирования конструкционных материалов, виды и характеристика армирующих волокон, а также свойства дисперсно армированных композиций на основе портландцемента в обосновании перспективных возможностей для применения конструкций дорожных одежд на основе фиброцементогрунтовых композиций.

На основе анализа работ, выполненных различными коллективами и авторами, сделано заключение, что совершенствование конструкций лесовозных лесных дорог на основе фиброцементогрунтовых композиций на современном этапе является актуальным и требует дальнейших исследований.

Вторая глава посвящена теоретическим исследованиям процессов структурообразования фиброцементогрунтовых композиций: рассмотрены особенности процессов структурообразования цементогрунта в конструкции лесовозных лесных дорог, представлены аналитические зависимости для обоснования оптимальных условий возникновения кристаллизационных контактов срастания между кристаллами гидратных новообразований, выявлены особенности процессов структурообразования дисперсно армированных цементных композиций, а также фиброцементогрунтовых композиций на основе различных волокон. Создана концепция механизма структурообразования фиброцементогрунтовых композиций с высокой плотностью и математическая модель фиброцементогрунта, отражающая взаимодействие основных структурообразующих элементов и их взаимосвязь со свойствами получаемого материала для условий применения в конструкциях лесовозных лесных дорог.

Известно, что распределенные в объеме фиброцементогрунта волокна способны удерживаться внутри цементогрунтовой матрицы и дисперсно армировать материал, воспринимая посредством своего осевого растяжения воздействие внешних нагрузок и увеличивая структурные прочностные показатели: угол внутреннего трения и удельный коэффициент сцепления, что обеспечивает возрастание прочности материала на сдвиг. Для исследования структурных взаимодействий компонентов создана математическая модель фиброцементогрунта, дисперсно армированного волокнами в зоне сдвига (рис. 1).

Волокна могут быть изначально ориентированы перпендикулярно к плоскости сдвига ($\alpha = 90^\circ$) либо под произвольным углом к горизонтали ($\alpha < 90^\circ$). Сдвиг приводит к деформированию волокна, возникновению в нем осевого напряжения, тем самым повышая прочность на сдвиг материала. Растягивающее волокно усилие можно разделить на составляющие, перпендикуляр-

ные 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.

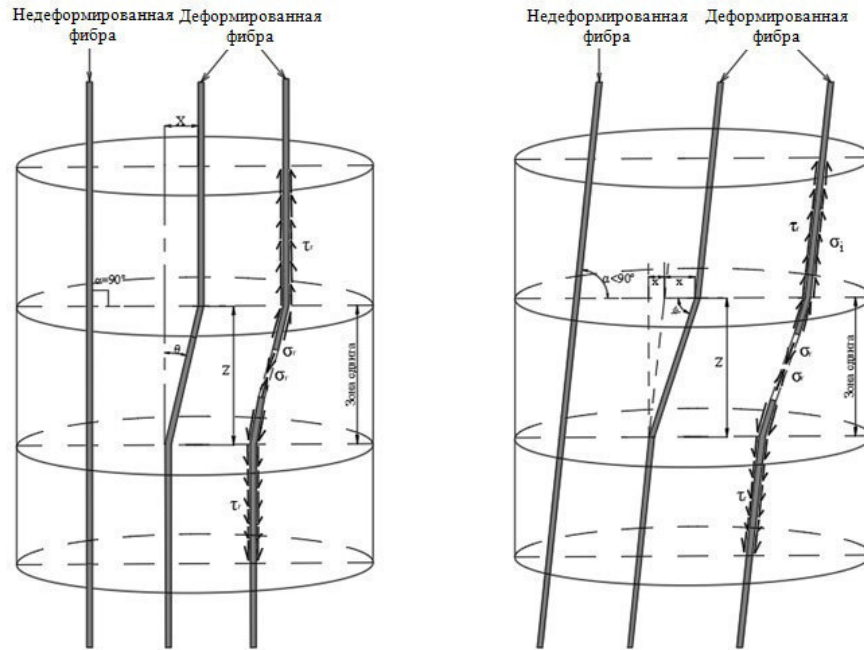


Рисунок 1 – Модель фиброцементогрунта, дисперсно армированного волокнами в зоне сдвига: а) ориентация волокон перпендикулярно к плоскости сдвига; б) ориентация волокон под произвольным углом к горизонтали

Основываясь на полученную модель, увеличение прочности на сдвиг фиброцементогрунта за счет дисперсного армирования волокнами, соответствующее разности прочности на сдвиг дисперсно-армированного (S_R) и неармированного цементогрунта (S), для случая ориентации волокон перпендикулярно к плоскости сдвига можно оценить по выражению (1) при условии линейного распределения растягивающего напряжения в плоскости сдвига и по выражению (2) при условии параболического распределения растягивающего напряжения в плоскости сдвига. Для случая ориентации волокон под произвольным углом к горизонтали увеличение прочности на сдвиг можно оценить по выражению (3) при условии линейного распределения растягивающего напряжения в плоскости сдвига и по выражению (4) при условии параболического распределения растягивающего напряжения в плоскости сдвига.

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

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

$$\Delta S = \left(\frac{A_f}{A}\right) \cdot \left(\frac{4E_f\tau_f}{D}\right)^{1/2} \cdot (z(\sec\theta - 1))^{1/2} \cdot (\cos(\psi) + \sin(\psi) \cdot \operatorname{tg}\varphi) \quad (3)$$

$$\Delta S = \left(\frac{A_f}{A}\right) \cdot \left(\frac{8E_f\tau_f}{3D}\right)^{1/2} \cdot (z(\sec\theta - 1))^{1/2} \cdot (\cos(\psi) + \sin(\psi) \cdot \operatorname{tg}\varphi) \quad (4)$$

где: ΔS — увеличение прочности на сдвиг за счет дисперсного армирования волокнами;

A_f — общая площадь поперечного сечения волокон, находящихся в плоскости сдвига;

A — общая площадь поперечного сечения плоскости сдвига;

E_f — модуль упругости волокна;

τ_f — напряжение поверхностного трения вдоль волокна;

D — диаметр волокна;

z — толщина зоны сдвига;

θ — угол наклона от вертикальной плоскости при деформации волокон под действием сдвиговой нагрузки;

φ — угол внутреннего трения цементогрунтовой матрицы;

ψ — угол наклона от горизонтальной плоскости при деформации волокон под действием сдвиговой нагрузки.

В результате преобразования уравнений (1 – 4) получим выражения по определению прочности на сдвиг (5) и по определению коэффициента прочности на сдвиг фиброцементогрунта, дисперсно армированного волокнами (6).

$$\begin{aligned}
 S_R &= 2A_r \sigma a_r \operatorname{tg} \varphi_i \sin \alpha \left(\frac{1 - \sin \varphi \cdot \sin (\varphi - 2\alpha)}{\cos^2 \varphi} \right) \cos(\psi) + \\
 &+ \left(\sigma + 2A_r \sigma a_r \operatorname{tg} \varphi_i \sin \alpha \left(\frac{1 - \sin \varphi \cdot \sin (\varphi - 2\alpha)}{\cos^2 \varphi} \right) \sin(\psi) \right) \operatorname{tg} \varphi = \\
 &= \sigma \left((2A_r a_r \operatorname{tg} \varphi_i \sin \alpha \left(\frac{1 - \sin \varphi \cdot \sin (\varphi - 2\alpha)}{\cos^2 \varphi} \right) (\cos(\psi) + (\sin(\psi) \operatorname{tg} \varphi))) + \operatorname{tg} \varphi \right)
 \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
 K_{\text{пр}}^{\text{сдв}} &= \frac{\sigma \left((2A_r a_r \operatorname{tg} \varphi_i \sin \alpha \left(\frac{1 - \sin \varphi \cdot \sin (\varphi - 2\alpha)}{\cos^2 \varphi} \right) (\cos(\psi) + (\sin(\psi) \operatorname{tg} \varphi))) + \operatorname{tg} \varphi \right)}{\sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi} \\
 &= 2A_r a_r \operatorname{tg} \varphi_i \sin \alpha \left(\frac{1 - \sin \varphi \cdot \sin (\varphi - 2\alpha)}{\cos^2 \varphi} \right) \left(\frac{\cos(\psi)}{\operatorname{tg} \varphi} + \sin(\psi) \right) + 1
 \end{aligned} \tag{6}$$

где: S_R — прочность на сдвиг фиброцементогрунта, дисперсно армированного волокнами;

A_r — общая концентрация волокон, находящихся в плоскости сдвига;

σ — общее нормальное ограничивающее напряжение в цементогрунтовой матрице, приложенное к плоскости сдвига;

a_r — отношение длины волокна (L) к его диаметру (D) ($a_r = \left(\frac{L}{D}\right)$);

$K_{\text{пр}}^{\text{сдв}}$ — коэффициент прочности на сдвиг ($K_{\text{пр}}^{\text{сдв}} = \frac{S_R}{S}$)

Выделив тонкий элемент из фиброцементогрунтового образца, имеющий в объеме цементогрунтовой матрицы случайно распределенные волокна (рис. 2), преобразуем выражение (6) с учетом площади поперечного сечения волокон в плоскости сдвига ($A_{f1}, A_{f2}, A_{f3}, \dots A_{fn}$), площади цементогрунтовой матрицы, включая поры в плоскости сдвига (A_{csm}) и толщины элемента (ΔL).

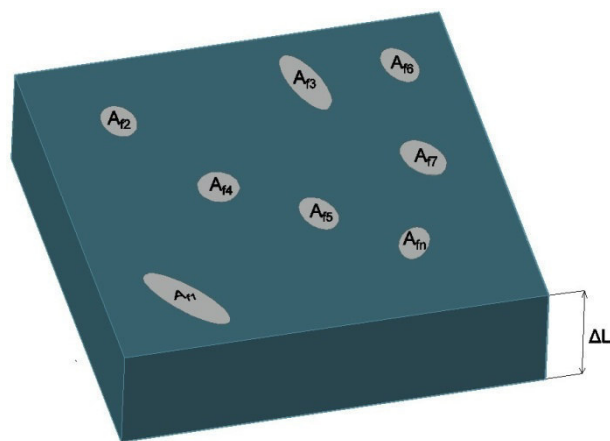


Рисунок 2 – Модель элемента из фиброцементогрунтового образца

$$K_{np}^{сдв} = 1 + 2\beta_1\beta_2 \left(\frac{p_f \left(\frac{G_{ss}}{G_f(1+e_s)} \right)}{1 + p_f \left(\frac{G_{ss}}{G_f(1+e_s)} \right)} \right) \left(\frac{\sin\alpha}{1 + 2\beta_1\beta_2 \left(\frac{\sigma}{E_f} \right)} + \sqrt{\frac{\cos^2\alpha + 4\beta_1\beta_2 \left(\frac{\sigma}{E_f} \right) \left(1 + \beta_1\beta_2 \left(\frac{\sigma}{E_f} \right) \right)}{\left(1 + 2\beta_1\beta_2 \left(\frac{\sigma}{E_f} \right) \right) \tan\varphi}} \right) \quad (7)$$

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

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

p_f - содержание волокон в элементе фиброцементогрунта;

G_f - плотность волокон;

G_{ss} - плотность твердых частиц цементогрунтовой матрицы;

e_s - коэффициент пустотности цементогрунтовой матрицы.

