

На правах рукописи

Ахтямов Эльдар Рашидович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И
СТРОИТЕЛЬСТВА МОРОЗОУСТОЙЧИВЫХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД
ЛЕСОВОЗНЫХ ДОРОГ С ДОБАВКАМИ ИЗ ВЕРМИКУЛИТА**

05.21.01 – Технология и машины лесозаготовок
и лесного хозяйства

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2022

Работа выполнена в ФГБОУ ВО "Уральский государственный лесотехнический университет"

Научный руководитель **Кручинин Игорь Николаевич**
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», профессор кафедры транспорта и дорожного строительства

Официальные оппоненты **Пильник Юлия Николаевна**
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО "Ухтинский государственный технический университет", профессор кафедры экологии, землеустройства и природопользования

Левушкин Дмитрий Михайлович
кандидат технических наук, доцент, Мытищинский филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», доцент кафедры технологии и оборудования лесопромышленного производства

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет»

Защита диссертации состоится 23 июня 2022 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.281.02 при ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» по адресу: 620100, г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, 37, к. 401.

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

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор

Елена Евгеньевна Шишкина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Как правило, транспортные сети действующих и потенциальных лесосырьевых баз располагаются в сложных природно-климатических условиях и в значительной удаленности от предприятий дорожно-строительного комплекса, что накладывает определенные ограничения как на конструкции лесовозных автомобильных дорог, так и на технологии их строительства.

Потребность в совершенствовании транспортно-эксплуатационных качеств лесотранспортной инфраструктуры обуславливает необходимость развития норм проектирования лесовозных автомобильных дорог и способов их строительства, повышения уровней содержания и эксплуатации, применения современных строительных материалов с улучшенными характеристиками. При этом необходимо учитывать, что ведение рациональной лесопромышленной деятельности ограничено возможностью использования некоторых типов дорожно-строительных материалов.

Существующие методы проектирования дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог, расположенных в сложных природно-климатических условиях, чаще всего не способны обеспечить эффективную борьбу с зимним морозным пучением, т.к. они в большинстве своем ориентированы на использование только традиционных теплоизоляционных строительных материалов, зачастую дорогостоящих. Также эти методы не рассматривают аспекты влияния прочностных и теплофизических характеристик конструктивных слоев дорожных одежд друг на друга, которые, в конечном итоге, определяют эксплуатационные свойства и долговечность лесовозных дорог.

Невозможность использования дорогостоящих теплоизоляционных материалов в дорожном строительстве на территориях большинства лесосырьевых баз РФ предопределяет важность поиска альтернативных технических решений, позволяющих использовать эффективные местные материалы для обустройства лесотранспортной инфраструктуры. Используемые материалы должны быть не только экологически безопасными и с относительно низкой стоимостью, но и должны обеспечивать дорожной одежде требуемые морозоустойчивые свойства.

Однако следует отметить, что использование для строительства морозоустойчивых дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог теплоизоляционных материалов сопряжено с рядом технических, технологических и эксплуатационных трудностей.

Необходимость совершенствования методов проектирования, разработки оптимальных конструкций морозоустойчивых дорожных одежд и способов их строительства обусловлена тем, что влияние лесовозных автомобильных дорог на средообразующие функции леса значительно и требует учета экологических последствий при рациональном природопользовании, поэтому исследования, направленные на решения этих задач, являются первоочередными и актуальными.

Работа выполнялась в соответствии со Стратегией развития лесного комплекса Российской Федерации на период до 2030 года (распоряжение Правительства Российской Федерации от 11 февраля 2021 года №312-р) и в рамках фундаментальных научных исследований ФГБОУ ВО УГЛТУ FEUG-2020-0013 «Экологические аспекты рационального природопользования» (номер госрегистрации темы АААА-А20-120092390016-9).

Степень разработанности темы исследования. Проблемы повышения эффективности проектирования и строительства лесовозных дорог занимались такие учреждения высшего образования, как СПбГЛТУ, ВГЛТУ, УГЛТУ, УГТУ, ПГТУ, ими разработаны вопросы проектирования и строительства лесовозных дорог. Выполненные исследования направлены на оценку проектных решений транспортного освоения лесосырьевых баз, а также развитие технологий их строительства и эксплуатации. Значительное количество исследований посвящено анализу создания транспортной инфраструктуры трансграничных лесов Евразии, расположенных в сложных природно-климатических условиях на территориях Свердловской и Челябинской областей.

При этом требования, предъявляемые к обеспечению морозоустойчивости лесовозных дорог, технологиям их строительства и эксплуатации, до конца не сформулированы.

В диссертации обосновывается решение проблемы повышения эффективности проектирования и строительства морозоустойчивых дорожных одежд лесовозных дорог, расположенных в сложных природно-климатических условиях, с использованием местного минерального сырья на основе вермикулита.

Цель исследования. Совершенствование методов проектирования и строительства морозоустойчивых дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог с добавками из вермикулита.

Задачи исследования:

1. Разработать методы оптимального проектирования морозоустойчивых дорожных одежд лесовозных дорог с добавками из вермикулита, обеспечивающие их работоспособность в сложных природно-климатических условиях.
2. Провести комплекс экспериментальных исследований по оценке физико-механических и теплофизических характеристик морозоустойчивых дорожных одежд лесовозных дорог с добавками из вермикулита.
3. Разработать технологию строительства морозоустойчивых дорожных одежд лесовозных дорог с добавками из вермикулита.

Объект исследования: лесовозные автомобильные дороги.

Предмет исследования: дорожные одежды лесовозных автомобильных дорог с добавками из вермикулита, технологии, методы и способы их строительства.

Методы исследования: системный анализ, методы дифференциального и интегрального исчисления, математического и имитационного моделирования, регрессионного анализа, эксперимента, математической статистики.

Научная новизна работы. Результатами диссертационной работы, обладающими научной новизной, являются:

1. Разработанная методика проектирования морозоустойчивых дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог, отличающаяся учетом обобщенного показателя физико-механических и теплофизических свойств конструктивных слоев дорожных одежд.
2. Полученные аналитические и регрессионные зависимости оценки характеристик морозоустойчивых дорожных одежд, отличающиеся возможностью учета влияния добавок из вермикулита на физико-механические и теплофизические свойства конструктивных слоев лесовозных дорог.

3. Разработанные рекомендации по повышению технологической эффективности строительства морозоустойчивых дорожных одежд лесовозных дорог, отличающиеся возможностью применения добавок из вермикулита.

Научные положения, выносимые на защиту.

1. Методика проектирования морозоустойчивых дорожных одежд лесовозных дорог с учетом обобщенного показателя физико-механических и теплофизических свойств конструктивных слоев, позволяющая найти их оптимальные значения.

2. Закономерности изменения характеристик конструктивных слоев морозоустойчивых дорожных одежд в зависимости от содержания вермикулита.

3. Технология строительства морозоустойчивых дорожных одежд с использованием добавок из вермикулита, позволяющая повысить физико-механические и теплофизические характеристики конструктивных слоев дорожных одежд и тем самым обеспечить устойчивость лесовозных дорог к нагрузкам при их эксплуатации в сложных природно-климатических условиях.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в разработке математической модели оптимального проектирования морозоустойчивых дорожных одежд и совершенствовании технологии строительства лесовозных дорог с добавками из вермикулита.

