

На правах рукописи

Шакирзянов Дмитрий Игоревич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СТРОИТЕЛЬСТВА
ЛЕСОВОЗНЫХ ДОРОГ ИЗ НЕКОНДИЦИОННЫХ
ЩЕБЕНОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

05.21.01 – Технология и машины лесозаготовок
и лесного хозяйства

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном образовательном учреждении высшего образования «Уральский государственный лесотехнический университет» (ФГБОУ ВО УГЛТУ)

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

Официальные оппоненты: **Бургонутдинов Альберт Масугутович**
доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический Университет», профессор кафедры Автомобильные дороги и мосты

Мохирев Александр Петрович
доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», доцент кафедры Лесоинженерное дело

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»

Защита состоится **«23» декабря 2021 г. в 10.00** 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» (www.usfeu.ru).

Автореферат разослан «__» ноября 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор

Шишкина Елена Евгеньевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

В современных условиях, ведение лесопромышленной деятельности ограничено возможностью использования качественных дорожно-строительных материалов для строительства и эксплуатации лесовозных дорог. В настоящее время на территории Свердловской области реализуется свыше семи инвестиционных проектов по освоению лесов, транспортная доступность которых составляет не более 60%. А степень обеспеченности дорожно-строительными материалами, для создания транспортной инфраструктуры лесов еще меньше и не превышает 35%. Актуальность темы исследования совершенствование технологии строительства лесовозных дорог из некондиционных щебеночных материалов исходит прежде всего из возможности применения в качестве дорожно-строительных материалов неиспользуемых остатков переработки каменных материалов производственной базы строительства Свердловской области и Северного Урала.

Следует отметить, что использование для строительства лесовозных лесных дорог местных некондиционных щебеночных материалов сопряжено с рядом технологических и эксплуатационных трудностей. Эти некондиционные материалы являются либо отходами горнодобывающей промышленности, либо низкосортными каменными материалами с нестабильными зерновыми составами и не удовлетворяют требованиям нормативно технической документации по строительству автомобильных дорог. При этом, ежегодно на территории области образуется около 18 млн. тонн неиспользуемых остатков каменных материалов и вскрышных пород. Такое количество отходов каменных материалов оказывает серьезное негативное влияние на лесопользование в Свердловской области и районах Северного Урала.

Таким образом, актуальность работы состоит в совершенствовании технологии строительства лесовозных автомобильных дорог из некондиционных щебеночных материалов в условиях Свердловской области и Северного Урала.

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 государственной регистрации темы АААА-А20-120092390016-9).

Степень разработанности темы исследования. Проблемы повышения эффективности строительства лесовозных лесных автомобильных дорог и элементов транспортной инфраструктуры занимались такие учреждения Высшего Образования, как СПбГЛТУ, ВГЛТУ, УГЛТУ, УГТУ, ПГТУ. Разработаны вопросы проектирования и строительства лесовозных лесных автомобильных дорог. Выполненные исследования направлены на оценку транспортных, эксплуатационных и экологических качеств лесовозных дорог. Значительное количество исследований посвящено анализу транспортной инфраструктуры лесосырьевой базы Свердловской области и Северного Урала.

При этом требования, предъявляемые к обеспечению устойчивого развития лесотранспортной инфраструктуры и технологиям строительства лесовоз-

ных дорог, работающих на арендуемых лесных участках Северного региона Свердловской области и Северного Урала до конца не сформулированы.

В диссертации обосновывается решение проблемы повышения технологической эффективности строительства лесовозных дорог из местных некондиционных щебеночных материалов в условиях Свердловской области и Северного Урала.

Цель исследования. Совершенствование технологии строительства лесовозных дорог из некондиционных щебеночных материалов в условиях Свердловской области и Северного Урала.

Задачи исследования:

1. Провести анализ современных технологий строительства лесовозных дорог с покрытиями из щебеночных материалов;
2. Разработать математическую модель строительства лесовозных дорог с покрытиями из некондиционных щебеночных материалов;
3. Исследовать изменения физико-механических свойств щебеночных покрытий лесовозных дорог из некондиционных каменных материалов в процессе строительства;
4. Разработать технологию строительства лесовозных дорог с покрытиями из некондиционных щебеночных материалов и дать рекомендации по их строительству.

Объект исследования: лесовозные дороги.

Предмет исследования: щебеночные покрытия лесовозных дорог, технологии 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. Разработанные методики и математическая модель строительства лесовозных дорог с покрытиями из некондиционных щебеночных материалов, построенная на основе теории нечетких множеств и нечетких нейронных сетей, отличающиеся учетом неопределенности физико-механических характеристик некондиционных щебеночных материалов.
2. Разработанные методики оценки прочностных свойств щебеночных покрытий лесовозных дорог, отличающиеся учетом зернового состава и степени уплотнения некондиционных щебеночных материалов, обеспечивающие увеличение прочностных качеств дорожных покрытий.
3. Предложенные пути повышения технологической эффективности строительства лесовозных дорог с покрытиями из некондиционных щебеночных материалов, отличающиеся учетом функционально-технологических параметров вибрационных катков и совмещения операций по уплотнению и измельчению каменного материала, позволяющие повысить качество строительства лесовозных дорог.

Научные положения, выносимые на защиту.

1. Методика и математическая модель, процесса строительства лесовозных дорог с покрытиями из некондиционных щебеночных материалов на основе теории нечетких множеств и построения нечетких нейронных сетей, позволяющие формировать устойчивые дорожные покрытия.

2. Методика оценки прочностных свойств щебеночных покрытий лесных дорог, позволяющая разрабатывать мероприятия по формированию уплотненного слоя дорожного покрытия, с учетом неопределенности зернового состава и физико-механических характеристик некондиционного щебеночного материала.

3. Рекомендации по повышению технологической эффективности строительства лесовозных дорог с покрытиями из некондиционных щебеночных материалов, позволяющие обеспечивать подбор вибрационных катков с учетом их функционально-технологических параметров и совмещения операций по уплотнению и измельчению каменного материала.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в разработке математической модели строительства лесовозных дорог с покрытиями из некондиционных щебеночных материалов и совершенствовании технологии строительства лесовозных дорог с покрытиями из местных некондиционных щебеночных материалов в условиях Свердловской области и Северного Урала.

Результаты работы позволят повысить технический уровень вновь строящихся лесовозных дорог, реализовать концепцию развития местных инвестиционных проектов повышения транспортной доступности лесов, приводящих к сокращению затрат на дорожно-строительные материалы и дорожно-строительную технику.

