

Карабутова Ирина Андреевна

**ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОКРЫТИЙ
ЛЕСОВОЗНЫХ ДОРОГ
НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ**

05.21.01 – Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург

2022

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

Научный руководитель	Побединский Владимир Викторович доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», заведующий кафедрой интеллектуальных систем
Официальные оппоненты	Бургонутдинов Альберт Масугутович доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Пермский национальный иссле- довательский политехнический университет», профессор кафедры Автомобильные дороги и мосты
	Смирнов Михаил Юрьевич доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», профессор ка- федры транспортно-технологических машин
Ведущая организация	ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет»

Защита состоится **«22» сентября 2022 г. в 14.00** 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 «___» августа 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор

Шишкина Елена Евгеньевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В соответствии со Стратегией развития лесного комплекса до 2030 года, к 2030 году вклад лесной отрасли в экономику Российской Федерации должен увеличиться до 1136 млрд. рублей, при этом особое внимание направлено на цифровизацию отрасли, внедрение современных информационных технологий, в первую очередь, искусственного интеллекта.

Эффективность лесопользования главным образом зависит от уровня развития лесотранспортной сети для обеспечения транспортной доступности расчетных лесосек и зон использования лесов. На Уральский Федеральный округ приходится около 14 % расчетной лесосеки России, однако ее использование от этого объема в 2019 году составило всего 15,9 %. Одной из причин низкого освоения является недостаточное развитие дорожной сети лесных дорог. Развитие транспортной инфраструктуры в местах концентрации большого числа лесопромышленных предприятий Свердловской области (муниципальное образование Алапаевское, Туринский и Тавдинский городской округ, городской округ Верхняя Тура) во многом определяет развитие как сырьевых районов, так и российского экспорта. Мировая практика показывает, что лесные ресурсы являются доступными, если плотность дорожной сети в лесном массиве составляет не менее 12–15 км на 1 тыс. га лесной площади. Протяженность лесных дорог в Российской Федерации на порядок ниже и, в частности, по состоянию на 2018 год средняя протяженность в Свердловской области составляла 1,46 км на 1 тыс. га лесных земель. Проблема еще больше обостряется тем, что в последнее время происходит перераспределение потоков заготавливаемой древесины с железнодорожного на автомобильные виды транспорта. При этом наблюдается тенденция использования региональных дорог для межмуниципального и межрегионального грузопотока крупногабаритного автотранспорта, используемого для перевозки лесного сырья и продукции.

На развитие и содержание дорожно-транспортной сети затрачиваются огромные средства, в том числе и в рамках национального проекта «Безопасные качественные дороги», что требует использования принципиально новых, более эффективных средств для разработки технологий строительства и стратегий эксплуатации. В профессиональной среде такое понимание сформировалось, поэтому за последние годы появились попытки использования интеллектуальных систем, нейронных сетей, но этого крайне недостаточно и говорит только об актуальности дополнительных исследований в этом направлении для создания новых методов совершенствования дорожных покрытий.

Следует отметить, что в Российскую практику в последнее время проникает много технологий, прикладного программного обеспечения зарубежного производства. Но в эпоху цифровой трансформации создание отечественного нового и более совершенного цифрового продукта дает возможность конкурировать с зарубежными материалами и технологиями и успешно решать проблему импортозамещения.

Таким образом, исследования, направленные на создание новых методов

для совершенствования покрытий лесовозных дорог с использованием интеллектуальных систем, являются чрезвычайно актуальными.

Цель исследования. Совершенствование методов проектирования, процессов строительства и эксплуатации лесовозных дорог на основе интеллектуальных систем оценки физических и эксплуатационных показателей покрытий.

Задачи исследования:

1. На основе анализа результатов работ, посвященных основным тенденциям в развитии дорожного и лесопромышленного сектора, а также цифровизации экономики, обосновать наиболее перспективный подход к совершенствованию покрытий лесовозных дорог и методов их устройства с использованием интеллектуальных систем для учета условий неопределенностей данных, в частности, к оценке основных физических и эксплуатационных показателей.

2. Провести экспериментальные исследования в лабораторных и натуральных условиях с целью получения исходных данных для разработки нейронных сетей.

3. Разработать интеллектуальную систему для оценки основного физического и эксплуатационного показателей покрытия лесовозных дорог, основанную на нейро-нечеткой сети оценки физического параметра дорожного покрытия и нейро-нечеткой сети оценки основного эксплуатационного показателя дорожных покрытий с реализацией модели интеллектуальной системы в среде *Matlab+Neuro-Fuzzy Designer*.

4. Выполнить численные экспериментальные исследования на основе интеллектуальной системы для оценки ее адекватности, выявления закономерностей влияния параметров исходных материалов на физический показатель асфальтобетона в покрытии, параметров структуры асфальтобетонной смеси, проектных, технических и технологических характеристик и эксплуатационных факторов на эксплуатационный показатель лесовозной дороги и разработать рекомендации по совершенствованию технологических процессов устройства дорожных покрытий.

5. Разработать методику проектирования покрытий лесовозных дорог с оценкой основного физического параметра и прогнозированием эксплуатационного показателя на основе интеллектуальных систем.

6. Разработать мероприятия для обеспечения внедрения результатов исследований в практику дорожного строительства с оценкой экономического эффекта.

Объект исследования: дорожная сеть лесопромышленного комплекса, включающая в себя сеть лесовозных дорог, а также участки автодорожной сети общего пользования.

Предмет исследования: закономерности влияния исходных материалов на физические параметры асфальтобетона и эксплуатационные показатели дорожного покрытия, и их оценка с помощью интеллектуальных систем.

Работа выполнялась в соответствии с положениями следующих документов, утвержденных на правительственном уровне:

- Стратегией развития лесного комплекса Российской Федерации на период до 2030 года (распоряжение Правительства РФ от 11.02.2021 №312-р);
- Стратегией развития инновационной деятельности в области дорожного хозяйства на период 2021–2025 годы (распоряжение Росавтодора от 03.03.2021 № 771-р);
- Стратегией развития информационного общества Российской Федерации на 2017–2030 годы (Указ Президента РФ от 09.05.2017 № 203);
- Национальной стратегией развития искусственного интеллекта на период до 2030 года (Указ Президента РФ от 10.10.2019 № 490).

Работа осуществлялась с учетом технического задания на разработку схемы развития и сохранности лесных дорог Свердловской области, выполненного кафедрой транспорта и дорожного строительства Инженерно-технического института УГЛТУ в рамках государственного контракта, заключенного УГЛТУ с Министерством природных ресурсов и экологии Свердловской области, от 15.10.2019 № 5-05.