Таким образом, дисперсное армирование волокнами позволяет повысить прочность фиброцементогрунта на сдвиг в зависимости от следующих показателей: увеличения содержания волокон; увеличения отношения длины волокна к его диаметру; использования низкомодульных волокон с преимущественной ориентацией к плоскости сдвига на 60° и увеличения поверхностного трения на границе раздела фаз «волокно – цементогрунтовая матрица».

Согласно современной физико-химической теории твердения минеральных вяжущих веществ, формирование прочной дисперсной структуры обеспечивается возникновением крепких кристаллизационных контактов срастания между кристаллами гидратных новообразований. Расстояние (h_k), при котором возникновение контактов происходит с той же вероятностью, как и возникновение зародышей роста, определяется по выражению (8).

$$h_k \approx \frac{d_0}{2} \sqrt{\frac{4w/kT}{\ln \varepsilon^x}} \quad (8)$$

где: d_0 – межмолекулярное расстояние;

w – энергия связи между двумя молекулами;

k - постоянная Больцмана;

T – абсолютная температура;

$\varepsilon = c/c_\infty$ – степень пересыщения гидратными новообразованиями.

Из выражения (8) следует, что 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 $h \leq h_k$. Однако глинистые частицы обладают высокой гидрофильностью и способны удерживать на своей поверхности 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 переувлажнённых глинистых грунтов портландцементом создание благоприятных условий для формирования оптимально развитой плотной цементогрунтовой структуры невозможно.

В данных условиях в целях интенсификации процессов структурообразования цементогрунтовой матрицы целесообразным является использование добавки – водорастворимый полиэлектролит поли-N,N-диметил-N,N-диаллиламмоний хлорид (полиДМДААХ). ПолиДМДААХ – высокомолекулярный сильноосновной катионный полимер линейно-циклической структуры. При введении в фиброцементогрунтовую смесь в виде раствора полиэлектролит диссоциирует с образованием полимерного органического катиона, который адсорбируется на глинистых частицах, нейтрализуя их поверхностный отрицательный заряд и снижая ζ – потенциал. В результате происходит значительное сокращение водной оболочки глинистых коллоидов, создавая условия максимального сближения частиц и обеспечивая высокую структурную плотность цементогрунтовой матрицы. Благодаря нейтрализации поверхностного заряда, процессы изоморфного замещения глинистыми частицами минимизируются, вследствие чего прекращаются реакции связывания извести глинистыми минералами и создаются предпосылки повышенной степени пересыщения дисперсионной среды, а также образования дополнительного цементирующего вяжущего и устойчивых высокоосновных гидросиликатов кальция. Таким образом, результатом действия полиДМДААХ является создание оптимальных факторов для возникновения крепких кристаллизационных контактов срастания и формирования плотной структуры цементогрунтовой матрицы, обеспечивающей увеличение поверхностного трения на границе раздела фаз «волокно – цементогрунтовая матрица» и повышение прочностных показателей фиброцементогрунтовых композиций в условиях лесной зоны.

В третьей главе рассматриваются направления исследований, изложена методика проведения экспериментов и статистической обработки их результатов, описаны параметры применяемого оборудования и контрольно-измерительной аппаратуры, приводятся характеристики компонентов фиброцементогрунтовых композиций.

Для экспериментов использовались следующие материалы: естественные глинистые грунты, отобранные из земляного полотна лесовозных лесных дорог в Свердловской области; портландцемент ЦЕМ II/В-И 32,5Б по ГОСТ 31108-2020;

фибра базальтовая, стеклянная, полипропиленовая и на основе базальтового волокна из отходов производства теплоизоляционных плит; полиэлектролит полиДМДААХ, являющийся побочным продуктом производства синтетического глицерина; зола-уноса Рефтинской ГРЭС; минеральная добавка, полученная с помощью сухой электросепарации золы-уноса Рефтинской ГРЭС; битумная эмульсия ЭБДК С по ГОСТ Р 58952.1-2020; минеральная добавка на основе пылевидных частиц из дробленого бетона и железобетона; щебень фракции 16,0-31,5 мм по ГОСТ 32703-2014; вода по ГОСТ 51232-98.

Исследования физико-механических характеристик фиброцементогрунтовых композиций проводились в соответствии с ГОСТ Р 70456-2022, ГОСТ Р 70452-2022, ГОСТ 12248.1-2020, ГОСТ 12248.3-2020. Изучение структуры материалов выполнялось методом оптической микроскопии, анализ процессов структурообразования – методом ИК-спектроскопии. Исследования транспортно-эксплуатационных показателей конструкций лесовозных лесных дорог на опытных участках проводились в соответствии с ОДМ 218.4.039-2018. Расчет прочностных показателей конструкций дорожной одежды производился в соответствии с ГОСТ Р 71404-2024, моделирование деформационных характеристик – методом конечных элементов.

Опытные данные оценивались посредством обработки результатов экспериментов методами математической статистики. Обоснование однородности дисперсии опытов осуществлялось по критерию Кохрена, значимость коэффициентов уравнения регрессии оценивалась критерием Стьюдента, адекватность модели проверялась с помощью анализа остатков и по критерию Фишера.

В четвертой главе представлены лабораторные исследования свойств фиброцементогрунтовых композиций в конструкциях лесовозных лесных дорог.

Согласно результатам исследований и разработанных экспериментально-статистических моделей (9 – 11) установлено, что конструкция лесовозных лесных дорог на основе фиброцементогрунта с содержанием базальтовых волокон 2,0 – 2,5 % и длиной 25 мм позволяет увеличить прочность на сжатие на 21,4 %, прочность на растяжение при раскалывании на 42,4 % (рис. 3) и коэффициент морозостойкости на 25,7 % по сравнению цементогрунтом, имеющим аналогичное содержание минерального вяжущего.

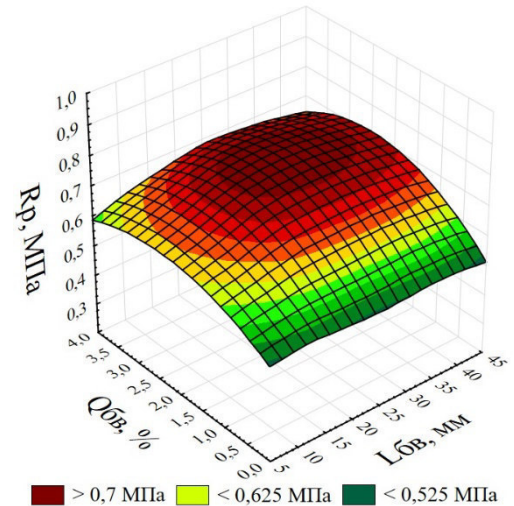


Рисунок 3 – Поверхность отклика прочности на растяжение при раскалывании в зависимости от длины и содержания базальтового волокна

$$R_{сж} = -0,625 - 0,0003L_{бв}^2 - 0,089Q_{бв}^2 - 0,027Q_{пц}^2 + 0,433Q_{бв} + 0,839Q_{пц} + 0,018L_{бв} - 0,043I_p \quad (9)$$

$$R_p = 0,192 - 0,001I_p^2 - 0,028Q_{бв}^2 + 0,0005L_{бв}Q_{бв} + 0,006Q_{бв}Q_{пц} + 0,004Q_{пц}I_p + 0,096Q_{бв} + 0,039Q_{пц} \quad (10)$$

$$R_{мрз} = 0,734 - 0,033Q_{бв}^2 - 0,0004I_p^2 + 0,153Q_{бв} \quad (11)$$

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

R_p – предел прочности на растяжение при раскалывании, МПа;

$K_{мрз}$ – коэффициент морозостойкости, ед.;

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

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

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

I_p – число пластичности грунта, ед.

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 среде Matlab. Средняя абсолютная ошибка нейронных сетей для тестовых выборок по определению прочности на сжатие составила $MAPE = 0,632 \%$ и по определению прочности на растяжение при раскалывании – $MAPE = 4,847 \%$, что свидетельствует о корректной настройке интеллектуальных систем на итоговом этапе проверки адекватности.

Программная реализация интеллектуальных систем и их достаточная адекватность позволяет производить оперативный и высокоточный расчет прочностных показателей фиброцементогрунта на базе естественного грунта – суглинка тяжелого пылеватого в зависимости от содержания портландцемента 4 – 8 % и базальтовой фибры от 0 – 4 % с различной длиной волокон от 5 мм до 45 мм в целях конструирования и расчета конструкций лесовозных лесных дорог. На основе полученных данных установлены максимальные прочностные показатели фиброцементогрунта при содержании базальтовой фибры 2,0 – 2,5 % и средней длине волокон 25 мм.

С целью исследования свойств фиброцементогрунтовых композиций на основе базальтовых волокон из техногенных отходов производства теплоизоляционных плит проведены лабораторные испытания по результатам которых разработаны экспериментально-статистические модели (11 – 13). Установлено, что конструкция лесовозных лесных дорог на основе фиброцементогрунта с содержанием базальтовых волокон на основе отходов производства теплоизоляционных плит 1,5 % позволяет увеличить прочность на сжатие на 10,2 %, прочность на растяжение при раскалывании на 20,3 % (рис. 4) и коэффициент морозостойкости на 19,8 % по сравнению цементогрунтом, имеющим аналогичное содержание минерального вяжущего.

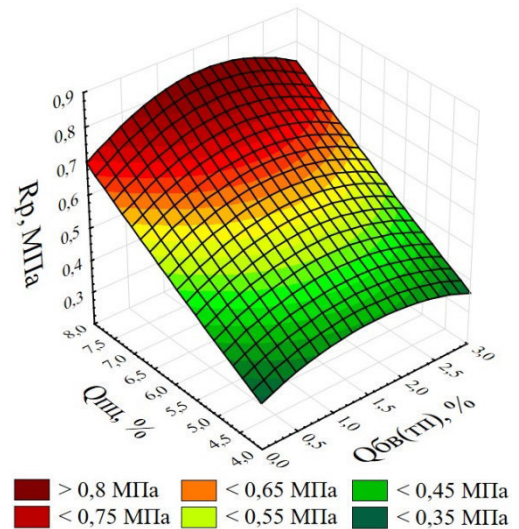


Рисунок 4 – Поверхность отклика прочности на растяжение при раскалывании в зависимости от содержания волокна и портландцемента

$$R_{сж} = -0,017 - 0,108Q_{бв(тп)}^2 + 0,376Q_{бв(тп)} + 0,618Q_{пц} - 0,009Q_{пц}I_p \quad (11)$$

$$R_p = 0,445 - 0,039Q_{бв(тп)}^2 - 0,001I_p^2 + 0,127Q_{бв(тп)} + 0,094Q_{пц} \quad (12)$$

$$R_{мрз} = 0,776 - 0,053Q_{бв(тп)}^2 + 0,201Q_{бв(тп)} - 0,003Q_{бв(тп)}I_p \quad (13)$$

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

R_p – предел прочности на растяжение при раскалывании, МПа;

$K_{\text{мрз}}$ – коэффициент морозостойкости, ед.;

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

$Q_{\text{пц}}$ – содержание портландцемента, % от массы сухого грунта;

I_p – число пластичности грунта, ед.