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. Полученные алгоритмы реализованы в виде вычислительных экспериментов в среде *Simulink*, *Fuzzy Logic Toolbox*, *FIS Editor*.

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 экспериментальные 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:

Всероссийская научно-практическая конференция «Современные проблемы развития Европейского Севера». (Ухта 25 мая 2020г); Цифровые технологии в лесном секторе. Материалы Всероссийской научно-технической конференции Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра (Санкт-Петербург, 2020 г.); Химия. Экология. Урбанистика. Материалы Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием) (Пермь, 2020).

Реализация работы. Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований внедрены в Серовском районе Свердловской области, используются в учебном процессе Уральского государственного лесотехнического университета и Ухтинского государственного технического университета.

Публикации. Результаты исследований отражены в 8 научных работах общим объемом 3,9 п.л. (авторских 1,3 п.л.), в том числе в 3 статьях, в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, в 1 статье в изданиях, индексируемых Scopus, 1 патент РФ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 разделов, общих выводов и приложений; содержит 216 страниц текста, 29 таблиц, 48 рисунков и библиографического списка из 157 наименований, включая 27 на иностранных языках.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложено содержание диссертационной работы, обоснованы актуальность и научная новизна выполненных исследований, их практическая значимость, результаты внедрения, а также сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен анализ работ, посвященных изучению транспортной инфраструктуры лесов Свердловской области и Северного Урала.

Основные требования к лесным дорогам и лесовозным сетям были сформулированы в исследованиях таких ученых как, В. И. Алябьева, Н. П. Вырко, Б. А. Ильина, И. И. Леоновича, Э. О. Салминена, А. П. Соколова и др.

Вопросами повышения транспортно-эксплуатационных показателей лесовозных автомобильных дорог и их строительства занимались такие ученые, как О. Н. Бурмистрова, В. К. Курьянов, И. Н. Кручинин, М. Г. Салихов, М. Ю. Смирнов, С. И. Сушков, А. В. Скрыпников. Значительный вклад по строительству временных лесных автомобильных дорог внесен в работах Б. П. Вейнберга, М. М. Корунова, И. В. Крагельского, С. И. Морозова.

В основу их исследований легли принципы повышения эффективности технологии строительства лесовозных дорог с применением только качественных кондиционных дорожно-строительных материалов, а изменения их физико-механических свойств в процессе строительства и их дальнейшей эксплуатации не рассматривались.

Становится очевидным, что для повышения эффективности лесотранспортных операций необходимы дополнительные исследования по применению местных некондиционных щебеночных материалов в условиях Свердловской области и Северного Урала.

На основе анализа методов повышения эффективности строительства щебеночных покрытий лесовозных дорог были сформулированы задачи исследований.

Во второй главе рассмотрены теоретические методы повышения эффективности строительства покрытий лесовозных дорог из некондиционных щебеночных материалов.

Технологии строительства дорожных покрытий из щебеночных материалов неразрывно связана с процессом формирования прочного слоя дискретной структуры, когда элементы структуры не имеют жестких связей между собой или же, эти структурные связи являются слабыми.

Структурная прочность дискретных сред оценивается величинами взаимодействия между его составными частицами. Это, или величина контактов между соседними зернами, или плотность зернистой среды, или угол внутреннего трения среды.

На сегодняшний день расчетные физико-механические модели дискретного тела получены только для нескольких частых случаев. В их основе лежит взаимодействие между отдельными частицами, а связи между ними только механические.

Наиболее известна модель *W.F. Murphy*, по оценке числа контактов в зависимости от пустотности дискретной среды

$$C = C_0 + B(V_0 - V)^n, \quad (1)$$

где C_0 – число контактов в неуплотненной дискретной среде; V_0 – начальная межзерновая пустотность дискретной среды, %; V – межзерновая пустотность уплотненной дискретной среды, для случая $V_0 \geq V$, %; B – эмпирический коэффициент; n – показатель степени.

В случае внешнего воздействия P на слой дискретного материала, удерживающая сила F между частицами может быть оценена по модели *Hertz-Mindlin*:

$$F = 4\pi \cdot C^{-1} \frac{D^2 p}{(1-V)^n}, \quad (2)$$

где P – давление на слой материала, МПа; D – размер частицы, мм; C – контактное число, или число контактов между частицами; V – межзерновая пустотность слоя дискретного материала, %.

Помимо числа контактов между частицами, любая дискретная среда будет обладать прочностью, которая зависит не только от размера, формы частиц, но и от суммарного значения межзерновых пустот.

Наиболее известные исследования по оценке пустотности и зерновых составов дискретных сред представлены в модели *Фуллера и Андреасена*:

$$A = 100 \cdot \left(\frac{d}{D} \right)^n, \quad (3)$$

где A – содержание частиц меньших, чем размер d ; d – крупность зерен той фракции, для которой вычисляется ее содержание в смеси, мм; D – максималь-

ный размер частиц, мм; n – степень кривой максимальной плотности по Фуллеру $n = 0,45$, по Андреасену $n = 0,37$ (для пространственного распределения).

В то же время модель *Cumberland D. J. and Crawford R. J.*, для оценки межзерновой пустотности идеализированной двуразмерной системы позволяет получить значения максимальной пустотности в зависимости от крупности заполнителя.

Для щебеночных покрытий лесовозных дорог характерна каркасная структура заполнителя. Именно для них, модель *Горельшева Н. В.* позволила оценивать свойства щебеночной смеси, в зависимости от коэффициента упаковки:

$$K_{\text{упк}} = \frac{(L-d)}{d}, \quad (4)$$

где $K_{\text{упк}}$ – коэффициент упаковки, при $K_{\text{упк}} \leq 0$ возникает контактная структура материала; L – расстояния между отдельными зёрнами смеси, мм; d – диаметр частиц в мм, для которых оценивается коэффициент упаковки.

Межзерновая пустотность и зерновой состав дискретного материала влияет не только на удерживающие усилия между частицами, но и на конструктивную прочность слоя. Модель, предложенная *А. К. Бируля* позволяет оценить прочность конструктивного щебеночного слоя выражением:

$$E = K_{\text{пр}} (0,7n^{0,7} - 51n + 960), \quad (5)$$

где n – остаточная пористость щебеночного слоя, %; $K_{\text{пр}}$ – коэффициент прочности каменного материала:

Представленные исследования рассматривали только отдельные частные случаи, чаще всего, для идеализированных сред и качественных, кондиционных каменных дорожно-строительных материалов.