Степень разработанности темы исследования. Исследованиям, направленным на совершенствование методов проектирования, строительства и эксплуатации автомобильных дорог, в том числе лесовозных, посвящены работы ученых МАДИ, СПбГЛТУ, ВГЛТУ, ВГУИТ, СФУ, УГЛТУ, ВолГАСУ, СибАДИ. Однако исследования, посвященные оценке эксплуатационных показателей асфальтобетонных покрытий с учетом физических параметров и на основе интеллектуальных систем, не проводились.

Аппарат нечеткой логики, нейронных сетей в вопросах решения прикладных задач лесного и дорожного хозяйства использовался в работах В.В. Побединского, С.И. Булдакова, И.Н. Кручинина (УГЛТУ). Кроме того, на кафедре транспорта и дорожного строительства Инженерно-технического института УГЛТУ было выполнено техническое задание на разработку схемы развития и сохранности лесных дорог Свердловской области. Целью создания схемы в соответствии с разработанным техническим заданием является обеспечение вклада лесных дорог в устойчивое экономическое развитие региона в области освоения лесов и системного освоения лесосырьевых баз.

Результаты исследований указанных авторов и государственная политика в области освоения лесов и дорожной деятельности показали необходимость и перспективность развития, совершенствования и приведения покрытий лесных дорог к техническому уровню соответствия требованиям нормативной документации и потребностям инвестиционных проектов, что может быть достигнуто преимущественно с помощью современных цифровых инструментов, в том числе интеллектуальных систем в условиях неопределенностей.

Методы исследования: теория дорожного строительства, проектирования дорожных покрытий, теория интеллектуальных систем, теория нечетких множеств, теория нейронных сетей, теория эксперимента, элементы математической статистики, теория алгоритмов и программ, теория экономического анализа.

Научная новизна работы. Научной новизной обладают следующие результаты работы:

- методика проектирования дорожных покрытий лесовозных дорог, а также автодорог общего пользования с усовершенствованным покрытием, позволяющая определять основные физические параметры и прогнозировать эксплуатационные показатели на основе интеллектуальных систем;

- выявленные закономерности влияния параметров исходных материалов на физические показатели асфальтобетона в покрытии, параметров структуры асфальтобетонной смеси, проектных, технических и технологических характеристик и эксплуатационных факторов на эксплуатационный показатель автодороги, полученные на основе интеллектуальной системы;

- разработанная интеллектуальная система на базе нейро-нечетких сетей для оценки эксплуатационного показателя глубины колеи покрытия лесовозной дороги с усовершенствованным покрытием из асфальтобетона с определением межремонтных сроков при эксплуатации.

Научные положения, выносимые на защиту.

- методика проектирования дорожных покрытий лесовозных дорог, а также автодорог общего пользования с усовершенствованным покрытием из асфальтобетона с оценкой основных физических и эксплуатационного показателя на основе интеллектуальных систем;

- выявленные закономерности влияния параметров исходных материалов на физические показатели асфальтобетона в покрытии, параметров структуры асфальтобетонной смеси, проектных, технических и технологических характеристик и эксплуатационных факторов на эксплуатационный показатель автодороги, полученные на основе интеллектуальной системы;

- интеллектуальная система на базе нейро-нечетких сетей для оценки эксплуатационного показателя глубины колеи покрытия лесовозной дороги с усовершенствованным покрытием с определением межремонтных сроков при эксплуатации.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем:

- методика проектирования дорожных покрытий лесовозных дорог, а также автодорог общего пользования с усовершенствованным покрытием с оценкой основных физических и эксплуатационного показателя на основе интеллектуальных систем;

- предложенные практические рекомендации совершенствования методов проектирования и процессов строительства лесовозных дорог на основе интеллектуальных систем оценки физических и эксплуатационных показателей покрытий;

- алгоритм и компьютерная программа для оценки физических и эксплуатационных показателей дорожного покрытия, которая может составить модуль российских САПР автодорог и решать проблему импортозамещения, разработанный алгоритм, позволяющий проектировать интеллектуальные системы для решения типового класса задач.

Результаты работы позволят прогнозировать эксплуатационное состояние автомобильных дорог, а также более обоснованно назначать межремонтные сроки, т.е. разрабатывать планы бюджетного финансирования и технической эксплуатации автодорог.

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 испытаний, проведенных в лабораторных и натуральных условиях, на лесовозных и автодорогах общего пользования, не противоречат известным результатам научных методов математического моделирования и подтверждаются статистическими данными по эксплуатации дорожных покрытий.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались на следующих конференциях: XIII Международной научно-технической конференции «Эффективный ответ на современные вызовы с учетом взаимодействия человека и природы, человека и технологий: социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса» (Екатеринбург, 2021); XVII Всероссийской (национальной) научно-технической конференции «Научное творчество молодежи - лесному комплексу России» (Екатеринбург, 2021), XVIII Всероссийской (национальной) научно-технической конференции «Научное творчество молодежи - лесному комплексу России» (Екатеринбург, 2022).

Публикации. Результаты исследований изложены в 7 научных публикациях [1 - 7], в том числе две статьи в журналах из перечня ВАК [1,2], два свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ [3,4].

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 разделов, общих выводов и приложений; содержит 194 страницы текста, 28 таблиц, 39 рисунков и библиографического текста из 109 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе выполнено исследование научных и производственных проблем на основе анализа работ, посвященных основным тенденциям в развитии лесопромышленного комплекса Свердловской области, дорожной отрасли и цифровизации промышленности.

Вопросами технологии устройства дорожных покрытий и повышения качества уплотнения горячих асфальтобетонных смесей на автомобильных дорогах, в том числе лесовозных, посвящены работы В.В. Бадалова, С.И. Булдакова, А.П. Васильева, Н.В. Горелышева, М.Г. Горячева, А.Ф. Зубкова, Г.Н. Кирюхина и др. Исследовательскими работами в области асфальтобетона и щебеночно-мастичного асфальтобетона занимались ученые А.М. Богоуславский, Л.Б. Гезенцвей, Н.В. Горелышев, Г.Н. Кирюхин, И.В. Королев и др., которые разработали методологическую основу теории асфальтобетона, изучали структуру и основные свойства строительного материала, разработали основные способы проектирования состава и некоторые его закономерности.

