

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

*На правах рукописи*

**Карабутова Ирина Андреевна**

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

05.21.01 – Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель – В.В. Побединский,  
доктор технических наук, профессор

Екатеринбург - 2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	14
1.1 Анализ обеспеченности лесов Свердловской области транспортными путями.....	17
1.2 Применение асфальтобетона на лесовозных дорогах и автодорогах общего пользования.....	23
1.3 Анализ работ, посвященных совершенствованию методов проектирования составов асфальтобетонных смесей .....	27
1.4 Анализ работ, посвященных совершенствованию технологических процессов устройства покрытий лесовозных дорог и автодорог общего пользования.....	36
1.5 Современные тенденции и проблемы использования зарубежных технологий и стандартов дорожных покрытий из асфальтобетона.....	38
1.6 Использование интеллектуальных систем в области проектирования, технологий устройства, а также эксплуатации покрытий лесовозных дорог и автодорог общего пользования.....	42
1.7 Выводы, цель и задачи исследования .....	48
1.8 Общая методология исследования .....	52
ГЛАВА 2. СБОР ИСХОДНЫХ ДАННЫХ В ЛАБОРАТОРНЫХ И НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ .....	54
2.1 Цель и задачи лабораторных и натуральных исследований.....	54
2.2 Определение физического параметра .....	56
2.2.1 Методы испытаний и средства измерения .....	57
2.2.2 Получение данных в лаборатории.....	60
2.3 Определение эксплуатационного показателя .....	62
2.3.1 Методы испытаний .....	63
2.3.2 Получение данных в натуральных условиях .....	64

2.4 Выводы по главе.....	66
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРЫТИЯ .....	67
3.1 Разработка методики исследования. Выбор и обоснование типа интеллектуальной системы .....	68
3.2 Разработка нейро-нечеткой сети для определения физического параметра асфальтобетона в покрытии .....	72
3.2.1 Постановка задачи в содержательном виде .....	72
3.2.2 Исследование основных параметров, влияющих на значение выбранного физического параметра .....	75
3.2.3 Программная реализация нейро-нечеткой сети в среде <i>Matlab</i> .....	81
3.3 Разработка нейро-нечеткой сети для определения эксплуатационного показателя .....	85
3.3.1 Постановка задачи в содержательном виде .....	85
3.3.2 Исследование основных параметров, влияющих на значение выбранного эксплуатационного показателя.....	88
3.3.3 Программная реализация нейро-нечеткой сети в среде <i>Matlab</i> .....	93
3.4 Создание обобщенной интеллектуальной системы на основе двух нейро-нечетких сетей.....	95
3.5 Выводы по главе.....	97
ГЛАВА 4. ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ.....	99
4.1 Цель, задачи и постановка численного эксперимента.....	99
4.2 Нормирование (нормализация) входных данных .....	101
4.2 Выбор и обоснование критерия адекватности настроенной нейронной сети (интеллектуальной системы) .....	103
4.4 Выполнение численных экспериментов по исследованию интеллектуальной системы .....	105

4.4.1 Проверка адекватности работы нейро-нечеткой сети определения содержания воздушных пустот.....	105
4.4.2 Проверка адекватности работы нейро-нечеткой сети определения глубины колеи.....	109
4.4.3 Проверка адекватности работы обобщенной интеллектуальной системы.....	111
4.5 Определение зависимостей выходного параметра от входных .....	113
4.6 Выводы по главе.....	121
<b>ГЛАВА 5. ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ.....</b>	<b>124</b>
5.1 Практическое применение результатов исследований в дорожной и лесохозяйственной отрасли.....	124
5.2 Разработка методики проектирования (общей схемы проектирования)	
5.2.1 Постановка задачи .....	130
5.2.2 Формирование набора обучающих и тестовых выборок.....	131
5.2.3 Выбор нейросетевой модели (топологии сети) .....	132
5.2.4 Выполнение алгоритма настройки сети .....	133
5.2.5 Проверка адекватности настройки сети .....	134
5.2.6 Практическое использование.....	134
5.3 Разработка алгоритма проектирования интеллектуальной системы...	135
5.4 Расчет экономического эффекта от внедрения результатов исследования.....	136
5.5 Расчет грузопотока лесовозной дороги. ....	143
5.6 Выводы по главе.....	143
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>145</b>
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....</b>	<b>148</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А .....</b>	<b>163</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....</b>	<b>179</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В .....</b>	<b>183</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....</b>	<b>186</b>

ПРИЛОЖЕНИЕ Д .....	191
ПРИЛОЖЕНИЕ Е.....	193

## ВВЕДЕНИЕ

**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.

#### **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).

**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 натурных 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, в том числе две статьи в журналах из перечня ВАК, два свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

**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.

## **ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Освоение лесных ресурсов безусловно связано с развитием лесной транспортной инфраструктуры, которая обеспечивает доступность лесных массивов и лесохозяйственных объектов и, как следствие, повышение рентабельности лесозаготовительных работ. Для решения первоочередных целей политики в области лесного хозяйства, направленных на достижение устойчивого развития лесов, обеспечивающего рост и развитие лесного сектора экономики, необходимо создавать новые сети лесных дорог постоянного действия, а также транзитные транспортные пути, по которым осуществляется межрегиональный грузопоток лесопромышленного комплекса.

В соответствии с СП 288.1325800.2016 [91] лесные дороги подразделяются на лесовозные лесные дороги и лесохозяйственные лесные дороги. Данная классификация учитывает функциональное назначение и расположение лесной дороги.

Лесовозные лесные дороги необходимы для транспортировки древесины и другой лесной продукции, полученной в результате осуществления лесохозяйственных мероприятий, перевозки специализированной техники и грузов, доставки персонала к рабочему месту, для лесохозяйственных целей.

Лесохозяйственные лесные дороги предназначены для доставки людей, лесохозяйственной и специальной техники и грузов к местам производства работ и лесным пожарам, а также для патрулирования лесных массивов.

Принципиальное отличие лесовозных и лесохозяйственных лесных дорог заключается в месте их строительства и использовании по прямому назначению – для вывозки древесины. Лесовозные дороги строят в эксплуатирующихся лесах для вывозки древесины, в то время как лесохозяйственные дороги - в защитных и резервных лесах.

В зависимости от функционального назначения лесных дорог в соответствии с нормами СП 288.1325800.2016 [91] и СП 318.1325800.2017 [92] принята классификация по категориям, представленная в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Классификация лесных дорог [91, 92]

Функциональное назначение	Грузооборот, млн т нетто/год	Категория
Лесная дорога, связывающая лесосырьевую базу с нижним лесопромышленным складом предприятия, пунктом потребления древесины или дорогой общего пользования, пересекает лесной массив и объединяет все лесные дороги в единую сеть	От 0,35 и выше	I <sub>л</sub>
Лесная дорога, связывающая лесосырьевую базу с нижним лесопромышленным складом, пунктом потребления древесины или дорогой общего пользования, пересекает лесной массив и объединяет все лесовозные дороги	От 0,14 до 0,35	II <sub>л</sub>
Лесная дорога, примыкающая к лесным дорогам категории I <sub>л</sub> или II <sub>л</sub>	Менее 0,14	III <sub>л</sub>
Лесные дороги, предназначенные: - для доставки сельскохозяйственной и специальной техники и грузов к местам производства работ и лесным пожарам; - осуществления рекреационной деятельности; - вывозки лесохимического сырья; - подъезда к лесопитомникам; - подъезда к кордонам и егерским участкам, а также для патрулирования лесных массивов, временных дорог (сезонного действия)	Без определенного грузооборота	IV <sub>л</sub>
Примечание - Интенсивность движения зависит от типа применяемого автомобиля и грузооборота.		

Анализ грузопотоков лесопромышленного комплекса показывает, что происходит их перераспределение с железнодорожного на автомобильные виды транспорта [86, 90]. На лесных дорогах, предназначенных для вывозки заготовленной древесины, основным транспортным средством для вывозки лесоматериалов являются лесовозные автопоезда, составляющие до 80% интенсивности движения, доставка персонала, специальных материалов к

месту работы осуществляется автомобилями общего назначения. Для этих целей больше всего подходят автодороги с усовершенствованным покрытием.

Область применения и типы дорожных одежд лесных дорог в соответствии с категорией дороги представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Типы и области применения дорожных одежд лесных дорог [91]

Тип дорожной одежды	Основной вид покрытия, материал и способ укладки	Категория дорог
Капитальные	Цементобетонные монолитные и сборные; армобетонные для дорог: монолитные, железобетонные монолитные и сборные; асфальтобетонные плотные из смесей, укладываемых в горячем состоянии, а также вышеперечисленные покрытия, армированные геосинтетическими материалами	I <sub>л</sub> , II <sub>л</sub>
Облегченные	Из выбранного щебеночного или гравийного материала, обработанного битумом в установке; из фракционированного щебня, обработанного вязким битумом в установке или методом пропитки; из щебеночной или гравийной смеси, обработанной жидким битумом методом смешения на дороге; из крупнообломочных (размером фракций до 40 мм) и песчаных грунтов, обработанных битумной эмульсией с добавкой цемента в установке с поверхностной обработкой	II <sub>л</sub>
Переходные	Из прочного фракционированного щебня, укладываемого по способу заклинки, из выбранного щебеночного и гравийного материала, из местных каменных и гравелисто-песчаных грунтов, обработанных вяжущими	III <sub>л</sub>
Низшие	Из выровненного скального или крупноблочного грунта; из грунтов, укрепленных или улучшенных различными скелетными добавками (щебнем, гравием, шлаком и другими местными материалами); из местных каменных материалов, грунтов, укрепленных местными вяжущими; грунтовые профилированные	IV <sub>л</sub>

Одним из самых дорогостоящих элементов дороги, в том числе и лесной, является конструкция дорожной одежды (40-50% и более от общей стоимости) [2]. Но этот процент оправдан, т.к. эксплуатационные характеристики автодороги, которые влияют на безопасность дорожного



движения, назначение межремонтных сроков, зависят от вида покрытия, материала и способа его устройства. Большая нагрузка от тяжелого и крупногабаритного автотранспорта вызывает достаточно быстрый износ дорожных покрытий, колееобразование и, как следствие, риски дорожно-транспортных происшествий [3], что определяет необходимость строительства и использования для вывозки древесины при грузообороте более 0,14 млн т нетто/год лесовозных автомобильных дорог категорий Іл, Іл с капитальным и облегченным типом конструкции дорожной одежды.

Принято, что схема транспортного освоения эксплуатируемых лесов включает в себя [91]:

- магистраль - грузосборочная лесная дорога постоянного действия;
- ветки - лесные дороги постоянного действия, примыкающие к грузосборочной;
- усы - лесные дороги временного действия;
- зимние лесные дороги.

## **1.1 Анализ обеспеченности лесов Свердловской области транспортными путями**

Свердловская область – один из крупнейших субъектов Российской Федерации (17-е место по площади), охватывает большую часть территории Среднего и Северного Урала. Лесистость Свердловской области составляет около 68%, что определяет производственный потенциал лесопромышленного комплекса области как высокий среди крупнейших регионов России. Распределение лесистости по субъектам Российской Федерации представлено на рисунке 1.1, по лесистости Свердловская область занимает 7-е место.



Рисунок 1.1 – Распределение лесистости по субъектам Российской Федерации [95]

Учитывая вышесказанное, в структуре земельного фонда Свердловской области наблюдается выраженное преобладание земель лесного фонда. По состоянию на 01.01.2019 площадь земель лесного фонда составляет 78% от площади всей территории Свердловской области.

По целевому назначению леса Свердловской области подразделяют на защитные и эксплуатационные. Резервные леса в Свердловской области отсутствуют. Эксплуатационные леса занимают 88% земель лесного фонда и 68% от площади Свердловской области и подлежат освоению в целях получения высококачественной древесины и других лесных ресурсов.

Освоение эксплуатационных лесов невозможно без развития транспортной сети региона. В Стратегии развития лесопромышленного комплекса Свердловской области на период до 2035 года [95] отмечена проблема разреженности дорожной сети лесоперерабатывающего комплекса.

Транспортная доступность лесов, обеспеченность транспортными путями на период действия Лесного плана Свердловской области на 2019 – 2028 годы приведена в таблице А.1 Приложения А.

Вместе с тем, при 68% лесистости Свердловской области дорожная сеть лесопромышленного комплекса региона не может быть ограничена только лесными дорогами типа магистраль, ветки, усы, зимние лесные дороги. В таком случае, дороги федерального и регионального значения общего пользования становятся неотъемлемой частью дорожной сети лесопромышленного комплекса и по определению могут быть отнесены к лесным лесовозным дорогам постоянного действия категорий Iл, IIл типа магистраль с капитальным и облегченным типом конструкции дорожной одежды, хотя не являются таковыми.

В случаях, когда предприятие использует сырье, поставляемое из других муниципальных образований, или поставляет сырье в другие регионы, при планировании дорожных работ необходимо учитывать внутрирегиональный и межрегиональный грузопотоки крупногабаритного автотранспорта, используемого для перевозки лесного сырья и продукции, осуществляемые по автодорогам как региональной, так и федеральной опорной сети [86].

Протяженность автомобильных дорог общего пользования на территории Свердловской области составляет 30835,6 км, из них: федерального значения – 588 км, регионального значения – 10 983 км, местного значения – 19 264,6 км.

На региональном уровне отсутствует территориальная комплексная схема транспортного освоения лесов, что затрудняет реализацию основных стратегий и планов развития лесного сектора как области, так и государства в целом. Кафедрой транспорта и дорожного строительства Инженерно-технического института УГЛТУ в рамках выполнения работ по государственному контракту, заключенному с Министерством природных ресурсов и экологии Свердловской области, от 15.10.2019 № 5-05 было

разработано техническое задание на разработку схемы развития и сохранности лесных дорог Свердловской области. Разработанное техническое задание представлено в Приложении А. Целью создания схемы является обеспечение вклада лесных дорог в устойчивое экономическое развитие инвестиционных проектов в области освоения лесов и системного освоения лесосырьевых баз.

Важнейшими задачами согласно разработанному техническому заданию являются формирование, развитие, совершенствование и приведение сети лесных дорог к техническому уровню соответствия техническим требованиям нормативной документации и потребностям инвестиционных проектов, что в соответствии с государственной политикой в области освоения лесов и дорожной деятельности может быть достигнуто преимущественно с помощью современных цифровых инструментов, в том числе и интеллектуальных систем [93].

В соответствии с техническим заданием размещение предприятий лесоперерабатывающего комплекса в Свердловской области тяготеет к районам добычи сырья - Алапаевское, Байкаловское, Билимбаевское, Верхотурское, Кушвинское, Режевское, Шалинское, Новолялинское, Ивдельское, Карпинское, Нижне-Тагильское, Сотринское, Талицкое, Гаринское, Серовское, Егоршинское, Невьянское, Березовское, Туринское, Синячихинское лесничества на территории Свердловской области. Карта-схема месторасположения объектов лесной и лесоперерабатывающей инфраструктуры, транспортной доступности освоения лесов Свердловской области представлена на рисунке 1.2.

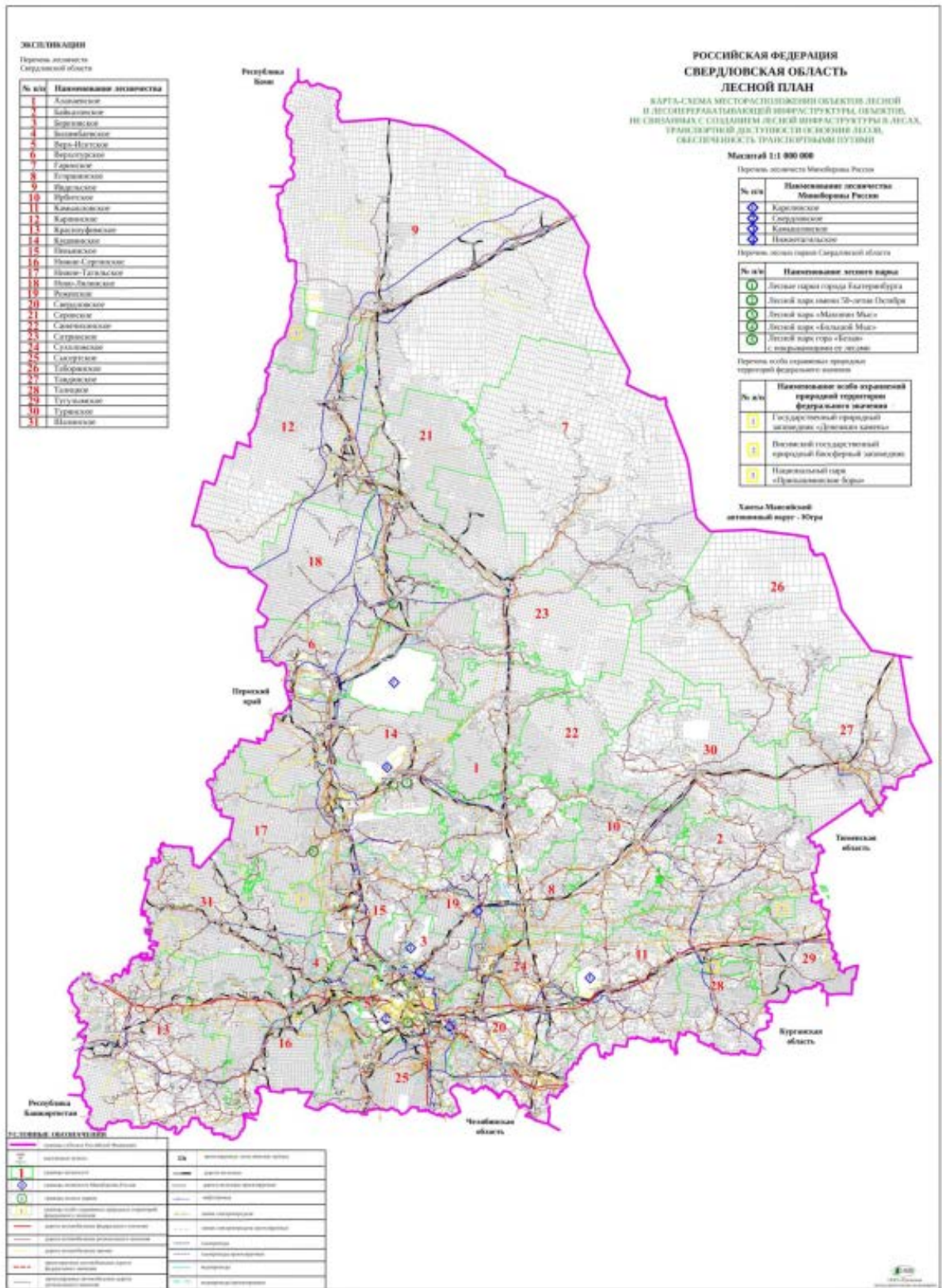


Рисунок 1.2 – Карта-схема месторасположения объектов лесной и лесоперерабатывающей инфраструктуры, транспортной доступности освоения лесов Свердловской области [50]

Исследования показали [86], что к крупным и средним предприятиям относятся: ОАО «Фанком», ЗАО «Туринский целлюлозно-бумажный завод», ООО «Холдинговая компания «Грани», ООО «Лесопромышленная компания», ООО «Тавдинский фанерный комбинат» (таблица 1.3).

Таблица 1.3 – Основные предприятия лесоперерабатывающего комплекса Свердловской области [86]

<b>Предприятие</b>	<b>Местоположение</b>	<b>Выпускаемая продукция</b>
ОАО «ФАНКОМ»	Раб. пос. Верхняя Синячиха, Алапаевский район	Фанера (188 тыс. м <sup>3</sup> )
ЗАО «Туринский целлюлозно-бумажный завод»	г. Туринск	Бумага ролевая и форматная, обои, ДВП, санитарно-гигиеническая бумага
ООО «Холдинговая компания «Грани»	г. Арамиль	Гофрокартон, гофротара
ООО «Первая лесопромышленная компания»	г. Алапаевск	Древесностружечная плита (ДСтП), пиломатериалы, столярно-строительные изделия (около 44 тыс. м <sup>3</sup> )
ООО «Тавдинский фанерный комбинат»	г. Тавда	Производственные мощности – 62 тыс. м <sup>3</sup> фанеры и 56 тыс. м <sup>3</sup> ДСтП в год

Также в перечень инвестиционных проектов, имеющих стратегическое значение для социально-экономического развития Свердловской области, на 2021–2022 годы, в соответствии с [63, 74, 75] входят два инвестиционных проекта (Проект по созданию высокотехнологичного деревообрабатывающего производства на территории Свердловской области, ООО «Синергия», Проект по созданию нового лесоперерабатывающего предприятия по производству пиломатериала экспортного качества с собственным циклом лесозаготовки на территории Свердловской области, ООО «Синергия»), реализуемых в городском округе Верхняя Тура с проектным объемом потребляемого сырья 745,398 тыс. м<sup>3</sup>/год, что требует наличия развитой транспортной сети лесовозных дорог, а также участков межмуниципальных (региональных) дорог, ввиду достаточно высокого показателя грузопотока.

Перечень приоритетных инвестиционных проектов в области освоения лесов, реализуемые на территории Свердловской области, представлен в таблице А.3 Приложения А.

Это подтверждает, что в местах концентрации большого числа лесопромышленных предприятий Свердловской области требуется наличие развитой сети лесовозных дорог, в том числе участков автодорог общего пользования, отвечающей современным требованиям к транспортно-эксплуатационным показателям и безопасности.

## **1.2 Применение асфальтобетона на лесовозных автомобильных дорогах и автодорогах общего пользования**

Для решения проблем, связанных с повышением транспортно-эксплуатационного состояния дорожных покрытий, в 2016 году в Российской Федерации был введен глобальный национальный проект «Безопасные и качественные автомобильные дороги» [62], в рамках которого перед дорожной отраслью поставлены масштабные задачи, направленные на приведение транспортной сети в нормативное состояние, повышение сроков межремонтной эксплуатации и снижение числа аварийно-опасных участков.

Успех реализации национальной программы и федеральных проектов напрямую зависит от обеспечения качества асфальтобетонных и щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей, которые являются одним из основных материалов для устройства дорожных покрытий автомобильных дорог, в том числе и лесовозных. Материалы должны отвечать современным требованиям по нагрузке на покрытие и обеспечивать высокий уровень эксплуатационных качеств дороги. Повышенные требования к эксплуатационным показателям асфальтобетонов и щебеночно-мастичных асфальтобетонов, особенно к глубине колес, требуют особого внимания.

Прогнозирование и проведение ремонтных работ имеет важнейшее значение при реализации национально проекта «Безопасные качественные

дороги», целевыми показателями которого являются такие показатели как «Доля автомобильных дорог регионального значения, соответствующих нормативным требованиям», «Удовлетворенность качеством и доступностью автомобильных дорог», «Доля государственных контрактов на осуществление дорожной деятельности в рамках нацпроекта, предусматривающих использование новых технологий и материалов, включенных в реестр новых и наилучших технологий, материалов и технологических решений повторного применения» и др.

В настоящее время все большее внимание уделяется дорожным покрытиям из асфальтобетона и щебеночно-мастичного асфальтобетона, так как они обладают улучшенными эксплуатационными свойствами, характеризуются комфортабельностью и более безопасными ездовыми качествами. Асфальтобетоны и щебеночно-мастичные асфальтобетоны могут применяться в качестве дорожных одежд капитального и облегченного типа для категорий лесовозных дорог Iд, IIд в соответствии с СП 288.1325800.2016 «Дороги лесные. Правила проектирования и строительства» [91].

Также в связи с тем, что на современном этапе отечественная нормативная база претерпевает значительные изменения, номенклатура смесей расширяется. Поэтому при стремительном росте объемов дорожного строительства, увеличении интенсивности дорожного движения необходимо учитывать актуальные современные требования производства, определить решающие факторы при выборе методов проектирования асфальтобетонных смесей, дорог и технологии устройства дорожных покрытий. Для этого необходимо провести анализ существующего положения в области строительства покрытий из асфальтобетона и щебеночно-мастичных асфальтобетонов и анализ наиболее перспективных направлений и подходов к решению поставленных задач.

Исследовательскими работами в области асфальтобетона и щебеночно-мастичных асфальтобетонов занимались ученые А.М. Богоусланский, Л.Б. Гезенцев, Н.В. Горелышев, Г.Н. Кирюхин, И.В. Королев, А.В.



Руденский, М.Г. Салихов и др., которые разработали методологическую основу теории асфальтобетона, изучали структуру и основные свойства строительного материала, разработали основные способы проектирования состава и некоторые его закономерности на таких сырьевых материалах как, щебень, дробленый песок, минеральный порошок, стабилизирующая добавка.

В работах ученых А.М. Богуславского, Л.Б. Гезенцева, Н.В. Горелышева [8-9, 17-20] приведены основные сведения об асфальтобетоне, исходных материалах, технологии производства асфальтобетонных смесей и строительства дорожных покрытий. Структура асфальтобетона зависит от многообразных факторов, в большей степени, механизмы взаимодействия компонентов асфальтобетонов и щебеночно-мастичных асфальтобетонов зависят от пористости минерального заполнителя и самого асфальтобетона, а также количества вяжущего.

Г.Н. Кирюхин и Е.А. Смирнов работают в направлении исследования и применения щебеночно-мастичного асфальтобетона в покрытии дорог, мостов и аэродромов. В работах [45-47] были рассмотрены особенности структуры щебеночно-мастичного асфальтобетона и эксплуатационные свойства дорожных покрытий на его основе, собраны сведения обо всех этапах технологии устройства покрытий из щебеночно-мастичного асфальтобетона, требования к исходным материалам, а также к проектированию составов и приготовления смесей.

М.Г. Салихов в работах [83] занимался исследованиями в области антигололедных и физико-механических свойств щебеночно-мастичных асфальтобетонов с различными добавками.

Как было отмечено ранее, из числа усовершенствованных дорожных покрытий наибольшее распространение в рамках реализации национальных проектов получили дорожные покрытия из щебеночно-мастичных асфальтобетонов. Щебеночно-мастичный асфальтобетон представляет собой отдельный вид асфальтобетона, который значительно отличается по своей

структуре и зерновому составу, что позволяет обеспечивать одновременно водонепроницаемость, сдвигоустойчивость и шероховатость верхнего слоя покрытия. Применение щебеночно-мастичных асфальтобетонов обеспечивает необходимые для слоев износа свойства [54,80], такие как:

- достаточная механическая прочность;
- сдвигоустойчивость при высоких температурах деформации, а также высокая устойчивость к упругим и пластическим деформациям;
- высокая износостойкость, ровность, простота ремонта;
- шероховатая поверхность, хорошее сцепление автомобильных шин с асфальтобетонным покрытием;
- долговечность в связи с повышенным содержанием битума.

Щебеночно-мастичные асфальтобетоны рекомендуется применять именно в верхних слоях дорожных покрытий. Это связано с тем, что структура щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси позволяет укладывать смесь тонкими слоями, соответственно, расход на квадратный метр будет значительно меньше. Поэтому щебеночно-мастичный асфальтобетон более рентабелен по сравнению с традиционными материалами для верхних слоев дорожных покрытий, хотя и содержит в своем составе более дорогие и качественные компоненты.

Щебеночно-мастичные асфальтобетонные смеси появились во второй половине 60-х годов двадцатого века в Германии и назывались «Splittmastixasphalt» (SMA) [108]. Составы были разработаны в результате исследований интенсивного разрушения дорожного покрытия и борьбы с колееобразованием в результате роста интенсивности движения большегрузного транспорта.

За рубежом щебеночно-мастичный асфальтобетон широко используется в строительстве дорог в таких странах как Германия, Франция, Норвегия, США, Китай и др. [103].

В России щебеночно-мастичные асфальтобетоны для устройства верхних слоев дорожных покрытий начали применять с 2000х годов.

Оптимальные составы впервые были регламентированы документами уровня технических условий, по которым осуществлялось опытное строительство дорожных покрытий: ТУ-5718-001-00011168-2000 (МАДИ) [103], ВТУ-2001 (Фэцит) [97]. Работа над техническими условиями основывалась на эмпирических лабораторных исследованиях, позволяющих выявить особенности структуры асфальтобетонов и определить основные требования к составу и физико-механическим свойствам материала с учетом климатических условий и нормативной базы России.

С 1 мая 2003 года был введен в действие межгосударственный стандарт ГОСТ 31015-2002 «Смеси асфальтобетонные и асфальтобетон щебеночно-мастичные. Технические условия» [21], в котором обобщены наиболее целесообразные составы и технические требования к материалам с учетом климатических условий и нормативно-технической базы России. Стандарт дает определение щебеночно-мастичного асфальтобетона как материала для устройства верхних слоев покрытий и подразделяет его на виды в зависимости от наибольшей крупности зерен щебня. Применять тот или иной вид щебеночно-мастичный асфальтобетон рекомендуется в зависимости от толщины устраиваемого слоя покрытия.

### **1.3 Анализ работ, посвященных совершенствованию методов проектирования составов асфальтобетонных смесей**

В общем случае цель проектирования асфальтобетонной смеси заключается в создании оптимальной структуры асфальтобетона с заранее заданными свойствами, которые в конечном итоге должны обеспечивать требуемые эксплуатационные характеристики устраиваемого дорожного покрытия.

Суть проектирования состава смеси состоит в выборе минеральных материалов и битумного вяжущего исходя из их физико-механических свойств, а также в определении такого соотношения компонентов, которое в

результате дает оптимальную структуру асфальтобетона с максимально плотным каркасом.

Подбор оптимального состава смеси производится в следующем порядке:

1. Осуществление входного лабораторного контроля для определения качества исходных минеральных материалов и битумного вяжущего с целью установить соответствие показателей свойств нормам действующей документации.

2. Определение такого соотношения содержания минеральных материалов (щебня, песка, минерального порошка), битумного вяжущего и стабилизирующей добавки, при котором обеспечены показатели свойств асфальтобетона, удовлетворяющие требованиям нормативной документации.

3. Техничко-экономическое сравнение вариантов подобранных составов, отработка технологии приготовления смеси на асфальтобетонном заводе и, при необходимости, корректирование состава с учетом результатов пробной укладки и испытаний проб смесей из пробных замесов в заводской смесительной установке.

При этом третий этап подбора состава, включающий результаты пробной укладки и дополнительных испытаний проб смесей замесов, является достаточно трудоемким и экономически затратным из-за издержек на дополнительные испытания, материалы и эксплуатацию техники. Как видно из приведенной схемы процесса, актуальной является задача проводить корректирование состава на втором этапе подбора асфальтобетонной смеси. Отказ от третьего этапа возможен в случае применения новых технологий, которые позволят пренебречь дополнительными лабораторными испытаниями.

Подбор состава зависит от конкретного типа и выбранного метода проектирования асфальтобетонной смеси. В практике известны следующие методы проектирования состава асфальтобетона: по прочностным показателям лабораторных образцов, испытываемых на приборах Хвима,

Смита и др., по предельным кривым плотных смесей, по остаточной пористости образцов, уплотненных и испытанных на приборах Маршалла (метод объемного проектирования), метод объемно-функционального проектирования, по объему воздушных пор и минимальному количеству битумного вяжущего в образцах, уплотненных по Проктору (метод Хаббарда-Филда) и др. [40, 54, 57]. Также возможна комбинация использования указанных методов.

Несмотря на большое количество разнообразных методов проектирования, основные принципы ориентированы на обеспечение требуемых эксплуатационных свойств асфальтобетона и долговечность устраиваемого дорожного покрытия. Выбор наилучшего состава смеси, предназначенного для устройства верхних слоев дорожных покрытий, до последнего времени связывали с повышением плотности асфальтобетона.

Основные методы проектирования, этапы приготовления, укладки и выполнения работ изложены в отраслевых методических рекомендациях по приготовлению асфальтобетонных смесей, которые носят рекомендательный характер.

Далее рассмотрены три основных метода проектирования составов асфальтобетонных смесей: метод предельных кривых, метод объемного проектирования (метод Маршалла), метод объемно-функционального проектирования (метод «*Superpave*»).

Метод подбора на основе предельных кривых был предложен Н.Н. Ивановым [41, 42]. Это наглядный способ подбора смесей, который позволяет убедиться в рациональном и правильном подборе минеральной части по графическому изображению кривой, лежащей в границах предельных кривых, отвечающих нормам ГОСТ.

В основе метода предельных кривых асфальтобетонных смесей лежат следующие принципы [73,61]:

- для обеспечения прочности, долговечности и экономичности асфальтобетона его минеральная часть должна обладать высокой

плотностью, которая достигается при определенном содержании каждой узкой фракции зерен в общем зерновом составе минеральной части;

- зерновой состав минеральной части асфальтобетона задается предельными кривыми, ограничивающими область допустимого содержания каждой фракции зерен;

- оптимальным (наилучшим) содержанием битума считается его минимальное количество, при котором физические и механические свойства асфальтобетона соответствуют техническим требованиям ГОСТ.

Состав минеральной части подбирают таким образом, чтобы кривая зернового состава располагалась в границах предельных кривых. При этом содержание битума определяется исходя из принципа заполнения битумом межзерновых пустот в уплотненной минеральной части с учетом заданной остаточной пористости асфальтобетона. Расчетное содержание битума уточняется экспериментально по данным испытаний асфальтобетона.

На рисунке 1.4 приведен пример определения гранулометрического состава смеси ЩМА-16 для устройства верхнего слоя покрытия. Проектная линия располагается в зоне, ограниченной границами кривых, установленных стандартом. При этом в используемом минеральном заполнителе основную часть составляет крупная фракция.

Минеральную часть щебеночно-мастичного асфальтобетона подбирают на основании заранее установленных зерновых составов щебня различных фракций, песка из отсева дробления и минерального порошка по предельным зерновым составам.

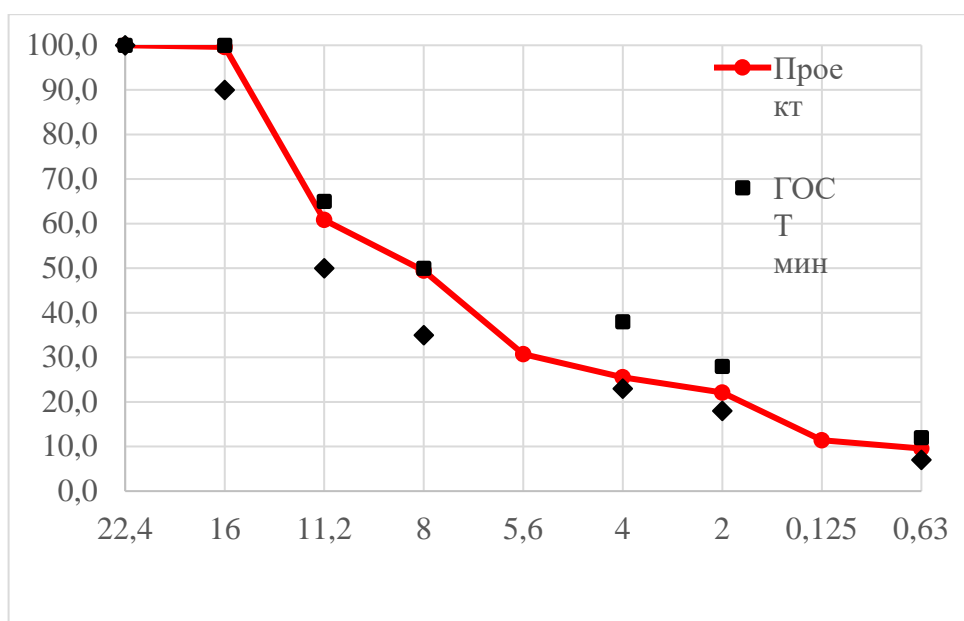


Рисунок 1.4 – Кривая зернового состава для подбора ЩМА-16

К недостаткам этого метода относят, в первую очередь, трудоемкость выполнения расчета.

Широкое распространение получил подбор состава смеси в соответствии с Методическими рекомендациями по объемному проектированию асфальтобетонных смесей по методологии Маршалла [58]. За основу данного метода принято определение объемных свойств асфальтобетона.

В соответствии с [58] определяется гранулометрический состав смеси, затем для каждого состава назначается пять разных значений содержания битума. Гранулометрический состав определяется методом предельных кривых, описанный выше.

После определения типа и вида асфальтобетонной смеси в соответствии с предъявляемыми к ней требованиями, а также эксплуатационными условиями конструктивного слоя дорожной одежды осуществляется подбор состава смеси:

1. Подбирается минеральный заполнитель по физико-механическим свойствам (по марке по дробимости, потере массы при истирании, стойкости к воздействию сульфата натрия (сульфата магния), содержанию примесей,

количеству пластинчатых и угловатых зерен, количеству дробленых зерен), по объемным свойствам (плотности, абсорбционной способности, зерновому составу).

2. В соответствии с требуемыми эксплуатационными характеристиками подбираются тип и марка битумного вяжущего.

3. Выполняется подготовка асфальтобетонной смеси, изготовление опытных образцов и проведение испытаний, необходимых для определения его физико-механических свойств.

Выбор оптимального количества битумного вяжущего для асфальтобетонной смеси осуществляется как среднеарифметический результат суммы оптимальных количеств битумного вяжущего в зависимости от соответствующих физических и эксплуатационных характеристик. При этом аналогично методу предельных кривых оптимальное количество битума должно находиться в зоне, ограниченной предельными значениями рассматриваемых характеристик (рисунок 1.5).

Для определения оптимального содержания битума по методу Маршалла подготавливаются ряд образцов (обычно пять) таким образом, чтобы кривые данных испытаний (рисунок 1.5) отражала зависимости содержания битума от различных свойств однозначно.

Согласно [58] для получения достоверных данных необходимо подготовить не менее трех образцов для каждого выбранного количества битума. Таким образом, проектирование смеси по методологии Маршалла предполагает использование пяти образцов с различным содержанием битума, а общее количество образцов – не менее 15.

Для изготовления оборудования и проведения испытаний используется специальное оборудование: уплотнитель Маршалла (с ручным или механическим молотами), установка Маршалла (компрессионное устройство для проведения испытаний, которое позволяет прикладывать нагрузку на испытуемые образцы через тестовые головки с цилиндрическим сегментом).



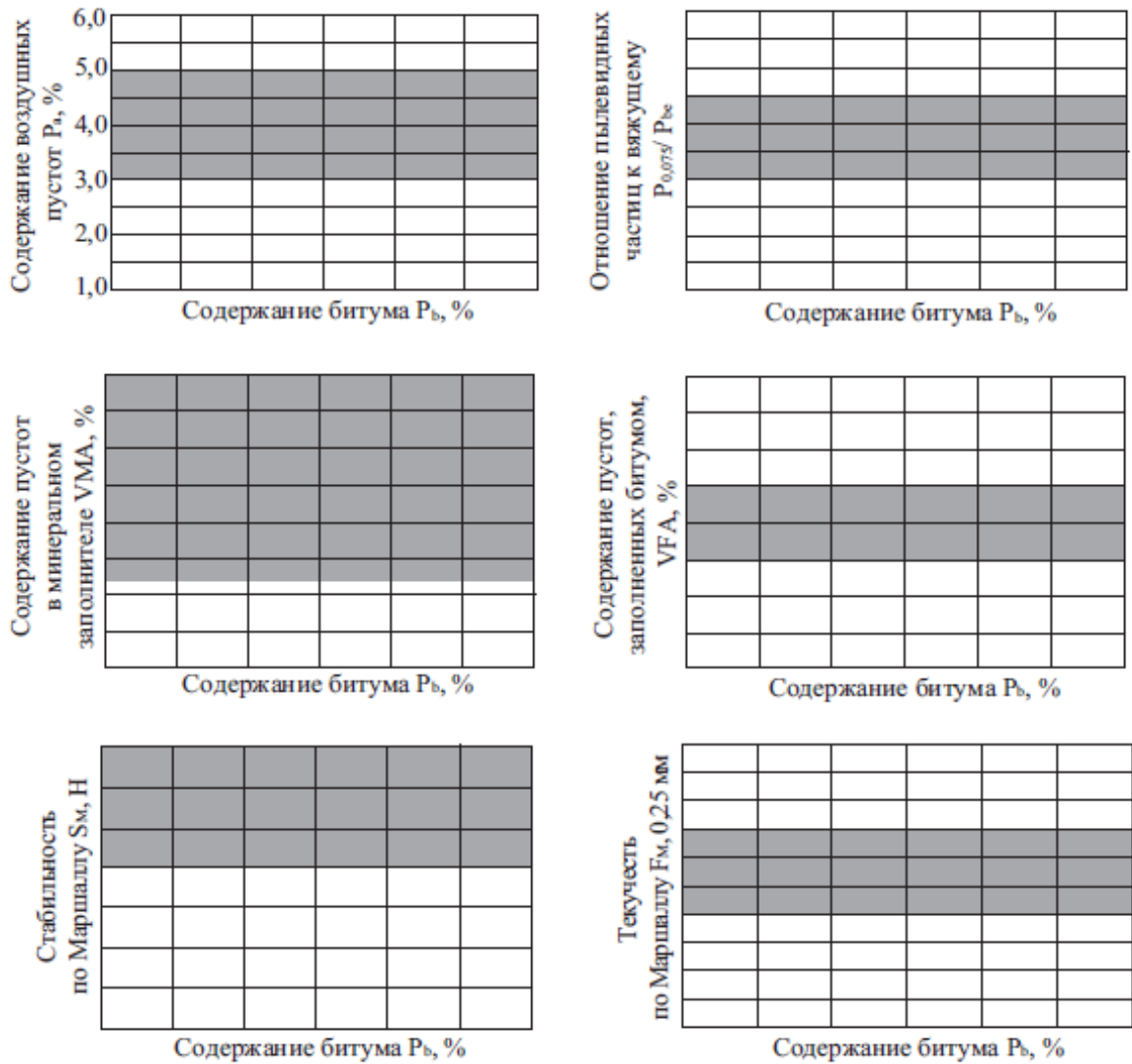


Рисунок 1.5 – Испытания битума в зависимости от различных свойств [58]

Метод объемного проектирования асфальтобетонных смесей представлен методом «*Superpave*», который использован за основу для национальных стандартов серии ГОСТ Р 58401-2019 [26-30]. Объемная система проектирования асфальтобетона и щебеночно-мастичного асфальтобетона «*Superpave*» учитывает условия движения, транспортные нагрузки и климатические условия, используя методы испытаний, повторяющие реальные воздействия на дорожное покрытие [60].

В основу правил объемно-функционального проектирования составов по системе «*Superpave*» положен американский стандарт AASHTO R 46-08 «*Standard Practice for Designing Stone Matrix Asphalt (SMA)*». В дополнение к

вышесказанному, введен в действие ГОСТ Р 58406.1-2020 [31], требования которого учитывают европейские нормы EN 13108-5 и частично нормы ГОСТ 31015-2002 [21].

