

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

На правах рукописи

Анастас Елена Сергеевна

**ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ СКОРОСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА
ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД ЛЕСОВОЗНЫХ ДОРОГ НА БАЗЕ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ**

4.3.4 – Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и
переработки древесины

ДИССЕРТАЦИЯ

На соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель – С.И. Булдаков
кандидат технических наук, профессор,
заслуженный работник высшей школы

Екатеринбург

2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ НАУЧНЫХ И ПРАКТИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ В ОБЛАСТИ ЛЕСНОГО ДОРОЖНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА.....	12
1.1 Особенности устройства дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог.....	13
1.2 Оценка транспортной инфраструктуры лесовозных дорог на примере Свердловской области.....	21
1.3 Анализ работ, посвященных совершенствованию лесовозных автомобильных дорог.....	26
1.4 Современные тенденции применения информационных технологий в области дорожного строительства.....	29
1.5 Выводы по первой главе.....	34
1.6 Определение цели и задач исследования. Разработка общей методологии исследования.....	36
ГЛАВА 2. ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОТОЧНОГО МЕТОДА УСТРОЙСТВА ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД ЛЕСОВОЗНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ.....	39
2.1 Основные принципы организации работ при устройстве дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог.....	40
2.2 Принятие решений при назначении скорости строительства дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог.....	45
2.3 Анализ неопределенностей при определении стоимости устройства дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог.....	52
2.4 Разработка структурной схемы модели определения скорости комплексного потока и стоимости устройства дорожной одежды.....	55
2.4 Выводы по второй главе.....	58

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ КОМПЛЕКСНОГО ПОТОКА И СТОИМОСТИ УСТРОЙСТВА ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ ЛЕСОВОЗНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ	59
3.1 Выбор программного средства для определения скорости комплексного потока и стоимости устройства дорожной одежды лесовозных автомобильных дорог	59
3.2 Получение исходных данных для разработки нейронных сетей определения скорости комплексного потока и стоимости устройства дорожной одежды	62
3.3 Разработка нейронной сети определения скорости комплексного потока устройства дорожной одежды	65
3.4 Разработка нейронной сети определения стоимости устройства дорожной одежды	73
3.4 Создание интеллектуальной системы определения скорости комплексного потока и стоимости устройства дорожной одежды на основе комплекса нейронных сетей.....	77
3.5 Выводы по третьей главе	78
ГЛАВА 4. ПОСТАНОВКА ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДЛАГАЕМОГО МЕТОДА НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ	80
4.1 Цель, задачи и постановка численного эксперимента.....	80
4.2 Проверка адекватности нейронных сетей и настроенной интеллектуальной системы.....	83
4.3 Практическое применение и анализ результатов исследования	94
4.4 Определение экономической эффективности от внедрения результатов исследования.....	99
4.5 Выводы по четвертой главе	102
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ.....	104

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	106
ПРИЛОЖЕНИЕ А	125
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	127
ПРИЛОЖЕНИЕ В	130
ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....	133
ПРИЛОЖЕНИЕ Д	138
ПРИЛОЖЕНИЕ Е.....	139

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Лесовозные автомобильные дороги являются важнейшим элементом лесозаготовительного производства. Эффективность использования лесосырьевых ресурсов в первую очередь зависит от уровня развития транспортной инфраструктуры лесных дорог. Качественные дороги обеспечивают ритмичную работу всех звеньев лесозаготовительного производства, что позволяет в максимальной степени использовать основные фонды и трудовые ресурсы. Современные лесовозные автомобильные дороги являются капиталоемким инженерным объектом, проектирование и устройство которых представляет собой сложный и трудоемкий процесс. Одним из самых высоконагруженных и дорогостоящих элементов, является дорожная одежда, себестоимость которой достигает 40...50 % от общей стоимости строительства автомобильной дороги.

Проблема развития лесотранспортной сети особенно остро стоит для Свердловской области, которая относится к многолесным районам, так как 83% ее территории занимают леса.

Технический прогресс требует от предприятий лесного комплекса использование прогрессивных методов проектирования и строительства, которые направлены на снижение стоимости работ и сокращение сроков их выполнения без потери качественных характеристик. В последние годы на государственном уровне, в частности «Стратегией развития лесного комплекса РФ на период до 2030 года» и «Национальным проектом Цифровая экономика» особое внимание уделено проблемам качественного проектирования автомобильных дорог с использованием современных средств информационных технологий. Самые приоритетные в их числе указаны в «Национальной стратегии развития искусственного интеллекта в РФ на период до 2030 г», однако, подобных разработок крайне недостаточно, что не способствует развитию дорожной

отрасли. Таким образом, с учетом актуальности проблемы, ее практической и научной значимости были определены цель и задачи исследований.

Цель исследования. Разработка рациональной технологии устройства дорожной одежды лесовозных автомобильных дорог с применением интеллектуальной системы.

Задачи исследования.

1. На основе анализа научных и практических проблем в области дорожного строительства определить наиболее актуальное направление дальнейшего его совершенствования с учетом условий неопределенности в технологии устройства дорожных одежд автомобильных лесовозных дорог.

2. Обосновать теоретический подход, исходные и выходные параметры, разработать структурную схему модели определения скорости комплексного потока и стоимости устройства дорожной одежды.

3. Разработать интеллектуальную систему в виде комплекса нейро-нечетких сетей для определения рациональной скорости комплексного потока и стоимости устройства дорожной одежды и реализовать ее в компьютерной программе *Matlab+Simulink*.

4. Выявить закономерности влияния технологических параметров на скорость комплексного потока и стоимость устройства дорожной одежды.

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

Объектом исследования является дорожная одежда автомобильной лесовозной дороги.

Предмет исследования: закономерности влияния технологических параметров строительства на скорость комплексного потока и стоимость устройства дорожной одежды.

Разработка настоящей темы обоснована следующими документами, утверждёнными на правительственном уровне:

- Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации на период до 2030 года (распоряжение Правительства РФ от 11.02.2021 №312-р);
- Национальный проект «Безопасные и качественные автомобильные дороги» на период с 2019 по 2030 годы. (утв. президиумом Совета при Президенте РФ по стратегическому развитию и национальным проектам, протокол от 24.12.2018 №15);
- Национальная стратегия развития искусственного интеллекта на период до 2030 года (указ Президента РФ от 10.10.2019 г. № 490);
- Национальный проект «Цифровая экономика» на период с 2019 по 2024 годы (постановление Правительства РФ от 02.03.2019 № 234 (ред. от 13.05.2022));
- Программа цифровизации в сфере дорожного хозяйства в Российской Федерации (Распоряжение Министерства транспорта Российской Федерации от 31 мая 2021 года № ВС-105-р);
- Стратегия развития лесного фонда Свердловской области на период до 2035 года (утв. постановлением Правительства Свердловской области от 02.04.2020 № 205-ПП).

Степень разработанности темы исследований. Большая часть исследований проводилась учеными в ВГЛТУ, ВГУИТ, ВолГАСУ, МАДИ, СибаДИ, СПбГЛТУ, СФУ, УГЛТУ, УГТУ. В трудах отмечается, что строительство лесовозных автомобильных дорог отличается неравномерным распределением объёмов и видов работ по всей длине устраиваемого участка в зависимости от разнообразных факторов и условий. Как показывает практика дорожного строительства, наиболее прогрессивным методом организации работ является поточный метод, так как он отвечает основному требованию – снижение затрат труда на единицу продукции. Основным технологическим параметром этого метода является скорость комплексного потока, оценка которого значительно осложняется из-за условий неопределенности в исходных пара-

метрах. Анализ известных традиционных исследований показал, что они практически не учитывают неопределенности, что делает их недостаточно корректными. Поэтому несмотря на большое количество исследований в дорожном строительстве такие вопросы, как использование методов искусственного интеллекта, в частности для оценки технологических параметров процесса строительства остались без внимания ученых.

Однако некоторый опыт использования методов искусственного интеллекта на базе нейронных сетей и нечетких систем профессорами Побединским В.В., Булдаковым С.И., Кручининым И.Н., к.т.н. Карабутовой И.А. показал их эффективность в исследованиях дорожных покрытий и перспективность для дальнейшего совершенствования технологии дорожного строительства.

Методология и методы исследования. Проведенные исследования основаны на теории дорожного строительства. Для проведения экспериментальных исследований использовались методы математической статистики, теории эксперимента. Также использованы теория нейронных сетей, нечетких систем, методы имитационного моделирования, оценка эффекта выполнена на основе экономического анализа.

Научная новизна заключается в следующих положениях.

1. Сформулирована задача и предложена структурная схема модели определения скорости комплексного потока и стоимости устройства дорожной одежды, отличающаяся учетом неопределенностей влияющих факторов и параметров строительного процесса.

2. Впервые разработана интеллектуальная система определения скорости комплексного потока и стоимости устройства дорожной одежды в виде комплекса нейро-нечетких сетей, программно-реализованная в среде *Matlab+Simulink*.

3. Выявлены новые закономерности изменения скорости комплексного потока и стоимости устройства дорожной одежды в зависимости от различных параметров строительного процесса.

Положения, выносимые на защиту.

1. Впервые предложена структурная схема модели определения скорости комплексного потока и стоимости устройства дорожной одежды, учитывающая неопределенности влияющих факторов и параметров строительного процесса.

2. Интеллектуальная система определения скорости комплексного потока и стоимости устройства дорожной одежды в виде комплекса нейро-нечетких сетей, программно-реализованная в среде *Matlab+Simulink*.

3. Выявленные новые закономерности изменения скорости комплексного потока и стоимости устройства дорожной одежды в зависимости от различных параметров строительного процесса.

Практическая значимость исследования заключается в расширении возможностей дорожно-строительной отрасли за счет использования современных информационных технологий. Разработанная интеллектуальная система определения скорости комплексного потока и стоимости устройства дорожной одежды позволяет на стадии разработки проектной документации определить основные параметры, обеспечивающие наилучший вариант проведения работ, а также оперативно скорректировать необходимое количество ресурсов при изменении условий строительства автомобильной лесовозной дороги. Результаты исследований могут быть востребованы лесозаготовительным комплексом при выборе рациональной скорости комплексного потока и определении стоимости устройства дорожной одежды, а также позволят с меньшими затратами времени и более точно выполнять проекты государственного значения, путем совершенствования методов строительства лесовозных автомобильных дорог.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Результаты, выносимые на защиту, относятся к пункту 8 – «Технология транспортного освоения лесосырьевых баз» (паспорт специальности 4.3.4. Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины).

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций. Достоверность результатов исследования обоснована объемным экспериментальным материалом, применением научно обоснованных методик, базируется на реальных объектах дорожного строительства, не противоречит известным методам имитационного и математического моделирования, подтверждается анализом и оценкой достоверности полученных данных.

Апробация работы. Результаты работы обсуждались на научно-технических конференциях:

- XIII Международная научно-техническая конференция «Эффективный ответ на современные вызовы с учетом взаимодействия человека и природы, человека и технологий: социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса» (Екатеринбург, 2021);
- XVII Всероссийская (национальная) научно-техническая конференция «Научное творчество молодежи – лесному комплексу России» (Екатеринбург, 2021);
- XVIII Всероссийская (национальная) научно-техническая конференция «Научное творчество молодежи – лесному комплексу России» (Екатеринбург, 2022);
- XIV Международная научно-техническая конференция «Эффективный ответ на современные вызовы с учетом взаимодействия человека и природы, человека и технологий: социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса» (Екатеринбург, 2023);
- XXVII Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы строительного комплекса России» (Уфа, 2023).

Публикации. Результаты исследований изложены в 11 научных публикациях, в том числе три статьи в журналах из перечня ВАК, два свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 разделов, общих выводов и приложений; содержит 141 страницу текста, 13 таблиц, 30 рисунков и библиографический список из 136 наименований.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ НАУЧНЫХ И ПРАКТИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ В ОБЛАСТИ ЛЕСНОГО ДОРОЖНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

Лесные автомобильные дороги являются значимым элементом лесозаготовительного производства, связывающим между собой лесосечные работы и первичную обработку древесины на лесных складах и биржах сырья. Высокий темп развития науки и техники требует от предприятий лесного комплекса сокращения расходов путем рационализации, совершенствования технологических процессов и применения прогрессивных технологий, но в то же время использования доступных строительных материалов, а также нуждается в кадрах из числа инженеров и дорожных рабочих. Инновации в сфере строительства лесных автомобильных дорог в первую очередь направлены на повышение качества, а также снижения общей стоимости работ и сокращение сроков их выполнения.

По статистическим данным на 2023 год в России насчитывается около 1800 тыс. км дорог, которые непрерывно эксплуатируются с целью перевозки древесины. К примеру, общая протяженность всех автомобильных дорог в России составляет около 1600 тыс. км. Подавляющее большинство – грунтовые автомобильные дороги постоянного действия – 49,6% или 918,3 тыс. км. Зимние автодороги составляют 21,3% или 393,2 тыс. км. Протяженность дорог с твердым покрытием – 307,5 тыс. км. На них приходится 16,6% от общей протяженности дорог. Прочие автомобильные дороги лесовозного и лесохозяйственного назначения составляют 12,5% или 231,4 тыс. км. Плотность автомобильных дорог на тысячу гектар лесной площади сегодня составляет 2,4 км. Ежегодно в России строят в среднем 6,4 тыс. км новых лесных дорог, ремонтируют и реконструируют порядка 10,6 тыс. км.

Согласно Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года [114] потребность лесопромышленного комплекса в строительстве новых дорог оценивается минимум в 2,1 тыс. км автомобильных дорог

постоянного действия и свыше 9,3 тыс. км автомобильных дорог сезонного действия. Следовательно, для рационального освоения лесов необходимо не менее 7 км всех видов дорог на 1 тыс. га, а в защитных лесах – 11-14 км. При этом 30-35% этих дорог должны иметь твердое покрытие и использоваться круглый год. Несмотря на активные дорожные работы, дефицит лесной дорожной сети в России составляет около 5 тыс. км автомобильных дорог постоянного и временного действия ежегодно.

1.1 Особенности устройства дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог

Базисом транспортной инфраструктуры лесов являются лесовозные дороги. Согласно Лесному кодексу Российской Федерации, лесовозные дороги могут создаваться при любых видах использования лесов [62]. Недостаточно развитая дорожно-транспортная сеть лесозаготовительного производства существенно ослабляет освоение, а также снижает экономическую доступность лесов.

Согласно СП 288.1325800.2016 [107] все лесные автомобильные дороги в зависимости от срока их эксплуатации подразделяются на постоянные и временные. Лесные дороги постоянного действия являются объектами капитального строительства, предусматривают круглогодичное использование. В свою очередь временные лесные дороги создаются на определенный промежуток времени и подразделяются на лесные дороги летнего действия и зимнего (зимники). В зависимости от назначения лесные дороги классифицируются на лесовозные лесные дороги и лесохозяйственные лесные дороги. Лесовозные автомобильные дороги используются по прямому их назначению – вывоз древесины и других продуктов работы лесозаготовительных предприятий. Лесохозяйственные же предназначены для патрулирования, охраны лесных массивов

от незаконной рубки и пожаров, а также для доставки техники и людей к местам производства работ. Строят их как правило в защитных и резервных лесах и не используют для вывозки древесины [63].

Транспортная сеть лесопользователя состоит из примыкающей к дорогам общего пользования магистрали, нескольких веток и большого количества лесовозных усов. Классификация лесных дорог приведена на рисунке 1.1.

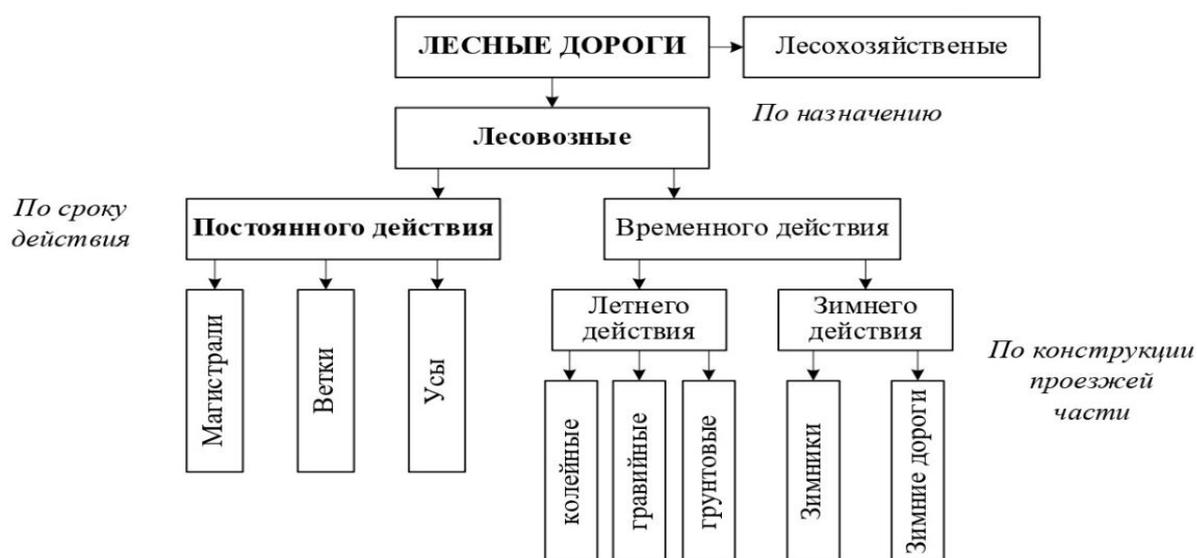


Рисунок 1.1 - Классификация лесных дорог

При планировании устройства лесных дорог следует руководствоваться следующими указаниями [38]:

- транспортная схема должна обеспечивать транспортную доступность лесов в целях многоцелевого и рационального использования лесов;
- разработку транспортной схемы рекомендуется осуществлять одновременно с разработкой проекта освоения лесов;
- транспортную схему разрабатывают с учетом ведомости лесотаксационных выделов, в которых допускаются заготовка древесины и другие виды пользования, сроков примыкания лесосек;
- в целях использования благоприятных зимних условий для сниже-

ния затрат на строительство дорог и вывозку древесины следует предусматривать сезонное районирование транспортного освоения лесного участка;

- при разработке транспортной схемы освоения лесного участка должно быть уделено особое внимание уменьшению отрицательного влияния дорожной сети на окружающую среду, защите водоемов от загрязнения и оттока поверхностных или подземных вод;

- густота транспортной сети (плотность дорог) для вывозки древесины должна быть оптимизирована;

- размещение лесных дорог для вывозки древесины на лесном участке осуществляется с учетом требований правил заготовки древесины по размерам лесосеки, отводимой для освоения, срокам примыкания и способам примыкания лесосек.

Классификация лесных дорог по функциональному назначению приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 - Классификация лесных дорог

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	Ил
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	Шл
Лесная дорога, примыкающая к лесным дорогам категории Ил или Шл	Менее 0,14	Шл
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	IVл

Дорожная одежда лесовозных дорог должна обеспечивать необходимые транспортно-эксплуатационные показатели в течение заданного срока использования дороги, с целью повышения безопасности и эффективности работы автомобильного транспорта. Типы дорожных одежд лесовозных дорог представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 - Типы дорожных одежд лесовозных дорог, основные виды покрытий и оснований, область их применения

Категории дорог	Тип дорожных одежд	Виды покрытий для верхнего слоя
I _л , II _л	Капитальный	Цементобетонный монолитный или сборный. Асфальтобетонное однослойное или двухслойное с верхним слоем из горячих смесей типа Б, Г, В, Д I- II марки, щебеночно-мастичный асфальтобетон
I _л , II _л	Облегченные	Асфальтобетонные двухслойные с верхним слоем из смесей I марок, типов Б _х , В _х , Г _х и Д _х , укладываемых в холодном состоянии. Асфальтобетонные однослойные из смесей III марки, укладываемой в горячем состоянии, II марки, укладываемой в холодном состоянии типов Б _х , В _х , Г _х и Д _х . Из подобранного щебеночного или гравийного материала, обработанного вязким или жидким битумом в установке Из фракционированного щебня, обработанного вязким битумом в установке или методом пропитки с поверхностной обработкой Из щебеночных или гравийных смесей, обработанных жидким битумом методом смешения на дороге Из крупнообломочных (до 40 мм) или песчаных грунтов, обработанных битумной эмульсией с цементом в установке и последующей поверхностной обработкой на дороге
III _л	Переходные и низшие	Из фракционированного щебня, укладываемого по способу заклинки. Из подобранного щебеночного или гравийного материала. Из местных каменных материалов и песчаных грунтов, обработанных органическими и минеральными вяжущими с применением поверхностно - активных веществ (ПАВ)
IV _л	Низшие	Из грунтов, укрепленных или улучшенных различными скелетными добавками (щебнем, гравием, древесной, шлаком, горелыми породами и другими местными материалами) Из местных каменных материалов, грунтов, укрепленных местными вяжущими (гранулированными доменными шлаками, активными золами уноса, фосфогипсом и т.д.)
Примечание: Целесообразность применения асфальтобетонных и цементобетонных покрытий на лесных дорогах должна быть обоснована технико-экономическим расчетом.		

Выполнение этих требований обеспечивается выбором конструкции дорожной одежды, типом покрытия проезжей части, конструкции сопряжения проезжей части с обочинами, типом укрепления обочин и откосов и т.д.

Конструкция дорожной одежды принимается с учетом: объема перевозок (для лесовозных дорог); типом транспортного средства; срока использования дороги; гидрогеологических условий района проектирования; наличия дорожно-строительных материалов и т.п.

В зависимости от конструкции проезжей части лесные дороги бывают следующих типов [49]:

- колейные;
- гравийные или из местного грунта, улучшенного добавками;
- грунтовые.

Области применения различных типов лесных дорог приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 - Области применения различных типов лесных дорог

Типы дорог	Область применения
Колейные из железобетонных плит или плит из стеклопластика	В лесосеках типа местности III, на заболоченных грунтах и болотах типов I и II, при вывозке автопоездами с осевой нагрузкой свыше 12 т
Гравийные на хворостяной выстилке	В лесосеках типа местности II и III при наличии песчано-гравийных материалов в радиусе до 5 км для автопоездов с осевой нагрузкой свыше 12 т
Из местного грунта, улучшенного добавками	В лесосеках типа местности III при отсутствии песчано-гравийных материалов и при наличии глинистых грунтов или мелкозернистых песков с расстоянием подвозки до 5 км при вывозке автопоездами с осевой нагрузкой до 12 т
Грунтовые	В лесосеках типов местности I и II при благоприятных грунтово-гидрологических условиях при вывозке автопоездами с осевой нагрузкой до 12 т

В соответствии с ПНСТ 390-2020 [83] принимаем типовую конструкцию дорожной одежды лесовозной автомобильной дороги, представленную на рисунке 1.2. Дорожная одежда представляет собой многослойную конструкцию из нескольких слоев, укладываемую на тщательно спланированный и уплотнённый верхний слой земляного полотна [35]. Ширина проезжей части и толщина конструктивных слоев зависят от показателя грузооборота проектируемой автомобильной дороги.

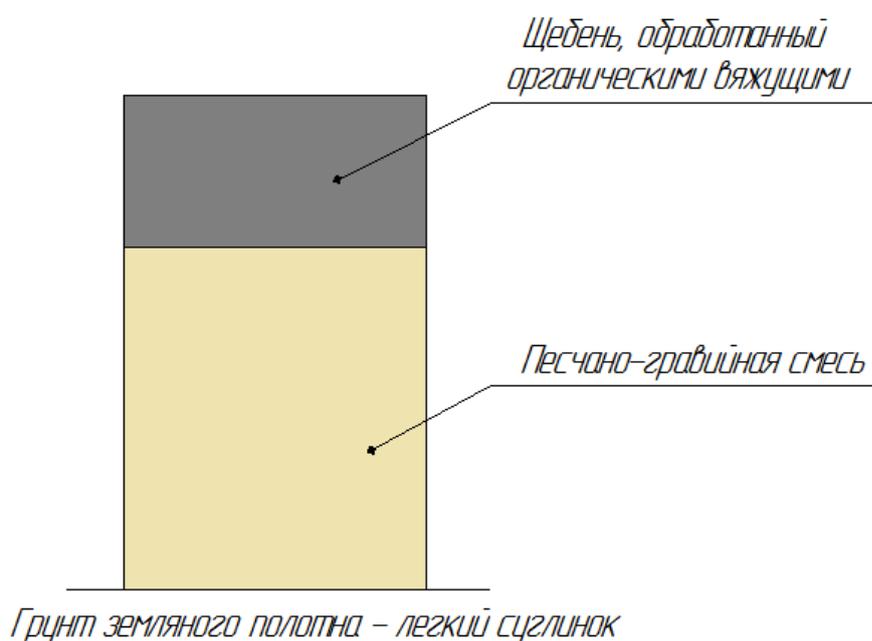


Рисунок 1.2 – Типовая конструкция дорожной одежды лесовозной автомобильной дороги согласно ПНСТ 390-2020

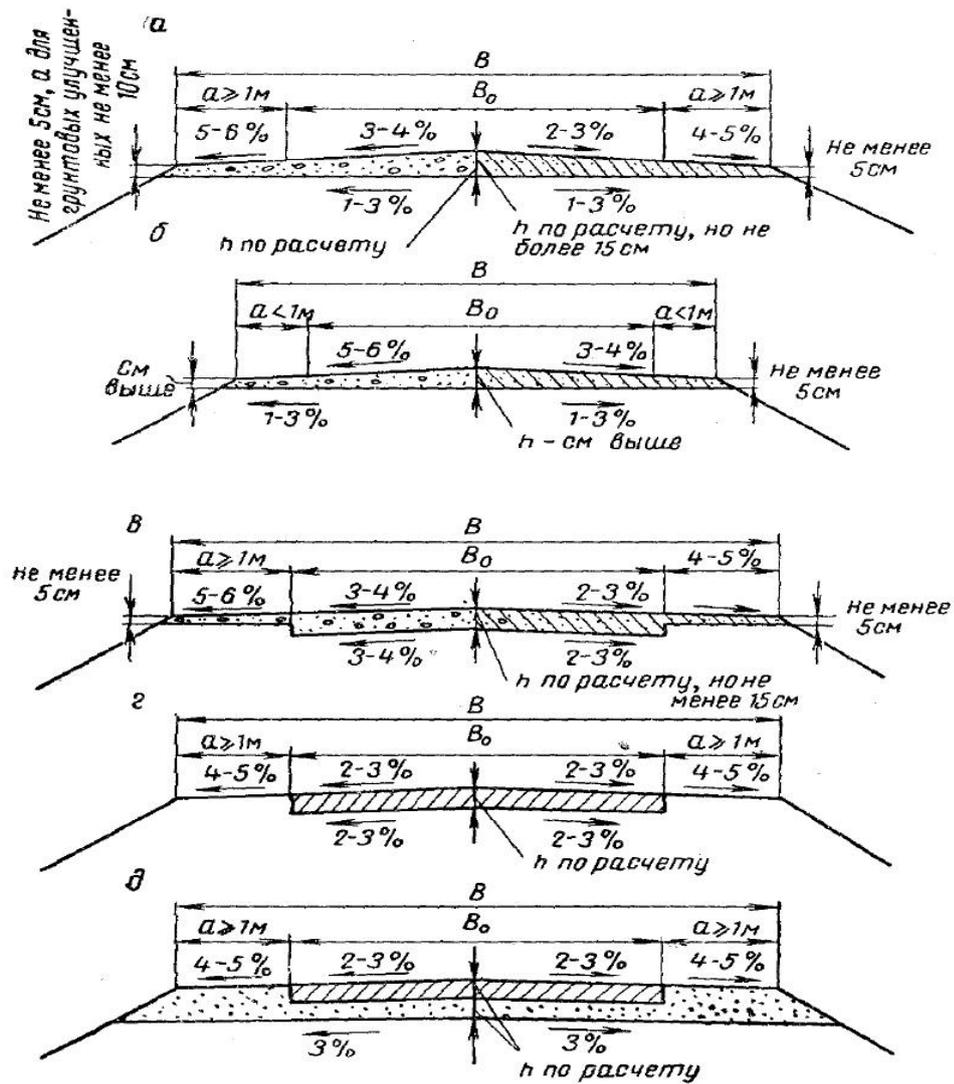
Наиболее дорогим и высоконагруженным слоем является покрытие дорожной одежды. В первую очередь покрытие воспринимает усилия от воздействия колес автомобилей и подвергается прямому воздействию климатических факторов, так же оно должно обладать ровностью и высоким показателем коэффициента сцепления [102]. Обычно покрытие устраивают из наиболее дорогостоящих материалов, так как предъявляемые требования к материалам достаточно высоки.

Преобладающим покрытием автомобильных лесовозных дорог принято считать гравийный тип, так как по таким дорогам вывозится более 42 % древесины [91]. Для устройства гравийных дорог оптимальным вариантом является материал, который после укатки обеспечивает большую и постоянную связь в частицах, при прочности самих частиц. В таких материалах наиболее крупные частицы образуют «скелет», поры которого заполняют материалом с мелкими частицами. Для увеличения сцепления конструктивных слоев принято использовать органические вяжущие [120].