С целью устранения отдельных противоречий в теории дискретных тел и учитывая неопределенность физико-механических характеристик некондиционных материалов была разработана математическая модель строительства лесовозных дорог с покрытиями из некондиционных щебеночных материалов (рисунок 1).

В основу математической модели положен блочно-функциональный принцип. Структурно, математическая модель состоит из следующих подсистем: подсистема формирования исходных данных; подсистема оценки физико-механических свойств щебеночного материала; подсистема адаптивной нейронечёткой сети; подсистема строительного контроля качества дорожного покрытия. Особенностью математической модели стало использование для настройки нейронечёткой сети опытных, экспериментальных данных изменения физико-механических характеристик некондиционных материалов под действием внешних нагрузок.

Основными показателями качества строительства покрытия лесовозной дороги может служить модуль общей деформации, модуль упругости и динамический модуль упругости конструктивного слоя.

В наших исследованиях рассматривается обобщенный технологический показатель строительства лесовозных дорог – динамический модуль упругости дорожного покрытия E_{VD} :

$$E_{vd} = f(F, D, C, V, NC), \quad (6)$$

где F – удерживающие усилия между частицами, $F=f(D, C, p, n)$, кН; D – размеры частицы, $D=f(k, p)$, мм; k – коэффициент прочности материала; C – количество контактов между зернами, $C=f(D, n)$; n – межзерновая пустотность слоя, $n=f(D, p, W)$, %; W – влажность слоя; NC – количество циклов нагружения на покрытие.

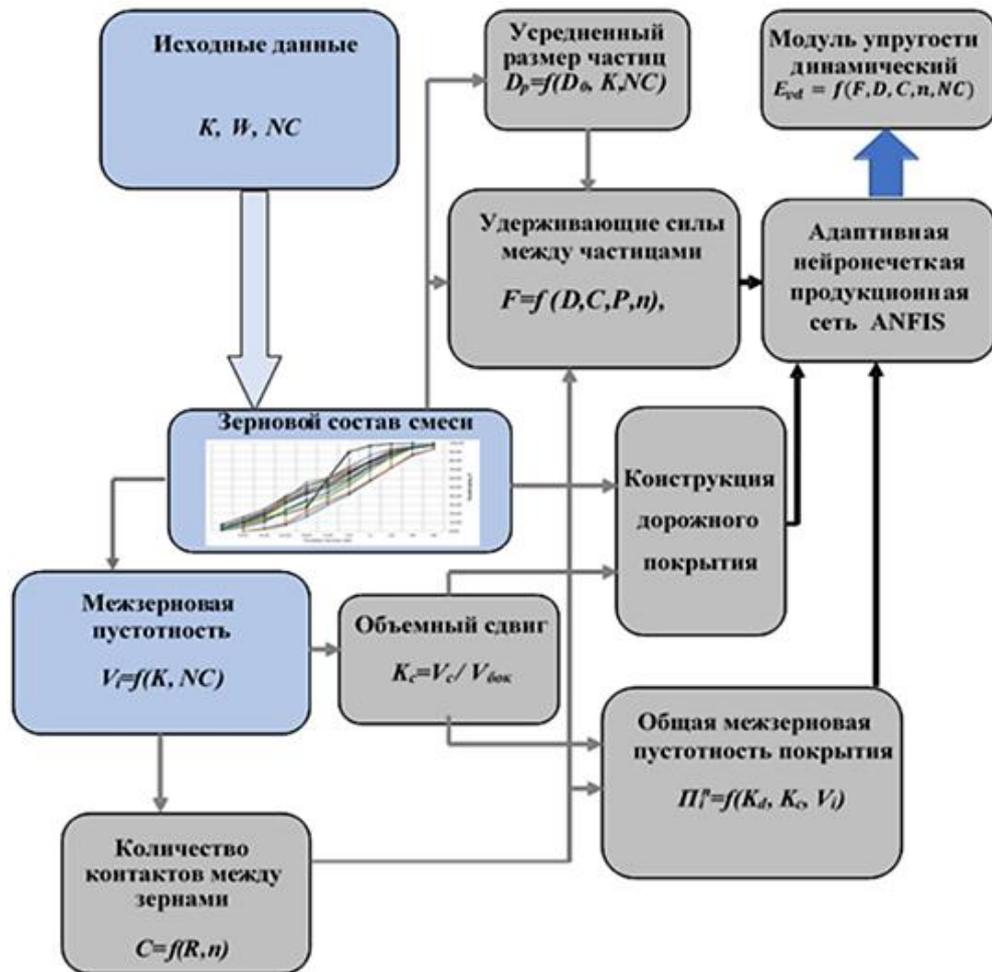


Рисунок 1 – Структурная схема математической модели строительства лесовозной дороги с покрытиями из некондиционных щебеночных материалов

Для решения задачи, с учетом условий неопределенности использовались методы приложения теории нечетких множеств нечеткой логики. Нечеткий вывод выполнялся по методу функции *Мамдани*. Для практической реализации нечетких моделей использовалась система компьютерной математики *Matlab*, которая располагает средствами для этой цели – приложения *Fuzzy Logic Toolbox*, *FIS Editor*.

Постановка задачи в содержательном виде заключается в качественном описании основных зависимостей выходной величины от исходных данных.

В процедуре фаззификации обоснованы входные и выходные переменные в виде нечетких функций принадлежности (лингвистических переменных), а также определены термножества лингвистических переменных.

В качестве входных величин принята крупность начального зернового состава каменного материала K , количество циклов нагружения, NC . В качестве

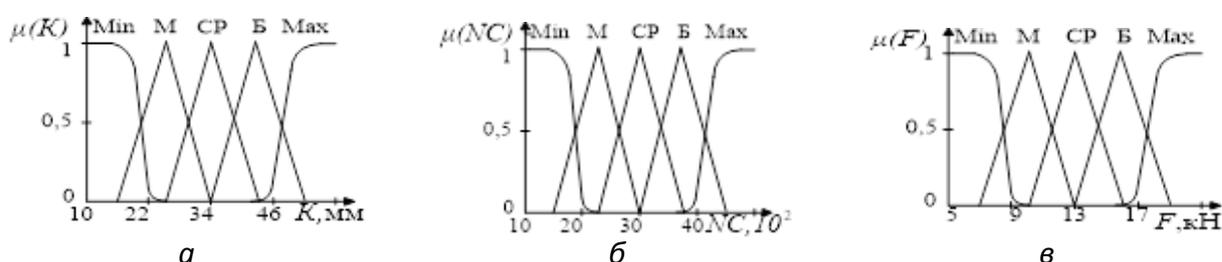
выходного значения переменной, характеризующей несущую способность покрытия, принято значение удерживающих сил F между частицами каменного материала.