Принципиальным отличием подходов объемно-функционального проектирования является использование в качестве основного показателя качества уплотнения – значения содержания воздушных пустот вместо водонасыщения. Это очень важный вопрос, т. к. затрагивает основные факторы структурообразования материала. Л.Б. Гезенцевем и Н.В. Горелышевым описаны основные отличия этих показателей [18, 19].

Остаточная пористость или содержание воздушных пустот складывается из общего объема межзерновых пространств, не заполненных битумом, и суммарного объема пор, содержащихся в минеральных материалах. Водонасыщение характеризует только поры, сообщающиеся между собой, т.е. так называемое эффективное поровое пространство.

По мнению Г.Н. Кирюхина [45-47], водонасыщение асфальтобетона является более информативным показателем, т. к. позволяет оценить содержание замкнутых и открытых пор.

Также изменился и подход к определению марки битумного вяжущего. В связи с внедрением в проектирование состава асфальтобетонных смесей новой методологии объемно-функционального проектирования «*Superpave*» вводится новая градация классификации марок битума PG, которая учитывает температурный диапазон эксплуатации покрытия [35, 44].

При использовании метода «*Superpave*» в качестве базовой кривой уплотнения является степенная функция

Для достижения требуемых объемных показателей и эксплуатационных характеристик готового асфальтобетонного покрытия при проектировании по методике «*Superpave*» необходимо очень внимательно прорабатывать вопросы структурообразования материала. Для этого технологи обращаются к методу, основанному на эмпирических исследованиях - методу Бейли.

Метод Бэйли был разработан Робертом Д. Бэйли в США в начале 1980х. В центре внимания метода Бэйли находится понятие упаковка зерна заполнителя. Для определения данного понятия необходимо понимать какие частицы образуют структуру зернового состава и какие заполняют пустоты, созданные в этой структуре.

При проектировании составов по методу «*Superpave*» на кривой зернового состава можно выделить три участка, соответствующих макроструктуре (щебень), мезоструктуре (крупный песок) и микроструктуре (мелкий песок и минеральный порошок). Сущность метода заключается в создании каркаса из щебня и заполнения пустот между зернами, таким образом, чтобы достичь оптимальной упаковки зерен [105, 109].

В конечном счете, метод Бейли позволяет технологу выбрать каркас заполнителя, который будет более устойчив к постоянной деформации, и отрегулировать содержание воздушных пустот и пустот в минеральном заполнителе, изменив упаковку зерна для обеспечения достаточного количества асфальтового вяжущего.

Основным преимуществом метода Бейли является установленная взаимосвязь между структурой асфальтобетона и технологическими свойствами асфальтобетонной смеси. Для оценки технологических свойств асфальтобетонной смеси вводятся такие показатели как  $CA$ ,  $FA_c$  и  $FA_f$ , характеризующие макро-, микро- и мезоструктуру. В общем виде показатели вычисляется как отношение содержаний мелкого и крупного щебня.

В результате по данным, полученным эмпирически, выявлено, что при высоком значении показателя  $CA$ , характеризующем щебеночную часть, смесь становится трудноуплотнимой, а при низком – неустойчивой к сегрегации. Показатель  $FA_c$ , отвечающий за заполнение межзернового пространства крупным песком, характеризует плотность асфальтобетона и его хрупкость. Показатель  $FA_f$ , характеризующий микроструктуру, представленную мелким песком и минеральным порошком. В зависимости от показателя  $FA_f$  технологические свойства асфальтобетонной смеси

изменяются примерно так же, как и от показателя  $FA_f$ . Слишком малые величины показателя  $FA_f$  обычно характерны для трудно уплотняемых смесей, а чрезмерно большие значения не желательны по причине образования волосяных трещин и повышения жесткости асфальтобетона.

Эти зависимости, приведенные в [105, 109], подтверждают тот факт, что не только физические, эксплуатационные, но и технологические свойства процессов уплотнения асфальтобетонных смесей зависят от зернового состава минеральной части.

#### **1.4 Анализ работ, посвященных совершенствованию технологических процессов устройства покрытий лесовозных автодорог и автодорог общего пользования**

Вопросами устройства дорожных покрытий и повышения качества уплотнения горячих асфальтобетонных смесей и щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей посвящены работы В.В. Бадалова, С.И. Булдакова, А.П. Васильева, Н.В. Горелышева, М.Г. Горячева, А.Ф. Зубкова, Г.Н. Кирюхина, Э.В. Котлярского, В.П. Подольского и др. В работах [1, 6, 10-12, 15-16, 18-20, 39, 45-47, 71] изложены этапы развития и совершенствования сети автомобильных дорог России и технологии их строительства. Особое внимание было уделено вопросам технологии и организации работ по строительству дорожных одежд автомобильных дорог. Большое внимание уделено новым дорожно-строительным материалам, технологиям и методам организации и обеспечения качества дорожно-строительных работ.

Особую роль в развитии транспортной сети играет сеть лесных лесовозных и лесохозяйственных дорог России. В Работы С.И. Булдакова [10-11] освещены вопросы проектирования, строительства и эксплуатации лесовозных автомобильных дорог. Приведены обоснования технических условий проектирования автомобильных дорог. Подробно рассмотрены

вопросы организации и технологии строительства дорог, выполнения тягово-эксплуатационных расчетов и организации вывозки леса.

С технологической точки зрения важнейшую роль играет процесс уплотнения асфальтобетонной смеси, т.к. именно на этом этапе происходит структурообразование – формируется структура асфальтобетона, характеризующая требуемые физические показатели (плотность, пористость, водонепроницаемость), влияющие на эксплуатационные показатели покрытия (глубина колеи, трещиностойкость, изностойкость).

На этапе уплотнения за счет силового воздействия рабочего органа уплотняющего катка происходит перемещение частиц материала относительно друг друга, вытесняется защемленный воздух, возникают новые контакты между частицами материала и происходит перераспределение свободного битума в зонах контакта.

За счет сближения частиц материала между собой повышается плотность смеси, которая пропорциональна росту уплотняющей нагрузки. С повышением плотности горячей смеси на перемещение минеральных частиц оказывает влияние прочность битумных пленок в зоне контакта, что требует повышения уплотняющей нагрузки. Плотность характеризует деформативные, прочностные свойства, структуру асфальтобетона и его долговечность.

В связи с вытеснением объемного битума из зон контакта частиц материала и повышением прочности битумных пленок процесс деформирования прекращается. При дальнейшем понижении температуры горячего асфальтобетона за счет увеличения вязкости битума происходит возрастание связей между частицами материала, и прочность асфальтобетона повышается.

Уплотнение асфальтобетона – один из важнейших структурообразующих факторов. После уплотнения асфальтобетонной смеси значительно повышается ее объемная масса, покрытие приобретает необходимую плотность, прочность и водоустойчивость. От степени

уплотнения зависят важнейшие эксплуатационные свойства асфальтобетонных покрытий. В соответствии с требованиями нормативной документации качество уплотнения щебеночно-мастичного асфальтобетонного слоя определяют по содержанию воздушных пустот  $P_a$  в лабораторных образцах и кернах – образцах-вырубках.

### **1.5 Современные тенденции и проблемы использования зарубежных технологий и стандартов дорожных покрытий из асфальтобетона**

В настоящее время в Российской Федерации происходит переход на новые технические условия и методы проектирования. В рамках внедрения новой методологии были разработаны и впервые введены в действие в 2016 году предварительные национальные стандарты на асфальтобетон ПНСТ 183-2016 [65] и ПНСТ 184-2016 [66]. Предварительные национальные стандарты основаны на межгосударственных стандартах, устанавливающих требования к битуму, щебню, песку и минеральному порошку. Затем ПНСТ были актуализированы в ГОСТ Р новых серий, в связи с тем, что срок действия первых ПНСТ завершился (рисунок 1.3).

Фонд нормативно-технической документации на дорожный асфальтобетон пересматривается, разрабатываются стандарты новых серий. Определено два основных направления развития новых методов проектирования: система с использованием методики объемно-функционального проектирования «*Superpave*» [27] и специализированная система проектирования «Евроасфальт» [32]. Для каждой из систем проектирования предусмотрены собственные нормативные документы, представленные на рисунке 1.6, которые регламентируют регулирование и технологическое сопровождение получаемых асфальтобетонов.

### Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон

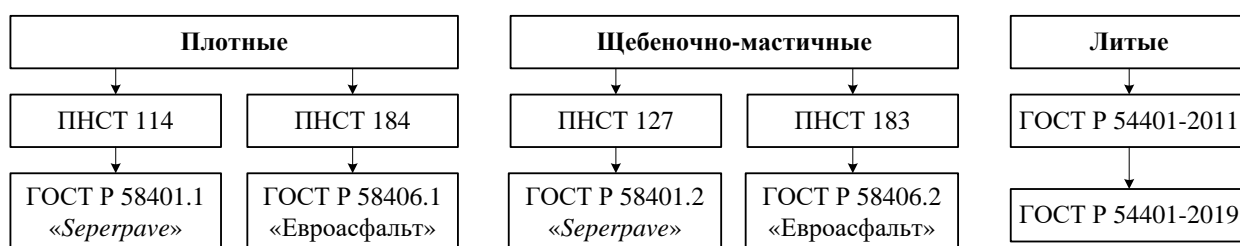


Рисунок 1.6 – Системы проектирования

Система объемно-функционального проектирования *Superpave* позволяет решить основные проблемы дорожного покрытия – пластические деформации, низкотемпературное и усталостное трещинообразование. Для проектирования составов асфальтобетонов приняты основные принципы объемного проектирования состава смеси с контролем таких показателей, как содержание воздушных пустот, пустоты в минеральном заполнителе (ПМЗ) и пустоты, наполненные битумным вяжущим [60].

В соответствии с вышеизложенным на данном этапе сложилась такая ситуация, что в дорожном хозяйстве действуют три нормативных системы асфальтобетона: постсоветская система Госстроя, «*Superpave*», «Евроасфальт».

В таблице 1.4 приведены особенности, основные сходства и различия указанных систем проектирования асфальтов.

Уровень требований к асфальтобетонам и его основным свойствам практически не изменялся со времени введения первых нормативных документов, поэтому постсоветская система, основанная на советских ГОСТ, не отвечает современным требованиям. Это связано с тем, что принципиально поменялись главные составляющие эксплуатационного воздействия на дорожные покрытия: интенсивность движения, осевые нагрузки и скорости движения, что привело к снижению качества дорожных покрытий и межремонтного срока службы.

Таблица 1.4 – Сравнительный анализ особенностей систем проектирования асфальтобетона

Основные параметры	ГОСТ 31015, ГОСТ 9128	«Евроасфальт» ГОСТ Р 58406.1, ГОСТ Р 58406.2	«Superpave» ГОСТ Р 58401.1, ГОСТ Р 58401.2
Классификация минерального материала	Сита с круглыми отверстиями	Сита с квадратными отверстиями	Сита с квадратными отверстиями
Тип и марка битумного вяжущего	По условным вязкостям	По условным вязкостям; по PG-характеристике, основанной на физических вязкостях	По PG-характеристике, основанной на физических вязкостях
Контроль качества уплотнения	Коэффициент уплотнения, водонасыщение	Содержание воздушных пустот	Содержание воздушных пустот
Имитационные лабораторные испытания асфальтобетона при подборе состава: колееобразование, истираемость, усталостная прочность	Не предусмотрены	Предусмотрены частично	Предусмотрен полный комплекс испытаний

Также наравне с увеличением эксплуатационных нагрузок постсоветская система не учитывает климатические факторы, которые значительно влияют на свойства асфальтобетонных покрытий. Наша страна обладает уникальным географическим положением, занимает северную часть Азии и восточную часть Европы. В различных климатических условиях асфальтобетонное покрытие из-за содержащегося в нем битумного вяжущего не будет обладать одними и теми же техническими характеристиками при одинаковых исходных данных.

По старой методологии мерой уплотнения асфальтобетона является коэффициент уплотнения. Но как показывает практика, использование данного показателя для оценивания качества уплотнения приводит к переуплотнению и появлению трещин.



Если сравнивать системы между собой, очевидно, что «Евроасфальт» является промежуточным переходным этапом.

Модернизация и внедрение новых стандартов сейчас находится на начальном этапе, в этой связи необходимо пересматривать методологию проектирования и последующего устройства с прогнозированием эксплуатационных свойств.

На практике крупные подрядные организации пользуются собственными технологическими регламентами и наборами рецептов, которые в отдельных случаях могут отвечать требованиям трех систем в совокупности и обладают достаточной конкурентоспособностью. Но в общем случае для создания базы рецептов необходимо обладать достаточной эмпирической базой и данными долгосрочных мониторингов, что становится проблемой для большинства дорожных лабораторий.

Основные проблемы, связанные с внедрением систем «*Superpave*», «Евроасфальт» связаны с заменой оборудования по производству вяжущего материала, заменой оборудования по производству минеральных материалов, переоснащением дорожных лабораторий и переобучением технологов и лаборантов.

Также введение новых нормативных документов сначала в виде ПНСТ, а затем в виде ГОСТ не увязано с существующей сметной и нормативной базой. В этой связи проектные организации при подготовке сметной документации находятся в очень уязвимом положении. Отсутствие стоимости материалов по новой нормативной базе, которая применяется в проектах на строительство, реконструкцию, капитальный ремонт и ремонт автомобильных дорог приводит к тому, что расценки принимаются в соответствии с прежним государственным стандартом, что занижает фактическую стоимость работ по отношению к реальной. Это тормозит внедрение новой нормативной базы и не отражает реальной экономической картины.

## **1.6 Использование интеллектуальных систем в области проектирования, технологий устройства, а также эксплуатации асфальтобетонных покрытий лесовозных автодорог и автодорог общего пользования**

В настоящее время Российская экономика выходит на новый этап развития, называемый «Индустрия 4.0» или четвертая промышленная революция [55]. Данный этап подразумевает переход к производству, основанному на массовом внедрении информационных технологий в промышленность, автоматизации бизнес-процессов, распространении искусственного интеллекта и общей цифровизации важнейших отраслей производства.

Дорожное хозяйство является одной из крупнейших отраслей материального производства, создает условия для беспрепятственного и безопасного проезда автомобильного транспорта по автомобильным дорогам при перевозке грузов и пассажиров. Поэтому Стратегия развития инновационной деятельности в области дорожного хозяйства на период 2021 – 2025 годы [93] в соответствии с происходящей во всей отечественной экономике цифровой трансформацией предполагает создание условий для осуществления цифровизации дорожной отрасли.

Традиционное решение задач повышения качества дорожного покрытия заключается в создании упрощенной модели технологического процесса. Процесс устройства слоя покрытия включает такие основные этапы как проектирование, изготовление смеси, транспортировка материала, подготовка основания, укладка слоя и его уплотнение. Очевидно, прогнозирование также и эксплуатационных свойств покрытий должно учитывать все указанные процессы и процедуры, что является чрезвычайно сложной задачей из-за большого количества параметров, при этом, как правило, взаимовлияющих друг на друга. Поэтому возникает необходимость обратиться к новым современным математическим методам, которые могут позволить решать задачу поэтапно: от работы в лаборатории до получения

готового слоя покрытия с учетом неопределенности изменяющихся свойств исходных материалов, физических и эксплуатационных параметров исследуемых покрытий.

Современными методами цифровой трансформации являются такие методы как машинное и глубокое обучение, большие данные, интеллектуальные системы, имитационные технологии, BIM-моделирование и др.

Под интеллектуальной системой понимают техническую или программную систему, решающую задачи, в которых исходными данными являются образные, числовые или лингвистические переменные, в которых логическая обработка информации преобладает над вычислительной, т.е. задача решается на основе данных и логических правил.

В результате объединения различных технологий искусственного интеллекта Лотфи Заде ввел понятие «мягкие вычисления» (*soft computing*) для принятия технических, технологических и управленческих решений в сложных системах. Мягкие вычисления учитывают неточность и неопределенность окружающего мира и различных факторов его влияния. Мягкие вычисления объединяют такие направления как искусственные нейронные сети, нечеткая логика, эволюционные алгоритмы и вероятностные рассуждения. Они используются в различных комбинациях, в которых происходит взаимное усиление достоинств систем и нивелирование недостатков, что позволяет более эффективно решать поставленные задачи.

Для решения поставленных производственных задач рациональнее всего использовать математические модели в виде искусственных нейронных сетей (глубокое обучение). От стандартных алгоритмов их отличает то, что они обучаются или настраиваются, что позволяет решать многие проблемы, связанные с большим количеством взаимовлияющих исходных данных.

Сейчас на федеральном уровне активно обсуждается внедрение информационного моделирования в дорожное хозяйство. В соответствии со Стратегией развития инновационной деятельности в области дорожного

хозяйства на период 2021 – 2025 годы определены приоритетные направления инновационного развития, одним из которых становится цифровизация дорожной отрасли [93].

В данном контексте применение искусственных нейронных сетей и интеллектуальных систем становится одним из перспективных направлений, т.к. отвечает основным принципам инновационной деятельности в рамках стратегий и планов развития:

1. Выбор параметров интеллектуальной модели в виде нейронной сети основывается на анализе различных факторов: климатических, ресурсных, экономических, технических, физических и др. В таком случае обеспечивается индивидуальный подход к решению задачи.

2. Несмотря на ограниченность задачи и заданные диапазоны параметров сам подход интеллектуальных систем и глубокого обучения методом нейронных сетей может использоваться практически в любом направлении дорожной отрасли, в том числе при проектировании составов асфальтобетонной смеси, а также прогнозирования эксплуатационных свойств готового покрытия.

3. Методология внедрения технологии интеллектуальных систем позволит провести гармонизацию существующих стандартов в единую нормативную методику, а также создать общедоступный информационный ресурс для получения корректных данных по различным расчетным методикам и подходам.

4. Цифровые продукты доступны для всех участников, вовлеченных в технологические процессы строительства, реконструкции, капитального ремонта, ремонта и содержания дорожных асфальтобетонных покрытий: от технического заказчика до исполнителя – подрядных и субподрядных организаций, а также технолога в лаборатории.

5. Учитывается этапность технологического процесса, т.к. сложный и многоуровневый процесс раскладывается на отдельные задачи.

6. В общем случае экономический эффект обусловлен увеличением межремонтных сроков эксплуатации дорожных асфальтобетонных покрытий. Удобство использования данных при решении эксплуатационных, ремонтных и иных задач позволит достичь определенной экономической выгоды, т.к. исследуются вопросы повышения качества покрытия и его технических характеристик.

Использование интеллектуальных систем и нейронных сетей может быть эффективным методом планирования работ при строительстве, реконструкции и ремонте автомобильных дорог, т. к. позволяет оценить физические параметры и эксплуатационные показатели дорожных покрытий на начальных этапах работы. Глобальная цифровизация, затрагивающая в том числе и лесную и дорожно-строительную отрасль, предполагает новые подходы к производству, основанные на массовом внедрении информационных технологий в промышленность.

Одним из перспективных направлений является получение цифрового двойника (*digital twin*). Цифровой двойник – это виртуальный аналог объекта или процесса, способный в различных условиях воспроизводить их основные свойства, закономерности и механизмы. Использование цифровых двойников позволяет эффективно планировать дорожную деятельность, создавать новые объекты и эксплуатировать существующие дороги. При этом, информация об объектах дорожно-транспортной сети доступна для заказчика, проектировщика, подрядчика, технолога и пользователя в реальном времени. Цифровые двойники позволяют повысить скорость принятия решений.

Цифровой двойник может быть реализован на основе взаимодействия нескольких интеллектуальных систем. Примером цифрового двойника технологического процесса может стать цифровая лаборатория. В таком случае, создание интеллектуальных систем проектирования составов асфальтобетонных смесей может стать элементом виртуальной цифровой лаборатории.

Цифровая лаборатория наряду с концепцией «Умный город» - пример внедрения информационных технологий в привычную для человека среду [51].

Поэтому появляется возможность протестировать подобранные материалы в разных условиях, при использовании различных режимов эксплуатации, а также скорректировать проектные характеристики без использования лабораторного оборудования в реальном времени. Также большую роль внедрение цифровой лаборатории играет в управленческих процессах. Например, применение цифровой лабораторно-информационной системы U-LAB, внедренной в информационном центре ИЦ «УралНИИСтром», показало заметную эффективность [4, 5].

ООО «НИИСТРОМ» внедряется цифровая платформа для испытательных дорожных лабораторий на основе лабораторной информационной менеджмент-системы. Существование платформенного решения является элементом цифровизации, т.к. процессы управления перенесены в цифровую среду, в решении представлена глубокая реорганизация процессов на всех уровнях с использованием цифровой платформенной логики.

Создание цифровых двойников и интеллектуальных систем не может быть описано формулами классической математики. Досконально и точно описать все процессы математическими формулами – сложнейшая задача. Имея большой объем данных о работах лабораторных установок и работе, и поведении материала при эксплуатации за определенный период времени проще выявить закономерности при помощи искусственных нейронных сетей.

Одним из основателей теории нечетких множеств является Лотфи Заде, чьи открытия сыграли важную роль в современной науке и философии. Его научные теории нечетких множеств (fuzzy logic), ставшие фундаментальными, лежат в основе многих сложных технологических процессов.

Прикладным применением теории нечеткой логики путем использования интеллектуальных систем в различных управленческих и технологических процессах значительный вклад внесли российские ученые А.Н. Аверкин, Н.Г. Малышев, М.Г. Матвеев, А.Н. Мелехов, Д.А. Поспелов, В.В. Побединский, Г.В. Рыбина, М.В. Семухин, В.Б. Силов, В.В. Круглов, Н.Г. Ярушкина.

В работах [7, 48-49, 52-53, 56, 76, 81] приведены основы теории и технологии построения современных интеллектуальных систем, рассмотрены базовые понятия, определения и классификации, описываются модельные и алгоритмические основы построения компонентов, а также методы приобретения, представления и обработки знаний в интеллектуальных системах. Особое внимание уделено практическим вопросам построения прототипов систем и их компонентов и решению различных задач.

Также вопросы реализации нечетких алгоритмов математических принципов теории нечетких множеств отражены в работах зарубежных ученых и специалистов А. Пегата, И. Мочкоржа, Т.Л. Саати в работах [82, 100].

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 [49,102].

В работах А.В. Остроуха [99] рассмотрены основные современные интеллектуальные системы активной помощи водителям, применяемые на легковых автомобилях, включающие адаптивное управление головным светом, системы ночного видения, распознавания дорожных знаков, предотвращения столкновений, автоматической регулировки ремней безопасности.

В дорожном секторе исследованиями процессов укладки и уплотнения асфальтобетонной смеси, занимаются ученые СФУ [76, 77]. Но при этом разработанные программы не учитывают изменения в нормативной

документации и новые требования к контролю качества процесса уплотнения, т. к. в качестве показателя принят коэффициент уплотнения, а не содержание воздушных пустот.

Также работы Д.А. Скоробогатченко (ВолгГТУ) [87-89] посвящены определению эксплуатационного состояния автомобильных дорог, при этом не рассмотрено влияние структурообразования асфальтобетона на итоговые эксплуатационные характеристики и не учитывается адаптивность подходов к новым требованиям национальных стандартов. Возможности цифровой трансформации дорожного хозяйства показаны в работе И.М. Царенковой [101].

Аппарат нечеткой логики, нейронных сетей использовался в работах В.В. Побединского, С.И. Булдакова, И.Н. Кручинина (УГЛТУ) [67-70, 84, 85]. Результаты исследований указанных авторов показали эффективность использования интеллектуальных систем в условиях неопределенностей данных и перспективность их для дальнейшего совершенствования дорожных покрытий.

Аппарат интеллектуального моделирования может быть использован для принятия решений при устройстве лесных дорог. Исследования в данном направлении позволят эффективно выполнять проекты государственной важности, путем совершенствования методов проектирования и устройства лесных дорог и дорог общего пользования.

### **1.7 Выводы, цель и задачи исследований**

Анализ состояния вопроса позволяет сделать следующие **выводы**:

1. Совершенствование использования лесов Свердловской области и Российской Федерации в целом связано с транспортной доступностью расчетных лесосек и зон использования лесов. Одной из проблем недостаточного освоения лесов выявлена неразвитая сеть лесовозных автодорог вблизи лесосек и лесопромышленных предприятий. Причем



дорожная сеть лесопромышленного комплекса региона не может быть ограничена только лесными дорогами типа магистраль, ветки, усы, зимние лесные дороги. Для многолесных районов Свердловской области (высокий показатель лесистости) дороги общего пользования становятся неотъемлемой частью дорожной сети и учитываются при разработке соответствующих инвестиционных проектов.

2. Успех реализации стратегий, государственных и национальных программ, федеральных проектов в лесопромышленной и дорожной отраслях напрямую зависит от обеспечения качества покрытий лесовозных автодорог и автодорог общего пользования. Покрытия должны отвечать современным требованиям и обеспечивать высокий уровень эксплуатационных качеств дороги. Повышенные требования к эксплуатационным показателям асфальтобетонных дорожных покрытий требуют особого внимания.

3. Асфальтобетон является одним из наиболее сложных строительных материалов, в связи с тем, что при соединении исходных каменных материалов с битумом под действием уплотняющей нагрузки происходят сложные физико-механические процессы, зависящие от многочисленных факторов. Физические и эксплуатационные свойства асфальтобетона тесно связаны с его структурой, поэтому необходимо установить взаимосвязь основных свойств с определенными признаками структуры асфальтобетона. Важнейшим процессом структурообразования является процесс уплотнения асфальтобетонной смеси, который характеризуется параметром содержание воздушных пустот.

4. Одной из самых распространенных проблем, возникающих при эксплуатации автомобильных дорог, является колееобразование. Колея снижает транспортно-эксплуатационные характеристики дорожного покрытия, тем самым сказывается на качестве асфальтобетонного покрытия и его долговечности. Поскольку повышение долговечности асфальтобетонного покрытия является важнейшей задачей для дорожной отрасли, вопросы прогнозирования и предварительной оценки глубины колеи

заслуживают особого внимания. Факторы, влияющие на глубину колеи, можно разделить на проектные, эксплуатационные, технические, технологические.

5. Введение новых государственных стандартов на асфальтобетоны и щебеночно-мастичные асфальтобетоны приводит к увеличению номенклатуры асфальтобетонных смесей.

6. Сложившаяся и устоявшаяся практика определения основных характеристик асфальтобетона в дорожном покрытии связана с проведением лабораторных испытаний, получением фактических значений показателей в лабораторных условиях и проверке их на соответствие требованиям нормативной документации. В таком случае предварительная оценка динамики значений важнейших физических параметров и эксплуатационных показателей скорее всего не производится в полной мере, т. к. большое влияние оказывают условия проведения испытаний, корректность проектной документации, человеческий фактор, которые придают неопределенность задаче. Данная неопределенность может учитываться при использовании нечетких нейронных сетей и интеллектуальных систем.

7. Указанные новые подходы применения технологий искусственного интеллекта к проектированию, процессам строительства и эксплуатации автомобильных дорог, которые ложатся в основу массового внедрения информационных технологий в промышленность, являются одним из основных элементов глобальной цифровизации.

На основании выводов по обзору состояния вопроса можно сформулировать цель и определить задачи исследований.

**Целью работы** является совершенствование методов проектирования, процессов строительства и эксплуатации лесовозных дорог на основе интеллектуальных систем оценки физических и эксплуатационных параметров 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.

### **1.7 Методология исследований**

Создание интеллектуальных систем включает несколько этапов:

1. Сбор, анализ и подготовка базы данных;
2. Постановка задачи;
3. Создание интеллектуальной системы, т. е. инструментальной системы в программной среде;
4. Обучение (настройка) интеллектуальной сети;
5. Тестирование (проверка на достоверность настроенной системы).

Таким образом, предлагаемая методика включает разработку интеллектуальной системы, для построения которой в рамках рассматриваемых вопросов необходимо корректно выполнить постановку задачи, создать и структурировать базу практических данных и настроить структурные связи компонентов. В дальнейшем разработать мероприятия для обеспечения внедрения результатов исследований в практику дорожного строительства с оценкой экономического эффекта.

Схема общей методологии настоящих исследований приведена на рисунке 1.7.

В исследованиях используются 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.

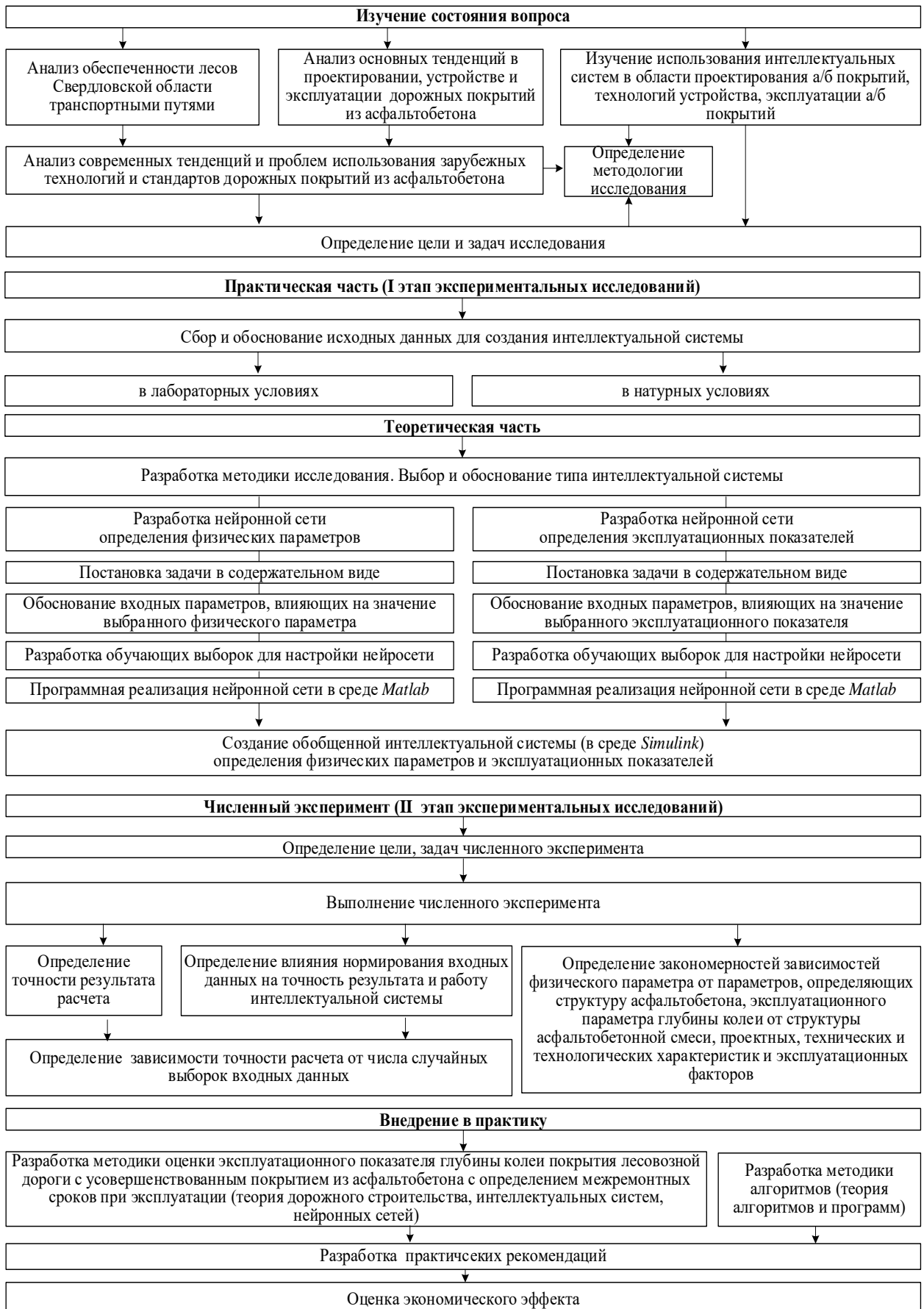


Рисунок 1.7 – Схема общей методологии исследований и применяемых научных методов

## ГЛАВА 2. СБОР ИСХОДНЫХ ДАННЫХ В ЛАБОРАТОРНЫХ И НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ

### 2.1 Цель и задачи лабораторных и натуральных исследований

Исходной информацией для нейро-нечеткой сети является набор исходных данных для формирования обучающей выборки. Исходными данными могут быть знания профессиональных экспертов, применяемые для решения сложных производственных задач, возникающих на практике. В дорожной отрасли в качестве профессиональных экспертов выступают дорожные лаборатории, подрядные организации, представители службы заказчика. Для построения систем, используется информация, накопленная и полученная экспертами и представленная в виде случайных выборок данных.

В данной задаче исходными данными являются выборки практических данных, полученных в результате проведения исследований двух видов: лабораторных и натуральных.

Выбор исходных данных для обучения сетей и их обработка являются важным и особенно ответственным этапом решения задачи. Набор используемых данных должен быть достаточно полным, не противоречивым и должен соответствовать области описания нейронной сети.

На стадии подготовки данных следует предусматривать два набора выборок – обучающую выборку и выборку тестовых данных. Принципиально две эти выборки ничем не отличаются, общий набор полученных данных делится на две части. Обучающая выборка необходима для настройки нейронных сетей и должна быть больше тестовой и не включать ее. Тестовая выборка позволяет проверить систему на адекватность.

**Цель лабораторных испытаний и натуральных исследований:** сбор исходных данных для построения нейро-нечетких сетей и интеллектуальной системы.

### **Задачи лабораторных испытаний и натурных исследований:**

1. Определить дорожно-строительные материалы, принятые к исследованию;
2. Описать методы получения значений входных данных в лабораторных и в натурных условиях и средства измерений;
3. Определить наименьшее количество опытов, используя методы математической статистики;
4. Провести сбор исходных данных в результате лабораторных испытаний и натурных исследований.

Сбор исходных данных производится в условиях, необходимых для решения конкретной поставленной задачи. В рамках проводимых исследований выполняется постановка двух задач:

1. Определение физического параметра;
2. Определение эксплуатационного показателя.

В связи с этим для получения этих данных проводились исследования двух видов: лабораторных и натурных.

Здесь под исходными данными будем понимать выборки данных, включающих входные данные для нейронной сети и соответствующее набору входных данных значение выходной переменной. Анализ литературы и литературных источников позволил выбрать входные параметры. Обоснование выбора и постановка задачи произведена в главе 3.

**Лабораторные исследования** выполнялись с целью определения физического параметра - значения содержания воздушных пустот. На данном этапе производился подбор составов асфальтобетонной смеси, определялся гранулометрический состав и процентное содержание основных компонентов смеси. Выходной величиной, которая в данной задаче определяет уплотняемость асфальтобетонной смеси, принято значение содержания воздушных пустот. Содержание воздушных пустот определено в соответствии с методикой проведения испытаний по требованиям действующей нормативной документации.

**Натурные исследования** проводились для определения эксплуатационных показателей в реальных конструкциях дорожных покрытий. В качестве эксплуатационного показателя выбран показатель глубины колеи, который был определен в натуральных условиях на автомобильных дорогах с асфальтобетонным покрытием. Была проанализирована проектная документация, проведены лабораторные исследования по определению содержания воздушных пустот, второго эксплуатационного показателя истираемости асфальтобетона, принятого в качестве входного параметра, проанализированы данные пробного уплотнения.

## 2.2 Определение физического параметра

Для определения физического параметра содержания воздушных пустот  $P_a$  были проведены исследования в сертифицированной лаборатории.

Исходной информацией для разработки нейро-нечеткой сети для оценки физического параметра содержания воздушных пустот  $P_a$  являются следующие характеристики:

- щебень крупной фракции ( $LCS$ ) – 11,2 – 16мм;
- щебень средней фракции ( $MCS$ ) - 8-11,2мм;
- щебень мелкой фракции или отсева ( $FCS$ ) - 4-8мм;
- содержание битума ( $B$ ).

Выбор марки щебеночно-мастичного асфальтобетона обусловлен необходимостью использования материалов, соответствующих требованиям ТР ТС 014/2011, в рамках национального проекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги» [62].

В процессе выбора составов щебеночно-мастичной смеси было рассмотрено несколько вариантов, состоящих из щебня различных фракций, песка, минерального порошка, битумного вяжущего и стабилизирующей добавки, взятых в различных процентных соотношениях.



Для выполнения работ были использованы минеральные материалы традиционных фракций, отобранных на производственном складе:

- щебень габбро-диабазовый фр. 11,2-16мм, фр. 8-11,2мм, фр. 4-8мм;
- песок из отсевов дробления;
- минеральный порошок;
- стабилизирующая добавка.

Выбор данных размеров фракций осуществлен в соответствии с новыми еврофракциями в соответствии с ГОСТ Р 58406.1-2020.

В качестве базового битума для приготовления асфальтобетонных смесей использован битум нефтяной дорожный вязкий марки БНД 70/100.

Составы были подобраны актуальной нормативной документации в лаборатории в соответствии с ГОСТ Р 58406.10-2020. Гранулометрические составы соответствуют ГОСТ 58406.1-2020. Кривые гранулометрических составов приведены на рисунке Б.1 Приложения Б.

Свойства исходных материалов представлены в таблицах Б.1-Б.4 Приложения Б. Подготовленные составы щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси для изготовления лабораторных образцов приведены в таблице Б.5 Приложения Б.

### **2.2.1 Методы испытаний и средства измерений**

При проведении исследований проведены следующие виды испытаний:

1. Определение зерновых составов асфальтобетонных смесей;
2. Определение содержания воздушных пустот асфальтобетона (лабораторные образцы);
3. Определение объемной плотности асфальтобетона;
4. Определение максимальной плотности асфальтобетонной смеси.

Рассмотрим методы испытаний и используемые средства измерений.

**Зерновые составы минеральной части асфальтобетонной смеси** определены на ситах с номинальными размерами ячеек: 0,063; 0,125; 0,25;

0,5; 1,0; 2,0; 4,0; 5,6; 8,0; 11,2; 16,0; 22,4; 31,5 мм по ГОСТ 33029-2014 и ГОСТ Р 51568 (ИСО 3310-1-90).

**Содержание воздушных пустот** было определено в соответствии с ГОСТ Р 58401.8-2019 для лабораторных образцов щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси.

Содержание воздушных пустот рассчитывалось по формуле:

$$P_a = \left(1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}}\right) \cdot 100, \quad (2.1)$$

где  $G_{mb}$  - объемная плотность асфальтобетона,

$G_{mm}$  - максимальная плотность асфальтобетонной смеси.

Объемная плотность асфальтобетона  $G_{mb}$  была определена по ГОСТ Р 58401.10-2019 с использованием метода А.

Средства измерений: весы, шкаф сушильный, емкость с водой для взвешивания испытуемого образца в воде, термометр. определяемой величины.

Состав и порядок лабораторных испытаний.

1. Выполнялась подготовка трех образцов;
2. Испытуемый образец ( $T=(22\pm 3)^\circ\text{C}$ ) взвешивался на воздухе (масса А).
3. Образец был погружен в емкость с водой ( $T=(22\pm 3)^\circ\text{C}$ ) на 4 минуты, затем взвешен в воде (масса С).
4. После извлечения образец был высушен влажным полотенцем, взвешен на воздухе (масса В). Вся вода, стекающая с образца во время взвешивания, считается частью массы насыщенного водой образца.
5. Объемная плотность  $G_{mb}$  вычислялась по формуле:

$$G_{mb} = \frac{A}{B - C} \cdot \rho_w, \quad (2.2)$$

где  $A$  – масса сухого образца на воздухе, г;

$B$  – масса образца на воздухе после выдерживания в воде 4 мин, г;

$C$  – масса образца в воде после выдерживания его в воде в течение 4 мин, г;

$\rho_w$  - плотность воды  $\rho_w = 0,997$  г/см<sup>3</sup>.

**Максимальная объемная плотность асфальтобетонных образцов**  $G_{mm}$  была определена в соответствии с ГОСТ Р 58401.16-2019 методом взвешивания в воде.

Средства измерений: оборудование вакуумное (чаша металлическая вакуумная с прозрачной крышкой, насос вакуумный с регулируемым давлением, система фильтрации водяных испарений, устройство вибрационное), весы, шкаф сушильный, термометр.

Состав и порядок лабораторных испытаний.

1. Подготовлено 3 пробы смеси;
2. Остывшая смесь была засыпана в металлическую вакуумную чашу известной массы и после взвешивания (масса  $A$ ) была залита водой таким образом, чтобы уровень воды был на 25 мм выше поверхности смеси.
3. Вакуумным насосом из закрытой вакуумной чаши со смесью и водой был удален воздух.
4. После этого чаша со смесью в воде с уровнем воды над чашей не менее 5 см был взвешен (масса  $B$ ).
5. Взвешена пустая чаша в воде (масса  $C$ ).
6. Максимальную плотность  $G_{mm}$  вычислялась по формуле:

$$G_{mm} = \frac{A}{A - (B - C)} \cdot \rho_w, \quad (2.3)$$

где  $A$  – масса высушенной асфальтобетонной смеси на воздухе, г;

$B$  – масса чаши с асфальтобетонной смесью в воде, г;

$C$  – масса чаши в воде, г;

$\rho_w$  - плотность воды  $\rho_w = 0,997$  г/см<sup>3</sup>.

Результаты испытаний рассмотренных составов приведены в таблице Б.5 Приложения Б.

### 2.2.2 Получение данных в лаборатории

Определение минимального количества наблюдений выполнено методом итеративного приближения к заданному числу проведенных предварительно испытаний [64]. Первоначально были получены значения максимальной и объемной плотности асфальтобетона и подсчитано содержание воздушных пустот для 8 образцов.

Необходимое количество опытов  $n$ , при котором среднее значения опыта отличается от ожидаемого не более чем на допустимую величину отклонения, для определения характеристик асфальтобетона в покрытии устанавливалось по формуле:

$$n = \frac{u^2 \cdot \sigma \cdot N}{(N-1) \cdot \Delta^2 + u^2 \cdot \sigma^2}, \quad (2.4)$$

где  $\sigma$  – дисперсия выборки;

$N$  – число проведенных предварительных испытаний;

$\Delta$  – допустимое отклонение от среднего значения;

$u$  – табличная величина, выбираемая для заданного уровня достоверности  $p$ .

Оценка дисперсии  $\sigma$  вычислялась:

$$\sigma = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2, \quad (2.5)$$

где  $\bar{y}$  – среднее значения опыта;

$N$  – количество образцов в опыте;

$y_i$  – единичный результат наблюдения в опыте.

Среднее значение опыта  $\bar{y}$  определялось по формуле:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (2.6)$$

Будем считать, что достаточная надежность эксперимента обеспечивается при точности 5% и уровне достоверности результатов 0,95.