Для устройства щебеночных покрытий используется метод заклинки, размеры фракции для средних и нижних слоев принимаются 40...70 и 70...120 мм; для верхних слоев 40...70 мм; для расклинки 20...40; 10...20; 5...10 мм. Основную фракцию щебня равномерно распределяют по всей ширине проезжей части, соблюдая требуемые ровность и поперечный профиль [26].

Слой основания дорожной одежды – основной несущий слой, который должен обеспечить устойчивость и требуемую прочность, служит для распределения и передачи давления от шин автотранспорта на грунт земляного полотна или нижние слои дорожной одежды. Основание на прямую не подвержено воздействию колес автомобилей, поэтому для его устройства используются материалы с меньшим коэффициентом прочности, чем в слое покрытия. Основания могут устраиваться из одного или нескольких слоев с использованием принципов укладки более дешевых и менее прочных материалов в нижние слои. Важно обеспечить не только прочность основания дорожной одежды, но и водонепроницаемость [25, 90].

На рисунке 1.3 приведены основные типы поперечных профилей дорожных одежд, применяемых на лесовозных дорогах. Серповидный поперечный профиль одежды представляет собой наиболее простую конструкцию. Он удобен и не требует больших затрат на содержание дороги [19].



а) серповидный профиль при ширине обочин 1 м и более; б) серповидный профиль одежды на однополосных дорогах (левые половины профилей а и б – для гравийных, грунтощебеночных и грунтовых покрытий, правые – для покрытий из грунтов, укрепленных вяжущими); в) полукорытный профиль (левая половина – для гравийных одежд при дренирующих грунтах земляного полотна, правая – для покрытия из грунтов, укрепленных вяжущими); г) корытный профиль при дренирующих грунтах земляного полотна; д) то же при недренирующих грунтах с устройством гравийного покрытия в корыте из песчаного подстилающего слоя

Рисунок 1.3 - Поперечные профили дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог

Серповидный профиль рекомендуется применять:

- для грунтовых дорог, улучшенных минеральными добавками или поверхностной россыпью гравия или щебня;
- гравийных покрытий на земляном полотне из не дренирующего грунта при любой толщине покрытия и ширине обочины;
- гравийных покрытий на земляном полотне из дренирующего грунта при ширине обочин менее 1 м и при большей ширине обочин при толщине слоя одежды менее 15 см [42].

Корытный профиль одежды применяется в случаях, когда покрытие устраивается из дорогостоящих материалов или имеет большую толщину. Его достоинством является экономия дорожно-строительных материалов, а недостатками – легкость заноса грязи с обочин на проезжую часть и необходимость дренажа воды из корыта с использованием трубчатых дрен. Полукорытный профиль одежды представляет собой промежуточное решение между корытным и серповидным профилями. На лесовозных дорогах полукорытный профиль рекомендуется применять:

- для гравийных покрытий на земляном полотне из дренирующих грунтов (при ширине обочин 1 м и более при толщине слоя более 15 см);
- для одежд с покрытиями из укрепленных грунтов (при ширине обочин 1 м и более при толщине укрепленного слоя более 15 см) [21].

1.2 Оценка транспортной инфраструктуры лесовозных дорог на примере Свердловской области

Согласно Стратегии развития лесного фонда Свердловской области на период до 2035 года [15] на территории Свердловской области насчитывается более 70 тыс. км лесовозных и лесохозяйственных дорог, однако большая часть их них эксплуатируется непостоянно и только при освоении прилегающих лесных участков. Транспортная сеть лесовозных автомобильных дорог с

усовершенствованным типом покрытия в настоящее время составляет до 1,5 тыс. км. Нормальное функционирование лесопромышленных предприятий невозможно без развитой лесотранспортной инфраструктуры, а также неотделимо от автомобильных дорог общего пользования. Согласно проведенному анализу ГКУ СО «Управление автомобильных дорог» об интенсивности движения транспортного потока доля лесовозного автомобильного транспорта в общем грузопотоке достигает 60 % [51]. Доля лесовозных дорог, по которым лесопромышленные предприятия перевозят сырье и лесоматериалы составляет 33,2 %, в том числе по дорогам общего пользования федерального значения - 20,8 %, регионального значения - 46 %. В соответствии со статистическим данным о дорожной сети Свердловской области 20 тыс. км ведомственных дорог, или 2,5 тыс. км, относится к категории лесовозных дорог. Следует отметить, что лесовозные дороги имеют наибольшую грузонапряженность и интенсивность движения.

Общая площадь лесов на территории Свердловской области по данным государственного лесного реестра по состоянию на 01.01.2022 составляет 16 020,2 тыс. га (82% от общей площади Свердловской области) [36]. Приняв во внимание это факт, дорожная сеть не ограничивается лесными дорогами типа магистраль, ветки, усы и зимние лесные дороги, так же неотъемлемой частью дорожной сети лесопромышленного комплекса становятся дороги федерального и регионального значения общего пользования и могут быть отнесены к лесным лесовозным дорогам постоянного действия категорий I_д, II_д типа магистраль с капитальным и облегченным типом конструкции дорожной одежды, однако таковыми не являются.

Протяженность автомобильных регионального и межмуниципального значения в Свердловской области составляет 31254,7 км, из которых протяженность дорог федерального значения – 588,3 км (2%), регионального и межмуниципального значения – 10 990,9 км (35%), местного значения –

19675,5 км (63%) (таблица 1.5). Транспортная доступность лесов, обеспеченность транспортными путями на период действия Лесного плана Свердловской области на 2019 –2028 годы приведена Приложения А.

В исследованиях А.М. Сидоренко [100] показано, что к крупным предприятиям Восточного округа Свердловской области относятся НАО «Свежа Верхняя Синячиха» и ООО «Лестех» (таблица 1.4).

Таблица 1.4 – Основные предприятия лесоперерабатывающего комплекса Восточного округа Свердловской области

Предприятие	Местоположение	Выпускаемая продукция
НАО «Свежа Верхняя Синячиха»	р. п. Верхняя Синячиха, Алапаевского района	Фанера (188 тыс. м ³)
ООО «Лестех»	г. Алапаевск	Древесно-стружечная плита (ДСтП), пиломатериалы, столлярно-строительные изделия (около 44 тыс. м ³)

Следует отметить, что данные предприятия находятся в Алапаевском районе, так как в этой части округа идет основная заготовка древесины. С учетом данных обстоятельств, дальнейшие исследования принято проводить в этой части Свердловской области. Карта-схема Свердловской области с выделением территории Алапаевского лесничества представлена на рисунке 1.4. Согласно Лесохозяйственному регламенту Алапаевского лесничества [61] на территории Алапаевского района действует 21 лесоперерабатывающее предприятие. Карта-схема транспортного освоения лесов предприятиями лесопромышленного комплекса Алапаевского района представлена на рисунке 1.5.

В соответствии с анализом транспортно-логистической системы промышленного региона, изложенным в работе А. М. Сидоренко, определена структура грузооборота Алапаевского района Свердловской области (рисунок 1.6). Как видно на рисунке 1.5, грузооборот лесоперерабатывающего комплекса в Алапаевском районе составляет 22 % (428,5 тыс. м³) от общего значения.

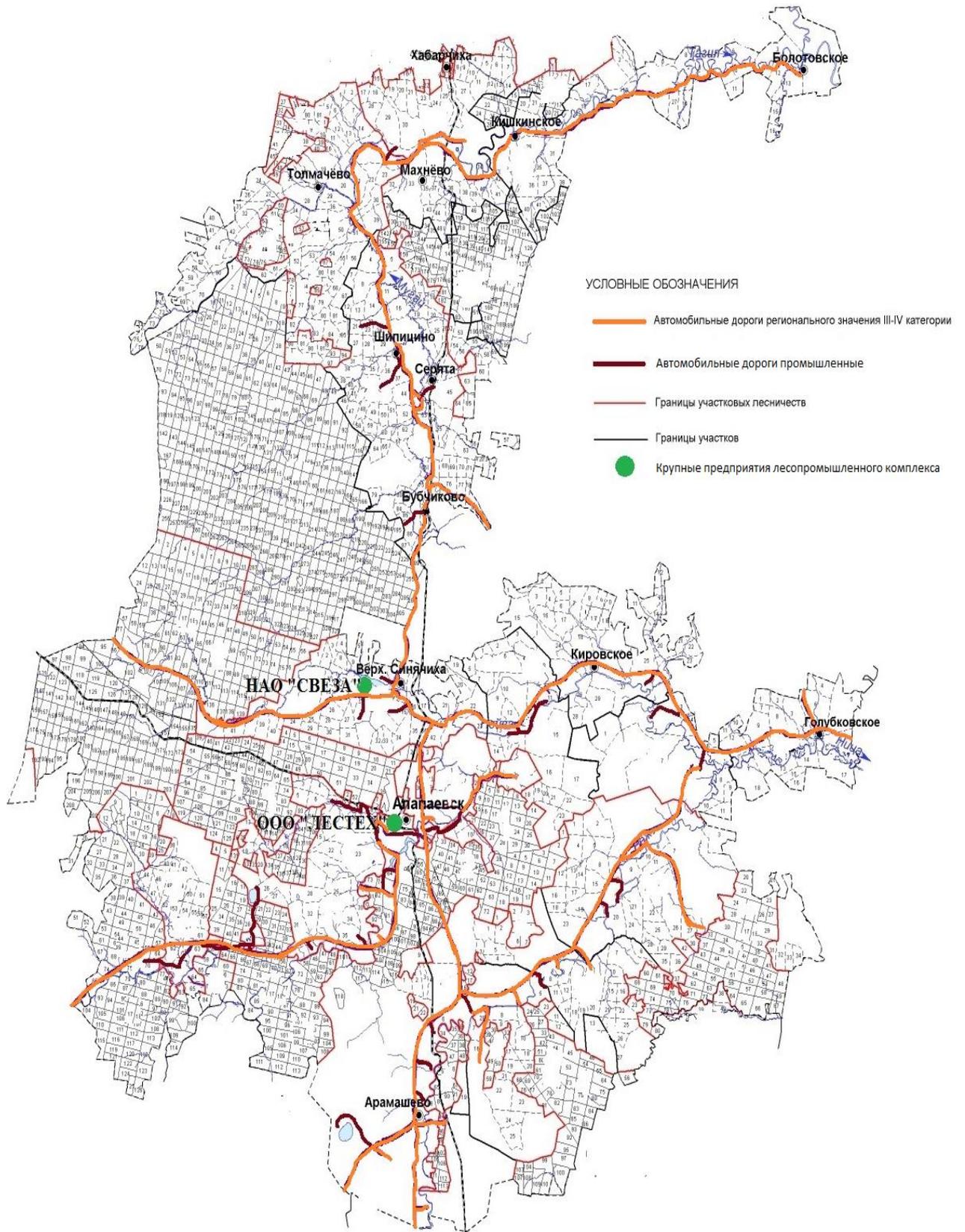


Рисунок 1.5 - Карта-схема транспортного освоения лесов предприятиями лесопромышленного комплекса Алапаевского района

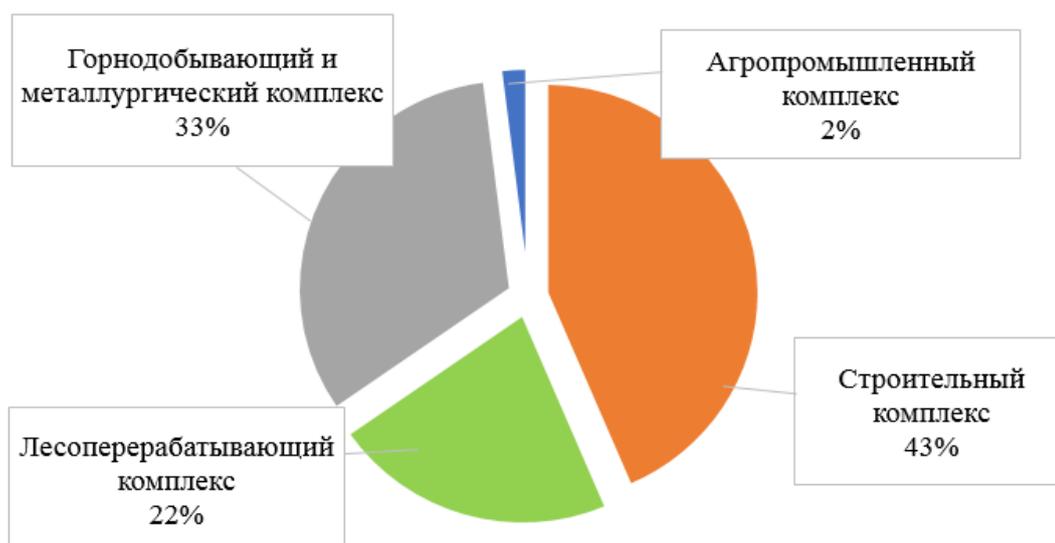


Рисунок 1.6 – Структура грузооборота Алапаевского района Свердловской области, %

Как показал анализ, автомобильные дороги в большинстве своем требуют улучшения и ремонта. Проезд по грунтовым дорогам возможен только в сухое время года, а на отдельных участках транспортом повышенной проходимости. В северной части Алапаевского района дорожная сеть развита плохо и большая часть лесов труднодоступна для разработки, что усугубляется неблагоприятными климатическими условиями.

Исходя из вышесказанного, в местах сосредоточенности лесопромышленных предприятий Алапаевского района Свердловской области требуется наличие развитой сети лесовозных дорог, в том числе участков автодорог общего пользования, отвечающей современным требованиям к транспортно-эксплуатационным показателям и безопасности.

1.3 Анализ работ, посвященных совершенствованию лесовозных автомобильных дорог

Вопросам совершенствования технологий в области дорожного строительства уделялось внимание многих исследователей, им посвящены работы

С.И. Булдакова, А.М. Бургонутдинова, Н.П. Вырко, О.Н. Галактионова, И.А. Гаруса, А.В. Квитко, И.Н. Кручинина, А.Ю. Мануковского, Б.П. Мотовилова, П.А. Нехорошкова, В.П. Подольского, С.В. Посыпанова, М. Г. Салихова, Э. О. Салминена, Ю. Д. Силукова, В.В. Сиротюка, А.В. Скрыпникова, С. И. Сушкова, М.М. Фаттахова и др [20, 22, 28, 30, 44, 52, 65-66, 73-74, 95-96, 101, 103, 117-118, 121, 131]. Фундаментальные исследования в области обоснования поточного метода производства работ, с разделением участка на захватки, приведены в трудах М. С. Будникова, Е. В. Кондрашовой, В.К Курьянова и др [47, 56-57]. Обоснование тип и конструкций одежд лесовозных автомобильных дорог и совершенствования методов расчета дорожных конструкций рассматривалось в работе В. В. Савельева [94].

Совершенствование транспортно-эксплуатационных показателей лесных автомобильных дорог отражены в работах С. А. Король, Ю. В. Лобанова, А. В. Степанова [48, 64, 111].

Большой вклад в оптимизацию производства земляных работ при строительстве лесовозных автомобильных дорог за счет рационального распределения земляных масс и формирования технологических комплексов внесли Д. В. Демидов, А. Х. Мохамед [40-41, 70-71].

Вопросами оптимизации проектирования и моделирования дорожных одежд занимались А. В. Бухтояров, Р. М. Михайлин, М. А. Телегин [23, 68, 119]. В данных работах затрагиваются проблемы проектирования дорожных одежд нежесткого типа с позиций комплексного подхода к решению задач в соответствии с общей теорией систем автоматизированного проектирования.

Анализ источников, посвященных вопросам организации производства работ в дорожном строительстве, позволил сделать вывод, что в данной теме требуется дальнейшее совершенствование процессов строительства лесовозных дорог, особенно в части устройства дорожных одежд.

Приоритет задач дорожного строительства, как правило, характеризуется рядом технико-экономических показателей, определяющих степень эффективности планируемых работ. Следовательно, для выбора наилучших решений необходимо выбирать главным условием - затраты на производство работ, а также скорость производимых работ.

В работах А.О. Боровоева, А. О. Орлова [14, 77] представлены особенности организации дорожно-строительных работ поточным методом с учетом сезонного характера их производства. Предпринято на основе методов математического моделирования разработать организационно-технологическую модель поточного дорожного строительства и решить одну из частных проблем, относящихся к классу задач календарного планирования - определение оптимальных заделов по элементам дорожной конструкции.

Внедрением интеллектуальных систем и разработкой алгоритмов для устойчивого управления и проектирования в области дорожного строительства занимались И.А. Карабутова, А.П. Прокопьев, Д. И. Шакирзянов [87, 89, 86].

В исследованиях В.В. Гасилова, К.А. Цапко [31, 122] рассматриваются основные принципы развития теоретико-методических положений к разработке организационно-экономического механизма управления стоимостью проектных организаций дорожно-строительного комплекса.

Мониторинг существующих методов по исследуемой теме показывает, что на сегодняшний день недостаточно раскрыт потенциал современных информационных технологий в дорожно-строительной отрасли.

1.4 Современные тенденции применения информационных технологий в области дорожного строительства

Внедрение современных информационных технологий в различные отрасли характеризует новый этап развития экономики России, в частности стремительно развивается промышленная революция «Индустрия 4.0». Одной из таких отраслей является дорожное строительство, где цифровизация позволит повысить конкурентоспособность и экономическую эффективность деятельности.

Цели внедрения цифровых технологий в область дорожного строительства в большинстве своем утилитарны: экономическая выгода при ремонте и содержании, организация безопасности движения, старт работ по организации беспилотного движения. Цифровизация даст довольно колоссальные преимущества – сокращение затрат на строительные работы, эксплуатацию и ремонт, снижение сроков выполнения работ. Более того такие стремления полностью соответствуют Национальной стратегией развития искусственного интеллекта на период до 2030 года [72] и Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017-2030 годы [113].

В 2021 году введена Стратегия развития инновационной деятельности в области дорожного хозяйства [112], утвержденная распоряжением Министерства транспорта. Основными задачами программы являются:

- формирование информационного моделирования (касательно автомобильных дорог федерального, регионального или межмуниципального значения, с учетом проектной документации на строительство, капитальный ремонт и реконструкцию);
- внедрение интеллектуальных систем (автоматизация процессов управления дорожным движением);

- цифровизация разрешительных функций (оказание услуг по выдаче разрешений на передвижения крупногабаритных транспортных средств по принципу «единого окна»);
- контрольно-надзорная деятельность (размещение пунктов весогабаритного контроля, увеличение числа камер фотовидеофиксации);
- создание учетных функций (контроль средств дорожных фондов).

Ожидаемым результатом данной программы считают создание и функционирование «логистических коммуникационных артерий» по всей дорожной инфраструктуре.

Примером успешной реализации является проект по развитию перевозок беспилотным транспортом «*Караван*». Разработка принадлежит Федеральному дорожному агентству, первый старт проходил на участке федеральной трассы «А-290 Новороссийск – Керчь». Успешно проведенный тестовый заезд беспилотного транспорта – это совместный результат работы дорожников, инженеров, автопроизводителей, научно-исследовательских институтов и ведущих Российских технических вузов.

На сегодняшний день компанией по разработке программного обеспечения, благополучно внедряющей цифровые технологии в области автоматизированного расчета конструкций дорожных одежд, является ООО «*ИндорСофт*». Система *IndorPavement* позволяет выполнять расчеты дорожных одежд на прочность по различным критериям. Проектную конструкцию дорожной одежды возможно оптимизировать по общей толщине, стоимости устройства, прочностным характеристикам и т.п. Изначально задается предел варьируемых толщин и экономический показатель каждого слоя, далее система в автоматизированном режиме предлагает различные варианты конструкции дорожной одежды, а также дает возможность применить фильтры по требуемым критериям и выбрать подходящие варианты для добавления в проект [11].

Тем не менее цифровизация дорожной отрасли находится на начальном этапе, так как есть ряд проблем, которые не позволяют наращивать темпы внедрения.

1. Государственные структуры достаточно серьезно регулируют дорожно-строительную отрасль. Существующая нормативная документация, которая определяет технологические процессы, стоимость тех или иных работ и другие значимые параметры строительства, не учитывает модернизацию, автоматизацию, сетевое планирование и т.п., так как некоторые методики были приняты несколько десятилетий назад и являются устаревшими в реалиях возможных перспектив.

2. Дефицит инвестиций. Ситуация складывается не лучшим образом, когда на федеральном уровне нет активного содействия от государства и затраты берут на себя компании, самостоятельно принимая решения об инвестициях в развитие цифровизации.

3. Нехватка квалифицированного персонала и/или отсутствие компетенций в области цифровых технологий.

Не смотря на ряд проблем, можно выделить следующие задачи и возможности внедрения цифровых технологий в области дорожного строительства:

- усиление и разработка нормативно-технической документации с учетом оптимизации процессов и внедрения интеллектуальных систем;
- в рамках программы «Цифровизация в сфере дорожного хозяйства в Российской Федерации» - обеспечение интеграции транспортных систем, применение сквозного информационного моделирования на всех этапах жизненного цикла автомобильных дорог, что в дальнейшем позволит проводить работы инженерных систем в режиме виртуального пространства;
- разработка мероприятий в рамках национального проекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги» [78], которые позволят в автоматизированном режиме контролировать соблюдение Правил дорожного

движения Российской Федерации, реализовать устройство искусственного электроосвещения, установку дополнительных дорожных знаков, светофорных объектов и барьерного ограждения, устройство горизонтальной дорожной разметки из термопластичных материалов;

– продвижение *VIM*–технологии, с помощью которых возможно смоделировать объект, с указанием его параметров и на этапе планирования минимизировать противоречия, которые при стандартных методах проектирования обнаружить невозможно [59];

– ввод в эксплуатацию беспилотников, что позволит достаточно информативно картировать объекты любой площади.

Цифровая трансформация дорожной отрасли предполагает создание условий для ее реализации, поэтому возникает необходимость прибегнуть к современным методам: имитационные и интеллектуальные системы, машинное обучение, *VIM*–технологии и др., которые позволяют решить данные задачи поэтапно: от создания проектной документации до запуска объекта в эксплуатацию [58].

Основателем теории нечетких множеств (*fuzzy logic*) является Лотфи Заде [136]. Не смотря на скептицизм со стороны научного сообщества, теория открыла новую эпоху и принесла фундаментальные изменения в области информатики, кибернетики и вычислительной техники. В результате объединения математических методов и технологий искусственного интеллекта Лотфи Заде было предложено понятие «мягкие вычисления». Под данным термином понимают методологию неточных алгоритмов, для которых не существует строгого подхода, допускают заданную погрешность и неопределенность в конкретной задаче. Мягкие вычисления объединяют такие области как: нечеткие системы, нейронные сети, генетические алгоритмы и экспертные системы. Совокупность данных способов позволяет усилить достоинства систем и сгладить недостатки, что дает возможность продуктивно решать проблемы в разных областях.

С учетом развития данного направления рационально использовать интеллектуальные системы на основе нейронных сетей. Под интеллектуальной системой понимают программную среду, которая способна находить решения с исходными данными в виде числовых значений или лингвистических переменных, с обработкой информации на основе базы данных и логических правил. Нейронные сети используются достаточно широко среди современных исследователей [54, 67, 124-125, 133]. Опыт последних лет показал, что интенсивное развитие практических приложений математики в различных областях, в частности теории нечетких множеств, элементной базы компьютерной, микропроцессорной техники, позволяют решать задачи автоматического управления на основе нечеткой логики. При этом, как показывает практика, использовать нечеткие модели бывает значительно проще и эффективнее, чем традиционные методы моделирования [39, 128]. Важным и наиболее распространенным предназначением моделирования объектов исследования является изучение и прогнозирование поведения сложных производственных процессов. Особенно актуально при работе с широкоформатными проектами, которые в реальности на этапе сопоставления вариантов неосуществимы в силу экономической нецелесообразности.

В работах [2-3, 15, 29, 34, 37, 55, 75, 93, 104-106] показаны результаты обработки знаний с помощью интеллектуальных систем в различных областях науки и техники, описаны модели и основы построения компонентов, особый интерес представляют практическое применение и анализ результатов.

В вопросы применения нечеткой логики для решения прикладных задач значительный вклад внесли российские ученые А.Н. Аверкин, Л.С. Бернштейн, А.Н. Борисов, В.В. Круглов, А.В. Кузьмин, В.В. Побединский, Н.Г. Ярушкина и др [1, 13, 84-85, 130]. Исследования методов и алгоритмов нечеткого вывода рассматриваются в работах Х. Ларсена, Е. Мамдани, А. Пегата, М. Сугено, Т. Такаги, Й. Цукамото [79, 132, 135]. Прикладное

направление нечеткой логики показано в работах А. В. Леоненкова, К. Хартманна, С.Д. Штовба [60, 123, 134].

Применение нечеткой логики рассматривается в работах В.В. Побединского, С.И. Булдакова, И.Н. Кручинина. Результаты исследований показали большой потенциал использования нейронных сетей в дорожно-строительной области.

В данных обстоятельствах применение интеллектуальных систем, основанных на нечетком математическом моделировании, является высокоперспективным путем решения задач и отвечает основным принципам государственных стратегий и планов. В случае устройства дорожных одежд такой подход позволит выявлять наилучший способ организации, определять ориентировочную стоимость строительных работ. Как итог, подобная система обеспечит сокращение экономических показателей за счет возможности автоматизированного поиска наилучших решений, на основании которых будет выполняться устройство дорожной одежды лесовозной дороги.

1.5 Выводы по первой главе

Основываясь на результатах исследований, проведенных в первой главе, можно сформировать следующие выводы.

1. Устойчивое управление лесосырьевыми ресурсами возможно при условии выполнения поставленных задач в рамках стратегий и национальных проектов. Строительство сети лесовозных дорог обеспечивает доступ к лесным ресурсам и является одной из наиболее затратных статей расходов для лесозаготовительных предприятий. Устройство дорожной одежды лесовозной автомобильной дороги относится к разряду капиталоемких линейно протяжённых инженерных объектов, строительство которой представляет собой сложный и многофункциональный процесс. Необходимо на этапе планирования

разработки лесных участков для заготовки древесины учитывать рациональные технологические решения, денежные и ресурсные затраты, а также полученный экономический эффект, удовлетворяющий непрерывно возрастающему спросу на освоение лесов.

2. Дорожная одежда является одним из более ресурсозатратных и дорогостоящих слоев проезжей части, основным назначением которой является принятие нагрузки от проходящих автомобилей и передача ее на земляное полотно в рассредоточенном виде, а также увеличение площади сопротивления нагрузке. Требования к дорожной одежде предопределены факторами прочности и износоустойчивости, что должно обеспечивать способность дорожной одежды в целом сохранять заданные эксплуатационные характеристики в течение расчетного срока службы. На повышение качества устройства дорожных одежд требует обратить особое внимание.

3. Невысокие темпы внедрения новых технологий в отрасль дорожного строительства, связаны с базовыми принципами работы: заказчиком большинства проектов строительства выступают государственные органы используя подход «заказчик — проектировщик — строитель», при котором на каждом из этапов возможны потери информации, которые в свою очередь приводят к непрогнозируемым простоям и дополнительным расходам, и как следствие появлению неопределённостей в задачах проектирования, а также непосредственно при проведении работ на объекте строительства. Для решения данной проблемы возможно использование методов нейронных сетей и нечетких систем, являющихся математическим аппаратом интеллектуальных систем.

4. Внедрение современных информационных технологий в лесную отрасль предопределено разработкой национальных программ и стратегий, основным вектором которых является повышение качества за счет использования новых методов, сокращение сроков строительства, снижение затрат на проектирование и строительномонтажные работы на объектах строительства.

1.6 Определение цели и задач исследования. Разработка общей методологии исследования

Целью исследования является разработка рациональной технологии устройства дорожной одежды лесовозных автомобильных дорог с применением интеллектуальной системы.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи.

1. На основе анализа научных и практических проблем в области дорожного строительства определить наиболее актуальное направление дальнейшего его совершенствования с учетом условий неопределенности в технологии устройства дорожных одежд автомобильных лесовозных дорог.

2. Обосновать теоретический подход, исходные и выходные параметры, разработать структурную схему модели определения скорости комплексного потока и стоимости устройства дорожной одежды.

3. Разработать интеллектуальную систему в виде комплекса нейро-нечетких сетей для определения скорости комплексного потока и стоимости устройства дорожной одежды и реализовать ее в компьютерной программе *Matlab+Simulink*.

4. Выявить закономерности влияния технологических параметров на скорость комплексного потока и стоимость устройства дорожной одежды.

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

Схема общей методологии настоящих исследований представлена на рисунке 1.7.