В результате обзора и анализа литературных источников выявлена наибольшая актуальность совершенствования конструкции дорожного покрытия в лесопромышленной и дорожной отраслях, в части обеспечения ровности и снижения образования колеи на автодорогах, что подтверждается положениями Стратегии развития инновационной деятельности в области дорожного хозяйства на период 2021–2025 годы. Эта же тенденция закреплена и новыми требованиями к проектированию и строительству автодорог в современных методиках объемно-функционального проектирования и системе проектирования «Евроасфальт».

Как выявлено при обзоре работ, применением теории нечеткой логики в различных задачах значительный вклад внесли российские ученые А.Н. Аверкин, Н.Г. Малышев, М.Г. Матвеев, А.Н. Мелехов, А.В. Остроух, В.В. Побединский, Д.А. Поспелов, Г.В. Рыбина, М.В. Семухин, В.Б. Силов, В.В. Круглов, Н.Г. Ярушкина. Также вопросы реализации нечетких алгоритмов, математических принципов теории нечетких множеств отражены в работах зарубежных ученых и специалистов А. Пегата, И. Мочкоржа, Т.Л. Саати. Вопросы реализации алгоритмов нечеткого вывода рассматриваются в работах Х. Ларсена, Е. Мамдани, М. Сугено, Т. Такаги, Й. Цукамото; прикладное направление - А. В. Леоненков, К. Хартманн, С.Д. Штовба.

На основе проведенного анализа была поставлена цель, сформулированы задачи и разработана общая методология исследований. Также в главе для дальнейших исследований был обоснован выбор физического параметра (содержание воздушных пустот) и эксплуатационного показателя (глубины колеи).

Во второй главе проведен первый этап экспериментальных исследований в лабораторных и полевых условиях с целью получения исходных данных для разработки нейро-нечетких сетей.

Исходной информацией для нейро-нечеткой сети является набор исходных данных для формирования обучающей выборки. Для получения этих данных проводились исследования двух видов: лабораторных и натуральных.

Лабораторные исследования выполнялись с целью определения физического параметра - значения содержания воздушных пустот, которое определяет уплотняемость асфальтобетонной смеси. При испытаниях производился подбор по процентному содержанию основных компонентов асфальтобетонной смеси, гранулометрического состава наполнителей, заполнителей, битума

и определялась выходная величина - значение содержания воздушных пустот.

Составы были подобраны с учетом актуальной нормативной документации в соответствии с ГОСТ Р 58406.10-2020. Гранулометрические составы образцов соответствовали ГОСТ 58406.1-2020.

Натурные исследования проводились для определения эксплуатационных показателей в реальных конструкциях дорожных покрытий. Была проанализирована проектная и исполнительная документация, проведены лабораторные исследования по определению содержания воздушных пустот, второго эксплуатационного показателя истираемости асфальтобетона, принятого в качестве входного параметра, а также была определена глубина колеи в натуральных условиях.

В качестве образцов приняты керны-вырубки асфальтобетонного покрытия автомобильных дорог Свердловской области, которые эксплуатируются длинномерным лесовозным автотранспортом для перевозки лесоматериалов с лесосеки. Виды испытаний при экспериментальных исследованиях указаны в таблице 1.

Таблица 1 – Виды испытаний экспериментальных исследований первого этапа

Лабораторные исследования: определение физических параметров	Натурные исследования: определение эксплуатационных показателей
1. Определение зерновых составов; 2. Определение содержания воздушных пустот асфальтобетона в лабораторных образцах; 3. Определение объемной плотности асфальтобетона в лабораторных образцах; 4. Определение максимальной плотности асфальтобетонной смеси.	1. Определение содержания воздушных пустот асфальтобетона в кернах; 2. Определение объемной плотности асфальтобетона в кернах; 3. Определение максимальной плотности асфальтобетонной смеси; 4. Определение истираемости асфальтобетона.

Расчет минимального количества опытов выполнен методом итеративного приближения с учетом коэффициента вариации статистической выборки проведенных предварительно испытаний. В результате получены исходные данные для разработки нейронных сетей, которые в дальнейшем используются для формирования обучающих выборок, настройки нейронных сетей, формирования тестовой выборки и проверки сети на адекватность.

В третьей главе выполнена разработка нейро-нечетких сетей для определения физических параметров, эксплуатационных показателей асфальтобетонного покрытия и обобщенной интеллектуальной системы для проектирования дорожного покрытия.

В настоящее время наибольшую популярность получили две концепции интеллектуальных систем: нечеткие системы, основанные на базах правил, и нейронные сети. В работе использована *гибридная нейро-нечеткая сеть ANFIS (Adaptive Network Neuron Fuzzy Interference)*, которая обладает преимуществами обеих концепций.

Нейросеть реализована в среде *Matlab+Neuro-Fuzzy Designer*.

Формально задача определения содержания воздушных пустот P_a имеет вид:

$$P_a = f(LCS, MCS, FCS, B), \quad (1)$$

где LCS (*Large Crushed Stone*) – содержание щебня крупной фракции 11,2 - 16 мм, $LCS = \{Min, M, Max\}$;

MCS (*Medium Crushed Stone*) – содержание щебня средней фракции 8-11,2, $MCS = \{Min, M, Max\}$;

FCS (*Fine Crushed Stone*) – содержание щебня мелкой фракции 4-8мм или отсева, $FCS = \{Min, M, Max\}$;

B (*Bitumen*) – содержание битума, $B = \{Min, M, Max\}$.

Указанные входные параметры представлены лингвистическими переменными, для формирования которых использованы терм-множества нечетких функций принадлежности (обозначены в фигурных скобках).

Обозначение входных и выходной переменной приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Входные и выходная лингвистические переменные нейро-нечеткой сети определения содержания воздушных пустот

Наименование лингвистической переменной	Физическое значение переменных
X_1 - щебень крупной фракции, LCS	Характеризует макроструктуру асфальтобетона и образование каркаса каменного материала
X_2 - щебень средней фракции, MCS	Характеризует мезоструктуру асфальтобетона и образование каркаса каменного материала
X_3 - щебень мелкой фракции или отсев, FCS	Характеризует микроструктуру асфальтобетона и образование каменного материала
X_4 - битум, B	Характеризует влияние битумного вяжущего на уплотняемость асфальтобетонной смеси
Y_1 - содержание воздушных пустот, P_a	Характеризует степень уплотнения асфальтобетонной смеси

Структура нейронной сети для определения содержания воздушных пустот приведена на рисунке 1.