По результатам исследований свойств фиброцементогрунтовых композиций на основе стеклянных волокон и разработанных экспериментально-статистических моделей (14 – 16) установлено, что конструкция лесовозных лесных дорог на основе фиброцементогрунта с содержанием стеклянных волокон 2,0 – 2,5 % и длиной 25 мм позволяет увеличить прочность на сжатие на 19,4 %, прочность на растяжение при раскалывании на 39,8 % (рис. 5) и коэффициент морозостойкости на 24,3 % по сравнению цементогрунтом, имеющим аналогичное содержание минерального вяжущего.

$$R_{\text{сж}} = -0,052 - 0,0002L_{\text{св}}^2 - 0,085Q_{\text{св}}^2 - 0,026Q_{\text{пц}}^2 + 0,013Q_{\text{св}}Q_{\text{пц}} + 0,001L_{\text{св}}I_p + 0,323Q_{\text{св}} + 0,799Q_{\text{пц}} - 0,068I_p \quad (14)$$

$$R_p = 0,173 - 0,026Q_{\text{св}}^2 - 0,001I_p^2 + 0,0004L_{\text{св}}Q_{\text{св}} + 0,005Q_{\text{св}}Q_{\text{пц}} + 0,004Q_{\text{пц}}I_p + 0,088Q_{\text{св}} + 0,045Q_{\text{пц}} \quad (15)$$

$$R_{\text{мрз}} = 0,793 - 0,032Q_{\text{св}}^2 + 0,146Q_{\text{св}} - 0,009I_p \quad (16)$$

где: $R_{\text{сж}}$ – предел прочности на сжатие, МПа;

R_p – предел прочности на растяжение при раскалывании, МПа;

$K_{\text{мрз}}$ – коэффициент морозостойкости, ед.;

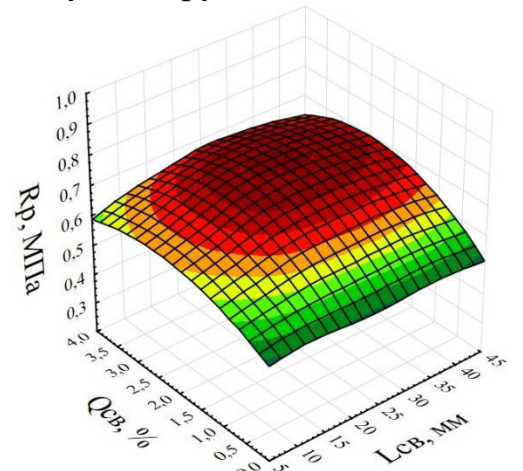
$L_{\text{св}}$ – длина стеклянного волокна, мм;

$Q_{\text{св}}$ – содержание стеклянного волокна, % от массы сухого грунта;

$Q_{\text{пц}}$ – содержание портландцемента, % от массы сухого грунта;

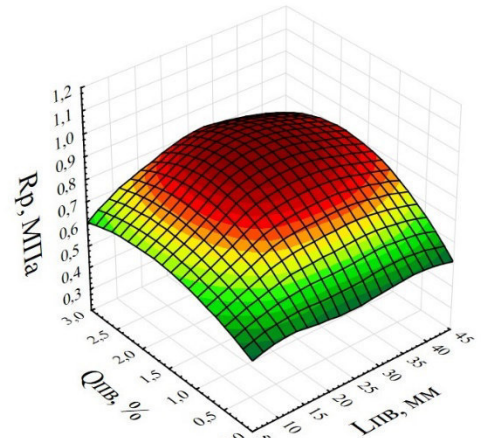
I_p – число пластичности грунта, ед.

С целью исследования свойств фиброцементогрунтовых композиций на основе полипропиленовых волокон проведены лабораторные испытания, по результатам которых разработаны экспериментально-статистические модели (17 – 19). Установлено, что конструкция лесовозных лесных дорог на основе фиброцементогрунта с содержанием полипропиленовых волокон 1,5 – 2,0 % позволяет увеличить прочность на сжатие на 31,8 %, прочность на растяжение при раскалывании на 70,5 % (рис. 6) и коэффициент морозостойкости на 29,2 % по сравнению цементогрунтом, имеющим анало-



■ > 0,7 МПа ■ < 0,625 МПа ■ < 0,525 МПа

Рисунок 5 – Поверхность отклика прочности на растяжение при раскалывании в зависимости от длины и содержания стеклянного волокна



■ > 0,9 МПа ■ < 0,825 МПа ■ < 0,725 МПа ■ < 0,625 МПа ■ < 0,525 МПа

Рисунок 6 – Поверхность отклика прочности на растяжение при раскалывании в зависимости от длины и содержания полипропиленового волокна

гичное содержание минерального вяжущего.

$$R_{сж} = -0,082 - 0,0003L_{пв}^2 - 0,225Q_{пв}^2 - 0,028Q_{пц}^2 + 0,001L_{пв}Q_{пв} + 0,001L_{пв}I_p + 0,037Q_{пв}Q_{пц} + 0,012Q_{пв}I_p + 0,452Q_{пв} + 0,827Q_{пц} - 0,086I_p \quad (17)$$

$$R_p = 0,260 - 0,0002L_{пв}^2 - 0,070Q_{пв}^2 - 0,002I_p^2 + 0,001L_{пв}Q_{пв} + 0,012Q_{пв}Q_{пц} + 0,008Q_{пц}I_p + 0,013L_{пв} + 0,172Q_{пв} - 0,015Q_{пц} \quad (18)$$

$$R_{мрз} = 0,782 - 0,07Q_{пв}^2 + 0,236Q_{пв} - 0,008I_p \quad (19)$$

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

R_p – предел прочности на растяжение при раскалывании, МПа;

$K_{мрз}$ – коэффициент морозостойкости, ед.;

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

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

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

I_p – число пластичности грунта, ед.

Исследования влияния геометрических характеристик волокон на прочностные свойства конструкций лесовозных лесных дорог проводились на базе фиброцементогрунтовых композиций с добавкой портландцемента 8 % и полипропиленовой фибры. Согласно данным разработанных экспериментально-статистических моделей (20 – 21) установлено, что геометрические характеристики волокон существенно влияют на показатели прочности на сжатие и прочности на растяжение при раскалывании фиброцементогрунта (рис. 7). Учитывая результаты лабораторных исследований оптимальное соотношение длины фибры к ее диаметру составляет $L / D = 1000 - 1800$, что обеспечивает требуемую устойчивость волокон в цементогрунтовой матрице для достижения максимальных прочностных показателей

фиброцементогрунтовым слоям лесовозных лесных дорог.

$$R_{сж} = 3,969 - 0,0006L_{пв}^2 - 0,086Q_{пв}^2 - 0,003D_{пв}Q_{пв} - 0,009Q_{пв}I_p + 0,061L_{пв} - 0,003D_{пв} + 0,627Q_{пв} - 0,014I_p \quad (20)$$

$$R_p = 1,264 - 0,0003L_{пв}^2 - 0,041Q_{пв}^2 - 0,0006D_{пв}Q_{пв} + 0,025L_{пв} - 0,003D_{пв} + 0,257Q_{пв} - 0,083I_p \quad (21)$$

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

R_p – предел прочности на растяжение при раскалывании, МПа;

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

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

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

I_p – число пластичности грунта, ед.

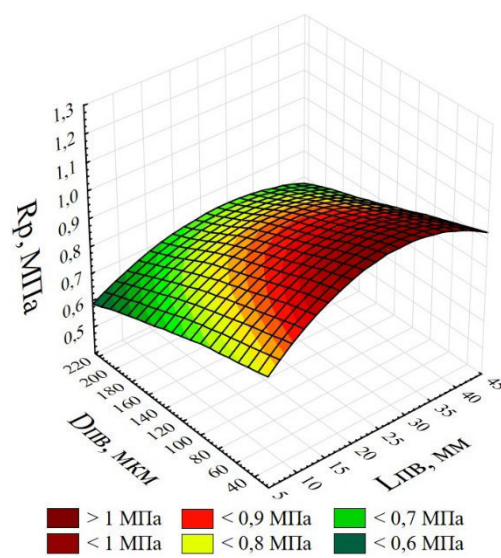


Рисунок 7 – Поверхность отклика прочности на растяжение при раскалывании в зависимости от длины и диаметра полипропиленового волокна

Моделирование и расчет конструкций лесовозных лесных дорог основывается на характеристиках структурной прочности фиброцементогрунта: угла внутреннего трения и удельного сцепления. С целью исследования данных показателей проведены лабораторные испытания, по результатам которых разработаны экспериментально-статистические модели (22 – 23). Установлено, что конструкция лесовозных лесных дорог на основе фиброцементогрунта с содержанием 1,5 % базальтовых волокон на основе отходов производства теплоизоляционных плит и 6 % портландцемента позволяет увеличить удельное сцепление на 43 % (рис. 8) и угол внутреннего трения на 8 % (рис. 9) по сравнению с цементогрунтом, имеющим аналогичное содержание минерального вяжущего.

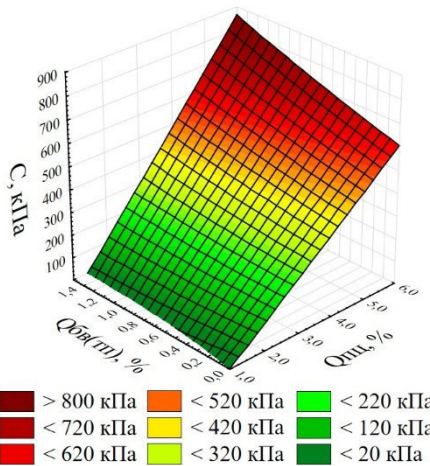


Рисунок 8 – Поверхность отклика удельного сцепления в зависимости от содержания портландцемента и фиброволокна

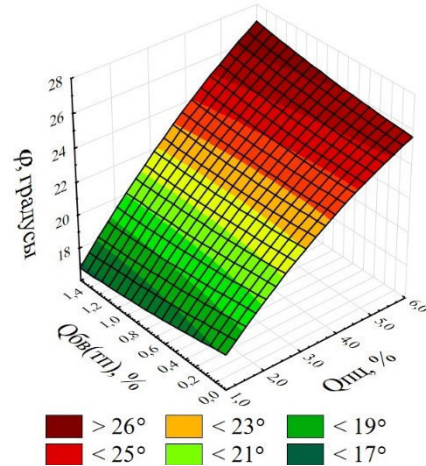


Рисунок 9 – Поверхность отклика угла внутреннего трения в зависимости от содержания портландцемента и фиброволокна

$$C = -117,434 + 0,379Q_{пц}^2 + 16,999Q_{бв(тп)}^2 + 44,783Q_{пц}Q_{бв(тп)} + 118,339Q_{пц} - 121,64Q_{бв(тп)} \quad (22)$$

$$\varphi = 15,874 - 0,122Q_{пц}^2 + 0,299Q_{бв}^2 + 0,367Q_{пц}Q_{бв} + 2,353Q_{пц} - 1,695Q_{бв} \quad (23)$$

где: C – удельное сцепление, кПа;
 φ – угол внутреннего трения, градусы;
 $Q_{пц}$ – содержание портландцемента, % от массы сухого грунта;
 $Q_{бв(тп)}$ – содержание базальтового волокна на основе отходов производства теплоизоляционных плит, % от массы сухого грунта.

Полученные данные свидетельствуют, что дисперсное армирование фиброцементогрунтовых композиций эффективно при содержании портландцемента более 2 %. В данных условиях поверхностное трение на границе раздела фаз «волокно – цементогрунтовая матрица» обеспечивает увеличение структурных прочностных характеристик материала. При этом эффективность фиброволокна повышается с ростом содержания портландцемента в составе фиброцементогрунта.