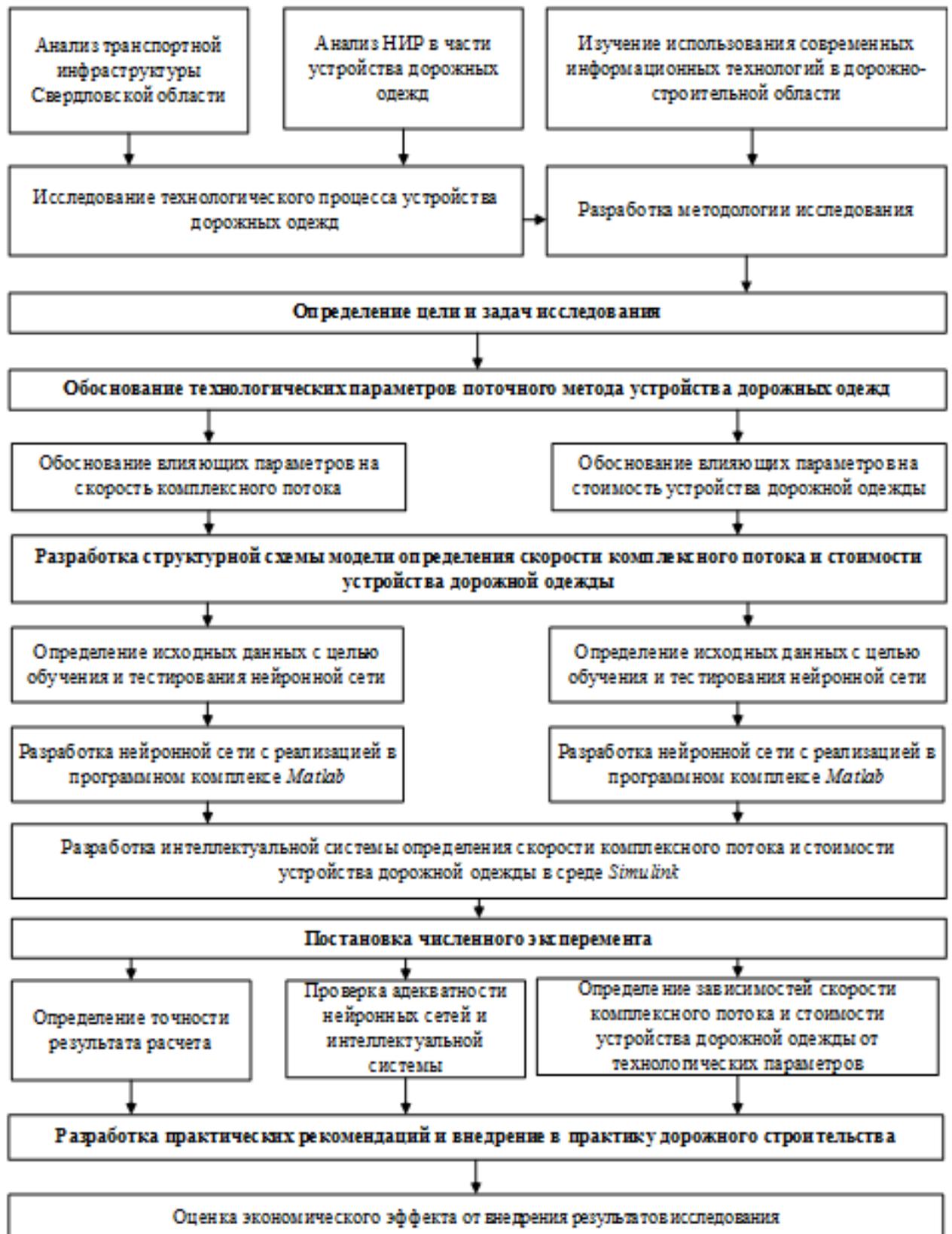


Рисунок 1.7 - Схема общей методологии настоящих исследований

Создание интеллектуальной системы включает в себя несколько этапов:

- 1) Постановка задачи;
- 2) Сбор, анализ и подготовка исходных данных (обучающие и тестовые выборки);
- 3) Создание нейронных сетей;
- 4) Создание интеллектуальной системы на основе комплекса нейронных сетей;
- 5) Обучение интеллектуальной системы;
- 6) Тестирование (проверка на адекватность настроенной интеллектуальной системы).

Таким образом для разработки интеллектуальной системы в рамках исследования необходимо корректно выполнить постановку задачи, обосновать исходные данные, создать базу практических данных и настроить структурные связи компонентов системы. В дальнейшем разработать мероприятия для обеспечения внедрения результатов исследований в практику дорожного строительства с оценкой экономического эффекта.

Проведенные исследования основаны на теории дорожного строительства. Для проведения экспериментальных исследований использовались методы математической статистики, теории эксперимента. Также использованы теория нейронных сетей, нечетких систем, методы имитационного моделирования, оценка эффекта выполнена на основе экономического анализа.

ГЛАВА 2. ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОТОЧНОГО МЕТОДА УСТРОЙСТВА ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД ЛЕСОВОЗНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Строительство автомобильных лесовозных дорог постоянного действия осуществляют в соответствии с проектной документацией, утверждённой в установленном порядке, частью которой является проект организации строительства (ПОС). На основании ПОС разрабатывается проект производства работ (ППР) в целях детального моделирования процесса строительства автомобильной лесовозной дороги.

Проектная документация содержит основополагающие данные об объекте строительства, определяет организацию проведения работ и содержит сведения для определения сметной стоимости строительства. Обязательным перечнем документации являются: календарный план, график потребности в материалах, оборудовании и дорожно-строительной технике, ведомость проводимых работ, места размещения производственных предприятий, объем требуемых материалов и их стоимость, смета на строительство объекта в целом и т.п. [7].

Цель разработки документации заключается в определении наиболее эффективных методов ведения строительных работ, способствующих снижению трудоемкости и денежных затрат, сокращению продолжительности строительства, повышению коэффициента использования строительных машин и оборудования и обеспечению безопасности труда [5]. Все решения, принятые в ПОС и ППР, обосновываются в пояснительной записке, где приводят краткую характеристику условий строительства; обосновывают методы производства работ; указывают количество, тип и мощность применяемых дорожных машин и транспортных средств; рассчитывают потребность в электроэнергии, воде,

временных сооружениях; дают рекомендации по структуре управления строительством и составу организаций-соисполнителей; приводят основные технико-экономические показатели строительства.

Разработка проектов организации строительства требует применения обоснованной методики проектирования, позволяющей учитывать техническую вооруженность и принимать наиболее перспективные проектные решения. Проектируют организацию строительства вариантным методом, предусматривающим выбор решений в результате сопоставления технико-экономических показателей. Состав показателей определяется особенностями рассматриваемых вариантов. Чаще всего среди экономических показателей выступают: общая продолжительность строительства, в том числе подготовительного периода, трудоемкость выполнения работ, максимальная численность работающих и дорожно - строительных машин. В общем случае выбирается вариант с наименьшей суммой приведенных затрат. При этом учитывается экономический эффект от сокращения продолжительности строительства и ускорения ввода объекта в эксплуатацию [24].

2.1 Основные принципы организации работ при устройстве дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог

В настоящее время при строительстве лесовозных дорог и организации работ руководствуются следующими документами: СП 288.1325800.2016, СП 37.13330.2012, СП 48.13330.2019, СП 78.13330.2012 [108, 109, 110]. Согласно данной документации, технологический процесс устройства дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог должен отражать наиболее прогрессивные способы организации строительства и производства работ, которые соответствуют современному уровню развития технологии строительства.

При традиционных методах проектирования производства работ по устройству дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог производятся

в соответствии с рядом неформализованных правил, дающих многозначные (неопределенные) результаты. Расчет дорожной одежды на данный момент проводится «вручную» по формулам и номограммам ОДН 218.046-01 [76], так и с помощью программных комплексов, таких как *ROBUR*, *CIVIL*, *CREDO*, *INDOR* и др. В качестве исходных данных используются: категория проектируемой дороги; дорожно-климатическая зона; схема увлажнения рабочего слоя земляного полотна; заданная надежность; тип дорожной одежды; грунт рабочего слоя земляного полотна; уровень грунтовых вод, считая от низа дорожной одежды; коэффициент уплотнения грунта рабочего слоя земляного полотна; расчетная нагрузка; срок службы дорожной одежды до капитального ремонта; перспективная общая среднесуточную интенсивность (в приведенных единицах) на последний год эксплуатации.

Согласно методике Баркалова С.А. [10] разработка проекта организации строительства начинается с выбора определяющего потока. Определяющий поток – это поток, наиболее зависящий от природно-климатических факторов, в частности от предельно допустимой температуры производства работ. Возможный срок производства работ для определяющего потока минимальный в течение календарного года. Как правило, определяющим потоком является поток по устройству конструктивных слоев дорожной одежды, так как строительный сезон ограничен летним периодом.

Весь комплекс дорожных работ подразделяют на сосредоточенные и линейные [8]. Сосредоточенные работы включают в себя устройство предприятий, средних мостов и тоннелей, пересечений на разных уровнях, комплексов автотранспортной и дорожных служб. Характерным отличием является неравномерное расположение и большой объём производимых работ по всей длине трассы.

Принято считать, что основным методом организации дорожных работ является поточный метод. Его главной особенностью является выполнение линейных работ без перерывов, а сосредоточенные работы должны опережать

линейные. В случае устройства дорожных одежд успешно применяется поточный метод, где главной технологической единицей является комплексный поток. Сущность поточного метода выполнения работ в дорожно-строительной отрасли можно изложить в следующем [17, 43]:

- работы на участке выполняются механизированными отрядами, расчлененными по видам работ и соответствующим оснащением;
- отряды равномерно и последовательно выполняют все строительномонтажные работы на заданном участке;
- готовая дорога наращивается лентой в одном направлении в равные установленные промежутки времени;
- после того как проходит последний отряд дорога полностью готова к сдаче в эксплуатацию.

На основании проекта организации и разработанной технологии формируется технологическая карта. Этапы проведения работ отображаются на схеме с распределением работ и дорожно-строительных машин по захваткам, с указанием объема проводимых работ и разделением на технологические процессы на принятый измеритель (100 м², 1 км и т.п.). В карту вносят производительность в смену согласно Единым нормам и расценкам, либо по расчету, который обязательно прикладывается к карте, а также в конце указывается потребность машин и рабочих [46].

По принятой скорости комплексного потока подбирается состав дорожно-строительной техники в каждом из отрядов и составляют схему с указанием размещения ресурсов на захватках и количеством техники. Для рационального комплектования механизированного потока требуется максимальная загрузка техники в течении всего времени проведения работ. В случае, когда невозможно обеспечить требуемое количество машин на захватке по расчетной скорости комплексного потока, ее принимают по ведущим машинам в отряде [80, 97].

По мнению С.И. Булдакова [16, 18] поточный метод имеет ряд существенных преимуществ перед другими методами организации работ.

1. Ввод дороги в действие (во временную эксплуатацию) осуществляют непрерывно и равномерно с первых дней развертывания всех работ потока. Благодаря этому улучшаются условия работы строительного транспорта, использующего готовые участки дороги для подвозки строительных материалов. Транспорт общего пользования также сможет задолго до конца строительства передвигаться по законченной части дороги, что ускоряет её окупаемость в народном хозяйстве.

2. Концентрация средств механизации в специализированных отрядах обеспечивает лучшее их использование, создаёт благоприятные условия для обслуживания и ремонта, облегчает контроль за работой машин. Всё это в конечном счете приводит к повышению производительности каждой машины и снижению себестоимости механизированных работ.

3. Специализация рабочих на выполнение ограниченного числа производственных операций способствует повышению их квалификации, что также ведет к повышению производительности труда и снижению себестоимости работ.

4. Сосредоточение производства работ на относительно небольшом участке дороги облегчает оперативное руководство работами и контроль за их качеством.

5. Вся система поточного строительства обеспечивает повышение общей культуры производства работ, облегчает учёт выполнения планов работ, сокращает сроки оборачиваемости материальных и денежных средств и объём незавершенного производства.

В работе Б. А. Кошелева [50] факторами, способствующими, развитию и внедрению поточного метода организации работ в дорожном строительстве, являются:

- научная разработка основ организации дорожного строительства;

- разработка прогрессивной технологии производства дорожно-строительных работ;
- оснащение дорожно-строительных организаций в достаточном количестве современными средствами механизации.

Непрерывность работ обеспечивается отсутствием перебоев в поступлении материалов, технологических процессах, выпуске готовой продукции. Равномерность производства предусматривает сохранение постоянного объёма за определенные отрезки времени при постоянстве потребности в кадрах и ресурсах. Этот метод совмещает в себе последовательный и параллельный, причём в нём устраняются недостатки и сохраняются преимущества каждого из них. При поточном методе для всех процессов назначают по возможности одинаковую продолжительность (идеальный вариант) и совмещают их выполнение во времени на разных участках, обеспечивая тем самым последовательное осуществление для однородных процессов и параллельное - для разнородных. При поточном методе требуется меньше времени, чем при последовательном, и меньше одновременно потребляемых ресурсов, чем при параллельном. Метод характеризуется высокой производительностью труда, специализацией всех дорожно-строительных работ, взаимосвязью подразделений, увязкой их работы с производственными предприятиями, высокой эффективностью работы транспорта, высоким уровнем комплексной механизации [81].

Установив скорость потока, можно построить его схему, разбив на захваты. Чем больше захваток, тем больше длина специализированного потока и всего комплексного потока [88, 92]. Поэтому нужно стремиться к сокращению числа захваток. Захватки должны обеспечить бесперебойную работу всех машин.

При слабой загрузке какой-либо машины на захватке можно планировать ее догрузку путем использования части смены на других захватках. При

этом следует иметь в виду, что перемещения как отдельных машин, таких звеньев с захватки на захватку должны при планировании сводиться к минимуму во избежание снижения производительности машин на основных работах.

В указаниях по производству работ излагают рекомендации по наилучшей организации и выполнению каждого производственного процесса (режим и схему работы машин, а также чертежи и рисунки, раскрывающие суть рекомендуемых операций) [27]. Рекомендации должны быть конкретными, с точными указаниями, например, мест выгрузки стройматериалов и т. п. Здесь же приводят рекомендации по организации труда, комплектации бригад и звеньев, режиму работ, системе. При устройстве дорожных одежд в лесной промышленности следует в максимальной степени использовать местные строительные материалы.

При сооружении дорожной одежды лесовозных автомобильных дорог применяют песчано-гравийную смесь, погрузку проводят на ближайшем карьере экскаваторами, а доставку к месту ведения работ осуществляют самосвалами. Разравнивание смеси на участке выполняется автогрейдером, уплотнение производится катками. Для устройства верхнего слоя обычно применяют щебень, путем последовательной послойной россыпи, уплотнения с расклиновкой основного слоя и пропиткой органическими вяжущими. Технологические операции выполняются идентичным комплектом дорожно-строительных машин. Пропитка слоев битумом осуществляется автогудронатором. Технология устройства дорожной одежды, отражающая все основные этапы ведения работ представлена в приложении Б.

2.2 Принятие решений при назначении скорости строительства дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог

Важнейшей единицей организации работ при поточном методе ведения работ является комплексный поток, соответственно, одной из ответственных

проектных процедур является определение скорости комплексного потока. Сменной (или суточной) скорости комплексного потока соответствует длина захватки, которая в свою очередь влияет на все технологические параметры строительного процесса. Как правило, между потоками устраивают технологические и операционные резервы, которые измеряются количеством смен. Каждый частный поток состоит из отдельных участков, на которых специализированные звенья выполняют определённые рабочие операции [4].

Именно по этой причине значение величины скорости комплексного потока взаимосвязано с другими расчетными параметрами дорожных одежд, что вносит в ее вычисление значительную неопределенность. Для выхода из положения при разработке проектов устройства дорожных одежд некоторые расчетные величины назначают субъективно, что не повышает качество проведенных расчетов, и как следствие ухудшается качество работ. Кроме того, во многих случаях, например, решений при инвестиционных проектах, тендерных процедурах, необходимы оперативные оценки различных альтернативных вариантов, которые получить без выполнения полного процесса проектирования невозможно.

Производство работ при устройстве дорожной одежды зависит от объёма работ в соответствии с запланированными показателями, исходя из этого критерием эффективности служит скорость комплексного потока. Как было отмечено, от скорости комплексного потока (V_n), будет зависеть весь процесс строительства. Следует стремиться к организации потоков с максимальной скоростью. Математическое выражение связи скорости комплексного потока с другими параметрами, в первую очередь длиной всего участка дороги (L_d), запишется в виде:

$$V_n = \frac{L_d}{T_c \cdot N_p} \rightarrow \max, \quad (2.1)$$

где V_n – скорость комплексного потока, м;

L_d – длина дороги, которую необходимо построить, м;

N_p – период развёртывания комплексного потока, дн;

T_c - количество рабочих смен в строительном сезоне, дн.

Период развёртывания комплексного потока - интервал времени, в течение которого постепенно включаются в работу механизированные подразделения и должен быть минимальным. При анализе данного параметра было выявлено, что он изменяется не в значительных пределах и практически не имеет влияния на технологические параметры.

Наиболее экономичным путем является проведение работ в благоприятных погодно-климатических условиях. Поэтому все дорожно-строительные работы разделены на группы в зависимости от температуры воздуха, благоприятной для проведения данного вида работ [116]. Проведение работ в других температурных условиях связано с дополнительными затратами или вынужденными простоями. Классификация дорожно-строительных работ в зависимости от температуры воздуха приведена в таблице 2.1.

Для определения календарной продолжительности дорожно-строительных работ на основании данных о погодно-климатических условиях строят дорожно-климатический график, на котором должны быть отображены данные о температуре воздуха, глубине промерзания грунта, осадках, продолжительности светового дня, высоте снежного покрова, даты весенней и осенней распутицы (рисунок 2.1). С помощью дорожно-климатического графика и на основании сопоставления погодно-климатических данных определяют продолжительность строительного сезона. Проведение работ в других температурных условиях связано с дополнительными затратами или вынужденными простоями.

К линейным работам можно приступать после оттаивания грунта и окончания весенней распутицы, а заканчивать их необходимо до начала осенней распутицы. Теплый период ведения дорожно-строительных работ, характеризуемый устойчивой среднесуточной температурой воздуха выше плюс 5-10 °С,

как правило, начинается вскоре после окончания весенней распутицы и заканчивается, практически, до начала осенней [126]. Дорожно-климатический график строительства автомобильной дороги представлен на рисунке 2.1.

Таблица 2.1 - Классификация дорожно-строительных работ в зависимости от температуры воздуха

Группа работ	Наименование работ	Среднесуточная допускаемая температура воздуха, °С
I	Устройство слоев дорожной одежды из минеральных материалов (щебеночных, гравийных, шлаковых и т.п.) Линейные земляные работы	Не ниже 0 После оттаивания грунта
II	Устройство слоев дорожной одежды из грунтов, укрепленных вяжущими или улучшенными скелетными добавками из шлакобетона, асфальтобетона, цементбетона, черного щебня и смесей, изготовленных в установках	После оттаивания грунта не ниже 5 весной и 10 осенью
III	Устройство слоев дорожной одежды из каменных материалов, укрепленных органическими вяжущими смешением на дороге и грунтощебня, укрепленного органическими вяжущими	Не ниже 10
IV	Устройство поверхностных обработок (при использовании катионной эмульсии для устройства поверхностной обработки	Не ниже 15

Независимо от вида работ дата начала сезона в одной определённой области одна и та же. Это объясняется фактором проходимости колёсных машин и отсутствием прилипания грунта к рабочим органам дорожно-строительной техники, поэтому такие параметры как: число выходных и праздничных дней, число нерабочих дней по метеорологическим условиям, простои по техническим причинам обозначаются конкретным значением для той или иной местности.

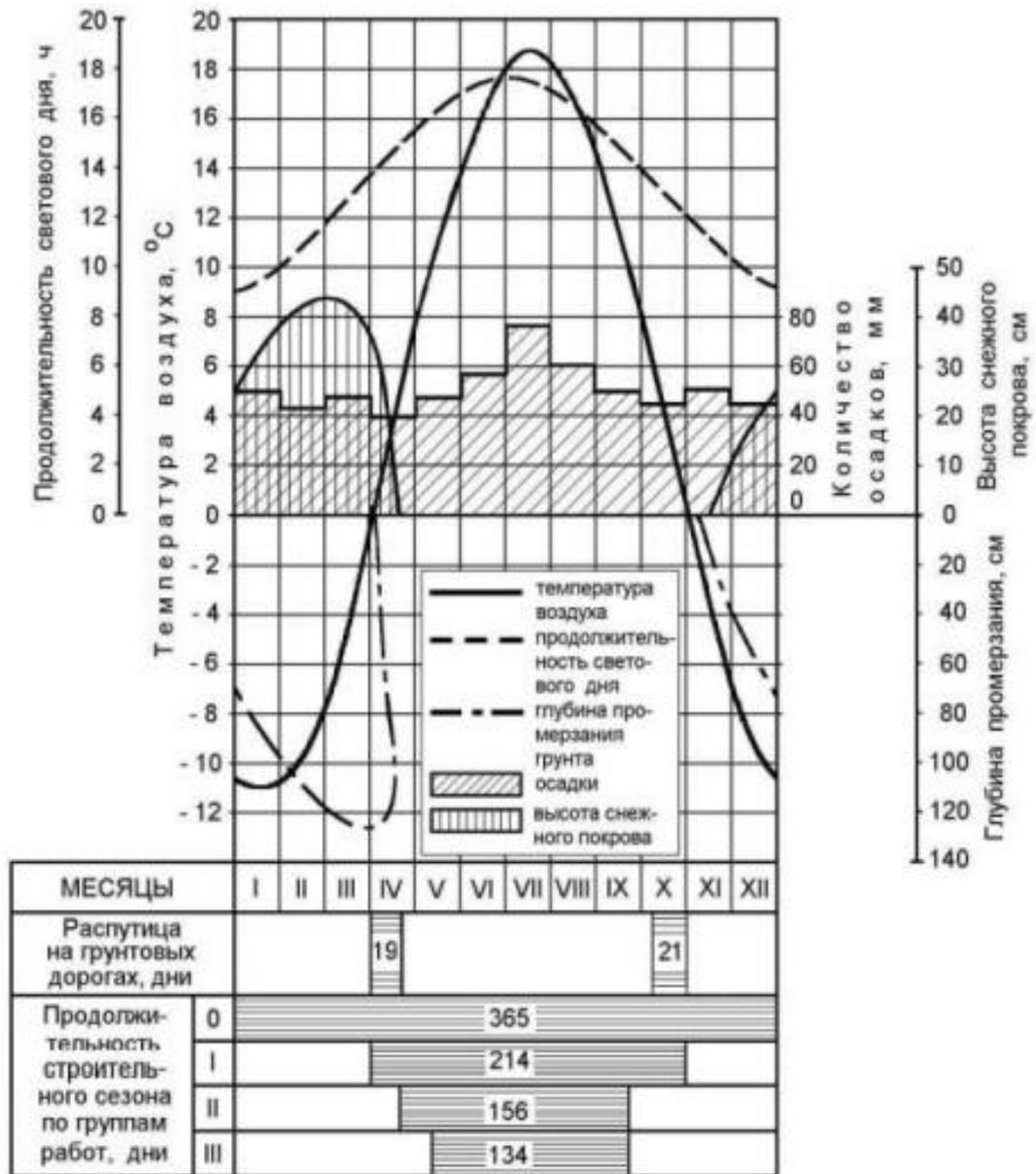


Рисунок 2.1 – Дорожно-климатический график строительства автомобильной дороги

Даты окончания строительного сезона для отдельных видов дорожно-строительных работ различны из-за неодинаковых технологических свойств, применяемых дорожно-строительных материалов. Начало основных работ назначается на конец весенней распутицы, а их окончание – на начало осенней распутицы. Проанализировав вышесказанное, был сделан вывод о следующем значимом параметре – количество рабочих смен в строительном сезоне (T_c).

Рассматривая последовательность устройства дорожных одежд [9], следующим этапом определяется потребность в дорожно-строительных материалах. Объем необходимого материала для устройства дорожной одежды определяется по ее геометрическим размерам по формуле:

$$V_c = L_d \times Bh \times K_y \times K_n \times K_m, \quad (2.2)$$

где L_d – длина строящейся дороги, м;

B – ширина укладки слоя материала, принимаемая по средней линии призмы отсыпки слоя, м;

h – толщина слоя отсыпки материалов, м;

K_y – коэффициент запаса на уплотнение;

K_n – коэффициент потерь при производстве работ;

K_m – коэффициент потерь материалов при транспортировке.

Из математического выражения (2.2) можно сделать вывод о том, что основным параметром при определении объема материала является длина дороги, которую необходимо построить. Следовательно, чем больше значение длины дороги, тем больше становится значение проводимых работ и наоборот. Соответственно третьим основным параметром выделяем объем проводимых работ (V_c).

Работы по устройству дорожных одежд являются трудоёмкими в строительстве и в силу этого требуют применения комплексной механизации, при которой механизмируются не только основные, но и вспомогательные операции производственного процесса. При комплексной механизации работы выполняются с помощью комплектов машин, взаимно дополняющих друг друга и увязанных между собой в механизированной цепи. Основные условия правильного комплектования машин для производства работ комплексно-механизированным способом следующие [6]:

– количество машин, участвующих в технологическом процессе,

должно быть минимальным, а конструкции и параметры их полностью соответствовать условиям работы;

- в составе каждого комплекта машин выделяется одна или несколько ведущих, которые, определяют организацию работ всего комплекта машин, его производительность и темпы производства работ;

- состав комплекта машин должен обеспечить направленность потока материалов от места его разработки до места отсыпки;

- производительность машин, входящих в комплект, должна быть выше, чем основной ведущей машины для обеспечения фронта работ.

Выбор наиболее целесообразного способа производства работ следует выполнять в следующем порядке:

- устанавливают процессы, входящие в полный технологический комплекс и объемы работ по каждому процессу;

- исходя из объемов работ и сроков их выполнения, характеристик, дальности перевозок и т. д. определяют возможные в данных условиях способы механизации отдельных процессов;

- назначают по каждому варианту ведущие и комплектующие машины, определяют их количество, устанавливают режим работы машины.

Для определения скорости комплексного потока подсчитывают объем работ и выбирают ведущую машину. В этом случае сначала рассчитывают производительность (норму выработки) ведущей машины (машин), которая должна быть определена заданием. Производительность может получиться в $\text{м}^2/\text{смена}$, $\text{м}^3/\text{смена}$, $\text{т}/\text{смена}$ и др., поэтому следующим шагом будет перевод и из получившихся единиц измерения в требуемые [127]. Производительность дорожных машин является важным показателем для оценки эффективности их использования и занимает центральное место в формулах критерия эффективности. Для уменьшения затрат как целевой функции оптимизации производительность должна увеличиваться. Между возможностями ведущей машины и их количеством существует связь:

$$N_e \geq \Pi \quad (2.3)$$

где N_e – количество ведущих машин, ед;

Π – производительность ведущих машин, м³/смена.

Ведущей считают машину, выполняющую наиболее трудоёмкие операции и имеющую наиболее высокую (по сравнению с другими машинами, работающими на захватке) стоимость машино-смены. Соответственно, можно провести прямую зависимость числа ведущих машин (N_B) и скоростью комплексного потока и обозначить данный параметр существенным при определении скорости комплексного потока.

Следует отметить, что параметры являются противоречивыми, то есть при улучшении одного сразу несколько других ухудшается. Следовательно, исходные или промежуточные расчетные данные несут свойство неопределенностей различного вида. Скорость комплексного потока напрямую зависит от длины устраиваемого участка, периода строительства и объёма проводимых работ. Чем меньше период строительства, тем больше необходимо принимать значение скорости комплексного потока. При большом сроке строительства можно уменьшить скорости комплексного потока, то есть ежедневный объем выполняемых работ и длину готового участка дороги, что позволит сократить количество необходимой дорожной техники и трудозатрат. Производительность ведущей машины (машин) и количество ведущих машин прямо пропорционально связано со скоростью комплексного потока. Если выбирается максимально возможное количество машин и их производительность, тем больше становится скорость комплексного потока состава машин за рабочую смену.

2.3 Анализ неопределенностей при определении стоимости устройства дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог

В практике дорожного строительства также одной из важнейших величин следует указать стоимость устройства дорожной одежды. Определение

экономических показателей, определяющих затраты на строительство лесных автомобильных дорог, должно базироваться на основе современных экономических и инженерных расчетов.

Большую часть в ценообразовании строительных работ занимает стоимость дорожно-строительных материалов. Стоимость и доступность строительных материалов - статья расходов, которая имеет яркую региональную специфику. Каждый субъект России имеет свою уникальную ресурсную базу. Сырье, которое имеет относительно низкую стоимость в одной области, может быть очень дорогим в другой. Данный показатель обусловлен следующими факторами: тип и марка требуемых материалов, наличие в регионе, транспортной доступностью, а также объемом проводимых работ.

При строительстве дороги используются: песок, отсев, щебень, гравий, минеральные порошки, битум и битумные эмульсии, геотекстиль, цемент, модифицирующие добавки (полимеры, резина, целлюлозные волокна и другие). Как правило, самым дорогим материалом из списка является битум и его производные. Это объясняется тем, что местные каменные карьеры есть во многих регионах, а в свою нефтеперерабатывающие заводы – явление более редкое. И если требуется материал действительно высокого качества, то его часто приходится привозить издалека, а то и вовсе импортировать [32]. Следовательно, показатель стоимости материалов (P_M) является одним из основных при определении стоимости устройства дорожной одежды.