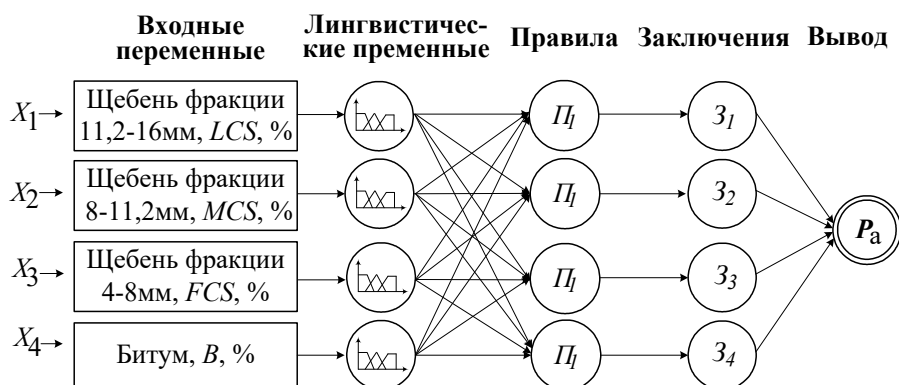


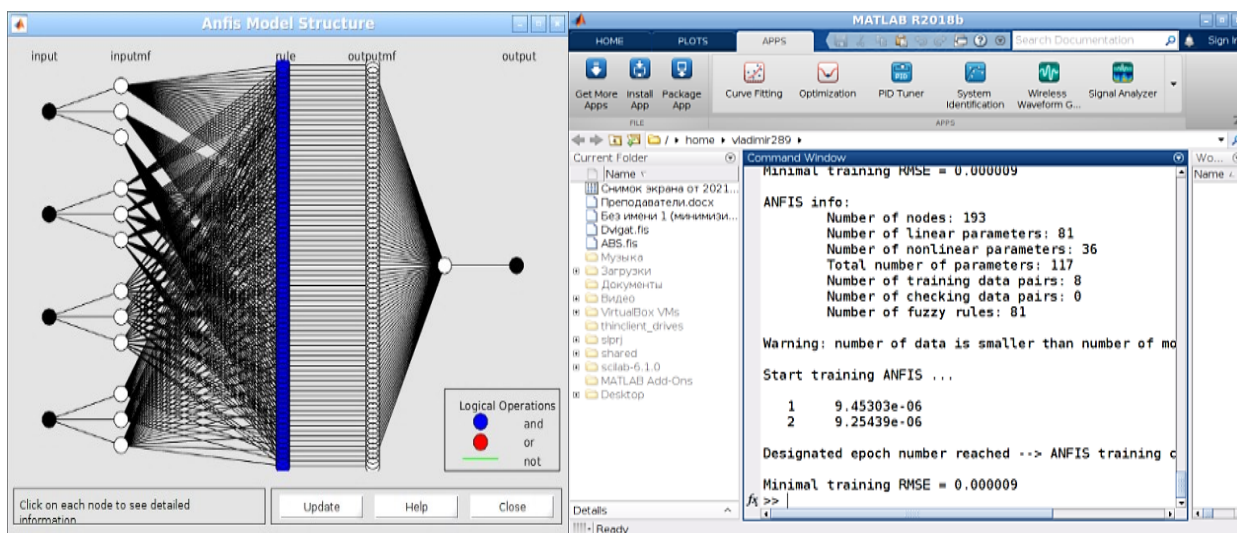
Рисунок 1 – Структура нейро-нечеткой сети определения содержания воздушных пустот

Для реализации нейронной сети использована среда *Neuro-Fuzzy Designer* приложения *Matlab*.

Работа в данном приложении включает следующие процедуры:

- загрузка данных;
- генерация структуры сети;
- обучение (настройка) нечеткой сети;
- настройка обученной сети на тестовых данных.

Результаты разработки нейросети показаны на рисунке 2.



а)

б)

а) структура нейронной сети; б) отображение процесса обучения

Рисунок 2 – Результаты разработки нейросети

Аналогично разрабатывалась нейросеть для определения эксплуатационного показателя – параметра образования колеи в процессе эксплуатации.

Формально задача определения глубины колеи K имеет вид:

$$K = f(P_a, N, E, V), \quad (2)$$

где P_a – содержание воздушных пустот, $P_a = \{Min, M, Max\}$;

N - число проходов вибротатка, $N = \{Min, M, Max\}$;

E - интенсивность движения транспорта, $E = \{Min, M, Max\}$;

V – истираемость по Праллу, $V = \{Min, M, Max\}$.

Аналогично входные параметры представлены лингвистическими переменными, для формирования которых использованы терм-множества нечетких функций принадлежности.

Обозначение входных и выходной переменной приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Входные и выходная лингвистические переменные нейро-нечеткой сети для определения глубины колеи

Наименование лингвистической переменной	Физическое значение переменных
X_1 - содержание воздушных пустот, P_a	Характеризует степень уплотнения асфальтобетонной смеси при образовании пластической колеи
X_2 - число проходов катка, N	Характеризует технологические причины пластического колеобразования
X_3 - интенсивность движения, E	Характеризует эксплуатационную составляющую колеи износа
X_4 - истираемость по Праллу, V	Характеризует истираемость асфальтобетона
Y_1 - глубина колеи, K	Характеризует ровность как эксплуатационный показатель покрытия

Структура нейронной сети для определения глубины колеи, K , показана на рисунке 3.

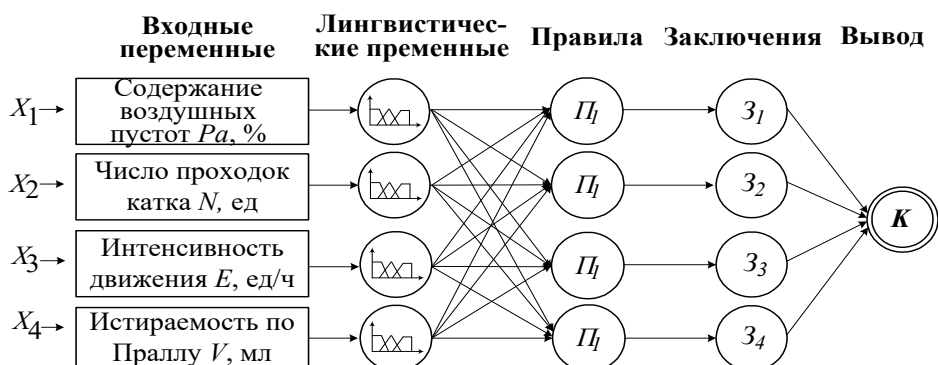


Рисунок 3 – Структура нейро-нечеткой сети определения глубины колеи

Реализация данной нейронной сети выполнена аналогично реализации нейронной сети для определения показателя содержания воздушных пустот.