Таблица 2.1 – Определение количества наблюдений

№ опыта	$y_i, \%$	$N$	$\bar{y}, \%$	$\sigma$	$\Delta, \%$	$u$	$n$
1	2,3948	8	3,0061	0,488	0,15	1,96	14
2	2,5082						
3	3,4157						
4	3,8448						
5	4,0653						
6	2,5118						
7	2,2611						
8	3,0468						

В результате вычислений минимальное число наблюдений, при котором среднее значение по выборке не отличается от математического ожидания не более чем заданную величину  $\Delta=0,15$ , равно 14.

Для выполнения настройки сети оставляем 14 выборок значений. Проверку сети на адекватность в дальнейшем будем осуществлять по 5 выборкам. В совокупности для дальнейшего исследования подготовлено 19 выборок, представленных в таблице 3.2, для которых проведены испытания.

Таблица 2.2 – Выборки для определения физического показателя

№ п/п	Щебень фракции 11,2-16мм, %	Щебень фракции 8-11,2мм, %	Щебень фракции 4-8мм, %	Битум, %	$P_a, \%$
1.	45,4	6,1	17,5	5,0	2,3948
2.	40,6	11,3	17,0	5,1	2,5082
3.	46,4	5,2	17,5	4,9	3,4157
4.	47,2	4,7	18,9	5,2	3,8448
5.	40,6	11,3	18,9	5,2	4,0653
6.	40,7	11,4	18,9	5,0	2,5118
7.	40,8	10,4	17,0	5,0	2,2611
8.	39,9	2,8	26,8	5,1	3,0468
9.	45,0	5,9	17,3	4,9	2,3567
10.	47,0	4,9	18,9	5,2	3,8336
11.	40,0	11,3	19,2	5,0	2,5018
12.	40,5	3,4	25,6	5,1	3,0468
13.	44,5	5,7	22,7	5,0	2,9685
14.	41,1	10,3	17,3	5,0	2,4099
15.	45,4	5,2	17,2	5,0	3,4246
16.	47,1	4,5	19,1	5,2	3,7395
17.	40,5	11,5	18,8	5,2	4,0569
18.	40,0	11,2	19,0	5,0	3,0658
19.	39,8	3,0	25,4	5,1	3,0399

### 2.3 Определение эксплуатационного показателя

Исходной информацией для разработки нейро-нечеткой сети для оценки эксплуатационного показателя глубины колеи  $K$  являются следующие характеристики:

- содержание воздушных пустот в асфальтобетоне покрытия  $P_a$ ,
- число проходов виброкатка при устройстве слоя покрытия  $N$ ,
- интенсивность движения транспорта  $E$ ,
- истираемость асфальтобетона в покрытии по Праллу  $V$ .

Для определения выходного определению эксплуатационного показателя глубины колеи, содержания воздушных пустот, второго эксплуатационного показателя- истираемости асфальтобетона, принятого в качестве входного параметра было проведено комиссионное обследование участков автомобильных дорог Свердловской области. Акт проведения обследований покрытий на участках автомобильных дорог Свердловской области с целью получения исходных данных для разработки интеллектуальной системы представлен в Приложении В.

**Содержание воздушных пустот** было определено при проведении лабораторных испытаний в соответствии с методами ГОСТ Р 58401.8-2019 на отобранных в ходе комиссионного обследования кернах.

**Истираемость** была определена при проведении лабораторных испытаний в соответствии с методами ГОСТ Р 58406.5-2020 на отобранных в ходе комиссионного обследования кернах.

**Число проходов катка** было принято в соответствии с анализом данных пробного уплотнения покрытий. Данный элемент технической документации составляется после уплотнения и проведения необходимых исследований, включающих характеристики применяемых материалов, условия выполнения уплотнения, параметры машин и механизмов, тип катка и количество проходов, результаты лабораторных испытаний.

Уплотнение исследуемого покрытия проводилось виброкатком, в количестве необходимом для получения нормированного значения содержания воздушных пустот. Сложность использования данного параметра заключается во взаимной зависимости с параметром содержания воздушных пустот.

**Интенсивность движения транспорта** подсчитана при проведении полевых работ в ходе комиссионного обследования дороги с учетом приведенной интенсивности движения лесовозного автотранспорта.

**Глубина колеи** определена в результате комиссионного обследования с использованием трехметровой рейки.

### 2.3.1 Методы испытаний

При проведении исследований проведены следующие виды испытаний:

1. Определение содержания воздушных пустот асфальтобетона (керны-вырубки) (описание см.п. 2.2.1);
2. Определение объемной плотности асфальтобетона (описание см.п. 2.2.1);
3. Определение максимальной плотности асфальтобетонной смеси (описание см.п. 2.2.1);
4. Определение истираемости.

**Определение истираемости** производилось в соответствии с ГОСТ Р 58406.5.

Состав и порядок лабораторных испытаний.

1. Подготовленный испытуемый образец помещают в испытательную камеру неопиленной стороной вверх.
2. Кладут кольцеобразную прокладку на образец, стальные шары в количестве шаров 40 шт. помещают на прокладку и закрывают крышку испытательной камеры.
3. Проводят испытание (направленное воздействие поршня).
4. Образец вынимают, промывают холодной водой, обтирают полотенцем и определяют массу.

5. Истираемость асфальтобетона  $V_{аб}$  вычислялась по формуле:

$$V_{аб} = \frac{m_1 - m_2}{G_{mb}}, \quad (2.7)$$

где  $m_1$  – масса образца перед испытаниями, г;

$m_2$  – масса образца после испытания, г;

$G_{mb}$  – объемная плотность образца.

### 2.3.2 Получение данных в натуральных условиях

Определение минимального количества наблюдений выполнено методом итеративного приближения к заданному числу проведенных предварительно испытаний. Под числом предварительных испытаний будем понимать объем выборки, используемый для настройки нейронной сети.

Необходимое минимальное количество опытов  $n$  для определения характеристик асфальтобетона в покрытии устанавливалось по формуле:

$$n = \frac{u^2 \cdot \sigma}{y^2 \cdot 5^2}, 100\%, \quad (2.8)$$

где  $\sigma$  – дисперсия выборки, определяется по формуле 2.5;

$y$  – среднее значение опыта;

$u$  – табличная величина, выбираемая для заданного уровня достоверности  $p$ .

Таблица 2.3 – Определение количества наблюдений

№ опыта	$y_i, \%$	$N$	$\bar{y}, \%$	$\sigma$	$u$	$n$
1	25	8	19,625	18,839	2,02	12
2	18					
3	20					
4	14					
5	15					
6	17					
7	25					
8	23					



На основании данных таблицы 2.3, полученных экспериментально, определялось необходимое число наблюдений при исследовании содержания воздушных пустот. Будем считать, что достаточная надежность эксперимента обеспечивается при точности 5% и уровне достоверности результатов 0,95.

Необходимое минимальное количество опытов  $n$  по расчету - 12. В результате принято минимальное число опытов, равное 14 (для приведения в соответствие предыдущей выборке) для построения модели и 5 для тестирования сети.

В результате испытаний в таблице 2.4 были получены значения содержания воздушных пустот и истираемости для 19 образцов.

Таблица 2.4 – Данные для проведения численного эксперимента

№ п/п	Содержание воздушных пустот $P_a$ , %	Число проходов катка $N$ , ед	Интенсивность движения $E$ , ед/ч	Истираемость $V$ , мл	Глубина колеи, мм
1.	2.5082	14	15	23	25
2.	2.4983	10	15	15	18
3.	2.3948	8	20	18	20
4.	3.4157	12	100	16	14
5.	2.3850	10	30	19	15
6.	2.5118	16	30	15	17
7.	2.3999	8	30	20	25
8.	2.5123	16	50	20	23
9.	3.0468	12	50	22	24
10.	3.0583	14	50	22	18
11.	3.8503	10	65	19	16
12.	3.8448	8	70	21	18
13.	2.2783	8	75	20	25
14.	3.4957	10	110	18	18
15.	3.4063	14	110	20	22
16.	2.2658	10	120	20	30
17.	2.2611	10	125	21	30
18.	4.0653	10	35	17	5
19.	4.0596	8	30	18	10

## 2.4 Выводы по результатам экспериментальных исследований

1. Проведен первый этап экспериментальных исследований в лабораторных и полевых условиях с целью получения исходных данных для разработки нейро-нечетких сетей.

2. На стадии подготовки данных следует предусматривать два набора выборок – обучающую выборку и выборку тестовых данных.

3. Определение минимального количества наблюдений выполнено методом итеративного приближения к заданному числу проведенных предварительно испытаний. Расчеты показали, что необходимое минимальное число испытаний для первоначального количества опытов - 8 составляет:

- 14 для выборки определения физического параметра содержания воздушных пустот,

- 12 для выборки определения глубины колеи.

4. Для дальнейших исследований и разработки нейро-нечеткой сети принято минимальное число опытов, равное 14 - для построения нейро-нечеткой сети и 5 - для тестирования нейро-нечеткой сети.

### **ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРЫТИЯ**

Для оценки основных параметров и показателей асфальтобетонного покрытия целесообразно выработать методологический подход, определить исходные данные, необходимые технологические и технические требования к основным процессам. Сложность задачи обусловлена большой зависимостью особенностей структуры асфальтобетона от многообразных факторов, поэтому она не может решаться с помощью традиционных математических и эмпирических методов. Но в таком исходном виде с неопределенными разбросанными входными параметрами задача является классической для использования методов нечеткой логики с применением нейро-нечетких сетей.

Разработка интеллектуальной системы с применением нейро-нечетких сетей для определения основных параметров и показателей асфальтобетонного покрытия включает решение следующих вопросов:

1. Разработка методики исследования. Выбор и обоснование типа интеллектуальной системы.
2. Разработка нейронных сетей.
  - 2.1 Постановка задачи в содержательном виде.
  - 2.2 Обоснование входных и выходных переменных для нейронных сетей.
  - 2.3 Программная реализация нейронных сетей в среде *Matlab*.
  - 2.4 Обучение нейронных сетей.
3. Создание обобщенной интеллектуальной системы на основе двух нейро-нечетких сетей.

Дальнейшая работа над проблемой выполняется в указанном порядке.

### 3.1 Разработка методики исследования.

#### Выбор и обоснование типа интеллектуальной системы

Классические методы не позволяют учесть большинство закономерностей структурообразования материала, методов испытаний, а также оперативно уточнить элементы технологического процесса строительства асфальтобетонных покрытий в совокупности. Рассматривая корреляционные зависимости требуемых регламентируемых показателей от технических характеристик исходных каменных материалов и вяжущего и технологических параметров укладки и уплотнения, а также эксплуатационных воздействий, мы не можем получить полную и объективную картину эффективной работы строительного материала в покрытии.

В настоящее время создано много различных типов интеллектуальных систем, которые основаны на различных концепциях [106]. Наибольшую популярность получили две концепции интеллектуальных систем: нечеткие системы, основанные на базах правил [48] и нейронные сети [100]. Каждый вид интеллектуальных систем имеет свои преимущества и недостатки.

Исследования и накопленный опыт применения асфальтобетона показывают возможности использования данных для построения *гибридной интеллектуальной системы*, которая основана на двух концепциях - нечетких систем и нейронных сетей. Применение концепции нечетких систем заключается в использовании методики нечеткого вывода с применением баз правил и лингвистических переменных. Математическая модель решения поставленной задачи воплощена в форме искусственных нейронных сетей.

Основная идея обобщенной гибридной интеллектуальной системы в границах решения поставленных задач заключается в обоснованном проектировании гранулометрического состава асфальтобетонных смесей с прогнозом эксплуатационных показателей.

Предлагается рассмотреть задачу в два этапа с разработкой самостоятельной нейро-нечеткой сети на каждом этапе. Нейро-нечеткие сети, работающие последовательно, образуют *обобщенную гибридную интеллектуальную систему*.

Гибридная интеллектуальная система представляет собой многослойную нейро-нечеткую сеть специальной структуры, в которой используются сигналы, веса и функции активации. Модели гибридных сетей основаны на использовании существующей выборки данных для определения функций принадлежности, которые соответствуют той или иной системе нечеткого вывода. Информацией, поступающей на вход системы нечеткого вывода, являются измеренные некоторым образом входные переменные, которые соответствуют реальным входным параметрам, оказывающим определенное влияние на выходной параметр.

Для определения входных и выходных параметров необходимо обратиться к нормативной документации, регламентирующей технические требования к асфальтобетонам. В соответствии с положениями ГОСТ Р 58406.1-2020 показатели асфальтобетонных смесей и асфальтобетонов следует подразделять на три группы: физические, эксплуатационные, дополнительные.

В связи с тем, что необходимость определения дополнительных показателей учитывается не всегда в зависимости от конкретных условий по требованиям заказчика, определение дополнительных показателей является не обязательным и не учитывается при разработке интеллектуальной системы.

На первом этапе решено рассмотреть физические параметры, отражающие основные принципы объемного проектирования гранулометрического состава, а также определить особенно значимые исходные данные, что позволит в конечном итоге выйти на эксплуатационные свойства. В этом заключается одна из проблем использования только классического подхода, который не позволяет

осуществлять контроль за эксплуатационными характеристиками на первоначальном этапе. К рассматриваемым входным параметрам следует отнести данные, связанные с исходными материалами, которые непосредственно влияют на объемные свойства асфальтобетонной смеси.

Практика показала, что объемные свойства смеси позволяют достаточно точно спрогнозировать дальнейшие эксплуатационные характеристики на протяжении всего срока службы дорожного покрытия. Поэтому на втором этапе одним из входных параметров предлагается принять выходной параметр, полученный ранее. На втором этапе следует рассмотреть различные факторы: проектные, технические, технологические. Обеспечение задаваемых свойств асфальтобетона зависит от особенностей уплотнения горячих смесей. Известно, что достичь требуемых параметров асфальтобетона можно при условии соблюдения температурных режимов укладки и уплотнения горячей смеси при соответствующей нагрузке. Также важнейшую роль играют эксплуатационные нагрузки, истирающее действие шипов на асфальтобетонное дорожное покрытие и др.

В рамках данной работы разработаны две нейро-нечеткие сети:

- нейро-нечеткая сеть для определения физического параметра асфальтобетона в покрытии;
- нейро-нечеткая сеть для определения эксплуатационного показателя асфальтобетона в покрытии.

Для реализации нейро-нечеткой сети использована методика создания гибридных нейро-нечетких сетей типа *ANFIS (Adaptive Network Neuron Fuzzy Interference)* и *Toolbox* (инструмент) *anfisedit* системы *MATLAB* [107]. *ANFIS* представляет собой систему нейронечеткого вывода, который содержит средства, предназначенные для проектирования, моделирования, обучения и использования различных вариантов искусственных сетей. Именно в данной подпрограмме возможно реализовать нейро-нечеткую сеть с несколькими входами и одним выходом, которые, в свою очередь, являются нечеткими лингвистическими переменными.

Обработка данных и формирование обучающих наборов данных выполнена с использованием методов математической статистики. Специфика задачи заключается в некоторой неопределенности входных и выходных параметров смесей. Поэтому нейро-нечеткая адаптивная сеть *ANFIS* будет в большей степени подходить для решения задачи определения основных характеристик дорожного покрытия.

В работе сети *ANFIS* для решения поставленных задач используется нечеткий вывод, основанный на алгоритме типа Сугено.

Некоторые определения, используемые для решения задач:

**Определение 1:** Нечетким множеством (*fuzzi set*)  $\tilde{A}$  на универсальном множестве  $U$  называется совокупность пар  $(\mu_A(u), u)$ , где  $\mu_A(u)$  — степень принадлежности элемента  $u \in U$  нечеткому множеству.

**Определение 2:** Степень принадлежности – число из диапазона  $[0;1]$ . Чем выше степень принадлежности, тем в большей мере элемент универсального множества соответствует свойствам данного нечеткого множества.

**Определение 3:** Функция принадлежности (*membership function*) – функция, которая позволяет вычислить степень принадлежности произвольного элемента универсального множества нечеткому множеству.

**Определение 4:** Лингвистическая (нечеткая) переменная (*linguistic variable*) – переменная, значениями которой могут быть слова естественного или искусственного языка.

**Определение 5:** Терм-множество (*term set*)- множество всех возможных значений, которые способна принимать лингвистическая переменная.

**Определение 6:** Терм (*term*) - элемент терм-множества.

**Определение 7:** Фаззификация (*fuzzification*) – введение нечеткости в задачу.

**Определение 8:** Дефаззификация (*defuzzification*) - процедура преобразования нечеткого множества в четкое число.

## **3.2 Разработка нейро-нечеткой сети для определения физического параметра асфальтобетона в покрытии**

### **3.2.1 Постановка задачи в содержательном виде**

Для выполнения постановки задачи в содержательном виде необходимо рассмотреть и проанализировать основные физические процессы структурообразования асфальтобетона. На данном этапе обоснован выходной параметр нейро-нечеткой сети.

Задача проектирования состава асфальтобетонной смеси подразумевает определение оптимального соотношения исходных материалов смеси для получения требуемых показателей свойств асфальтобетона в покрытии. Асфальтобетонная смесь - это строительный материал, состоящий из минеральных компонентов (щебня, песка, минерального порошка и т.п.), битума и добавки, обеспечивающей устойчивость вяжущего. Все эти материалы образуют структуру асфальтобетона и влияют на физические и эксплуатационные свойства дорожных покрытий.

Цель проектирования состава асфальтобетонной смеси заключается в том, чтобы все показатели физико-механических свойств, полученных при испытании асфальтобетонных образцов, отвечали требованиям нормативной документации. Однако в рамках нормативов рекомендуется оптимизировать состав смесей в направлении повышения эксплуатационных свойств и долговечности слоя дорожной одежды.

В соответствии с системой проектирования составов смесей [47] к физическим показателям следует отнести следующие:

- зерновой состав и количество вяжущего;
- стекание вяжущего;
- максимальную плотность;
- объемную плотность;
- содержание воздушных пустот;



- пустоты в минеральном заполнителе (ПМЗ).

При этом зерновые составы, тип и количество вяжущего, значения максимальной и объемной плотности следует рассматривать в качестве входных параметров, т. к. они задаются при подборе состава смеси при изготовлении образцов в лаборатории.

Требования к основным физическим показателям (содержанию воздушных пустот и пустот в минеральном заполнителе) для различных типов смесей приведены в таблице 2.1.

Таблица 3.1 – Зерновые составы щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей [31]

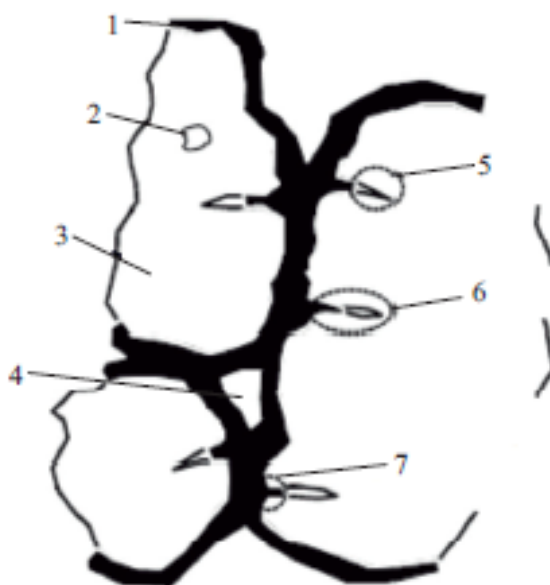
Наименование показателя	Значение показателя для типов смеси			
	ЩМА-22	ЩМА-16	ЩМА-11	ЩМА-8
Физические показатели				
Содержание воздушных пустот, %				
- для образцов, изготовленных в лаборатории	От 2,5 до 5,0	От 2,0 до 4,0	От 2,0 до 4,0	От 1,5 до 3,5
- кернов (вырубок)	От 2,0 до 6,0	От 2,5 до 6,0	От 2,5 до 5,5	От 1,5 до 5,5
Пустоты в минеральном заполнителе, %, не менее	16,0			

Оптимизацию состава смеси, предназначенной для устройства верхних слоев дорожных покрытий, до последнего времени связывали с повышением плотности асфальтобетона.

Уплотнение асфальтобетона – один из важнейших структурообразующих факторов. После уплотнения асфальтобетонной смеси значительно повышается ее объемная масса, покрытие приобретает необходимую плотность, прочность и водоустойчивость. От степени

уплотнения зависят важнейшие эксплуатационные свойства асфальтобетонных покрытий.

Качество уплотнения асфальтобетонного слоя по ГОСТ принято определять по содержанию воздушных пустот ( $P_a$ ). Содержание воздушных пустот, показано на рисунке 3.1 под номером 4, включает объем всех воздушных пустот в уплотненной смеси. Данным параметром контролируется степень уплотнения.



1 – эффективное содержание вяжущего (неабсорбированного заполнителем);  
 2 – непроницаемые пустоты; 3 – заполнитель; 4 – воздушные пустоты; 5 –  
 водопроницаемые пустоты, не заполненные битумом; 6 – водопроницаемые  
 пустоты; 7 – пустоты, заполненные битумом (битум, абсорбированный  
 заполнителем)

Рисунок 3.1 – Характерное изображение заполнителя, битума и воздушных пустот в асфальтобетонной смеси под микроскопом [58]

Что касается показателя ПМЗ, показано на рисунке 3.1 под номером 1, 2 5, 6, то этот показатель отражает содержание пустот в минеральном заполнителе и включает объем воздушных пустот и эффективное количество вяжущего (не абсорбированного заполнителем = свободный битум).

С учетом вышесказанного, выходным параметром для нейро-нечеткой сети обоснованно принят физический параметр - содержание воздушных пустот ( $P_a$ ), который является достаточно информативным и определяет степень уплотнения будущего состава.

### **3.2.2 Исследование основных параметров, влияющих на значение выбранного физического параметра**

Теперь необходимо рассмотреть и определить какие факторы влияют на выбранный параметр. Структура асфальтобетона определяется структурой исходных материалов, т.е. структурой минерального остова, структурой битума, а также особенностями их взаимодействия.

Структура минерального остова напрямую зависит от гранулометрического состава смеси. Гранулометрический состав влияет на оптимальную упаковку зерна заполнителя, а также на объемные свойства асфальтобетона в покрытии. Вопросами гранулометрии занимались многие отечественные и зарубежные ученые. Различные принципы формирования гранулометрического состава легли в основу основных подходов в проектировании рецептов асфальтобетонных смесей.

Также существует взаимосвязь гранулометрического состава смеси с таким технологическим параметром как удобоукладываемость. Это связано с тем, что при укладке смеси, обладающей непрерывистым гранулометрическим составом, возникают трудности в уплотнении материала. Это в очередной раз доказывает неопределенность задачи и необходимость использования нечеткого моделирования.

Гранулометрический состав асфальтобетонной смеси – относительное содержание компонентов по массе. Гранулометрия определяет содержание пор в минеральной части асфальтобетона, которое в дальнейшем определяет количество битума в смеси и степень его структурирования.

При проектировании рецептов по методу «*Superpave*» на гранулометрической кривой зернового состава можно выделить три участка, соответствующих макро-, мезо- и микроструктуре смесей. На рисунке 3.2 показана структура щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси.



Рисунок 3.2 - Структура ЩМА

**Макроструктура.** Именно щебень образует макроструктуру асфальтобетона, формирует несущий каркас из взаимно соприкасающихся щебенков, который воспринимают основные сдвиговые нагрузки, делает материал прочным и устойчивым к пластическим деформациям. Зерна щебня образуют скелет материала и создают самые крупные межзерновые пустоты. Также повышенное содержание щебня создает шероховатую текстуру поверхности и хорошее сцепление асфальтобетона с шинами.

При подборе составов по методу объемно-функционального проектирования рекомендуется использовать несколько фракций щебня. Таким образом, создается более компактная упаковка зерна заполнителя. Именно содержанием щебня различных фракций регулируется содержание воздушных пустот в заполнителе.

**Мезоструктура.** Зерна щебня средней фракции и песок являются элементом мезоструктуры асфальтобетонной смеси. Примечательно, что в зарубежной литературе понятие песок не используется. Структура асфальтобетона представляется исключительно крупным и мелким

заполнителем. Но это не совсем верно, ведь зерна песка занимают большую часть объема асфальтобетона, частично формируют каркас, в то же время заполняя пустоты между зернами щебня. Именно песок позволяет получить непрерывную кривую гранулометрического состава. Играет благоприятную роль в формировании структуры асфальтобетона в процессе его уплотнения.

Особое внимание также стоит обратить на то, что искусственные пески, полученные дроблением горной породы, делают асфальтобетонную смесь более прочной. Это происходит из-за того, что угловатые остроугольные частицы повышают внутреннее трение смеси.

**Микроструктура.** Микроструктура определяет заполнение пустот и раздвижку зерна крупного заполнителя. Микроструктуру определяют мелкие зерна заполнителя, а также минеральный порошок. Минеральный порошок в асфальтобетоне выполняет несколько функций. Во-первых, он является заполнителем пустот между крупным заполнителем. Во-вторых, при взаимодействии с битумом именно минеральный порошок образует вяжущее вещество, отвечающее за структурообразование битума. Взаимодействие битума и минерального порошка является важнейшим фактором структурообразования в асфальтобетоне.

Являясь компонентом минеральной части, порошок повышает ее плотность (уменьшает пустотность). Порошок структурирует битум и эффективно воздействует на прочность, вязкость, теплостойкость и клеящие свойства асфальтовяжущего. Избыточное содержание порошка может привести к росту хрупкости асфальтобетона, особенно при низких температурах.

Однако при подборе состава смеси песок и минеральный порошок не изменяются в пределах, необходимых для учета неопределенности, они не могут учитываться при постановке задачи.

**Битум.** Качество асфальтобетонной смеси во многом зависит от содержания битумного вяжущего. Границы содержания битума определяются при подборе оптимального состава с лучшими показателями

свойств. Технологические свойства и уплотняемость смеси улучшаются с увеличением содержания битума, однако слишком большое содержание битума приводит к высокой подверженности пластическим деформациям, как следствие, асфальтобетон плохо работает на сдвигающие нагрузки от колеса автомобиля.

Битум в асфальтобетоне также выполняет ряд функций. Играя вместе с порошком (или без него) роль вяжущего, битум склеивает в монолит зерна щебня (гравия) и песка. Кроме того, заполняя межзерновое пространство минеральной части, битум придает асфальтобетону требуемую прочность и водостойкость. Будучи термопластичным вяжущим битум играет и роль смазки, уменьшающей внутреннее трение в минеральной части, поэтому избыточное содержание битума может привести к снижению прочности, теплостойкости и сдвигоустойчивости асфальтобетона.

Особенностью щебеночно-мастичных смесей является повышенное, по сравнению с традиционными горячими смесями, содержание битума. Большое количество вяжущего препятствует проникновению влаги внутрь слоя, повышает устойчивость к старению, водо-морозостойкость, трещиностойкость и, в конечном счете, значительно увеличивает долговечность покрытия. Однако повышенное содержание битумного вяжущего в смеси нужно стабилизировать, то есть предотвратить его отслоение и стекание с поверхности зерен щебня при высоких технологических температурах приготовления, хранения, транспортирования и укладки. Данная проблема легко решается введением в смесь стабилизирующей добавки, например целлюлозного волокна или специальных гранул на его основе, которые должны соответствовать требованиям технической документации предприятия-изготовителя.

Отличительной особенностью методики объемного проектирования является подбор вяжущего. В соответствии с методологией марка битумного вяжущего выбирается в соответствии с географическим расположением района строительства, применением и статистическими данными по

температуре воздуха в выбранном районе строительства, по которым рассчитываются расчетные температуры слоя дорожного покрытия [44]. В рамках данной задачи зададимся значением содержания битумного вяжущего, т.к. тип и марка назначаются технологами и проектировщиками.

**Входные переменные.** В ходе рассмотрения принципов проектирования состава были определены наиболее значимые исходные фракции и материалы.

В итоге в качестве входных переменных предлагается принять содержание в составе асфальтобетонной смеси щебня крупной, средней и мелкой фракции и битумного вяжущего:

- щебень крупной фракции (*Large Crushed Stone (LCS)* - 11,2-16мм);
- щебень средней фракции (*Medium Crushed Stone (MCS)* 8-11,2мм);
- щебень мелкой фракции или отсева (*Fine Crushed Stone (FCS)* 4-8мм);
- битум (*Bitumen (B)*).

Указанные входные переменные являются лингвистическими переменными. При формировании входных лингвистических переменных использованы следующие терм-множества:

- $LCS = \{Min, M, Max\}$ ;
- $MCS = \{Min, M, Max\}$ ;
- $FCS = \{Min, M, Max\}$ ;
- $B = \{Min, M, Max\}$ .

Формально постановка задачи подбора состава смеси по содержанию воздушных пустот  $P_a$  запишется в виде:

$$P_a = f(LCS, MCS, FCS, B)$$

Параметр  $LCS$  отвечает за макроструктуру асфальтобетона и образование каркаса каменного материала. Параметры  $MCS$  и  $FCS$  характеризует заполнение пространства между крупными зернами. В совокупности эти параметры позволяют обеспечить необходимую упаковку зерен каменного материала.

Содержание битума  $B$  позволяет учесть влияние битумных материалов на уплотняемость асфальтобетонной смеси.

Обозначение входных и выходной переменной приведены в таблице 2.

Таблица 3.2 – Входные и выходная лингвистические переменные нейронечеткой сети определения содержания воздушных пустот

Обозначение	Наименование лингвистической переменной	Вид и интерпретация термножества	Физическое значение переменных
$X_1$	Щебень крупной фракции, $LCS$	$Min$ – минимальное; $M$ – среднее; $Max$ – максимальное	Характеризует макроструктуру асфальтобетона и образование каркаса каменного материала
$X_2$	Щебень средней фракции, $MCS$	$Min$ – минимальное; $M$ – среднее; $Max$ – максимальное	Характеризует мезоструктуру асфальтобетона и образование каркаса каменного материала
$X_3$	Щебень мелкой фракции или отсева, $FCS$	$Min$ – минимальное; $M$ – среднее; $Max$ – максимальное	Характеризует микроструктуру асфальтобетона и образование каменного материала
$X_4$	Битум, $B$	$Min$ – минимальное; $M$ – среднее; $Max$ – максимальное	Характеризует влияние битумного вяжущего на уплотняемость асфальтобетонной смеси
$Y_1$	Содержание воздушных пустот, $P_a$	$Min$ – минимальное; $M$ – среднее; $Max$ – максимальное	Характеризует степень уплотнения асфальтобетонной смеси

Структура нейронной сети для определения содержания воздушных пустот приведена на рисунке 3.3.

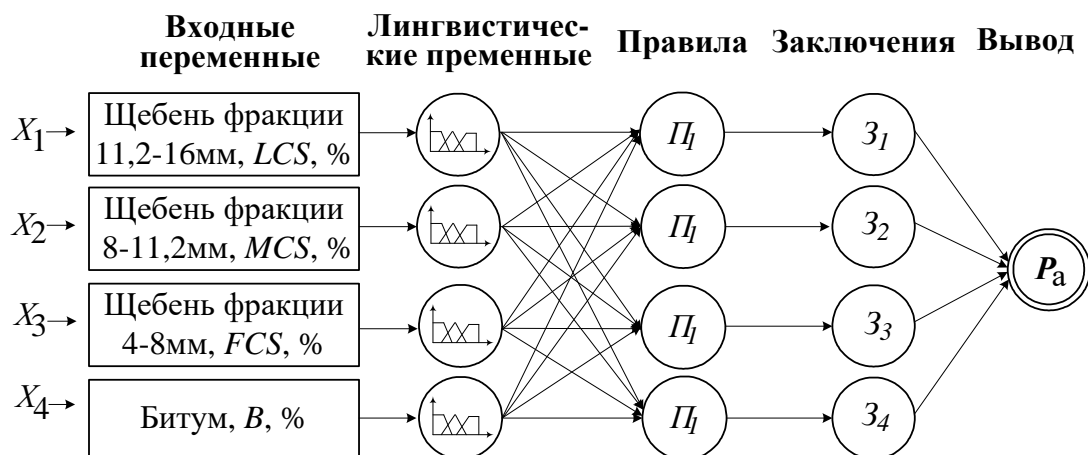


Рисунок 3.3–Нейронная сеть определения содержания воздушных пустот



### 3.2.3 Разработка обучающих выборок для настройки нейросети

Для создания сети подготовлены обучающие выборки, представленные в таблице 3.3. С целью большей адекватности данные для входных параметров в виде обучающих выборок были подготовлены в результате экспериментальных исследований в сертифицированной лаборатории. Получение исходных данных подробно описано в главе 2.

Таблица 3.3 - Обучающие выборки нейронной сети для определения содержания воздушных пустот

№	Входные параметры				Выходной параметр
	Щебень фракции 11,2-16мм, <i>LCS</i> , %	Щебень фракции 8-11,2мм, <i>MCS</i> , %	Щебень фракции 4-8мм, <i>FCS</i> , %	Битум, <i>B</i> , %	Содержание воздушных пустот, <i>P<sub>a</sub></i> , %
1	45,4	6,1	17,5	5,0	2,3948
2	40,6	11,3	17,0	5,1	2,5082
3	46,4	5,2	17,5	4,9	3,4157
4	47,2	4,7	18,9	5,2	3,8448
5	40,6	11,3	18,9	5,2	4,0653
6	40,7	11,4	18,9	5,0	2,5118
7	40,8	10,4	17,0	5,0	2,2611
8	39,9	2,8	26,8	5,1	3,0468
<p><b>Примечания:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Температура изготовления смеси <math>T=165^{\circ}\text{C}</math>;</li> <li>2. Содержание исходных материалов указано в % от массы смеси;</li> <li>3. Требуемое содержание воздушных пустот для образцов, изготовленных в лаборатории для ЦМА-16, составляет от 2,0 до 4,0 %.</li> </ol>					

### 3.2.4 Программная реализация нейронной сети в *Matlab*

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

Пакет *Neuro-Fuzzy Designer* позволяет выполнять обучение методом обратного распространения ошибки, основным назначением которого

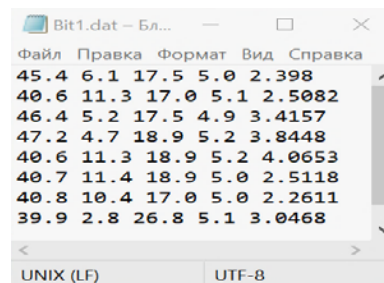
является настройка всех слоев многослойной структуры путем изменения весов промежуточных слоев, и гибридным методом, который представляет собой комбинацию методов наименьших квадратов и обратного распространения ошибки.

В условиях решения нашей задачи задано 10 эпох обучения, поэтому для настройки параметров используется гибридный метод обучения.

Работа в данной программной среде включает в себя четыре этапа:

1. Загрузка данных;
2. Генерация структуры сети;
3. Обучение (настройка) нечеткой сети;
4. Проверка обученной (настроенной) сети.

На основании обучающей выборки подготовленных данных (см. таблицу 3.4) создается файл с форматом *Bit1.dat* (рисунок 3.4). Данные представлены в виде матрицы, причем выходной параметр располагается в последнем столбце.



data set index	1	2	3	4	5
1	45.4	6.1	17.5	5.0	2.398
2	40.6	11.3	17.0	5.1	2.5082
3	46.4	5.2	17.5	4.9	3.4157
4	47.2	4.7	18.9	5.2	3.8448
5	40.6	11.3	18.9	5.2	4.0653
6	40.7	11.4	18.9	5.0	2.5118
7	40.8	10.4	17.0	5.0	2.2611
8	39.9	2.8	26.8	5.1	3.0468

Рисунок 3.4 –Файл с обучающими выборками

Затем исходные данные загружаются в приложение (рисунок 3.5).

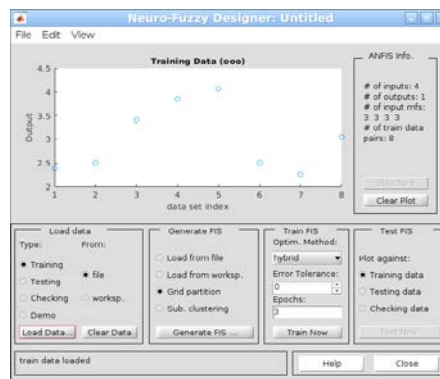


Рисунок 3.5 – Загрузка данных

Задается методика нечеткого вывода для выходной переменной (методом Сугено).

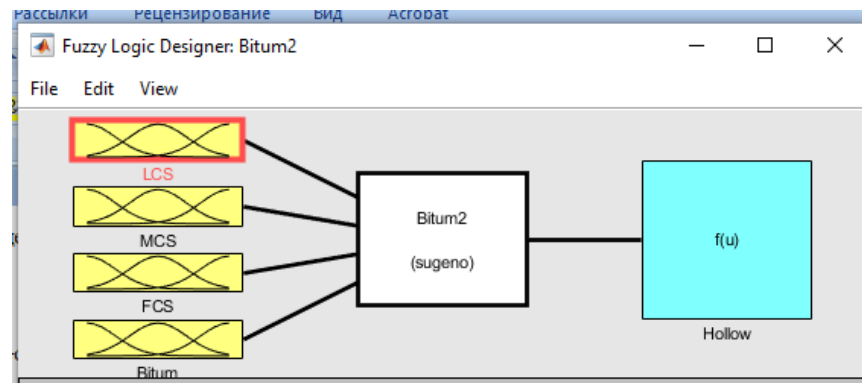
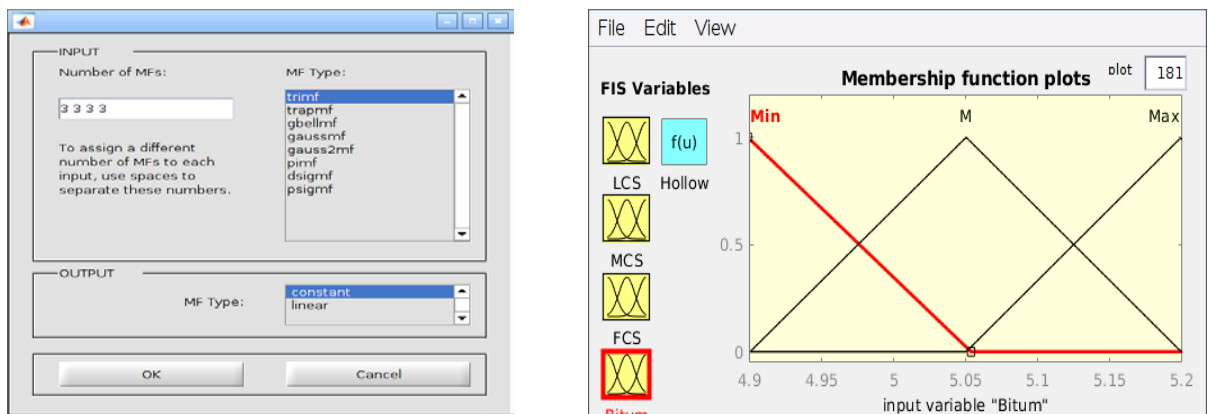


Рисунок 3.6–Схема метода нечеткого вывода (методом Сугено)

После подгрузки исходных данных выбираются параметры исходных переменных и задаются треугольные функции принадлежности для термножеств входных и выходной лингвистических переменных.



а)

б)

а) задание параметров нечеткой системы; г) переменная «В» (переменные «LCS», «MCS» и «FCS» заданы аналогично)

Рисунок 3.7 - Задание параметров нечеткой системы

Сгенерированная система нечеткого вывода приведена на рисунке 3.8.

На разработанную нейронную сеть получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ[85]. Этапы разработки нейронной сети представлены в [70].

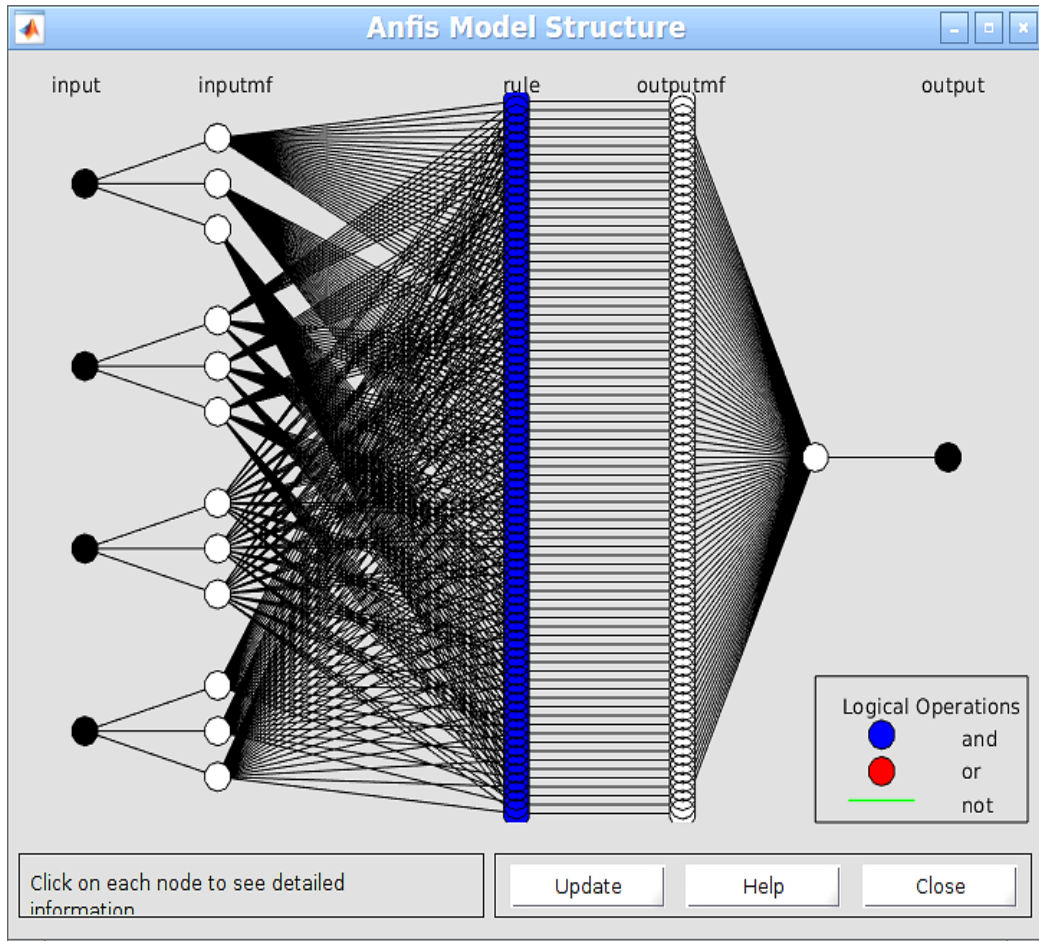
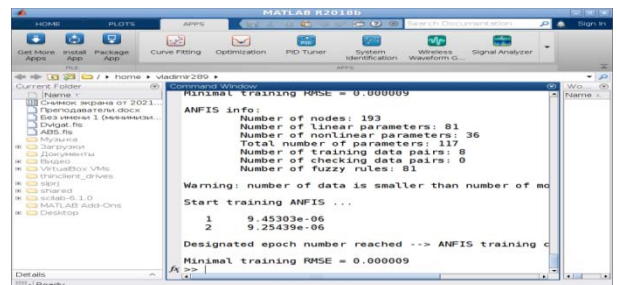
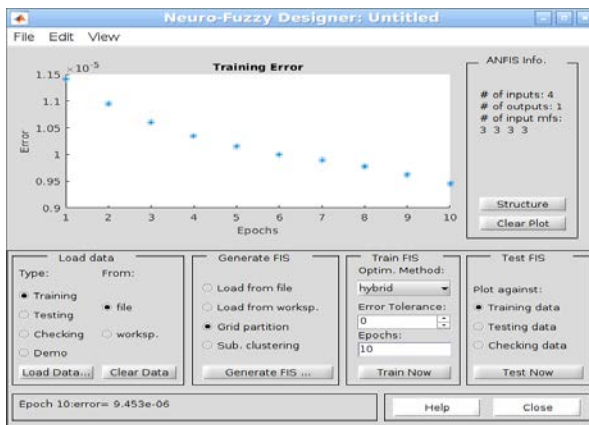


Рисунок 3.8 - Генерация нейронной сети

Запускается процедура обучения сети (рисунок 3.9а), при этом задано 10 эпох обучения. Процесс обучения отображается в командном окне *Matlab* (рисунок 3.9б), где выведено значение среднеквадратической ошибки *RMSE* результата обучения равное 0,000009.