Последовательностью устройства дорожных одежд предусмотрено определение параметров транспортных работ. Расстояние доставки материалов принято определять согласно формуле:

$$l_{\partial} = L_0 + L_{\partial}, \quad (2.4)$$

где L_0 – расстояние от места временного складирования до начала трассы, км;

L_{∂} – длина строящейся дороги, км.

С значением расстояния доставки материалов и объёмом производимых работ связаны параметры числа машин (N_a), которые будут обеспечивать выполнение технологических операций на выбранном участке дороги. Подбирают машины и оборудование для создания комплексного механизированного отряда, предназначенного для выполнения работ определённого вида, и составляют эти машины в технологической последовательности, обеспечивающей высокое качество работ при максимальной эффективности использования всех средств механизации. При выборе машин и оборудования прибегают к технико-экономическому сравнению различных средств механизации (машин разных марок и типов), руководствуясь следующими соображениями:

- стоимость единицы продукции (1 пог. м. или 1 м² покрытия) должна быть наименьшей. Этот показатель является основным и в большинстве случаев решающим;
- выработка продукции на одного рабочего/машину должна быть наибольшей;
- энергоёмкость единицы продукции должна быть наименьшей, а энерговооружённость одного рабочего/машины наибольшей.

Обязательно следует учесть показатель стоимости машино-смены (P_c). Сметная стоимость машино-смены служит для определения затрат на эксплуатацию строительных машин, учитываемых в сметной стоимости строительства. Она исчисляется с учетом средних условий применения машин. На основе сметной стоимости машино-смены производят:

- а) определение сметной стоимости работ, выполняемых с применением машин;
- б) сопоставление фактических затрат на эксплуатацию машин со сметной стоимостью, выявление результатов работы специализированных участков и управлений механизации.

2.4 Разработка структурной схемы модели определения скорости комплексного потока и стоимости устройства дорожной одежды

На основании анализа нормативно-технической документации, проектной документации и технологического процесса устройства дорожных одежд, можно выделить основополагающие величины, которые имеют наибольшее влияние на параметр «скорость комплексного потока».

При детальном рассмотрении технологии устройства дорожных одежд можно наблюдать множество связей на различных этапах планирования производства работ, начиная с определения сроков осуществления строительства, заканчивая подбором оптимального состава комплексного механизированного потока и его производительности. Схема определения влияющих параметров на скорость комплексного потока представлена на рисунке 2.2.

Для определения стоимости устройства дорожной одежды основными параметрами в ходе анализа были обоснованы: длина доставки материалов, стоимость материалов, стоимость машино-смены, так как эти показатели напрямую влияют на стоимость устройства дорожной одежды. Также необходимо учесть количество машин, данный параметр связан с показателем фактических или планируемых затрат времени и финансов любой дорожно-строительной машиной на производство заданного объема работ и степени ее использования.

Перечисленные параметры характеризуются свойствами неопределенности и изменяются в некотором диапазоне. Для преодоления этой проблемы при разработке документации они задаются детерминировано, что делает решение недостаточно корректными и как правило, для решения таких проблем в значительной мере опираются на опыт и интуицию инженера.

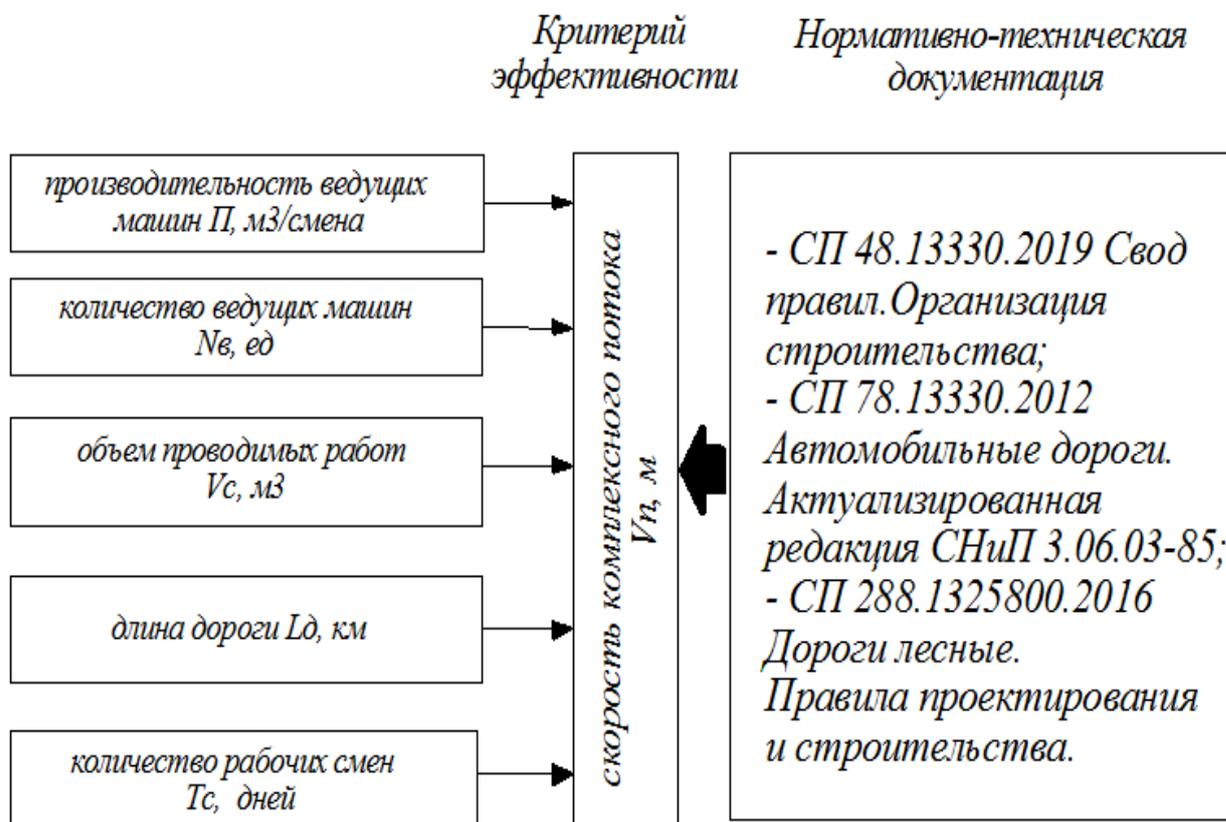


Рисунок 2.2 - Схема определения влияющих параметров на скорость комплексного потока

Таким образом были обоснованы все необходимые параметры, теоретический подход к решению задачи и разработана структурная схема модели. Структурная схема модели определения скорости комплексного потока и стоимости устройства дорожной одежды приведена на рисунке 2.3.

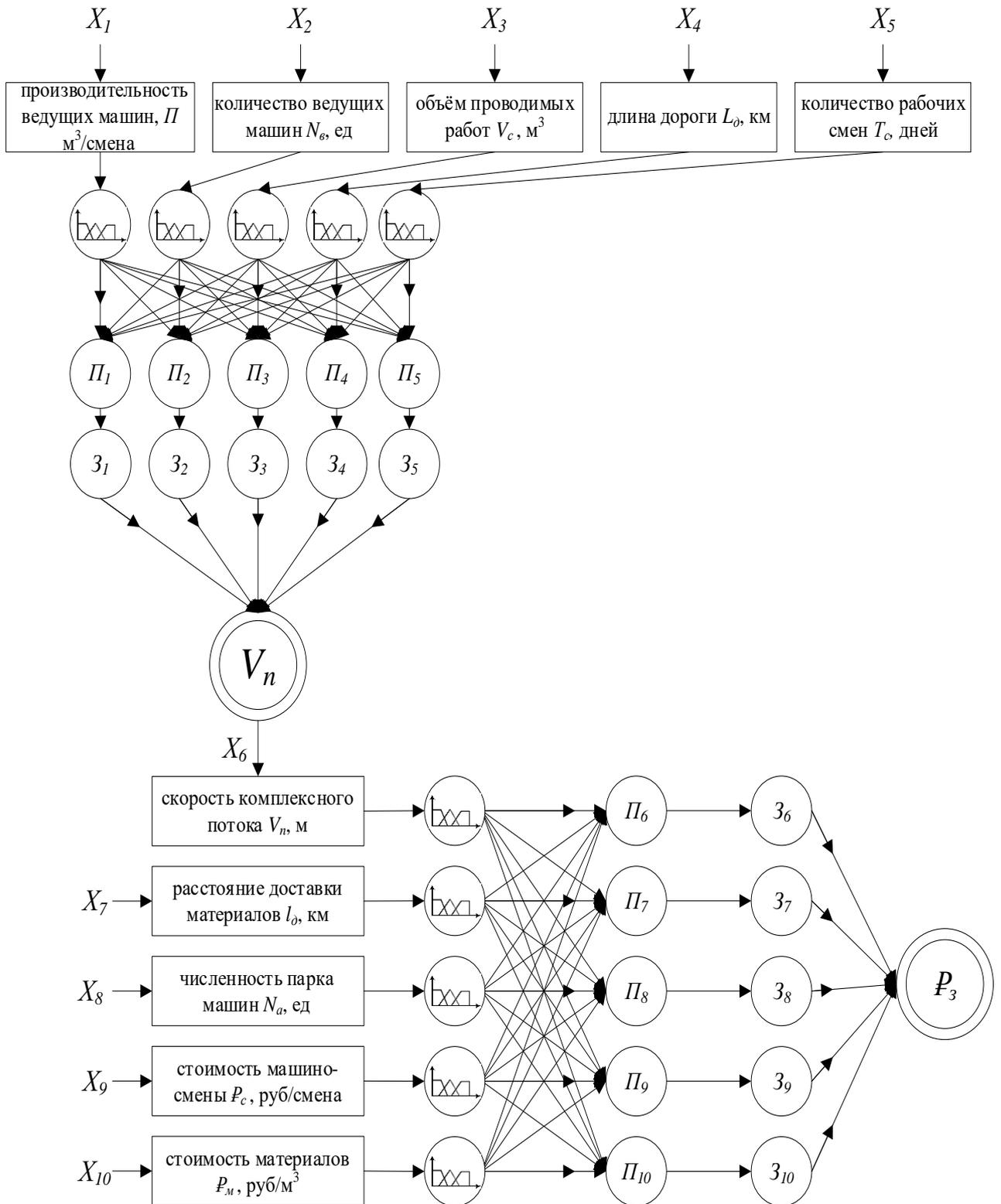


Рисунок 2.3 – Структурная схема модели определения скорости комплексного потока и стоимости устройства дорожной одежды

2.4 Выводы по второй главе

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. Основными этапами разработки проектной документации при устройстве дорожных одежд являются: сбор данных, выбор вида покрытия, определение потребности в материалах, транспортные работы, разработка сметной документации, выбор наилучшего варианта устройства дорожной одежды.

2. Поточный метод проведения работ существенно превосходит остальные известные методы за счет повышения общей эффективности выполнения работ, облегчает учёт выполнения планов работ, сокращает сроки оборота материальных и денежных средств и объём незавершенного производства.

3. Особенностью выбора наилучшего варианта устройства дорожной одежды является результат сопоставления технико-экономических показателей. Среди экономических показателей выступают: продолжительность строительства, трудоемкость выполнения работ, максимальная численность работающих и машин. В общем случае выбирается вариант с наименьшей суммой приведенных затрат, что не повышает качество принятых решений.

4. Обоснованы зависимости и влияние параметров на скорость комплексного потока и стоимость устройства дорожной одежды, а также проведен анализ параметров с целью выявления неопределенностей при устройстве дорожных одежд, что позволило получить основные данные для разработки нейронных сетей.

5. Разработана структурная схема модели определения скорости комплексного потока и стоимости устройства дорожной одежды лесовозных автомобильных дорог.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ КОМПЛЕКСНОГО ПОТОКА И СТОИМОСТИ УСТРОЙСТВА ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ ЛЕСОВОЗНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

3.1 Выбор программного средства для определения скорости комплексного потока и стоимости устройства дорожной одежды лесовозных автомобильных дорог

Выбор программного средства для разработки интеллектуальной системы определения скорости комплексного потока и стоимости устройства дорожной одежды лесовозных автомобильных дорог подразумевает анализ возможных путей решения данной проблемы: адаптация существующих методов, либо поиск и выявление новых. Использование стандартных математических методов на жесткой алгоритмической основе для решения задачи оценки технологических решений в подавляющем большинстве случаев дает неудовлетворительные результаты. Это связано со сложностью анализируемых объектов и тем, что при решении поставленных задач приходится оперировать большим объемом входных данных не только числового формата, но и лингвистического, для которых характерны неопределенность, неполнота и отсутствие возможности формальной структуризации.

При разработке интеллектуальной системы для определения скорости комплексного потока и стоимости устройства дорожной одежды лесовозных автомобильных дорог следует выработать теоретический подход, определить современные компьютерные и программные средства разработки, необходимые функциональные требования к системе, обеспечивающие требуемые параметры системы.

Для решения поставленных задач необходимы методы, способные реализовать выбор рационального решения на основе ранее полученного опыта и анализа всей доступной информации об объекте исследования. Существуют различные интеллектуальные системы, но наиболее распространенными можно назвать следующие [12]:

- искусственные нейронные сети (ИНС) – представляет собой простые вычислительные элементы – нейроны, которые в совокупности представляют собой математическую модель биологических нейронных сетей человеческого мозга;

- генетические алгоритмы – это алгоритмы, используемые для решения задач оптимизации и моделирования, основанные на генетических процессах, аналогичных для биологических организмов;

- системы, основанные на знаниях (экспертные системы, системы логического вывода), т. е. системы, построенные на правилах, хранящихся в базе знаний, с помощью которых на основе совокупности исходных фактов осуществляется поиск решений и заключений из этих фактов.

Опираясь на поставленные задачи исследования, наиболее привлекательны интеллектуальные системы, основанные на знаниях, поскольку речь идет о необходимости экспертных заключений из исходных данных и поисков решений для подбора рациональных вариантов технологических и экономических параметров.

Системы логических выводов можно разделить на основные группы - четкие и не четкие выводы. Четкие логические выводы построены на теории четких множеств. Нечеткие логические выводы построены на теории нечеткой логики, и представляют собой процессы получения нечетких заключений с помощью нечетких условий или предпосылок об объекте исследования на основе информации о его текущем состоянии. Нечеткое множество – это математическая формализация нечеткой информации, представленная множеством элементов, обладающих общим свойством в различной степени и принадлежащих

к данному множеству с различной степенью принадлежности. Нейронный логический вывод – один из немногих методов, который допускает неточность, неопределенность и неполную истинность обрабатываемых данных и реализуется на основе обобщенного использования методов нечеткой логики и методов искусственных нейронных сетей (ИНС). Применение методов нечеткой логики обусловлено прикладным характером задачи оценки технологических показателей, когда необходимо оперировать не только численными данными, но и лингвистическими. Кроме того, использование аппарата нечетких множеств позволяет адекватно формализовать знания экспертов, которые могут быть неполными и/или субъективными.

Использование методов ИНС обусловлено их основным преимуществом – возможностью обучения, что позволяет путем объединения в обучающей выборке экспертных знаний и аналитических зависимостей при разработке технологических решений идентифицировать неоднозначные параметры.

С целью учета неопределенностей в задаче предлагается использовать интеллектуальную систему на основе нейро-нечетких сетей [33]. В случае устройства дорожной одежды предполагается, что такой подход позволит разработать аппарат для определения наилучшего способа организации строительства и определять ориентировочную стоимость строительных работ. Как итог, подобная система обеспечит улучшение экономических показателей за счет возможности автоматизированного поиска более обоснованного решения.

Этапы разработки интеллектуальной системы можно представить в следующем виде:

- постановка задачи в содержательном виде;
- формирование обучающих и тестовых выборок;
- формирование базы правил;
- принятие решений;
- вывод.

Разработанная в рамках данной работы структурная схема модели определения скорости комплексного потока и стоимости устройства дорожной одежды является математической моделью интеллектуальной системы принятия решений и предназначена для поиска наилучшего решения в совокупности одновременно рассматриваемых критериев при учете большого объема данных различной природы.

3.2 Получение исходных данных для разработки нейронных сетей определения скорости комплексного потока и стоимости устройства дорожной одежды

Этап формирования обучающих и тестовых выборок является основополагающим, так как набор исходных данных не должен противоречить области нейронной сети и быть полным для получения адекватных результатов исследования. Исходными данными служат накопленные экспертные сведения, а также утвержденные проекты организации строительства, которые прошли ряд экспертиз и приняты в работу на объекте строительства. Экспертами в области дорожного строительства обычно выступают подрядные организации, инженеры ПТО, представители заказчика и т.п.

Для решения задачи с использованием нейронных сетей следует определить обучающие выборки входных и выходного параметра. Рекомендуемое количество примеров обучающего множества Q рассчитано по формуле:

$$Q = 7 \cdot N_x + 15 \quad (3.1)$$

где N_x – количество входных переменных сети.

Простая выборка является математической моделью серии независимых опытов и, как правило, используется для машинного обучения. При этом для каждого этапа обучения необходим свой набор данных:

- обучающая выборка;
- тестовая выборка.

Большой разницы между этими выборками нет, весь набор данных подразумевает разделение на две части, но есть одно важное условие – обучающая выборка не должна включать тестовую выборку. Для получения исходных данных использовались проекты организации строительства и производства работ автомобильных дорог в Алапаевском районе Свердловской области, которые эксплуатируются лесовозным транспортом для перевозки лесоматериалов, представленные в таблице В.1.

В отношении формулы (3.1) Ясницким Л.Н. отмечается [129], что она приемлема для построения регрессионных моделей, а для нейронных сетей эмпирически определено достаточное количество примеров в 2-4 раза меньше.

Определение минимального количества опытов выполнено методом последовательных приближений [82]. Для проведения эксперимента было подобрано по 6 выборок для каждой нейронной сети.

В исследованиях принято считать, что достаточная надежность эксперимента обеспечивается при точности 5% и уровне достоверности результатов 0,95. Необходимое количество опытов n , при котором среднее значения опыта отличается от ожидаемого не более чем на допустимую величину отклонения, для определения скорости комплексного потока рассчитывалось по формуле:

$$n = \frac{t^2 \cdot \sigma}{y^2 \cdot \Delta^2}, \quad (3.2)$$

где σ – дисперсия выборки;

Δ — допустимая ошибка выборки;

y - среднее значение опыта;

t - табличная величина, выбираемая для заданного уровня достоверности (критерий Стьюдента).

Оценка дисперсии σ определялась по следующей формуле:

$$\sigma = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y)^2, \quad (3.3)$$

где y_i - единичное значение опыта;

y - среднее значение опыта;

n - количество образцов в опыте.

$$y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad (3.4)$$

Результаты расчета минимального количества опытов для определения скорости комплексного потока отражены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты расчета минимального количества опытов для определения скорости комплексного потока

<i>№ опыта</i>	<i>y_i, м</i>	<i>N</i>	<i>y, м</i>	<i>σ</i>	<i>t</i>	<i>Δ, %</i>	<i>n</i>
1	100	6	208,3	4513,9	1,96	5	10,0
2	250						
3	150						
4	300						
5	200						
6	250						

В результате вычислений минимальное число наблюдений, при котором среднее значение по выборке не отличается от математического ожидания не более чем заданную величину $\Delta = 5$, равно 10.

Проверку сети на адекватность в дальнейшем будем осуществлять по 6 выборкам. В совокупности для дальнейшего исследования подготовлено 20 выборок, представленных в таблице В.2. Для выполнения настройки сети сформируем 14 выборок значений.

Аналогично определим минимальное количество опытов для определения стоимости устройства дорожной одежды. Результаты расчета минимального количества опытов для определения стоимости устройства дорожной одежды в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты расчета минимального количества опытов для определения стоимости устройства дорожной одежды

<i>№ опыта</i>	<i>y_i, тыс. руб</i>	<i>N</i>	<i>y, тыс. руб</i>	<i>σ</i>	<i>t</i>	<i>Δ, %</i>	<i>n</i>
1	4551,11	6	10812,5	16954537,5	1,96	5	14
2	12711,73						
3	7198,55						
4	17217,79						
5	10257,79						
6	12938,31						

В результате вычислений минимальное число наблюдений, при котором среднее значение по выборке не отличается от математического ожидания не более чем заданную величину $\Delta = 5$, равно 14. Для выполнения настройки сети формируем 14 выборок значений. Проверку сети на адекватность в дальнейшем будем осуществлять по 6 выборкам. В совокупности для дальнейшего исследования подготовлено 20 выборок, представленных в таблице В.3.

3.3 Разработка нейронной сети определения скорости комплексного потока устройства дорожной одежды

Выбор скорости комплексного потока является важной частью проекта организации строительства, которая при устройстве дорожных покрытий влияет на все технологические параметры и в результате решения которой определяют наилучший вариант для проведения рабочих операций на участке. Именно по этой причине значение скорости комплексного потока взаимосвязано с другими расчетными параметрами, что вносит в ее расчет значительную

неопределенность, представляют собой многовариантную задачу, для решения которой целесообразно применение математических методов и ЭВМ.

В качестве входных переменных предлагается принять:

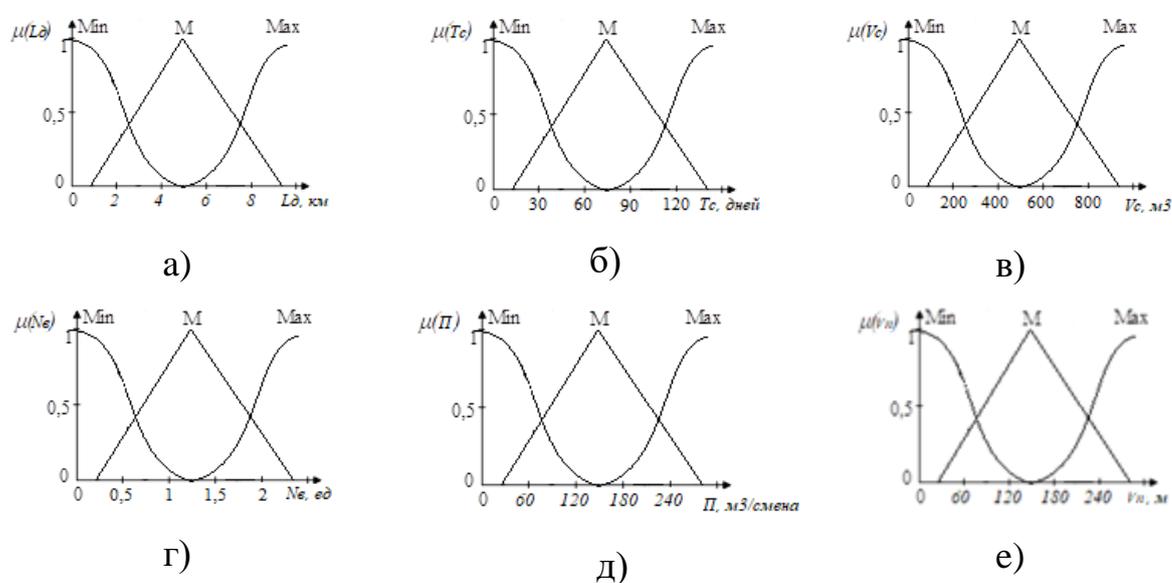
- производительность ведущих машин, (P , м³/смена);
- количество ведущих машин, (N_v , ед);
- объём проводимых работ, (V_c , м³);
- длина дороги, (L_d , км);
- количество рабочих смен (T_c , дней).

Для реализации нейронной сети так же следует разработать нечеткие функции принадлежности, так как выявленные неопределенности в задаче подлежат процедуре формализации. Формализация – один из способов выражения содержания совокупности знаний через определённую форму, в данном случае через знаки искусственного языка. Наиболее значимой в задаче является логическая формализация, которая несет в себе выражение мысленного содержания посредством логических форм. Под логическими формами в данном случае следует принимать лингвистические переменные. Лингвистическая переменная является переменной более высокого порядка, чем нечеткая переменная, в том смысле, что лингвистической переменной являются нечеткие переменные, предназначены в основном для анализа сложных и плохо формализуемых явлений [48].

Значениями лингвистических переменных являются нечеткие множества, символами которых являются слова и предложения в естественном или формально языке, служащие некоторой элементарной характеристикой явления и описываются они следующим набором (N, T, X, G, M), где N - наименование переменной, T – терм-множество N , то есть совокупность ее лингвистических значений, X – универсальное множество с базовой переменной x , G – синтаксическое правило, порождающее терм-множество T , M – семантическое правило. Подобно тому, как алгебраические переменные имеют своими значениями числа, лингвистические переменные в качестве переменных имеют

слова и словосочетания. Множество значений, которая может принять лингвистическая переменная принято называть терм-множеством. Каждое значение в терм-мноестве называется термом и является нечетким множеством (нечеткой переменной), определяемым в области базовой переменной. Базовая переменная же является универсумом для всех нечетких переменных в терм-мноестве.

Для определения лингвистических переменных и задания терм-мноеств приняты треугольные нечеткие интервалы, а по краям универсального множества приняты S-образные функции. В графическом виде предложенные нечеткие функции принадлежности для нечеткого вывода функции длина захватки приведены на рисунке 3.1.



- а) «длина дороги, L_d »; б) «количество рабочих смен, T_c »;
 в) «объем проводимых работ, V_c »; г) «количество ведущих машин, $N_в$ »;
 д) «производительность ведущих машин, Π »;
 е) «скорость комплексного потока, V_n »

Рисунок 3.1 - Лингвистические переменные

Определим на универсальном множестве лингвистических переменных следующие терм-множества: «Минимальное» – Min ; «Среднее» – M ; «Максимальное» – Max . Таким образом, запишем терм-множества лингвистических переменных в следующем виде:

- $\Pi = \{Min, M, Max\}$;
- $N_g = \{Min, M, Max\}$;
- $V_c = \{Min, M, Max\}$;
- $L_d = \{Min, M, Max\}$;
- $T_c = \{Min, M, Max\}$.

Формально постановка задачи определения скорости комплексного потока запишется в виде:

$$V_n = f(\Pi, N_g, V_c, L_d, T_c) \quad (3.5)$$

Обозначение параметров функции (3.5) представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Обозначения параметров функции определения скорости комплексного потока

Обозначение	Наименование переменной	Нечеткие функции принадлежности	Физическое значение переменных
X_1	Производительность ведущих машин, Π	Минимальное - Min ; Среднее - M ; Максимальное - Max	Количество продукции, перерабатываемое машиной за единицу времени, м ³ /смена
X_2	Количество ведущих машин, N_g	Минимальное - Min ; Среднее - M ; Максимальное - Max	Количество требуемых машин для производства работ, ед
X_3	Объем проводимых работ, V_c	Минимальное - Min ; Среднее - M ; Максимальное - Max	Объем необходимого материала для устройства дорожной одежды, м ³
X_4	Длина дороги, L_d	Минимальное - Min ; Среднее - M ; Максимальное - Max	Длина устраиваемого дорожного полотна, км
X_5	Количество рабочих смен, T_c	Минимальное - Min ; Среднее - M ; Максимальное - Max	Период, за который планируется провести работы, дней
Y_1	Скорость комплексного потока, V_n	Минимальное - Min ; Среднее - M ; Максимальное - Max	Длина участка готовой дороги, построенной за одну смену, м

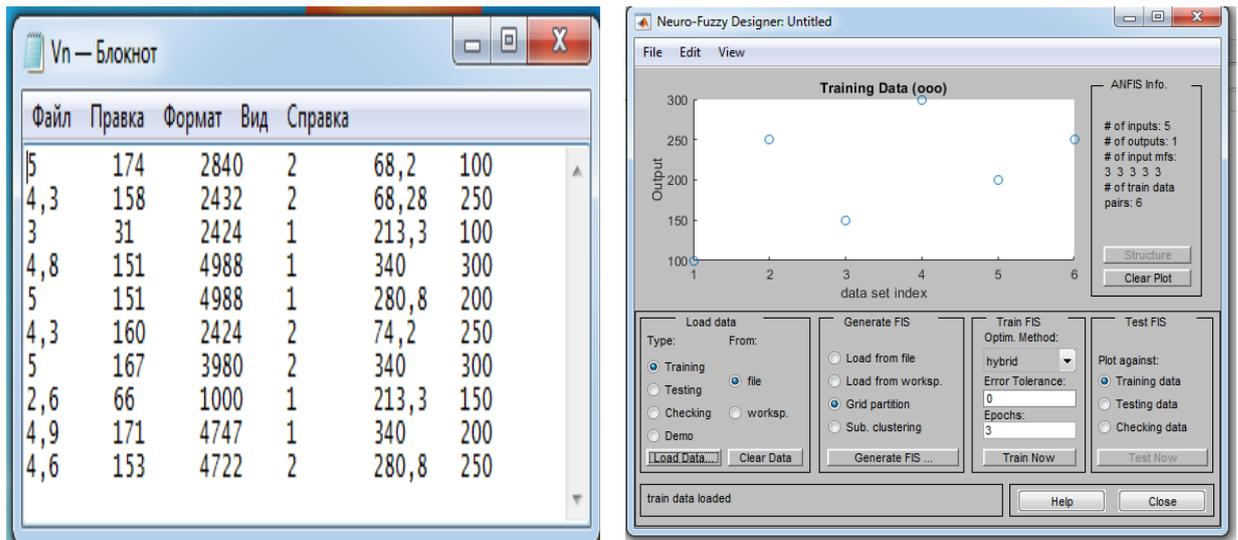
В соответствии со схемой (рисунок 2.3) и обоснованными входными переменными изначально была разработана нейронная сеть для определения скорости комплексного потока. Построение нейронной сети осуществляется на основе системы нейронного вывода (*adaptive neuro-fuzzy inference system, ANFIS*) посредством применения специализированного пакета *Neuro-Fuzzy Designer* программного средства *Matlab*. Обучение модели было выполнено методом, который представляет собой комбинацию методов наименьших квадратов и обратного распространения ошибки. Результатом данного процесса является оптимизация (настройка) параметров функций принадлежности входных лингвистических переменных.