Для организации более полного процесса проектирования дорожных покрытий разработана обобщенная модель интеллектуальной системы, которая объединяет все рассмотренные входные параметры и две нейронные сети. Выходная переменная первой нейронной сети является входной переменной для второй сети. Структура обобщенной модели приведена на рисунке 4.

Обобщенная модель интеллектуальной системы реализована в среде визуально-блочного имитационного моделирования *Simulink* системы *Matlab* (рисунок 5).

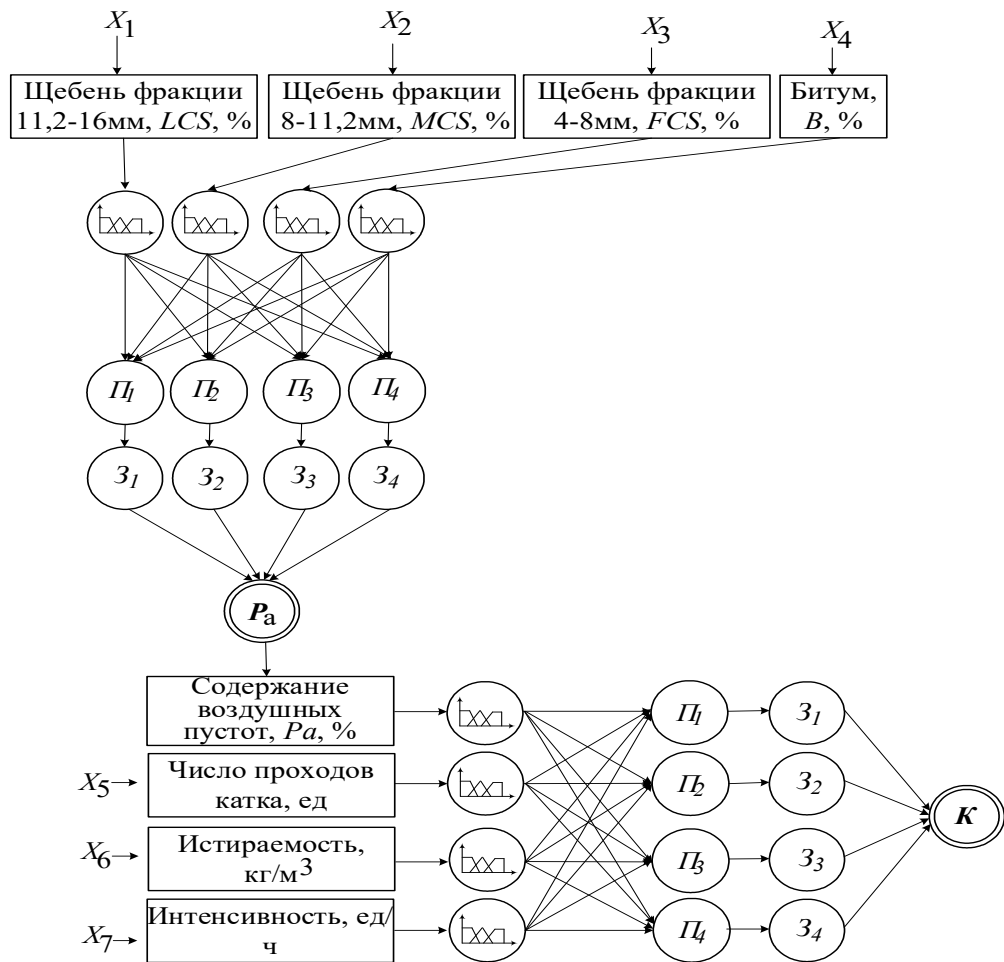


Рисунок 4 – Обобщенная модель интеллектуальной системы проектирования дорожного покрытия