Результаты работы позволят повысить технический уровень вновь строящихся лесовозных дорог и увеличить срок их межремонтной эксплуатации, улучшить лесотранспортную доступность трансграничных лесов Евразии, сократить затраты на дорожно-строительные материалы.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Результаты, выносимые на защиту, относятся к пункту 15 – «Обоснование схем транспортного освоения лесосырьевых баз, поставки лесопродукции, выбора техники и способов строительства лесовозных дорог и инженерных сооружений» (паспорт специальности 05.21.01 – Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства).

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций. Сформулированные в диссертации научные положения, выводы и рекомендации обоснованы теоретическими решениями и экспериментальными результатами, полученными в работе, базируются на результатах опыта строительства лесовозных дорог, не противоречат известным положениям научных методов математического моделирования и подтверждаются статистическими расчетами, выполненными на основе результатов лабораторных и производственных экспериментов, проведенных. Полученные алгоритмы реализованы в виде вычислительных экспериментов в среде *Matlab, Microsoft Excel 2010*.

Личное участие соискателя в получении результатов, изложенных в диссертации. В работе и опубликованных статьях автор обосновал актуальность темы, поставил цель научно-исследовательской работы и сформулировал исследовательские задачи, определил и улучшил методические аспекты проведения исследований. Являлся инициатором и непосредственным участником проведения лабораторных и полевых экспериментов и сбора данных, осуществлял деятельность по аннотированию и ведению исследовательских данных. Автором выполнен анализ научно-технических источников информации, сформулированы проблема, цель, задачи исследования, получены теоретические и экспери-

ментальные результаты, осуществлены их обработка, интерпретация и внедрение в производство и учебный процесс.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на международных научных, научно-практических и научно-технических конференциях:

– Современные машины, оборудование и *IT*-решения лесопромышленного комплекса: теория и практика. Всероссийская научно-практическая конференция, Воронеж, 17 июня 2021 г. (г. Воронеж, 2021г.);

– Современная наука: актуальные вопросы, достижения и инновации. XXXIX Международная научно-практическая конференция (г. Анапа, 2021 г.).

Реализация работы. Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований внедрены в Свердловской, Челябинской области при строительстве лесовозных дорог, используются в учебном процессе Уральского государственного лесотехнического университета и Ухтинского государственного технического университета.

Публикации. Результаты исследований отражены в 11 научных работах общим объемом 3,9 п.л. (авторских 2,8 п.л.), в том числе в 4 статьях в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, общих выводов и приложений; содержит 194 страницы текста, 25 таблиц, 31 рисунок и библиографический список из 125 наименований, включая 25 на иностранных языках.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность тематики диссертационной работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, изложены научная новизна результатов выполненных исследований, их теоретическая и практическая значимость.

В первой главе выполнен анализ работ, посвященных изучению транспортной инфраструктуры трансграничных лесов Евразии, расположенных на территориях Свердловской и Челябинской областей.

Основные требования к транспортной инфраструктуре лесов были сформулированы в исследованиях В.И. Алябьева, Н.П. Вырко, И.И. Леоновича, Э.О. Салминена и других ученых.

Вопросами проектирования, строительства и эксплуатации лесовозных автомобильных дорог занимались такие ученые, как О.Н. Бурмистрова, Б.А. Ильин, В.К. Курьянов, И.Н. Кручинин, А.Ю. Мануковский, Ю.Н. Пильник, М.Ю. Смирнов, С.И. Сушков, А.В. Скрыпников.

В основе их исследований лежат принципы проектирования дорожных конструкций из известных дорожно-строительных материалов, а вопросы повышения эффективности строительства и эксплуатации лесовозных дорог рассмотрены с точки зрения традиционных технологий. При этом, как правило, не учитывалось территориальное расположение лесосырьевых баз и вопросы по обеспечению морозоустойчивости дорожных одежд.

Основные требования к теплоизолирующим материалам для дорожного строительства рассмотрены в работах Б.В. Белоусова, А.М. Бургонутдинова, А.Ю. Дедюхина, Е.В. Кошкарова, М.Г. Салихова.

На основе анализа этих работ и с учетом природно-климатических условий расположения трансграничных лесов Евразии был определен перечень местных материалов, доступных для строительства лесовозных дорог. По комплексу основных физико-механических и теплофизических показателей наиболее предпочтительными и перспективными являются материалы на основе вермикулита, исследованиям которых посвящены работы Я.А. Ахтямова, Р.Я. Ахтямова, Г.В. Геммерлинга, К.Н. Дубенецкого. Однако в рамках их исследований вермикулит и материалы на его основе для дорожного строительства не применялись.

Очевидно, что для повышения эффективности проектирования и строительства лесовозных дорог с морозоустойчивыми дорожными одеждами необходимы дополнительные исследования по применению местных теплоизолирующих материалов, в первую очередь, на основе вермикулита, разработка современных методов проектирования и технологий строительства лесовозных дорог с использованием таких материалов.

В заключении первой главы на основании проведенного анализа сформулированы цель и задачи исследований.

Во второй главе осуществлена постановка задачи оптимального проектирования морозоустойчивых дорожных одежд, предложен алгоритм и компьютерная реализация алгоритма решения.

Постановка задачи оптимального проектирования параметров конструкции дорожной одежды включает следующие процедуры: постановку задачи в общем виде; формирование критерия оптимальности (целевой функции); задание ограничений; задание вектора управляемых параметров; задание конструктивных неуправляемых параметров; определение метода поиска оптимального решения; разработка алгоритма поиска оптимального решения; реализация алгоритма оптимизации в компьютерной программе.

В общем виде эту задачу можно представить следующим образом: дорожная конструкция характеризуется параметрами $U_i - U_1, U_2, \dots, U_n$, от которых зависит величина суммарного термического сопротивления и физико-механического показателя - суммарный модуль упругости дорожной одежды. Обозначим: U_0 - общий модуль упругости дорожной многослойной конструкции, ($E_{общ}$, МПа); U_1 - толщина верхнего слоя покрытия, м; U_2 - толщина слоя грунтовермикулитового материала, м; U_3 - толщина рабочего слоя земляного полотна, м; U_4 - коэффициент теплопроводности верхнего слоя покрытия, (λ_1 , Вт/м·К); U_5 - коэффициент теплопроводности слоя грунтовермикулитового материала, (λ_2 , Вт/м·К); U_6 - коэффициент теплопроводности рабочего слоя грунта земляного полотна (λ_3 , Вт/м·К); U_7 - модуль упругости конструктивного верхнего слоя покрытия, (E_1 , МПа); U_8 - модуль упругости конструктивного слоя грунтовермикулитового материала, (E_2 , МПа); U_9 - модуль упругости грунта рабочего слоя земляного полотна, (E_3 , МПа); U_{10} - термическое сопротивление дорожной одежды (R_t , м²·К/Вт); U_{11} - ограничение по предельному напряжению сдвига в слоях, МПа; U_{12} - коэффициент, учитывающий условия эксплуатации лесотранспортной сети, м²·К/Вт.