Для лингвистических переменных определены термножества со следующими значениями:

- «Удерживающие силы, F » = {Мин, Мал, Срл, Бол, Макс};
- «Крупность фракционного состава, K » = {Мин, Мал, Срл, Бол, Макс};
- «Количество циклов нагружения, NC » = {Мин, Мал, Срл, Бол, Макс}.

В лингвистических переменных значения термножеств представлены в виде треугольных подмножеств, а по краям универсума приняты S-образные и Z-образные функции. Формализация нечетких функций была выполнена в среде *Fuzzy Logic Toolbox*.

Для вывода обобщающей функции $F_{ij} = f(K_{ij}, NC_{ij})$ сформулированы нечеткие функции принадлежности, которые показаны на рисунке 2.



a – «Крупность фракционного состава, K »; *б* – «Количество циклов нагружения, NC »;
в – «Удерживающие силы, F »

Рисунок 2 – Нечеткие функции принадлежности

База правил нечеткой продукции приведена в таблице 1.

Таблица 1 – База правил нечеткого вывода моделирования величины удерживающих сил между частицами каменного материала $F_{ij} = f(K_{ij}, NC_{ij})$

Значения лингвистической переменной «Крупность фракционного состава K »	Значения выходных нечетких подмножеств «Удерживающие силы F » при изменении нечеткой функции «Количество циклов нагружения NC »				
	<i>Мин</i>	<i>Мал</i>	<i>Срд</i>	<i>Бол</i>	<i>Макс</i>
<i>Мин</i>	<i>Мин</i>	<i>Мал</i>	<i>Мин</i>	<i>Мин</i>	<i>Мин</i>
<i>Мал</i>	<i>Мал</i>	<i>Срд</i>	<i>Мал</i>	<i>Мин</i>	<i>Мин</i>
<i>Срд</i>	<i>Срд</i>	<i>Бол</i>	<i>Срд</i>	<i>Мал</i>	<i>Мин</i>
<i>Бол</i>	<i>Срд</i>	<i>Макс</i>	<i>Бол</i>	<i>Срд</i>	<i>Мал</i>
<i>Макс</i>	<i>Бол</i>	<i>Макс</i>	<i>Бол</i>	<i>Срд</i>	<i>Мал</i>

Создание новых методов оценки качества покрытий лесовозных дорог при строительстве их из некондиционных материалов с учетом условий неопределенности привел к разработке адаптивной нейронечеткой продукционной сети типа *ANFIS (Adaptive Network-based Fuzzy Inference System)*. Эта сеть имеет свойства продукционных нечетких систем на основе базы правил и свойства простых нейронных сетей поэтому относится к системам гибридного типа. Входные параметры: удерживающие усилия, F ; усредненный размер частиц, наиболее преобладающих в составе смеси дорожного покрытия D ; межзерновая

пустотность n ; количество циклов нагружения на покрытие NC . Обучающие выборки со значениями принятых параметров приведены в таблице 2.

Таким образом, задача оценки технологической эффективности строительства покрытия лесовозных дорог по значению динамического модуля упругости является чрезвычайно сложной, так как все взаимосвязанные параметры характеризуются неопределенностью в данных.

Таблица 2 – Параметры обучающих выборок нейросети строительства покрытия лесовозных дорог

№	Удерживающие усилия между частицами, F кН	Усредненный размер частиц, D мм	Межзерновая пустотность, n	Количество циклов нагружения (степень), NC	Динамический модуль упругости, E_{VD} , МПа
1	8,6	18,2	0,25	10 (1)	25,3
2	4,2	7,2	0,14	100 (2)	48,7
3	2,3	6,3	0,11	1000 (3)	40,1
4	0,8	2,5	0,10	10000 (4)	28,6
Обоснование переменных					
5	Наибольшие зарегистрированные значения наблюдаемого диапазона	По данным ситового анализа	Наибольшее и наименьшее зарегистрированное значение пустотности дорожного покрытия	Нормативные значения для лесных дорог	Диапазон значений, полученных при полевых испытаниях
6	от 0,5 до 11,2	от 2,5 до 20	от 0,1 до 0,4	от 1 до 10000	от 18,6 до 52,5

Построенная сеть относится к системам гибридного типа, т.к. имеет свойства продукционных нечетких систем на основе базы правил и свойства простых нейронных сетей. Система выполнена в среде *MATLAB*. Исходные данные формируются в виде матрицы с исходными данными. Схема методики формирования сети показана на рисунке 3.

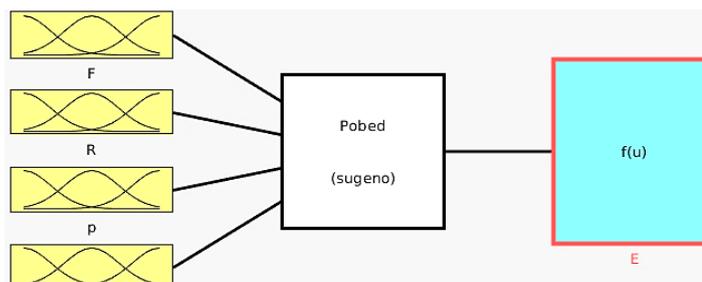


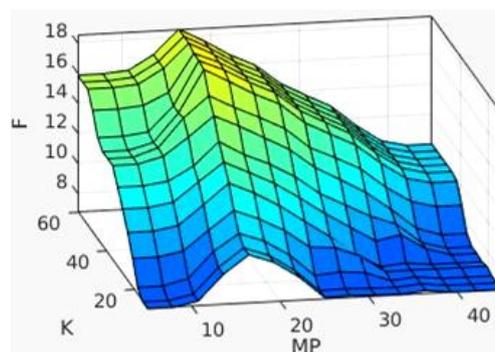
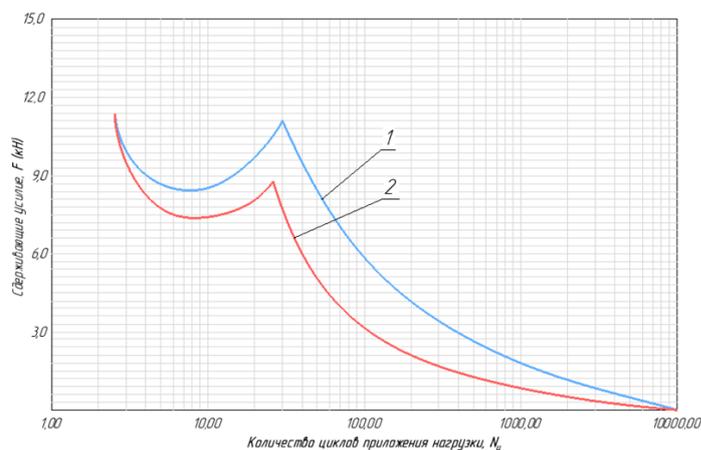
Рисунок 3 – Схема метода нечеткого вывода (Сугено) в сети