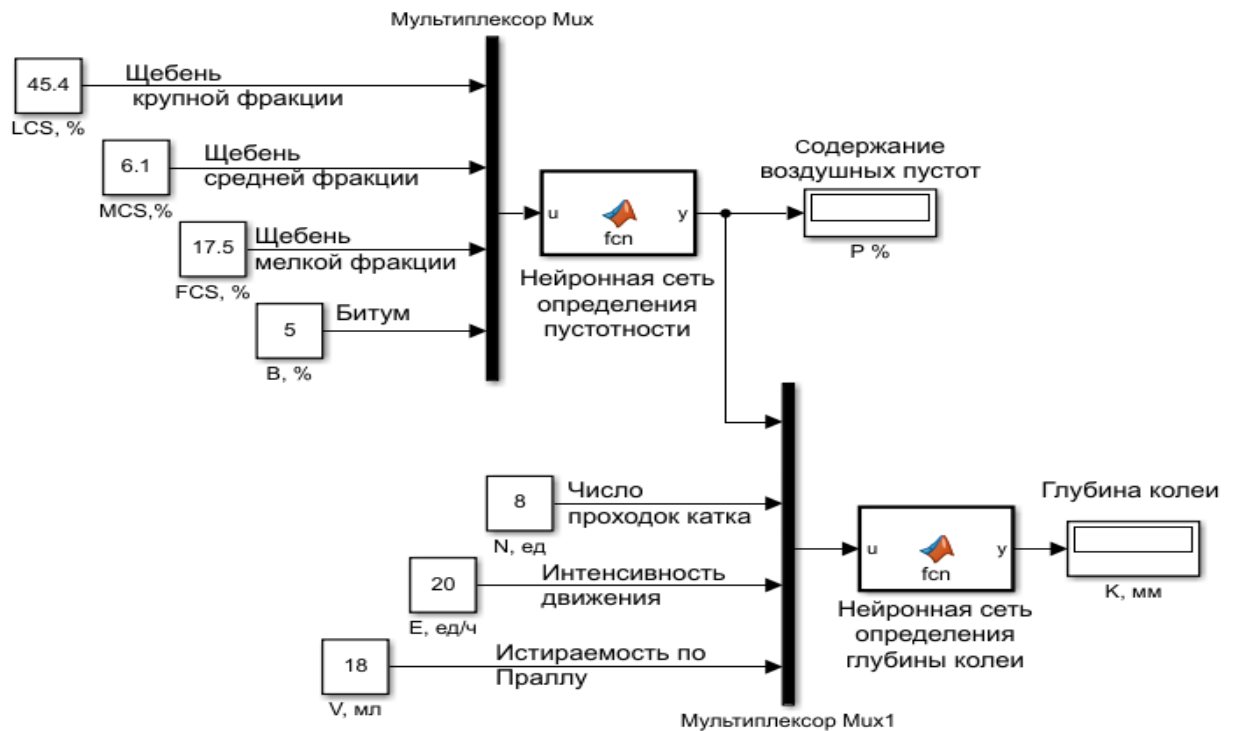
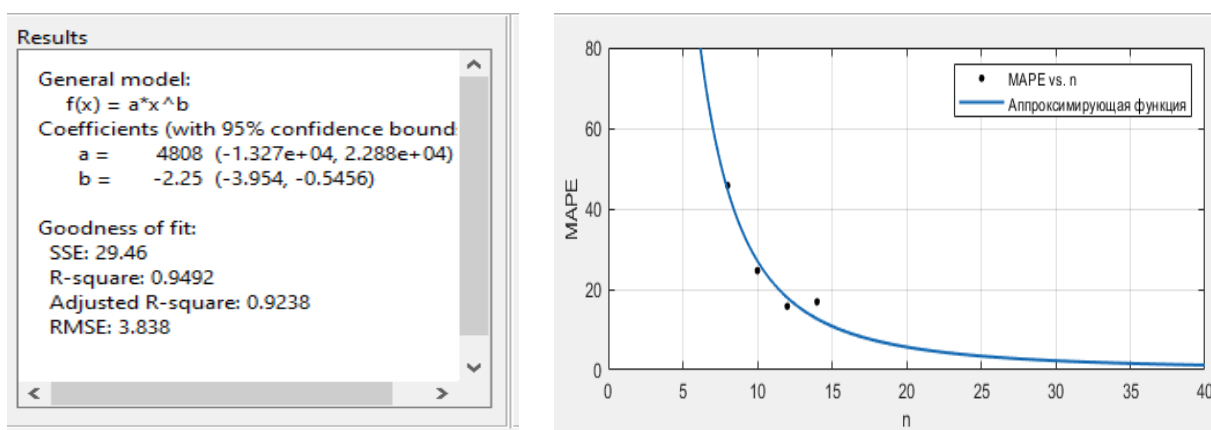


Рисунок 5 – Программа интеллектуальной системы проектирования дорожного покрытия в Simulink-формате

Четвертая глава посвящена выполнению численных экспериментов по исследованию разработанной интеллектуальной системы для определения закономерностей влияния исходных параметров, материалов на физические параметры асфальтобетона и технических, технологических и эксплуатационных параметров на эксплуатационные показатели покрытия. Также на данном этапе проведена проверка на адекватность результатов работы нейронных сетей и обобщенной модели интеллектуальной системы путем определения ошибки вычислений при сравнении с экспериментальными данными. Модель исследована на оценку величины ошибки вычислений в зависимости от числа обучающих выборок. В результате получена в приложении *Matlab* (рисунок 6) корреляционная функция зависимости ошибки модели от числа обучающих выборок.

Функция имеет вид $Y = 4808x^{-2,25}$



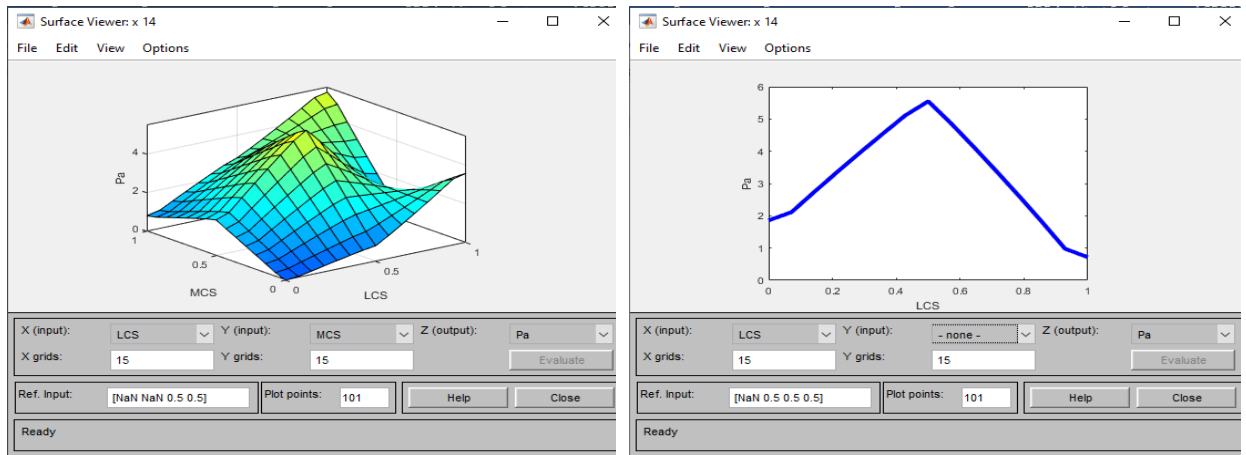
а) расчет параметров аппроксимирующей функции;

б) график функции аппроксимации $y=4808x^{-2,25}$

Рисунок 6 – Результаты аппроксимации

В результате исследований получены семейства функций в форме трехмерных и двумерных графиков, выражающие закономерности зависимостей выходных параметров от входных. На рисунке 7а представлена трехмерная зависимость переменной содержания воздушных пустот P_a от двух переменных содержания щебня крупной фракции LCS и средней фракций MCS $P_a=f(LCS; MCS)$. При этом, переменные содержание щебня мелкой фракции FCS и битума B закреплены на нормируемом значении 0,5 (абсолютные значения $FCS=21,9\%$, $B=5,05\%$).

На рисунке 7б представлен график двумерной зависимости $P_a=f(LCS)$. Для получения графика двумерной зависимости дополнительно закреплено значение переменной содержания щебня средней фракций MCS на нормируемом значении 0,5 (абсолютное значение $MCS=7,1\%$).