а) процесс обучения нейросети; б) отображение процесса обучения

Рисунок 3.9 – Процесс обучения нейро-нечеткой сети

### **3.3 Разработка нейронной сети для определения эксплуатационного показателя асфальтобетона в покрытии**

#### **3.3.1 Постановка задачи в содержательном виде**

Для выполнения постановки задачи определения эксплуатационного показателя асфальтобетонного покрытия в содержательном виде необходимо обосновать наиболее важный выходной эксплуатационный показатель, установить взаимосвязь между выбранными исходными материалами и свойствами готового покрытия, рассмотреть и проанализировать основные факторы влияния и воздействия на дорожные покрытия.

Одним из основных факторов безопасности движения является ровное покрытие автомобильной дороги. Но в процессе эксплуатации неизбежно появляется колея, препятствующая безопасному движению.

Колея - вид деформирования поперечного профиля проезжей части с образованием углублений по полосам наката с гребнями или без гребней выпора.

Различают два вида колееобразования:

1. Пластическое (глубинное);
2. Абразивное (колея износа или истираемость).

Физические причины образования колеи позволяют отличить пластическую колею от колеи износа, но на практике это не так очевидно. Процесс пластического колееобразования возникает с момента начала эксплуатации покрытия и заканчивается при накоплении определенных пластических сдвиговых напряжений. В то время как абразивное колееобразование активно происходит сезонно, в начальный и завершающий периоды зимы. С учетом вышеизложенного, можно говорить о том, что фактически глубина колеи на дороге будет иметь и пластическую, и абразивную природу. В зависимости от того, как эксплуатируется покрытие

(интенсивность движения, сезон, тип автомобилей), по внешнему виду колеи можно определить какой тип колееобразования преобладает.

Причем как показывает практика, глубина пластической колеи почти в 10 раз меньше по величине, чем глубина колеи износа. Поэтому ее сложнее оценить и увидеть на дороге через несколько лет эксплуатации.

Принципы и методы проектирования асфальтобетонных смесей совершенствуются, но проблема колееобразования все равно остается. Несмотря на то, что при проектировании дорожных одежд закладываются расчетные нагрузки, близкие к фактическим нагрузкам на покрытие, учитываются климатические факторы, наблюдается большое количество участков с глубиной колеи, превышающей нормативные значения. Наблюдаемый рост интенсивности движения, нагрузок на ось автомобилей приводят к тому, что даже на автодорогах, рассчитанных на высокие нагрузки, происходит пластическое и абразивное колееобразование.

В таком случае, разработка методов оценки сопротивляемости асфальтобетонного покрытия колееобразованию становится актуальной задачей. Известно достаточное количество различных методик определения глубины колеи дорожных покрытий.

Можно выделить следующие основные группы средств по оценке глубины колеи:

- лабораторные методы испытаний в специальных камерах с осуществлением приложения многократной колесной нагрузки;
- установки ускоренного испытания, использующие полноразмерные колеса;
- испытательные полигоны.

Наибольшее распространение получили лабораторные методы, основанные на принципе прокатывания колеса. В рамках новой утвержденной системы ГОСТ действующая методика для определения глубины пластической колеи представлена ГОСТ Р 58406.3 – 2020.

Испытания на истираемость в общем виде проводятся лабораторными методами, но оборудование должно также учитывать воздействие шипов. Для этого применим новый метод тестирования асфальтобетона на истираемость по Праллу в рамках ГОСТ Р 58406.5-2020, что подтверждено исследованиями [37,38].

Но шипы не единственная причина износа. Большую роль в этом вопросе играет выбор состава покрытия. Существующие нормативные методы испытаний (ГОСТ 34342-2017) имеют некоторые недоработки и не учитывают устойчивость покрытий к шипованной резине в различных условиях.

Но использование пневматических колес в лабораторных установках не в полной мере позволяет создать реальные нагрузки на материал, что дает погрешности при анализе работы материала в покрытии.

Очевидно, что для прогноза динамики развития колееобразования необходимо использовать методику, позволяющую минимизировать воздействие условий испытаний на результаты, а также учитывать другие характеристики испытываемого асфальтобетона. Нельзя не учитывать тот факт, что конечная глубина колеи зависит от выбранного состава асфальтобетонной смеси и физических свойств асфальтобетона.

Для усовершенствования процедуры проектирования асфальтобетона также предлагается использование искусственных нейронных сетей. Данный метод позволит эффективно и объективно оценить насколько тот или иной материал способен сопротивляться образованию колеи.

Выходной переменной обоснованно принимается результирующая величина глубины колеи, которая и определяет эксплуатационные показатели дорожного асфальтобетонного покрытия.

### 3.3.2 Исследование основных параметров, влияющих на значение выбранного эксплуатационного показателя

Пластичная колея образуется преимущественно в летний период, когда при высокой температуре окружающего воздуха асфальт становится более вязким. Под нагрузкой автомобилей в структуре покрытия возникают множественные необратимые остаточные деформации. Результат виден как колея с выпором асфальта по краям.

Причиной образования абразивной колеи является истирающее воздействие шин автомобилей, и в первую очередь, шипованных шин. Колея износа характерна для зимних и переходных осенне-зимне-весенних периодов. На высокой скорости многократные удары металлических шипов в воде выбивают частички асфальта из покрытия. Энергия и сила удара зависят от скорости автомобиля и массы шипа. На абразивный эффект также влияют траектория движения автомобиля, ускорение и торможение. Поэтому колея износа не имеет гребней выпора, характерных для пластичной колеи.

Причем, если при образовании пластичной колеи большее воздействие оказывает грузовой транспорт, то вклад в образование колеи износа в основном вносят легковые автомобили, двигающиеся на высокой скорости.

**Пластическая колея.** Для определения глубины пластической колеи с помощью интеллектуального моделирования определим наиболее значимые входные параметры.

Рассматривая пластическую (деформационную) колею, разделим факторы, влияющие на ее образование, на три группы:

- проектные (интенсивность, толщина слоя покрытия) – задаются проектировщиком, исходными данными;
- физические (плотность асфальтобетонной смеси, содержание воздушных пустот, проходы через сито, содержание вяжущего) – подбираются технологом в лаборатории подрядчика, определяются повторно



в испытательной лаборатории при проведении контроля качества представителем заказчика;

- технологические (режим работы катка, количество проходов катка, изменение температуры смеси при уплотнении, время транспортирования) – определяются в соответствии с пробным уплотнением производителем работ и представителем отдела технологии и качества.

Достаточно изучено и бесспорно прямое влияние приложенной нагрузки на асфальтобетонное покрытие. Интересен тот факт, как технологические параметры уплотнения влияют на глубину колеи. Рассмотрим физические причины образования колеи.

Опыт использования лабораторных испытаний для определения глубины колеи позволяет говорить, что процесс колееобразования происходит в несколько этапов. Наглядно это можно увидеть на кривой колееобразования на рисунке 3.10.



Рисунок 3.10 – Кривая пластического колееобразования [59]

Первый участок кривой соответствует процессу доуплотнения материала. Это стадия, на которой происходит интенсивное доуплотнение под действием прилагаемой нагрузки. На величину колеи, появляющуюся на данном этапе, влияет степень уплотнения асфальтобетонной смеси и величина остаточной пористости асфальтобетона.

Второй участок кривой характеризует саму пластическую деформацию и соответствует процессу ползучести. По мнению исследователей [43], в данный период времени происходит рост глубины колеи за счет накопления незначительных по величине необратимых (неупругих) деформаций материала. Накопление глубины колеи на данном этапе определяется свойствами асфальтобетона, влияющими на его сдвигоустойчивость,

Третья часть кривой, называется кривой разрушения. На данном этапе кривая образования колеи резко увеличивает наклон и начинается гораздо более интенсивное накопление глубины колеи.

В результате, общая величина глубины колеи складывается из трех составляющих: колеи доуплотнения, колеи ползучести и колеи разрушения. Причем ползучесть асфальтобетона начинается только при накоплении определенных напряжений, поэтому особое внимание необходимо обратить на глубину колеи доуплотнения, которая преимущественно связана с технологическими факторами влияния.

**Абразивная колея.** На величину глубины колеи износа влияют следующие факторы:

- проектные (материал покрытия);
- эксплуатационные (интенсивность и скорость движения, геометрия проезжей части, состояние покрытия);
- технические (параметры автомобиля, доля автомобилей с шипами, характеристики шипов и их количество);
- технологические (режим работы катка, количество проходов катка, изменение температуры смеси при уплотнении, время транспортирования).

Кроме того, помимо самого асфальтобетона, его компонентов, технологических и конструктивных факторов, на колееобразование влияют температура и влажность покрытия, использование противогололедных реагентов и др.

Для построения нейронной сети выделено четыре входных параметра, определяющих фактор влияния различной природы:

- содержание воздушных пустот ( $P_a$ ), %;
- число проходов катка ( $N$ ), ед;
- интенсивность движения ( $E$ ), ед/ч;
- характеристика истираемости ( $V$ ), мл.

Формально постановка задачи запишется в виде:

$$K = f(P_a, N, E, V)$$

Данная модель позволяет учесть неопределенность входных параметров и их различную функцию в формировании колеи.

При формировании входных лингвистических переменных в этой задаче использованы следующие терм-множества:

- $P_a = \{Min, M, Max\}$ ;
- $N = \{Min, M, Max\}$ ;
- $E = \{Min, M, Max\}$ ;
- $V = \{Min, M, Max\}$ .

Обозначение входных и выходной переменной приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Входные и выходная лингвистические переменные

Обозначение	Наименование лингвистической переменной	Вид и интерпретация терм-множества	Физическое значение переменных
$X_1$	Содержание воздушных пустот, $P_a$	$Min$ – минимальное; $M$ – среднее; $Max$ – максимальное	Характеризует степень уплотнения асфальтобетонной смеси при образовании пластической колеи
$X_2$	Число проходов катка, $N$	$Min$ – минимальное; $M$ – среднее; $Max$ – максимальное	Характеризует технологические причины пластического колееобразования
$X_3$	Интенсивность движения, $E$	$Min$ – минимальное; $M$ – среднее; $Max$ – максимальное	Характеризует эксплуатационную составляющую колеи износа
$X_4$	Истираемость по Праллу, $V$	$Min$ – минимальное; $M$ – среднее; $Max$ – максимальное	Характеризует истираемость асфальтобетона
$Y_1$	Глубина колеи, $K$	$Min$ – минимальное; $M$ – среднее; $Max$ – максимальное	Характеризует ровность как эксплуатационный показатель покрытия

Структура нейронной сети для определения глубины коле,  $K$ , показана на рисунке 3.11.

Содержание воздушных пустот (физический параметр) и число проходов катка (технологический параметр) позволяют учесть причины образования пластической составляющей результирующего значения глубины колеи.

Интенсивность движения (эксплуатационный параметр) учитывает причину образования колеи износа.

Характеристика истираемости по Праллу также характеризует истираемость асфальтобетона, выраженную величиной изменения объема образца под воздействием контактных напряжений от стальных шаров в испытательной установке.

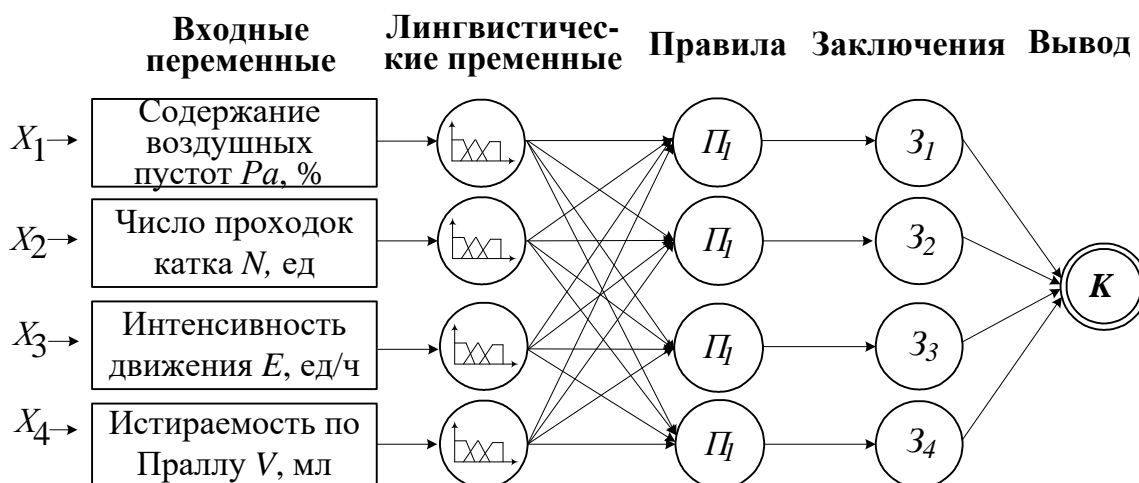


Рисунок 3.11 -Нейро-нечеткая сеть определения глубины колеи

### 3.3.3 Разработка обучающих выборок для настройки нейросети

Формирование обучающей выборки для решения данной задачи определения эксплуатационного показателя – глубины колеи выполнено на основании замеров поперечной ровности при проведении комиссионного обследования с использованием передвижной дорожной лаборатории. Подробно вопрос формирования обучающих выборок рассмотрен в главе 2.

Обучающие выборки представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 - Обучающие выборки для определения глубины пластической колеи

№	Входные параметры				Выходной параметр
	Содержание воздушных пустот, $P_a$ , %	Число проходов катка $N$ , ед;	Интенсивность движения $E$ , ед/ч	Истираемость $V$ , мл	Глубина колеи, мм
1	3,4157	12	100	16	14
2	4,0653	10	35	17	5
3	2,3948	8	20	18	20
4	2,5118	16	30	15	17
5	2,5082	14	15	23	25
6	3,0468	12	50	22	24
7	3,8448	8	70	21	18
8	2,2611	10	125	21	30

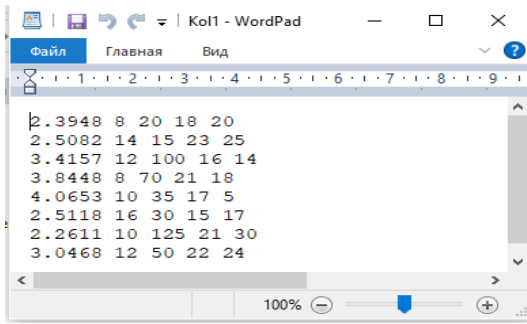
### 3.3.4 Программная реализация нейронной сети в *Matlab*

Реализация данной нейронной сети проведена аналогично реализации нейронной сети, представленной в разделе 3.2.4, в среде *Neuro-Fuzzy Designer* приложения *Matlab*.

На основании обучающей выборки подготовленных данных (см. таблицу 3.6) создается файл с форматом *Koll.dat* (рисунок 3.12а). Данные представлены в виде матрицы, причем выходной параметр располагается в последнем столбце. Затем исходные данные загружаются в приложение (рисунок 3.12б).

После подгрузки исходных данных и выбора параметров входных нечетких переменных (рисунок 3.12в,г), генерации структуры сети (рисунок 3.12д), задается методика нечеткого вывода для выходной переменной (методом Сугено).

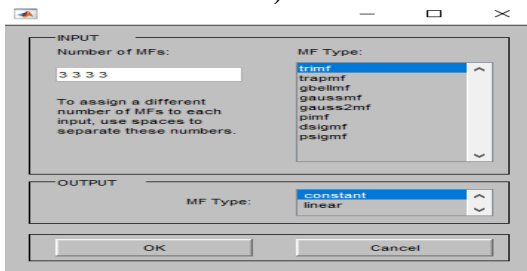
Выбранные и скорректированные лингвистические переменные для входных данных определены как показано на рисунке 3.12г.



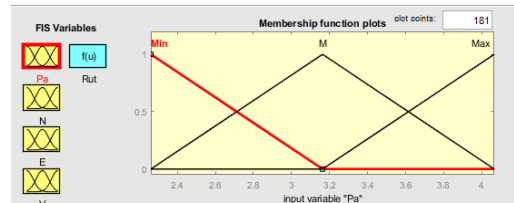
а)



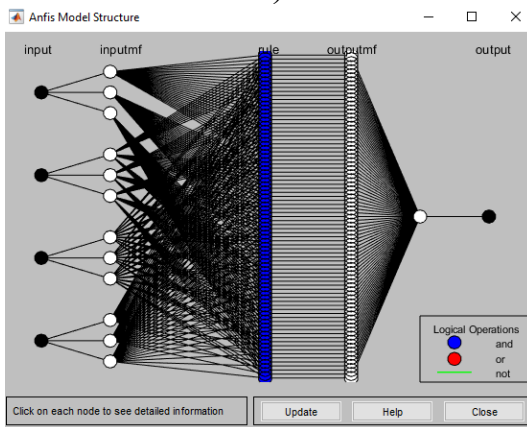
б)



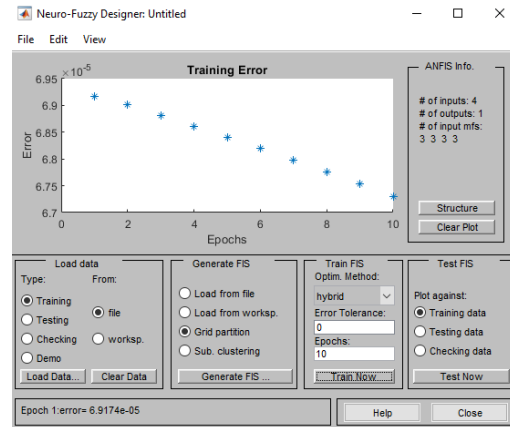
в)



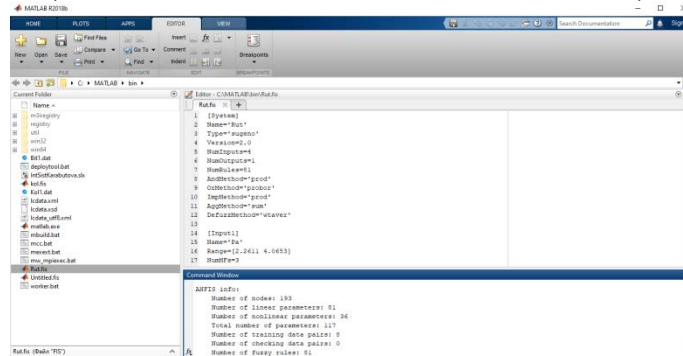
г)



д)



ж)



и)

а) файл с обучающими выборками; б) загрузка данных; в) задание параметров нечеткой системы; г) переменная « $P_a$ » (переменные « $N$ », « $E$ » и « $V$ » заданы аналогично); д) генерация нейронной сети; ж) процесс обучения нейросети; м) отображение процесса обучения

Рисунок 3.12 -Процедура создания нейро-нечеткой сети в системе *Matlab*

Запускается процедура обучения сети (рисунок 3.12ж), при этом задано 10 эпох обучения. Процесс обучения отображается в командном окне *Matlab* (рисунок 3.12и), где выведено значение среднеквадратической ошибки *RMSE* результата обучения равное 0,000069.

На разработанную нейронную сеть получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ[84].

### 3.4 Создание интеллектуальной системы на основе двух нейронных сетей

Обобщенная модель является гибридной интеллектуальной системой и состоит из двух нейронных сетей. Схема приведена на рисунке 3.13.

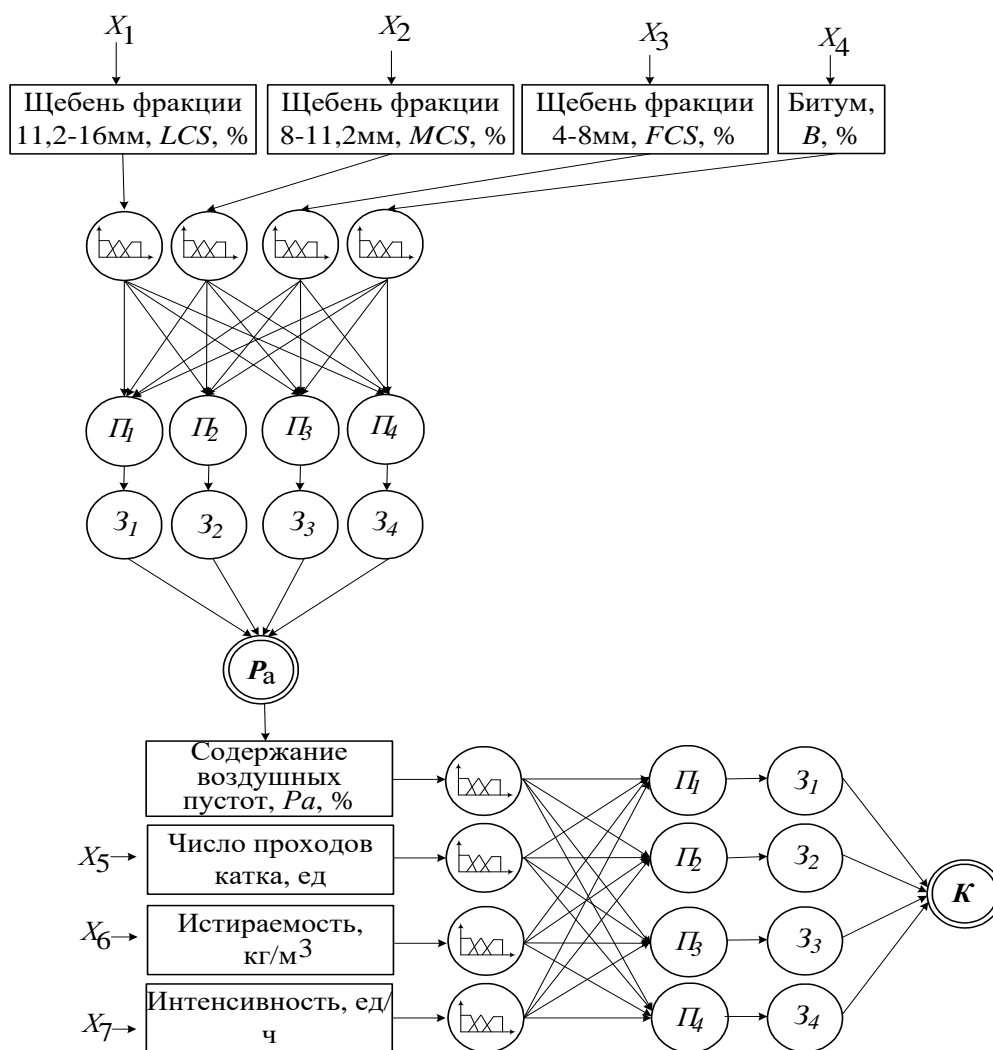


Рисунок 3.13 – Обобщенная модель интеллектуальной системы

Обобщенная модель интеллектуальной системы реализована в среде визуально-блочного имитационного моделирования *Simulink* компьютерной программы *Matlab* (рисунок 3.14).

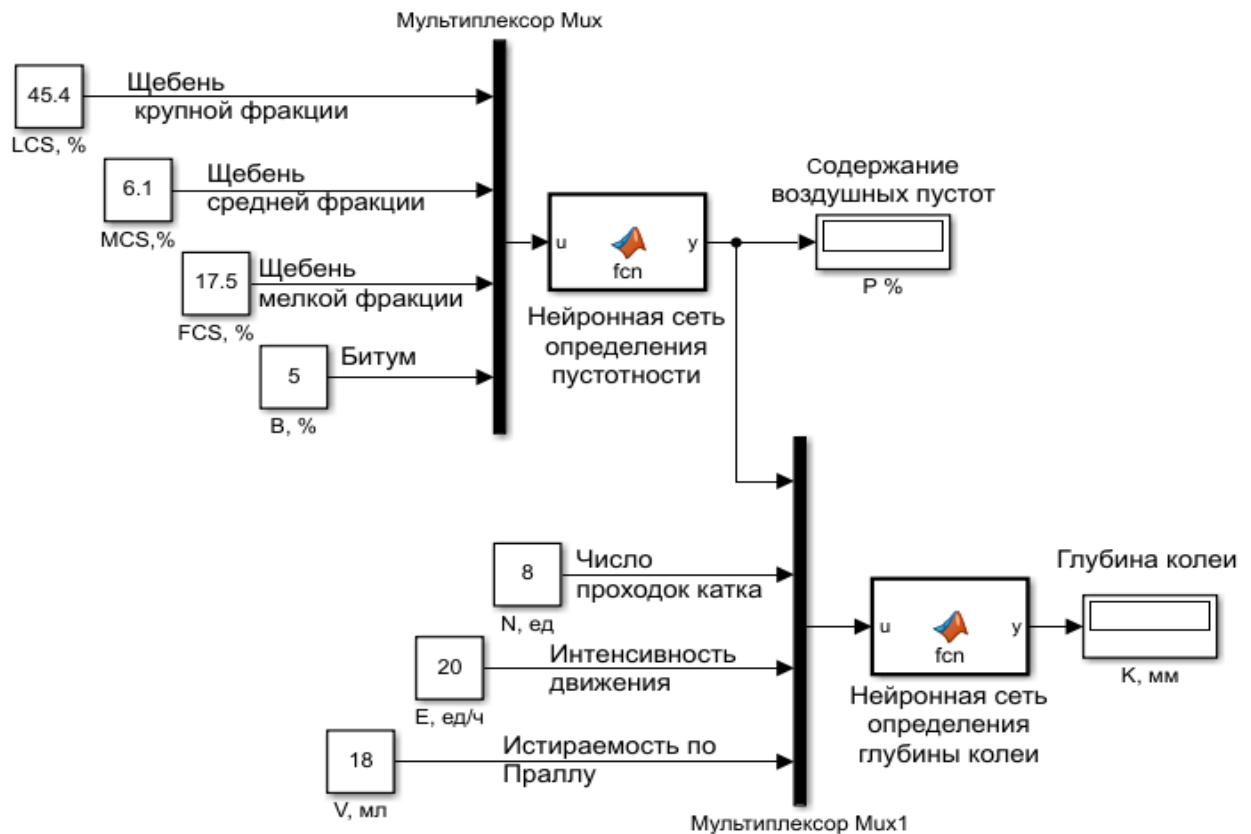


Рисунок 3.14 – Программа интеллектуальной системы для расчета глубины колеи функции в среде *Simulink* компьютерной программы *Matlab*

В среде *Simulink* создается файл *\*.mlapp*, в котором создается модель. Модель состоит из блока исходных данных, которые для удобства заносятся в блоки *Constant*, блока мультиплексов *Mux* и *Mux1* и блока *Fuzzy Logic*.

Входные значения представляются как векторы, они передаются в блоки мультиплексов *Mux* и *Mux1*. После объединения последовательно передаются в блоки *Fuzzy Logic*, где с их использованием выполняется нечеткий вывод.

Так значение переменной «Содержание воздушных пустот» рассчитывается в блоке *Fuzzy Logic*. Это выходное значение определяет и



содержит совместное влияние на глубину колеи параметров содержания щебня различных фракций (*LCS*, *MCS*, *FCS*) и битума (*B*). Далее этот сигнал со значением входных переменных число проходов катка (*N*), истираемость (*V*) и интенсивность (*E*) поступает через мультиплексор *Mux1* в блок *Fuzzy Logic*, выполняется нечеткий вывод и рассчитывается значение глубины колеи.

### 3.5 Выводы по главе 3

1. Разработана модель определения физических параметров и эксплуатационных показателей в виде интеллектуальной системы гибридного типа, построенной на основе двух нейро-нечетких сетей.

2. Определен и обоснован физический смысл зависимости параметра содержание воздушных пустот от структуры асфальтобетонной смеси. Обосновано, что физические и эксплуатационные свойства асфальтобетона тесно связаны с его структурой. Важнейшим процессом структурообразования является процесс уплотнения асфальтобетонной смеси.

3. Одной из самых распространенных проблем, возникающих при эксплуатации автомобильных дорог, является колееобразование, что определяет выбор выходных параметров: содержание воздушных пустот, глубина колеи. Факторы, влияющие на выходные параметры, предложено разделить на пять групп: факторы структурообразования, проектные, эксплуатационные, технические, технологические.

4. Построена нейро-нечеткая сеть определения содержания воздушных пустот;

5. Построена нейро-нечеткая сеть определения глубины колеи;

6. Построена интеллектуальная система для оценки основных физических и эксплуатационных показателей покрытия автодороги, основанную на нейро-нечеткой сети оценки физического параметра асфальтобетонного дорожного покрытия и нейро-нечеткой сети оценки

основного эксплуатационного показателя дорожных покрытий с реализацией модели интеллектуальной системы в среде *Matlab+Neuro-Fuzzy Designer*.

## ГЛАВА 4. ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Использование среды *MatLab* позволяет создавать самые реальные имитационные модели объектов и процессов в различных отраслях производства. В результате без проведения дополнительных испытаний на основании уже существующей базы экспериментальных данных может быть получен необходимый параметр или показатель.

В главе 3 в среде *MatLab* и *Simulink* разработана модель, которая позволяет выполнять оценку и прогноз глубины колеи асфальтобетонных дорожных покрытий. В рамках данного раздела необходимо проверить адекватность результатов работы нейронных сетей и обобщенной модели и достоверность результатов, сопоставить ее работу с независимыми экспериментальными данными.

### 4.1 Цель, задачи и постановка численного эксперимента

Для разработанной интеллектуальной системы, по которой получены расчетные значения физического параметра и эксплуатационного показателя асфальтобетонного дорожного покрытия, необходима проверка, основанная на экспериментальных исследованиях.

Важным и особенно ответственным этапом решения задачи является выбор исходных данных для настройки сети и их обработка. Набор используемых данных должен быть достаточно полным, не противоречивым и должен соответствовать области описания нейронной сети.

Нейронные сети, разработанные в главе 3, были построены на основе фактических отобранных данных – выборках обучающих данных. При проведении проверки решено дополнительно выполнить нормирование входных данных и сравнить точность сети в нормированном и привычном числовом виде представления обучающих и тестовых данных. Под

нормированием данных будем понимать представление входных данных в безразмерном виде в виде числа, принадлежащего диапазону  $[0;1]$ .

Также значительный интерес представляет такое минимальное количество наборов обучающих опытных данных, при котором каждая нейронная сеть и интеллектуальная система в целом будут работать адекватно с достаточной достоверностью. При этом необходимо определить значение достаточной достоверности и допустимых отклонений.

**Цель численного эксперимента:** проверка адекватности работы нейронных сетей и обобщенной интеллектуальной системы с определением зависимостей выходного параметра от входных.

Для определения адекватности необходимо определить критерий точности прогнозирования числового ряда. Таким критерием может быть ошибка отклонения прогнозируемых значений от фактических значений.

В таком случае, сформулируем **задачи численного эксперимента:**

1. Определить адекватность результатов вычислений нейронных сетей и интеллектуальной системы путем определения ошибки вычислений;
2. Определить зависимость величины ошибки вычислений от числа обучающих выборок;
3. Определить влияние нормирования в диапазоне  $[0;1]$  входных данных на точность результата и работу интеллектуальной системы;
4. Получить зависимости выходного параметра от входных и провести анализ полученных результатов.

Численный эксперимент выполнялся в три этапа:

I этап: проверка адекватности определения физического параметра содержания воздушных пустот с помощью нейронной сети.

II этап: проверка адекватности определения эксплуатационного показателя глубины колеи с помощью нейронной сети.

III этап: проверка адекватности определения физического параметра и эксплуатационного показателя с помощью интеллектуальной системы.

Адекватность нейронных сетей и интеллектуальной системы следует определять на числовых рядах обучающей выборки для того, чтобы убедиться в корректности проведенной процедуры настройки, и на числовых рядах тестовой выборки, специально предназначенной для определения достоверности результатов настроенной сети.

В соответствии с исследованиями, проведенными в главе 2, минимальное число выборок – 8. Для определения зависимости адекватности системы от числа обучающих выборок, проведена предварительная настройка сетей и системы по 8, 10, 12, 14 выборкам обучающих данных.

Проверка на адекватность сети проведена по 5 выборкам тестовых данных. Выбор тестовых настроек не оказывает влияния на точность настройки.

Экспериментальные данные, используемые в численном эксперименте, получены в главе 2.

#### **4.2 Нормирование (нормализация) входных данных**

Нормирование данных – приведение входных данных к безразмерному виду от 0 до 1. Эта процедура имеет очень важное значение, т. к. обеспечивает соответствие размерности входных данных. В решаемой задаче размерности входных данных отличаются на несколько порядков. Так при содержании битума равном 5,0% содержание щебня крупной фракции составляет 45,4% (один порядок), при значении содержания воздушных пустот 2,2611% интенсивность движения 125 ед/ч (два порядка).

В таком случае, переменные вероятно будут оказывать разное влияние на выходной параметр и сеть будет плохо обучаться. Именно для исключения данного явления мы дополнительно проведем нормирование входных данных и проверим, как это повлияет на результат.

Для нормирования входных переменных используем формулу:

$$y_n = \frac{y_{\max} - y_i}{y_{\max} - y_{\min}}, \quad (4.1)$$

где  $y_n$  – нормированное значение переменной;

$y_{\max}$  – максимальное значение переменной;

$y_{\min}$  – минимальное значение переменной.

Также можно предположить, что нормирование входных данных позволит программе работать быстрее, т. к. нормированные данные одного порядка проще обрабатывать, в результате сеть будет настраиваться быстрее и корректнее.

В дальнейших исследованиях при выполнении численного эксперимента будем проверять скорость настройки и точность результатов исследования с учетом нормирования входных данных (таблица 4.1, таблица 4.2).

Таблица 4.1 – Нормированные значения исходных данных нейронной сети для определения содержания воздушных пустот

№ п/п	Щебень фракции 11,2-16мм, %	Щебень фракции 8-11,2мм, %	Щебень фракции 4-8мм, %	Битум, %	$P_a$ , %
1.	0,25	0,62	0,95	0,67	2,3948
2.	0,90	0,01	1,00	0,33	2,5082
3.	0,11	0,72	0,95	1,00	3,4157
4.	0,00	0,78	0,81	0,00	3,8448
5.	0,90	0,01	0,81	0,00	4,0653
6.	0,89	0,00	0,81	0,67	2,5118
7.	0,88	0,12	1,00	0,67	2,2611
8.	1,00	1,00	0,00	0,33	3,0468
9.	0,30	0,64	0,97	1,00	2,3567
10.	0,03	0,76	0,81	0,00	3,8336
11.	0,99	0,01	0,78	0,67	2,5018
12.	0,92	0,93	0,12	0,33	3,0468
13.	0,37	0,66	0,42	0,67	2,9685
14.	0,84	0,13	0,97	0,67	2,4099
15.	0,25	0,72	0,98	0,67	2,1560
16.	0,01	0,80	0,79	0,00	3,8015
17.	0,92	0,01	0,82	0,00	4,2536
18.	0,26	0,64	0,92	0,67	2,5632
19.	0,92	0,05	0,72	0,00	4,1205

Таблица 4.2 – Нормированные значения обучающей выборки нейронной сети для определения глубины колеи

№ п/п	Содерж. возд. пустот $P_a$ , %	Число проходов катка $N$ , ед	Интенсивность движения $E$ , ед/ч	Истираемость $V$ , мл	Глубина колеи, мм
1.	0,86	0,25	1,00	0,00	25
2.	0,87	0,75	1,00	1,00	18
3.	0,93	1,00	0,95	0,63	20
4.	0,36	0,50	0,23	0,88	14
5.	0,93	0,75	0,86	0,50	15
6.	0,86	0,00	0,86	1,00	17
7.	0,93	1,00	0,86	0,38	25
8.	0,86	0,00	0,68	0,38	23
9.	0,56	0,50	0,65	0,13	24
10.	0,56	0,25	0,68	0,13	18
11.	0,12	0,75	0,55	0,50	16
12.	0,12	1,00	0,50	0,25	18
13.	0,99	1,00	0,45	0,38	25
14.	0,32	0,75	0,14	0,63	18
15.	0,37	0,25	0,14	0,38	22
16.	1,00	0,75	0,05	0,38	30
17.	1,00	0,75	0,00	0,25	30
18.	0,00	0,75	0,82	0,75	5
19.	0,00	1,00	0,86	0,63	10

### 4.3 Выбор и обоснование критерия адекватности настроенной нейронной сети (интеллектуальной системы)

Выполнение проверки адекватной работы и достоверности настроенной нейронной сети и ее работа в среде *MatLab* производится с помощью процедуры *RuleViewer*.

Для определения адекватности необходимо определить точность прогнозирования временных рядов и ошибку отклонения прогнозируемых значений от фактических. Точность является показателем качества модели временного ряда, которая представляет результат процесса его моделирования. Существуют разные методики определения ошибки вычислений. В литературе представлены следующие варианты определения критерия точности числовых временных рядов [104]:

средняя абсолютная ошибка в процентах (*MAPE* «*Mean absolute percentage error*»),

средняя абсолютная ошибка (*MAE* «*Mean absolute error*»),

среднеквадратичная ошибка (*MSE* «*Mean squared error*»),

квадратный корень из среднеквадратичной ошибки (*RMSD* «*Root-mean-square deviation*»),

средняя ошибка (*ME* «*Mean*»),

стандартное отклонение (*SD* «*Standard deviation*»).

В данных исследованиях принято определять среднюю абсолютную ошибку в процентах *MAPE*. Способ определения ошибки принят, т.к. выбранная ошибка позволит:

- оценить точность методики использования нейронных сетей;
- наглядно представить величину ошибки значений, полученных при использовании нейронных сетей, в сравнении с фактическими значениями;
- сравнить два ряда прогнозируемых значений (полученных на основании нормированных и ненормированных данных) с фактическими, полученными в лабораторных условиях и при проведении натуральных исследований.

Средняя абсолютная ошибка в процентах *MAPE* вычислялась по формуле:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \bar{y}_i|}{y_i} \cdot 100\%, \quad (4.2)$$

где  $y_i$  – фактическое значение переменной, полученное в результате лабораторных испытаний или натуральных исследований;

$\bar{y}_i$  – значение переменной, полученное при использовании нейронной сети;

$n$  – количество испытаний.

При определении абсолютной ошибки под количеством испытаний будем понимать количество тестовых выборок. В процессе подготовки данных и планировании необходимого числа наблюдений было решено, что



обучающая выборка содержит 8-14 наборов данных, тестовая выборка содержит 5 наборов данных.

## 4.4 Выполнение численных экспериментов

### 4.4.1 Проверка адекватности работы нейронной сети определения содержания воздушных пустот

#### Проверка адекватности на примерах из обучающей выборки.

На рисунке 4.1 приведен расчет функции  $P_a = f(LCS, MCS, FCS, B)$  для восьмого набора данных для настройки разработанной модели.

Для расчета значений функции  $P_a = f(LCS, MCS, FCS, B)$  заданы значения входных переменных, полученные в результате подбора составов в лаборатории (см. таблицу 4.1

Для заданных исходных данных  $LCS = 39,9\%$ ;  $MCS = 2,8\%$ ;  $FCS = 26,8\%$ ;  $B = 5,1\%$  получено значение  $P_a = 3,05\%$ , которое отличается от заданного в начальной выборке 3,0468 на величину 0,0032, что говорит о том, что настройка проведена корректно.

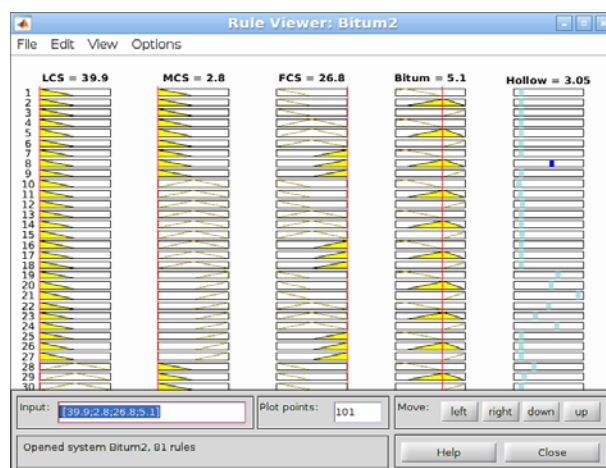


Рисунок 4.1 - Расчеты функции  $P_a = f(LCS, MCS, FCS, B)$  по разработанной модели нейросети в процедуре *RuleViewer*

### Проверка адекватности на примерах из тестовой выборки.

Важным условием при подготовке тестовых данных является то, чтобы тестовые данные входили в диапазоны обучающих данных.

Результат проведенной проверки на адекватность настроенной нейросети по тестовой выборке для нормированных и ненормированных входных значений приведен в таблице 4.3. На основании данных таблицы 4.3 определена средняя абсолютная ошибка при получении содержания воздушных пустот.