В результате исследований установлено, что в процессе строительства щебеночных покрытий лесовозных дорог в точках контакта зерен каменного материала возникают усилия в виде удерживающих сил F между ними.

При внешнем воздействии на покрытия размеры частиц изменяются, происходит их измельчение и уменьшение давления между зернами каменного материала до предела, когда рост числа контактов замедляется и происходит перераспределение напряжений в покрытии. После достижения оптимального зернового состава будет происходить последовательное снижение прочности щебеночного покрытия.

Изменение удерживающих сил F происходит по-разному в различных диапазонах количества внешних циклов нагружения NC . На рисунке 4, а представлены зависимости изменения удерживающих сил в покрытии лесовозной дороги от количества циклов нагружения для кондиционного и некондиционного щебеночного материала.

График функции $F = f(K, NC)$ в зависимости от крупности зернового состава и количества циклов нагружения приведен на рисунке 4, б.



а – Изменения удерживающих сил между частицами в щебеночных покрытиях лесовозных дорог от количества циклов нагружения (1 – кондиционный материал; 2 – некондиционный материал.); б – График функции нечеткого вывода

Рисунок 4 – Изменение удерживающих сил F в различных диапазонах количества внешних циклов нагружения NC

Усредненный размер частиц каменного материала при моделировании постоянно изменяется. Нами были рассмотрены выборки с размерами частиц от 2,5 до 20 мм.

Решение поставленной задачи с учетом условий неопределенности проводилось с помощью основных методов приложения теории нечетких множеств нечеткой логики.

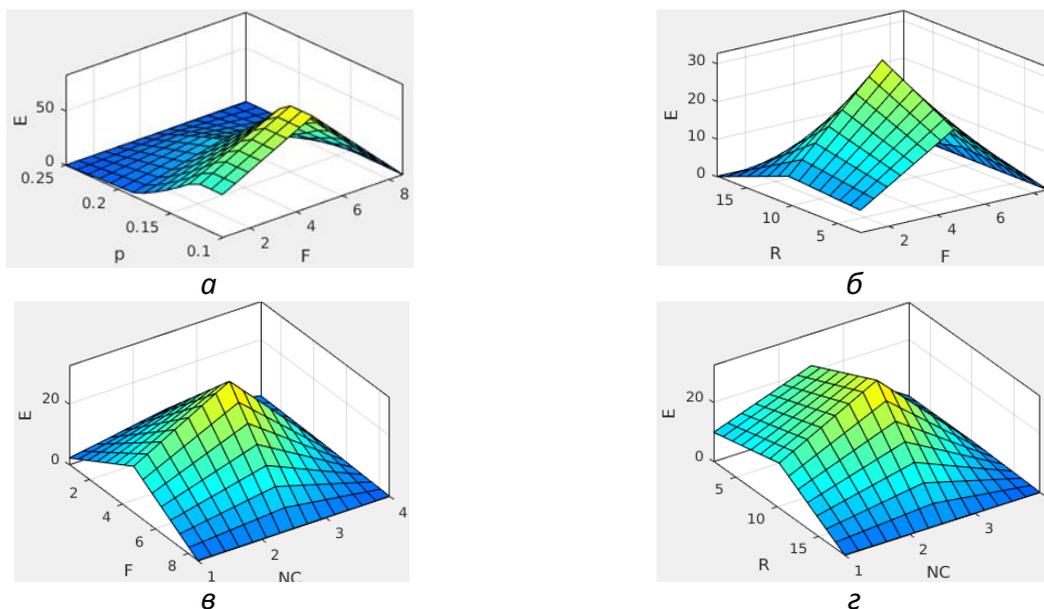
Для оценки сдерживающего усилия, которое наиболее точно характеризует несущую способность покрытия, получена соответствующая функция по изложенной выше методике.

Наличие разработанной адаптивной нейронечеткой продукционной сети типа *ANFIS (Adaptive Network-based Fuzzy Inference System)* позволило расширить область исследования повышения технологической эффективности строительства лесовозных дорог. Выбор функций принадлежности проводился по параметрам: количество циклов нагружения, удерживающие усилия, усредненный размер частиц, межзерновая пустотность.

Судя по результатам расчетов модель системы строительства лесовозных дорог является достаточно адекватной реальным объектам.

На рисунке 5 представлены результаты моделирования изменения технологических параметров щебеночных покрытий лесовозных дорог.

Изменения динамического модуля упругости в зависимости физико-механических свойств каменного материала позволил определить зоны оптимального уплотнения, при условии сохранности структуры дискретных, щебеночных слоев.



а) $E=f(p, F)$; б) $E=f(D, F)$; в) $E=f(NC, F)$; г) $E=f(D, NC)$

Рисунок 5 – Зависимости изменения технологического параметра (динамический модуль упругости) в зависимости от циклов нагружения и физико-механических свойств щебеночного материала

В третьей главе изложены материалы экспериментальных исследований по строительству лесовозных дорог из щебеночных материалов, выполненные в два этапа:

- исследования на лабораторной установке изменения физико-механических свойств некондиционных щебеночных материалов при их уплотнении;
- исследования в производственных условиях участков лесовозных дорог, построенных из щебеночных материалов, с их инструментальным обследованием.