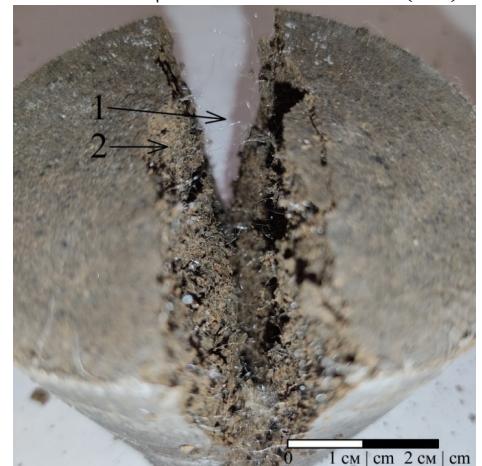


Рисунок 10 – Макроструктура фиброцементогрунта с содержанием портландцемента 6 % и фиброволокна 1,5 % от массы сухого грунта:
 1 – фиброволокно;
 2 – цементогрунтовая матрица

На основании показателей структурной прочности фиброцементогрунта произведено расчетное моделирование напряжений (рис. 10) и деформационных характеристик конструкций лесовозных лесных дорог с учетом нагрузок от лесотранспортных машин и связного грунта основания земляного полотна – суглинка легкого пылеватого различной консистенции: текучепластичной, мягкопластичной и твердой. С целью оценки эффективности исследование напряжений и деформационных характеристик конструкции лесовозной лесной дороги на основе фиброцементогрунта (тип 2) проводилось в сравнении с равнопрочными дорожными одеждами из цементогрунта (тип 1) и из каменных материалов (тип 3). По полученным зависимостям построены поверхности отклика вертикальной деформации (осадки) (рис. 11) и горизонтальной деформации (боковое смещение) (рис. 12).

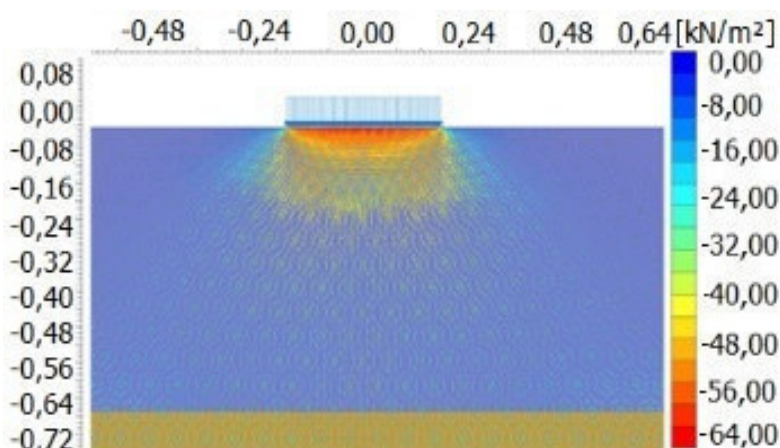


Рисунок 10 – Эпюра напряжений в конструкции дорожной одежды на основе фиброцементогрунта от лесотранспортной нагрузки на основании из суглинка легкого пылеватого текучепластичной консистенции

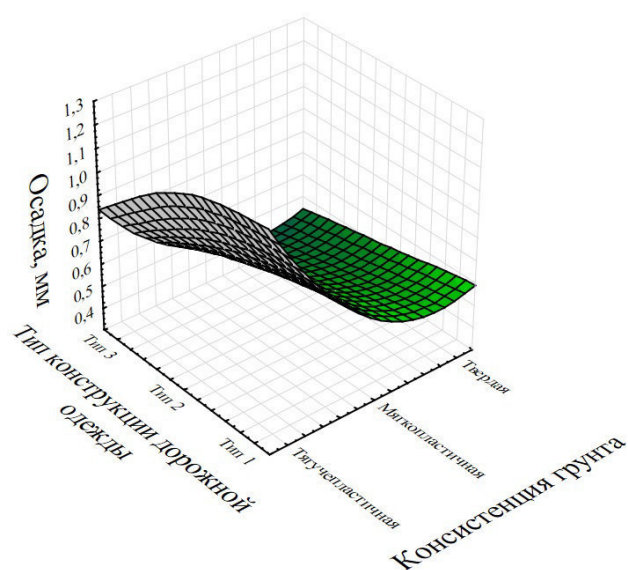


Рисунок 11 – Поверхность отклика вертикальной деформации (осадки) в зависимости от консистенции грунта основания и типа конструкции дорожной одежды

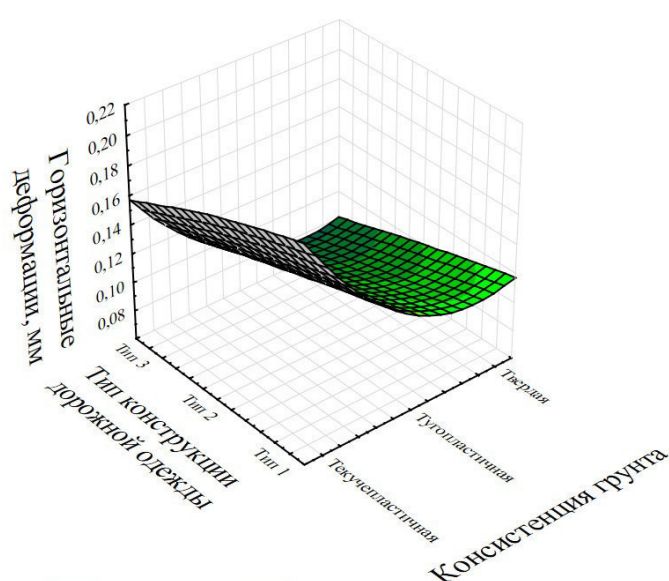


Рисунок 12 – Поверхность отклика горизонтальной деформации (боковое смещение) в зависимости от консистенции грунта основания и типа конструкции дорожной одежды

Согласно полученным данным, 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 рав-

ных прочностных характеристиках, дорожная одежда из щебня имеет толщину, большую на 20,6 %, чем конструкция из укрепленного грунта, что увеличивает ее деформационные характеристики, однако требует использования значительных объемов каменных материалов. Конструкция лесовозной лесной дороги на основе фиброцементогрунта 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. Снижение деформаций в конструкции дорожной одежды при действии нагрузок от лесовозного транспорта позволяет обеспечивать высокие транспортно-эксплуатационные показатели лесовозных лесных дорог в условиях слабых оснований.

Изучение структурных особенностей фиброцементогрунтовых композиций на основе различных видов фибры: стеклянной, полипропиленовой и базальтовой, а также волокон из отходов производства базальтовых теплоизоляционных плит, проведены методом оптической микроскопии. Исследование 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.

Из рисунка 12 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. При этом вследствие испытаний образцов на поверхности цементогрунта наблюдается сеть микротрещин. Структура фиброцементогрунта отличается отсутствием микротрещин и хорошо различимыми волокнами, выступающими на поверхности и удерживаемыми в цементогрунтовой матрице (рис. 13). В исследуемых образцах волокна распределены в объеме фиброцементогрунта хаотично, перекрещиваясь между собой и формируя дисперсный армоскелет материала.

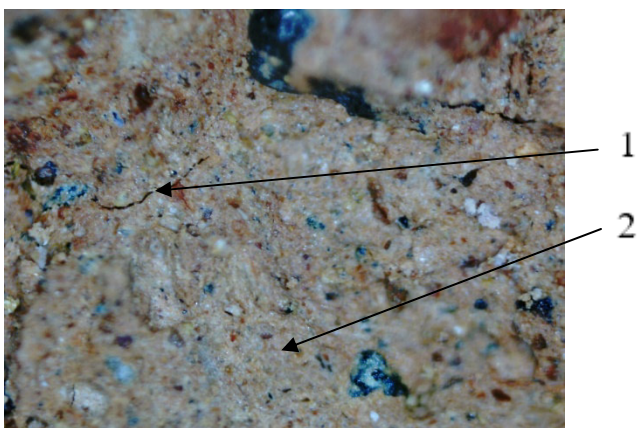


Рисунок 12 – Изображение структуры цементогрунта в возрасте 28 суток твердения: 1 – микротрещина; 2 – цементогрунтовая матрица



Рисунок 13 – Изображение структуры фиброцементогрунта в возрасте 28 суток твердения: 1 – стеклянные волокна; 2 – цементогрунтовая матрица

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 фиброцементогрунтовых композиций 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. Однако на поверхности стеклянных и полипропиленовых волокон наблюдаются локальные зоны гидратных новообразований цементационной природы (рис. 14). Через 3 суток твердения отчетливо видны кристаллические новообразования, удерживающие глинистые коллоиды и пылеватые частицы грунта, на поверхностях всех видов волокон (рис. 15). 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 (рис. 16). Через 28 суток твердения размеры кристаллических новообразований цементационной природы на поверхности фибры достигают еще больших размеров (рис. 17).

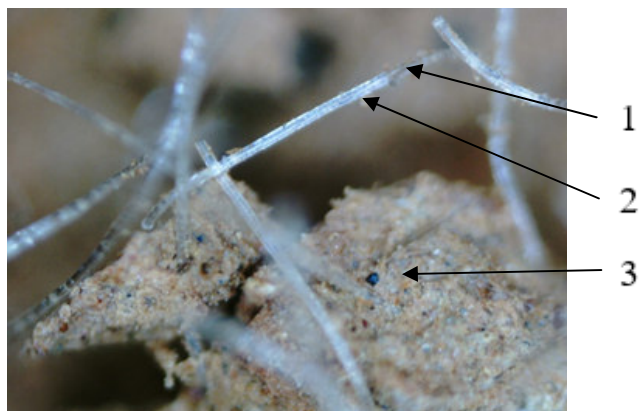


Рисунок 14 – Изображение структуры фиброцементогрунта в возрасте 16 часов твердения: 1 – полипропиленовые волокна; 2 – кристаллы гидратных новообразований на поверхности волокон; 3 – цементогрунтовая матрица

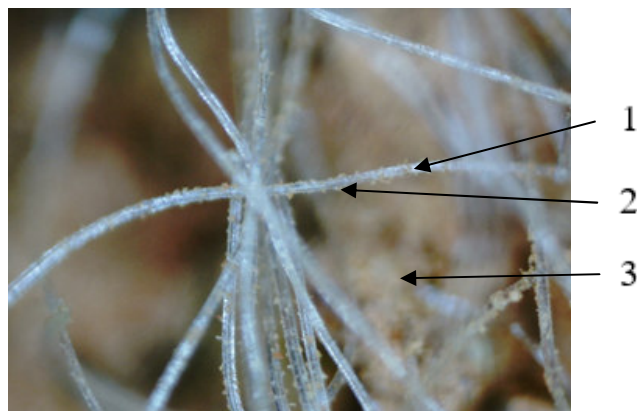


Рисунок 15 – Изображение структуры фиброцементогрунта в возрасте 3 суток твердения: 1 – полипропиленовые волокна; 2 – кристаллы гидратных новообразований на поверхности волокон; 3 – цементогрунтовая матрица

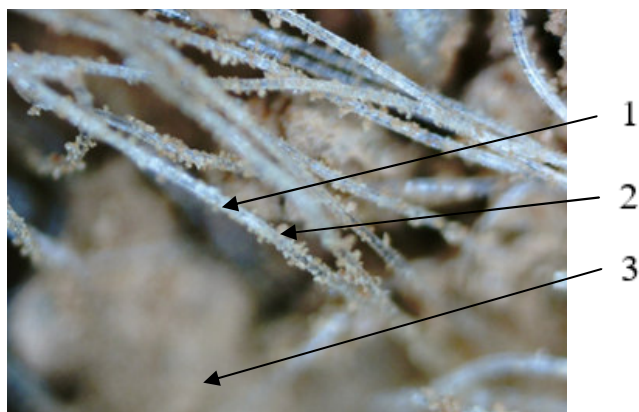


Рисунок 16 – Изображение структуры фиброцементогрунта в возрасте 7 суток твердения: 1 – полипропиленовые волокна; 2 – кристаллы гидратных новообразований на поверхности волокон; 3 – цементогрунтовая матрица

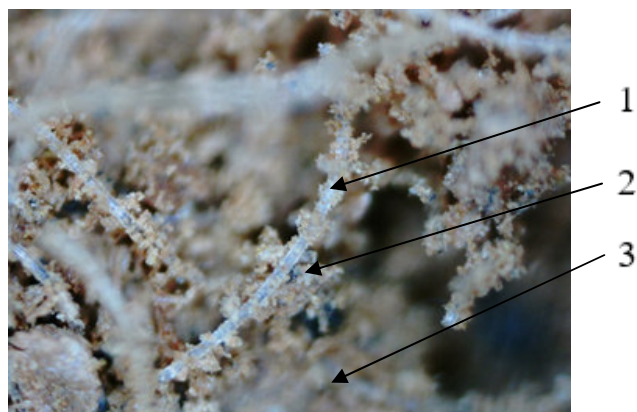


Рисунок 17 – Изображение структуры фиброцементогрунта в возрасте 28 суток твердения: 1 – полипропиленовые волокна; 2 – кристаллы гидратных новообразований на поверхности волокон; 3 – цементогрунтовая матрица

Таким образом, на основании результатов исследования установлено, что продукты гидратации клинкерных материалов в процессе твердения портланд-цемента образуются и развиваются опережающим темпом на поверхности 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.