В многослойной конструкции дорожной одежды эксплуатационные выходные параметры зависят, в первую очередь, от толщины конструктивных слоев и их физико-механических характеристик. Поскольку основные марки, типы материалов в данном случае не варьируются, то изменяемыми переменными принимаются толщины слоев. Отсюда вектор управляющих параметров U будет иметь следующий вид:

$$U = [U_1, U_2, U_3], \quad (1)$$

Тогда общий модуль упругости на покрытии дорожной одежды можно представить в виде:

$$U_0 = \frac{U_7 U_1 + U_8 U_2 + U_9 U_3}{U_1 + U_2 + U_3}, \quad (2)$$

Термическое сопротивление дорожной одежды представим в виде:

$$U_{10} = \left\{ \frac{U_1}{U_4} + \frac{U_2}{U_5} + \frac{U_3}{U_6} \right\} + \frac{1}{U_{12}}. \quad (3)$$

С учетом выражений (1) – (3) формально задача оптимального проектирования конструкции морозоустойчивой дорожной одежды лесовозной дороги будет иметь вид:

$$F(U) \rightarrow \max, \quad U \in L \quad (4)$$

где L – область допустимых значений управляющих параметров при ограничениях.

В этом случае обобщенный показатель эффективности, учитывающий влияние физико-механических и теплофизических свойств, который в данном случае соответствует целевой функции, можно представить в виде:

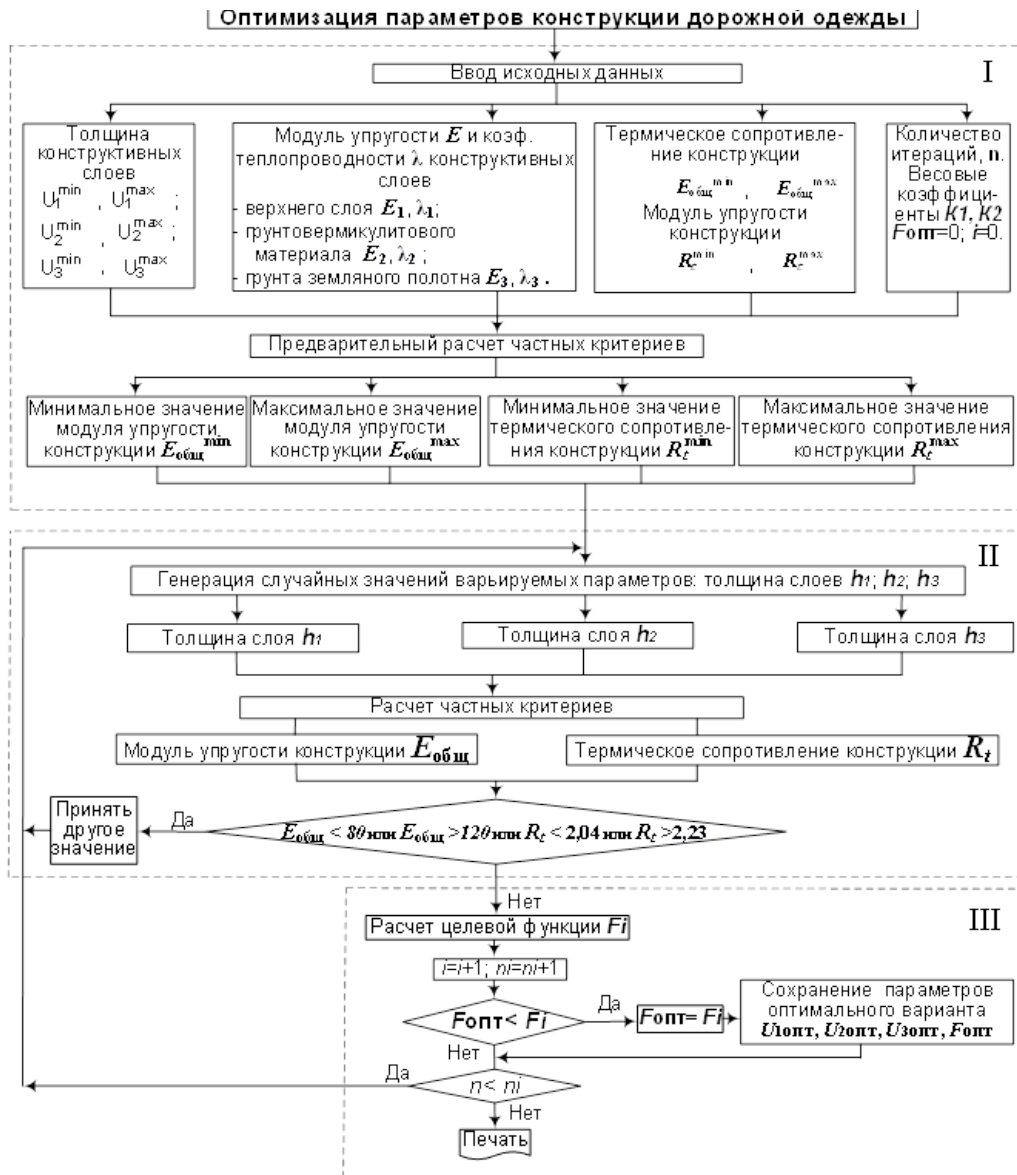
$$F = K_1(U_{10} - U_{10}^{\min}) / (U_{10}^{\max} - U_{10}^{\min}) + K_2(U_0 - U_0^{\min}) / (U_0^{\max} - U_0^{\min}), \quad (5)$$

где U_{10}^{\max} , U_{10}^{\min} и U_0^{\max} , U_0^{\min} – максимальные и минимальные значения частных показателей, соответственно термического сопротивления и модуля упругости многослойной дорожной конструкции;

K_1, K_2 - весовые коэффициенты при каждом частном показателе, определяются пользователем.

Для решения задачи оптимизации был определен алгоритм с использованием метода генерации случайных значений исходных параметров с учетом заданных ограничений. Схема алгоритма поиска оптимальных параметров конструкции морозоустойчивой дорожной одежды представлена на рисунке 1.

Программное решение позволяет произвести расчеты оптимальных параметров конструкции для различных вариантов приоритета частных критериев, пример результатов расчетов приведены в таблице 1. Наиболее приемлемым компромиссом будет задание весовых критериев равными 0,5, что минимизирует противоречие между критериями. При необходимости придать специфические свойства конструкции в процессе проектирования задаются соответствующие весовые коэффициенты. Программное решение размещено в сети Интернет в качестве модуля Электронной Информационной Образовательной Среды ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» и доступно по адресу <http://is1.lms-usfeu.ru/index.php>. Интерфейс (диалоговое окно) программы оптимизации параметров морозоустойчивых дорожных одежд лесовозных дорог представлен на рисунке 2.