Работа в пакете *Neuro-Fuzzy Designer* включает в себя четыре фазы:

- 1) загрузка данных;
- 2) генерация структуры сети;
- 3) обучение нечеткой сети на обучающих выборках;
- 4) проверка настроенной нечеткой сети на тестовых выборках.

На основе подготовленных обучающих выборок создается файл $V_n.dat$ (рисунок 3.2а). Данные отображаются в виде матрицы, (обязательно выходной параметр располагается в последнем столбце) загружаются в программную среду *Matlab* (рисунок 3.2б). Затем определяется структура сети, основанной на правилах с нечетким выводом по методу *Surgeno*. Целью данного метода является разработка модели, которая выполняет отображение входов (X) в выход (Y), обеспечивающее более точную и налаженную аппроксимацию реальной системы. Такое отображение предполагает некую геометрическую поверхность в пространстве и задаётся декартовым произведением $X \times Y$ [38]. Исходя из вышесказанного, особенностью предлагаемого метода является использование базы правил нечеткой продукции. При создании базы правил рассматриваются варианты возможных значений входных параметров и их влияние в этих случаях на выходную переменную.

Для вывода функция принадлежности имеет вид линейной функции от значений предпосылок нечетких правил (рисунок 3.3), задаются параметры сети (рисунок 3.4а) и выполняется корректировка лингвистических переменных для всех входных параметров (рисунок 3.4б). Запускается генерация сети, выводится ее структура (рисунок 3.5) и созданная база правил (рисунок 3.6).



а)

б)

а) подготовка обучающих выборок в файле $V_n.dat$; б) загрузка данных в программную среду *Matlab*

Рисунок 3.2 – Представление обучающих выборок

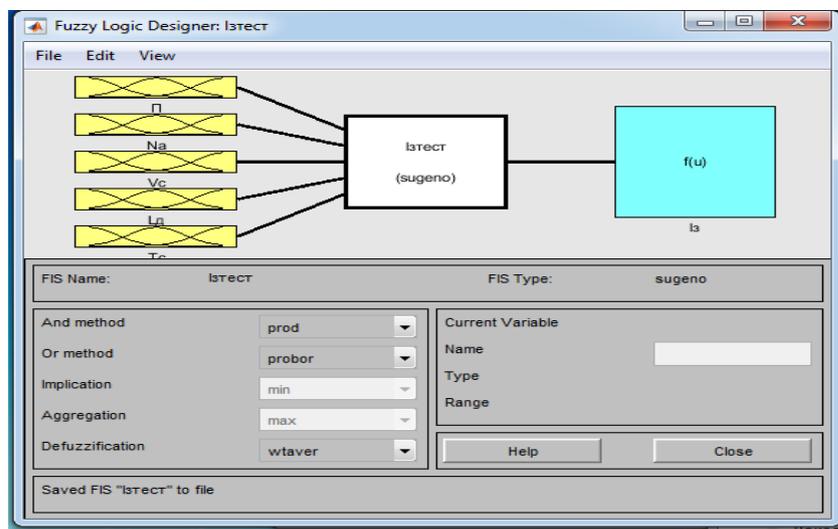
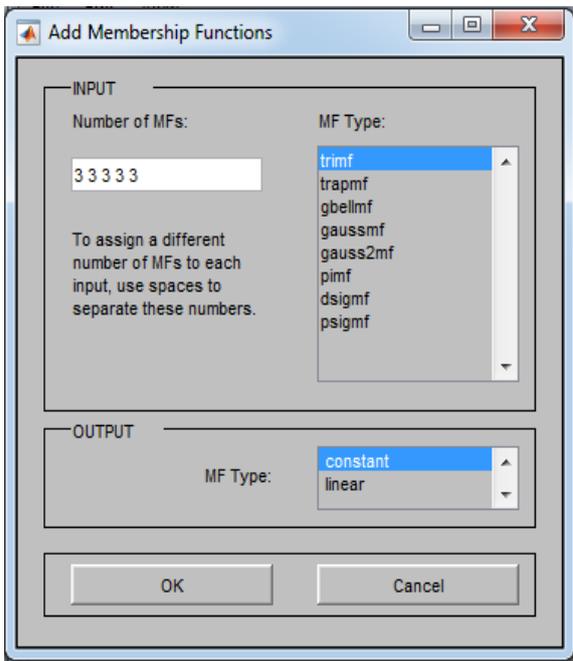
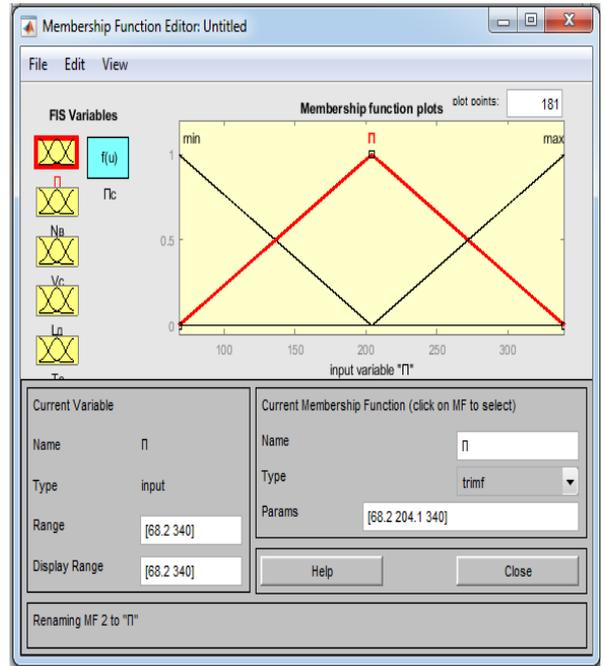


Рисунок 3.3 – Задание структуры сети и метода нечеткого вывода (*Surgeno*)



а)



б)

а) задание параметров сети; б) переменная «П» (переменные «Nв», «Vс», «Lд», «Tс» заданы аналогично)

Рисунок 3.4 - Задание параметров нечеткой сети

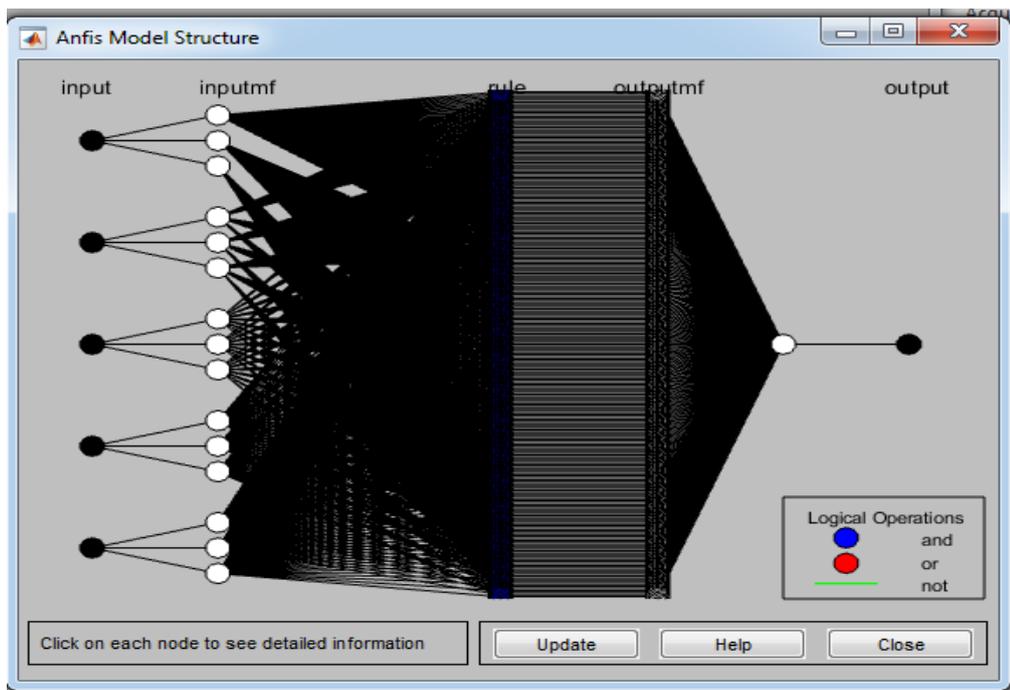


Рисунок 3.5 – Генерация нейронной сети

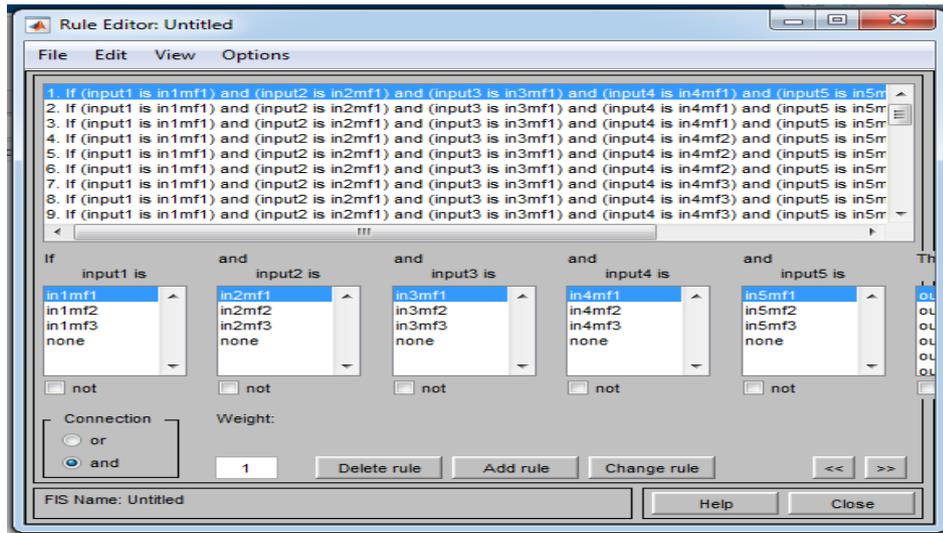
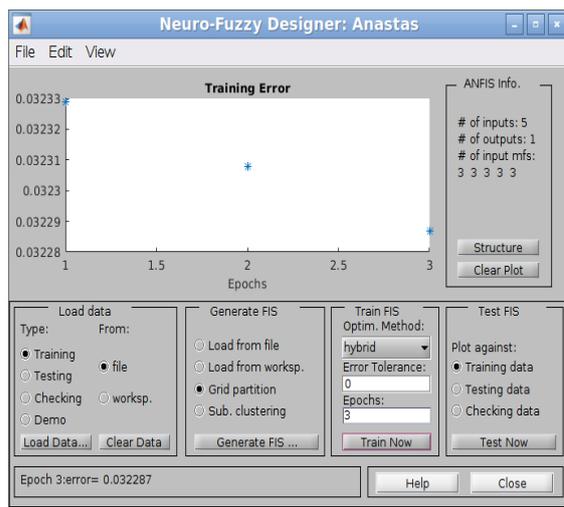


Рисунок 3.6 - Генерация базы правил нечеткой продукции

Далее запускается процедура обучения сети (рисунок 3.7а), при этом задано 10 эпох обучения. Процесс обучения отображается в командном окне *Matlab* (рисунок 3.7б), где выведено значение среднеквадратической ошибки RMSE результата обучения равное 0,000392. Расчеты по настроенной сети в рабочей области *Matlab* представлены на рисунке 3.8.



Minimal training RMSE = 0.000392

ANFIS info:

Number of nodes: 524
 Number of linear parameters: 243
 Number of nonlinear parameters: 45
 Total number of parameters: 288
 Number of training data pairs: 6
 Number of checking data pairs: 0
 Number of fuzzy rules: 243

Warning: number of data is smaller than number of modifiable parameters

Start training ANFIS ...

1	0.000392367
2	0.000392544

Designated epoch number reached --> ANFIS training completed at epoch 2.

а)

б)

а) процесс обучения нейронной сети; б) отображение процесса обучения;

Рисунок 3.7 – Обучение нейронной сети

```
>> fis=readfis('ПС2');evalfis(fis,[213.3,1,4042,5,160])

ans =

149.9996
```

Рисунок 3.8 – Расчеты по настроенной сети в рабочей области *Matlab*

На разработанную нейронную сеть получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ [98].

3.4 Разработка нейронной сети определения стоимости устройства дорожной одежды

Аналогично разрабатывалась нейронная сеть определения стоимости устройства дорожной одежды. Для разработки нейронной сети выделено пять параметров, в которых наиболее явно выражена неопределенность:

- V_n – скорость комплексного потока, м
- l_d - расстояние доставки материалов, км;
- N_a - численность парка машин, ед;
- P_c - стоимость машино-смены, руб/смена;
- P_m - стоимость материалов, руб/м³.

Таким образом, сформулированная постановка задачи будет выглядеть следующим образом:

$$P_3 = f(V_n, l_d, N_a, P_c, P_m) \quad (3.6)$$

Обозначение параметров функции (3.6) приведены в таблице 3.4.

Процесс создания сети аналогичен ранее проведенным процедурам и показан на рисунках 3.9-3.11. Процесс обучения сети показан на рисунке 3.12. Значение среднеквадратической ошибки *RMSE* результата обучения равно

0,047183 (рисунок 3.12б). Расчеты по настроенной сети в рабочей области *Matlab* представлены на рисунке 3.12в.

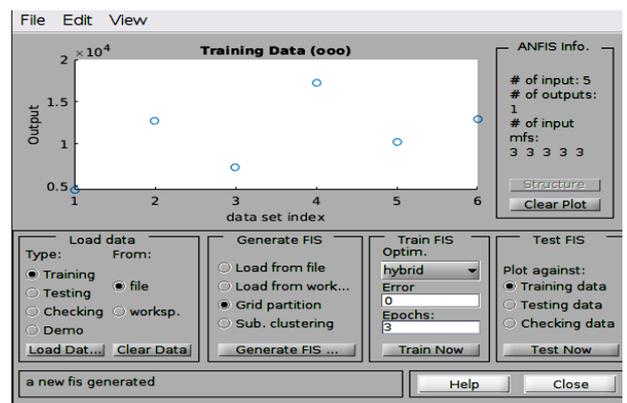
Таблица 3.4 – Обозначение параметров функции определения стоимости устройства дорожной одежды

Обозначение	Наименование переменной	Нечеткие функции принадлежности	Физическое значение переменных
X_6	Скорость комплексного потока, V_n	Минимальное - Min ; Среднее - M ; Максимальное - Max	Длина участка готовой дороги, построенной за одну смену, м
X_7	Расстояние доставки материалов, l_d	Минимальное - Min ; Среднее - M ; Максимальное - Max	Удаленность строительных материалов от места проведения работ, км
X_8	Численность парка машин, N_a	Минимальное - Min ; Среднее - M ; Максимальное - Max	Количество используемых в процессе машин, ед
X_9	Стоимость машино-смены, P_c	Минимальное - Min ; Среднее - M ; Максимальное - Max	Сумма денежных затрат, отнесенных к одной рабочей смене, руб/смена
X_{10}	Стоимость материалов, P_m	Минимальное - Min ; Среднее - M ; Максимальное - Max	Сумма денежных затрат на строительные материалы, руб/м ³
Y_2	Стоимость устройства дорожной одежды, P_3	Минимальное - Min ; Среднее - M ; Максимальное - Max	Сумма денежных затрат на строительство дорожной одежды, тыс. руб

Bul.dat - /home/vladimir289...akov/СетьБулдако

Файл Правка Поиск Вид Документ Проект Сборка Инст

№	1	2	3	4	5	6
1	100	22	50	10400	3400	4551,1184
2	250	15	34	10400	3200	12711,7320
3	150	20	37	10400	3350	7198,5578
4	300	20	73	10400	3350	17217,7692
5	200	11	83	12000	2450	10257,7904
6	250	38	73	12000	3500	12938,3110



а)

б)

а) подготовка обучающих выборок в файле *Bul.dat*; б) загрузка данных в программную среду

Рисунок 3.9 – Представление обучающих выборок

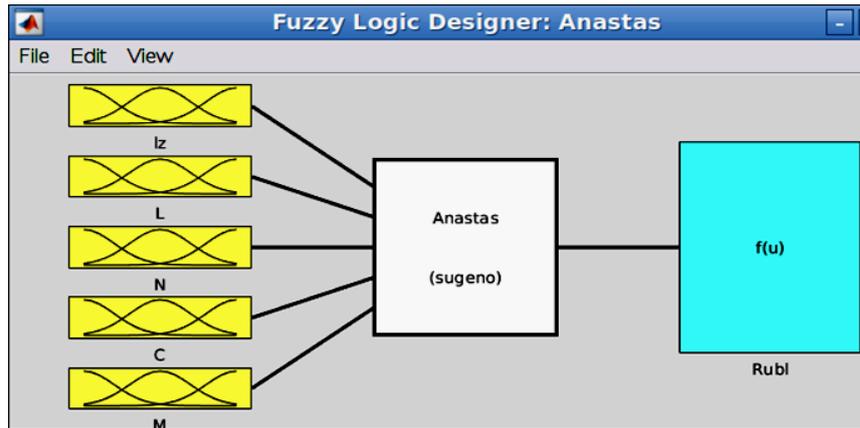
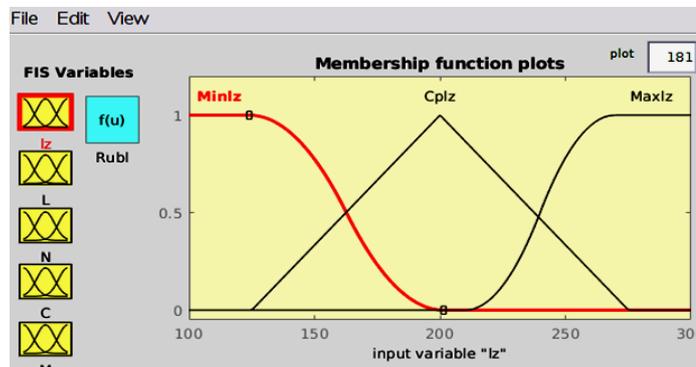
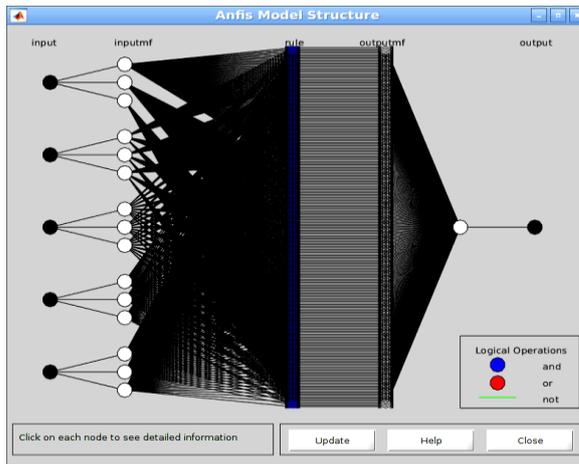


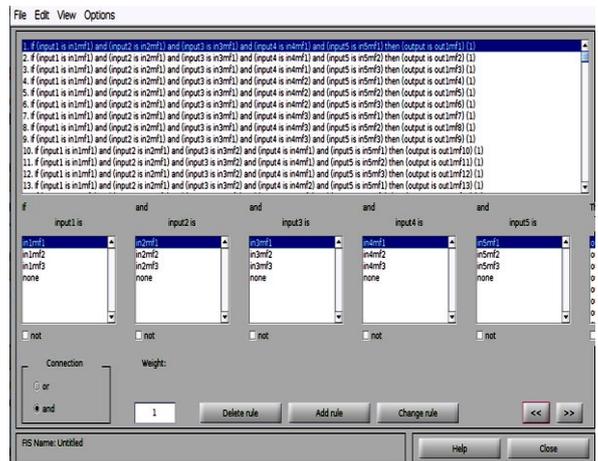
Рисунок 3.10 – Задание структуры сети и метода нечеткого вывода (*Surgeno*)



а)



б)



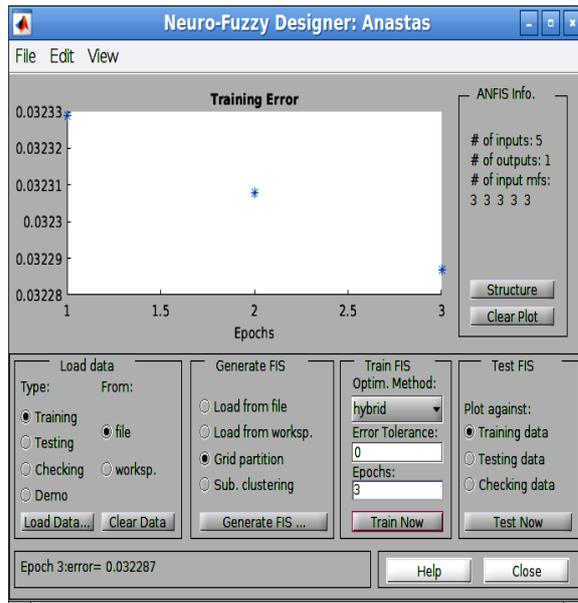
в)

г) переменная « P_c » (переменные « V_n », « I_Δ », « N_a », « P_M » заданы аналогично);

д) генерация нейронной сети; е) генерация базы правил

нечеткой продукции

Рисунок 3.11 – Процедура создания нейронной сети



a)

```

ANFIS info:
  Number of nodes: 1503
  Number of linear parameters: 729
  Number of nonlinear parameters: 54
  Total number of parameters: 783
  Number of training data pairs: 6
  Number of checking data pairs: 0
  Number of fuzzy rules: 729

Warning: number of data is smaller than number of modifiable parameters

Start training ANFIS ...

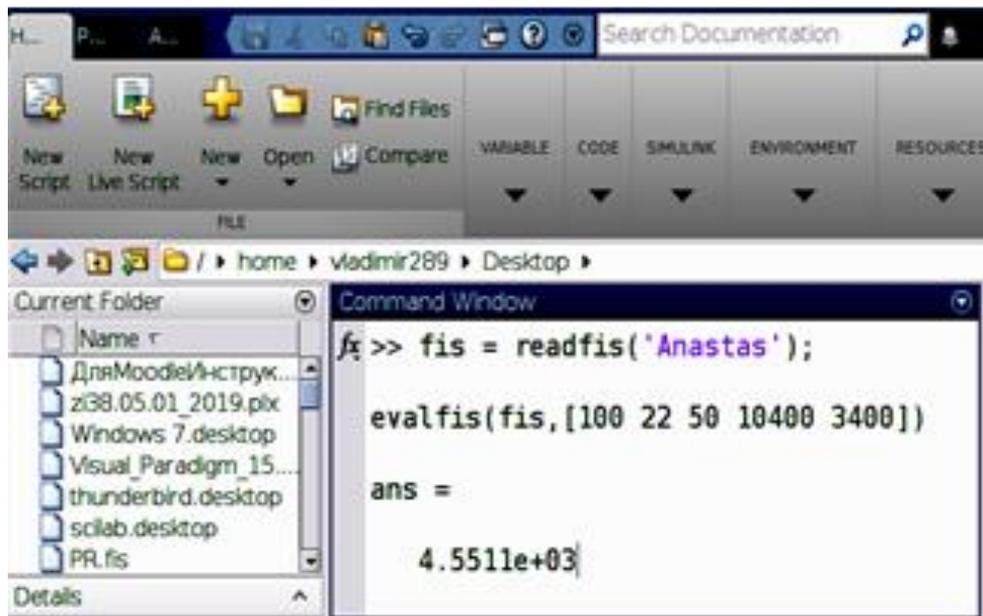
  1  0.0471998
  2  0.0471833

Designated epoch number reached --> ANFIS training completed at epoch 2.

Minimal training RMSE = 0.047183
fx >> |

```

б)



в)

а) процесс обучения нейронной сети; б) отображение процесса обучения;

в) расчеты по настроенной сети в рабочей области *Matlab*

Рисунок 3.12 – Процесс обучения нейронной сети

На разработанную нейронную сеть получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ [99].

3.4 Создание интеллектуальной системы определения скорости комплексного потока и стоимости устройства дорожной одежды на основе комплекса нейронных сетей

Обобщенная модель представляет собой комплекс нейронных сетей и является гибридной интеллектуальной системой. Структурная схема модели определения скорости комплексного потока и стоимости устройства дорожной одежды реализована среде визуально-блочного моделирования *Simulink* на основе программы *Matlab* (рисунок 3.13).



Рисунок 3.13 – Реализация интеллектуальной системы в среде визуально-блочного моделирования *Simulink*

Среда программирования *Simulink* позволяет смоделировать влияние входных параметров и последовательно передает данные между блоками системы, что позволяет сгенерировать нечеткий вывод и получить рациональное значение искомого параметра. Структурная схема включает в себя комплекс:

1. Блок *Constant* – представляют собой структурированные блоки для ввода входных переменных.
2. Блок мультиплексоров (в данном случае *mux*, *mux1*) – предназначен для объединения и последовательной интеграции входных переменных.
3. Блок *Fuzzy Logic* – используется для выполнения процедуры нечеткого вывода как на промежуточном наборе значений, так и для вывода в комплексе нейронных сетей.

Для работы в среде *Simulink* создается файл *sim.slx*. Далее в блоки *Constant* заносятся входные переменные и передаются на блоки мультиплексоров *mux* и *mux1*. После этого передаются в блоки *Fuzzy Logic*, где выполняется процедура нечеткого вывода.

Таким образом значение переменной «скорость комплексного потока» посредством расчета в блоке *Fuzzy Logic* содержит в себе совместное влияние входных переменных Π , N_v , V_c , L_d , T_c . Далее блок-сигнал в совокупности со значениями параметров l_3 , l_d , N_a , P_c , F_m поступает через *mux1* в следующий блок *Fuzzy Logic*, где выполняется процедура нечеткого вывода и рассчитывается стоимость устройства дорожной одежды.

3.5 Выводы по третьей главе

1. Подобран тип интеллектуальной системы, которая соответствует поставленным задачам. По рассмотренным признакам система имеет свойство учитывать основные технологические параметры процесса устройства дорожных одежд, что предполагает принципиально новые возможности для решения такой задачи.

2. Выполнено определение минимального количества наблюдений. Расчеты показали, что необходимое минимальное число испытаний для первоначального количества опытов составляет:

- 16 опытов для выборки определения скорости комплексного потока;
- 20 опытов для выборки определения стоимости конструкции дорожной одежды.

Согласно проведенным расчетам окончательно установим минимальное число наблюдений в размере 14 выборок для обучения моделей и 6 для тестирования сети.

3. Разработаны нейронные сети для определения скорости комплексного потока и стоимости устройства дорожной одежды.

4. Разработана интеллектуальная система определения скорости комплексного потока и стоимости устройства дорожной одежды лесовозных автомобильных дорог гибридного типа на основе комплекса нейронных сетей с реализацией в среде *Matlab+Neuro-Fuzzy Designer*.

ГЛАВА 4. ПОСТАНОВКА ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДЛАГАЕМОГО МЕТОДА НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Применение программного обеспечения *MatLab* и пакета его приложений дает возможность решать задачи в условиях неопределенностей, основываясь на минимальной базе входных переменных, а также позволяет создавать имитационные модели объектов разного рода деятельности.

В третьей главе была разработана интеллектуальная система определения скорости комплексного потока и определения стоимости устройства дорожной одежды лесовозных автомобильных дорог, позволяющая спрогнозировать наилучший вариант по стоимости работ до создания полноценного проекта устройства дорожной одежды, позволит решать вопросы при тендерных процедурах, в части оценки возможностей предприятия, а также при изменении условий строительства (климатические факторы, количество требуемой дорожно-строительной техники и т.п.) оперативно принимать решения по дальнейшему строительству автомобильной лесовозной дороги, что дает преимущество для подрядных организации и ИТР в части экономии материальных и производственных ресурсов.