Учитывая активность волокон в формировании структуры фиброцементогрунтовых композиций, проведено исследование процессов структурообразования по кинетике набора прочности. В качестве физико-механических характеристик фиброцементогрунтовых композиций с добавкой базальтовых волокон на основе отходов производства теплоизоляционных плит были определены: прочность на сжатие (рис. 18) и прочность на растяжение при раскалывании (рис. 19), при различных сроках твердения образцов: 7, 28 и 56 суток.

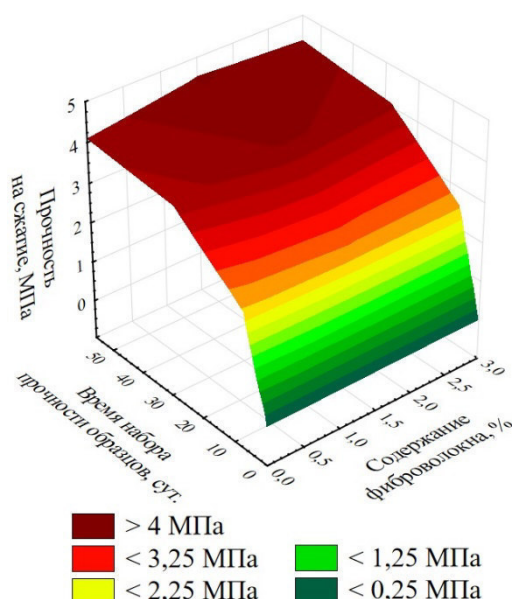


Рисунок 18 – Поверхность отклика прочности на сжатие в зависимости от содержания фиброволокна и времени твердения

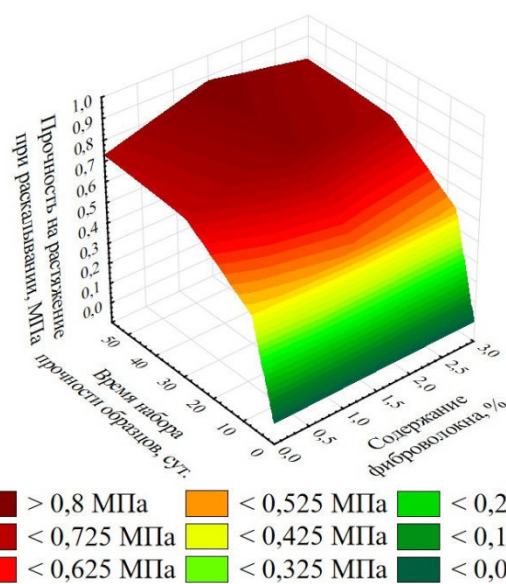


Рисунок 19 – Поверхность отклика прочности на растяжение при раскалывании в зависимости от содержания фиброволокна и времени твердения

Как показали результаты исследований, фиброцементогрунтовые композиции с добавкой 1,5 % базальтовых волокон на основе отходов производства теплоизоляционных плит в период с 7 суток до 56 суток твердения имеют прочность на сжатие выше до 10,9 % и прочность на растяжение при раскалывании выше до 21,4 % по сравнению с цементогрунтом, что свидетельствует о более динамичном процессе структурообразования фиброцементогрунтовых композиций.

Данные выводы также подтверждаются результатами исследований процессов структурообразования фиброцементогрунтовых композиций методом ИК-спектроскопии, при различных сроках набора прочности: 16 часов; 3 суток; 7 суток и 28 суток. Анализ количественного состава фаз, производимый путем сопоставления площадей отражения при одинаковой длине волны, установил, что введение различных видов фибры: стеклянной, полипропиленовой (рис. 20) и ба-

зальтовой, а также волокон из отходов производства базальтовых теплоизоляционных плит, при сроке твердения до 28 суток позволяет повысить интенсивность протекания процессов структурообразования фиброцементогрунтовых композиций, увеличив количество новообразований при гидратации портландцемента от 6 % до 15 % в сравнении с цементогрунтом.

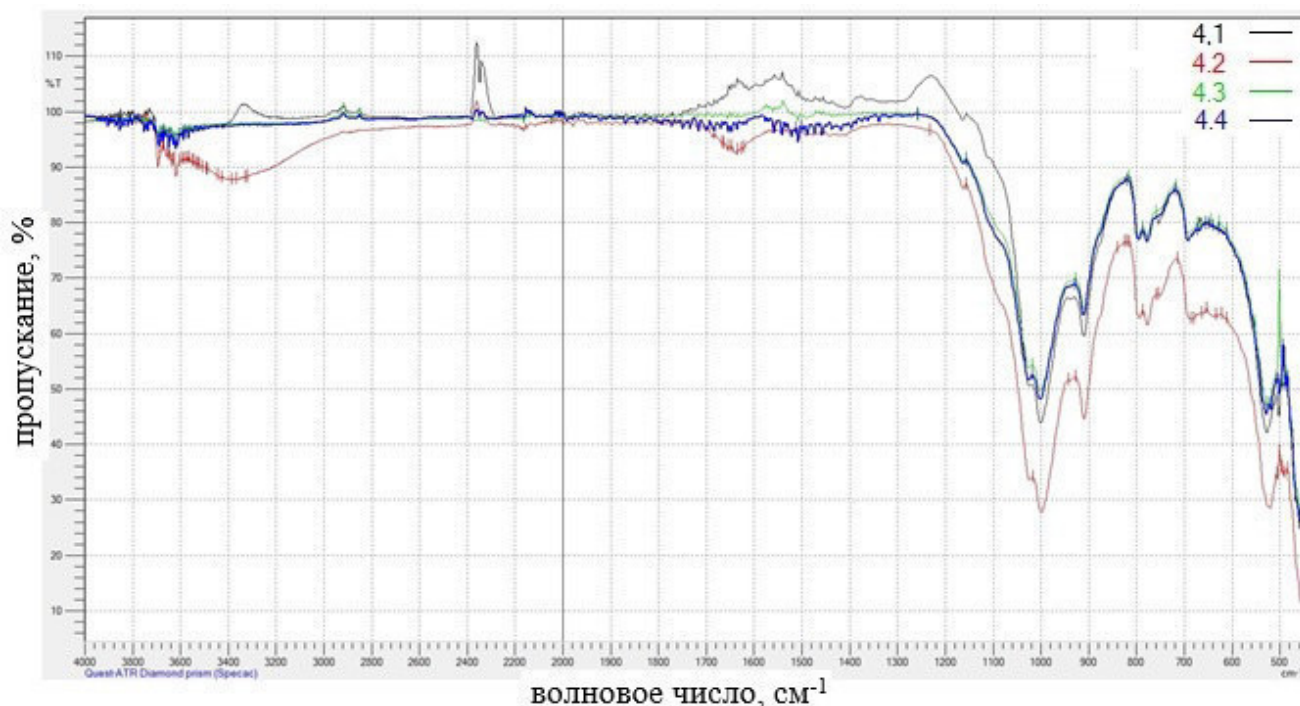


Рисунок 20 – ИК (ATR) – спектры фиброцементогрунтовых образцов с полипропиленовой фиброй при различных сроках набора прочности: 4.1 – 16 часов твердения; 4.2 – 3 суток твердения; 4.3 – 7 суток твердения; 4.4 – 28 суток твердения

Динамичный процесс структурообразования и 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 на основе фиброцементогрунтовых композиций.

В пятой главе разработаны практические рекомендации по проектированию составов и технологии устройства дорожной одежды, а также эффективные конструкции на основе фиброцементогрунтовых композиций, учитывающие особые условия лесной зоны: преобладание кислых, переувлажненных глинистых грунтов, и требования по обеспечению высоких транспортно-эксплуатационных качеств лесовозных лесных дорог.

В соответствии с результатами теоретических и лабораторных исследований, в целях обеспечения соблюдения технологических требований, а также контроля качества работ, разработан технологический регламент по устройству конструкций лесовозных лесных дорог с высокими транспортно-эксплуатационными показателями, учитывающий процессы приготовления оптимальных составов, укладки и ухода за фиброцементогрунтовым слоем.

Для повышения эффективности устройства конструкций лесовозных лесных дорог в условиях переувлажненных глинистых грунтов проведены исследования свойств фиброцементогрунтовых композиций с добавкой полиДМДААХ. На основании разработанных экспериментально-статистических моделей (24 – 26) установлено, что конструкция лесовозных лесных дорог на основе фиброцементогрунтовых композиций с содержанием базальтовых волокон 2,0 %, портландцемента 8,0 % и добавкой полиДМДААХ 0,3 % имеет превышение прочности на сжатие на 44,6 %, прочности на растяжение при раскалывании на 65,0 % (рис. 21) и коэффициента морозостойкости на 40,8 %, чем у цементогрунта. Полученные результаты подтверждают эффективность полиэлектролита по обеспечению благоприятных условий для формирования плотной структуры цементогрунтовой матрицы в условиях преобладания переувлажнённых глинистых грунтов в лесной зоне и усиливать действенность ее дисперсного армирования волокнами фибры.

$$R_{сж} = 3,839 - 0,157Q_{бв}^2 - 7,193Q_{пэ}^2 + 0,76Q_{бв} + 4,874Q_{пэ} \quad (24)$$

$$R_p = 0,681 - 0,051Q_{бв}^2 - 1,155Q_{пэ}^2 + 0,26Q_{бв} + 0,77Q_{пэ} \quad (25)$$

$$R_{мрз} = 0,667 - 0,035Q_{бв}^2 - 0,758Q_{пэ}^2 + 0,164Q_{бв} + 0,506Q_{пэ} \quad (26)$$

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

R_p – предел прочности на растяжение при раскалывании, МПа;

$K_{мрз}$ – коэффициент морозостойкости, ед.;

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

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

Для разработки конструкций лесовозных лесных дорог с повышенным коэффициентом сцепления проведены исследования состава фиброцементогрунтовой композиции с добавкой щебня и битумной эмульсии. 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 и обеспечивает высокие прочностные показатели и морозостойкость конструкции лесовозных лесных дорог.