Таблица 4.3 – Определение содержания воздушных пустот

№ п/п	1	2	3	4	5	$\sum_{i=1}^n \frac{ y_i - \bar{y}_i }{y_i}$	MAPE, %
$P_a$ , % Лаб. усл.	2,156	3,8015	4,2536	2,5632	4,1205		
$P_a$ , % <i>MatLab</i>	2,23	3,72	4,20	2,16	3,60	0,352	7,040
$P_a$ , % <i>MatLab</i> <i>норм</i>	2,06	3,76	4,28	2,18	3,73	0,306	6,118

На основании представленных вычислений можно сделать следующие выводы:

- 1) Точность вычислений с использованием методики нейронных сетей при 8 наборах обучающих данных составляет 93,882%.
- 2) Величина средней абсолютной ошибки составляет 6,118% при выполнении процедуры нормирования, 7,040% - при фактическом числовом представлении входных данных.
- 3) Точность вычислений при выполнении процедуры нормирования незначительно, но превышает точность при ненормированном представлении входных данных.
- 4) Обучение сети на выборках нормированных значений проводится быстрее.

С учетом вышесказанного, следует увеличить число обучающих выборок, а также выполнять нормирование входных данных для дальнейших исследований.

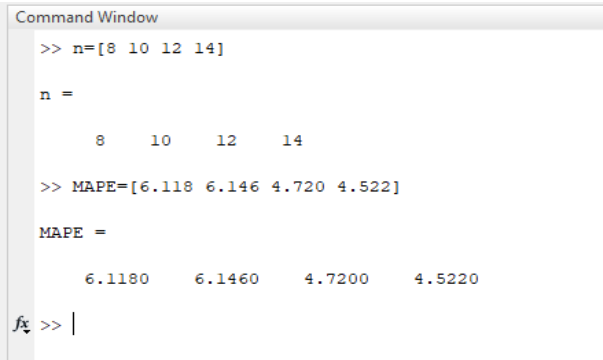
Процедура, аналогичная рассмотренной выше, проведена для нейронных сетей, настроенных по 10, 12, 14 выборкам входных данных. Результаты представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Определение абсолютной ошибки при определении содержания воздушных пустот

№	1	2	3	4
$n$	8	10	12	14
$MAPE, \%$	6,118	6,146	4,720	4,522

Для определения зависимости величины ошибки от количества обучающих выборок использована процедура *Curve Fitting Tool* программного комплекса *Matlab*. Процедура позволяет построить аппроксимирующую кривую функции, приближенной к функции зависимости величины ошибки от количества обучающих выборок.

На основании данных таблицы 4.4 в командном окне *Command Window* задается множество значений числа обучающих выборок  $n$  и множество значений абсолютной ошибки  $MAPE$ .



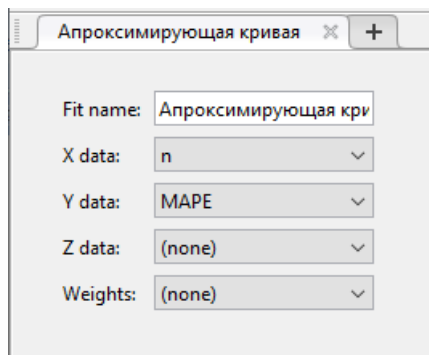
```

Command Window
>> n=[8 10 12 14]
n =
     8    10    12    14
>> MAPE=[6.118 6.146 4.720 4.522]
MAPE =
    6.1180    6.1460    4.7200    4.5220
fx >> |
  
```

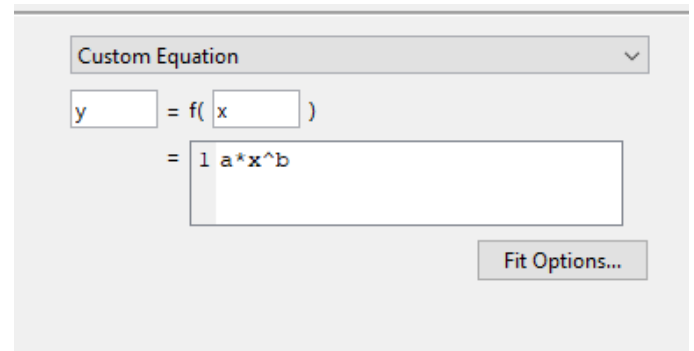
Рисунок 4.2 – Ввод данных в командное окно *Command Window*

Затем вызывается процедура *Curve Fitting Tool* и производится выбор множества значений  $X$  и множества значений  $Y$  для точек, к которым выполняется приближение (рисунок 4.3 а).

После выбора исходных данных задается пользовательская аппроксимирующая функция *Custom equation* в параметрическом виде. Наиболее подходящей в физическом смысле принята степенная функция вида  $y=a*x^b$  (рисунок 4.3 б).



а)

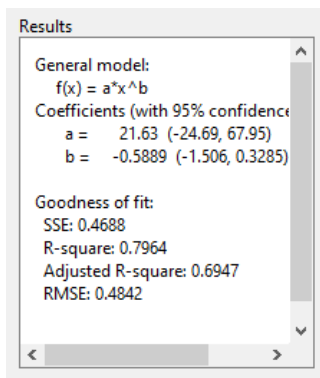


б)

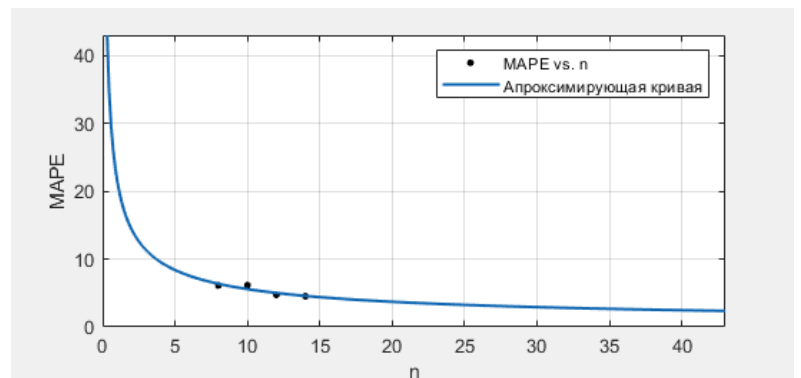
а) выбор исходных данных; б) выбор функции приближения.

Рисунок 4.3 – Задание исходных данных

В результате расчета получена аппроксимирующая функция  $y=21,63x^{-0,5889}$ . Коэффициенты  $a$  и  $b$  определены с достоверностью 95% в следующих доверительных границах:  $a = (-24.69, 67.95)$ ;  $b=(-1.506, 0.3285)$ .



а)



б)

а) вывод параметров аппроксимирующей функции; б) график приближенной функции аппроксимации  $y=21,63*x^{(-0,5889)}$ .

Рисунок 4.4 – Результат аппроксимации

### 3.6.2 Проверка адекватности работы нейронной сети определения глубины колеи

Выполнение проверки адекватной работы и достоверности настроенной нейронной сети производится аналогично п. 3.6.1 с помощью процедуры *RuleViewer* (рисунок 3.5). При выполнении дальнейших исследований проведено нормирование входных данных.

#### Проверка адекватности на примерах обучающей выборки.

На рисунке 3.5 приведен расчет функции  $K = f(P_a, N, E, V)$  для первого набора данных для настройки разработанной модели. Для расчета значений функции  $K = f(P_a, N, E, V)$  задаем значения входных переменных, полученные в результате лабораторных испытаний и натурных исследований (см. таблицу 3.2).

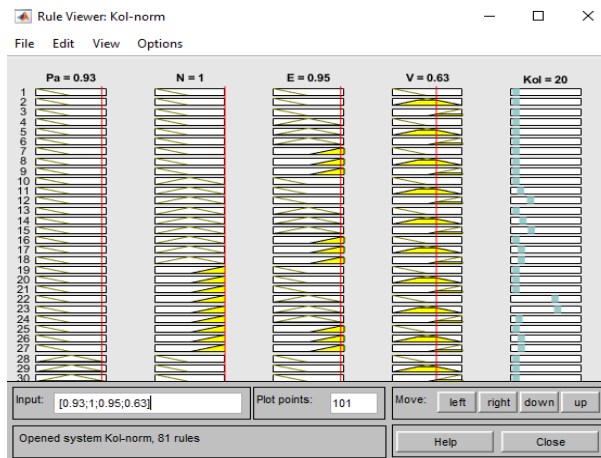


Рисунок 4.5 - Расчеты функции  $K = f(P_a, N, E, V)$  по разработанной модели нейросети в процедуре *RuleViewer*

Для заданных исходных данных  $P_a = 0,93$ ;  $N = 1,0$ ;  $E = 0,95$ ;  $V = 0,63$  ( $P_a = 2,3948$ ;  $N = 8$ ;  $E = 20$ ;  $V = 18$  соответственно) получено значение  $Kol = 20$ , что говорит о корректной настройке сети.

### Проверка адекватности на примерах из тестовой выборки

Дополнительно была подготовлена тестовая выборка входных данных, состоящая из пяти наборов данных. Предварительно входные данные были нормированы в соответствии с обучающей выборкой. Нормированные значения тестовой выборки нейронной сети для определения глубины колеи приведены в таблице 4.2.

Результаты проведенной проверки на адекватность настроенной нейросети для 8, 10, 12, 14 тестовых выборок приведен в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Определение абсолютной ошибки при определении глубины колеи

№	1	2	3	4
<i>n</i>	8	10	12	14
<i>MAPE, %</i>	45,788	24,662	15,792	16,919

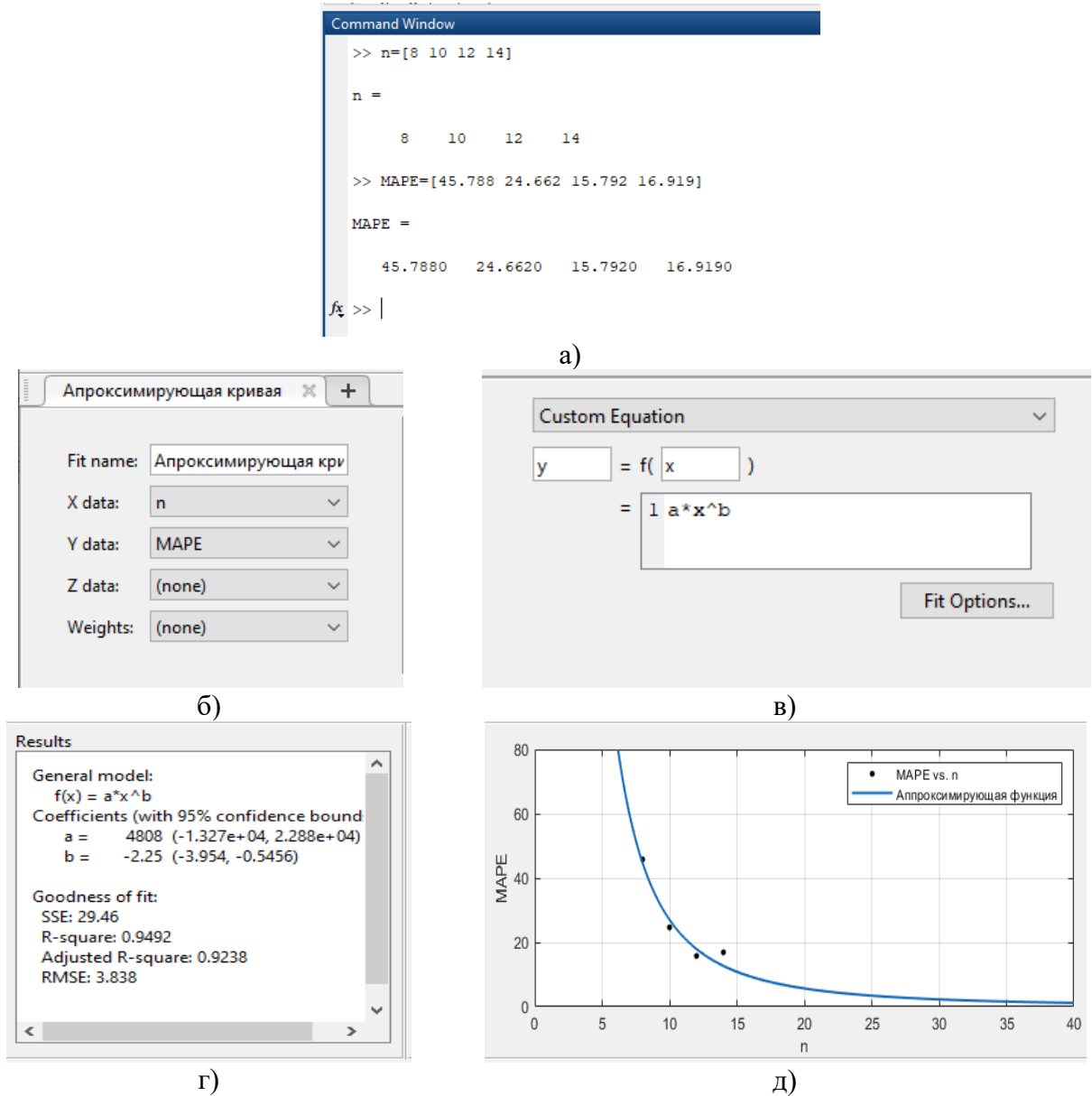
На основании представленных вычислений можно сделать следующие выводы:

1) Точность вычислений с использованием методики нейронных сетей при 14 наборах нормированных обучающих данных составляет 84,208%.

2) Величина средней абсолютной ошибки составляет 15,792% при выполнении процедуры нормирования.

Определение зависимости величины ошибки от количества обучающих выборок проведено аналогично в процедуре *Curve Fitting Tool* приложения *Matlab* (рисунок 4.6 а-д).

В результате расчета получена аппроксимирующая функция  $y=4808x^{-2,25}$ . Коэффициенты *a* и *b* определены с достоверностью 95%.



а) ввод данных в командное окно *Command Window*; б) выбор исходных данных; в) выбор функции приближения; г) вывод параметров аппроксимирующей функции; д) график приближенной функции аппроксимации  $y=4808 \cdot x^{(-2,25)}$

Рисунок 4.6 – Результат аппроксимации

#### 4.4.3 Проверка адекватности работы обобщенной модели

Численный эксперимент выполнялся на имитационной модели в среде *Simulink*. В рамках исследования оценивался физический параметр и эксплуатационный показатель асфальтобетона в покрытии.

На рисунке 4.7 представлена программа интеллектуальной системы для расчета глубины колеи в среде *Simulink* приложения *Matlab*.

Для проведения численного эксперимента в программе необходимо задать входные данные в специальные ячейки блока *Constant*.

### 1. Проверка адекватности на примерах из обучающей выборки.

На рисунке 4.7 приведен расчет функции  $K = f(P_a(LCS, MCS, FCS, B), N, E, V)$  для первого набора данных для настройки разработанной модели.

Для заданных нормированных исходных данных  $LCS = 0,25$ ;  $MCS = 0,62$ ;  $FCS = 0,95$ ;  $Bitum = 0,67$ ;  $N = 1,0$ ;  $E = 0,95$ ;  $V = 0,63$  получено значение  $K = 20$ , что говорит о том, что настройка проведена корректно.

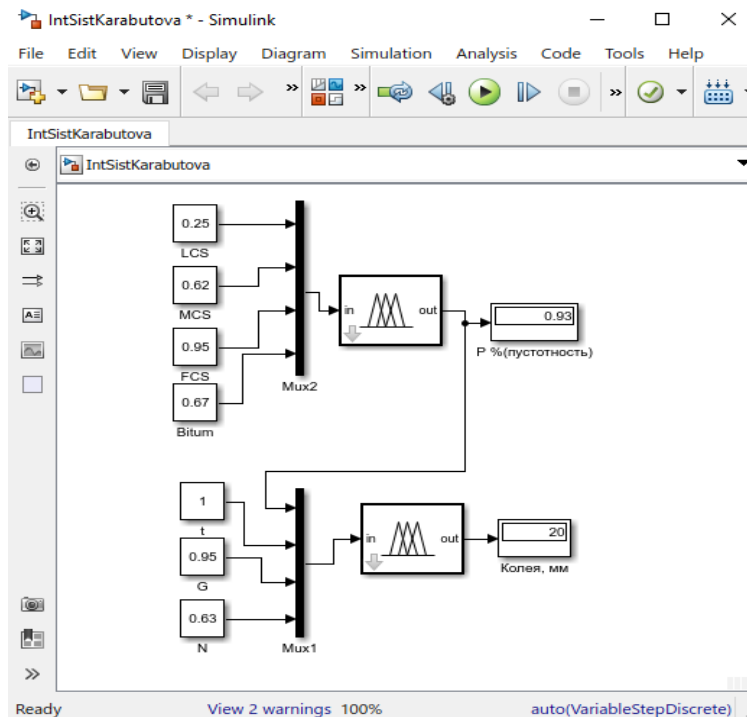


Рисунок 4.7 - Программа интеллектуальной системы для расчета глубины колеи в среде *Simulink* приложения *Matlab*

### Проверка адекватности на примерах из обучающей выборки

Результаты проведенной проверки на адекватность настроенной интеллектуальной сети совпадают с результатами проверки на адекватность



настроенных нейронных сетей, т.к. в качестве тестовых выборок были использованы одни и те же выборки.

Результаты проверки на адекватность представлены на рисунке 4.6. При этом точность интеллектуальной системы 95% достигается при обучении на 22 наборах исходных данных в соответствии с графиком приближенной функции аппроксимации  $y=4808*x^{(-2,25)}$ .

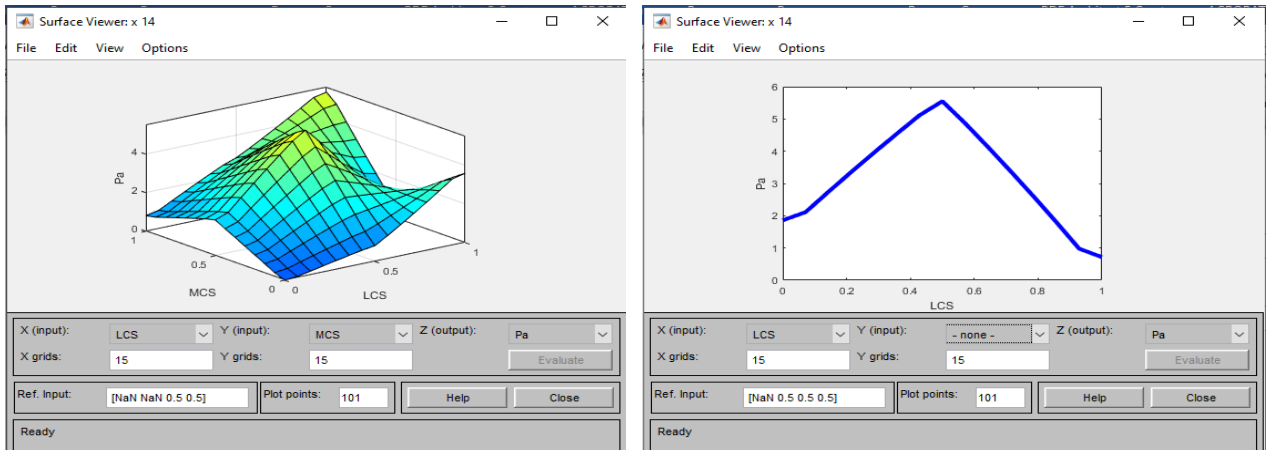
#### 4.5 Определение зависимостей выходного параметра от входных

Разработанная интеллектуальная система позволяет установить основные зависимости выходных параметров от входных и наглядно представить их в форме двумерных и трехмерных графиков.

Для визуального представления использована процедура *Surface Viewer* программы *Matlab*. В результате исследований получены семейства функций, выражающие закономерности зависимостей физического параметра от содержания компонентов асфальтобетона, эксплуатационного параметра глубины колеи от физических, проектных, технических и технологических характеристик и эксплуатационных факторов.

Трехмерная зависимость переменной содержания воздушных пустот  $P_a$  от двух переменных содержания щебня крупной фракции  $LCS$  и средней фракций  $MCS$   $P_a=f(LCS; MCS)$  показана на рисунке 4.8а. 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 4.8б 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  $P_a=f(LCS; MCS)$ ; б) график функции нечеткого вывода зависимости  $P_a=f(LCS)$

Рисунок 4.8 - Представление системы нечеткой модели в *SurfaceViewer*

Для построения и анализа графиков зависимости переменной содержания воздушных пустот  $P_a$  от входных параметров используем значения таблицы 4.6, представленных в абсолютном виде. Значения получены с помощью настроенной нейронной сети.

Для построения графика вида  $y=f(x_i)$  приняты значения остальных входных переменных  $x$  в нормированном виде 0,5. График построен для наиболее полной нейронной сети, настроенной по 14 наборам входных данных.

Таблица 4.6 – Исходные данные для построения зависимостей  $P_a$

Норм. Знач.	$P_a=f(LCS)$		$P_a=f(MCS)$		$P_a=f(FCS)$		$P_a=f(B)$	
	$LCS, \%$	$P_a, \%$	$MCS, \%$	$P_a, \%$	$FCS, \%$	$P_a, \%$	$B, \%$	$P_a, \%$
<b>1,0</b>	47,2	1,86	11,40	0,82	26,80	0,90	5,20	0,02
<b>0,9</b>	46,47	2,36	10,54	1,65	25,82	1,87	5,17	1,14
<b>0,8</b>	45,74	3,23	9,68	2,64	24,84	2,84	5,14	2,3
<b>0,7</b>	45,01	4,07	8,82	3,62	23,86	3,81	5,11	3,46
<b>0,6</b>	44,28	4,89	7,96	4,59	22,88	4,78	5,08	4,63
<b>0,5</b>	43,55	5,55	7,10	5,55	21,90	5,55	5,05	5,55
<b>0,4</b>	42,82	4,57	6,24	5,07	20,92	5,11	5,02	5,03
<b>0,3</b>	42,09	3,53	5,38	4,48	19,94	4,67	4,99	4,45
<b>0,2</b>	41,36	2,44	4,52	3,89	18,96	4,22	4,96	3,88
<b>0,1</b>	40,63	1,31	3,66	3,28	17,98	3,78	4,93	3,31
<b>0,0</b>	39,9	0,72	2,8	2,84	17,00	3,42	4,90	2,75

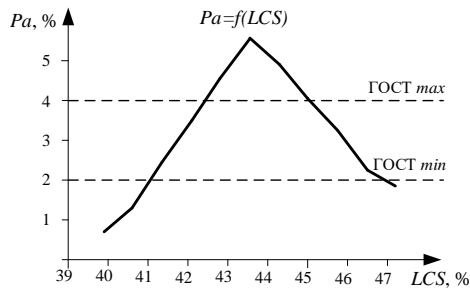
На рисунках 4.9-4.12 приведены двумерные графики зависимостей содержания воздушных пустот  $P_a$  от содержания щебня крупной, средней, мелкой фракций ( $LCS$ ,  $MCS$ ,  $FCS$ ) и битума ( $B$ ). Установлено, что аппроксимирующая функция является полиномом второй степени – квадратичной функцией.

Двумерный график зависимости содержания воздушных пустот от содержания щебня крупной фракции  $P_a=f(LCS)$  при абсолютных значениях  $MCS=7,10\%$ ,  $FCS=21,90\%$  и  $B=5,05\%$  показан на рисунке 4.9а. Функция аппроксимации имеет вид  $P_a=-0,29LCS^2+25LCS+550$ . Соответствие значения содержания воздушных пустот нормативным требованиям по ГОСТ Р 58406.1 ( $P_a$  в диапазоне 2-4% для лабораторных образцов) достигается при  $LCS=(41,05;42,31); (45,24;46,83)\%$ .

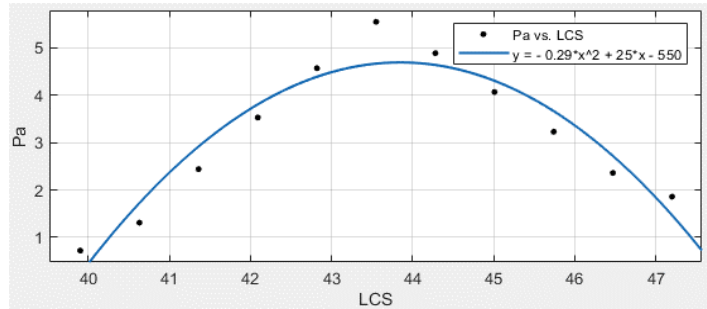
Двумерный график зависимости содержания воздушных пустот от содержания щебня средней фракции  $P_a=f(MCS)$  при абсолютных значениях  $LCS=43,55\%$ ,  $FCS=21,90\%$ ,  $B=5,05\%$  показан на рисунке 4.10а. Функция аппроксимации имеет вид  $P_a=-0,18MCS^2+2,3MCS-2,5$ . Соответствие значения содержания воздушных пустот нормативным требованиям ГОСТ Р 58406.1 достигается при  $MCS=(2,08;4,55); (8,40;10,30)\%$ .

Двумерный график зависимости содержания воздушных пустот от содержания щебня мелкой фракции  $P_a=f(FCS)$  при абсолютных значениях  $LCS=43,55\%$ ,  $MCS=7,10\%$ ,  $B=5,05\%$  показан на рисунке 4.11а. Функция аппроксимации имеет вид  $P_a=-0,13FCS^2+5,3FCS-50$ . Соответствие значения содержания воздушных пустот нормативным требованиям ГОСТ Р 58406.1 достигается при  $FCS=(17,00;18,48);(23,70;25,79)\%$ .

Двумерный график зависимости содержания воздушных пустот от содержания битума  $P_a=f(B)$  при абсолютных значениях  $LCS=43,55\%$ ,  $MCS=7,10\%$ ,  $FCS=21,90\%$  показан на рисунке 4.12а. Функция аппроксимации имеет вид  $P_a=-0,162B^2+1624B-4073$ . Соответствие значения содержания воздушных пустот нормативным требованиям ГОСТ Р 58406.1 достигается при  $B=(4,90;4,97);(5,10;5,15)\%$ .



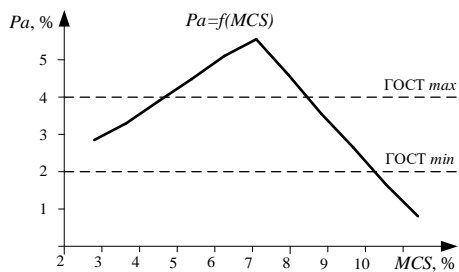
а)



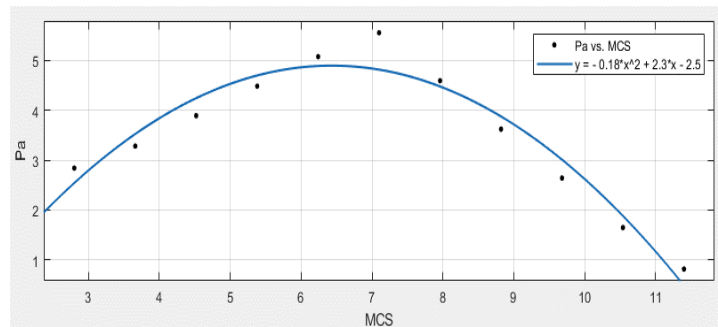
б)

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

Рисунок 4.9 – График зависимости содержания воздушных пустот от содержания щебня крупной фракции  $P_a=f(LCS)$



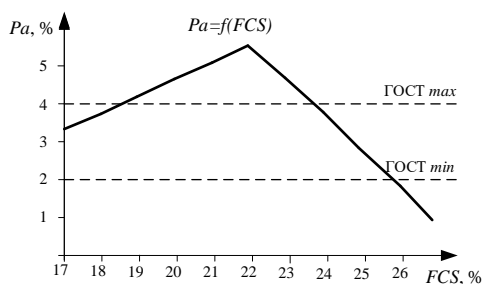
а)



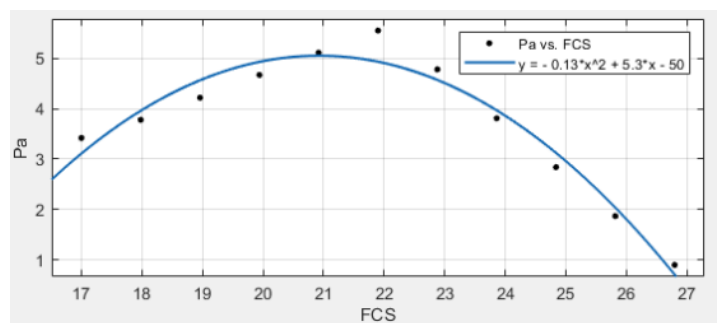
б)

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

Рисунок 4.10 – График зависимости содержания воздушных пустот от содержания щебня средней фракции  $P_a=f(MCS)$



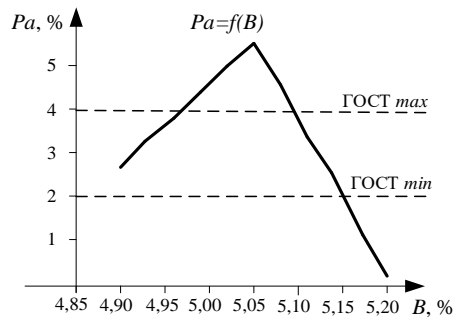
а)



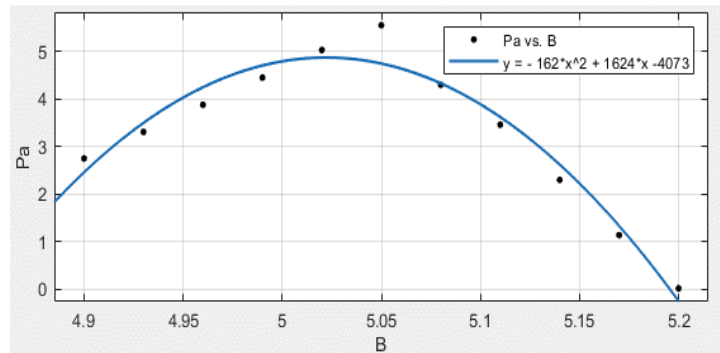
б)

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

Рисунок 4.11 – График зависимости содержания воздушных пустот от содержания щебня мелкой фракции  $P_a=f(FCS)$



а)



б)

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

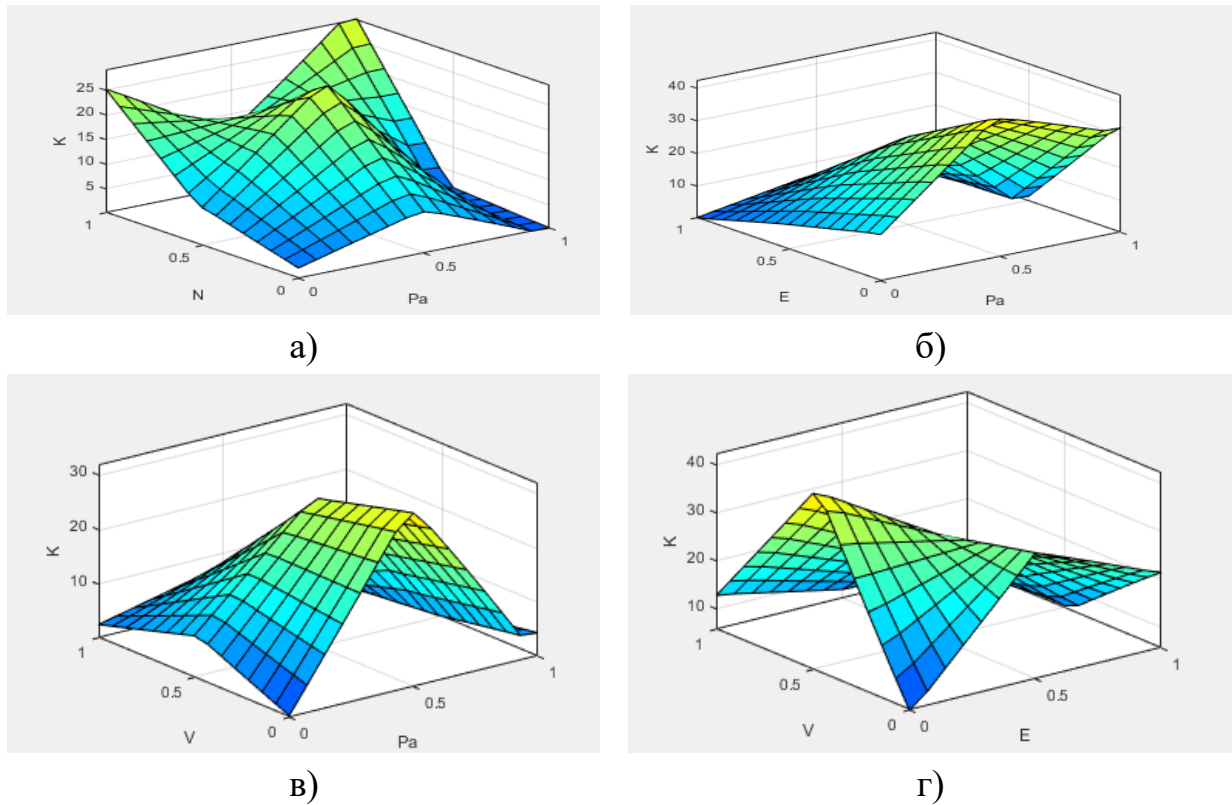
Рисунок 4.12 – График зависимости содержания воздушных пустот от содержания битума  $P_a=f(B)$

Установлено, что в исследуемых диапазонах соблюдаются правила упаковки зерна асфальтобетона. На средних участках рассмотренных графиков наблюдается максимальное значение содержания воздушных пустот и несоответствие нормативному значению ГОСТ Р 58406.1. При процентных соотношениях содержания заполнителя на данных участках происходит раздвижка зерен, при которой образуется большее количество воздушных пустот.

По рассмотренному набору двумерных и трехмерных графиков можно определить необходимое процентное содержание компонентов смеси для получения требуемого содержания воздушных пустот.

На рисунке 4.13 представлены графики трехмерных зависимостей глубины колеи от содержания воздушных пустот  $P_a$  и числа проходов катка  $N$ , интенсивности  $E$ , истираемости  $V$  -  $K=f(P_a, N)$ ;  $K=f(P_a, E)$ ;  $K=f(P_a, V)$ .

Для построения трехмерных зависимостей закрепление переменных произведено аналогично рассмотренному выше.



а) от содержания воздушных пустот и числа проходов катка  $K=f(P_a, N)$ ;

б) от содержания воздушных пустот и интенсивности  $K=f(P_a, E)$ ;

в) от содержания воздушных пустот и истираемости  $K=f(P_a, V)$ ;

г) от истираемости и интенсивности  $K=f(V, E)$ .

Рисунок 4.13 – Трехмерные графики зависимостей глубины колеи

Для построения и анализа графиков зависимостей переменной глубина колеи  $K$  от входных параметров:  $P_a$ ,  $N$ ,  $E$ ,  $V$  используем значения таблицы 4.7, представленных в абсолютном виде. Значения получены с помощью интеллектуальной системы.

Таблица 4.7 – Исходные данные для построения зависимостей  $K$

Норм. Знач.	$K=f(P_a)$		$K=f(N)$		$K=f(E)$		$K=f(V)$	
	$P_a, \%$	$K, \text{мм}$	$N$	$K, \text{мм}$	$E$	$K, \text{мм}$	$V$	$K, \text{мм}$
<b>1,0</b>	4,0653	7,87	16	8,56	125	42,5	23,0	32,0
<b>0,9</b>	3,8853	12,00	15,2	12,3	114	39,9	22,2	31,1
<b>0,8</b>	3,7053	16,20	14,4	16,10	103	36,8	21,4	30,2
<b>0,7</b>	3,5253	20,40	13,6	20,0	92	33,6	20,6	29,3
<b>0,6</b>	3,3453	24,60	12,8	23,9	81	30,5	19,8	28,3
<b>0,5</b>	3,1653	27,50	12	27,5	70	27,5	19,0	27,5
<b>0,4</b>	2,9853	22,30	11,2	24,8	59	23,4	18,2	23,4
<b>0,3</b>	2,8053	16,30	10,4	21,6	48	19,1	17,4	19,5
<b>0,2</b>	2,6253	10,20	9,6	18,5	37	14,7	16,6	15,5
<b>0,1</b>	2,4453	3,86	8,8	15,3	26	10,3	15,8	11,5
<b>0,0</b>	2,2653	1,70	8	12,1	15	6,2	15,0	7,58

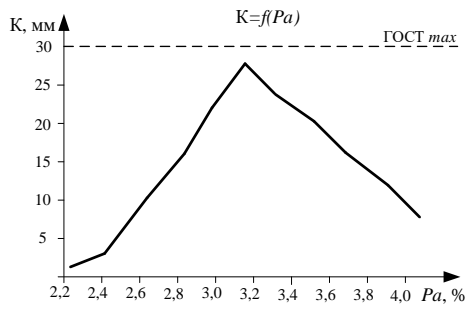
На рисунках 4.14-4.17 приведены двумерные графики зависимостей глубины колеи от содержания воздушных пустот  $P_a$ , числа проходов катка  $N$ , интенсивности  $E$ , истираемости  $V$ . Установлено, что построенная аппроксимирующая функция является полиномом второй степени – квадратичной функцией.

Двумерный график зависимости глубины колеи от содержания воздушных пустот  $K=f(P_a)$  при абсолютных значениях  $N=12$ ед,  $E=70$  ед/ч,  $V=19,0\text{м}^3$  показан на рисунке 4.14. Функция аппроксимации имеет вид  $K=-25 P_a^2+165P_a-246$ . На отрезке  $P_a=(2,2653; 4,0653)\%$  колея не превышает нормативное значение.

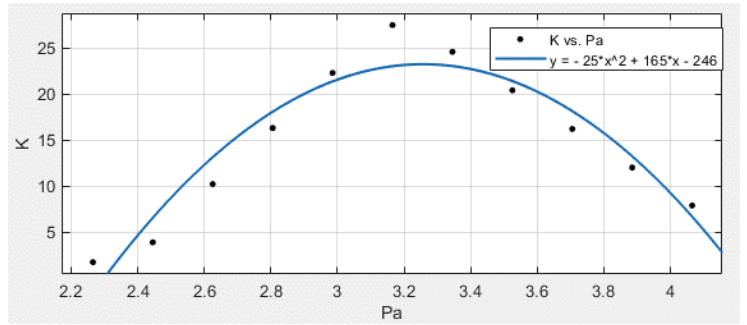
Двумерный график зависимости глубины колеи от числа проходов катка  $K=f(N)$  при абсолютных значениях  $P_a=3,17\%$ ,  $E=70$  ед/ч,  $V=19,0\text{м}^3$  показан на рисунке 4.15. Функция аппроксимации имеет вид  $K=-0,95N^2+22N-107$ . На отрезке  $N=(8;16)\%$  колея не превышает нормативное значение.

Двумерный график зависимости глубины колеи от интенсивности  $K=f(E)$  при абсолютных значениях  $P_a=3,17\%$ ,  $N=12$ ед,  $V=19,0\text{м}^3$  показан на рисунке 4.16. Функция аппроксимации имеет вид  $K=-0,0009E^2+0,4624E-0,8943$ . На отрезке  $E=(15;80)$ ед/ч колея не превышает нормативное значение.

Двумерный график зависимости глубины колеи от истираемости  $K=f(V)$  при абсолютных значениях  $P_a=3,17\%$ ,  $N=12$ ед,  $E=70$  ед/ч показан на рисунке 4.17. Функция аппроксимации имеет вид  $K=-0,142V^2+19V-183$ . На отрезке  $V=(15;21)$  м<sup>3</sup> колея не превышает нормативное значение.



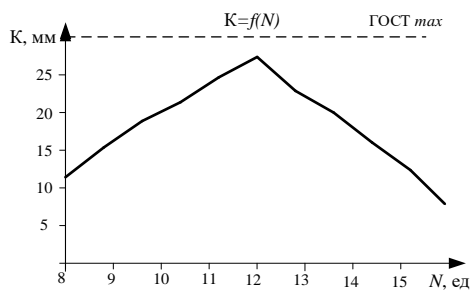
а)



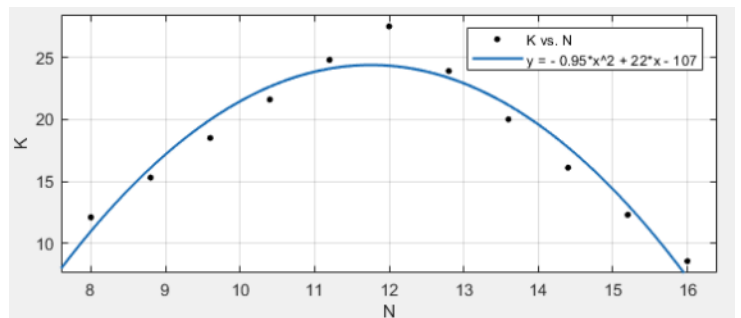
б)

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

Рисунок 4.14 – График зависимости глубины колеи от содержания воздушных пустот  $K=f(P_a)$



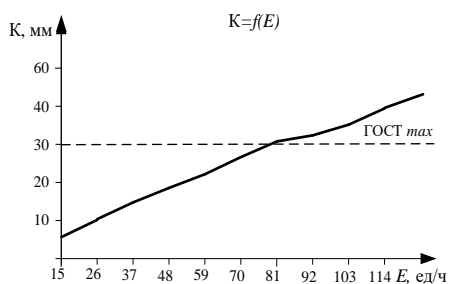
а)



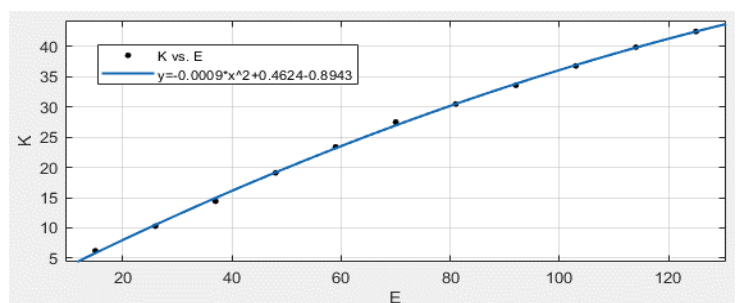
б)

а) функциональная зависимость  $K=f(N)$ ; б) аппроксимирующая функция

Рисунок 4.15 – График зависимости глубины колеи от числа проходов катка  $K=f(N)$



а)

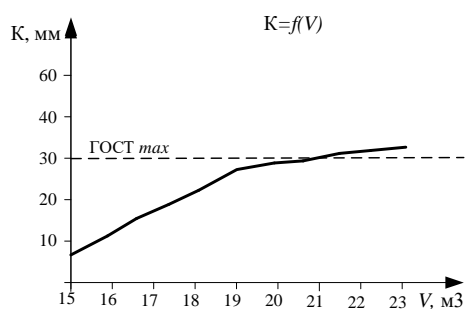


б)

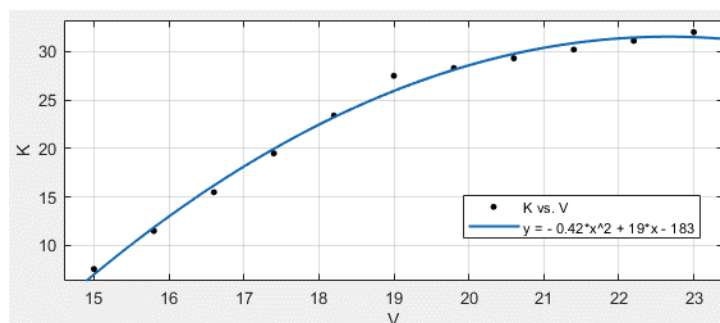
а) функциональная зависимость  $K=f(E)$ ; б) аппроксимирующая функция

Рисунок 4.16 – График зависимости глубины колеи от интенсивности движения транспорта  $K=f(E)$





а)



б)

а) функциональная зависимость  $K=f(V)$ ; б) аппроксимирующая функция  
 Рисунок 4.17 – График зависимости глубины колеи от истираемости  $K=f(V)$

Установлено, на выбранных диапазонах изменение исследуемых параметров пластического колееобразования (содержания воздушных пустот, количества проходов катка) не приводит к превышению нормативных требований ГОСТ 50597-2017 (рисунок 4.14а, 4.15а).