4.1 Цель, задачи и постановка численного эксперимента

Целью численного эксперимента является проверка адекватности интеллектуальной системы и выявление процента отклонений между прогнозируемыми и фактическими значениями. Основополагающим этапом является подбор входных переменных и их нормализация. Данные должны быть полными, соответствовать области нейросети, а также обязательно отсутствие противоречий. В данном случае, задачи экспериментальных исследований включают в себя:

- проверку адекватности расчетов, полученных с помощью нейронных сетей;
- определение оптимального количества обучающих выборок для получения корректной выходной переменной;
- анализ полученных результатов.

Экспериментальные исследования выполнялись в три этапа.

I этап: проверка адекватности модели определения скорости комплексного потока с помощью нейронной сети.

II этап: проверка адекватности модели определения стоимости устройства дорожной одежды с помощью нейронной сети.

III этап: проверка адекватности обобщённой модели с помощью интеллектуальной системы.

Определение адекватности нейронных сетей и интеллектуальной системы проводят с помощью числовых рядов обучающих выборок для оценки корректности процедуры настройки, и на числовых рядах тестовой выборки для подтверждения правильности результата настроенной сети.

Нормализация входных данных – приведение данных к определенному интервалу, в нашем случае от 0 до 1. Если не провести процедуру нормализации, входные переменные будут оказывать существенное влияние на нейрон, что может привести к неверным решениям, так как нельзя ставить на один уровень величины разных порядков. Так же нормализация позволяет значительно повысить скорость отклика программы и сходимости алгоритма обучения нейронной сети.

Для нормализации данных используется следующая формула:

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

где y_n – нормированное значение переменной;

y_{max} – максимальное значение переменной;

U_{min} – минимальное значение переменной.

Далее в исследованиях при выполнении численных экспериментов будет проверяться 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 определения скорости комплексного потока

№	Длина дороги, м	Количество рабочих смен, дней	Объём проводимых работ, м ³	Кол-во ведущих машин, ед	Производительность ведущих машин, м ³ /смена	Скорость комплексного потока, м
1	0,00	0,01	0,51	0,00	1,00	100
2	0,18	0,12	0,61	0,00	1,00	250
3	0,00	0,10	0,23	1,00	0,47	150
4	0,05	0,16	0,00	1,00	0,00	300
5	0,00	0,16	0,00	1,00	0,22	200
6	0,18	0,10	0,61	0,00	0,98	250
7	0,00	0,05	0,24	0,00	0,00	300
8	0,60	0,74	0,96	1,00	0,47	150
9	0,02	0,03	0,06	1,00	0,00	200
10	0,10	0,15	0,06	0,00	0,22	250
11	1,00	0,93	1,00	1,00	1,00	150
12	0,90	0,78	0,75	1,00	1,00	200
13	0,00	0,05	0,33	0,00	0,98	250
14	0,75	1,00	0,73	1,00	1,00	300
15	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	250
16	0,50	0,98	0,61	1,00	0,47	100
17	0,13	0,30	0,23	0,00	0,22	200
18	0,63	0,90	0,51	1,00	0,98	300
19	0,05	0,10	0,00	0,00	0,00	150
20	0,18	0,16	0,06	0,00	0,00	150

Таблица 4.2 – Нормированные значения исходных данных нейронной сети определения стоимости устройства дорожной одежды

№	Скорость комплексного потока, м	Расстояние доставки материалов, км	Число машин, ед	Стоимость машино-смены, руб	Стоимость материалов, руб	Стоимость устройства дорожной одежды, тыс. руб.
1	1,00	0,82	0,52	0,71	0,13	4551,11
2	0,25	0,93	0,78	0,71	0,30	12711,73
3	0,75	0,85	0,73	0,71	0,17	7198,55
4	0,00	0,85	0,16	0,71	0,17	17217,76
5	0,50	1,00	0,00	0,45	0,96	10257,79
6	0,25	0,56	0,16	0,45	0,04	12938,31
7	0,00	0,82	0,67	0,55	0,83	16862,82
8	0,75	0,79	0,76	0,60	0,48	16293,4
9	0,50	0,05	0,71	1,00	1,00	10900,6
10	0,25	0,97	0,86	0,00	0,57	41308
11	0,75	0,77	0,78	0,73	0,26	5193,30
12	0,50	0,13	1,00	0,66	0,48	9135,85
13	0,25	0,56	0,35	0,45	0,13	12936,7
14	0,00	0,72	0,87	0,71	0,13	20568,1
15	0,25	0,54	0,65	0,45	0,96	19368,9
16	1,00	0,43	0,78	0,89	0,30	15986,2
17	0,50	0,00	0,86	0,65	0,00	31236
18	0,00	0,70	0,13	0,71	0,22	14789,2
19	0,75	0,34	0,68	0,45	0,13	7987,2
20	0,75	0,66	0,65	0,61	0,96	8925,3

4.2 Проверка адекватности нейронных сетей и настроенной интеллектуальной системы

С целью обеспечения требуемой точности интеллектуальной системы необходимо оценить ее адекватность. Проводится данная операция в среде

MatLab с помощью процедуры *RuleViewer*. Как правило, проводится комплексный анализ на основе проверки статистических гипотез и критериев (критерий Дарбина-Уотсона, Фишера и др.), а также исследуют модели на нормальность распределения и отсутствие связей между прошлыми и текущими рядами значений.

На практике же для проверки постоянности ряда и оценки его дисперсии чаще всего используют автокорреляционную и частную автокорреляционную функции. Результаты решения задачи проверки уровня адекватности модели, основанные на анализе соответствия построенной модели предположениям и ограничениям общей модели, представлены в различных шкалах и требуют экспертной оценки с целью принятия окончательного решения. Существует несколько критериев точности моделей временных рядов (рисунок 4.1).

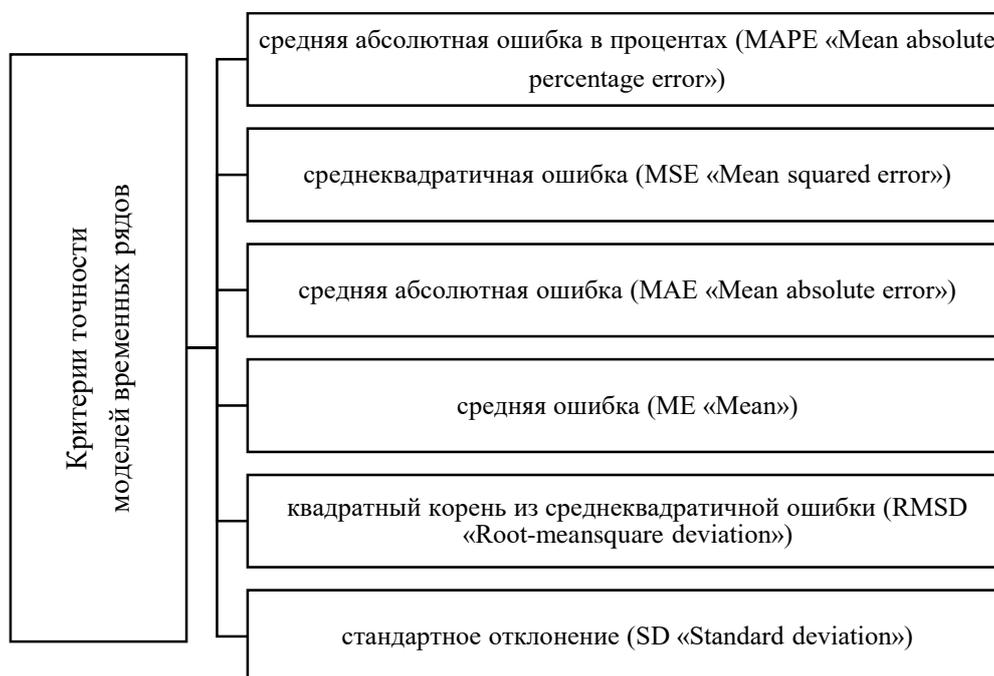


Рисунок 4.1 - Критерии точности моделей временных рядов

В данной работе целесообразно определять среднюю абсолютную ошибку в процентах (*MAPE* «*Mean absolute percentage error*»), так как данный способ позволит:

- продемонстрировать в процентном отношении величину ошибки данных, полученных с помощью интеллектуальной системы к фактическим;
- сопоставить значения до и после нормализации данных;
- проанализировать достоверность полученных значений с использованием интеллектуальных систем.

Средняя абсолютная ошибка в процентах $MAPE$ вычисляется согласно 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 натурных исследований;

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

n – количество испытаний.

На рисунке 4.2 приведен расчет функции $V_n = f(\Pi, N_\delta, V_c, L_\delta, T_c)$ для третьего набора данных. Для заданных исходных данных $\Pi = 213,3$ м³/смена, $N_\delta = 1$ ед, $V_c = 4042$ м³, $L_\delta = 5$ км, $T_c = 160$ дней, получено значение $V_n = 150$ м, которое не отличается от заданного значения, что говорит о корректной настройке нейросети. Результаты определения средней абсолютной ошибки при определении скорости комплексного потока приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 - Величина средней абсолютной ошибки при определении скорости комплексного потока

№ п/п	1	2	3	4	5	6	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{ y_i - \bar{y}_i }{y_i}$	MAPE, %
V_n , м, факт	300	150	250	150	250	200		
V_n , м, <i>MatLab</i>	299,9988	149,9997	249,9987	149,9998	249,9995	199,9995	0,000017	0,00028
V_n , м, <i>MatLab</i> норм	299,9997	149,9998	249,9994	149,9999	249,9997	199,9997	0,0000081	0,00013

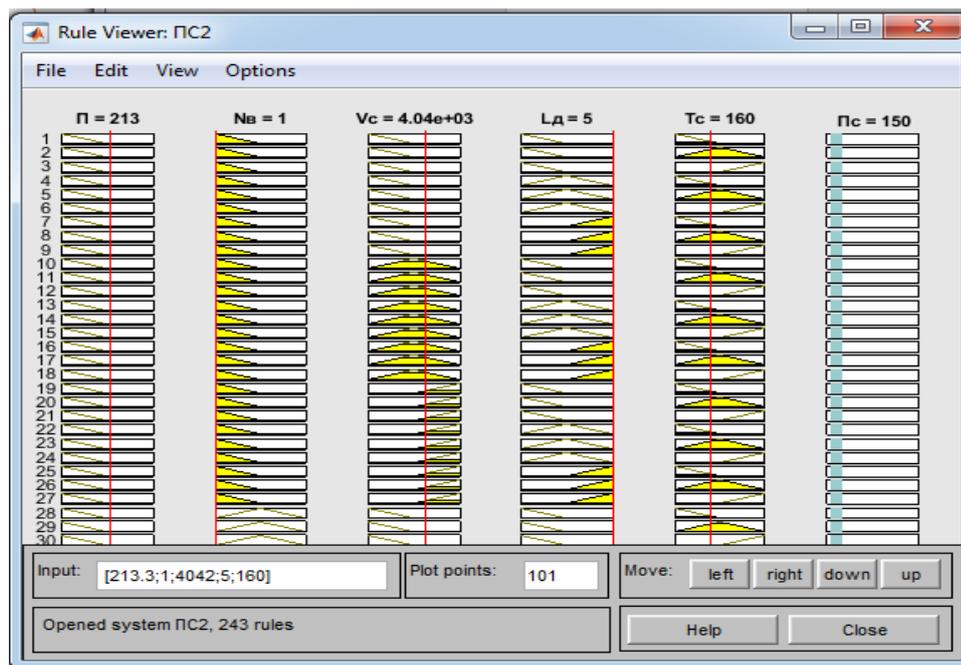


Рисунок 4.2 - Расчет функции $V_n = f(\Pi, N_b, V_c, L_d, T_c)$ по разработанной нейронной сети в процедуре *RuleViewer*

На основании проведенных проверок на адекватность можно сделать следующие выводы:

1. Точность вычислений с использованием нейронной сети при 6 наборах обучающих выборок сетей составляет 99,99972 %.
2. Величина средней абсолютной ошибки составляет 0,00028% при фактическом числовом представлении входных данных.
3. Величина средней абсолютной ошибки составляет 0,00013% при нормированном числовом представлении входных данных.
4. Точность вычислений при нормировании данных превышает точность вычислений с фактическими числовыми значениями, но абсолютно незначительно.
5. Величина средней абсолютной ошибки менее 1%, что свидетельствует о том, что обучение сети выполнено корректно.

На рисунке 4.3 приведен расчет функции $P_z = f(V_n, l_d, N_a, P_c, P_m)$ для второго набора данных. Для заданных исходных данных $V_n = 250$ м, $l_d = 15$ км,

$N_a = 50$ ед, $P_c = 10400$ руб/смена, $P_m = 3200$ руб/м³, получено значение $P_3 = 12700$ тыс. руб, которое отличается от заданного значения на величину 11,73 тыс. руб, что говорит о корректной настройке нейронной сети.

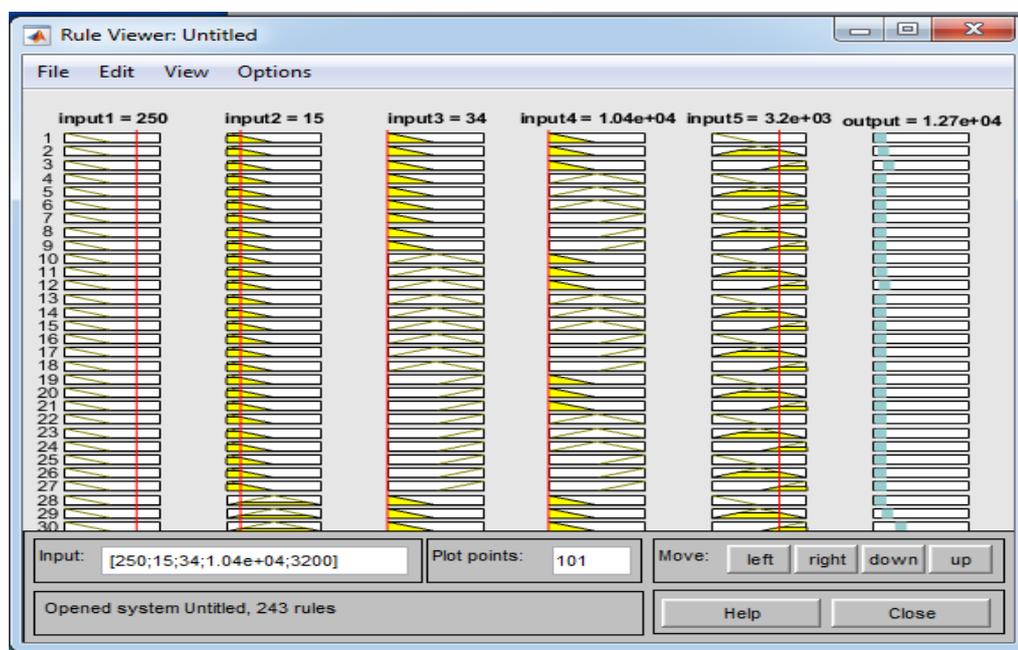


Рисунок 4.3 - Расчет функции $P_3 = f(V_n, l_0, N_a, P_c, P_m)$ по разработанной нейронной сети в процедуре *RuleViewer*

Результаты определения средней абсолютной ошибки при определении стоимости устройства дорожной одежды приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 - Величина средней абсолютной ошибки при определении стоимости устройства дорожной одежды

№ п/п	1	2	3	4	5	6	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{ y_i - \bar{y}_i }{y_i}$	MAPE, %
P_3 , тыс.руб, факт	16293,4	12936,7	14789,2	16862,82	5193,3	8925,3		
P_3 , тыс.руб, <i>MatLab</i>	16293,0	12937,0	14789,0	16863,0	5193,3	8925,3	0,0000042	0,00007
P_3 , тыс.руб, <i>MatLab</i> норм	16293,0	12937,0	14789,0	16863,0	5193,3	8925,3	0,0000042	0,00007

На основании проведенных проверок на адекватность модели можно сделать следующие выводы:

1. Точность вычислений с использованием нейронной сети при 6 наборах обучающих выборок сетей составляет 99,99993 %.
2. Величина средней абсолютной ошибки при фактическом и нормированном числовом представлении входных данных составляет 0,00007 %.
3. Точность вычислений при нормировании данных не превышает точность вычислений с фактическими числовыми значениями.
4. Обучение сети выполнено корректно.

С целью проверки проверки адекватности работы комплекса нейронных сетей эксперимент проводился с помощью имитационной модели в приложении *Simulink*. Для выполнения эксперимента в приложении требуется задать исходные данные в блоки *Constant*. На рисунке 4.4 показан расчет функции $P_3 = f(V_n f(\Pi, N_b, V_c, L_d, T_c), l_d, N_a, P_c, P_m)$ для седьмого набора данных.



Рисунок 4.4 – Расчет функции $P_3 = f(V_n f(\Pi, N_b, V_c, L_d, T_c), l_d, N_a, P_c, P_m)$

с помощью интеллектуальной системы приложения *Simulink*

программы *Matlab*

Для заданных фактических исходных данных $\Pi = 340 \text{ м}^3/\text{смена}$, $N_8=2 \text{ ед}$, $V_c = 3980 \text{ м}^3$, $L_\partial = 5 \text{ км}$, $T_c = 167 \text{ дней}$, $l_\partial = 20 \text{ км}$, $N_a = 73 \text{ ед}$, $P_c = 10400 \text{ руб/смена}$, $P_m = 3350 \text{ руб/м}^3$ получено значение $P_3 = 17220 \text{ тыс.руб}$, что отличается на величину от заданного значения на 2,8 тыс. руб, что говорит о корректной настройке интеллектуальной системы. Как правило, на данном этапе адекватность комплекса нейронных сетей подтверждается.

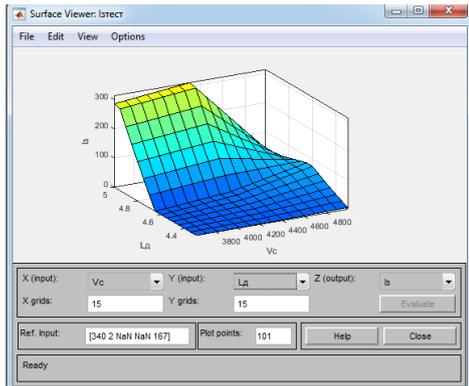
Разработанная интеллектуальная система позволяет наглядно представить основные зависимости выходных параметров от входных в форме двумерных и трехмерных графиков. Для визуализации параметров использовалась процедура *Surface Viewer* программы *Matlab*.

Трехмерная зависимость переменной скорости комплексного потока V_n от двух переменных длина дороги L_∂ и объема материала V_c $V_n = f(L_\partial; V_c)$ показана на рисунке 4.5а. Аналогично определены зависимости $V_n = f(\Pi; N_8)$, $V_n = f(N_8; V_c)$, $V_n = f(L_\partial; T_c)$, $V_n = f(T_c; \Pi)$ показаны на рисунках 4.5б-4.5д.

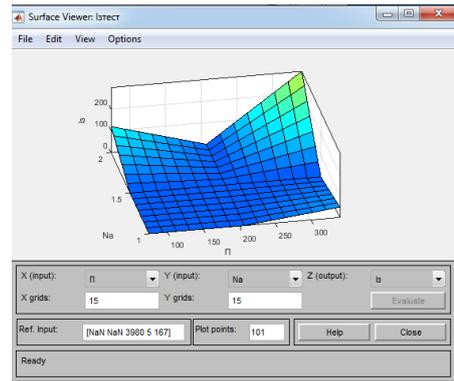
Двухмерные зависимости переменной скорости комплексного потока V_n от входных параметров $V_n = f(\Pi)$, $V_n = f(N_8)$, $V_n = f(V_c)$, $V_n = f(L_\partial)$, $V_n = f(T_c)$ представлены на рисунке 4.6.

По рассмотренному набору двумерных и трехмерных графиков можно определить рациональную скорость комплексного потока устройства дорожной одежды. Аналогично предыдущему методу были построены зависимости переменной стоимости устройства дорожной одежды от входных параметров $P_3 = f(V_n; l_\partial)$, $P_3 = f(N_a; l_\partial)$, $P_3 = (P_c; N_a)$ и представлены на рисунках 4.7, 4.8.

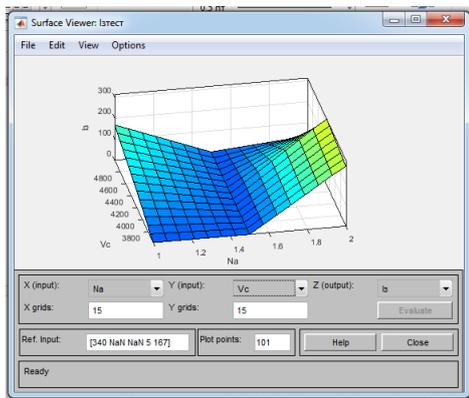
На рисунке 4.6а приведена функциональная зависимость скорости комплексного потока от производительности ведущих машин $V_n = f(\Pi)$ при фиксированных средних значениях остальных параметров. Установлено, что увеличение производительности ведущих машин на $40 \text{ м}^3/\text{смену}$, позволяет повысить скорость комплексного потока на 50 м.



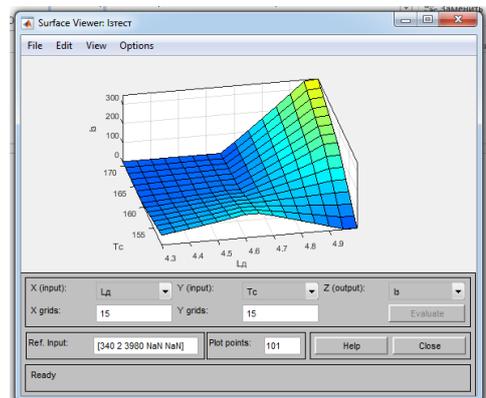
а)



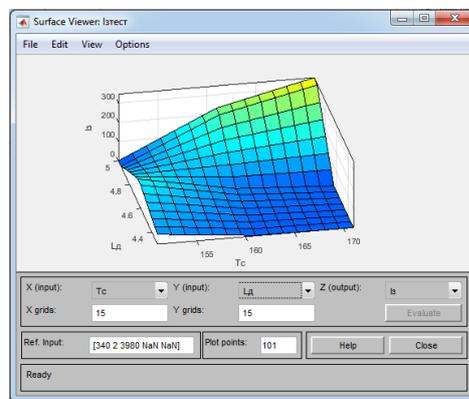
б)



в)



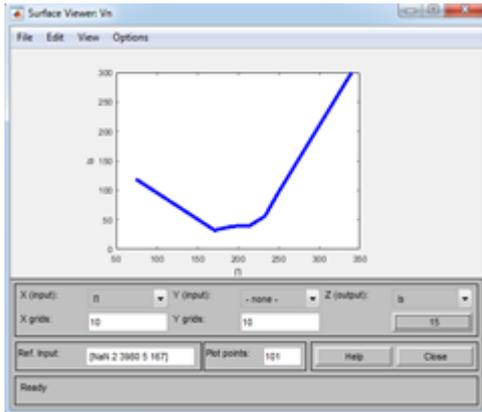
г)



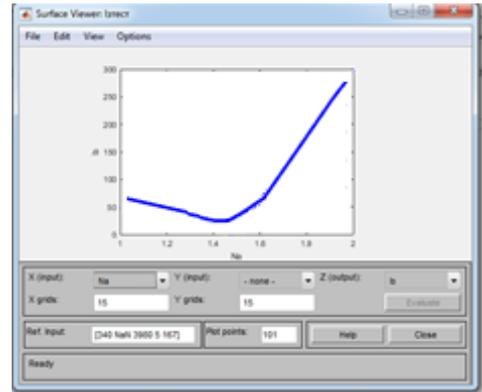
д)

а) от длины дороги и объема материала $V_n = f(L_d; V_c)$; б) от производительности ведущей машины и количества ведущих машин $V_n = f(\Pi; N_b)$; в) от количества ведущих машин и объема материала $V_n = f(N_b; V_c)$; г) от длины дороги и периода строительства $V_n = f(L_d; T_c)$; д) от периода строительства и производительности ведущей машины $V_n = f(T_c; \Pi)$

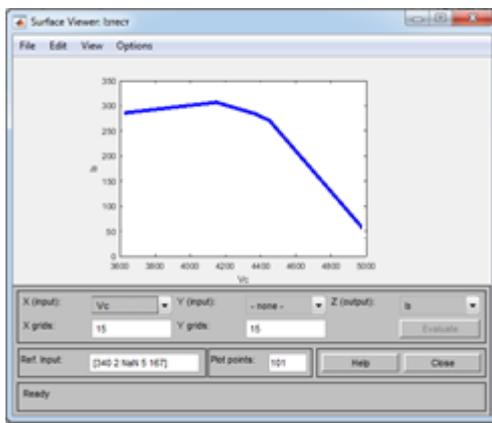
Рисунок 4.5 - Представление трехмерных зависимостей системы нечеткой модели определения скорости комплексного потока в *SurfaceViewer*



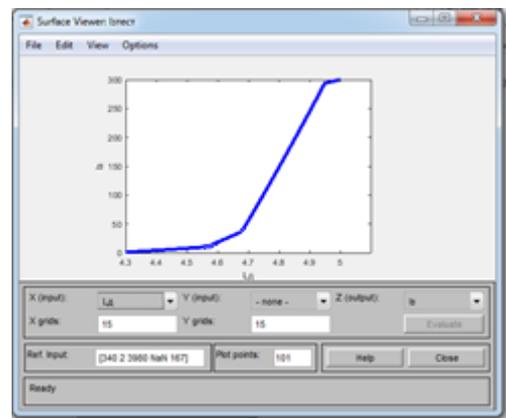
а)



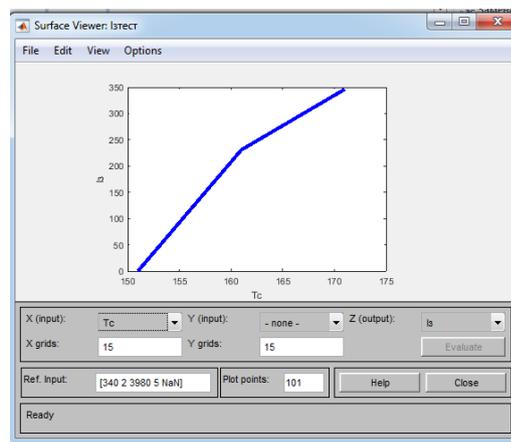
б)



в)



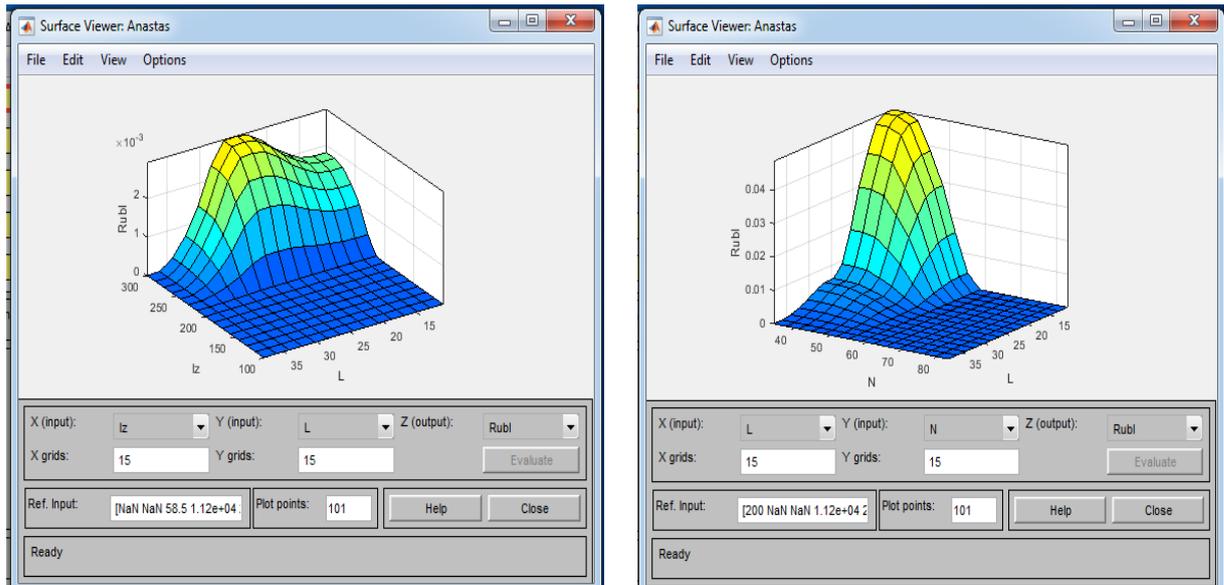
г)



д)