I – модуль формирования исходных данных; II – модуль поиска оптимального решения; III – формирование и вывод результатов
 Рисунок 1 – Схема алгоритма поиска оптимальных параметров конструкции морозостойчивой дорожной одежды

Таблица 1 – Результаты расчетов оптимальных параметров морозостойчивой дорожной одежды для условий трансграничных лесов Евразии

Наименование параметра	Варианты				
	1	2	3	4	5
Расчетный модуль упругости дорожной одежды, E , МПа	92	113	91	102	115
Общее термическое сопротивление дорожной одежды, R_t , м ² К/Вт	2,05	2,19	2,14	2,12	2,04
Толщина дорожного покрытия, см	4	3	4	3	5
Толщина грунтовермикулитового слоя, см	18	44	21	35	41
Толщина рабочего слоя земляного полотна земляного полотна, м	1,59	1,62	1,30	1,55	0,76
Обобщенный показатель эффективности, F	0,506	0,409	0,728	0,659	0,532

Программа оптимизации параметров конструкции морозоустойчивой дорожной одежды лесовозных дорог

1 – асфальтобетонное покрытие с добавками из вермикулита;
2 - грунтовермикулитовый морозозащитный слой; 3 - грунт земляного полотна

Схема многослойной морозоустойчивой конструкции дорожной одежды лесовозной дороги

Определяем параметры (если не будут введены или не попадут в границы возьмется случайная величина)

- коэффициент теплопроводности верхнего слоя покрытия: $U_{1min} = 0.792 \text{ Вт} \cdot \text{м} \cdot \text{К} / \text{У} \cdot \text{м}^2$; $U_{1max} = 1.657 \text{ Вт} \cdot \text{м} \cdot \text{К} / \text{У} \cdot \text{м}^2$ Ваше значение: 1.001;
- коэффициент теплопроводности слоя грунтовермикулитового материала: $U_{2min} = 0.565 \text{ Вт} \cdot \text{м} \cdot \text{К} / \text{У} \cdot \text{м}^2$; $U_{2max} = 1.565 \text{ Вт} \cdot \text{м} \cdot \text{К} / \text{У} \cdot \text{м}^2$ Ваше значение: 0.254 Случайное значение: 0.166;
- коэффициент теплопроводности слоя грунта земляного полотна: $U_{3min} = 1.612 \text{ Вт} \cdot \text{м} \cdot \text{К} / \text{У} \cdot \text{м}^2$; $U_{3max} = 1.823 \text{ Вт} \cdot \text{м} \cdot \text{К} / \text{У} \cdot \text{м}^2$ Ваше значение: 1.658; Случайное значение: 1.802;
-
- модуль упругости верхнего слоя покрытия: $U_{1min} = 2000 \text{ МПа}$; $U_{1max} = 2400 \text{ МПа}$ Ваше значение: 2200;
- модуль упругости слоя грунтовермикулитового материала: $U_{2min} = 100 \text{ МПа}$; $U_{2max} = 200 \text{ МПа}$ Ваше значение: 120;
- модуль упругости грунта земляного полотна: $U_{3min} = 35 \text{ МПа}$; $U_{3max} = 45 \text{ МПа}$ Ваше значение: 36;
- Ограничение по предельному напряжению сдвига в грунте τ_s : $U_{1min} = 0.010 \text{ МПа}$; $U_{1max} = 0.033 \text{ МПа}$ Ваше значение: 0.034;
- Поразовый коэффициент условий работы лесовозных дорог: $U_{12min} = 20 \text{ Вт} \cdot \text{м} \cdot \text{К} / \text{У} \cdot \text{м}^2$; $U_{12max} = 34 \text{ Вт} \cdot \text{м} \cdot \text{К} / \text{У} \cdot \text{м}^2$ Ваше значение: 32;
- Весовой коэффициент K_1 Ваше значение: 0.5;
- Весовой коэффициент K_2 Ваше значение: 0.5;

Генерация случайных значений варьируемых параметров: толщина слоя U_1 ; U_2 ; U_3 по ограничениям модуля упругости

- толщина верхнего слоя покрытия: $U_{1min} = 0.03 \text{ м}$; $U_{1max} = 0.06 \text{ м}$ Ваше значение: 0.04;
- толщина слоя грунтовермикулитового материала: $U_{2min} = 0.15 \text{ м}$; $U_{2max} = 0.50 \text{ м}$ Ваше значение: 0.15;
- толщина рабочего слоя земляного полотна: $U_{3min} = 0.80 \text{ м}$; $U_{3max} = 1.65 \text{ м}$ Ваше значение: 1.30;

Вычислим модуль упругости на покрытие дорожной одежды (ограничения $U_{0min} = 80 \text{ МПа}$; $U_{0max} = 120 \text{ МПа}$) и термическое сопротивление дорожной одежды (ограничения для территорий трансграничных лесов Евразии $U_{10min} = 2.04 \text{ м}^2 \text{ К} / \text{Вт}$; $U_{10max} = 2.23 \text{ м}^2 \text{ К} / \text{Вт}$);
Максимальное количество проколов: 100000
0.04

Модуль упругости на покрытие дорожной одежды ($U_0(E)$) составил **91.87 МПа**
Термическое сопротивление дорожной одежды ($U_{10}(R)$) составило **2.14 м² К / Вт**
Обобщенный показатель эффективности $F = 0.5 \cdot (-2.04) / (2.23 - 2.04) + 0.5 \cdot (-80) / (120 - 80) = 0.728$

Таким образом,

- толщина верхнего слоя **0.04 м**
- толщина слоя грунтовермикулитового материала **0.21 м**
- толщина рабочего слоя земляного полотна: **1.30 м**

Рисунок 2 – Интерфейс (диалоговое окно) программы оптимизации параметров морозоустойчивых дорожных одежд лесовозных дорог (доступ авторизованным пользователям по адресу <http://isl.lms-usfeu.ru/index.php>.)

В третьей главе представлены материалы экспериментальных исследований по строительству морозоустойчивых дорожных одежд лесовозных дорог с добавками из вермикулита, выполненные в три этапа:

- лабораторные исследования грунтовермикулитового материала;
- лабораторные исследования асфальтобетонов с добавками из вермикулита для дорожных покрытий;
- опытно-экспериментальное строительство морозоустойчивых дорожных одежд с их инструментальным обследованием.

В качестве добавки в морозоустойчивые дорожные конструкции использовался природный вермикулит, отходы производства при получении вспученного вермикулита путем термообработки исходного вермикулита и вспученный вермикулит Потанинского месторождения.

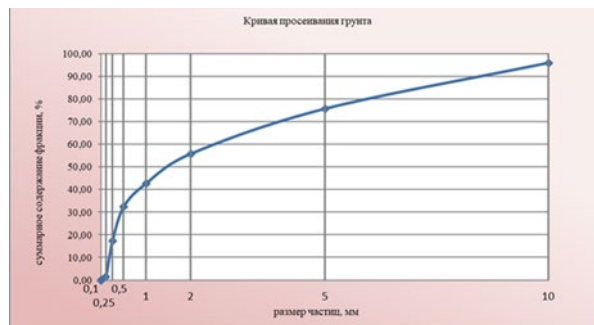
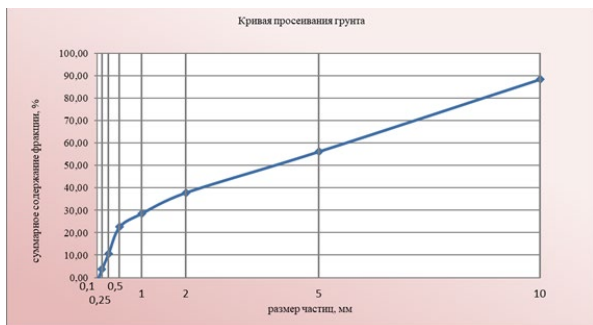
При лабораторных исследованиях грунтовермикулитового материала были определены следующие показатели: гранулометрический (зерновой) состав по массовому содержанию в нем частиц различной крупности; насыпная плотность; истинная плотность, пустотность; средняя плотность; максимальная плотность; оптимальная влажность; коэффициент пористости, пористость, коэффициент фильтрации; коэффициент теплопроводности.