Согласно данным разработанных экспериментально-статистических моделей (27 – 29) установлено, что конструкция лесовозных лесных дорог на основе фибробитумоцементогрунта с содержанием базальтовых волокон 2,0 %, портландцемента 8,0 % и добавками битумной эмульсии 7,0 % и щебня 25,0 % имеет превышение прочности на сжатие на 8,5 %, прочности на растяжение при

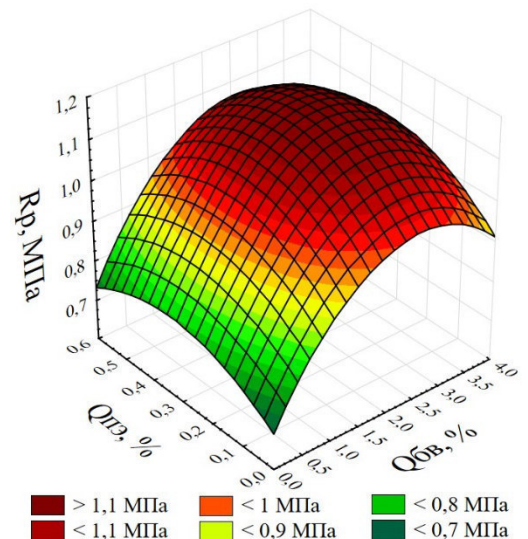
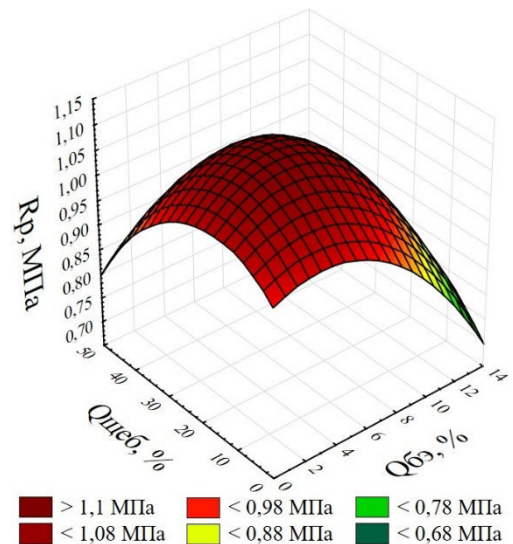


Рисунок 21 – Поверхность отклика прочности на растяжение при раскалывании в зависимости от содержания волокна и полиДМДААХ

раскалывании на 10,7 % (рис. 22) и коэффициента морозостойкости на 7,0 %, чем у фиброцементогрунта. Кроме того, опытно-экспериментальные исследования на лесовозной лесной дороге III категории показали, что фибробитумоцементогрунтовое покрытие имеет коэффициент сцепления на 39,1 % выше, чем аналогичный показатель на фиброцементогрунтовом покрытии. Полученные результаты подтверждают эффективность использования фибробитумоцементогрунта в верхнем слое покрытия дорожной одежды, в особенности для обеспечения безопасности движения в условиях высокой интенсивности на сложных участках лесовозных лесных дорог.



$$R_{сж} = 4,64 - 0,009Q_{бэ}^2 - 0,001Q_{щеб}^2 + 0,001Q_{бэ}Q_{щеб} + 0,054Q_{щеб} \quad (27)$$

$$R_p = 0,984 - 0,003Q_{бэ}^2 - 0,0002Q_{щеб}^2 + 0,0002Q_{бэ}Q_{щеб} + 0,022Q_{бэ} + 0,008Q_{щеб} \quad (28)$$

$$R_{мрз} = 0,849 - 0,002Q_{бэ}^2 - 0,0002Q_{щеб}^2 + 0,0002Q_{бэ}Q_{щеб} + 0,017Q_{бэ} + 0,005Q_{щеб} \quad (29)$$

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

R_p – предел прочности на растяжение при раскалывании, МПа;

$K_{мрз}$ – коэффициент морозостойкости, ед.;

$Q_{бэ}$ – содержание битумной эмульсии, % от массы сухого грунта;

$Q_{щеб}$ – содержание щебня, % от массы сухого грунта.

Для условий преобладания кислых глинистых грунтов проведены исследования свойств конструкций лесовозных лесных дорог на основе фиброзолоцементогрунтовых композиций с минеральной добавкой, полученной с помощью сухой электросепарации золы-уноса Рефтинской ГРЭС. Данная минеральная добавка имеет содержание оксидов железа менее 0,65 % по массе, что не приводит к снижению активности и прочностных свойств портландцемента. При этом в ее основе содержится CaO (5,6 % по массе), Al₂O₃ (23,9 % по массе) и SiO₂ (61,1 % по массе), в связи с чем, 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, которая эффективно удерживает фиброволокна, дисперсно армирующие фиброзолоцементогрунт.

На основании разработанных экспериментально-статистических моделей (30 – 32) установлено, что конструкция лесовозных лесных дорог из фиброзолоцементогрунта, содержащего базальтовое волокно 2,0 %, портландцемент 8,0 % и минеральную добавку на основе золы-уноса ГРЭС, обладает повышенными прочностными показателями и морозостойкостью и наиболее эффективна в условиях кислых глинистых грунтов, распространенных в лесной зоне. При увеличении кислотности грунта pH с 6,5 до 4,5 содержание минеральной добавки на основе золы-уноса ГРЭС 5,0 % позволяет увеличить прочность на сжатие фибро-

золоцементогрунтовых конструкций на 27,4 %, прочность на растяжение при раскалывании – на 31,1 % (рис. 23) и коэффициент морозостойкости – на 30,0 %.

$$R_{сж} = 0,616 - 0,035(pH)^2 - 0,049Q_{мдз}(pH) + 0,444Q_{мдз} + 0,855(pH) \quad (30)$$

$$R_p = 0,219 - 0,001Q_{мдз}^2 - 0,01Q_{мдз}(pH) + 0,097Q_{мдз} + 0,115(pH) \quad (31)$$

$$K_{мрз} = 0,628 + 0,003Q_{мдз}^2 + 0,005(pH)^2 - 0,001Q_{мдз}(pH) + 0,013Q_{мдз} + 0,001(pH) \quad (32)$$

где: $R_{сж}$ – предел прочности на сжатие, МПа;
 R_p – предел прочности на растяжение при раскалывании, МПа;
 $K_{мрз}$ – коэффициент морозостойкости, ед.;
 $Q_{мдз}$ – содержание минеральной добавки на основе золы-уноса ГРЭС, % от массы сухого грунта;
 pH – кислотность грунта, ед.

Для условий преобладания переувлажнённых глинистых грунтов проведены исследования свойств конструкций лесовозных лесных дорог на основе фиброминералогрунтовых композиций с минеральной добавкой на основе пылевидных частиц, фракции менее 0,05 мм, полученных из дробленого бетона и железобетона путем рассева. Данная минеральная добавка имеет удельную поверхность не менее 2500 см²/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 фиброминералогрунта. Благодаря химическому составу, показатель кислотности минеральной добавки (pH) не менее 12, в связи с этим она создает щелочную среду, способствующую благоприятным условиям для кристаллообразования портландцемента, увеличивая прочностные показатели и морозостойкость фиброминералогрунта.

Согласно данным разработанных экспериментально-статистических моделей (33 – 35) установлено, что конструкция лесовозных лесных дорог на основе фиброминералогрунта с содержанием базальтового волокна 2,0 % и портландцемента 8,0 % обладает повышенными прочностными характеристиками и морозостойкостью и наиболее эффективна в условиях преобладания переувлажнённых глинистых грунтов, распространенных в лесной зоне. При увеличении естественной влажности грунта с 13 % до 43 % содержание минеральной добавки 24,0 % позволяет увеличить прочность на сжатие на 52,9 %, прочность на растяжение при раскалывании на 58,4 % (рис. 24), коэффициент

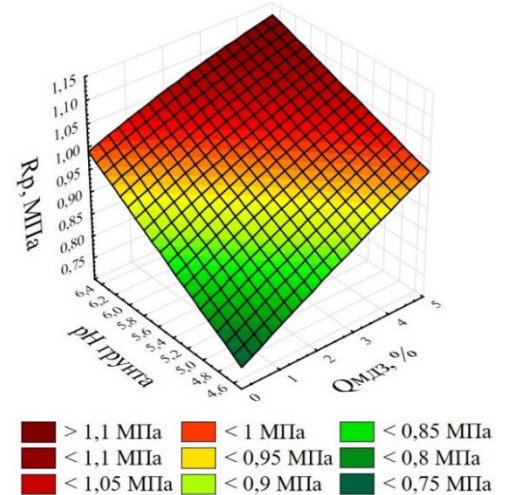


Рисунок 23 – Поверхность отклика прочности на растяжение при раскалывании в зависимости от содержания минеральной добавки на основе золы-уноса ГРЭС и кислотности грунта (pH)

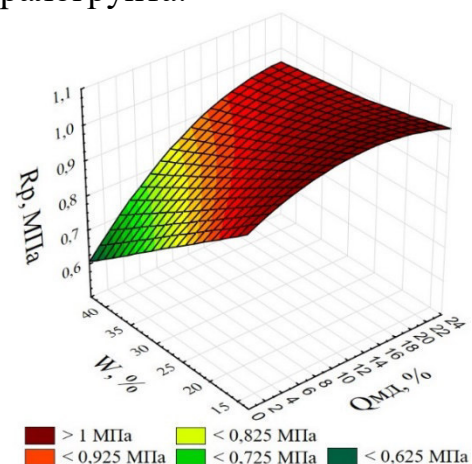


Рисунок 24 – Поверхность отклика прочности на растяжение при раскалывании в зависимости от содержания минеральной добавки и естественной влажности грунта

морозостойкости на 55,0 %.

$$R_{сж} = 5,261 - 0,003Q_{мд}^2 + 0,002Q_{мд}W + 0,066Q_{мд} - 0,044W \quad (33)$$

$$R_p = 1,167 - 0,001Q_{мд}^2 + 0,0004Q_{мд}W + 0,008Q_{мд} - 0,014W \quad (34)$$

$$R_{мрз} = 0,975 - 0,0005Q_{мд}^2 + 0,0004Q_{мд}W + 0,009Q_{мд} - 0,01W \quad (35)$$

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

R_p – предел прочности на растяжение при раскалывании, МПа;

$K_{мрз}$ – коэффициент морозостойкости, ед.;

$Q_{мд}$ – содержание минеральной добавки на основе пылевидных частиц из дробленого бетона и железобетона, % от массы сухого грунта;

W – естественная влажность грунта, %.

В целях эффективного использования дорожно-строительных ресурсов целесообразным является повторное использование материалов от рекультивируемых цементогрунтовых лесовозных лесных дорог для строительства новых конструктивных слоев на неосвоенных участках лесосырьевых баз. В составе регенерированного цементогрунта предусмотрена добавка золы-уноса Рефтинской ГРЭС для улучшения структурообразования и фиброволокно для дисперсного армирования цементогрунтовой матрицы. Гранулометрический состав цементогрунтового гранулята должен соответствовать условиям: не более 25 % по массе частиц размером более 5 мм и не более 10 % по массе частиц размером более 10 мм.