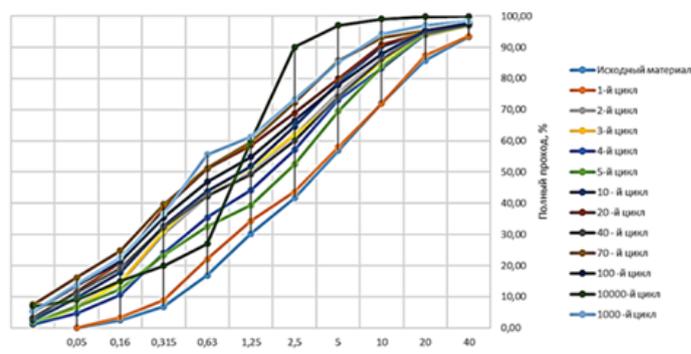
В лабораторных исследованиях имитировался процесс уплотнения щебеночных некондиционных материалов при строительстве покрытий лесовозных дорог, с использованием вальцового уплотнителя (роллерный компактор) В039 (рисунок 6, а). Секторный вальцовый уплотнитель позволил оперативно создавать значительное количество циклов нагружения на слой исследуемого щебеночного материала. При лабораторных испытаниях были заданы значения уплотняющих нагрузок в 10000 циклов, что эквивалентно не более 200 проходов лесовозных автопоездов в сутки по лесной дороге в течение 20 лет.

Испытаниям были подвержены каменные материалы, наиболее доступные на территории Свердловской области и Северного Урала: смесь щебеночно-песчаная некондиционная (ЩПСН), ООО «Уральский щебень», карьер п. Покров-Уральский; смесь вскрышных и вмещающих пород и некондиционных отходов Богословского рудоуправления, месторождение Воронцовское; смесь вскрышных пород Волчанский балластный карьер.

В результате проведенного комплекса испытаний по уплотнению получены данные по изменению зерновых составов материала в зависимости от внешнего нагружения и количества циклов приложения нагрузки (рисунок 6, б).

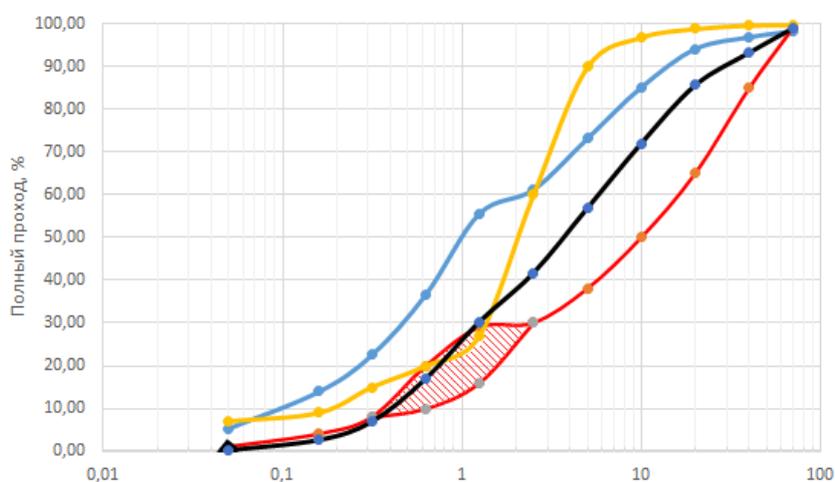
Выяснено, что зерновой состав смеси измельчается с различной интенсивностью. Так, впервые установлено, что наибольшему измельчению подверга-

ются частицы с размером от 5,0 до 70 мм. Именно они начинают увеличивать количество мелких частиц в смеси материала. Начиная с 100-го цикла нагружения характер измельчения изменяется, что, видимо, связано с перераспределением напряжений от уплотнения в смеси и изменениями между каркасообразующими и заполняющими фракциями



а – Лабораторная установка (роллерный компактор В039);
б – Зерновые составы щебеночно-песчаной смеси, некондиционной, в зависимости от количества циклов приложения нагрузки.
 Рисунок 6 – Лабораторные исследования уплотнения щебеночных некондиционных материалов

На рисунке 7 представлены кривые зерновых составов в зависимости от количества циклов нагружения, полученные в лабораторных условиях.



1 – зерновой состав после 40 – го цикла приложения нагрузки;
 2 – зерновой состав смеси максимальной плотности; 3 – зерновой состав после 10000 – го цикла приложения нагрузки;
 4 – исходный зерновой состав; 5 – область ограниченного доступа (область структурной неустойчивости для смесей фр. св. 0,315 до 2,5 мм).

Рисунок 7 – Изменения зерновых составов щебеночно-песчаной смеси некондиционной, в зависимости от количества циклов приложения нагрузки

Анализ показал, что применение некондиционных каменных материалов при строительстве щебеночных покрытий лесовозных дорог имеют свои особенности. Было выяснено, что исходный состав смесей не удовлетворяет основным требованиям, предъявляемыми нормативно технической документацией по строительству автомобильных дорог (кривая 4) и даже проходит по области ограниченного доступа.

В процессе уплотнения слоя из щебеночного материала происходит существенное изменение зернового состава. В опытах было зафиксировано уменьшение крупной фракции состава. Зерновой состав после уплотнения, на 40-м

цикле, показал приемлемые показатели по структурной устойчивости, кривая 1. Однако по мере увеличения внешнего воздействия количество мелкого заполнителя продолжает увеличиваться и достигает своего критических значений при значениях в диапазоне, близком к 10000-му циклу нагружения, кривая 3.

Частотный анализ зернового состава щебеночного материала показал, что структурная прочность слоя зависит от наличия мелкого заполнителя (рисунок 8).

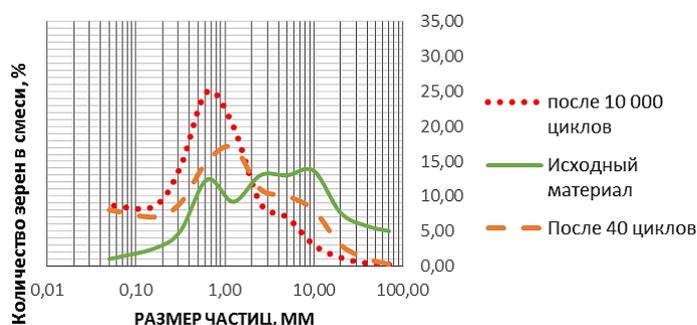


Рисунок 8 – Частотный анализ зернового состава некондиционной ЩПСН Покров-Уральский ООО «Уральский щебень» при его уплотнении

Полученные опытно-экспериментальные зависимости использовались при настройке нейронечеткой сети в математической модели строительства лесовозной дороги из некондиционных щебеночных материалов.