Физико-механические характеристики местного грунта и грунтовермикулитового материала приведены на рисунке 3 и в таблице 2.

Полученное уравнение регрессии изменения теплопроводности в зависимости от количества вермикулита после уплотнения слоя при коэффициенте детерминации $R^2 = 0,9936$ имеет вид:

$$\lambda_{ГВМ} = 0,1003x^2 - 0,8213x + 2,2818 \quad (6)$$

где x – количество вермикулита в смеси, %.



а)

б)

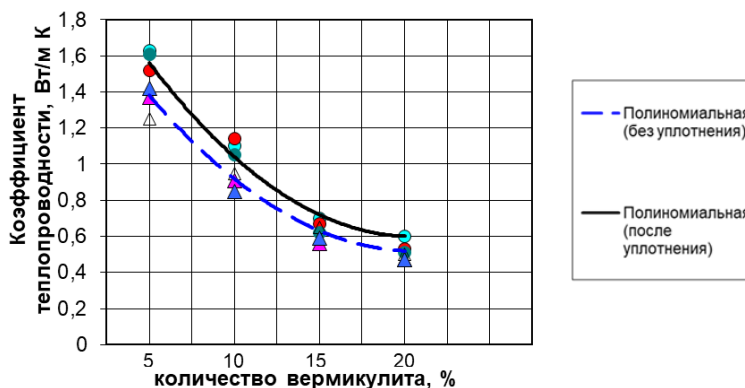
Рисунок 3 – Зерновые составы местного грунта (а) и грунтовермикулитового материала (б)

Таблица 2 – Характеристики грунтовермикулитового материала

№ п/п	Вид добавки в грунт	Количество добавки, %	Коэффициент уплотнения	Коэффициент пористости, ед.	Теплопроводность, Вт/м·К
Без уплотнения					
1	Отходы производства при получении вспученного вермикулита	5%	0,77	0,52	1,370
2		10%	0,77	0,58	0,875
3		15 %	0,77	0,63	0,681
4		20%	0,77	0,72	0,506
После уплотнения нагрузкой 600 кПа					
5	Отходы производства при получении вспученного вермикулита	5%	0,99	0,32	1,567
6		10%	0,99	0,38	1,115
7		15 %	0,99	0,45	0,751
8		20%	0,98	0,50	0,587

В качестве ограничения было принято начало уменьшения коэффициента уплотнения из-за увеличения пористости грунтовермикулитовых материалов.

На рисунке 4а представлена установка для измерения теплопроводности материала, на рисунке 4б показано изменение теплопроводности грунтовермикулитового материала в зависимости от количества добавки из вермикулита.



а)

б)

Рисунок 4 – Установка для измерения теплопроводности (а) и изменение коэффициента теплопроводности грунтовермикулитового материала в зависимости от количества добавки из вермикулита (б)

При выполнении опытно-экспериментальных работ по выявлению влияния добавок из вермикулита на основные физико-механические и теплофизические свойства асфальтобетонов для дорожных покрытий целесообразно воспользоваться классическим равномер-ротаторным планом 2-го порядка. В качестве добавки из вермикулита использовался термообработанный вспученный вермикулит.

Схема проведения эксперимента представлена на рисунке 5. Для его проведения выбран трехфакторный план Бокса-Хантера, включающий в себя двадцать опытов. Данный план обладает приемлемыми статистическими показателями при небольшом числе опытов и простоте его реализации. Значения постоянных, а также наименование управляемых и диапазоны варьирования управляющих факторов представлены в таблицах 3, 4, 5. Диапазоны изменения управляющих факторов выбраны с учетом пробных экспериментов.

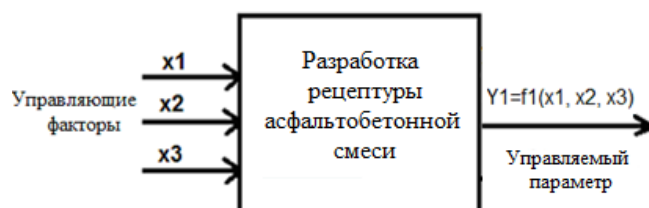


Рисунок 5 – Схема проведения эксперимента по разработке рецептуры асфальтобетонной смеси для дорожных морозоустойчивых покрытий

Таблица 3 – Значения постоянных факторов в эксперименте

№ п/п	Наименование фактора	Значение по требованиям ГОСТ Р 58406.1
1	Объемная плотность, $г/см^3$	не нормируется
2	Максимальная плотность, $г/см^3$	не нормируется
3	Содержание воздушных пустот, %	От 2,0 до 4,0
4	Устойчивость смеси к расслаиванию по показателю стекания вяжущего, %	От 0,07 до 1,15
5	Разрушающая нагрузка по Маршаллу, H	Не менее 6200
6	Деформация по Маршаллу, $мм$	От 2,0 до 4,0
7	Предел прочности на растяжение при изгибе, $МПа$, не менее	7,5

Таблица 4 – Диапазоны варьирования управляющих факторов в эксперименте

Наименование фактора	Нормализованное обозначение	Значения на уровнях варьирования				
		звездная точка	нижний	основной	верхний	звездная точка
		-1,682	-1	0	+1	+1,682
Содержание минерального порошка в асфальтобетонной смеси, $С_{МП}$, %	x_1	6,0	8,0	10,0	12,0	14,0
Содержание вяжущего в асфальтобетонной смеси, $С_{вяж.}$, %	x_2	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0
Содержание вспученного вермикулита в асфальтобетонной смеси, $С_{вспВ}$, %	x_3	0,100	0,175	0,350	0,525	0,700

Таблица 5 – Наименование управляемого параметра в эксперименте

Наименование параметра	Обозначение	Нормализованное обозначение
Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К	$\lambda_{абс.}$	y

На основе статистического анализа и оценки значимости коэффициентов регрессии получено уравнение в нормализованных обозначениях факторов:

$$\hat{y} = 1,034 + 0,002x_1 - 0,002x_2 - 0,161x_3 + 0,031x_1^2 + \dots$$

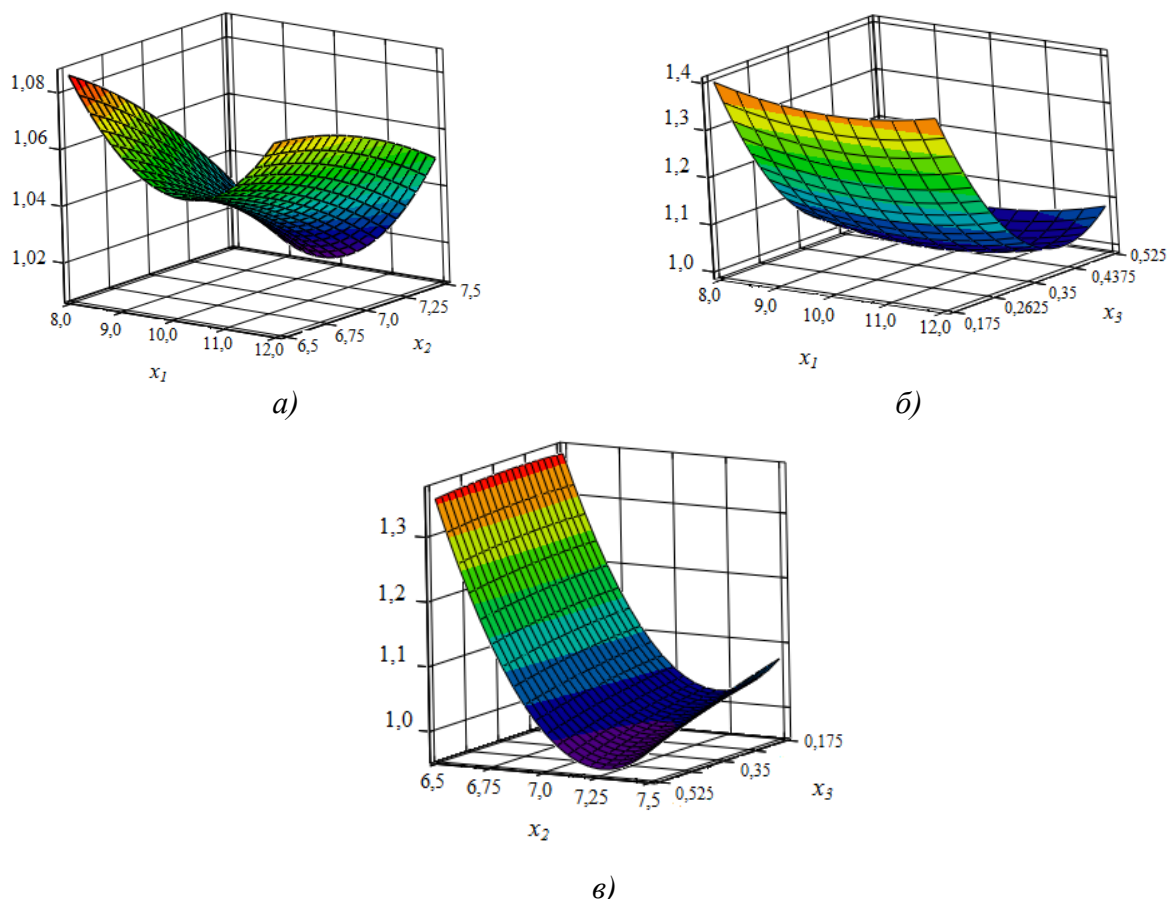
$$\dots + 0,005x_2^2 + 0,171x_3^2 + 0,008x_1x_2 + 0,006x_1x_3 - 0,017x_2x_3, \quad (7)$$

– в натуральных обозначениях факторов:

$$\lambda_{абс.} = 6,231 - 0,916C_{МП} - 0,471C_{ВЯЖ.} - 5,691C_{ВСПВ} + 0,0077C_{МП}^2 - \dots$$

$$- 0,02C_{ВЯЖ.}^2 + 5,587C_{ВСПВ}^2 + 0,008C_{СП}C_{ВЯЖ.} + 0,002C_{МП}C_{ВСПВ} + 0,093C_{ВЯЖ.}C_{ВСПВ}. \quad (8)$$

По результатам полученных экспериментальных данных были построены графические интерпретации зависимостей изменения теплопроводности асфальтобетонного покрытия от величины вспученного вермикулита, минерального порошка и вяжущего, представленные на рисунке 6.



x_1 – содержание минерального порошка, %; x_2 – содержание вяжущего, %;
 x_3 – содержание вспученного вермикулита, %
 (сверх 100% минеральной части)

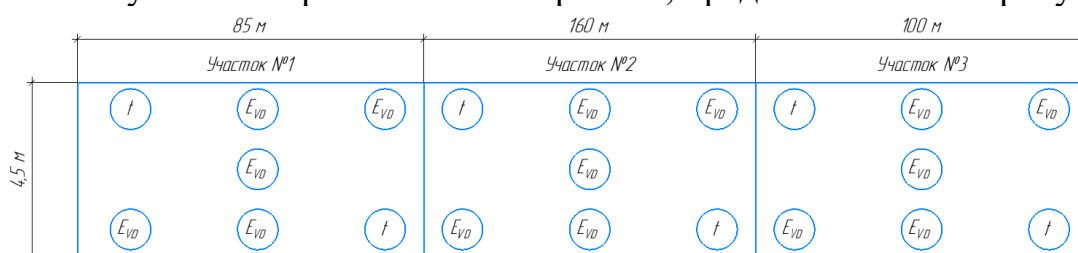
Рисунок 6 – Графическая интерпретация изменения теплопроводности асфальтобетонного покрытия в зависимости от величины вспученного вермикулита, минерального порошка и вяжущего (выходной параметр – коэффициент теплопроводности асфальтобетонного дорожного покрытия, Вт/м·К)

При решении оптимизационной модели использовалась технология оптимизации *Microsoft Excel 2010* встроенной надстройки «Поиск решения». Оптимизация осуществлялась с применением метода обобщенного приведенного градиента. Оптимальные значения управляющих факторов составили:

$$x = \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ 0,459 \end{matrix} \rightarrow \begin{matrix} 10\% \\ 7\% \\ 0,27\% \end{matrix}. \quad (9)$$

Где $x_1 = 10\%$ – содержание минерального порошка; $x_2 = 7\%$ – содержание вяжущего, $x_3 = 0,27\%$ – содержание вспученного вермикулита, при ожидаемом значении коэффициента теплопроводности асфальтобетона $\lambda_{abc} = 1,001 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$.

Согласно плану опытно-производственного строительства, было заложено три опытных участка из различных материалов, представленных на рисунке 7.



t – место установки термопары;

E_{VD} – место измерения динамического модуля упругости.

Рисунок 7 – Опытные участки и схема расположения контрольных точек для измерений физико-механических показателей морозоустойчивых дорожных одежд лесовозных дорог

№1 – участок из местного грунта, крупнообломочный дресвяной, содержание частиц размером более 2 мм в количестве более 50 %, толщина рабочего слоя 40 см;

№2 – участок из грунтовермикулитового материала, с содержанием вермикулита от 10 до 12 % (классифицируется как песок гравелистый, с содержанием частиц размером более 2 мм в количестве более 25 %), толщина слоя 35 см;

№3 – участок из грунтовермикулитового материала, с содержанием вермикулита от 15 до 20 % (классифицируется как как песок крупный по содержанию частиц размером более 0,50 мм в количестве более 50 %), толщина слоя 35 см.



а) динамическим плотномером ZFG-3000-10 GPS; б) методом режущего кольца; в) установка термопары ХК (L); г) измерение температуры грунтовермикулитового слоя Темпер-3.11

Рисунок 8 – Обследование морозоустойчивых дорожных одежд (Территория трансграничных лесов Евразии, Челябинская область, участок лесовозной дороги 55°36'55.3"N 60°31'57.5"E)

Значения физико-механических и теплотехнических параметров дорожных одежд, полученные в результате проведенного комплекса испытаний (рисунок 8), были использованы при проектировании морозоустойчивых дорожных одежд и разработке технологий их строительства.

В четвертой главе разработаны технические и организационно-технологические решения по строительству морозоустойчивых дорожных одежд лесовозных дорог постоянного действия I лв, II лв, III лв, I лх, II лх категорий, представленные на рисунке 9.