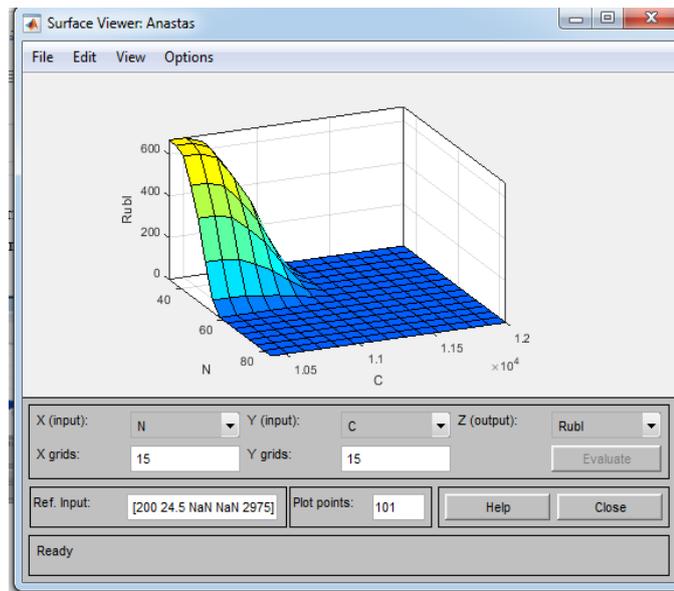
а) от производительности ведущей машины $V_n = f(\Pi)$; б) от количества ведущих машин $V_n = f(Nv)$; в) от объема материала $V_n = f(Vc)$; г) от длины дороги $V_n = f(Ld)$; д) от периода строительства $V_n = f(Tc)$

Рисунок 4.6 - Представление двухмерных зависимостей системы нечеткой модели определения скорости комплексного потока в *SurfaceViewer*



а)

б)



в)

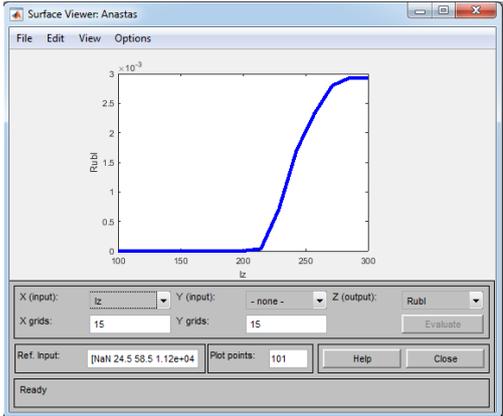
а) от скорости комплексного потока и длины доставки материалов

$P_3 = f(V_n; l_0)$; б) от количества машин и длины доставки материалов

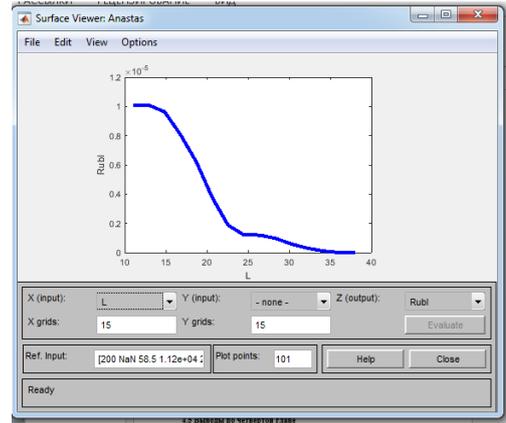
$P_3 = f(N_a; l_0)$; в) от стоимости материалов и длины доставки материалов

$P_3 = (P_c; N_a)$

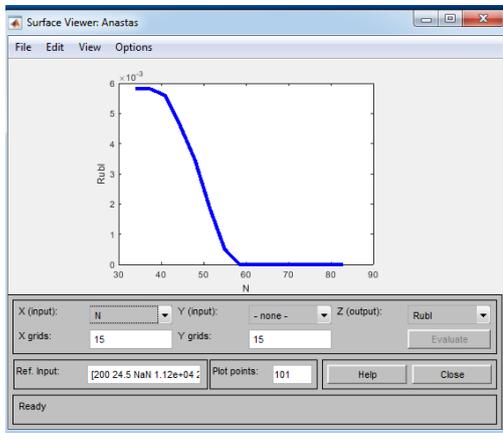
Рисунок 4.7 - Представление трехмерных зависимостей системы нечеткой модели определения стоимости устройства дорожной одежды в *SurfaceViewer*



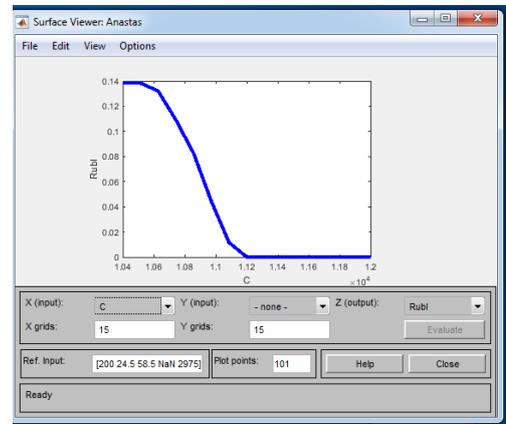
а)



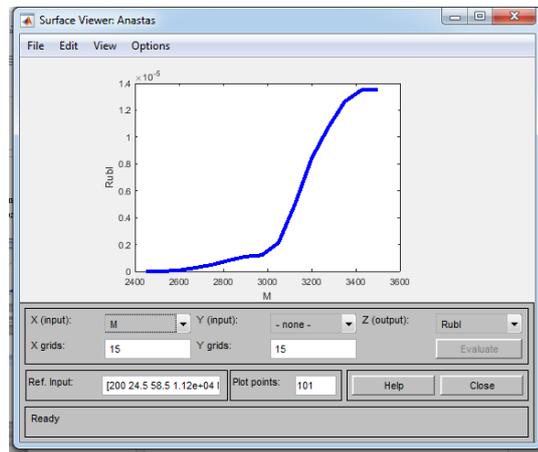
б)



в)



г)



д)

а) от скорости комплексного потока $P_3 = f(V_n)$; б) от длины доставки материалов $P_3 = f(l_d)$; в) от количества машин $P_3 = f(N_a)$; г) от стоимости материалов $P_3 = f(P_c)$; д) от стоимости машино-смены $P_3 = f(P_m)$.

Рисунок 4.8 - Представление двухмерных зависимостей системы нечеткой модели определения стоимости устройства дорожной одежды в *SurfaceViewer*

На рисунке 4.8г показана закономерность изменения стоимости устройства дорожной одежды от стоимости материалов $P_3 = f(P_M)$. Установлено влияние стоимости материалов, например, использование на 4 % более дорогостоящих или не местных материалов, приводит к увеличению стоимости устройства дорожной одежды до 15 %.

4.3 Практическое применение и анализ результатов исследования

Результаты работы могут быть применены в практике дорожного строительства:

- в целях научного обоснования и применение методики определения технологических и экономических показателей при устройстве дорожных одежд на основе разработанной интеллектуальной системы;

- в качестве программного обеспечения определения скорости комплексного потока и стоимости устройства дорожной одежды на этапе проектирования и оценки рентабельности вариантов устройства дорожных одежд, а также при оперативной оценке принимаемых решений на объекте строительства.

Для использования комбинации компьютерных данных и описания принципа работы результаты стоит представить в виде последовательности действий, тем самым разработать алгоритм для использования интеллектуальной системы в подрядных организациях.

Процесс разработки промышленных интеллектуальных систем практически для любой проблемной области включает несколько этапов:

- методологические проблемы — постановка задачи в общем виде, а также формулировка проблемы;

- извлечение знаний — получение наиболее полного из возможных представлений о предметной области и способах принятия решений в ней;

- структурирование знаний — разработка массива данных, которое отражает основные взаимосвязи между параметрами;
- определение требуемого показателя точности;
- формализация — разработка базы знаний на языке представления знаний и определения совокупностей требуемых параметров;
- выбор программного обеспечения;
- реализация — разработка программного комплекса, демонстрирующего жизнеспособность подхода в целом;
- тестирование — выявление ошибок в подходе и реализации, выработка рекомендаций по возможности использования системы в промышленности.

Следовательно, разрабатываемая методика выражается в виде технологии и алгоритма создания интеллектуальной системы определения скорости комплексного потока и стоимости устройства дорожной одежды, структурирования практических знаний, создание базы данных и настройки связей в программном комплексе *Matlab*.

Постановка задачи в общем виде предполагает определение входных параметров нейронной и представление результата работы в виде выходного параметра. Установленные параметры должны иметь структурированный по блокам вид и обязательно единичное наименование. Стоит отметить, что показатель возможно рассматривать в форме лингвистических переменных. Это является большим преимуществом интеллектуальных систем, так, например, лингвистическая переменная «скорость» в данном ключе может иметь значения «высокая», «средняя», «низкая» и так далее. Количество входных данных может включать в себя множество значений и зависит от требуемых результатов и технических возможностей исследователя.

Формально, постановка задачи записывается с учетом всех выбранных переменных в следующем виде:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n), \quad (4.3)$$

где $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ - входные переменные;

y – выходная переменная;

f – функция нечеткого вывода.

Определение точности модели, количество выборок для тестирования сети и обучения возможно одним из статистических методов. В данной работе определение минимального количества опытов выполнено методом последовательных приближений.

Как отмечалось ранее, входные и выходная переменные должны иметь определенную структуру и представлять собой массив данных. Согласно общим правилам упорядочивания элементов полученные данные представляются в виде матрицы в документе формата *.dat*. Матрица исходных данных показана на рисунке 4.9.

X_{11}	X_{12}	X_{13}	.	X_{1n}	Y_1
X_{21}	X_{22}	X_{23}	.	X_{2n}	Y_2
X_{31}	X_{32}	X_{33}	.	X_{3n}	Y_3
.
X_{j1}	X_{j2}	X_{j3}	.	X_{jn}	Y_j

Рисунок 4.9 - Матрица исходных данных в документе формата *.dat*

Одним из важнейших этапов является выбор программного обеспечения. При выборе интеллектуальной системы и нейросетей, в частности, стоит обращать внимание на физический смысл задачи и принадлежность используемых данных. В исследовании принято использовать алгоритм типа *Sugeno*, что подразумевает использование нечеткого вывода типа *ANFIS*. В программном комплексе *Matlab* этап проектирования структурных связей и выбор количества нейронов предусмотрен разработчиком, связи с этим не требуется проведения дополнительных настроек.

Инструментом в данном случае является пакет приложения *Fuzzy Logic Designer*, регулирование логических правил для корректной работы выполняется в процедуре *Rule Editor*.

Настройка нейросети происходит посредством использования пакета приложений *Neuro-Fuzzy Designer*. Он включает в себя следующие этапы:

1. Загрузка данных в документе формата *.dat*
2. Определение ключевых параметров
3. Генерация сети
4. Настройка нейронной сети

После загрузки данных требуется редакторе переменных функций *Membership Function Edition* обозначить данные и указать их интервал значений от *min* к *max*.

Проверка адекватности настроенной нейронной сети реализуется в приложении *Rule Viewer*. Тестирование проводится поэтапно, изначально в качестве данных используются обучающие выборки, далее тестовые. Большой разницы между выборками нет, весь набор данных подразумевает деление на две части, но есть одно важное условие – обучающая выборка не должна включать тестовую выборку. Как результат проверки на адекватность производится оценка отклонений между выходными сигналами и отобранными выходными значениями. По результатам тестирования существует возможность вносить корректировки.

Для объединения разработанных нейронных сетей в комплекс используется приложение *Simulink*. Работа в нем представляет последовательную передачу данных на мультиплексоры, которые в свою очередь поэтапно с помощью процедуры нечеткого вывода передают параметры в окно для выходных данных.

Интерфейс пакетов прикладных программ *Matlab*, используемый в исследованиях показан в Приложении Г.

Анализ результатов исследования predetermined разработку алгоритма проектирования интеллектуальной системы. Принятый алгоритм включает в себя следующие этапы.

1. Создание нейронной сети для определения скорости комплексного потока

1.1 Выявление и обоснование принятого технологического параметра – скорость комплексного потока

1.2 Подбор и обоснование входных переменных согласно проектам организации строительства и технологической документации. Выбор основных исходных данных: производительность и количество ведущих машин, объём проводимых работ, длина дороги, количество рабочих смен.

1.3 Подготовка обучающих и тестовых выборок, нормирование данных.

1.4 Настройка нейронной сети.

1.5 Получение выходного параметра – скорость комплексного потока.

2. Создание нейронной сети для определения стоимости устройства дорожной одежды.

2.1 Выявление и обоснование принятого экономического показателя – стоимости устройства дорожной одежды.

2.2 Подбор и обоснование входных переменных согласно проектам организации строительства и технологической документации. Выбор основных исходных данных: скорость комплексного потока, расстояние доставки материалов, численность парка машин, стоимость машино-смены, стоимость материалов.

2.3 Подготовка обучающих и тестовых выборок, нормирование данных.

2.4 Настройка нейронной сети.

2.5 Получение выходного параметра - стоимость устройства дорожной одежды.

4.4 Определение экономической эффективности от внедрения результатов исследования

В рамках решения поставленной задачи выходным итоговым параметром определена стоимость устройства дорожной одежды. Сметная стоимость дорожной одежды напрямую зависит от выбора и определения правильной технологии работ, а также подбора наиболее рационального комплекта машин, работающих в составе комплексного потока. Оба эти этапа взаимосвязаны и влияют один на другой. Исследования в области промышленности показывают, что рост эффективности строительного производства на 1% за счет правильной организации работ на этапе разработки проектов требует в восемь раз меньше капитальных вложений, чем при повышении на тот же уровень механизированности рабочего состава. Например, в промышленности каждый час, затраченный на подготовку производства, экономит свыше 20 часов от проведения работ на самом объекте. Погрешности организации работ и подготовки к строительству являются одной из основных причин снижения экономических показателей и переноса сроков ввода объекта в эксплуатацию. Важность исследований в этой области определяется тем, что наиболее ответственные технологические, организационные и экономические моменты должны решаться в рамках подготовки производства, для увеличения эффективности и сокращения затрат. Определение скорости комплексного потока относится к мероприятиям, которые связаны с рациональным использованием основных элементов производства.

В рамках данной работы предполагается что экономический эффект достигается путем сокращения продолжительности строительства за счет определения рациональной скорости комплексного потока. На примере проекта организации и производства работ «Строительство автомобильной лесовозной дороги на территории Алапаевского района II-л категории на базе ООО «Лестех»» определена рациональная скорость комплексного потока и

стоимость устройства 1 м² дорожной одежды с помощью интеллектуальной системы.

Согласно проекту производства работ, скорость комплексного потока при устройстве дорожной одежды составляла 275 м. Определение рациональной скорости комплексного потока в работе принято производить путем сравнения стоимости строительства 1 м² дорожной одежды. За рациональную принимаем скорость комплексного потока, при которой стоимость строительства 1 м² дорожной одежды будет наименьшей. При расчете с помощью интеллектуальной системы скорость комплексного потока путем варьирования входных данных составила 350 м.

Согласно вышесказанному, за счет варьирования входными данными, которые влияют на скорость комплексного потока возможно уменьшение срока устройства дорожной одежды без потери качественных характеристик на данном участке дороги. Целесообразно выразить экономический эффект от сокращения сроков строительства согласно методике Д.А. Кузнецова [53].

1. Экономический эффект от сокращения сроков строительства у заказчика:

$$\mathcal{E}_3 = E_n \cdot C \cdot \left(1 - \frac{T_n}{T_\phi} \right) = 0,14 \cdot 35599,26 \cdot \left(1 - \frac{9}{11} \right) = 996,2 \text{ тыс. руб} \quad (4.4)$$

где E_n – нормативный коэффициент экономической эффективности (при сравнении вариантов автомобильных дорог с твердым покрытием нормативный коэффициент сравнительной эффективности установлен на уровне 0,14);

C – сметная стоимость устройства дорожной одежды, тыс. руб;

T_n, T_ϕ – прогнозируемый и фактический сроки строительства соответственно, дней.

2. Экономический эффект от сокращения сроков строительства у подрядчика:

$$\mathcal{E}_n = 0,6 \cdot NP \cdot \left(1 - \frac{T_n}{T_\phi} \right) = 0,6 \cdot 5339,9 \cdot \left(1 - \frac{9}{11} \right) = 582,5 \text{ тыс. руб} \quad (4.5)$$

где NP – накладные расходы в сметной стоимости строительства, тыс. руб;

T_n, T_f – прогнозируемый и фактический сроки строительства соответственно, дней.

3. Экономический эффект от сокращения сроков строительства и внедрения планируемых мероприятий по снижению себестоимости работ:

$$\mathcal{E}_o = \mathcal{E}_z + \mathcal{E}_n + \Delta C = 996,2 + 582,5 + 569,6 = 2148,3 \text{ тыс. руб} \quad (4.6)$$

где ΔC - снижение себестоимости работ по разрабатываемым мероприятиям, тыс.руб;

\mathcal{E}_z - экономический эффект от сокращения сроков строительства у заказчика, тыс. руб;

\mathcal{E}_n - экономический эффект от сокращения сроков строительства у подрядчика, тыс. руб.

4. Снижение стоимости работ по разрабатываемым мероприятиям рассчитывается по формуле:

$$\Delta C = \frac{P \cdot C}{1000} = \frac{16 \cdot 35599,26}{1000} = 569,6 \text{ тыс. руб} \quad (4.7)$$

где P – процент планируемого снижения сметной стоимости строительства по разрабатываемым мероприятиям:

$$P = \frac{C - C_{инт}}{C} \cdot 100 \% = \frac{35599,26 - 29850,8}{35599,26} \cdot 100 \% = 16 \% \quad (4.8)$$

где C – сметная стоимость устройства дорожной одежды, тыс. руб;

$C_{инт}$ – стоимость устройства дорожной одежды, полученная с помощью интеллектуальной системы, тыс. руб.

5. Разницу между фактической сметной стоимостью и экономическим эффектом от сокращения сроков строительства можно выразить:

$$\mathcal{E}_{эф} = C - \mathcal{E}_o = 35599,26 - 2148,3 = 33392,1 \text{ тыс. руб} \quad (4.9)$$

Согласно проектно-сметной документации стоимость устройства дорожной одежды в текущих ценах на 1 квартал 2023 года – 35599,26 тыс. руб. Экономический эффект от определения рациональной скорости комплексного потока с помощью предлагаемой интеллектуальной системы составит 2148,3 тыс. руб. (6 % от сметной стоимости).

4.5 Выводы по четвертой главе

1. На основании критериев точности моделей временных рядов определена средняя абсолютная ошибка *MARE*. Данный способ позволил демонстрировать в процентном отношении величину ошибки данных, полученных с помощью интеллектуальной системы к фактическим. Проверка адекватности настройки сети по тестовым и обучающим выборкам показала, что интеллектуальная система работает корректно, ошибка вычислений составляет менее 1%.

2. При сравнении результатов вычислений, на основе нормированных и фактических данных, было обнаружено, что процент ошибки при нормированных данных меньше, но не значительно. Важно отметить, что нормирование данных увеличивает скорость обработки и вывода результата, что все же позволяет говорить о необходимости данной процедуры.

3. На основе интеллектуальной системы получены двух- и трехмерные зависимости переменных. Данная процедура позволяет наглядно демонстрировать влияние выбранных параметров на выходную величину. В частности, увеличение производительности ведущих машин на 40 м³/смену, позволяет повысить скорость комплексного потока на 50 м, а использование на 4 % более дорогостоящих или не местных материалов, приводит к увеличению стоимости устройства дорожной одежды до 15 %.

4. Разработана и описана методика проектирования нейронных сетей и интеллектуальной системы для определения скорости комплексного потока и стоимости устройства дорожной одежды, которая позволяет предварительно оценить скорость комплексного потока, назначить наилучший вариант организации работ на захватке (выбор и количество ведущих машин, объём проводимых работ, период строительства и т.п.), спрогнозировать стоимость устройства дорожной одежды на этапе формирования проектно-сметной документации, а также при изменении условий строительства.

5. Разработан алгоритм создания интеллектуальной системы определения скорости комплексного потока и стоимости устройства дорожной одежды для использования данных материалов при решении типовых задач.

6. На примере реального проекта организации строительства и производства работ автомобильной лесовозной дороги в Свердловской области в рамках разработанной интеллектуальной системы экономический эффект составил 6 % от сметной стоимости.

7. На разработанное программное обеспечение получены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ: № 2021616927 от 29.04.2021 «Интеллектуальная система для определения длины захватки при строительстве автомобильной дороги *RaschetZahvatki*», № 2020663898 от 03.11.2020 «Нейронная сеть для оценки технологических решений дорожных покрытий», представленные в Приложении Д.

8. Результаты исследований и практические рекомендации внедрены в производство на предприятии ООО «КАПИТАЛСТРОЙ» и в учебный процесс УГЛТУ на кафедре транспорта и дорожного строительства Инженерно-технического института и кафедре интеллектуальных систем Социально-экономического института, что подтверждается соответствующими актами, представленными в Приложении Е.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Анализ технологий устройства дорожных одежд автомобильных дорог показал практически отсутствие использования методов, учитывающих условия неопределенности в параметрах и влияющих факторах, что делает эти методы недостаточно корректными и точными. Поэтому их дальнейшее совершенствование будет наиболее эффективным на базе интеллектуальных систем.

2. Впервые предложена структурная схема модели определения одного из важнейших технологических параметров - скорости комплексного потока и структурная схема модели определения стоимости устройства дорожной одежды, учитывающая неопределенности влияющих факторов и параметров строительного процесса.

3. Разработана интеллектуальная система определения рациональной скорости комплексного потока и стоимости устройства дорожной одежды на основе комплекса нейро-нечетких сетей с реализацией модели в среде *Matlab+Simulink* в зависимости от наиболее влияющих параметров. Таким образом реализована технология модельно-ориентированного проектирования технологии устройства дорожной одежды автомобильных лесовозных дорог.

4. Выявлены функциональные зависимости скорости комплексного потока от каждого входного параметра $V_n = f(\Pi)$, $V_n = f(N_e)$, $V_n = f(V_c)$, $V_n = f(L_d)$, $V_n = f(T_c)$. Аналогично выявлены зависимости стоимости устройства дорожной одежды $P_3 = f(V_n)$, $P_3 = f(l_d)$, $P_3 = f(N_a)$, $P_3 = f(P_c)$, $P_3 = f(P_m)$. В частности, увеличение производительности ведущих машин на 40 м³/смену, позволяет повысить скорость комплексного потока на 50 м, а использование на 4 % более дорогостоящих или не местных материалов, приводит к увеличению стоимости устройства дорожной одежды до 15 %.

5. Экономический эффект от внедрения результатов исследований, рассчитанный на примере реального проекта автомобильной лесовозной дороги в Свердловской области, показал возможность снижения стоимости устройства дорожной одежды не менее 6 % от сметной.

6. Использование интеллектуальной системы определения скорости комплексного потока и стоимости устройства дорожной одежды позволит решать вопросы при тендерных процедурах, в части оценки возможностей предприятия, а также при изменении условий строительства (климатические факторы, количество требуемой дорожно-строительной техники и т.п.) оперативно принимать решения по дальнейшему строительству автомобильной лесовозной дороги.

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аверкин, А. Н. Применение моделей нечеткого иерархического оценивания в системе гибридных моделей краткосрочного прогнозирования / А. Н. Аверкин, С. А. Ярушев, В. М. Савинова // Системный анализ в экономике - 2020: Сборник трудов VI Международной научно-практической конференции-биеннале, Москва, 09–11 декабря 2020 года / Под общей редакцией Г.Б. Клейнера, С.Е. Щепетовой. – Москва: ООО Издательский дом "Наука", 2021. – С. 398-401.
2. Алтунин, А. Е. Технологические расчеты при управлении процессами нефтегазодобычи в условиях неопределенности / А. Е. Алтунин, М. В. Семухин // Сборник докладов международной конференции по мягким вычислениям. - СПб: изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». - 2003. - Т2. - С. 74-77.
3. Анастас, Е. С. Перспективы применения интеллектуальных систем в дорожно-строительной отрасли / Е. С. Анастас, С. И. Булдаков // Научное творчество молодежи - лесному комплексу России: материалы XVIII Всероссийской (национальной) научно-технической конференции, Екатеринбург, 04–15 апреля 2022 года. – Екатеринбург, 2022. – С. 373-376.
4. Анастас, Е. С. Требования к технологии устройства дорожных одежд лесовозных дорог / Е. С. Анастас, С. И. Булдаков // Эффективный ответ на современные вызовы с учетом взаимодействия человека и природы, человека и технологий: социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса: Материалы XIV международной научно-технической конференции, Екатеринбург, 08–09 февраля 2023 года. – Екатеринбург, 2023. – С. 287-291.
5. Андреева, Е. В. Технология и организация работ по строительству дорожной одежды автомобильных дорог: учебное пособие / Е. В. Андреева, М. В. Исаенко. - Омск: СибАДИ, 2021. - 294 с.

6. Афанасьев, В. А. Поточная организация работ в строительстве / В. А. Афанасьев, А. В. Афанасьев. - Санкт-Петербург: СПбГАСУ. - 2000. - с. 149.
7. Афиногенов, О. П. Конструирование и расчет дорожных одежд: учебное пособие / О.П. Афиногенов, С.В. Ефименко, В. Н. Ефименко; под ред. С.В. Ефименко. – 2-е изд., доп. и перераб. – Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2020 – 444 с.
8. Бабаскин, Ю. Г. Технология дорожного строительства: Учеб. пособие по дисциплинам «Технология дорожного строительства» для студ. спец. 1-36.1.01 «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование» / Ю.Г. Бабаскин, И. Н. Вербилло. - Мн.: БНТУ, 2003 - 202 с.
9. Баранов, А. Н. Теоретические основы проектирования, строительства и эксплуатации лесовозных дорог: учебное пособие для студентов, обучающихся по направлению 6563300 Технология лесозаготовительных деревообрабатывающих производств специальности 250401 Лесоинженерное дело очной и заочной формы обучения / А. Н. Баранов – Красноярск: СибГТУ, 2012. – 169 с.
10. Баркалов, С. А. Методические указания к курсовому проектированию по дисциплинам «Спецкурс по организации строительного производства» и «Организация строительного производства»: метод. указания / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост.: С. А. Баркалов, Л. В. Шевченко. - Воронеж: Изд-во ВГТУ. - 2022 - 31 с.
11. Бездельникова, О. А. Расчет объемов дорожной одежды при ремонте автомобильных дорог в IndorCAD/Road / О. А. Бездельникова, Л. В. Шепелева // Вестник МГСУ. - 2022. - Т. 17, № 5. - С. 655 - 662.
12. Болдырев, В. В. Анализ эффективности алгоритмов нечеткого вывода sugeno и mamdani в задачах оптимизации автоматизированных систем слежения / В. В. Болдырев // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: Материалы IV Международной научно-практической

конференции, Комсомольск-на-Амуре, 16–26 февраля 2021 года / Редколлегия: С.И. Сухоруков (отв. ред.), А.С. Гудим, Н.Н. Любушкина. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет. - 2021. - С. 164-167.

13. Борисов, А. Н. Принятие решений на основе нечетких моделей: Примеры использования / А.Н. Борисов, О.А. Крумберг, И.П. Федоров. - Рига: Зинатне. - 1990. - 184 с.

14. Боровоев, А.О. Повышение эффективности лесовозных автомобильных дорог / А. О. Боровоев, И. А. Высоцкая, А. В. Скрыпников, П. В. Тихомиров, В. В. Никитин, М. В. Мацнев, Д. В. Болтнев // Современные наукоемкие технологии. - 2021. - № 4. - С. 87-92.

15. Боровский, А. В. Классификация коротких технических текстов с применением системы нечеткого вывода Сугено / А. В. Боровский, Е. Е. Раковская, А. Л. Бисикало // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2021. – № 1. – С. 16-27.

16. Булдаков, С. И. Основы эксплуатации и ремонта автомобильных дорог: учебное пособие / С. И. Булдаков, Ю. Д. Силуков, М. Д. Малиновских, Д. Н. Чегаев. — Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. — 236 с.

17. Булдаков, С. И. Особенности проектирования автомобильных дорог: учебное пособие / С. И. Булдаков. - 2-е изд., перераб. и доп. - Екатеринбург: УГЛТУ, 2016. - 271 с.

18. Булдаков, С. И. Последовательность выполнения проекта по строительству автомобильных дорог: учебное пособие / С. И. Булдаков. - Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2017. – 177 с.

19. 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.