На основании разработанных экспериментально-статистических моделей (36 – 38) установлено, что конструкция лесовозных лесных дорог из регенерированного цементогрунта, содержащего базальтовое волокно 2,0 %, портландцемент 6,0 % и золу-уноса Рефтинской ГРЭС 8,0 % от массы цементогрунтового гранулята, обеспечивает марку по прочности М40 А (рис. 25) 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 %.

$$R_{сж} = -0,022 - 0,013Q_{пц}^2 + 0,002Q_{пц}Q_{зз} + 0,761Q_{пц} + 0,026Q_{зз} \quad (36)$$

$$R_p = -0,009 - 0,004Q_{пц}^2 - 0,0004Q_{зз}^2 + 0,0004Q_{пц}Q_{зз} + 0,166Q_{пц} + 0,007Q_{зз} \quad (37)$$

$$R_{мрз} = -0,005 - 0,004Q_{пц}^2 - 0,0003Q_{зз}^2 + 0,0003Q_{пц}Q_{зз} + 0,146Q_{пц} + 0,005Q_{зз} \quad (38)$$

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

R_p – предел прочности на растяжение при раскалывании, МПа;

$K_{мрз}$ – коэффициент морозостойкости, ед.;

$Q_{пц}$ – содержание портландцемента, % от массы сухого

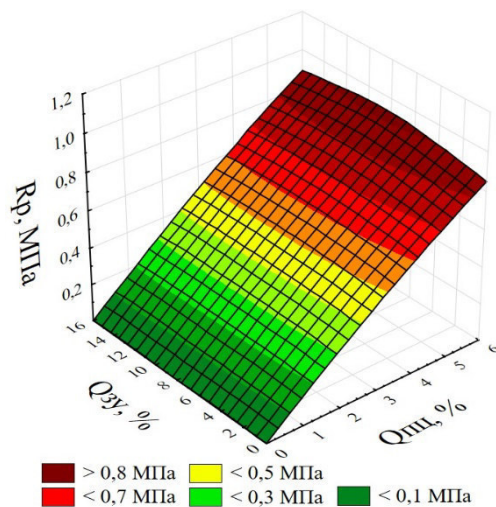


Рисунок 25 – Поверхность отклика прочности на растяжение при раскалывании в зависимости от содержания портландцемента и золы-уноса ГРЭС

цементогрунтового гранулята;

$Q_{\text{зу}}$ – содержание золы-уноса ГРЭС, % от массы сухого цементогрунтового гранулята.

На основании полученных результатов исследований 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.

В шестой главе представлены опытно-производственные исследования технологических и транспортно-эксплуатационных показателей конструкций лесовозных лесных дорог на основе фиброцементогрунтовых композиций.

В соответствии с разработанным технологическим регламентом в августе 2023 года на лесовозной лесной дороге III категории на территории ГКУ СО «Карпинское лесничество» построены опытные участки № 1, № 2, № 3, № 4, № 5 и в июне 2024 года на лесовозной лесной дороге III категории на территории ГКУ СО «Ирбитское лесничество» – опытные участки № 6, № 7, № 8, № 9, № 10 протяженностью 25 м каждый, с покрытием дорожной одежды из фиброцементогрунтовых композиций.

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 исследований 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. м³/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			

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. Компонентные составы и основные характеристики фиброцементогрунтовых композиций с различными видами волокон и добавкой полиДМДААХ представлены в табл. 6.3.

Таблица 6.2 – Основные показатели эксплуатации опытных участков №№ 6 – 10

№ уча- стка	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. м³/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				

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	M40 A	0,82
Фибра на основе базальтового волокна из отходов производства теплоизоляционных плит					
2	8	1,5	0	M40 A	0,87
3	8	1,5	0,2	M60 A	0,88
Базальтовая фибра					
4	8	2,0	0	M60 A	0,85
5	8	2,0	0,2	M70 A	0,91
6	9	0	0	M40 A	0,81
Стеклянная фибра					
7	9	2,0	0	M60 A	0,87
8	9	2,0	0,3	M70 A	0,89
Полипропиленовая фибра					
9	9	1,5	0	M70 A	0,91
10	9	1,5	0,3	M80 A	0,93

Анализ результатов натурных исследований показал, 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 полиД-МДААХ 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 от 7 % до 12 % в течение всего периода исследований.

На основании исследований установлены 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 (колеиности) в сравнении с цементогрунтовым покрытием.

Согласно результатам исследования дефектов на опытных участках выявлено, 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.

Таким образом, строительство опытных участков лесовозных лесных дорог и результаты мониторинга доказали техническую и технологическую возможность, а также эффективность устройства конструкций дорожных одежд на основе фиброцементогрунтовых композиций с высокими транспортно-эксплуатационными показателями.

Седьмая глава посвящена разработке комплексной методики с созданием интеллектуальных систем и тепловой карты, а также анализу полученных данных технико-экономического обоснования технологии транспортного освоения лесосырьевых баз на основе строительства лесовозных лесных дорог с конструкцией из фиброцементогрунта на примере Свердловской области в следующей последовательности.

1. Создание интеллектуальных систем в виде нейро-нечетких сетей ANFIS в среде Matlab по определению сметной стоимости строительства 1 км лесовозной лесной дороги I категории в условиях Свердловской области с альтернативными равнопрочными конструкциями дорожной одежды: из фиброцементогрунта на основе базальтового волокна из отходов производства теплоизоляционных плит и из традиционно используемых инертных каменных материалов, в зависимости от различной дальности доставки материалов от места их производства до объекта строительства:

- 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.

Расчет средних абсолютных ошибок работы нейронных сетей для тестовых выборок по определению сметной стоимости строительства лесовозной лесной дороги показал: из фиброцементогрунта $MAPE = 0,144 \%$, из каменных материалов $MAPE = 0,085 \%$, что свидетельствует о корректной настройке интеллектуальных систем на итоговом этапе проверки адекватности.

Программная реализация интеллектуальных систем и их достаточная адекватность позволяет производить оперативный и высокоточный анализ единовременных затрат на устройство конструкций дорожных одежд в зависимости от транспортно-логистической схемы доставки материалов. На основании полученных данных, можно сделать вывод, что сметная стоимость строительства лесовозных лесных дорог в значительной степени зависит от применяемых дорожно-строительных материалов и расстояния их доставки (рис. 26 – 27).

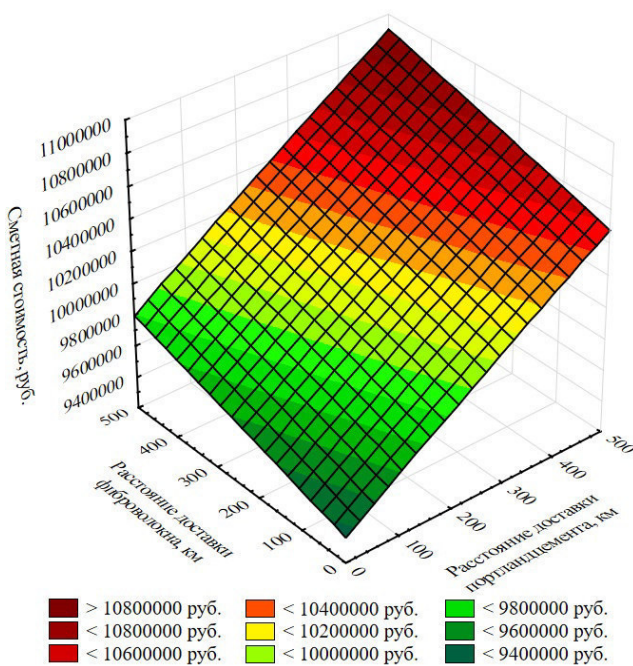


Рисунок 26 – Поверхность отклика сметной стоимости строительства 1 км лесовозной лесной дороги от расстояния доставки портландцемента и фиброволокна

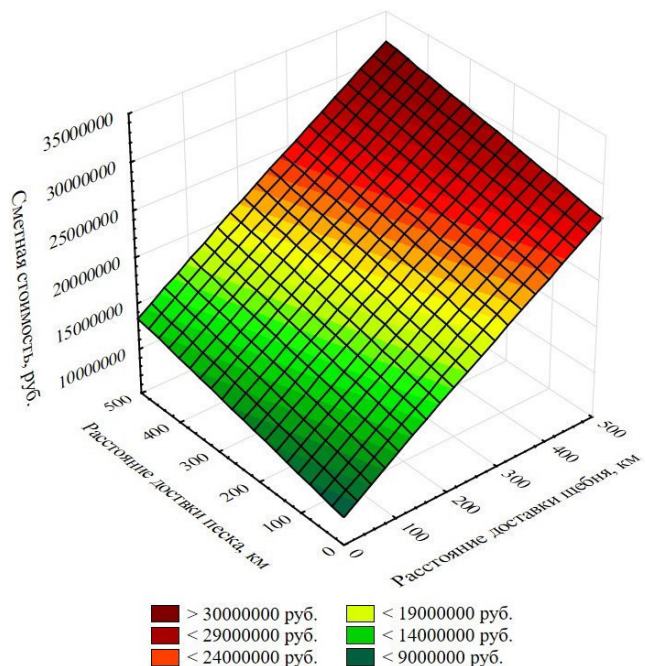


Рисунок 27 – Поверхность отклика сметной стоимости строительства 1 км лесовозной лесной дороги от расстояния доставки щебня и песка

Минимальная сметная стоимость строительства 1 км лесовозной лесной дороги Iл категории из фиброцементогрунта составляет 9458,7 тыс. руб. с учетом дальности доставки портландцемента и базальтового фиброволокна 30 км. При увеличении расстояния доставки указанных материалов до 500 км стоимость строительства возрастает на 15 % и составит 10911,3 тыс. руб. (рис. 28). Минимальная сметная стоимость строительства 1 км лесовозной лесной дороги Iл категории из каменных материалов составляет 9539,0 тыс. руб. с учетом дальности доставки щебня и песка 30 км. При увеличении расстояния указанных материалов до 500 км стоимость строительства возрастает более чем в 3,33 раза и составит 31811,5 тыс. руб. (рис. 29).

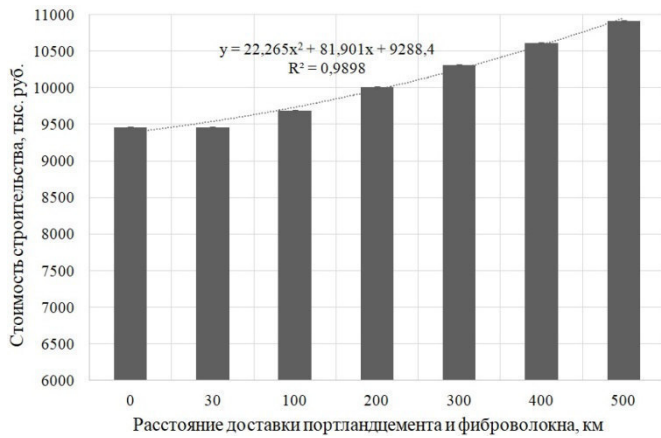


Рисунок 28 – Гистограмма зависимости сметной стоимости строительства 1 км лесовозной лесной дороги от расстояния доставки портландцемента и фиброволокна

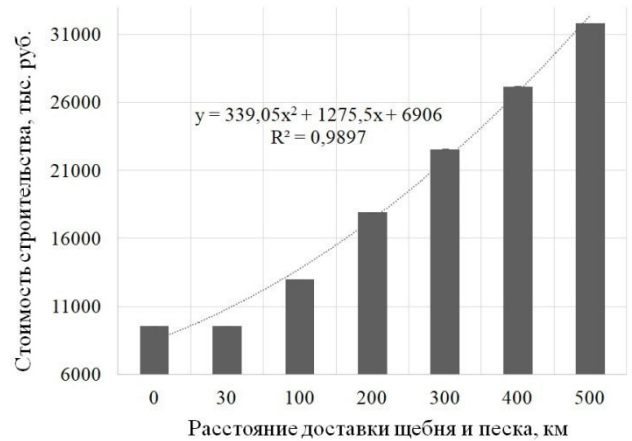


Рисунок 29 – Гистограмма зависимости сметной стоимости строительства 1 км лесовозной лесной дороги от расстояния доставки щебня и песка

Таким образом, технико-экономический эффект от устройства конструкций лесовозных лесных дорог на основе фиброцементогрунтовых композиций достигается за счет минимизации транспортных затрат, а также единовременной стоимости применяемых дорожно-строительных материалов, поскольку в качестве основного компонента используется местный грунт при незначительном содержании добавок портландцемента и фиброволокна.