Рисунок 9 – Организационно-технологические решения при строительстве морозоустойчивых дорожных одежд лесовозных дорог

На основании проведенных исследований был разработан технологический регламент ТР 03799937 – 003 -2021 на устройство конструктивных морозозащитных слоев лесовозных дорог с добавками из вермикулита. Разработанная технологическая последовательность представлена на рисунке 10.



Рисунок 10 – Последовательность работ при строительстве конструктивного морозозащитного слоя с добавками из вермикулита

Особые условия при строительстве и эксплуатации лесотранспортной инфраструктуры вызывают серьезные затруднения при проведении технологического контроля. Значительная удаленность строящихся участков лесовозных дорог от производственных баз, складов дорожно-строительных материалов, трудности в оперативном управлении строительными процессами, отсутствие централизованного управления подрядными организациями обуславливают необходимость создания новой системы технологического контроля качества, построенной на основе информационных технологий.

Структурная схема технологического контроля качества строительства лесовозных дорог с использованием информационных систем представлена на рисунке 11.

Разработанная система контроля качества строительства дорог была интегрирована в цифровую лабораторно-информационную систему U-LAB. Система U-LAB была внедрена в информационном центре ИЦ «УралНИИСтром». С целью обеспечения эффективного технологического контроля качества в систему U-LAB был внедрен блок «Подсистема технологического контроля строительства лесовозной дороги», что позволило перейти от традиционной организации технологического контроля в обычной лаборатории к системе технологического контроля качества строительства лесовозных дорог с использованием информационных систем. Система формирует заявки на проведение технологического контроля качества строительства лесовозных дорог, обеспечивает ведение протоколов испытаний, формирует перечень используемого оборудования, генерирует интерактивное окно объекта технологического контроля качества и даже карту объектов строительства (см. рисунок 12).

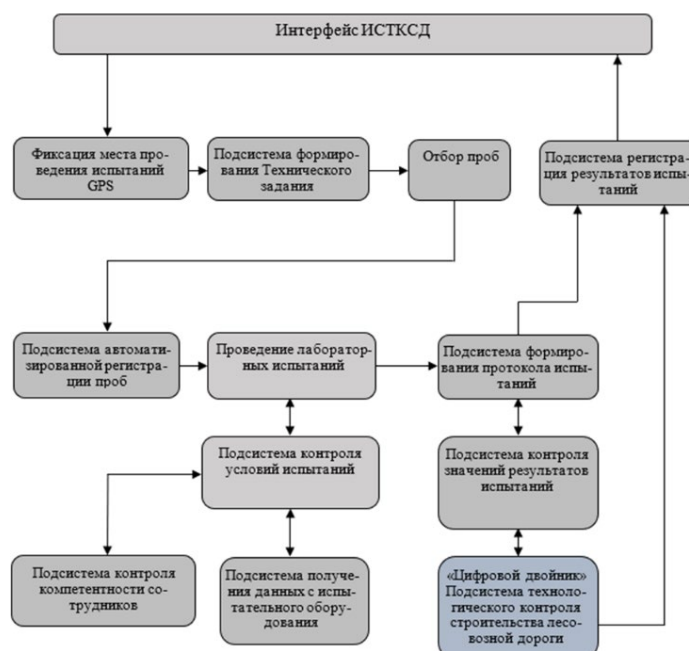


Рисунок 11 – Структурная схема технологического контроля качества строительства лесовозных дорог с использованием информационных систем

Система имеет синхронизацию с комплексом 1С-Бухгалтерия. Это позволяет обеспечить высокий уровень качества строящихся лесовозных дорог

за счет «прозрачности» процесса строительства на всех этапах, эффективности и оперативности передачи результатов контроля всем заинтересованным лицам, имеющим доступ к интерфейсу системы, включая надзорные органы (в случае необходимости).

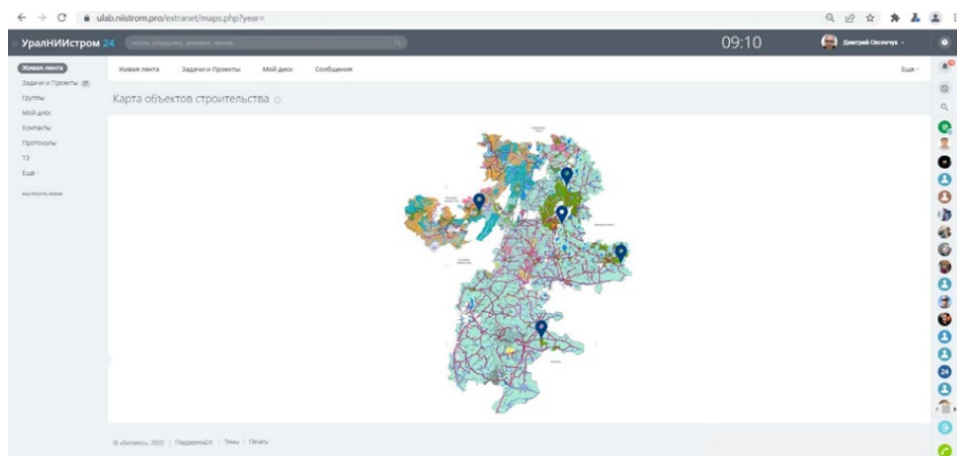


Рисунок 12 – Карта объектов строительства лесовозных дорог на территории трансграничных лесов Евразии (интерфейс информационной системы контроля качества строительства)

Для оценки экономической эффективности выполнялись расчеты на примере строительства опытно-производственного участка лесовозной дороги на территории Кыштымского лесничества. Для сравнения рассматривали варианты с морозоустойчивой дорожной конструкцией с традиционным типом асфальтобетонного покрытия и с применением конструктивного слоя из пенополистирола, с дорожной конструкцией с асфальтобетонным покрытием с добавкой из вермикулита и с конструктивным слоем из грунтовермикулитовых материалов.

Экономическая эффективность строительства морозоустойчивых дорожных одежд лесовозных дорог с добавками из вермикулита в текущих ценах IV квартала 2021 г. с НДС составила 8 937,33 тыс. руб. на 1 км, по сравнению с базовым вариантом.

Основные выводы и рекомендации

1. Разработанные методики проектирования морозоустойчивых дорожных одежд с учетом обобщенного показателя физико-механических и теплофизических свойств конструктивных слоев лесовозных дорог с добавками из вермикулита позволяют использовать местные грунты и экологически неопасные природные добавки, повысить теплоизоляционные свойства конструктивных слоев, обеспечить устойчивость к нагрузкам при эксплуатации лесовозных дорог в сложных природно-климатических условиях.

2. Впервые получены значения оптимальных параметров морозоустойчивых дорожных одежд лесовозных дорог с использованием добавок из вермикулита. Анализ показал, что оптимальными параметрами следует считать: толщина асфальтобетонного покрытия 4 см; толщина грунтовермикулитового слоя 21 см; толщина рабочего слоя земляного полотна 1,30 м, при обобщенном показателе эффективности 0,728.

3. Получены рациональные составы грунтовермикулитового материала: добавка вермикулита от 12 до 18%; гранулометрический состав: фракция 40 мм – 0 %; фракция 20 мм – 0 %; фракция 10 мм – от 4,0 до 11,6 %; фракция 5 мм от

24,3 до 43,8 %; фракция 2 мм – от 44,2 до 62,1 %; фракция 1 мм – от 57,3 до 71,4 %; фракция 0,5 мм – от 67,6 до 77,4%; фракция менее 0,5 мм – 100% (полные остатки). Ожидаемое значение коэффициента теплопроводности грунтовермикулитового слоя составило $\lambda_{звс} = 1,106 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, статического модуля упругости – 47 МПа.