При этом, колея износа (факторы истираемости материала, движения транспорта) имеет большее влияние на образование итогового значения колеи, т. к. на графиках зависимостей глубины колеи от факторов абразивного колееобразования, изображенных на рисунках 4.16а, 4.17а, наблюдаются участки превышения нормативного значения глубины колеи по ГОСТ 50597-2017.

На основе полученных зависимостей и закономерностей были разработаны практические технологические рекомендации с целью совершенствования дорожных покрытий, учитывающие влияние рассмотренных факторов. Рекомендации представлены в Приложении Г.

#### 4.6 Выводы по главе

По итогам численного эксперимента можно сделать следующие выводы:

1. Адекватность вычислений определена с помощью средней абсолютной ошибки *MAPE*, которая позволяет оценить точность вычислений. Выполнены проверка адекватности настройки и адекватности вычислений (точность вычислений) нейронных сетей и интеллектуальной системы. Проверка адекватности настройки по наборам из обучающей выборки для нейронных сетей и интеллектуальной системы показала, что настройка сетей выполнена корректно.

2. Точность вычислений нейронной сети для оценки физического параметра при 14 наборах обучающих данных составляет 95%. Точность вычислений нейронной сети для оценки эксплуатационного показателя при 14 наборах обучающих данных составляет 84%. Точность интеллектуальной системы для оценки эксплуатационного показателя при 14 наборах обучающих данных составляет 84%.

3. Сравнение результатов вычислений, проведенных без нормирования и с нормированием входных данных, позволяет говорить о важном значении данной процедуры, которая приводит к уточнению результатов и скорости обработки вычислений нейронной сети и интеллектуальной системы.

4. Построены степенные аппроксимирующие кривые функции, приближенной к функции зависимости величины ошибки от количества обучающих выборок. Для обеспечения необходимой точности получена функциональная зависимость  $Y = 4808x^{-2,25}$ , позволяющая определить количество обучающих выборок. Установлено, что точность интеллектуальной системы 95% достигается при обучении на 22 наборах исходных данных.

5. На основе разработанной интеллектуальной системы получены семейства функций, наглядно представленные в форме двумерных и трехмерных графиков, которые позволяют установить основные зависимости эксплуатационного параметра глубины колеи от структуры асфальтобетонной смеси, проектных, технических и технологических

характеристик и эксплуатационных факторов. Установлены закономерности упаковки зерна асфальтобетона, их влияние на выходной параметр и получены основные функциональные зависимости. Аппроксимирующие функции установленных зависимостей имеют вид квадратичной параболы. 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.

## **ГЛАВА 5. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

### **5.1 Практическое применение результатов исследований в дорожной и лесохозяйственной отрасли**

Полученные результаты могут быть применены на практике путем реализации:

- в качестве научно обоснованных физических и эксплуатационных параметров асфальтобетонных покрытий;

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

- в качестве алгоритма и компьютерной программы определения физического параметра содержания воздушных пустот и эксплуатационного показателя глубины колеи для использования в дорожных лабораториях и подрядных организациях.

Для дальнейшего использования результаты требуется представить в виде алгоритма для реализации в программном комплексе с целью определения эксплуатационного показателя на начальном этапе проектирования асфальтобетонной смеси.

Для оценки положительного экономического эффекта следует выполнить технико-экономические расчеты.

Обеспечить внедрение результатов в практические процессы проектирования и производства позволит выполнение следующих задач:

1. Разработать алгоритм проектирования интеллектуальной системы оценки физических параметров и эксплуатационных показателей, а также для решения типовых задач;

2. Рассчитать экономический эффект;

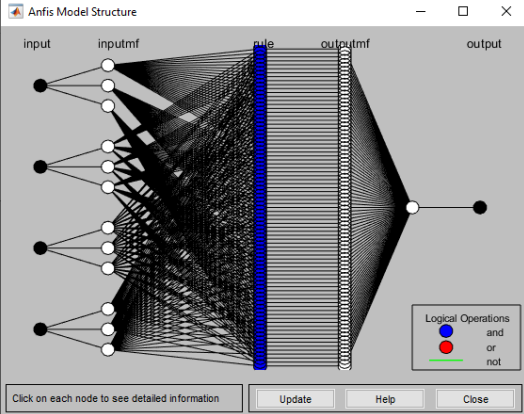

Общая методология исследования представляет собой разработку и уточнение структуры нейронных сетей для решения поставленной практической задачи.


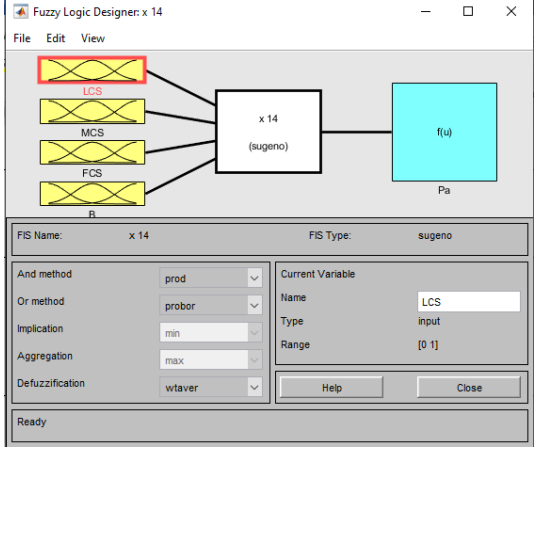
В общем виде технологию разработки интеллектуальной системы можно выстроить в следующем логическом порядке по следующим этапам:

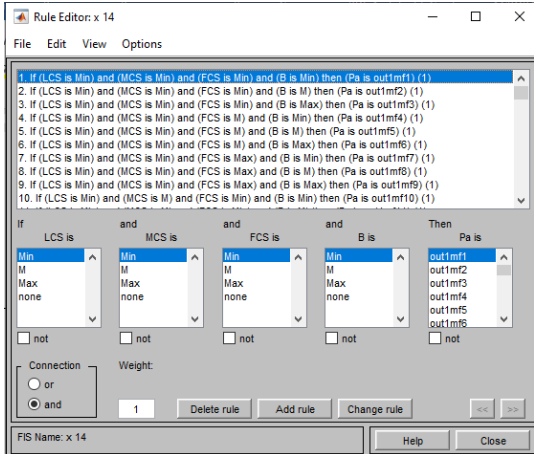
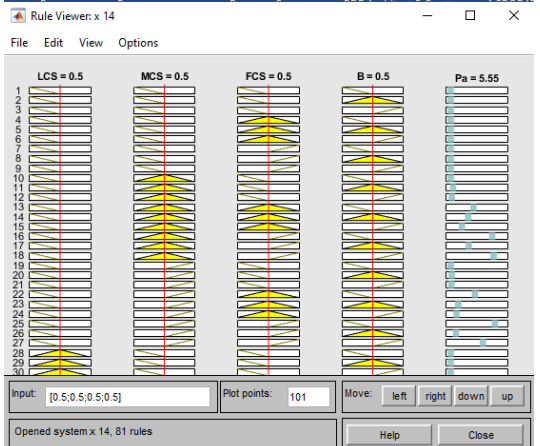
1. Постановка задачи;
2. Определение требуемой точности расчетов и количества обучающих выборок;
3. Формирование набора обучающих и тестовых выборок;
4. Выбор нейросетевой модели (топологии сети);
5. Выполнение алгоритма настройки сети;
6. Проверка адекватности настройки и работы обобщенной интеллектуальной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

Таким образом, предлагаемая методика представляет собой технологию и алгоритм создания интеллектуальной системы, для построения которой в рамках рассматриваемых вопросов колееобразования выполнена постановка задачи, создана и структурирована база практических данных и настроены структурные связи компонентов в программной среде *Matlab*.

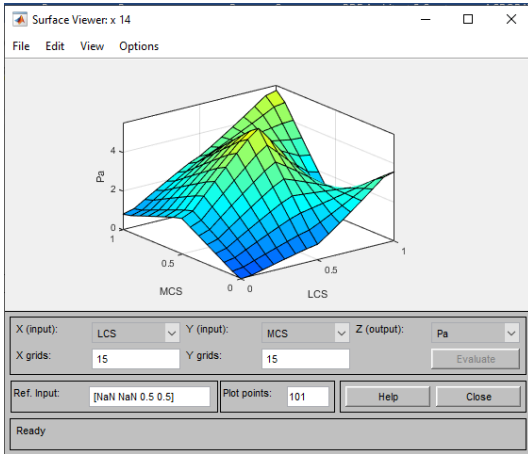
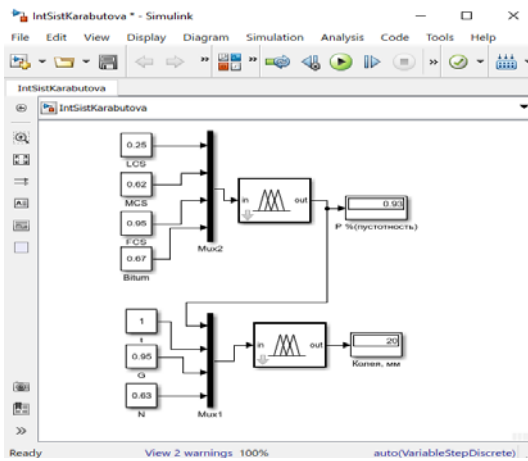
Таблица 5.1 – Пакеты/процедуры программного комплекса *Matlab*, используемые в исследованиях

№	Название приложения/процедуры	Описание	Назначение	Реализация в <i>Matlab</i>
1.	<i>ANFIS</i> ( <i>adaptive neuro-fuzzy inference systems</i> )	Адаптивные системы нейро-нечеткого вывода	Позволяет настроить системы нечеткого вывода типа <i>Sugeno</i> с использованием обучающих данных.	
2.	<i>Neuro-Fuzzy Designer</i>	Пакет программного комплекса <i>Matlab</i> , позволяющий настроить и протестировать систему нейро-нечеткого вывода	Позволяет разработать, настроить и протестировать адаптивные системы нейро-нечеткого вывода ( <i>ANFIS</i> ) с использованием обучающих данных ввода / вывода.	

№	Название приложения/процедуры	Описание	Назначение	Реализация в <i>Matlab</i>
3.	<i>Membership Function Edition</i>	Редактор переменных функции	Служит для назначения диапазона каждой входной и выходной переменной, количества функций принадлежности, тип каждой функции принадлежности и параметры функции принадлежности.	
4.	<i>Fuzzy Logic Designer</i>	Инструментарий нейро-нечеткого вывода пакета программного комплекса <i>Matlab</i>	Позволяет моделировать поведение сложной системы с использованием простых логических правил, а затем реализовывать эти правила в системе нечеткого вывода. Может быть использован как самостоятельный механизм нечеткого вывода. В качестве альтернативы могут быть использованы блоки нечеткого вывода в <i>Simulink</i> и смоделированы нечеткие системы в рамках комплексной модели всей динамической системы <i>Simulink</i> .	

№	Название приложения/процедуры	Описание	Назначение	Реализация в <i>Matlab</i>
5.	<i>Rule Editor</i>	Редактор правил	Используется для изменения правил нечеткой системы.	
6.	<i>Rule Viewer</i>	Средство просмотра правил процесса вывода нейро-нечеткого вывода	Позволяет выполнить просмотр процесса вывода для нечеткой системы: настроить входные значения и просмотреть соответствующие выходные данные каждого нечеткого правила, агрегированный выходной нечеткий набор и дефазифицированное выходное значение.	



№	Название приложения/процедуры	Описание	Назначение	Реализация в <i>Matlab</i>
7.	<i>Surface Viewer</i>	Средство просмотра поверхностей	Позволяет выполнить просмотр поверхностей для нечеткой системы. Чтобы просмотреть выходную поверхность, вы должны указать входные и выходные переменные системы, соответствующие им функции принадлежности и нечеткие правила.	
8.	<i>Simulink</i>	Графическая среда программирования на базе <i>Matlab</i>	Позволяет моделировать и анализировать динамические системы, в том числе системы нейро-нечеткого вывода. Его основной интерфейс представляет собой графический инструмент построения блочных диаграмм и настраиваемый набор библиотек блоков. Он обеспечивает тесную интеграцию с пакетами среды <i>Matlab</i> и может либо управлять процедурами <i>Matlab</i> , либо быть настроенным на основе процедур <i>Matlab</i> .	

### 5.2.1 Постановка задачи

Применение нейронных сетей для решения поставленных задач определения физических и эксплуатационных показателей щебеночно-мастичного асфальтобетонного покрытия обусловлена отсутствием готовых алгоритмов для решения практической задачи. Для нейросетевой постановки задачи необходимо определить входные параметры и представить ожидаемый результат работы искусственной нейронной сети в форме выходного параметра.

В итоге, постановка задачи выражается в определении параметров. Каждый выбранный параметр должен иметь уникальное имя, по которому интеллектуальная система идентифицирует его. Это очень важная особенность интеллектуальных систем. Также стоит заметить, что параметр может быть задан в любой символьной форме, в т. ч. и лингвистически в виде лингвистической переменной.

В общем виде постановка задачи выполняется следующим образом:

$$Y_1 = f(X_1, X_2, \dots, X_n), \quad (5.1)$$

где  $X_1, X_2, \dots, X_n$  – входные переменные;

$Y_1$  – выходная переменная;

$f$  – функция нечеткого вывода.

Количество входных данных не нормируется и зависит от мощностных возможностей компьютера, на котором выполняются вычисления.

В рамках наших исследований постановка задачи была выполнена в главе 3 для двух нейронных сетей.

### **5.2.2 Определение требуемой точности расчетов и количества обучающих выборок**

Определение требуемой точности расчетов и количества обучающих выборок производится на основании корреляционной функции зависимости ошибки модели от числа обучающих выборок.

### **5.2.3 Формирование набора обучающих и тестовых выборок**

После выполнения постановки задачи формируется база данных. База данных является основой любой интеллектуальной системы. В данной задаче базой данных являются выборки практических данных, полученных в результате лабораторных и натурных исследований с использованием методов математической статистики.

Все информационные единицы, входящие в состав базы данных, должны обладать гибкой структурой. Это означает, что между ними должна существовать возможность установления отношений типа «причина - следствие», «часть – целое» или «вход – выход». В информационной базе между информационными единицами должна быть предусмотрена возможность установления связей различного типа. Прежде всего, эти связи могут характеризовать отношения между информационными единицами. Эта связь может быть сильной или слабой и выражается коэффициентом значимости. Коэффициенты значимости определяются программой автоматически в процессе настройки сети и системы.

При формировании обучающей выборки особое внимание было уделено самым важным параметрам и свойствам дорожного покрытия и таких процессов как проектирование, технология устройства и эксплуатация исследуемого объекта с учетом наличия и доступности данных.

После получения обучающей выборки проводится предварительная обработка данных в этой выборке – от этого зависит результат обучения нейронной сети.

Под обработкой данных подразумевается нормирование данных в диапазоне от 0 до 1, а также исключение недостоверных данных, которые в литературе имеют название «выбросы». Выбросы могут значительно снижать точность настройки.

Полученные данные должны быть представлены в виде матрицы, записанной в документе формата *.dat*, последний столбец которой содержит выходные значения.

Представление обучающей выборки в общем виде для  $n$  параметров и  $j$  выборок показано на рисунке 5.1.

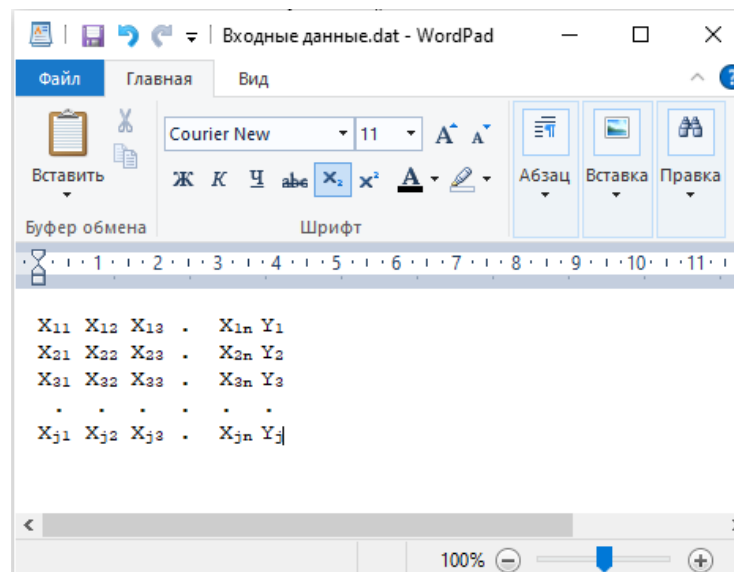


Рисунок 5.1 – Представление матрицы исходных данных в формате *.dat*

#### 5.2.4 Выбор нейросетевой модели (топологии сети)

Важной характеристикой сети является топология нейросети, т.е. нейросетевой модели, которая выбирается в зависимости от физического смысла задачи и особенностей данных.

Именно на данном этапе начинается работа в среде *Matlab*.

В связи с тем, что в работе используется сеть нечеткого вывода *ANFIS* (показана в пункте 1 таблицы 5.1), для решения поставленных задач используется нечеткий вывод, основанный на алгоритме типа *Sugeno*.

Проектирование структуры сети предполагает выбор количества слоев сети и нейронов в каждом слое, определение необходимых связей между ними, возможное наличие обходных соединений и характер функций активации нейронов, а также установку логических правил.

В программе *Matlab* данный этап автоматически встроен в алгоритм, поэтому не требует дополнительных расчетов и настроек. Инструментарий нейро-нечеткого вывода пакета программного комплекса *Matlab* представлен во встроенном пакете *Fuzzy Logic Designer* (показан в пункте 4 таблицы 5.1). В случае необходимости параметры нейронечеткого вывода можно корректировать.

Установка логических правил выполняется процедурой *Rule Editor* (показана в пункте 5 таблицы 5.1).

### **5.2.5 Выполнение алгоритма настройки сети**

Процесс обучения заключается в настройке весов сети под значения каждой из выборок, рассматривая их в определенном порядке. Порядок может быть последовательным, случайным и др. Так сети без учителя просматривают набор выборок один раз. Сети с учителем просматривают выборки много раз. Каждый проход по набору выборок называется эпохой обучения.

Алгоритм настройки сети реализуется в пакете *Neuro-Fuzzy Designer* (показано в пункте 2 таблицы 5.1):

1. Загрузка исходных данных в формате *.dat*;
2. Определение основных параметров генерации сети;
3. Выбор количества эпох обучения;
4. Настройка сети.

После загрузки матрицы подготовленных данных (рисунок 5.1) необходимо обозначить и назвать используемые в задаче переменные как показано в пункте 3 таблицы 5.1 в редакторе переменных функций *Membership Function Edition* и указать их максимальные и минимальные значения, т.е. выполнить процесс ввода лингвистической переменной и ее значений.

### **5.2.6 Проверка адекватности настройки и работы обобщенной интеллектуальной системы**

Качество обучения сети проверяется при помощи тестирования в процедуре *Rule Viewer* (показана в пункте 6 таблицы 5.1). Тестирование можно проводить с целью определения корректности выполненной настройки сети или с целью адекватности работы в целом.

В первом случае, в качестве проверочных данных используются данные обучающих выборок. В таком случае, результаты должны соответствовать выходным значениям обучающих выборок.

При выполнении проверки на адекватность работы на входы сети подаются сигналы, которые не входили в обучающую выборку, т.е. отобранные дополнительно. Оценивается отклонение между выходными сигналами и соответствующими им выходными значениями.

По результатам тестирования вносятся корректировки.

### **5.2.7 Практическое использование**

Необходимо изложить метод решения, но с использованием метода упрощения и вербализации, т.е. данный этап подразумевает разработку и дальнейшее использование обобщенной интеллектуальной системы гибридного типа.

Обобщенная система программируется в среде *Simulink* программы *Matlab* путем последовательного объединения двух нейронных сетей.

На данном этапе также возможна проверка корректности настройки, но как правило, если корректность подтверждается адекватностью работы нейронных сетей по отдельности, система также работает корректно.

### **5.3 Разработка алгоритма проектирования интеллектуальной системы**

В результате исследований был разработан алгоритм проектирования интеллектуальной системы.

1. Построение нейронной сети для определения физического параметра.

1.1 Определение и обоснование принятого физического параметра – содержание воздушных пустот.

1.2 Определение и обоснование входных переменных. Выбор основных исходных данных: крупность щебня, типа и количества битумного вяжущего. Разработка технического задания на асфальтобетонную смесь с учетом требуемой марки и требуемых характеристик согласно проектной документации.

1.3 Подготовка обучающих и тестовых данных: определение значений содержания крупного заполнителя и содержания щебня, нормирование значений.

1.4 Настройка сети.

1.5 Расчет характеристики содержания воздушных пустот.

2. Построение нейронной сети для определения эксплуатационного параметра.

2.1 Определение и обоснование принятого эксплуатационного показателя – глубины колеи.

2.2 Определение основных параметров согласно проектной и организационно-технологической документации.

2.3 Подготовка обучающих и тестовых данных: проведение лабораторных испытаний, пробных уплотнительных работ, выполнение натурных исследований, нормирование значений.

2.4 Настройка сети.

2.5 Расчет характеристики глубина колеи.

3. Объединение нейронных сетей в обобщенную интеллектуальную систему.

4. Уточнение расчетных значений параметров на основе численного эксперимента и поверочный расчет.

#### **5.4 Расчет экономического эффекта от внедрения результатов исследования**

В рамках решения поставленной задачи выходным итоговым параметром определена эксплуатационная характеристика величина глубины колеи асфальтобетонного дорожного покрытия. Скорость образования колеи зависит от типа и качества покрытия, нагрузок и интенсивности движения сезона, погодных условий и т. п.

В общем случае величина вреда от проезда тяжеловесного автотранспорта, в том числе от автопоездов для перевозки деревьев, хлыстов и пиломатериалов, включает затраты на преждевременный капитальный ремонт в результате снижения несущей способности дорожных конструкций и затраты на преждевременный ремонт из-за повышенного износа дорожных покрытий [3,72,78,14]. Этот факт подтверждает анализ зависимости колеи от износа, выполненный в настоящем исследовании в п. 4.5.

В таблице 5.2 приведены значения среднего годового износа асфальтобетонных покрытий в зависимости от общей интенсивности движения на полосе за время службы покрытия  $t_d$  в соответствии с рекомендациями по выявлению и устранению колеи на нежестких дорожных



одеждах [79]. Здесь и далее рассмотрено только значение износа дорожного покрытия без учета остаточных деформаций земляного полотна.

В настоящих исследованиях износ асфальтобетонных покрытий учитывал срок службы, что позволило заранее разработать стратегию ремонта, т.е. настроить систему на срок службы и разрабатывать планы технической эксплуатации автодорог.

Поэтому необходимо иметь данные об образовании колеи на периоды эксплуатации и в дальнейшем использовать при проектировании автомобильных дорог с аналогичными условиями.

Таблица 5.2 – Средний годовой износ асфальтобетонных покрытий [79]

<b>Общая фактическая интенсивность движения на полосу (средняя за <math>t_{л}</math>), авт./сут</b>	<b>Среднее значение износа асфальтобетонного покрытия за год, мм</b>
2000	0,315
2500	0,360
3000	0,400
3500	0,445
4000	0,490
4500	0,505
5000	0,575
5500	0,620
6000	0,665
6500	0,710
7000	0,750

В наших исследованиях при получении обучающих и тестовых выборок использовались усредненные данные за пятилетний период эксплуатации автомобильных дорог. В таком случае, интеллектуальная система позволяет спрогнозировать износ асфальтобетонного покрытия и итоговое значение колеи.

Данные таблицы 5.3 получены при построении поверхности зависимости при нормированных значениях  $P_a=0$ ;  $N=0$ ;  $V=0$  (переменные закреплены).

Таблица 5.3 – Средний прогнозируемый годовой износ асфальтобетонных покрытий [составлено в ходе проведения настоящих исследований]

<b>Общая фактическая интенсивность движения на полосу авт./сут</b>	<b>Среднее значение износа асфальтобетонного покрытия за год, мм</b>
2000	0,001
2500	0,023
3000	0,054
3500	0,096
4000	0,126
4500	0,157
5000	0,198
5500	0,229
6000	0,259
6500	0,300
7000	0,331

Требования к характеристикам эксплуатационного состояния автомобильных дорог общего пользования, допустимого по условиям обеспечения безопасности дорожного движения, методам их контроля, а также предельные сроки приведения эксплуатационного состояния дорог в соответствие нормативам установлены ГОСТ 50597-2017. В соответствии с ГОСТ 50597-2017 колею глубиной более 5 см на участке полосы движения длиной 100 м устраняют при осуществлении капитального ремонта дорог и улиц.

Превышение нормативной глубины колеи приводит к снижению поперечной ровности покрытия, что является критерием для назначения ремонтных работ.

Межремонтные сроки проведения дорожных работ регламентированы ГОСТ Р 58861-2020. В соответствии с этим документом межремонтные сроки проведения работ по ремонту дорожной одежды капитального типа (асфальтобетона) всех категорий составляет 12 лет, по капитальному ремонту – 24 года.

Для устранения колеи и восстановления поперечной ровности выполняется периодическое восстановление в процессе эксплуатации слоя

износа (верхнего замыкающего слоя дорожной одежды, непосредственно воспринимающего воздействие колес автомобильного транспорта и погодноклиматических факторов, здесь и далее подразумевается верхний слой покрытия). Для этого осуществляются ремонтные работы по фрезерованию покрытия с последующей укладкой асфальтобетонных слоев.

Периодичность проведения работ по устройству слоев износа из щебеночно-мастичных асфальтобетонов представлены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Периодичность проведения работ по устройству слоев износа из щебеночно-мастичных асфальтобетонов [36]

Фактическая среднегодовая суточная интенсивность транспортного потока по наиболее загруженной полосе движения, авт./сут	Периодичность проведения работ для ДКЗ, г.				
	I	II	III	IV	V
Щебеночно-мастичный асфальтобетон с номинально максимальным размером зерен 16,0 мм					
От 1000 до 2500	5,5	6,5	6,5	6,0	5,0
От 2500 до 5000	4,5	5,5	5,5	5,0	4,0
От 5000 до 10000	3,5	4,5	4,5	4,0	3,5
От 10000 до 15000	2,5	3,5	3,5	3,5	3,0
Более 15000	2,0	2,5	2,5	2,5	2,5

Сравнивая значения износа в таблицы 5.5, можно определить, что при одинаковом значении интенсивности колееобразование с учетом оптимизации входных значений имеет меньшее значение, причем при планировании ремонта слоя износа по показателю глубины колеи можно добавить два дополнительных года эксплуатации. Так при интенсивности 7000 авт./сут (периодичность проведения работ для II ДКЗ составляет 4,5 года) средний годовой износ с учетом прогнозирования составляет 0,331 мм, при этом для средний годовой износ согласно [99] - 0,315 мм при интенсивности 2000 авт./сут. (периодичность проведения работ для II ДКЗ составляет 6,5 лет).

С учетом вышесказанного, можно рассмотреть увеличение межремонтных сроков на 2 года.

Таблица 5.5 – Сравнение среднего годового износа

<b>Фактическая среднегодовая суточная интенсивность транспортного потока по наиболее загруженной полосе движения, авт./сут</b>	<b>Периодичность проведения работ для П ДКЗ, г.</b>	<b>Средний годовой износ согласно [99], мм</b>	<b>Средний годовой с учетом оптимизации входных данных, мм</b>
2000	6,5	0,315	0,001
2500	6,5	0,360	0,023
3000	5,5	0,4000	0,054
3500	5,5	0,445	0,096
4000	5,5	0,49	0,126
4500	5,5	0,505	0,157
5000	5,5	0,575	0,198
5500	4,5	0,620	0,229
6000	4,5	0,665	0,259
6500	4,5	0,710	0,300
7000	4,5	0,750	0,331

В таком случае, можно сократить количество мероприятий по замене слоя износа в соответствии с расчетом, представленным в таблице 5.6.

Таблица 5.6 – Сравнение необходимого количества мероприятий для восстановления слоя износа

<b>Фактическая среднегодовая суточная интенсивность транспортного потока по наиболее загруженной полосе движения, авт./сут</b>	<b>Количество мероприятий по ремонту слоя износа с учетом рекомендаций [36]</b>		<b>Количество мероприятий по ремонту слоя износа с учетом прогнозирования по ИС</b>	
	<b>Периодичность проведения работ</b>	<b>За 12 лет</b>	<b>Периодичность проведения работ</b>	<b>За 12 лет</b>
Щебеночно-мастичный асфальтобетон с номинально максимальным размером зерен 16,0 мм				
От 1000 до 2500	6,5	1	8,5	1
От 2500 до 5000	5,5	2	7,5	1
От 5000 до 10000	4,5	2	6,5	1
От 10000 до 15000	3,5	3	5,5	2
Более 15000	2,5	4	4,5	2

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» [74,75].

Сведения об инвестиционном проекте представлены в таблице 5.7.

Таблица 5.7 – Сведения о реализуемом инвестиционном проекте ООО «Синергия» [74,75]

Предприятие	Местоположение	Объем потребляемого сырья, тыс. куб. м	Выпускаемая продукция
Строительство фанерного производства и ТЭЦ на древесном сырье на ООО «Синергия»	г. Верхняя Тура	745,398	фанера широкоформатная – 100,0 тыс. куб. м; пиломатериалы транспортной влажности – 190 тыс. куб. м.; технологическая щепа - 90,75 тыс. куб.м

Для перевозки деревьев, хлыстов и пиломатериалов с лесосеки до нижнего склада и с нижнего склада до деревообрабатывающего предприятия в основном используются автопоезда, состоящие из автомобиля-тягача и соответствующего прицепного состава (таблица 5.8).

Таблица 5.8 – Автопоезда для вывозки деревьев и хлыстов [2]

Базовый автомобиль, колесная формула	Марка автопоезда	Марка роспуска	Длина перевозимого груза, м	Полная масса автопоезда, т	Полезная нагрузка, м <sup>3</sup>
КамАЗ-53228, 6х6	КаМАЗ-6426	ГКБ-9362	18-25	41	36
КамАЗ-4310, 6х6	ТМ-39-02	ГКБ-9383	15-27	26,7	18
Урал-4320, 6х6	ТМ-39-03	ГКБ-9851 ГКБ-9362	15-27 15-27	26.5 26.5	17 15
МАЗ-5434, 4х4	ТМ-33	ГКБ-9383 ГКБ-9362	15-27 15-27	30 34	21 25
МАЗ-64255, 6х6	ТМ-81	ГКБ-9362	15-27	48,7	40
КрАЗ-6437, 6х6	ТМ-30 двухкомплект.	ГКБ-9362 (3 шт.)	До 24	80	63

Наибольший объем перевозимых грузов на лесовозных дорогах составляют хлысты — очищенные от сучьев срезанные деревья (около 90%) и сортименты (около 7%) [13]. Поэтому интенсивность движения крупногабаритного автотранспорта можно производить по автопоездам для вывозки деревьев и хлыстов (таблицы 5.8).

Средняя интенсивность движения крупногабаритного транспорта составляет (в расчете по автопоезду КаМАЗ-6426):

$$E = \frac{V}{365 \cdot p}, \quad (5.1)$$

где  $V$  - объем потребляемого сырья, м<sup>3</sup>;

$P$  - полезная нагрузка, м<sup>3</sup>.

$$E = \frac{V}{365 \cdot p} = \frac{745398}{365 \cdot 36} = 57 \text{ ед/сут.}$$

Интенсивность движения грузовых автомобилей, приведенную к расчетной нагрузке 100 кН на ось по формуле в соответствии с [79]:

$$E_p = E \cdot s, \quad (5.2)$$

где  $N$  – количество автомобилей в сутки, ед/сут;

$s$  – коэффициент приведения автомобилей различного типа к расчетной нагрузке, для тягачей с прицепами  $S=1,5$ .

$$E_p = E \cdot s = 57 \cdot 1,5 = 86 \text{ ед/сут.}$$

В расчетах для перевозки сырья использована выбранная при проведении испытаний и получении выборок данных автомобильная дорога общего пользования регионального значения «г. Екатеринбург – г. Нижний Тагил – г. Серов» с приведенной интенсивностью движения по данным ГКУ СО «Управление автодорог» 3 055 ед./сут. С учетом работы указанных предприятий интенсивность увеличится до 3 141 ед./сут.

Ремонт участка автодороги «г. Екатеринбург – г. Нижний Тагил – г. Серов» км 198+800 – км 202+000, км 210+000-км 213+000 на территориях городского округа Верхняя Тура и Кушвинского городского округа указанной автодороги выполнялся в 2017 году.

Согласно проектно-сметной документации стоимость ремонта 1 км покрытия дороги составляет в текущих ценах на 1 квартал 2016 г. с НДС – 10 443,84 тыс. рублей. Ремонт покрытия автодороги протяженностью 6,2 км – 64 751,81 тыс. рублей. За 12 лет до проведения капитального ремонта необходимо провести два ремонта и потратить 129 503,62 тыс. рублей.

При оптимальном подборе материалов и способе строительства за 12 лет эксплуатации до проведения капитального ремонта проводится только один ремонт – 64 751,81 тыс. рублей.

Экономия на 1 км покрытия составит до 10 443,84 тыс. рублей.

### 5.5 Расчет грузопотока лесовозной дороги

Грузопоток (грузонапряженность) дороги — количество заготовленной древесины, которое вывозится по данному участку дороги за расчетный период. Грузопоток лесовозной дороги за год выразим из формулы 5.1, где интенсивность принята в соответствии с анализом зависимостей п. 4.5 - при  $P_a=3,17\%$ ,  $N=12$ ед,  $V=19,0$ м<sup>3</sup> -  $E=(15;80)$ ед/ч:

$$V_{\min} = \frac{E}{s} \cdot p \cdot 24 \cdot 365 = \frac{15}{1,5} \cdot 36 \cdot 24 \cdot 365 = 3153600 \text{ м}^3;$$

$$V_{\max} = \frac{E}{s} \cdot p \cdot 24 \cdot 365 = \frac{80}{1,5} \cdot 36 \cdot 24 \cdot 365 = 16819200 \text{ м}^3.$$

### 5.6 Выводы по главе

1. Разработана и описана методика проектирования интеллектуальной системы для оценки эксплуатационного показателя дорожных покрытий дорог, позволяющая совершенствовать методы проектирования, процессы строительства и эксплуатации лесовозных дорог, а также автодорог общего пользования с усовершенствованным покрытием.

2. Разработан алгоритм проектирования интеллектуальной системы оценки физических параметров и эксплуатационных показателей, а также для решения типового класса задач.

3. 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.

4. 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,  $V=19,0$ м<sup>3</sup> составляет 16819200 м<sup>3</sup>, минимальное значение грузопотока 3153600 м<sup>3</sup>.

5. Результаты исследований и практические рекомендации внедрены в производство на предприятиях ООО «Уральский дорожный научно-исследовательский центр» и ООО «УралДорТехнологии» и в учебный процесс на кафедре транспорта и дорожного строительства Инженерно-технического института и кафедре интеллектуальных систем Социально-экономического института УГЛТУ, что подтверждается соответствующими актами, представленными в Приложениях Д, Е.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 Iл, IIл 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 глубину колеи покрытия в зависимости 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  $V=(21,0;23,0)м^3$ , при  $P_a=3,17\%$ ,  $N=12$ ед,  $V=19,0м^3$   $E=(80;125)$ 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,  $V=19,0$ м<sup>3</sup> составляет 16819200 м<sup>3</sup>, минимальное значение грузопотока 3153600 м<sup>3</sup>.

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

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Авласова, Н. М. Гранулометрический состав минерального остова асфальтобетона / Н.М. Авласова, Н.В. Горелышев // Информация об отечественной и зарубежной дорожной технике. – М., 1959. – № 2. – С. 3-8.
2. Алябьев, В. И. Сухопутный транспорт леса: учебник для вузов / В.И. Алябьев [и др.]. - М.: Лесная промышленность, 1990. - 416 с.
3. Апестин, В. К. Оценка и расчет ущерба от проезда тяжеловесных транспортных средств / В.К. Апестин // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2005. – № 3. – С. 10-12.
4. Ахтямов, Э. Р. Информационная система контроля качества строительства лесных дорог / Ахтямов Э.Р., Кручинин И.Н., Побединский В.В., Кручинина Е.И., Чижов А.А. / Деревообрабатывающая промышленность. - 2021. - № 4. - С. 3-10.
5. Ахтямов, Э. Р. Развитие системы контроля качества строительства автомобильных дорог с использованием лабораторной информационной менеджмент-системы U-LAB / Ахтямов Э.Р., Кошкарров Е.В., Дедюхин А.Ю. / Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. - 2021. -Т. 21. № 2. - С. 44-51.
6. Бадалов, В. В. Изменение температуры асфальтобетона в процессе уплотнения [Текст] / В.В. Бадалов, А.Ф. Зубков // Автомоб. дороги. - 1973. - № 9.-С. 7.
7. Батыршин И.З., Недосекин А.А., Стецко А.А., Тарасов В.Б., Язенин А.В., Ярушкина Н.Г. Теория и практика нечетких гибридных систем / Под ред. Н.Г. Ярушкиной. — М.: Физматлит, 2006.
8. Богуславский, А. М. Асфальтобетонные покрытия [Текст] / А. М. Богуславский, Л. Г. Ефремов. – М.: МАДИ, 1981. – 146 с.
9. Богуславский, А. М. Дорожные асфальтобетонные покрытия [Текст] / А. М. Богуславский. – М.: Транспорт, 1965. – 112 с.

10. Булдаков, С. И., Последовательность выполнения проекта по строительству автомобильных дорог: учеб. пособие / С.И. Булдаков. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2017. – 177 с. ISBN 978-5-94984-605-6.

11. Булдаков, С. И. Содержание и ремонт автомобильных дорог: монография / С. И. Булдаков, Ю. Д. Силуков, М. Д. Малиновских; Минобрнауки России, Урал. гос. лесотехн. ун-т. – Екатеринбург, 2017. – 200 с.: ил. ISBN 978-5-94984-609-4.

12. Быстров, Н. В. Рекомендации по эффективному уплотнению асфальтобетонных покрытий и оснований [Текст] / Н. В. Быстров, Э. В. Котлярский, Н. В. Горелышев. - Москва: МГПО Автодор, 1990. - 45 с.

13. Бычков, В. П. Организационно-технологические основы сухопутного транспорта леса: учеб. пособие / В.П. Бычков, В.М. Бугаков, В.М. Заложных; под ред. В.П. Бычкова. - М.: ИНФРА-М, 2018. — 187 с. — (Высшее образование: Бакалавриат). — [www.dx.doi.org/10.12737/744](http://www.dx.doi.org/10.12737/744). - ISBN 978-5-16-006922-7. - Текст: электронный. - URL: <https://znanium.com/catalog/product/923358> (дата обращения: 03.05.2022). – Режим доступа: по подписке.

14. Вайнштейн, Е. В. Исследование изменения вертикальных перемещений от нагрузки лесовозных автопоездов в конструкции дорожной одежды и земляного полотна методом конечных элементов [Электронный ресурс] / Е.В. Вайнштейн, М. Г. Салихов, В.М. Вайнштейн, П.А. Нехорошков // Современные проблемы науки и образования: научный журнал. - 2012. - № 26. Режим доступа: URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=7646>.

15. Васильев, А.П. Справочная энциклопедия дорожника. Т.1. Строительство и реконструкция автомобильных дорог [Текст] / под ред. А. П. Васильева [и др.]. - Москва : Информавтодор, 2005. - 1701 с.

16. Васильев, А.П. Справочная энциклопедия дорожника. Т.П. Ремонт и содержание автомобильных дорог [Текст] / под ред. А. П. Васильева [и др.]. - Москва : Информавтодор, 2004. - 1279с.

17. Гезенцвей, Л. Б. Асфальтовый бетон [Текст] / Л. Б. Гезенцвей. – М.: Стройиздат, 1964. – 477 с.
18. Гезенцвей, Л. Б. Дорожный асфальтобетон/Л.Б. Гезенцвей. – М.: Транспорт, 1986 –336 с.
19. Горелышев, Н. В. Материалы и изделия для строительства дорог/ Н.В. Горелышев. -М.: Транспорт, 1986 – 148 с.
20. Горелышев, Н. В. Технология и организация строительства автомобильных дорог [Текст]: учеб. / Н. В. Горелышев. - Москва: Транспорт, 1991. -551 с.
21. ГОСТ 31015-2002 Смеси асфальтобетонные и асфальтобетон щебеночно-мастичные. Технические условия. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294845/4294845388.pdf>.
22. ГОСТ 33029— 2014 Дороги автомобильные общего пользования. Щебень и гравий из горных пород. Определение гранулометрического состава. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293759/4293759258.pdf>.
23. ГОСТ 34342-2017 Автомобильные транспортные средства. Шины пневматические зимние, оборудованные шипами противоскольжения. Методы испытаний по определению величины износа тестового дорожного покрытия. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293737/4293737178.pdf>.
24. ГОСТ Р 50597-2017 Дороги автомобильные и улицы. Требования к эксплуатационному состоянию, допустимому по условиям обеспечения безопасности дорожного движения. Методы контроля. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200147085>.
25. ГОСТ Р 51568 (ИСО 3310-1-90)/ Сита лабораторные из металлической проволочной сетки. Технические условия. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294845/4294845370.pdf>.

26. ГОСТ Р 58401.1 Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Система объемно-функционального проектирования. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data/709/70941.pdf>.