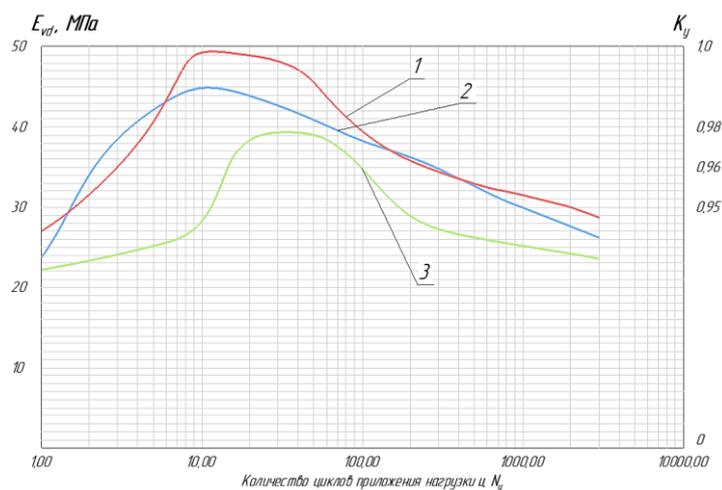
На втором этапе исследования, в производственных условиях были построены щебеночные покрытия лесных дорог, с проведением их инструментального обследования.

Было выяснено, что в процессе строительства щебеночного покрытия прочность слоя наиболее интенсивно возрастает при начальном уплотнении виброкатками.

В качестве основного технологического показателя был использован динамический модуль упругости конструктивного слоя щебеночного покрытия (рисунок 9).



а



б

Рисунок 9 – Обследование дорожных конструкций из некондиционных материалов динамическим прогибомером ZFG. (Свердловская область, магистральная лесовозная дорога) и изменение динамического модуля упругости и коэффициента уплотнения щебеночного покрытия в зависимости от количества циклов нагружения (проходов виброкатка) (1 – Участок №1; 2 – Участок №2; 3 – Участок №3)

В четвертой главе разработаны технические, технологические решения и практические рекомендации по строительству щебеночных покрытий лесовоз-

ных дорог из некондиционных каменных материалов в условиях Свердловской области и Северного Урала.

На рисунке 10 представлены основные положения разработанной последовательности работ при строительстве лесовозных дорог.



Рисунок 10 – Последовательность работ при строительстве лесовозных дорог

Учитывая, что основной технологической операцией является уплотнение дорожно-строительного материала, были проведены исследования по анализу парка уплотняющих машин, наиболее распространенных на территории Свердловской области и Северного Урала. В таблице 3 представлены основные функционально-технологические параметры вибрационных катков и их обобщенные показатели.

Таблица 3 – Функционально-технологические параметры уплотняющей техники, применяемой в строительстве лесовозных дорог на территории Свердловской области

Вид производства работ	Статическая линейная нагрузка на валец, кН/м	Масса катка, т	Уплотняющая способность катка, МПа	Давление в пятне контакта, с учетом динамической нагрузки, P_0 , МПа	Индекс уплотняющей способности виброкатков J_k			
					Толщина уплотняемого слоя, см			
					8	12	15	20
Начало уплотнения	42-63	9,8 - 15,0	0,129 - 0,202	4,7-6,8	1,1-1,2	1,2-1,4	1,3-1,4	1,4-1,6
Окончание уплотнения	42-63	9,8 - 15,0	0,129 - 0,202	9,6-15,9	0,24-0,47	0,29-0,50	0,38-0,52	0,40-0,56

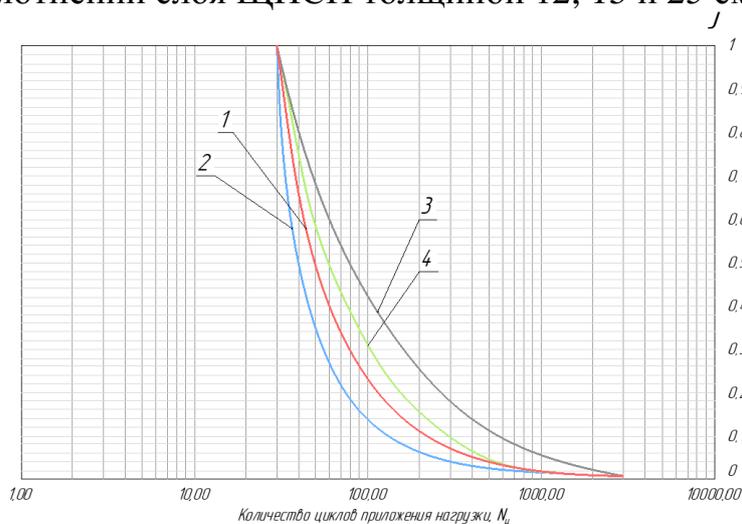
На основании проведенных опытно-экспериментальных исследований, в качестве критерия производственной эффективности использований дорожно-строительной уплотняющей техники было введено понятие – индекс уплотняющей способности виброкатка, как функционально-технологический параметр. Он учитывает степень накопления деформации в уплотняемом слое и зависит от интенсивности воздействия виброкатка на уплотняемый материал, модуля деформации уплотняемого слоя и его толщины.

Функционально-технологический параметр позволяет оценивать уплотняющие возможности виброкатка и подбирать технологию строительства лесовозных дорог. Индекс уплотняющей способности виброкатка J_k оценивается по выражению:

$$J_k = \kappa_{техн} \frac{I_6}{NC}, \quad (7)$$

где $\kappa_{техн}$ – коэффициент технологичности, учитывающий вид материала и толщину уплотняемого слоя, $\kappa_{техн} = 1,1 \dots 2,2$; I_6 – интенсивность воздействия от виброкатка на уплотняемый материал, $I_6 = n_u P_0$; NC – количество циклов нагружения на покрытие от вальца катка.

На рисунке 11 представлены зависимости изменения индекса уплотняющей способности для виброкатка Bomag, BW 154 AD-4 с рабочей массой $Q = 9,8$ т и виброкатка Дупарас СА 3000 с рабочей массой $Q = 13,8$ т при уплотнении слоя ЩПСН толщиной 12, 15 и 25 см соответственно.



1, 2 -Дупарас CF 3000, при $h = 15$ см, при $h = 25$ см;
3, 4 – Bomag BW 154, при $h = 12$ см; при $h = 25$ см;

Рисунок 11 – Индекс уплотняющей способности виброкатков

строительства щебеночных покрытий лесовозных дорог обладают грунтогравийные покрытия из вскрышных и вмещающих пород, однако их прочностные параметры существенно уступают базовому варианту из ЩПСН (динамический модуль упругости 42,2 и 49,7 МПа соответственно).