а)

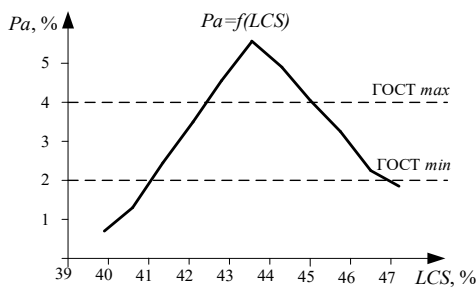
б)

а) Трехмерная зависимость содержания воздушных пустот $P_a=f(LCS; MCS)$;

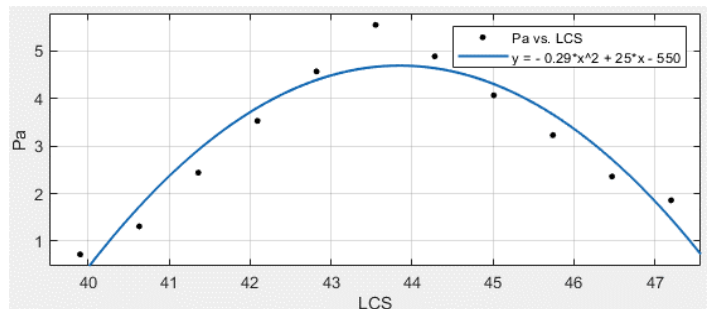
б) график функции нечеткого вывода зависимости $P_a=f(LCS)$

Рисунок 7 - Представление системы нечеткой модели в *SurfaceViewer*

На рисунке 8а приведен график зависимости содержания воздушных пустот P_a от содержания щебня крупной фракцией LCS . Установлено, что в исследуемых диапазонах соблюдаются правила упаковки зерна асфальтобетона. При абсолютных значениях $MCS=7,10\%$, $FCS=21,90\%$ и $B=5,05\%$, выполняется соответствие нормативным требованиям ГОСТ Р 58406.1 при $LCS=(41,05;42,31)$; $(45,24;46,83)\%$. При этом, аппроксимирующая функция, показанная на рисунке 8б, является полиномом второй степени – квадратичной функцией.



а)



б)

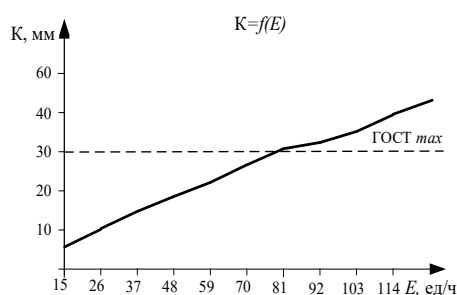
а) функциональная зависимость $P_a=f(LCS)$; б) аппроксимирующая функция

Рисунок 8 – График зависимости содержания воздушных пустот от содержания щебня крупной фракции $P_a=f(LCS)$

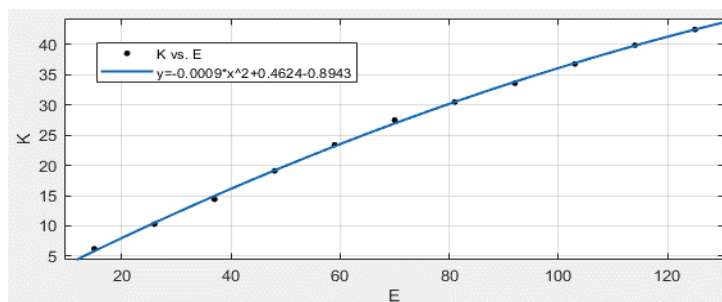
На среднем участке графика $LCS=(42,31;45,24)\%$ содержание воздушных пустот выше регламентированного ГОСТ Р 58406.1, т. к. при процентных соотношениях содержания заполнителя на указанном участке происходит раздвижка зерен, при которой образуется большее количество воздушных пустот.

На рисунке 9а приведен график зависимости глубины колеи от эксплуатационного фактора (колея износа), который иллюстрирует превышение при $P_a=3,17\%$, $N=12$ ед, $V=19,0\text{м}^3$ нормативного значения по ГОСТ 50597-2017 при

$E=(80;125)$ ед/ч. Выявлено, , износ (факторы истираемости материала, движения транспорта) имеет большее влияние на образование колеи.



а)



б)

а) функциональная зависимость $K=f(E)$; б) аппроксимирующая функция
Рисунок 9 – График зависимости глубины колеи от интенсивности движения транспорта $K=f(E)$

В пятой главе изложены предлагаемые мероприятия по внедрению результатов в практику. Разработана методика определения физических параметров и эксплуатационных показателей, которая может использоваться для решения подобных типовых задач. Методика, реализованная в алгоритме программы, включает следующие процедуры.

1. Постановка задачи;
2. Определение требуемой точности расчетов и количества обучающих выборок;
3. Формирование набора обучающих и тестовых выборок;
4. Выбор нейросетевой модели;
5. Выполнение алгоритма настройки сети;
6. Проверка адекватности настройки и работы обобщенной интеллектуальной системы;
7. Практическое использование.

Алгоритм реализован в среде *Matlab+Simulink*. Визуально-блочная модель интеллектуальной системы приведена на рисунке 5. Предложенная программа может быть использована в качестве отдельного модуля САПР современных программных средств.

Оценка экономического эффекта от внедрения результатов в практику выполнена на примере и по данным инвестиционного проекта ООО «Синергия» – «Строительство фанерного производства и ТЭЦ на древесном сырье на ООО «Синергия», где предложено для перевозки сырья использовать автомобильные дороги общего пользования регионального значения «Екатеринбург – Нижний Тагил – Серов». Сравнение полученных и нормативных данных колееобразования позволяет увеличить межремонтный период на два года эксплуатации. Такое увеличение позволит для выбранной дороги сэкономить в соответствии с указаниями нормативных документов ГОСТ 50597-2017, ГОСТ Р 58861-2020 до 50 % затрат на ремонт верхнего слоя покрытия (слоя износа), при этом экономия в расчете на 1 км покрытия составляет не менее 10,4 млн. рублей.

Основные выводы и рекомендации

1. Для освоения лесосырьевой базы решающее значение имеет развитая транспортная сеть, для которой по ряду правительственных документов предусмотрено значительное развитие. Устройство и эксплуатация дорог лесопромышленного комплекса, к которым относятся не только лесные лесовозные и лесохозяйственные автодороги, но и автодороги общего пользования, требует огромных затрат, что вызывает необходимость совершенствования дорожных покрытий на всех этапах жизненного цикла. Исследования показали, что в настоящее время самым перспективным направлением совершенствования дорожных покрытий будет использование интеллектуальных систем.