27. ГОСТ Р 58401.2 Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Система объемно-функционального проектирования. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data/709/70973.pdf>.

28. ГОСТ Р 58401.8-2019. Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные. Метод определения содержания воздушных пустот. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data/709/70947.pdf>.

29. ГОСТ Р 58401.10-2019. Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Методы определения объемной плотности. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data/709/70974.pdf>.

30. ГОСТ Р 58401.16-2019. Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Методы определения максимальной плотности. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data/709/70950.pdf>.

31. ГОСТ Р 58406.1 Дороги автомобильные общего пользования. Смеси горячие асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293721/4293721376.pdf>.

32. ГОСТ Р 58406.2 Дороги автомобильные общего пользования. Смеси горячие асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293721/4293721375.pdf>.

33. ГОСТ Р 58406.3 – 2020 Метод определения стойкости к колееобразованию прокатыванием нагруженного колеса. [Электронный

ресурс]. Режим доступа:  
<https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293721/4293721374.pdf>.

34. ГОСТ Р 58406.5-2020 Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Метод определения истираемости. [Электронный ресурс]. Режим доступа:  
<https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293721/4293721292.pdf>.

35. ГОСТ Р 58829-2020 Дороги автомобильные общего пользования. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Правила выбора марок в зависимости от прогнозируемых транспортных нагрузок и климатических условий эксплуатации на основе дополнительных показателей. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293722/4293722505.pdf>.

36. ГОСТ Р 58861-2020 Дороги автомобильные общего пользования. Капитальный ремонт и ремонт. Планирование межремонтных сроков. [Электронный ресурс]. Режим доступа:  
<https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293721/4293721072.pdf>.

37. Дедюхин, А. Ю. Исследование истираемости асфальтобетонных покрытий большого города/ А.Ю. Дедюхин, Э.Р. Ахтямов, Е.В. Кокшаров. – Автомобильные дороги. №12. – 2020. С. 63-65.

38. Дедюхин, А. Ю. Способ повышения стойкости дорожного асфальтобетона к абразивному износу/ А.Ю. Дедюхин, В.Е. Кокшаров, Е.В. Кокшаров. – Автомобильные дороги. №3. – 2020. С. 40-43.

39. Зубков, А. Ф. Технология строительства асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог [Текст] / А. Ф. Зубков, В. Г. Однолько. - Москва: Машиностроение, 2009. - 224 с.

40. Гриневич, Н. А. Горячие асфальтобетонные смеси, материалы, подбор составов смесей и строительство автомобильных дорог национальный центр по асфальтовой технологии / Н.А. Гриневич; Урал. гос. лесотехн. ун-т. – Екатеринбург, 2016. – 36 с.



41. Иванов, Н. Н. Выбор типа и способа подбора асфальтобетона / Н.Н. Иванов // Доклады по вопросам строительства черных дорог. – М.; Л. : ОГИЗ Гострансиздат, 1932. – С. 175–190.
42. Иванов, Н. Н. Черные дороги / Н.Н. Иванов. – М. : ОГИЗ Гострансиздат, 1931. – 173 с.
43. Ильин Л.Н. Основы учения о пластической деформации. М.: Машиностроение, 1980. - 150 с.
44. Карабутова И. А. Применение битумных материалов в дорожном строительстве / Карабутова И.А., Булдаков С.И. / В сборнике: Научное творчество молодежи - лесному комплексу России. Материалы XVIII Всероссийской (национальной) научно-технической конференции. Екатеринбург, 2022. С. 417-421.
45. Кирюхин, Г. Н. Покрытия из щебеночно-мастичного асфальтобетона / Г.Н. Кирюхин, Е.А. Смирнов. - М.: ООО «Издательство "Элит"», 2009. - 176 с. илл.
46. Кирюхин, Г. Н. Опыт устройства долговечных покрытий из ЦМА / В.Ф. Гекк, Г.Н. Кирюхин, Е.А Смирнов. - Автомобильные дороги. № 3. - 2021. С.115-120.
47. Кирюхин, Г. Н. Нормирование состава и свойств щебеночно-мастичного асфальтобетона в Российской Федерации / Кирюхин Г.Н., Смирнов Е.А. -Автомобильные дороги. № 9. - 2017. С. 78-83.
48. Крамаров, С. О. Современные методы анализа и синтеза интеллектуально-адаптивного управления / Крамаров С.О., Смирнов Ю.А., Соколов С.В., Таран В.Н. - М.: РИОР: ИНФРА-М, 2017. - 238 с.
49. Леонков, А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.: ил. ISBN 5-94157-087-2.
50. Лесной план Свердловской области на 2019 - 2028 годы, утвержденный Указом Губернатора Свердловской области от 18 сентября 2019 г. № 450-УГ. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://docs.cntd.ru/document/561550939>.

51. Макаренко, К. В. «Умный город»: стандарты, проблемы, перспективы развития / К.В. Макаренко, В.О. Логиновская // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 165–171. DOI:10.14529/ctcr190316.

52. Макаров, И. М. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления / И.М. Макаров, В.М. Лохин, С.В. Манько, М.П. Романов; [отв. Ред. И.М. Макарова]; Отделение информ. технологий и вычислит. систем РАН. – М. : Наука, 2006. – 333 с. - ISBN 5-02-033782-X (*в пер.*).

53. Матвеев, М. Г. Модели и методы искусственного интеллекта. Применение в экономике: учеб. пособие / М.Г. Матвеев, А.С. Свиридов, Н.А. Алейникова. – М.: Финансы и статистика; ИНФРА-М, 2008. – 448м.: ил. ISBN 978-5-279-03279-2 (Финансы и статистика) ISBN 978-5-16-003412-6 (ИНФРА-М).

54. Методические рекомендации по устройству верхних слоев дорожных покрытий из щебеночно-мастичного асфальтобетона. Союздорнии. – М.: 2002. - 29 с.

55. Национальная стратегия развития искусственного интеллекта на период до 2030 года. Утверждена Указом Президента Российской Федерации от 10.10.2019 № 490 «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации». [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/44731>.

56. Новак, В. Математические принципы нечеткой логики / Новак В., Перфильева И., Мочкорж И.: пер. с англ. — Физматлит. 2006. — С. 347.

57. Обзорная информация. Автомобильные дороги и мосты. Проектирование состава асфальтобетона и методы его испытаний. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://files.stroyinf.ru/Data1/47/47961/>

58. ОДМ 218.3.096–2017 Методические рекомендации по объемному проектированию асфальтобетонных смесей по методологии Маршалла. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://rosavtodor.gov.ru/storage/app/media/uploaded-files/226odm-2183096-2017.pdf>.

59. ОДМ 218.3.098-2017 Методические рекомендации по испытанию уплотненных асфальтобетонных смесей прокатыванием нагруженного колеса по гамбургскому методу. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: [https://matest.ru/uploads/russian-standards/ODM\\_218.3.098-2017.pdf](https://matest.ru/uploads/russian-standards/ODM_218.3.098-2017.pdf)

60. ОДМ 218.4.036-2017 Методические рекомендации по приготовлению асфальтобетонных смесей, их укладке, а также приемке выполненных работ, основанные на методологии «*Superpave*». [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://rosavtodor.gov.ru/storage/app/media/uploaded-files/199odm-2184036-2017.pdf>.

61. Охотин, В. В. Лабораторные опыты по составлению дорожных грунтовых смесей по принципу наименьшей плотности. М.: Транспечать, НКПС, 1929, 32 с.

62. Паспорт национального проекта «Безопасные и качественные дороги», утвержденный президиумом Совета при Президенте Российской Федерации по стратегическому развитию и национальным проектам (протокол от 24.12.2018 № 15).

63. Перечень инвестиционных проектов, имеющих стратегическое значение для социально-экономического развития Свердловской области, на 2021–2022 годы (Приложение к протоколу заседания Совета по улучшению инвестиционного климата в Свердловской области при Губернаторе Свердловской области 25 августа 2021 года от 30.09.2021 № 44). [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://mir.midural.ru/investicionnye-proekty-imeyushchie-strategicheskoe-znachenie-dlya-sverdlovskoy-oblasti>.

64. Пижурин, А. А. Исследования процессов деревообработки / Пижурин А.А., Розенблит М.С. – М. Лесн. Пром-сть, 1984. -232 с.

65. ПНСТ 183-2016 Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон щебеночно-мастичные. Технические условия. – Введ. 2016-12-20. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293748/4293748653.pdf>.

66. ПНСТ 184-2016 Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Технические условия. – Введ. 2016-12-20. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293748/4293748651.pdf>

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

68. Побединский, В. В. Нейронечеткая сеть для оценки технологических решений устройства лесных дорог / В. В. Побединский, С. И. Булдаков, А. В. Берстнев, Е. С. Анастас // Лесотехнический журнал. – 2020. – Т. 10. – № 3 (39). – С. 95–103. – Библиогр.: с. 101–102 (10 назв.). – DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2020.3/10

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

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

71. Подольский, В. П. Технология и организация строительства автомобильных дорог. Дорожные покрытия: учеб. для студентов учреждений высш. проф. образования / В. П. Подольский, А. В. Глагольев, П. И.

Поспелов; под ред. В. П. Подольского. - Москва : Изд. центр «Академия», 2012. - 304 с.

72. Постановление Правительства РФ от 31.01.2020 № 67 (ред. от 26.10.2020) «Об утверждении Правил возмещения вреда, причиняемого тяжеловесными транспортными средствами, об изменении и признании утратившими силу некоторых актов Правительства Российской Федерации».

73. Пособие по строительству асфальтобетонных покрытий и оснований автомобильных дорог и аэродромов (к СНиП 3.06.03-85 и СНиП 3.06.06-88)/ Союздорнии. - М., 1991.

74. Приказ Министерства промышленности и торговли Российской Федерации от 16.12.2020 № 4444 «О включении инвестиционного проекта в перечень приоритетных инвестиционных проектов в области освоения лесов». [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL:

75. Приказ Министерства промышленности и торговли Российской Федерации от 27.01.2022 № 183 «О внесении изменений в приоритетный инвестиционный проект в области освоения лесов». [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL:

76. Прокопьев, А. П. Нейросетевая система управления процессом уплотнения дорожных материалов асфальтоукладчиками / Прокопьев А.П., Набижанов Ж.И. // Инженерный вестник Дона. - 2021. - № 10 (82). - С. 120-129.

77. Прокопьев, А. П. Новый метод нейросетевой системы контроля уплотнения асфальтобетонных смесей / Прокопьев А.П., Набижанов Ж.И., Емельянов Р.Т., Иванчура В.И. // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. - 2021.- № 9. - С. 65-69.

78. Ращектаев, В. А. Исследование контактных усилий частиц каменных материалов при уплотнении оснований и покрытий лесовозных автомобильных дорог/В. А. Ращектаев, И.Н. Кручинин, С.А. Чудинов // Современные проблемы науки и образования. - 2014. - № 3. - С. 85.

79. Рекомендации по выявлению и устранению колеи на нежёстких дорожных одеждах / Министерство транспорта Российской Федерации. Государственная служба дорожного хозяйства (Росавтодор). - М.; 2002. - 179 с.

80. Руденский А.В. Дорожные асфальтобетонные покрытия. М.:Транспорт, 1992. 254 с.

81. Рыбина, Г. В. Основы построения интеллектуальных систем: учеб. пособ./ Г.В. Рыбина. – М.: Финансы и статистика; ИНФРА-М, 2010. – 432 с.: ил. ISBN 978-5-279-03412-3 (Финансы и статистика) ISBN 978-5-16-004033-2 (ИНФРА-М).

82. Саати, Т. Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети. —М.: Издательство ЛКИ, 2008. – 360 с.

83. Салихов, М. Г. Антигололедные щебеночно-мастичные асфальтобетоны [Текст] : монография / М. Г. Салихов, А. В. Исаев, Е. В. Веюков ; М-во образования и науки Российской Федерации, Федеральное гос. бюджетное образовательное учреждение высш. проф. образования "Марийский гос. технический ун-т". - Йошкар-Ола : МарГТУ, 2012. - 129 с. : ил.; 20 см.; ISBN 978-5-8158-0987-1.

84. 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.

85. 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.

86. Сидоренко, А. М. Интеграционные процессы транспортно-логистической системы промышленного региона: монография / [А. М. Сидоренко и др.]; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Уральский государственный лесотехнический университет. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2021. – 160 с.

87. Скоробогатченко, Д. А. Вопросы управления и решение задач прогнозирования в автодорожном комплексе на основе нечетких нейронных сетей / Скоробогатченко Д.А. / Форум. Серия: Гуманитарные и экономические науки. - 2015. - № 3 (6). - С. 140-146.

88. Скоробогатченко, Д. А. Модель краткосрочного прогнозирования состояния дорожного покрытия для целей оперативного управления зимним содержанием городской улично-дорожной сети / Скоробогатченко Д.А., Агуреев И.А. / В сборнике: Роль опорного вуза в развитии транспортно-энергетического комплекса Саратовской области (Трансэнергоком-2018). Сборник научных трудов по материалам Всероссийской научно-практической конференции. - 2018. - С. 383-387.

89. Скоробогатченко, Д.А. Прогнозирование ровности покрытия автомобильных дорог с учетом погодно-климатического воздействия и уровня работ по содержанию / Скоробогатченко Д.А., Забазнов А.С. / Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. - 2018. - Т. 9. № 2. - С. 98-109.

90. Смирнов, М. Ю. Повышение эффективности вывозки лесоматериалов автопоездами: научное издание / М. Ю. Смирнов. - Йошкар-Ола: МарГТУ, 2003. - 280 с.

91. СП 288.1325800.2016 Дороги лесные. Правила проектирования и строительства (с изменением № 1) Официальное издание. М.: Стандартинформ, 2017. – 114 с.

92. СП 318.1325800.2017. Свод правил. Дороги лесные. Правила эксплуатации. – Введ. 2018-06-26. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293739/4293739232.pdf>.

93. Стратегия развития инновационной деятельности в области дорожного хозяйства на период 2021–2025 годы, утвержденная распоряжением Росавтодора от 03.03.2021 № 771-р «Об утверждении стратегии развития инновационной деятельности в области дорожного

хозяйства на период 2021-2025 годов». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://rosavtodor.gov.ru/docs/prikazy-rasporyazheniya/431091>.

94. Стратегия развития информационного общества Российской Федерации на 2017–2030 годы, утвержденная Указом Президента РФ от 09.05.2017 № 203 «О Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017 – 2030 годы». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/41919>.

95. Стратегия развития лесного фонда Свердловской области на период до 2035 года, утвержденная постановлением Правительства Свердловской области от 02.04.2020 № 205-ПП «Об утверждении Стратегии развития лесного фонда Свердловской области на период до 2035 года». [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://docs.cntd.ru/document/570723208>.

96. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 г, утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации от 22 ноября 2008 года №1734-р. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: [http://strategy2030.midural.ru/sites/default/files/files/transportnaya\\_strategiya\\_rossiyskoy\\_federacii\\_na\\_period\\_do\\_2030\\_goda\\_0.pdf](http://strategy2030.midural.ru/sites/default/files/files/transportnaya_strategiya_rossiyskoy_federacii_na_period_do_2030_goda_0.pdf).

97. ТУ-5718.030.01393697-99 (Корпорация Трансстрой). Смеси асфальтобетонные щебеночно-мастичные и асфальтобетон. Технические условия. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293766/4293766914.pdf>

98. ТУ-5718-001-00011168-2000 (МАДИ). Смеси асфальтобетонные щебеночно-мастичные и асфальтобетон. – Введ. 2000-04-01. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://files.stroyinf.ru/Data1/10/10130/index.htm>.

99. Остроух, А. В. Интеллектуальные системы: монография / А.В. Остроух. – Красноярск: Научно-инновационный центр, 2020. – 316 с. ISBN 978-5-907208-27-8 DOI: 10.12731/978-5-907208-27-8.



100. Хултен Джефф. Разработка интеллектуальных систем: пер. с англ. В.С. Яценкова. М.: ДМК Пресс, 2019. 284 с.
101. Царенкова, И. М. Возможности цифровой трансформации дорожного хозяйства // Вестник НГИЭИ. 2020. № 6 (109). С. 57–64.
102. Штовба, С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. — М.: Горячая линия Телеком, 2007. — С. 288.
103. Ульмгрен, Н. Зарубежный опыт применения щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей (на примере шведского концерна NCC) [Текст] / Н. Ульмгрен, С. Дымов // Материалы и конструкции. Дорожная техника. – СанктПетербург: издательский дом «Славутич», 2003. – С. 22-31.
104. Ярушкина, Н. Г. Интеллектуальный анализ временных рядов: учебное пособие / Н. Г. Ярушкина, Т. В. Афанасьева, И. Г. Перфильева. – Ульяновск: УлГТУ, 2010. – 320 с.
105. Aurilio V. The Bailey Method Achieving Volumetrics and HMA Compactability / V. Aurilio, W.J. Pine, P. Lum / Proceedings of the 50th Annual Canadian Technical. Asphalt Association Conference, Victoria, Canada, 2005, pp. 160-183. URL: [http://https://www.asphaltinstitute.org/wp-content/uploads/Bailey\\_Method\\_Achieving\\_Volumetrics\\_HMA\\_Compactability\\_Paper-1.pdf](http://https://www.asphaltinstitute.org/wp-content/uploads/Bailey_Method_Achieving_Volumetrics_HMA_Compactability_Paper-1.pdf) (Дата обращения 16.04.2022).
106. Kruchinin I.N., Pobedinsky V.V., Kovalev R.N. Fuzzy simulation of forest road surface parameters // The open access IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (EES) provides a fast, versatile and cost-effective proceedings publication service. 2019. V. 326, iss. 1. № 12026.
107. MATLAB Release Notes for R2008a. MathWorks. Available at. URL: <https://www.mathworks.com/help/simulink/release-notes>. Highlight (accessed: 15.02.19).
108. Splittmastixasphalt / Dr. Ing. K.H. Kolb, die Herren H. Erhard, F. Hoggenmuller, O. Kast und andere; LEITFADEN. Deutscher Asphaltverband (DAV). – 27 s.

109. Vavrik W.R. Bailey Method for Gradation Selection in HMA Mixture Design / W.R. Vavrik, G. Huber, W.J. Pine, S.H. Carpenter, R. Bailey // Transportation Research E-Circular, E-C 044. – 2002. – 34 P.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Транспортная инфраструктура лесов Свердловской области

Таблица А.1 - Транспортная доступность лесов, обеспеченность транспортными путями на период действия Лесного плана Свердловской области на 2019 – 2028 годы

Номер строки	Наименование лесничества, лесопарка <*>	Протяженность дорог (за 2017 год) (км)					Плотность дорог (за 2017 год) (км/тыс. га)	Протяженность на последний год периода действия лесного плана Свердловской области (2028 год) (км)					Плотность дорог на последний год периода действия лесного плана Свердловской области (2028 год) (км/тыс. га)
		железных	автомобильных			всего		железных	автомобильных			всего	
			с твердым покрытием	грунтовых					с твердым покрытием	грунтовых			
				круглогодичного действия	зимники					круглогодичного действия	зимники		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1.	Алапаевское	293	201	783	2056	3333	6,9	293	224	805	2081	3403	7,0
2.	Байкаловское	0	456	895	1216	2567	10,4	0	456	901	1231	2588	10,4
3.	Березовское	37	201	633	578	1449	10,4	37	238	665	578	1518	10,9
4.	Билимбаевское	218	342	282	1410	2252	9,4	218	342	282	1410	2252	9,4
5.	Верх-Исетское	18	75	122	0	215	16,2	18	75	122	0	215	16,2
6.	Верхотурское	115	215	339	666	1335	3,3	115	272	361	666	1414	3,5
7.	Гаринское	0	40	140	982	1162	0,7	0	40	160	992	1192	0,8
8.	Егоршинское	205	198	228	876	1507	9,5	205	198	241	876	1520	9,6
9.	Ивдельское	308	336	1661	6401	8706	3,5	308	336	1782	6401	8827	3,5
10.	Ирбитское	81	357	559	785	1782	7,2	81	436	574	785	1876	7,6
11.	Камышловское	72	243	242	1197	1754	10,0	72	249	254	1225	1800	10,2
12.	Карпинское	151	502	3049	2317	6019	6,8	151	545	3049	2317	6062	6,8
13.	Красноуфимское	101	152	404	2111	2768	6,5	101	183	422	2111	2817	6,6
14.	Кушвинское	229	396	1193	2341	4159	8,0	229	415	1231	2341	4216	8,1
15.	Невьянское	106	405	432	1289	2232	9,7	106	416	458	1302	2282	10,0
16.	Нижне-Сергинское	176	485	347	1956	2964	7,5	176	495	347	1956	2974	7,5
17.	Нижне-Тагильское	98	328	1142	1470	3038	5,4	98	328	1200	1470	3096	5,5
18.	Ново-Лялинское	52	173	1568	2120	3913	6,4	52	173	1568	2160	3953	6,5
19.	Режевское	36	198	127	526	887	7,2	36	205	127	593	961	7,7
20.	Свердловское	211	239	439	261	1150	8,3	211	239	439	261	1150	8,3

Номер строки	Наименование лесничества, лесопарка <*>	Протяженность дорог (за 2017 год) (км)					Плотность дорог (за 2017 год) (км/тыс. га)	Протяженность на последний год периода действия лесного плана Свердловской области (2028 год) (км)					Плотность дорог на последний год периода действия лесного плана Свердловской области (2028 год) (км/тыс. га)
		железных	автомобильных			всего		железных	автомобильных			всего	
			с твердым покрытием	грунтовых					с твердым покрытием	грунтовых			
				круглогодичного действия	зимники					круглогодичного действия	зимники		
21.	Серовское	145	114	244	2119	2622	6,1	145	124	254	2119	2642	6,2
22.	Синячихинское	9	212	461	2600	3282	6,8	9	212	461	2600	3282	6,8
23.	Сотринское	190	238	178	3487	4093	5,3	190	238	178	3487	4093	5,3
24.	Сухоложское	173	333	527	543	1576	7,6	173	349	527	543	1592	7,6
25.	Сысертское	93	351	621	1412	2477	9,1	93	351	621	1412	2477	9,1
26.	Таборинское	0	275	246	777	1298	1,2	0	275	320	777	1372	1,3
27.	Тавдинское	132	171	1026	1437	2766	4,9	132	171	1026	1471	2800	5,0
28.	Талицкое	49	298	1254	339	1940	8,3	49	298	1254	339	1940	8,3
29.	Тугулымское	102	244	442	590	1378	6,0	102	254	442	602	1400	6,1
30.	Туринское	79	254	133	647	1113	2,6	79	254	200	655	1188	2,8
31.	Шалинское	179	329	632	2604	3744	8,2	179	329	632	2604	3744	8,2
32.	Всего	3658	8361	20349	47113	79481	5,2	3658	8720	20903	47365	80646	5,3

\* за исключением земель обороны и безопасности

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Уральский государственный лесотехнический  
университет»

Научно-исследовательская часть

«УТВЕРЖДАЮ»  
Врио ректора  
  
\_\_\_\_\_ Е.П. Платонов  
«    » \_\_\_\_\_ 2019 г.

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ**  
на разработку «Схемы развития и сохранности лесных дорог  
Свердловской области»

Руководитель темы \_\_\_\_\_

к.т.н., профессор Булдаков С.И.

Исполнитель \_\_\_\_\_

к.т.н., доцент Чудинов С.А.

Екатеринбург, 2019 г.

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ**  
на разработку «Схемы развития и сохранности лесных дорог Свердловской  
области»

**1. Государственный заказчик:** Министерство природных ресурсов и экологии Свердловской области.

**2. Исполнитель:** Определяется в ходе конкурса.

**3. Ответственный за выполнение работы:** Определяется в ходе конкурса.

**4. Цель и задачи, решаемые при разработке Схемы развития и сохранности лесных дорог Свердловской области (далее – Схема):**

**4.1. Цель работы:** Разработка схемы развития и сохранности лесных дорог Свердловской области в качестве одного из этапов выполнения работ по проектированию границ защитных лесов категорий – леса, расположенные в зеленых зонах и леса, расположенные в лесопарковых зонах, а также в целях обеспечения максимального вклада лесных дорог в устойчивое экономическое развитие инвестиционных проектов в области освоения лесов, системного освоения лесосырьевых баз и обеспечения пожарной безопасности лесов.

**4.2. Задачи работы:** на основе произведенных технико-экономических изысканий, выполненных с учетом: особенностей Свердловской области, государственной политики в сфере освоения лесов, прогнозов развития экономики, проектных предложений схемы территориального планирования, лесохозяйственных регламентов лесничеств Свердловской области, Лесного плана Свердловской области на 2019-2028 годы (утвержденного Указом Губернатора Свердловской области от 18.09.2019 № 450-УГ), проектов освоения лесов инвестиционных проектов Свердловской области дать рекомендации:

- по развитию (формированию) сети лесных дорог Свердловской области;
- по приведению сети лесных дорог к техническому уровню соответствия техническим требованиям и потребностям инвестиционных проектов;
- по выбору приоритетных направлений развития и совершенствования сети лесных дорог;
- о прогнозных размерах инвестиций на развитие и совершенствование сети лесных дорог Свердловской области;
- по обеспечению пожарной безопасности лесов Свердловской области.

**4.3.** За перспективный расчетный период принять 2030 год.

**5. Сроки выполнения работ:** начало – рабочий день, следующий за датой заключения государственного контракта; окончание I этапа – не позднее 31 июля 2020 года; окончание II этапа – не позднее 15 декабря 2020 года.

**6. Место выполнения работы:** Алапаевское, Байкаловское, Билимбаевское, Верхотурское, Кушвинское, Режевское, Шалинское, Новолялинское, Ивдельское, Карпинское, Нижне-Тагильское, Сотринское, Талицкое, Гаринское, Серовское, Егоршинское, Невьянское, Березовское, Туринское, Синячихинское, Таборинское, Тавдинское лесничества на территории Свердловской области.

**7. Требования к гарантийному сроку работы:** 2 (Два) года, исчисляемые с момента подписания Государственным заказчиком акта сдачи-приёмки выполненных работ.

**8. Основания для проведения работ:** Перечень приоритетных инвестиционных проектов в области освоения лесов, утвержденный Приказом Минпромторга России от 23 мая 2019 г. № 1768.

**9. Нормативно-правовые и иные документы, регламентирующие выполнение работ.**

1. Земельный кодекс Российской Федерации.
2. Лесной кодекс Российской Федерации.
3. Водный кодекс Российской Федерации.
4. Градостроительный кодекс Российской Федерации.
5. Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды».
6. Федеральный закон от 04.12.2006 г. № 201-ФЗ «О введении в действие Лесного кодекса Российской Федерации».
7. Постановление Правительства Российской Федерации от 16.04.2011 № 281 «О мерах противопожарного обустройства лесов».
8. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 22.11.2017 № 626 «Об утверждении Правил ухода за лесами».
9. Приказ Федерального агентства лесного хозяйства от 27 апреля 2012 г. № 174 «Об утверждении нормативов противопожарного обустройства лесов».
10. Приказ Федерального агентства лесного хозяйства от 5 июля 2011 г. № 287 «Об утверждении классификации природной пожарной опасности лесов и классификации пожарной опасности в лесах в зависимости от условий погоды».
11. Постановление Правительства РФ от 20.05.2017 № 607 «О Правилах санитарной безопасности в лесах».
12. Постановление Правительства Российской Федерации от 14.12.2009 № 1007 «Об утверждении Положения об определении функциональных зон в лесопарковых зонах, площади и границ лесопарковых зон, зеленых зон».
13. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 27.05.2013 № 849-р «Об утверждении Перечня объектов, не связанных с созданием лесной инфраструктуры для защитных лесов, эксплуатационных лесов, резервных лесов».
14. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 29.03.2018 № 122 «Об утверждении лесоустроительной инструкции» (далее – Лесоустроительная инструкция).
15. Инструкция о порядке создания и размножения лесных карт, утвержденная Государственным комитетом СССР по лесному хозяйству 11.12.1986 г.
16. Приказ Минприроды России от 18.08.2014 № 367 «Об утверждении Перечня лесорастительных зон Российской Федерации и Перечня лесных районов Российской Федерации».
17. СП 288.1325800.2016 Свод. Правил. Дороги лесные. Правила проектирования и строительства (утв. и введен в действие Приказом Минстроя России от 16.12.2016 № 952/пр).
18. СП 318.1325800.2017. Свод правил. Дороги лесные. Правила эксплуатации

(утв. и введен в действие Приказом Минстроя России от 25.12.2017 № 1713/пр).

19. ОСТ 56-44-80 «Знаки натурные лесоустроительные и лесохозяйственные. Типы, размеры и общие технические требования».

20. ГОСТ 21.204-93 СПДС. Условные графические обозначения и изображения элементов генеральных планов и сооружений транспорта.

21. ГОСТ Р 52293-2004 Геоинформационное картографирование. Система электронных карт. Карты электронные топографические. Общие требования.

Перечень нормативно-правовых актов не является исчерпывающим. Выполнение работ следует осуществлять с учетом действующей редакции нормативно-правовых актов.

Приемка работ осуществляется с учетом требований действующего законодательства на дату сдачи работ.

#### **8. Исходные данные:**

– Квартальная сетка в формате MapInfo на территории лесничеств: Алапаевское, Байкаловское, Билимбаевское, Верхотурское, Кушвинское, Режевское, Шалинское, Новолялинское, Ивдельское, Карпинское, Нижне-Тагильское, Сотринское, Талицкое, Гаринское, Серовское, Егоршинское, Невьянское, Березовское, Туринское, Снячихинское, Таборинское, Тавдинское.

– Характеристика, объем производства, перспективы (прогноз) развития инвестиционных проектов о области освоения лесов Свердловской области до 2030 года: ООО «Лестех», ООО «Лесной Урал Лобва», ООО «СибирьЭкоСтрой», ООО «ТУРА-ЛЕС», ООО «Сосьва-Лес», ООО «Синергия», ООО «Уральская лесопромышленная компания», ООО «Выйский ДОК», ООО «Аргус СФК» и прочих лесопользователей.

– Перечень (реестр) автомобильных дорог и искусственных сооружений, их транспортно-эксплуатационное состояние и характеристики из государственного лесного реестра и проектов освоения лесов на территории лесничеств: Алапаевское, Байкаловское, Билимбаевское, Верхотурское, Кушвинское, Режевское, Шалинское, Новолялинское, Ивдельское, Карпинское, Нижне-Тагильское, Сотринское, Талицкое, Гаринское, Серовское, Егоршинское, Невьянское, Березовское, Туринское, Снячихинское, Таборинское, Тавдинское.

– Реестры автомобильных дорог общего пользования муниципального, межмуниципального и регионального, федерального значения, бесхозные на лесничеств: Алапаевское, Байкаловское, Билимбаевское, Верхотурское, Кушвинское, Режевское, Шалинское, Новолялинское, Ивдельское, Карпинское, Нижне-Тагильское, Сотринское, Талицкое, Гаринское, Серовское, Егоршинское, Невьянское, Березовское, Туринское, Снячихинское, Снячихинское, Таборинское, Тавдинское.

– Информация о запланированных к размещению объектов транспортной инфраструктуры (лесных дорог) ведомствами и организациями лесопромышленного комплекса до 2030 года на территории лесничеств: Алапаевское, Байкаловское, Билимбаевское, Верхотурское, Кушвинское,



Режевское, Шалинское, Новолялинское, Ивдельское, Карпинское, Нижне-Тагильское, Сотринское, Талицкое, Гаринское, Серовское, Егоршинское, Невьянское, Березовское, Туринское, Сиячихинское, Сиячихинское, Таборинское, Тавдинское.

– Планы (стратегии) освоения лесов ведомствами лесопромышленного комплекса Свердловской области до 2030 года с указанием требуемых точек тяготения лесных автомобильных дорог на территории лесничеств: Алапаевское, Байкаловское, Билимбаевское, Верхотурское, Кушвинское, Режевское, Шалинское, Новолялинское, Ивдельское, Карпинское, Нижне-Тагильское, Сотринское, Талицкое, Гаринское, Серовское, Егоршинское, Невьянское, Березовское, Туринское, Сиячихинское, Сиячихинское, Таборинское, Тавдинское.

## **9. Содержание работы:**

**9.1. «Исследование существующего состояния сети лесных дорог Свердловской области по лесничествам эксплуатации лесных участков инвестиционных проектов в области освоения лесов: Алапаевское, Байкаловское, Билимбаевское, Верхотурское, Кушвинское, Режевское, Шалинское, Новолялинское, Ивдельское, Карпинское, Нижне-Тагильское, Сотринское, Талицкое, Гаринское, Серовское, Егоршинское, Невьянское, Березовское, Туринское, Сиячихинское, Таборинское, Тавдинское».**

9.1.1. Проведение технико-экономических изысканий лесных дорог Свердловской области в разрезе лесничеств: Алапаевское, Байкаловское, Билимбаевское, Верхотурское, Кушвинское, Режевское, Шалинское, Новолялинское, Ивдельское, Карпинское, Нижне-Тагильское, Сотринское, Талицкое, Гаринское, Серовское, Егоршинское, Невьянское, Березовское, Туринское, Сиячихинское, Сиячихинское, Таборинское, Тавдинское», с целью изучения и анализа: текущего состояния лесных дорог и мостовых сооружений на них, в том числе с указанием назначения, категории, типа лесной дороги, ширины проезжей части и земляного полотна, протяженности, транспортно-эксплуатационного состояния и грузооборот лесных дорог.

9.1.2. По каждому лесничеству провести анализ, представить краткую транспортно-экономическую характеристику и табличные материалы:

– анализ существующего проложения и состояния лесных дорог в соответствии с государственным лесным реестром и проектами освоения лесов на основе космических снимков высокого разрешения не старше 2 лет.

– перечень лесных дорог и их характеристик по состоянию на период начала работ;

– перечень мостовых сооружений и их характеристик по состоянию на период начала работ;

– характеристика и объем производства предприятий лесопромышленного комплекса, эксплуатирующих лесных участки на территории лесничеств.

– характеристика материально-сырьевой базы дорожного строительства на территории лесничеств.

9.1.3. Разработка карты-схемы лесных дорог в разрезе лесничеств по состоянию на текущее время с нанесением на неё:

- квартальной сетки;
- границы лесничеств;
- лесопользователей;
- населенных пунктов;
- сети автомобильных дорог общего пользования;
- сети лесных дорог с указанием вида покрытия, мостовых сооружений, зимников и ледовых переправ;

9.1.4. Разработка карты-схемы лесных дорог в разрезе лесничеств по состоянию на текущее время выполняется в виде электронной многослойной карты в формате AutoCAD или MapInfo на базе топографических карт масштабов от М 1: 25000 до М 1:100000 в зависимости от площади лесничеств при условии предварительного согласования с Государственным заказчиком. Карта схема должна быть разработана с возможностью пополнения, обновления, редактирования, связи с семантической базой данных. Организовать слои так, чтобы отдельно включались на изображении сеть автомобильных дорог по каждому виду отдельно, топографическая информация по отдельному классификатору.

9.1.5. Анализ существующего состояния и предложения по развитию сети лесных дорог Свердловской области до 2030 года по каждому лесничеству с учетом:

- определения содержания проблем и обоснования необходимости их решения по результатам исследования существующего состояния сети лесных дорог Свердловской области;
- перспективы (прогнозов) развития инвестиционных проектов о области освоения лесов Свердловской области до 2030 года: ООО «Лестех», ООО «Лесной Урал Лобва», ООО «СибирьЭкоСтрой», ООО «ТУРА-ЛЕС», ООО «Сосьва-Лес», ООО «Синергия», ООО «Уральская леспоромышленная компания», ООО «Выйский ДОК», ООО «Аргус СФК»;
- плана строительства туристико-рекреационного кластера «Гора Белая» в Свердловской области;
- плана (стратегии) освоения лесов ведомствами лесопромышленного комплекса Свердловской области до 2030 года с указанием требуемых точек тяготения лесных автомобильных дорог на территории лесничеств: Алапаевское, Байкаловское, Билимбаевское, Верхотурское, Кушвинское, Режевское, Шалинское, Новолялинское, Ивдельское, Карпинское, Нижне-Тагильское, Сотринское, Талицкое, Гаринское, Серовское, Егоршинское, Невьянское, Березовское, Туринское, Снячихинское, Снячихинское, Таборинское, Тавдинское;
- запланированных к размещению объектов транспортной инфраструктуры (лесных дорог) ведомствами и организациями лесопромышленного комплекса до 2030 года на территории лесничеств: Алапаевское, Байкаловское, Билимбаевское, Верхотурское, Кушвинское, Режевское, Шалинское, Новолялинское, Ивдельское, Карпинское, Нижне-Тагильское, Сотринское, Талицкое, Гаринское, Серовское,

Егоршинское, Невьянское, Березовское, Туринское, Синячихинское, Синячихинское, Таборинское, Тавдинское.

**9.2. «Разработка проектных предложений по развитию сети автомобильных дорог Свердловской области по лесничествам эксплуатации лесных участков инвестиционных проектов в области освоения лесов: Алапаевское, Байкаловское, Билимбаевское, Верхотурское, Кушвинское, Режевское, Шалинское, Новолялинское, Ивдельское, Карпинское, Нижне-Тагильское, Сотринское, Талицкое, Гаринское, Серовское, Егоршинское, Невьянское, Березовское, Туринское, Синячихинское, Синячихинское, Таборинское, Тавдинское».**

9.2.1. По каждому лесничеству разработать проектные предложения по развитию сети лесных дорог, с учетом обеспечения дорогами лесосырьевых баз, пожарной безопасности и перспективными мероприятиями по развитию автомобильных дорог общего пользования муниципального, межмуниципального и регионального, федерального значения, включая решение следующих задач:

- определение грузооборота и категории лесных дорог на перспективный период;
- проведение анализа соответствия состояния автомобильных дорог существующей, перспективной загрузке и функциональному значению;
- определение ширины проезжей части и земляного полотна, протяженности автомобильных дорог на перспективный период;
- разработка подпрограммы строительства, реконструкции лесных дорог, искусственных сооружений по этапам реализации до 2030 года в разрезе лесничеств с указанием очередности мероприятий и продолжительности реализации, представленным в виде реестра конкретных мероприятий;
- разработка подпрограммы капитального ремонта и ремонта лесных дорог, искусственных сооружений по этапам реализации до 2030 года в разрезе лесничеств с указанием очередности мероприятий и продолжительности реализации, представленным в виде реестра конкретных мероприятий;
- определение инвестиций, необходимых для выполнения программы по развитию с сохранности сети лесных дорог Свердловской области.

9.2.2. Произвести расчет потребности в материальных ресурсах и рекомендации по развитию производственной базы для строительства лесных дорог и мостовых сооружений по этапам реализации мероприятий до 2030 года.

9.2.3. Проектные предложения по развитию и сохранности лесных дорог Свердловской области увязать с существующей сетью автомобильных дорог общего пользования Свердловской области и планом её перспективного развития. Разработать проектные предложения по местам примыканий лесных дорог к автомобильным дорогам общего пользования.

9.2.4. Разработка карты-схемы лесных дорог в разрезе лесничеств на перспективный период с нанесением на неё:

- квартальной сетки;
- границы лесничеств;
- лесопользователей;
- населенных пунктов;

- сети автомобильных дорог общего пользования;
- общей сети лесных дорог с нанесением перспективных мероприятий по развитию лесных дорог с указанием вида покрытия, мостовых сооружений, зимников и ледовых переправ в соответствии с разработанным реестром перспективных мероприятий до 2030 года.

9.2.5. Разработка карты-схемы лесных дорог на перспективный период в разрезе лесничеств выполняется в виде электронной многослойной карты в формате AutoCAD или MapInfo на базе топографических карт масштабов от М 1: 25000 до М 1:100000 в зависимости от площади лесничеств при условии предварительного согласования с Государственным заказчиком. Карта схема должна быть разработана с возможностью пополнения, обновления, редактирования, связи с семантической базой данных. Организовать слои так, чтобы отдельно включались на изображении сеть автомобильных дорог по каждому виду отдельно, топографическая информация по отдельному классификатору.

9.2.6. Разработка выводов и предложений по Схеме развития и сохранности лесных дорог Свердловской области.

## **10. Этапы разработки Схемы:**

### **I этап.**

Исследование существующего состояния сети лесных дорог Свердловской области по лесничествам, где расположены лесные участки инвестиционных проектов в области освоения лесов: Алапаевское, Байкаловское, Билимбаевское, Верхотурское, Кушвинское, Режевское, Шалинское, Новолялинское, Ивдельское, Карпинское, Нижне-Тагильское, Сотринское, Талицкое, Гаринское, Серовское, Егоршинское, Невьянское, Березовское, Туринское, Снячихинское, Снячихинское, Таборинское, Тавдинское:

- Техничко-экономические изыскания лесных дорог Свердловской области;
- Транспортно-экономическая характеристика лесных дорог Свердловской области;
- Разработка карты-схемы лесных дорог Свердловской области по состоянию на текущее время;
- Анализ существующего состояния и предложения по развитию сети лесных дорог Свердловской области;
- Согласование Заказчиком результатов выполненных работ по I этапу.

### **II этап.**

Разработка проектных предложений по развитию сети автомобильных дорог Свердловской области по лесничествам, где расположены лесные участки инвестиционных проектов в области освоения лесов: Алапаевское, Байкаловское, Билимбаевское, Верхотурское, Кушвинское, Режевское, Шалинское, Новолялинское, Ивдельское, Карпинское, Нижне-Тагильское, Сотринское, Талицкое, Гаринское, Серовское, Егоршинское, Невьянское, Березовское, Туринское, Снячихинское, Снячихинское, Таборинское, Тавдинское:

- Проектные предложения по развитию сети лесных дорог области, с учетом обеспечения дорогами лесосырьевых баз и пожарной безопасности;

- Потребность в материальных ресурсах и рекомендации по развитию производственной базы для строительства лесных дорог и мостовых сооружений;
- Проектные предложения по примыканиям лесных дорог к автомобильным дорогам общего пользования;
- Разработка карты-схемы лесных дорог Свердловской области на период до 2030 года;
- Выводы и предложения по Схеме развития и сохранности лесных дорог Свердловской области;
- Согласование Заказчиком результатов выполненных работ по II этапу.