2. Проведение конъюнктурного анализа поставщиков дорожно-строительных материалов на территории Свердловской области, используемых в альтернативных вариантах конструкций лесовозных лесных дорог с получением данных о местонахождении, номенклатуре и стоимости выпускаемой продукции.

3. Разработка картографической основы территории Свердловской области с нанесением производителей портландцемента, щебня, песка и базальтового волокна из отходов производства теплоизоляционных плит (рис. 30).

4. Равномерное распределение на картографической основе Свердловской области матрицы из 300 точек тяготения грузопотоков со средним расстоянием друг от друга 19,5 км (рис. 31).



Рисунок 30 – Схема производителей дорожно-строительных материалов на территории Свердловской области

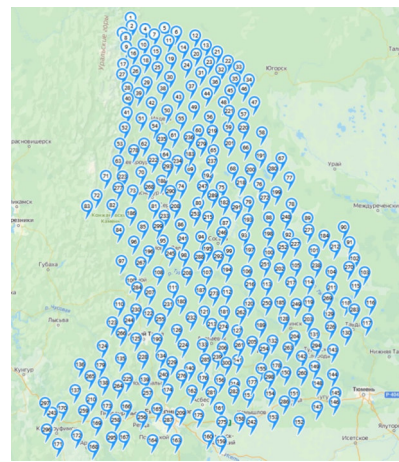


Рисунок 31 – Матрица точек тяготения грузопотоков на территории Свердловской области

5. Расчет для каждой точки матрицы тяготения грузопотоков минимального расстояния доставки от ближайших производителей дорожно-строительных материалов с учетом существующей сети автомобильных дорог общего пользования и лесовозных лесных дорог.

6. С помощью разработанных интеллектуальных систем для каждой точки матрицы тяготения грузопотоков расчет сметной стоимости строительства 1 км лесовозной лесной дороги с альтернативными конструкциями дорожной одежды: из фиброцементогрунта и из каменных материалов.

7. С учетом стоимостных данных для каждой точки матрицы тяготения грузопотоков расчет технико-экономической эффективности строительства лесовозных лесных дорог из фиброцементогрунта по формуле (1).

$$\mathcal{E} = \frac{Z_{до1} - Z_{до2}}{Z_{до1}} \times 100\% \quad (1)$$

где: $\mathcal{E}$ – экономический эффект от строительства лесовозной лесной дороги из фиброцементогрунта, %;

$Z_{до1}$ – стоимость строительства лесовозной лесной дороги из каменных материалов, тыс. руб./1 км.

$Z_{до2}$ – стоимость строительства лесовозной лесной дороги из фиброцементогрунта, тыс. руб./1 км.

8. Интерполяция показателей экономической эффективности строительства лесовозных лесных дорог из фиброцементогрунта в точках матрицы тяготения грузопотоков на территории Свердловской области, вычерчивание границ и выделение цветовых областей тепловой карты (рис. 32).

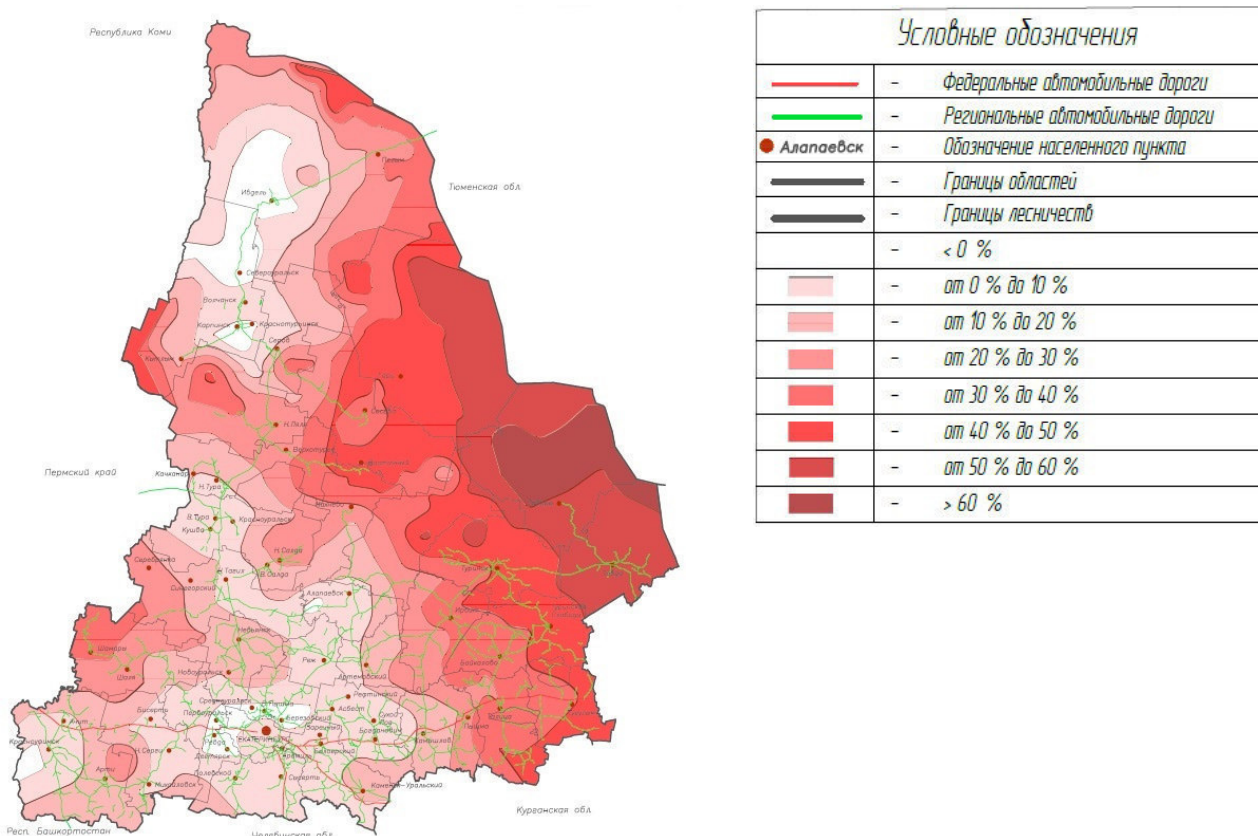


Рисунок 32 – Тепловая карта технико-экономической эффективности строительства лесовозных лесных дорог из фиброцементогрунта на территории Свердловской области

Таким образом, на основе разработанной тепловой карты возможно производить оценку технико-экономической эффективности технологии транспортного освоения лесосырьевых баз на всей территории Свердловской области. Установлено, что технико-экономическая эффективность устройства конструкций лесовозных лесных дорог из фиброцементогрунтовых композиций составляет от 32 % до 66 % по сравнению с традиционной технологией строительства с использованием инертных каменных материалов.

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.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

Статьи в изданиях, индексируемых в Web of Science и Scopus

1. **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, 28–29 ноября 2019 года. – St. Petersburg, 2020. – P. 012007. – DOI 10.1088/1757-899X/817/1/012007.

2. **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, 16–18 июня 2020 года. – Saint Petersburg, 2020. – P. 012010. – DOI 10.1088/1755-1315/574/1/012010.

3. **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.

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК

4. **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.

5. **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.

6. **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.

7. **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.

8. **Чудинов, С. А.** Повышение эффективности укрепления грунтов портландцементом со стабилизирующей добавкой / **С. А. Чудинов** // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5. – С. 163.

9. **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.

10. **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.

11. **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.

12. **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.

13. **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.

14. **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.

15. **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.

16. **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.

17. **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.

Монографии

18. Неволин, Д. Г. Инновационные технологии проектирования и строительства автомобильных дорог : монография / Д. Г. Неволин, В. Н. Дмитриев, Е. В. Кошкарлов, **С. А. Чудинов** [и др.] ; под ред. Д. Г. Неволлина, В. Н. Дмитриева. – Екатеринбург : Уральский государственный университет путей сообщения, 2015. 192 с.

19. **Чудинов, С. А.** Укрепленные грунты в строительстве лесовозных автомобильных дорог : монография / **С. А. Чудинов**. – Екатеринбург : Уральский государственный лесотехнический университет, 2020. 174 с.

20. **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.

21. **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, Р. Д. Черняк. – Екатеринбург : Уральский государственный лесотехнический университет, 2024. 181 с.

Патенты

22. 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».

23. 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».

24. Патент № 2785742 С1 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».

25. Патент № 2792506 С1 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».

26. Патент № 2820381 С1 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».

27. Патент № 2816939 С1 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».

28. 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».

29. 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».

30. 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».

31. 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».

32. Патент № 2833614 С1 Российская Федерация, МПК E01C 7/36, E02D 3/12, E01C 3/04. Фиброминералогрунтовая смесь : заявл. 16.10.2023 : опубл. 27.01.2025 / **С. А. Чудинов** ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный лесотехнический университет».

Статьи, материалы и тезисы конференций

33. **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.

34. **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.

35. **Чудинов, С. А.** Повышение эффективности укрепления глинистых грунтов портландцементом с добавкой полиэлектrolита / **С. А. Чудинов** // Актуальные вопросы проектирования автомобильных дорог. Сборник научных трудов ОАО ГИПРОДОРНИИ. – 2013. – № 4(63). – С. 121–129.

36. **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.

37. **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.

38. **Чудинов, С. А.** Техничко-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.

39. **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.

40. **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.

41. **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.

42. **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.

43. **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.

44. **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.

45. **Чудинов, С. А.** Повышение эффективности строительства лесных автомобильных дорог из укрепленных грунтов / **С. А. Чудинов, Н. В. Ладейщиков** // Приоритетные и перспек-

тивные направления научно-технического развития Российской Федерации : материалы VI Всероссийской научно-практической конференции / Том Выпуск 1. – Москва : Государственный университет управления, 2023. – С. 182–184.

46. 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.

47. 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.

48. **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.

49. **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.

50. **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.

51. **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.

52. **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.

53. 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.

54. **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.

55. 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.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с заверенной подписью и указанием фамилии, имени, отчества, почтового адреса, наименования организации, должности и ученой степени (с указанием шифра специальности, по которой была защищена диссертация) лица, составившего отзыв, просим направлять по адресу: 620100, г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, 37, УГЛТУ, диссертационный совет 24.2.424.01, e-mail: d21228102@yandex.ru

Подписано в печать
Объем авт.л.

Тираж 100 экз.

Заказ № _____

ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет»
620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37.
Отдел оперативной полиграфии