2. В работе установлено, что прогноз динамики значений важнейших физических параметров и эксплуатационных показателей дорожных покрытий из асфальтобетона на примере лесовозных постоянного действия категорий Іл, Іл типа магистраль с капитальным и облегченным типом конструкции дорожной одежды, а также участков автомобильных дорог общего пользования, которые эксплуатируются транспортом лесопромышленных предприятий, может выполняться с использованием нейро-нечетких сетей и интеллектуальных систем.

3. Для определения содержания воздушных пустот предложена нейро-нечеткая сеть, которая учитывает основные параметры смесей, технологический параметр, содержание битума и может быть использована для проектирования асфальтобетонных смесей. Для оценки эксплуатационного показателя – глубины образования колеи в процессе эксплуатации разработана нейро-нечеткая сеть, позволяющая прогнозировать состояние покрытия от наиболее влияющих параметров.

4. На базе нейронных сетей создана обобщенная интеллектуальная система для оценки основного физического и прогнозирования эксплуатационного показателей покрытия дороги с реализацией модели интеллектуальной системы в среде *Matlab+Neuro-Fuzzy Designer*

5. На основе разработанной интеллектуальной системы получены семейства функций, наглядно представленные в форме двумерных и трехмерных графиков, которые позволяют установить зависимости физического параметра от параметров, определяющих структуру асфальтобетона $P_a=f(FCS)$, $P_a=f(MCS)$, $P_a=f(LCS)$, $P_a=f(B)$; эксплуатационного параметра глубины колеи от структуры асфальтобетонной смеси, проектных, технических и технологических характеристик и эксплуатационных факторов $K=f(N)$, $K=f(E)$, $K=f(V)$, $K=f(P_a)$. Аппроксимирующие функции установленных зависимостей имеют вид квадратичной параболы.

6. Установлено, что в исследуемых диапазонах соблюдаются правила упаковки зерна асфальтобетона. В частности, при абсолютных значениях $MCS=7,10\%$, $FCS=21,90\%$ и $B=5,05\%$, выполняется соответствие нормативным требованиям при $LCS=(41,05;42,31)$; $(45,24;46,83)\%$,

при $LCS=43,55\%$, $FCS=21,90\%$, $B=5,05\%$ $MCS=(2,08;4,55)$; $(8,40;10,30)\%$,
при $LCS=43,55\%$, $MCS=7,10\%$, $B=5,05\%$ $FCS=(17,00;18,48)$; $(23,70;25,79)\%$,
при $LCS=43,55\%$, $MCS=7,10\%$, $FCS=21,90\%$ $B=(4,90;4,97)$; $(5,10;5,15)\%$.

На выбранных диапазонах изменение исследуемых параметров пластического колееобразования (содержания воздушных пустот, количества проходов катка) не приводит к превышению нормативных требований. Износ имеет большее влияние на колееобразование. Например, при абсолютных значениях $P_a=3,17\%$, $N=12$ ед, $E=70$ ед/ч колея превышает нормативную при $V=(21,0;23,0)\text{м}^3$, при $P_a=3,17\%$, $N=12$ ед, $V=19,0\text{м}^3$ $E=(80;125)$ ед/ч.

7. Точность интеллектуальной системы 95% достигается при обучении на 22 наборах исходных данных. Для обеспечения необходимой точности получена функциональная зависимость $Y=4808x^{-2,25}$, позволяющая определить количество обучающих выборок.

8. Разработана методика оценки физических параметров и эксплуатационных показателей с использованием программных средств *Matlab* с приведением алгоритма проектирования интеллектуальной системы оценки физических параметров и эксплуатационных показателей. Полученные результаты являются более универсальными, чем только для лесных дорог. На примере реального проекта автодороги общего пользования по разработанной интеллектуальной системе расчеты эксплуатационных параметров и планировании ремонта слоя износа по показателю глубины колеи показали возможность добавить два дополнительных года межремонтных сроков эксплуатации, что в соответствии с нормативными указаниями позволит для выбранной дороги сэкономить не менее 50 % затрат на ремонт слоя износа, экономия в расчете на 1 км покрытия достигнет 10, 4 млн. рублей.

9. На основе интеллектуальной системы подсчитан грузопоток лесовозной дороги по приведенной интенсивности из расчета колееобразования. В частности, максимальное значение грузопотока при $P_a=3,17\%$, $N=12$ ед, $V=19,0\text{м}^3$ составляет 16819200 м^3 , минимальное значение грузопотока 3153600 м^3 .

10. Результаты исследований и практические рекомендации внедрены в производство, что подтверждается соответствующими актами, также используются в учебном процессе.

Список основных публикаций по теме диссертации:

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

1. Побединский В.В. Интеллектуальная система определения темпа потока при проектировании дорожных покрытий / В.В. Побединский, С.И. Булдаков, И.Н. Кручинин, С.В. Ляхов, Е.С. Анастас, **И.А. Карабутова** // Деревообрабатывающая промышленность, 2021. - № 4. С. 31 - 41.

2. Побединский В.В. Нейронечеткая сеть для подбора асфальтобетонных смесей дорожных покрытий по содержанию воздушных пустот / В.В. Побединский, С.И. Булдаков, С.В. Ляхов, **И.А. Карабутова**, Е.С. Анастас // Системы. Методы. Технологии, 2022. - № 1 (53). С. 78 - 85.

б) патенты

3. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022618495, 11.05.2022. Заявка № 2022616958 от 20.04.2022 / В.В. Побединский, С.И. Булдаков, **И.А. Карабутова**.

4. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022660090, 30.05.2022. Заявка № 2022619154 от 23.05.2022 / В.В. Побединский, С.И. Булдаков, **И.А. Карабутова**.

в) в других изданиях и материалах конференций.

5. **Карабутова И.А.** Требования к технологии проведения дорожно-строительных работ / **И.А. Карабутова** // Научное творчество молодежи - лесному комплексу России: Материалы XVII Всероссийской (национальной) научно-технической конференции. Екатеринбург, 2021. С. 106 - 108.

6. **Карабутова И.А.** Определение основных параметров эффективности устройства асфальтобетонных покрытий лесовозных дорог / **И.А. Карабутова**, С.И. Булдаков // 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, 2021. С. 383 - 387.

7. **Карабутова И.А.** Применение битумных материалов в дорожном строительстве / **И.А. Карабутова**, С.И. Булдаков // Научное творчество молодежи - лесному комплексу России. Материалы XVIII Всероссийской (национальной) научно-технической конференции. Екатеринбург, 2022. С. 417 - 421.

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