4. Установлено, что асфальтобетонная смесь морозоустойчивого дорожного покрытия должна содержать: минерального порошка - 10,0 %; битумного вяжущего - 7,0 %; вспученного вермикулита 0,27 %. Ожидаемое значение коэффициента теплопроводности асфальтобетона составило $\lambda_{абс} = 1,001 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$.

5. Разработаны новые технологии строительства морозоустойчивых дорожных одежд с добавками из вермикулита. Рациональные технологические режимы строительства: коэффициент уплотнения не менее 0,99; коэффициент увлажнения от 0,95 до 1,15; продолжительность технологического перерыва от 1 до 1,5 часов. При этом ожидаемые значения физико-механических характеристик конструктивных слоев: динамический модуль упругости рабочего слоя земляного полотна - 26 МПа и выше, грунтовермикулитового слоя - 37 МПа и выше, асфальтобетонного дорожного покрытия - 45 МПа и выше.

6. Разработан и внедрен технологический регламент, закрепляющий организационные и технико-технологические решения строительства морозоустойчивых дорожных одежд лесовозных дорог с добавками из вермикулита.

7. Показано, что технологический контроль является неотъемлемой частью технологического процесса строительства лесовозных дорог и может быть эффективно реализован с использованием современных информационных систем. Разработана «Подсистема технологического контроля строительства лесовозной дороги» в системе в цифровой лабораторно-информационной системы U-LAB, позволяющая повысить качество строительства лесовозных дорог, территориально расположенных в сложных природно-климатических условиях.

8. Ожидаемый экономический эффект от использования добавок из вермикулита при строительстве морозоустойчивых дорожных одежд позволяет в 2,24 раза снизить затраты на приобретение дорожно-строительных материалов, увеличить межремонтные сроки эксплуатации, а также обеспечить снижение экологической нагрузки на лесную среду за счет отказа от использования синтетических теплоизолирующих материалов.

9. Результаты исследований и практические рекомендации внедрены в ООО «Уралвермикулит», АО «ГК «Северавтодор», что подтверждается соответствующими актами.

Перспективы дальнейшей разработки темы. В дальнейшем предполагается расширить область исследований по применению морозоустойчивых дорожных одежд для условий многолетних мерзлых грунтов при освоении бореальных лесов РФ.

Список основных публикаций по теме диссертации:

а) в рецензируемых научных журналах и изданиях для опубликования основных научных результатов диссертации

1. Ахтямов Э.Р. Повышение эксплуатационных характеристик покрытий лесных лесовозных дорог за счет добавки из вспученного вермикулита [Текст] /

Э.Р. Ахтямов, И.Н. Кручинин, В.В. Побединский, Е.И. Кручинина // Деревообрабатывающая промышленность. – 2021. - №2. – С. 3-10.

2. Ахтямов Э.Р. Информационная система контроля качества строительства лесных дорог [Текст] / Э.Р. Ахтямов, И.Н. Кручинин, В.В. Побединский, Е.И. Кручинина, А.А. Чижов // Деревообрабатывающая промышленность. – 2021. - № 4. – С. 3-10.

3. Ахтямов Э.Р. Технология строительства покрытий лесных дорог с применением добавок из вспученного вермикулита [Текст] / Ахтямов Э.Р., Кручинин И. Н., Кручинина Е.И. // Деревообрабатывающая промышленность. – 2021. - № 4. – С. 16-23.

4. Ахтямов Э.Р. Разработка требований к применению добавок из вспученного вермикулита для строительства лесовозных дорог на территориях Северного, Приполярного и Полярного Урала [Текст] / Э.Р. Ахтямов, И.Н. Кручинин, В.В. Побединский, Е.И. Кручинина, А.А. Чижов. // Деревообрабатывающая промышленность. – 2022. - № 1. – С.3-10.

б) в других изданиях и материалах конференций

5. Ахтямов Э.Р. Асфальтобетонные покрытия лесных лесовозных дорог с улучшенными транспортно-эксплуатационными показателями / Э.Р. Ахтямов, И.Н. Кручинин, Е.И. Кручинина, А.А. Лабыкин // Сетевое издание «Вестник АГАТУ». Научный журнал ФГБОУ ВО Арктический государственный агротехнологический университет [Электронный ресурс]. - Выпуск №1(1) 2021. - с.61-65.

6. Ахтямов Э.Р. Особенности проектирования асфальтобетонных покрытий лесных лесовозных дорог на территории Северного и Приполярного Урала [Электронный ресурс] / Э.Р. Ахтямов, И.Н. Кручинин, Е.И. Кручинина /Современные машины, оборудование и IT-решения лесопромышленного комплекса: теория и практика : материалы Всероссийской научно-практической конференции, Воронеж, 17 июня 2021 г.: М-во науки и высшего образования РФ, ФГБОУ ВО «ВГЛУ». – Воронеж, 2021. – С. 23 – 28.

7. Ахтямов Э.Р. Применение вермикулита в битумных композициях и мастиках для дорожного строительства / Э.Р. Ахтямов, Е.В. Кошкарлов, А.Ю. Дедюхин и др. // Вестник Южно-Уральского гос. университета. Серия «Строительство и архитектура». Том 21. Вып. 1. – 2021.-С.43 - 47.

8. Ахтямов Э.Р. Развитие системы контроля качества строительства автомобильных дорог с использованием лабораторной информационной менеджмент-системы U-LAB/ Э.Р. Ахтямов, Е.В. Кошкарлов, А.Ю. Дедюхин и др. // Вестник Южно-Уральского гос. университета. Серия «Строительство и архитектура». Том 21. Вып. 2. – 2021.-С.44-51.

9. Ахтямов Э.Р. Разработка требований к асфальтобетонным покрытиям лесных дорог/ Э.Р. Ахтямов, И.Н. Кручинин // Современная наука: актуальные вопросы, достижения и инновации. Сборник научных трудов по материалам XXXIX Международной научно-практической конференции (г.-к. Анапа, 17 июля 2021 г.). [Электронный ресурс]. – Анапа: Изд-во «НИЦ ЭСП» в ЮФО, 2021. – С. 6 - 11.

10. Ахтямов Э.Р. Исследование битумно-вермикулитовых мастик и асфальтобетонов для дорожного строительства / Э.Р. Ахтямов, Е.В. Кошкарлов, А.Ю. Дедюхин, В.Н. Агейкин // «Национальная Ассоциация Ученых»: ежемесячный

научный журнал. – Екатеринбург: Евразийское научное изд-во. – № 34 (61). – 2020. – С. 21-26.

в) патенты

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU № 2022616417. Российская Федерация. Программа оптимизации параметров конструкции лесовозной дороги с морозозащитным слоем / В.В. Побединский, И.Н. Кручинин; С.В. Ченушкина, **Э.Р. Ахтямов** заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО Уральский государственный лесотехнический университет. – №2022614372; заявл. 24.03.2022; зарегистрировано 08.04.2022.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим направлять по адресу: 620100, г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, 37, УГЛТУ, Ученому секретарю диссертационного совета Д.212.281.02, e-mail: d21228102@yandex.ru