Наиболее затратным способом строительства следует считать конструкцию дорожного покрытия из качественного щебня фракции 40-70 из изверженных пород, устраиваемой по способу заклинки (удорожание от базового до 27%). В этом случае динамический модуль упругости покрытия оказался даже ниже нормативного, что характерно для кондиционных трудноуплотняемых

Установлено, что уплотняющее воздействие от виброкатка не должно превышать значение индекса более $J_k = 0,38$. В случае превышения значения индекса следует скорректировать типоразмер виброкатка, количество проходов при уплотнении или толщину уплотняемого слоя материала.

В результате технико-экономического анализа установлено, что наименьшей стоимостью

щебней. Для достижения нормативных значений необходимо использование более мощные, дорогостоящие уплотняющие средства.

Дорожные покрытия из кондиционных щебней фракции 40-80 из изверженных пород, устраиваемых по способу заклинки, так же показывают увеличение эксплуатационных затрат в сравнении с базовым вариантом.

Основные выводы и рекомендации

1. Установлено, что существующие технологии строительства лесовозных дорог с покрытиями из щебеночных материалов применяются только с использованием качественных кондиционных каменных материалов, а изменения их физико-механических свойств в процессе строительства не рассматривались.

2. Разработана математическая модель строительства лесовозных дорог с покрытиями из некондиционных щебеночных материалов, построенная на основе теории нечетких множеств и нейронечеткой сети, с учетом неопределенности физико-механических свойств материалов.

3. Расчеты показали, что наибольшие удерживающие усилия в щебеночных покрытиях лесовозных дорог достигаются при усредненном размере частиц 8,22 мм, а наименьшие, при преобладании частиц с усредненным размером частиц менее 2,23 мм.

4. Частотный анализ зерновых составов покрытий лесовозных дорог из некондиционных щебеночных материалов, показал, что при достижении среднего номинального максимального размера в диапазоне от 5 до 10 мм прочность слоя достигает наибольших значений.

5. На основе теоретических и экспериментальных исследований определены диапазоны рациональных зерновых составов покрытий лесовозных дорог из некондиционных щебеночных материалов. Установлено, что на сите 5 мм частные остатки должны соответствовать диапазону от 24 до 35%, на сите 10 мм диапазону от 12 до 18 %.

6. Установлено, что совмещение двух технологических операций уплотнения и измельчения, при строительстве щебеночных покрытий лесовозных дорог, возможно реализовать при индексе уплотняющей способности вибрационных катков в диапазоне от 0,38 МПа и ниже. В случае несоответствия функционально-технологических параметров вибрационного катка толщина уплотняемого слоя изменяется.

7. Расчетами установлено, что при строительстве покрытий лесовозных дорог из некондиционных щебеночных материалов, для повышения технологической эффективности строительства необходимо реализовать от 40 до 70 циклов приложения нагрузки на слой покрытия, что соответствует технологическим значениям от 8 до 10 проходов вибрационного катка по одному следу.

8. При строительстве лесовозных дорог из некондиционных материалов динамический модуль упругости щебеночного покрытия следует принимать равным 35 МПа и выше, при величине остаточной пустотности не более 18 %.

Список основных публикаций по теме диссертации:

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

1. Шакирзянов, Д. И. Моделирование транспортно-эксплуатационного состояния покрытий лесных дорог / И. Н. Кручинин, Д. И. Шакирзянов, В. В. Побединский // Деревообрабатывающая промышленность. – 2020. – №2. – С. 3-11.

2. Шакирзянов, Д. И. Система оценки транспортно-эксплуатационного состояния покрытий переходного типа лесных автомобильных дорог / И. Н. Кручинин, В. В. Побединский, Д. И. Шакирзянов, В. В. Данилов // Деревообрабатывающая промышленность. – 2020. – № 3. – С. 3-10.

3. Шакирзянов, Д. И. Нейронная сеть для оценки транспортно-эксплуатационного состояния лесных автомобильных дорог / В. В. Побединский, И. Н. Кручинин, М. В. Шавнина, Д. И. Шакирзянов // Деревообрабатывающая промышленность. – 2020. – № 3. – С. 10-18.

б) Scopus

4. Grigorev I, Kunickaya O, Prosuzhih A, Kruchinin I, Shakirzyanov D, Shvetsova V, Markov O, Egipko S. Efficiency improvement of forest machinery exploitation. Diagnostyka. 2020, Vol. 21, No. 2, pp. 95-109. / Scopus / DOI: 10.29354/diag/122797

в) патенты

5. Пат. № 203323 Российская Федерация, МПК E01C19/28. Валец дорожно-го катка / И. Н. Кручинин, В. В. Побединский, Д. И. Шакирзянов, А. А. Гарипова, В. В. Данилов, Е. И. Кручинина; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО УГЛТУ, RU . – № 2020139868/12(074081), заявл. 02.12.2020 г. опубл. 31.03.2021 г. бюл. №10.

г) в других изданиях и материалах конференций.

6. Шакирзянов, Д. И. Информационное обеспечение технологии строительства дорожных покрытий лесных дорог применительно к условиям Республики Коми / И. Н. Кручинин, Д. И. Шакирзянов / Цифровые технологии в лесном секторе. Материалы Всероссийской научно-технической конференции Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого – СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020. – С. 169–171.

7. Шакирзянов, Д. И. Дорожные покрытия лесных дорог из низкосортных природных песчано-гравийных смесей / И. Н. Кручинин, Д. И. Шакирзянов // Химия. Экология. Урбанистика. Материалы Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием). Том 3. г. Пермь, 23–24 апреля 2020 г. Научное издание – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2020. – С.128-132.

8. Шакирзянов, Д. И. Применение интеллектуальных систем при создании дорожно-транспортной инфраструктуры лесопромышленного комплекса / И. Н. Кручинин, Д. И. Шакирзянов, О. Н. Бурмистрова // Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы развития Европейского Севера». Секция «Технологий и транспортно-технологических машин». Научном журнале УГТУ Научном журнале УГТУ – Ухта, 25 мая 2020 г. – С. 56-60.

Просим принять участие в работе диссертационного Совета или прислать Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах с заверенными подписями по адресу: 620100, г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, 37, УГЛТУ, диссертационный совет Д.212.281.02, e-mail: d21228102@yandex.ru