#### **11. Документы и материалы, предоставляемые по окончании работ.**

По окончании работ I этапа – не позднее 31 июля 2020 года и по окончании работ II этапа – не позднее 15 декабря 2020 года Исполнитель предоставляет Государственному заказчику акт выполненных работ в 2 экз. с приложением отчетной документации в составе:

№ п/п	Наименование	Количество, экз.	
		на бумажных носителях	на электронных носителях
1	Тома отчетной документации в составе текстовых и графических материалов по I этапу выполнения работ	2	4
2	Карты-схемы лесных дорог Свердловской области в разрезе лесничеств по состоянию на начало работ	2	4
3	Тома отчетной документации в составе текстовых и графических материалов по II этапу выполнения работ	2	4
4	Карты-схемы лесных дорог Свердловской области в разрезе лесничеств по состоянию на 2030 год.	2	4
5	Выводы и предложения по Схеме развития и сохранности лесных дорог Свердловской области	2	4

#### **12. Требования к оформлению результатов работ.**

- Карты-схемы лесных дорог разработать в масштабе от М 1:25000 до М 1:100000, для отдельных лесничеств в зависимости от их площади, при условии предварительного согласования масштабов с Государственным заказчиком.
- При оформлении карт-схем руководствоваться ГОСТ Р 52293-2004 и использовать условные знаки согласно ГОСТ 21.204-93 СПДС.
- Основные выводы и предложения по развитию и сохранности лесных дорог Свердловской области выделить отдельным томом, в состав тома включить сводные ведомости стоимости развития лесных дорог.

- Материалы, предоставляемые на электронных носителях должны иметь пояснительный файл с содержанием электронного носителя.
- Материалы, предоставляемые на электронных носителях должны иметь электронные форматы: текстовые файлы – в формате МО Word 2003 и выше (с расширением «.doc»); табличные файлы – в формате МО Excel 2003 и выше (с расширением «.xls»); картографический материал – в формате dwg, MapInfo, pdf.

### **13. Особые условия.**

- Результаты работ по I и II этапу требуется согласовать с Заказчиком.
- Подрядчик при необходимости представляет и принимает участие в защите промежуточных и конечного результатов разработки на совещаниях, организуемых Министерством природных ресурсов и экологии Свердловской области.

Заказчик  
Министерство природных ресурсов  
и экологии Свердловской области

Подрядчик

---

---

Таблица А.3 - Приоритетные инвестиционные проекты в области освоения лесов, реализуемые на территории Свердловской области

Наименование организации, реализующей проект, сроки реализации	Наименование проекта	Объем инвестиций (млн. рублей)		Социальный эффект (создание новых рабочих мест)	Ежегодный разрешенный размер пользования лесом (тыс. куб. м)	Годовой объем выпускаемой (планируемой к выпуску) продукции в рамках проекта
		план	факт			
1	2	3	4	5	6	7
Общество с ограниченной ответственностью (далее - ООО) "Аргус СФК" 2005 - 2015 годы (проект в стадии завершения)	создание деревообрабатывающего предприятия в Серовском районе Свердловской области с собственным циклом лесозаготовки	310,6	506,0	160	250,0	обрезные пиломатериалы - 128 куб. м; фанера - 30000 куб. м; топливные гранулы - 3000 т
ООО "Лестех" 2012 - 2024 годы	создание высокотехнологичного деревообрабатывающего производства с циклом заготовки древесины и дорожного строительства на территории Свердловской области	575,4	674,7	259	300,4	обрезные пиломатериалы - 48321 куб. м; столярно-строительные изделия и детали профильные - 10120 куб. м; лесоматериалы необработанные для лущения - 37600 куб. м гранулы топливные - 9790 т; древесина для плитного производства - 162206 куб. м
ООО "Лесной Урал Лобва" 2016 - 2027 годы	открытие нового лесоперерабатывающего производства в поселке Лобва Новолялинского городского округа	456,4	255,0	163	134,5	древесина топливная и сырье для целлюлозно-бумажного комбината - 35157 куб. м, необработанные березовые для лущения - 26602 куб. м;

Наименование организации, реализующей проект, сроки реализации	Наименование проекта	Объем инвестиций (млн. рублей)		Социальный эффект (создание новых рабочих мест)	Ежегодный разрешенный размер пользования лесом (тыс. куб. м)	Годовой объем выпускаемой (планируемой к выпуску) продукции в рамках проекта
		план	факт			
1	2	3	4	5	6	7
						обрезные пиломатериалы - 18611 куб. м, детали профильные - 1531 куб. м; комплекты для строительства дома из профилированного бруса - 2000 куб. м; пеллеты - 6439 т; древесный уголь - 3533 т
ООО "ТУРА ЛЕС" 2017 - 2026 годы	создание нового лесоперерабатывающего завода по производству шпона с собственным циклом лесозаготовки на территории Свердловской области	501,2	75,9	177	150,9	обрезные пиломатериалы - 27800 куб. м; шпон - 15600 куб. м, детали профильные - 1500 куб. м, топливные гранулы 4000 т; уголь древесный - 4300 т; низкосортная древесина для населения - 15000 куб. м
ООО "СибирьЭкоСтрой" 2017 - 2026 годы	создание нового лесоперерабатывающего завода по глубокой переработке древесины и инновационным способам утилизации отходов на территории Свердловской области	502,9	56,0	175	261,3	обрезные пиломатериалы - 40000 куб. м; элементы домостроения - 8000 куб. м; детали профильные - 5800 куб. м; фанерный кряж - 30500 куб. м; уголь древесный - 4000 т; древесная мука - 6900 т; древесная тара - 5800 куб. м



Наименование организации, реализующей проект, сроки реализации	Наименование проекта	Объем инвестиций (млн. рублей)		Социальный эффект (создание новых рабочих мест)	Ежегодный разрешенный размер пользования лесом (тыс. куб. м)	Годовой объем выпускаемой (планируемой к выпуску) продукции в рамках проекта
		план	факт			
1	2	3	4	5	6	7
ООО "Уральская лесопромышленная компания" 2017 - 2021 годы	завод профильных деталей для строительства с циклом лесопиления и лесозаготовки на территории Свердловской области	505,0	6,4	178	244,6	кашированные детали профилированные - 5000 куб. м; кашированные детали клееные - 3000 куб. м; детали профилированные - 3000 куб. м; пиломатериалы 15000 куб. м; пеллеты - 10000 т; брикеты - 4200 т; щепа топливная - 52750 куб. м
ООО "Синергия" 2018 - 2021 годы	создание высокотехнологичного деревообрабатывающего производства на территории Свердловской области	1503,4	10,8	135	659,2	пиломатериалы - 133000 куб. м; шпон лущеный - 50000 куб. м; древесный уголь - 12000 т; щепа технологическая - 1000000 плотных куб. м; балансы - 142120 куб. м; дрова населению - 20000 куб. м
ООО "Сосьва-Лес" 2018 - 2027 годы	модернизация лесоперерабатывающего завода по глубокой переработке древесины на территории Свердловской области	507,6	6,3	126	239,6	обрезные пиломатериалы - 44000 куб. м; шпон - 15500 куб. м; детали профильные для строительства - 7700 куб. м; гранулы топливные - 12600 куб. м; щепа технологическая - 27500 куб. м;

Наименование организации, реализующей проект, сроки реализации	Наименование проекта	Объем инвестиций (млн. рублей)		Социальный эффект (создание новых рабочих мест)	Ежегодный разрешенный размер пользования лесом (тыс. куб. м)	Годовой объем выпускаемой (планируемой к выпуску) продукции в рамках проекта
		план	факт			
1	2	3	4	5	6	7
						балансы - 47000 куб. м
Итого		4862,5	1591,1	1373	2210,5	-

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Дорожно-строительные материалы, принятые к исследованию

Таблица Б.1 - Технические характеристики щебня, применяемого в асфальтобетоне

№	Наименование показателя	Фактические показатели			Технические требования	
		фр. 11,2-16 мм	фр. 8-11,2 мм	фр. 4-8 мм	ГОСТ Р 58406.1- 2020	СТО 001- 2019
1.	Дробимость, не ниже	M1400	M1400	M1400	не ниже M1000	не ниже M1400
2.	Морозостойкость	F300	F300	F300	не ниже F50	не ниже F200
3.	Сопротивление дроблению и износу	И1	И1	И1	От И1 до И2 включ.	И1
4.	Средневзвешанное содерж. зерен пластин. (лещадной) и игловатой формы, %	5	6	8	до 15 включ.	до 15 включ.
		5,9				
5.	Содержание пылев. и глин. частиц, % от массы	0,2	0,2	0,6	Не более 0,5	-
6.	Сопротивление истираемости по показателю микро-Деваль	МД1	МД1	МД1	МД1	МД1
7.	Средняя плотность, г/см <sup>3</sup>	3,05	3,04	3,04		

Таблица Б.2 - Технические характеристики дроблёного песка, применяемого в асфальтобетоне

№	Наименование показателя	Фактические показатели	Технические требования	
			ГОСТ Р 58406.1-2020	СТО 001-2019
1.	Дробимость, не ниже	M1400	M800	M1000
2.	Содержание глинистых частиц, определяемое методом набухания, %	0,49	не более 0,5	не более 0,5
3.	Максимальная плотность, г/см <sup>3</sup>	3,07		

Таблица Б.3 - Технические характеристики минерального порошка, применяемого в асфальтобетоне

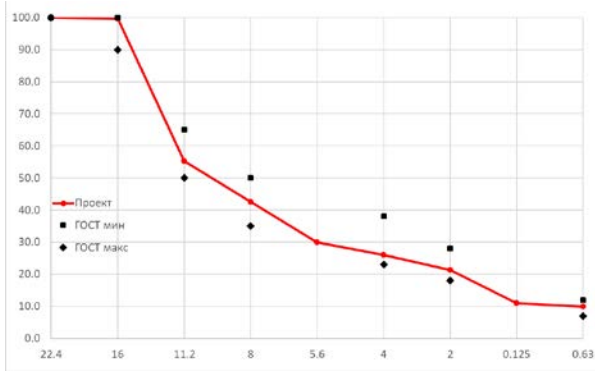
№	Наименование показателя	Фактические показатели	Технические требования
			ГОСТ 32761, МП-1
1.	Зерновой состав, % по массе, не менее:		
	- мельче 2 мм;	100	100
	- мельче 0,125 мм;	89,2	85
	- мельче 0,063 мм;	83	70
2.	Пористость, %, не более	29	30
3.	Битумоемкость, г, не более	48	50

Таблица Б.4 - Технические характеристики битума, применяемого в асфальтобетоне

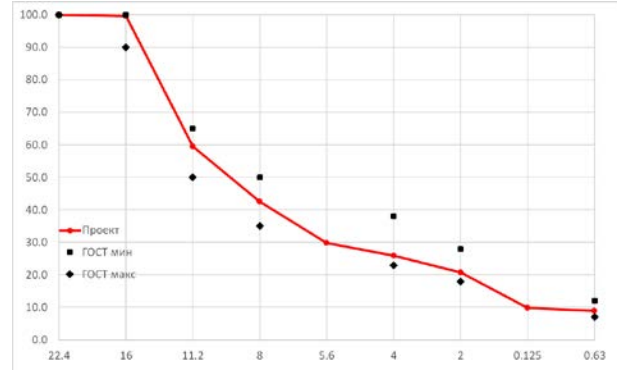
№	Наименование показателя	Фактические показатели	Технические требования ГОСТ 33133, БНД 70/100
1.	Глубина проникания иглы, 0,1 мм при 25 °С	73	71-100
2.	Температура размягчения по кольцу и шару, °С	48	не ниже 47
3.	Растяжимость при 0 °С, см	4,0	не менее 3,7
4.	Температура хрупкости, °С	минус 20	не выше минус 18
5.	Изменение массы образца после старения, %	0,4	не более 0,6
6.	Изменение температуры размягчения после старения, °С	6,8	не более 7

Таблица Б.4 – Состав а/б смесей со значениями физических показателей по результатам лабораторных испытаний

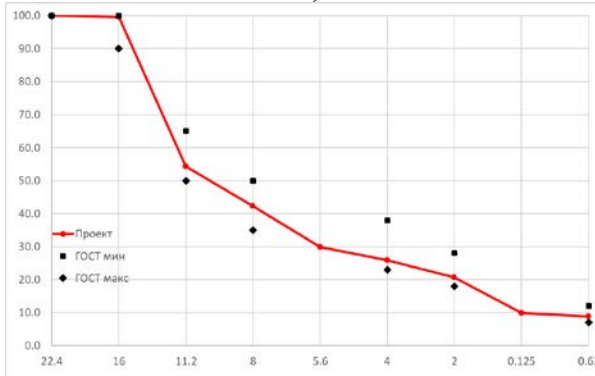
№ п/п	Щебень фракции, %			Песок, %	Мин. пор., %	Битум, %	$G_{mm}$ , %	$G_{mb}$ , %	$P_a$ , %
	11,2-16мм	8-11,2мм	4-8мм						
1.	45,4	6,1	17,5	16,1	9,5	5,0	2,756	2,690	2,3948
2.	40,6	11,3	17,0	17,5	8,0	5,1	2,751	2,682	2,5082
3.	46,4	5,2	17,5	17,5	8,0	4,9	2,752	2,658	3,4157
4.	47,2	4,7	18,9	15,1	8,5	5,2	2,757	2,651	3,8448
5.	40,6	11,3	18,9	15,1	8,5	5,2	2,755	2,643	4,0653
6.	40,7	11,4	18,9	15,1	8,5	5,0	2,747	2,678	2,5118
7.	40,8	10,4	17,0	17,4	9,0	5,0	2,742	2,680	2,2611
8.	39,9	2,8	26,8	16,0	9,0	5,1	3,014	2,757	3,0468
9.	45,0	5,9	17,3	17,5	9,0	4,9	2,757	2,692	2,3567
10.	47,0	4,9	18,9	15,1	8,5	5,2	2,753	2,647	3,8336
11.	40,0	11,3	19,2	15,1	9,0	5,0	2,754	2,685	2,5018
12.	40,5	3,4	25,6	15,1	9,9	5,1	2,748	2,664	3,0468
13.	44,5	5,7	22,7	15,1	6,6	5,0	2,759	2,677	2,9685
14.	41,1	10,3	17,3	15,1	10,8	5,0	2,750	2,684	2,4099
15.	45,4	5,2	17,2	17,4	9,4	5,0	2,748	2,654	3,4246
16.	47,1	4,5	19,1	15,1	8,6	5,2	2,753	2,650	3,7395
17.	40,5	11,5	18,8	15,0	8,6	5,2	2,754	2,642	4,0569
18.	40,0	11,2	19,0	15,1	9,3	5,0	2,758	2,673	3,0658
19.	39,8	3,0	25,4	17,4	8,9	5,1	2,748	2,664	3,0399



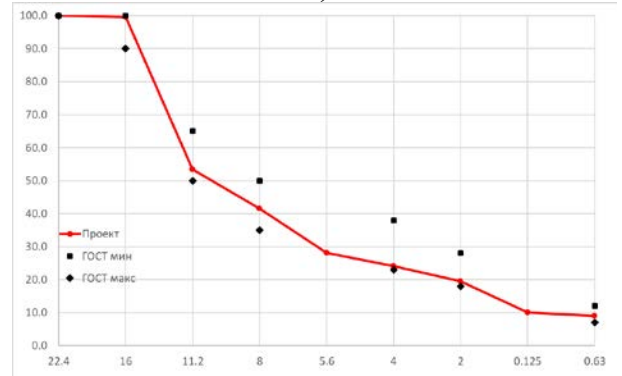
а)



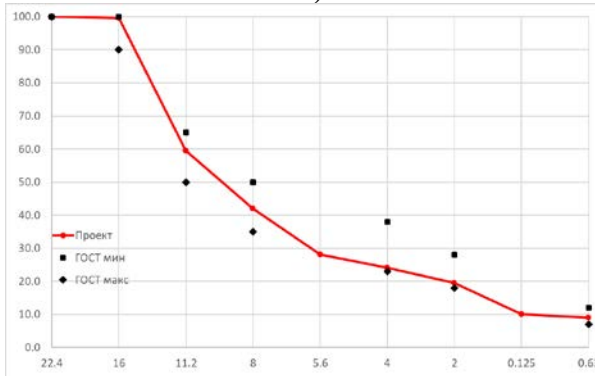
б)



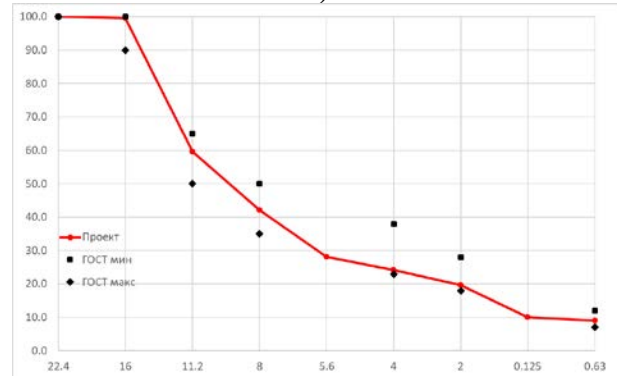
в)



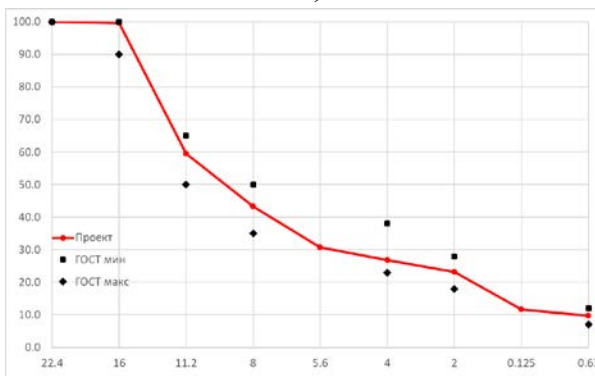
г)



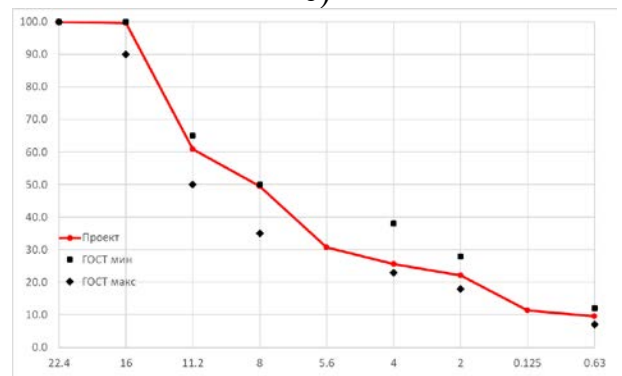
д)



е)



ж)



з)

Рисунок Б.1 Кривые зернового состава для смесей 1-8 таблицы Б.4

От 05.07.2021

**АКТ**  
**проведения обследований покрытий на участках автомобильных дорог**  
**Свердловской области с целью получения исходных данных для разработки**  
**интеллектуальной системы**

Комиссия в составе Начальника лаборатории контроля качества ГКУ СО «Управление автодорог» А.В. Втюрина, главного технолога АО «Трест Уралтрансспецстрой» Е.В. Моора, Профессора кафедры транспорта и дорожного строительства УГЛТУ С.И. Булдакова, Профессора кафедры интеллектуальных систем В.В. Побединского УГЛТУ, Аспиранта кафедры транспорта и дорожного строительства УГЛТУ И.А. Карабутовой составили настоящий акт по результатам обследования участков автомобильных дорог Свердловской области для получения исходных данных для разработки интеллектуальной системы оценки эксплуатационного показателя глубины колеи покрытия автодороги с усовершенствованным покрытием из асфальтобетона с определением межремонтных сроков при эксплуатации в целях совершенствования методов проектирования, процессов строительства и эксплуатации лесовозных дорог на основе интеллектуальных систем оценки физических и эксплуатационных показателей покрытий.

В ходе комиссионного обследования был произведен отбор 19 кернов на участках автомобильных дорог с асфальтобетонным покрытием для определения следующих характеристик:

- содержание воздушных пустот в асфальтобетоне покрытия  $P_a$ ,
- число проходов виброкатка при устройстве слоя покрытия  $N$ ,
- интенсивность движения транспорта  $E$ ,
- истираемость асфальтобетона в покрытии по Праллу  $V$ ,
- глубина колеи  $K$ .

Керны в виде цилиндрических образцов диаметром 100 мм были отобраны по ГОСТ Р 58407.5-2019 «Дороги автомобильные общего пользования. Асфальтобетон дорожный. Методы отбора проб из уплотненных слоев дорожной одежды» с использованием установки для выбуривания кернов мокрым способом с алмазными коронками на всю глубину конструктивного слоя покрытия на участках следующих автодорог.

## 1. ХАРАКТЕРИСТИКА УЧАСТКОВ

Указанные в таблице 1 участки автодорог Свердловской области тяготеют к расчетным лесосекам Кушвинского и Серовского лесничеств на территории Свердловской области и эксплуатируются крупногабаритным транспортом для перевозки лесного сырья, хлыстов и продукции.

Таблица 1 - Характеристика участков

Код дороги	Автомобильная дорога	Начало участка, км	Конец участка, км	Покрытие	Муниципальное образование
4103000	г.Екатеринбург - г.Нижний Тагил - г.Серов	198.408	202.508	А/б	городской округ Верхняя Тура
5301000	г.Верхняя Тура - г.Красноуральск	1.900	3.800	А/б	городской округ Верхняя Тура
5301000	г.Верхняя Тура - г.Красноуральск	3.800	4.057	А/б	городской округ Верхняя Тура
5302000	г.Верхняя Тура - г.Качканар	5.656	15.080	А/б	городской округ Верхняя Тура
5302130	Подъезд к г.Верхняя Тура от км 6+860 а/д "г.Верхняя Тура - г.Качканар"	0.000	9.600	А/б	городской округ Верхняя Тура
5304000	г.Кушва - г.Нижняя Тура	13.026	14.277	А/б	городской округ Верхняя Тура
5304000	г.Кушва - г.Нижняя Тура	19.000	19.819	А/б	городской округ Верхняя Тура

## 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

**Содержание воздушных пустот** было определено при проведении лабораторных испытаний в соответствии с методами ГОСТ Р 58401.8-2019 «Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные. Метод определения содержания воздушных пустот» на отобранных в ходе данного комиссионного обследования кернах.

Содержание воздушных пустот рассчитывалось по формуле:

$$P_a = \left(1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}}\right) \cdot 100,$$

где  $G_{mb}$  - объемная плотность асфальтобетона,

$G_{mm}$  - максимальная плотность асфальтобетонной смеси.

**Истираемость** была определена при проведении лабораторных испытаний в соответствии с методами ГОСТ Р 58406.5-2020 «Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Метод определения истираемости» на отобранных в ходе данного комиссионного обследования кернах.

Истираемость асфальтобетона  $V_{ab}$  вычислялась по формуле:

$$V_{ab} = \frac{m_1 - m_2}{G_{mb}},$$

где  $m_1$  – масса образца перед испытаниями, г;

$m_2$  – масса образца после испытания, г;

$G_{mb}$

- объемная плотность образца.

**Число проходов катка** было принято в соответствии с актами пробного уплотнения покрытий исполнительной документации.

**Интенсивность движения транспорта** подсчитана при проведении полевых работ в ходе комиссионного обследования дороги с учетом приведенной интенсивности движения лесовозного автотранспорта.



Глубина колеи определена в результате данного комиссионного обследования с использованием трехметровой рейки. Установлено, что на автодороге присутствуют дефекты покрытия проезжей части в виде колеи.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Результаты испытаний приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Сводная ведомость определения характеристик по итогам проведенных испытаний

Автодорога	км	Содержание воздушных пустот Pa, %	Число проходов катка N, ед	Интенсив- ность движения E, ед/ч	Истира- емость V, мл	Глубина колеи, мм
Подъезд к г. Верхняя Тура от км 6+860 а/д «г. Верхняя Тура - г. Качканар»	0,0	2.5082	14	15	23	25
	6,7	2.4983	10	15	15	18
	9,0	2.3948	8	20	18	20
г. Кушва - г. Нижняя Тура	19,0	4.0653	10	35	17	5
	19,2	2.385	10	30	19	15
	19,4	2.5118	16	30	15	17
	19,6	2.3999	8	30	20	25
	19,8	4.0596	8	30	18	10
г. Верхняя Тура - г. Красноуральск	1,9	3.0468	12	50	22	24
	3,5	2.5123	16	50	20	23
	4,0	3.0583	14	50	22	18
г. Кушва – г. Нижняя Тура	13,0	3.8503	10	65	19	16
	13,5	3.8448	8	70	21	18
	14,0	2.2783	8	75	20	25
Екатеринбург – Нижний Тагил – Серов	198,5	3.4157	12	100	16	14
	199,5	3.4957	10	110	18	18
	200,5	3.4063	14	110	20	22
	201,5	2.2658	10	120	20	30
	202,5	2.2611	10	125	21	30

Начальник лаборатории контроля качества ГКУ  
СО «Управление автодорог»

А.В. Втюрин

Главный технолог АО «Трест  
Уралтрансспецстрой»

Е.В. Моор

Профессор кафедры Транспорта  
и дорожного строительства УГЛТУ

С.И. Булдаков

Профессор кафедры Интеллектуальных систем  
УГЛТУ

В.В. Побединский

Аспирант кафедры Транспорта и дорожного  
строительства УГЛТУ

И.А. Карабутова

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

### Рекомендации

#### на проектирование, приготовление и уплотнение асфальтобетонной смеси для устройства верхнего слоя покрытия

### 1. Область применения

1.1 Рекомендуется к применению в дорожных лабораториях при проектировании составов асфальтобетонных смесей, в проектных организациях при проектировании и составлении Проектов организации строительства, подрядных организациях при составлении Проектов производства работ.

1.2 При выборе вида асфальтобетона для дорожного покрытия, его состава и исходных компонентов необходимо учитывать требования, зависящие от категории дороги, климатических и эксплуатационных условий, технико-экономических показателей (требования долговечности и надежности, наличие ресурсов, сроки строительства и др.).

### 2. Применяемые минеральные материалы

2.1 Рекомендуется применять материалы в следующих процентных соотношениях:

Наименование материалов	Содержание в асфальтобетонной смеси по массе, %
1. Щебень крупной фракции ( <i>Large Crushed Stone (LCS)</i> -11,2-16мм);	39,8-47,2
2. Щебень средней фракции ( <i>Medium Crushed Stone (MCS)</i> - 8-11,2мм);	2,8-11,5
3. Щебень мелкой фракции или отсеб ( <i>Fine Crushed Stone (FCS)</i> 4-8мм);	17-26,8
4. Песок;	15,0-17,5
5. Минеральный порошок активированный	8,0-10,8

## 2.2 Технические характеристики щебня, применяемого в асфальтобетоне

Наименование показателя	Ед. изм.	Технические требования	
		ГОСТ 58406.1-2020	ГОСТ 32703-2014
Средняя плотность	г/см <sup>3</sup>	Не норм	Не норм
Марка:			
- по дробимости	%	Не ниже 1000	Не ниже 1400
- по сопротивлению дроблению и износу	%	От И-1 до И-2	Не ниже И-1
- по морозостойкости	%	не ниже F50	не ниже F200
Содержание зерен пластинчатой (лещадной) и игловатой формы	%	до 15 включ.	до 15 включ.
Сопротивление истираемости по показателю микро-Деваль	%	МД1	МД1

## 2.3 Технические характеристики песка дробленого, применяемого в асфальтобетоне

Наименование показателя	Технические требования	
	ГОСТ Р 58406.1-2020	ГОСТ 32730-2014
Дробимость, не ниже	М1000	М400
Содержание глинистых частиц, определяемое методом набухания, %	не более 0,5	-

## 2.4 Технические характеристики минерального порошка, применяемого в асфальтобетоне

Наименование показателя	Технические требования
	ГОСТ 32761, МП-1
Зерновой состав, % по массе, не менее:	
- мельче 2 мм;	100
- мельче 0,125 мм;	85
- мельче 0,063 мм;	70
Пористость, %, не более	30
Битумоемкость, г, не более	50

2.5 После подбора гранулометрического состава смеси на ситах с номинальными размерами ячеек: 0,063; 0,125; 0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 4,0; 5,6; 8,0; 11,2; 16,0; 22,4; 31,5 мм по ГОСТ 33029— 2014 рекомендуется подобрать и проверить процентные соотношения с использованием нейро-нечеткой сети оценки содержания воздушных пустот в асфальтобетоне покрытия (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) в программном комплексе Matlab на соответствие показателя содержание воздушных пустот требованиям ГОСТ 58406.1-2020.

2.6 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  $LCS=43,55\%$ ,  $MCS=7,10\%$ ,  $FCS =21,90\%$   $B=(4,90;4,97);(5,10;5,15)\%$ .

2.7 Интерфейс программы показан на рисунке 1. Необходимо ввести соответствующие значения в блок ввода.

### 3. Приготовление асфальтобетонной смеси

3.1 Температура инертных материалов на выходе из сушильного барабана. Принимается – 170-180°C.

3.2 Температура битума, поступающего в смеситель (в рабочем котле). Принимается – 130-140°C.

3.3 Время сухого перемешивания инертных материалов и минерального порошка – 15 с.

3.4 Время мокрого перемешивания инертных материалов с битумом – 45 с.

3.5 Температура смеси на выходе из смесителя 150-165°C.

2.6 Время хранения смеси не более:

- в бункере накопителе – не более 2 часов.

3.7 При приготовлении смеси должна быть четко определена ее рецептура и соблюден заданный температурный режим. Готовая смесь выгружается в бункер-накопитель или непосредственно в автомобиль-самосвал.

#### **4. Укладка и уплотнение асфальтобетонной смеси**

4.1 Особое внимание уделяется подготовке основания дорожной одежды. Основание, на которое будет укладываться асфальтобетонная смесь, должно быть очищено от грязи, пыли и посторонних предметов. Также за 1-6 ч проводится нижнего слоя покрытия битумом или битумной эмульсией с расчетным расходом:

- при обработке битумом нижнего слоя покрытия - 0,2-0,3 л/м<sup>2</sup>;
- при обработке эмульсией нижнего слоя покрытия - 0,3-0,4 л/м<sup>2</sup>.

4.2 Укладка покрытия осуществляется асфальтоукладчиком. При выборе асфальтоукладчика учитывается его производительность и мощность, ширина укладки, состояние основания.

4.3 Температура смеси в начале уплотнения и температурной режим при уплотнении устанавливается не выше 160°C.

4.4 Технологические режимы укладки и уплотнения назначаются после пробной укладки. Рекомендуется определять количество и режим проходов катка с помощью интеллектуальной системы оценки глубины колеи в асфальтобетоне покрытия с учетом информации об интенсивности движения транспорта на автодороге, истираемости асфальтобетона и составе асфальтобетона в покрытии (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) из расчета соответствия прогнозируемой глубины колеи требованиям ГОСТ Р 50597-2017.

4.5 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.

4.6 Интерфейс программы показан на рисунке 1. Необходимо ввести соответствующие значения в блок ввода.

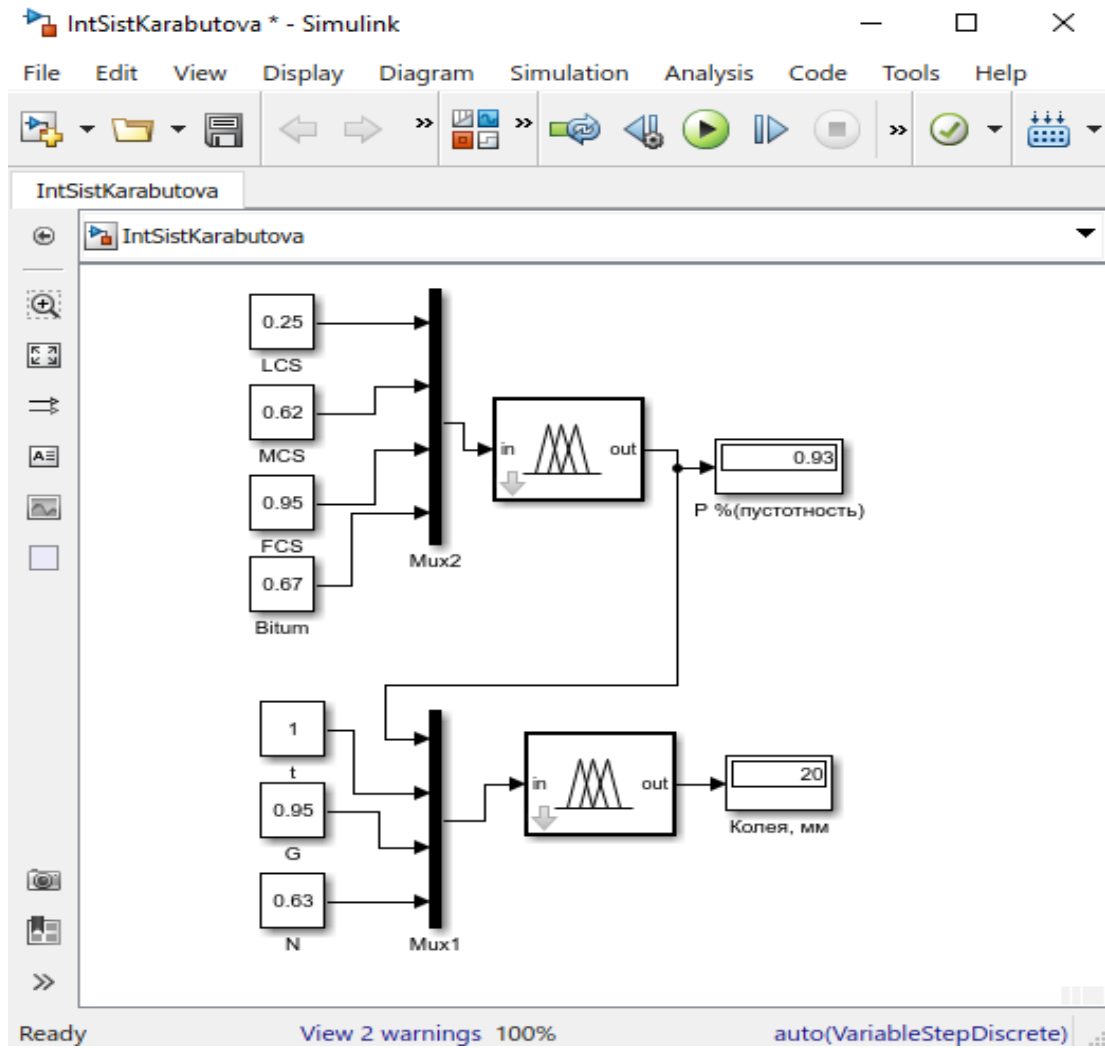


Рисунок 1- Интерфейс программы



## УРАЛЬСКИЙ ДОРОЖНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР

Общество с ограниченной ответственностью  
«Уральский дорожный научно-исследовательский центр»  
ОКПО 46658029, ОГРН 1169658011313, ИПН 6658482266/КПП 665801001  
Р/с 40702810702400000738 в Ф-ле Западно-Сибирский ЦАО Банка «ФК Открытие» БИК 047162812  
620014, г. Екатеринбург, ул. Юмашева, д. 7, тел. **(343) 319-58-08**,  
**E-MAIL: URALDORNAUKA@YANDEX.RU**

ООО «Уральский дорожный научно-исследовательский центр»



УТВЕРЖДАЮ  
Генеральный директор

В.Н. Дмитриев

«07» июля 2022 года

### АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук аспиранта кафедры транспорта и дорожного строительства Уральского государственного лесотехнического университета Карабутовой Ирины Андреевны на тему:  
«Оценка эксплуатационных показателей покрытий лесовозных дорог на основе интеллектуальных систем».

Настоящий акт подтверждает, что предлагаемая методика, разработанная в диссертационной работе Карабутовой И.А., принята для внедрения при проектировании автомобильных дорог для обоснования проектных решений в целях прогнозирования глубины колеи в покрытии дорожных одежд и увеличения межремонтных сроков.

Данное внедрение позволит: проектировать состав асфальтобетонной смеси покрытия с предварительной оценкой физического параметра – содержания воздушных пустот; проектировать технологический процесс пробного уплотнения (уплотнение катками); назначать эксплуатационные параметры (грузопоток, истираемость асфальта) с прогнозом эксплуатационного показателя покрытия – глубины колеи; планировать межремонтные сроки.

Начальник отдела проектирования и внедрения новых материалов – ГИП

Горбунов А.Г.



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ  
ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ

Юридический адрес: 620075, г. Екатеринбург, ул. Луначарского, 80, этаж 4,  
оф. 408  
Почтовый адрес: 620014, г. Екатеринбург, ул. Антона Валека, д.15, оф.401  
Телефон: 8-(343)-288-29-01 (02)  
Факс: 8-(343)-342-01-39  
E-mail: info@uraldor.ru  
ОГРН 1046604420444  
ИНН/ КПП 6672175034/667001001

СОЮЗ «Уральское объединение строителей» СРО-С-166-30122009 регистрационный номер  
№ 1727 от 29.08.2017

## УТВЕРЖДАЮ

Исполнительный директор  
ООО «УралДорТехнологии»

  
С.И. Тамбовцева  
« 4 » Июль 2022 г

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук аспиранта кафедры транспорта и дорожного строительства Уральского государственного лесотехнического университета Карабутовой Ирины Андреевны на тему: «Оценка эксплуатационных показателей покрытий лесовозных дорог на основе интеллектуальных систем».

Настоящий акт подтверждает, что научные и практические результаты диссертационной работы Карабутовой И.А. использованы в области прогнозирования колееобразования на автомобильных дорогах с асфальтобетонным покрытием, в том числе эксплуатирующихся крупногабаритным автотранспортом для перевозки лесного сырья и лесной продукции. Прогнозируемые данные были подтверждены на 75 %. Результаты прогностических расчетов позволяют обосновать проектные, технические и технологические решения при разработке проектной документации.

Приняты ко внедрению результаты диссертационной работы Карабутовой И.А. при разработке проектной документации на «Ремонт автомобильной дороги с. Битимка – с. Первомайское на участке км 14+135 – км 19+450 на территории городского округа Первоуральск и Нижнесергинского муниципального района Свердловской области» для оценки эксплуатационного показателя покрытия – колеености. После проведения ремонтных работ в течение гарантийного срока планируется исследовать покрытие автомобильной дороги с целью определения динамики образования колеи.

Начальник технического отдела



А.В. Шарибзянов




РЕКОМЕНДОВАНО:

Методической комиссии Инженерно-технического института

Протокол № 1/4 от 05.05.2022Председатель  А.А. Чижов

УТВЕРЖДАЮ

Проректор УГЛТУ  
по научной работе и инновационной  
деятельности В.В. Фомин«5» мая 2022

Г

## АКТ

о внедрении в учебный процесс на кафедре транспорта и дорожного строительства Инженерно-технического института результатов диссертационной работы Карабутовой Ирины Андреевны «Оценка эксплуатационных показателей покрытий лесовозных дорог на основе интеллектуальных систем».

**1. Краткое описание результатов внедрения, конечный результат.**

Разработана методика проектирования покрытий лесовозных дорог, а также автодорог общего пользования с усовершенствованным покрытием, с оценкой основных физических и эксплуатационного показателя на основе интеллектуальных систем, разработаны рекомендации по совершенствованию дорожных покрытий на основе интеллектуальных систем.

**2. Внедрение по курсу дисциплин:**

По направлению подготовки 35.03.02 – Технология лесозаготовительных и деревообрабатывающих производств (профиль: Промышленный транспорт в лесном бизнесе) «Инженерные изыскания и проектирование лесных автомобильных дорог», «Строительство лесных автомобильных дорог», «Эксплуатация лесных автомобильных дорог», «Автоматизированное проектирование лесных автомобильных дорог».

По направлению подготовки 08.03.01 – Строительство (профиль: Автомобильные дороги) «Информационные технологии в дорожной отрасли», «Технологические процессы в строительстве», «Строительство дорог», «Эксплуатация дорог», «Автоматизированное проектирование дорог», «Основы научных исследований в дорожной отрасли», «Основы организации и управления в строительстве автомобильных дорог».

**3. Рекомендации** – результаты исследований использованы при проведении лекционных и практических занятий, а также в курсовых и выпускных квалификационных работах кафедры Транспорта и дорожного строительства по направлениям подготовки 35.03.02 – Технология лесозаготовительных и деревообрабатывающих производств (профиль: Промышленный транспорт в лесном бизнесе), 08.03.01 – Строительство (профиль: Автомобильные дороги).

Состав комиссии:

Зав. кафедрой транспорта и дорожного строительства



С.А. Чудинов

Доцент кафедры транспорта и дорожного строительства



М.В. Савсюк

Доцент кафедры транспорта и дорожного строительства



А.Ю. Шаров



МИНОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ  
 Федеральное государственное  
 бюджетное образовательное  
 учреждение высшего  
 профессионального образования  
 «Уральский государственный лесотехни-  
 ческий университет»  
 (УГЛТУ)

Сибирский тракт, д. 37,  
 Екатеринбург, 620100.

Тел. (343) 254-65-06. Факс (343) 262-96-38.

E-mail: general@usfeu.ru  
 ОКПО 02069243, ОГРН 1026605426814  
 ИНН/КПП 6662000973/667201001

№ \_\_\_\_\_  
 на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе и ин-  
 новационной деятельности УГЛТУ

  
 \_\_\_\_\_  
 Фомин В.В.

« 10 » июня 2022 г.



## А К Т

внедрения результатов диссертационной работы аспиранта УГЛТУ  
 Карабутовой И.А. «Оценка эксплуатационных показателей покрытий  
 лесовозных дорог на основе интеллектуальных систем»

Комиссия в составе: председателя директора социально-экономического инсти-  
 тута доцента, к.э.н., Капустиной Ю.А., членов комиссии проф., д.т.н. Ковалева Р.Н.,  
 доцента, к.т.н. Ляхова С.В. составили настоящий акт о том, что результаты диссер-  
 тационной работы Карабутовой Ирины Андреевны «Оценка эксплуатационных пока-  
 зателей покрытий лесовозных дорог на основе интеллектуальных систем» исполь-  
 зуются в учебном процессе по дисциплинам «Нейронные сети», «Основы искус-  
 ственного интеллекта», в курсовом и дипломном проектировании. Предложенная ав-  
 тором методика и компьютерные программы для исследования и проектирования  
 дорожных покрытий позволяют выполнять прикладные задачи по указанным дисци-  
 плинам, а в среде MatLab следующие процедуры:

- 1) постановку задачи оценки параметров дорожных покрытий для решения с по-  
 мощью нейро-нечеткой сети;
- 2) разработку обобщенной интеллектуальной системы в среде Simulink;
- 3) обработку экспериментальных данных.

Использование указанной методики, программ позволяет студентам на основе  
 самых передовых компьютерных разработок – нейросетей, нечетких систем, осваи-  
 вать современные методы моделирования и проектирования дорожных покрытий.

Председатель комиссии:

доц., к.э.н.

Капустина Ю.А.

Члены комиссии:

проф., д.т.н.

Ковалев Р.Н.

доц., к.т.н.

Ляхов С.В.