20. Булдаков, С. И. Транспорт леса. Т. 1. Автомобильные дороги. Учебное пособие / С. И. Булдаков, М. В. Савсюк – Екатеринбург: УГЛУ, 2016.
21. Булдаков, С. И. Проектирование основных элементов автомобильной дороги: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности "Автомобильные дороги и аэродромы" направления подготовки дипломированных специалистов "Транспортное строительство" / С. И. Булдаков – Екатеринбург: УГЛУ, 2008. – 310 с.
22. Бургонутдинов, А. М. Методы и способы улучшения долговечности дорожных конструкций автомобильных дорог / А. М. Бургонутдинов, С. В. Манн, Р. Г. Цыплёнков, Ю. В. Шилова // Перспективы совершенствования технической подготовки военнослужащих и сотрудников войск национальной гвардии Российской Федерации [Электронный ресурс]: межвуз. сб. науч.-практ. материалов, [г. Пермь], 4 марта 2022 г. / Федер. служба войск нац. гвардии Рос. Федерации, Перм. воен. ин-т войск нац. гвардии Рос. Федерации, Каф. техн. подготовки. - Пермь: [Тип. ПВИ войск нац. гвардии]. - 2022. - С. 151-163.
23. Бухтояров, А. В. Оптимизация проектирования дорожных одежд нежесткого типа на основе местных дорожно-строительных материалов: диссертация ... кандидата технических наук: 05.23.11 / А. В. Бухтояров; [Место защиты: ВГАСА. – Воронеж, 2000. – 175 с.
24. Васильев, А. П. Справочная энциклопедия дорожника. Т.1. Строительство и реконструкция автомобильных дорог / под ред. А. П. Васильева. - Москва: Инфрмавтодор. - 2005. - 1701 с.
25. Веренько, В. А. В 31 Надежность дорожных одежд: Пособие / В. А. Веренько. - Мн.: БГПА. - 2002. - 120 с.
26. Веренько, В. А. Конструирование и расчет дорожной одежды повышенной надежности и долговечности: пособие по выполнению курсового проекта № 3 «Проект дорожной одежды нежесткого типа (деталь проекта)»

для студентов специальности 1-70 03 01 «Автомобильные дороги» / В. А. Веренько - Минск: БНТУ. – 2012. - 78 с.

27. Вотинова, Е.Б. Основы технологической подготовки производства: учеб. пособие / Е. Б. Вотинова, М. П. Шалимов, А. М. Фивейский. - Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. - 2017. - 168 с.

28. Вырко, Н. П. Сухопутный транспорт леса: учебник для студентов вузов / Н. П. Вырко. – Минск: Высш. шк., 1987. – 437 с.

29. Галкин, А. П. Применение аппарата нечеткого вывода и нечеткой логики в системах защиты информации / А. П. Галкин, А. В. Дерябин, А. М. Мохаммед, Е. Г. Сулова // Известия Института инженерной физики. – 2009. – № 2(12). – С. 13-15.

30. Гарус, И. А. Анализ условий эксплуатации и обоснование транспортных схем в условиях строительства лесовозных автомобильных дорог / И. А. Гарус, П. М. Огар, Е. М. Рунова // Системы. Методы. Технологии. – 2020. – № 3(47). – С. 81-87.

31. Гасилов, В. В. Определение стоимости проектно-изыскательских работ на капитальный ремонт и ремонт автомобильных дорог и сооружений на них/ В. В. Гасилов, М. А. Шибеева, А. Е. Макаров // Серия Строит, и арх.: Известия Тульского гос ун-та/ Тул. гос. ун-т, Вып. 9. – Тула. - 2006. С. 105-112.

32. Гиясова, И. В. Экономическое обоснование решений при проектировании автомобильных дорог: методические указания / сост.: И. В. Гиясова, Е. В. Аленичева. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2006. – 32 с.

33. Глушань, В. М. Нечёткие модели и методы многокритериального выбора в интеллектуальных системах поддержки принятия решений / В. М. Глушань, В. П. Карелин, О. Л. Кузьменко // Известия ЮФУ. Технические науки. - 2009. - № 4 (93). - С. 106-113.

34. Гончарова, А. Б. Постановка предварительного медицинского диагноза на основе теории нечетких множеств с использованием меры Сугено / А. Б. Гончарова // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная

математика. Информатика. Процессы управления. – 2019. – Т. 15, № 4. – С. 529-543.

35. ГОСТ Р 59120 - 2021 Дорожная одежда. Общие требования. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: https://euro-test.ru/Pub.Lib/Normativ_docs/GOSTR59120-21.pdf.

36. Государственный доклад «О состоянии окружающей среды на территории Свердловской области в 2021 году», утвержден распоряжением Правительства Свердловской области от 2 сентября 2022 г. № 498-ПП. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/406221868>

37. Григорьева, Д. Р. Основы нечеткой логики: Учебно-методическое пособие к практическим занятиям и лабораторным работам / Д. Р. Григорьева, Г. А. Гареева, Р. Р. Басыров - Набережные Челны: Изд-во НЧИ КФУ, 2018 - 42 с.

38. Громская, Л. Я. Автомобильные дороги лесозаготовительных предприятий: Структура и методика размещения / Л. Я. Громская, Н. А. Тюрин - Saarbrucken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012. – 184 с.

39. Громская, Л. Я. Современное состояние моделирования и оптимизации лесных дорог / Л. Я. Громская, М. В. Симоненков // Известия вузов. Лесной журнал. – 2016. – №5 (353). – [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennoe-sostoyanie-modelirovaniya-i-optimizatsii-lesnyh-dorog>.

40. Демидов, Д. В. Применение номограмм для определения количества ведущих землеройно-транспортных машин и длины захватки для строительства лесовозных автомобильных дорог / Д. В. Демидов // Известия вузов: Лесной журнал. – №3. – 2005. – С. 72 – 77.

41. Демидов, Д. В. Анализ функции удельной себестоимости при обосновании ведущих машин для производства земляных работ / Д. В. Демидов // В сб.: Проблемы проектирования, строительства и эксплуатации автомобильных дорог. – Пермь: Пермск. гос. техн. ун-т. - 2002. – С. 52 – 55.

42. Дидковская, Л. М. Реконструкция автомобильных дорог: проектные работы: учебное пособие / Л. М. Дидковская, С. И. Булдаков - Екатеринбург: УГЛТУ, 2009. – 141 с.

43. Дидковская, Л. М. Реконструкция автомобильных дорог: предпроектные работы: учебное пособие / Л. М. Дидковская, С. И. Булдаков – Екатеринбург: УГЛТУ, 2009. – 117 с.

44. Жалко, М. Е. Разработка методов повышения транспортно-эксплуатационных показателей лесовозных автомобильных дорог, работающих в сложных природно-климатических условиях/ М. Е. Жалко, А. М. Бургонутдинов, О. Н. Бурмистрова, С. В. Ченушкина, В. В. Данилов //Деревообрабатывающая промышленность. - 2022. - № 1. С. 10-17.

45. Замятин, Н. В. Нечеткая логика и нейронные сети: учеб. пособие / Н.В. Замятин - Томский. гос. ун-т АСУ и радиоэлектроники. - Томск: Изд-во. Томск. гос. ун-та АСУ и радиоэлектроники, 2014 – 203 с. - гос. ун-та, 2010 – 96 с.

46. Калгин, Ю. И. Технология и организация строительства автомобильных дорог. Раздел «Строительство дорожных одежд»: учеб.-метод. Пособие / Ю. И. Каглин [и др.]; Воронеж. гос. арх.-строит. ун-т. – Воронеж, 2011.- 90 с.

47. Кондрашова, Е. В. Оптимизация проектных решений при вариантном проектировании лесовозных автомобильных дорог и организации движения на них / Е. В. Кондрашова // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. – 2009. – № 3. – С. 94-99.

48. Король, С. А. Совершенствование транспортно-эксплуатационных показателей лесных автомобильных дорог Республики Коми: диссертация

... кандидата технических наук: 05.21.01 / С. А. Король; [Место защиты: Магнитогорский гос. техн. ун-т]. - Ухта, 2012. - 215 с.

49. Корочкин, А. В. Конструирование дорожных одежд нежесткого типа: учеб. пособие / А. В. Корочкин, А. В. Косцов. – М.: МАДИ, 2018. – 80 с.

50. Кошелев, Б. А. Строительство дорог часть 1. Земляное полотно: учебно-методическое пособие / Б. А. Кошелев, И. И. Шомин, А. Ю. Шаров - Екатеринбург: УГЛТУ, 2015. – 54 с.

51. Кручинин, И. Н. Транспортная инфраструктура лесов: учебное пособие / И. Н. Кручинин – Екатеринбург: УГЛТУ, 2022. – 134 с.

52. Кручинин, И. Н. Повышение качества оснований лесовозных автомобильных дорог нежесткого типа из щебеночно-песчаных смесей / И. Н. Кручинин, В. А. Ращектаев // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. – 2012. – Т. 3. – С. 237-240.

53. Кузнецов, Д. А. Организация строительства автомобильной дороги с подсчетом потребности ресурсов: методические указания к выполнению курсовой работы / сост.: Д. А. Кузнецов. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2016. – 28 с.

54. Куликова, И. В. Применение нечеткого регулятора типа Такаги-Сугено-Канга нулевого порядка в системе автоматического управления движением комбайна / И. В. Куликова // Мехатроника, автоматика и робототехника. – 2022. – № 9. – С. 127-129.

55. Курейчик, В. М. Особенности построения систем поддержки принятия решений / В. М. Курейчик // Известия ЮФУ. Технические науки. - 2012. - № 7 (132). - С. 92-98.

56. Курьянов, В. К. Автоматизированная обработка результатов полевых измерений при оценке геометрических параметров лесовозных автомобильных дорог. Депонированная рукопись №182-В2005 08.02.2005.

57. Курьянов, В. К. Математическая обработка результатов полевых измерений при нивелировании для оценки транспортно-эксплуатационных качеств лесовозных автомобильных дорог. Депонированная рукопись №248-В2005 21.02.2005.

58. Левашов, Г. М. Автоматизированное проектирование транспортных сооружений: проектирование дорожных одежд. Лабораторный практикум: учебное пособие / Г. М. Левашов [и др.]. - Омск: СибАДИ, 2019. - 79 с.

59. Леконцева, Д. Д. Применение BIM-технологии в транспортном строительстве / Д. Д. Леконцева // Современные направления в проектировании, строительстве, ремонте и содержании транспортных сооружений: матер. II Междунар. студ. конф. Секция 1: Современные направления в проектировании и строительстве транспортных сооружений. – Минск: БНТУ. - 2018. – С. 35-38.

60. Леоненков, А. В. Нечеткое моделирование в среде *Matlab* и *fuzzi-TECH* / А. В. Леоненков. - СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 719 с.

61. Лесохозяйственный регламент Алапаевского лесничества Свердловской области с 2019 по 2028 год, утвержденный приказом Департамента лесного хозяйства Свердловской области от 22.11.2018 № 1175. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://mprso.midural.ru/article/show/id/10187>.

62. Лесной кодекс Российской Федерации» от 04.12.2006 N 200-ФЗ (ред. от 02.07.2021) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.09.2021) [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64299/.

63. Леонович, И. И. Состояние транспортных путей и себестоимость вывозки древесины / И. И. Леонович, Н. П. Вырко, М. Н. Демидко // Труды БГТУ. №2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. – 2014. – № 2(166). – С. 40-41.

64. Лобанов, Ю. В. Методы и модели управления транспортно-эксплуатационными качествами лесовозных автомобильных дорог: диссертация

... кандидата технических наук: 05.21.01 / Ю. В. Лобанов; [Место защиты: Воронеж. гос. лесотехн. акад.]. – Воронеж. - 2010. - 199 с.

65. Мануковский, А. Ю. Влияние переувлажнения насыпи земляного полотна на прочностные характеристики автомобильной дороги / А. Ю. Мануковский, А. В. Рубанов, Н. В. Недовесов, А. Ю. Романцов // Арктика: инновационные технологии, кадры, туризм. – 2020. – С. 164-169.

66. Мануковский, А. Ю. Целесообразность разработки программного продукта для подготовки проектов организации строительства лесовозных дорог в контексте BIM-технологий / А. Ю. Мануковский, И. В. Ефремов // Современные машины, оборудование и IT-решения лесопромышленного комплекса: теория и практика. - 2021. – С. 86-92.

67. Мелихов, А. Н Ситуационные соответствующие системы с нечеткой логикой /А. Н. Мелихов, Л. С. Берштейн, С. Я. Коровин / М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1992. – 272 с.

68. Михайлин, Р. Г. Дальневосточный опыт проектирования и строительства высокой армогрунтовой конструкции / С. А. Кудрявцев, Ю. Б. Берестянный, Р. Г Михайлин [и др.] // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2011. – Т.7. -№1. – С 95-101.

69. Мохамед, А. Х. Оптимизация организации лесного дорожного строительства / А. Х. Мохамед, Н. А. Тюрин // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2019. – Т. 227. – С. 199–208.

70. Мохамед, А. Х. Рациональный алгоритм распределения земляных масс в лесном дорожном строительстве / А. Х. Мохамед, Н. А. Тюрин // Resources and Technology. – 2019. – Т. 2. – № 16. – С. 131–140.

71. Наурызбаева, М. А. Автоматическая классификация платежей в системе контроля финансовых потоков домашнего хозяйства с использованием нечеткого вывода / М. А. Наурызбаева, Г. А. Попов, А. Р. Мамлеева // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2014. – № 10. – С. 47-50.

72. 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>.

73. Никитин, В. В. Численные и графоаналитические методы оптимизации транспортных сетей с применением информационных систем / В. В. Никитин, А. В. Скрыпников, А. А. Берестовой, Д. М. Левушкин, А. Ю. Мануковский, Ю. Н. Пильник, К. А. Яковлев, В. А. Бурмистров, В. С. Прокопец // Строительные и дорожные машины. – 2021. - №11. - С. 32-37.

74. Никитин, В. В. Аналитические методы оптимизации транспортных сетей лесовозных автомобильных дорог / В. В. Никитин, А. В. Скрыпников, А. А. Берестовой, Д. М. Левушкин, А. Ю. Мануковский, Ю. Н. Пильник, К. А. Яковлев, В. А. Бурмистров // Строительные и дорожные машины. - 2021. - №10. - С. 53-60.

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

76. ОДН 218.046-01 Проектирование нежестких дорожных одежд. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200015514>.

77. Орлов, А. О. Обзор методов оптимизации состава машин при строительстве автомобильных дорог / А. О. Орлов, М. В. Мацнев, А. В. Скрыпников, В. Г. Козлов, Р. В. Могутнов // Бюллетень транспортной информации. 2019. № 5 (287). С. 14-17.

78. 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).

79. Пегат, А. Нечеткое моделирование и управление. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. - 798 с.
80. Пермяков, В. Б. Организация эффективной эксплуатации транспортно-технологических машин и методология формирования ресурсосберегающих комплектов машин в дорожном строительстве: учебно-методическое пособие / В. Б. Пермяков. - Омск: СибАДИ, 2019. - 159 с.
81. Петрович, П. П. Реконструкция дорожных одежд автомобильных дорог: учебно-методическое пособие / П. П. Петрович. – М.: МАДИ, 2021 – 154 с.
82. Пижурин, А. А. Исследования процессов деревообработки / Пижурин А. А., Розенблит М. С. – М. Лесная промышленность, 1984. - 232 с.
83. ПНСТ 390-2020 Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Типовые конструкции. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200170767>.
84. Побединский, В. В. Интеллектуальная система определения темпа потока при проектировании дорожных покрытий / В. В. Побединский, С. И. Булдаков, И. Н. Кручинин, С.В. Ляхов, Е. С. Анастас, И. А. Карабутова // Деревообрабатывающая промышленность. - 2021. - № 4. - С. 31-41.
85. 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.
86. Побединский, В. В. Нейронная сеть для оценки транспортно- эксплуатационного состояния лесных автомобильных дорог / В. В. Побединский, И. Н. Кручинин, М. В. Шавнина, Д. И. Шакирзянов // Деревообрабатывающая промышленность. - 2020. - № 3. - С. 10-18.
87. Побединский, В. В. Нейронечеткая сеть для подбора асфальтобетонных смесей дорожных покрытий по содержанию воздушных пустот /

В. В. Побединский, С. И. Булдаков, С. В. Ляхов, И. А. Карабутова, Е. С. Анастас // Системы. Методы. Технологии. - 2022. - № 1 (53). - С. 78-85.

88. Подольский, В. П. Технология и организация строительства автомобильных дорог. Дорожные покрытия: учебник для студ. Учреждений высш. проф. образования / В. П. Подольский, П. И. Поспелов, А. В. Глагольев, А. В. Смирнов; под ред. В. П. Подольского. - М.: Издательский центр «Академия», 2012 - 304 с.

89. Прокопьев, А. П. Нейросетевая система управления процессом уплотнения дорожных материалов асфальтоукладчиками / А. П. Прокопьев, Ж. И. Набижанов // Инженерный вестник Дона. – 2021. - №10. – 10 с.

90. Прокопьева, А. Г. Устройство основания автомобильных дорог из щебеночно-песчаных смесей методом холодной регенерации / А. Г. Прокопьева // Том Часть 2. – Чебоксары: Волжский филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», 2017. – С. 173-177.

91. Прядилина, Н. К. Лесной сектор экономики Свердловской области: этапы развития, современное состояние и проблемы лесного планирования: монография / Н. К. Прядилина. – Екатеринбург: УГЛТУ. - 2019. - 342 с.

92. Реут, Ж. В. Строительство дорожной одежды капитального типа: учебно-методическое пособие / Ж. В. Реут, Е. П. Ходан. - Минск: БНТУ, 2020. - 85 с.

93. Саати, Т. Аналитическое планирование. Организация систем: пер с англ. – М.: Радио и связь. – 1991. – 224 с.

94. Савельев, В. В Концепция технико-экономического обоснования типа и конструкции дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог / В. В. Савельев, Ю. А. Ширнин // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. – 2003. – С. 186-190.

95. Салихов, М. Г. Проектирование и организация работы производственных предприятий дорожного строительства: задания и метод. указания к выполнению курсовой работы: учебное пособие / М. Г. Салихов. — Йошкар-Ола: ПГТУ, 2011. - 52 с

96. Салминен, Э. О. Логистическо-математическое моделирование транспортно-технологического процесса лесопромышленного комплекса / Э. О. Салминен, А. А. Борозна // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. – 2013. – № 1. – С. 132-136.

97. Сафонова, Ю. А. Исследование вероятностных зависимостей, обуславливающих планирование ритмичного строительства лесовозных автомобильных дорог / Ю.А. Сафонова [и др.] // Лесной вестник. Forestry Bulletin. - 2018. - Т.22. - № 6. - С. 79-87.

98. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021616927 Российская Федерация. Интеллектуальная система для определения длины захватки при строительстве автомобильной дороги RaschetZahvatki: № 2021616141: заявл. 23.04.2021: опубл. 29.04.2021 / В. В. Побединский, С. И. Булдаков, Е. В. Побединский, Е. С. Анастас; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный лесотехнический университет».

99. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020663898 Российская Федерация. Нейронная сеть для оценки технологических решений дорожных покрытий: № 2020663115: заявл. 28.10.2020: опубл. 03.11.2020 / В. В. Побединский, С. И. Булдаков, А. В. Берстнев, Е. С. Анастас; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный лесотехнический университет».

100. 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.

101. Силуков, Ю. Д. Влияние износа шероховатости покрытия автомобильных дорог на сцепление колес транспорта / Ю. Д. Силуков // Транспорт Урала. – 2010. – № 4(27). – С. 36-37.

102. Сильянов, В. В. Транспортно-эксплуатационные качества автомобильных дорог и городских улиц: учебник для студ. высш. учеб. заведений / В. В. Сильянов, Э. Р. Домке - 3-е изд., стер. – М.: Академия, 2009. – 352 с.

103. Сиротюк, В. В. Особенности конструирования дорожных одежд с армированным асфальтобетонным покрытием в условиях Сибири и Крайнего Севера / В. В. Сиротюк, Е. Ю. Крашенинин // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2008. – № 1(7). – С. 31-38.

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

105. Скоробогатченко, Д. А. Модель краткосрочного прогнозирования состояния дорожного покрытия для целей оперативного управления зимним содержанием городской улично-дорожной сети / Д.А. Скоробогатченко, И.А. Агуреев // Сборник научных трудов по материалам Всероссийской научно-практической конференции. - 2018. - С. 383-387.

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

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

108. СП 37.13330.2012 Промышленный транспорт. Актуализированная редакция СНиП 2.05.07-91. * М.: ФАУ «ФЦС». – 2012. – 195 с.
109. СП 48.13330.2019 Организация строительства. Актуализированная редакция СНиП 12-01-2004. * М.: ФАУ «ФЦС». – 2019. – 66 с.
110. СП 78.13330.2012 Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 3.06.03-85. * М.: ФАУ «ФЦС». – 2013. – 67 с.
111. Степанов, А.В. Анализ сети лесовозных дорог республики Карелия / А. В. Степанов, А. Н. Петров // Ученые записки ПетрГУ. - 2014. - №8 (145). - Т.2. - С. 78 – 81.
112. Стратегия развития инновационной деятельности в области дорожного хозяйства на период 2021–2025 годы, утверждённая 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/priказы-rasporяzheniya/431091>.
113. Стратегия развития информационного общества Российской Федерации на 2017–2030 годы, утверждённая 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>.
114. Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 20 сентября 2018 г. № 1989-р [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <http://static.government.ru/media/files/cA4eYSe0MObgNpm5hSavTdIxID77KCTL.pdf>.
115. Стратегия развития лесного фонда Свердловской области на период до 2035 года, утверждённая 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>.

116. Строительство автомобильных дорог: учебник / / под ред. В. В. Ушакова, В. М. Ольховикова. – Москва: КНОРУС, 2013.

117. Сушков, С. И. Экспериментальное сравнение двух конструкций дорожных одежд с применением георешеток, устраиваемых на склонах лесовозных дорог, в основании которых водонасыщенный глинистый грунт / С. И. Сушков, А. С. Сергеев // Лесотехнический журнал. - 2017. - Т. 7. - № 1(25). - С. 126-136.

118. Сушков, С. И. Принципы решения задач управления в многоуровневых транспортно-производственных системах лесного комплекса / С. И. Сушков, О. Н. Бурмистрова, Ю. Н. Пильник // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 11-2. – С. 317-321.

119. Телегин, М.А. Моделирование работы дорожной одежды на стальной ортотропной плите / М. А. Телегин // Вестник СиБАДИ. - 2012. - №3(25). – С. 63-68.

120. Углова, Е. В. Типовые конструкции нежестких дорожных одежд на автомобильных дорогах с высокой интенсивностью движения. Принципы конструирования: учебное пособие / Е. В. Углова, О. В. Конорева, А. С. Конорев. - Ростов-на-Дону: Донской ГТУ, 2017. - 103 с.

121. Чирков, Е. В. Экспериментальное исследование методов автоматизированного проектирования трассы лесовозной автомобильной дороги / Е. В. Чирков, А. В. Скрыпников, А. О. Боровлев [и др.] // Автоматизация. Современные технологии. – 2021. – Т. 75, № 1. – С. 29-33.

122. Цапко, К. А. Методические основы формирования стоимостно-ориентированного портфеля заказов проектной организации дорожно-строительного комплекса // [Электронный ресурс]: Инженерный вестник Дона, 2012.- №2. - Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2012/769>.

123. Хартман, К. Планирование эксперимента в исследованиях технологических процессах / К. Хартман. Москва: Издательство «Мир», 1977. - 553 с.

124. Хохлов, А. И. Анализ неопределенностей в технологии устройства земляного полотна лесовозных дорог / А. И. Хохлов, Е. С. Анастас // Научное творчество молодежи - лесному комплексу России: Материалы XVII Всероссийской (национальной) научно-технической конференции, Екатеринбург, 05–17 апреля 2021 года. – Екатеринбург, 2021. – С. 143-145.

125. Хохлов, А. И. Применение интеллектуальных систем в строительстве лесовозных дорог / А. И. Хохлов, Е. С. Анастас, С. И. Булдаков // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России: материалы XVII Всероссийской (национальной) научно-технической конференции студентов и аспирантов - Екатеринбург, 2021. – С. 146–148.

126. Цупиков, С. Г. Справочник дорожного мастера. Строительство, эксплуатация и ремонт автомобильных дорог. Учебно-практическое пособие / С. Г. Цупиков. Москва: Инфра-Инженерия, 2005.

127. Чудинов, С. А. Проектирование и строительство автомобильных дорог в сложных природных условиях / С. А. Чудинов – Екатеринбург: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Уральский государственный лесотехнический университет". - 2022. – 96 с.

128. Штерензон, В. А. Моделирование технологических процессов: конспект лекций / В. А. Штерензон. - Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та. – 2010. - 66 с.

129. Ясницкий, Л. Н. Нейронные сети – инструмент для получения новых знаний: успехи, проблемы, перспективы / Л. Н. Ясницкий // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2015. - №5. – С. 48-56.

130. Ярушкина, Н. Г. Интеллектуальный анализ временных рядов: учебное пособие / Н. Г. Ярушкина, Т. В. Афанасьева, И. Г. Перфильева. – Ульяновск: УлГТУ, 2010. – 320 с.
131. Labudin, B. V., Ivko, V. R., Koltsova, E. I., Skrypnikov, A. V., Kozlov, V. G., Levushkin, D. M., Matsnev, M.V., Zelikov, V.A. (2020). Increasing pit road inclinations at high latitude deposits of solid minerals. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 15(19), 2168-2173.
132. Mamdani E.H. (1975) An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies*. 7. pp. 1–13.
133. Pavlov A. N., Sokolov B. V. Priniatie reshenia v usloviyah nechenkoy informatsii [Decision-making in the conditions of fuzzy information]. Textbook. St. Petersburg, SPbGUAP Publ., 2006, 72 p.
134. Shtovba S. D. Modelirovanie nadezhnosti cheloveka-operatora s pomoschiyu nechetkoy bazy znaniy Sugeno [The reliability of a human operator using a fuzzy Sugeno knowledge base]. *Automation and telemekhanics*, 2009, no. 1, pp. 180 - 187.
135. Tahani H., Keller J. M. Information fusion in computer vision using the fuzzy integral. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1990, vol. 20(3), pp. 733–741.
136. Zadeh, L. A. Fuzzy sets. *Information and Control*, 1965, vol. 8, no. 3, pp. 338–353. 5. Sugeno M. Theory of fuzzy integrals and its application. *Doct. Thesis*. Tokyo, Tokyo Institute of Technology Publ., 1974, 50 p. 6.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(обязательное)

Транспортная доступность лесов Свердловской области

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

№	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				
				кругло-годовалого	зимники	всего					кругло-годовалого	зимники			всего
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
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.	Суходождское	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.	Турунское	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

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

Технологический процесс устройства дорожной одежды лесовозных автомобильных дорог

Таблица Б.1 - Технологический процесс устройства дорожной одежды

№ захватки и ее длина	250	250	250	250	250	250
№ операции	1-3	4-5	6-8	9-10	11-13	14-15
Наименование работ	1. Погрузка песчано-гравийной смеси экскаватором в самосвалы 2. Подвозка песчано-гравийной смеси автомобилями самосвалами 3. Разравнивание автогрейдером	4. Подвозка воды и увлажнение песчано-гравийной смеси 5. Уплотнение песчано-гравийной смеси	6. Погрузка щебня фракции 20-40 экскаватором в самосвалы 7. Подвозка щебня фракции 20-40 автомобилями самосвалами 8. Разравнивание автогрейдером	9. Уплотнение щебня фракции 20-40 10. Розлив битума	11. Погрузка щебня фракции 10-20 экскаватором в самосвалы 12. Подвозка щебня фракции 10-20 автомобилями самосвалами 13. Разравнивание автогрейдером	14. Уплотнение щебня фракции 10-20 15. Розлив битума
Ресурсы на захватку	Экскаватор – 2 Самосвал - 18 Автогрейдер - 2 Водители – 18 Машинисты – 4 Помощник машиниста - 2	Поливомоечная машина -1 Каток – 2 Машинисты -3 Дорожные рабочие - 4	Экскаватор – 2 Самосвал - 11 Автогрейдер - 1 Водители – 11 Машинисты – 2 Помощник машиниста - 1	Каток - 2 Автогудронатор – 1 Машинисты – 3 Дорожные рабочие - 4	Экскаватор – 2 Самосвал - 11 Автогрейдер - 1 Водители – 11 Машинисты – 2 Помощник машиниста - 1	Каток - 2 Автогудронатор – 1 Машинисты – 3 Дорожные рабочие - 4



а)



б)



в)



г)



д)

- а) карьер по производству песчано-гравийной смеси; б) транспортировка и выгрузка песчано-гравийной смеси;
 в) разравнивание куч песчано-гравийной смеси; г) увлажнение слоя песчано-гравийной смеси;
 д) уплотнение слоя песчано-гравийной смеси

Рисунок Б.1 - Технология устройства основания дорожной одежды



а)



б)



в)



г)



д)



е)

а) карьер по производству щебня; б) транспортировка и выгрузка щебня; в) разравнивание куч щебня;
г) выравнивание слоя щебня; д) уплотнение слоя щебня; е) розлив битума

Рисунок Б.2 - Технология устройства покрытия дорожной одежды

ПРИЛОЖЕНИЕ В

(обязательное)

Исходные данные, принятые к исследованию

Таблица В.1 - Автомобильные дороги Алапаевского района, которые эксплуатируются лесовозным транспортом для перевозки лесоматериалов

№ п/п	Автомобильная дорога	Протяженность участка, км	Категория
1	г. Алапаевск - п. Каменский	5,831	V
2	д. Кочнёва - с. Клевакино - д. Ветлугина	3,272	V
3	д. Толмачёва - п. Дружба	6,613	IV
4	п. Коптелово - д. Ермаки	5,184	IV
5	п. Коптелово - с. Костино - с. Невьянское	3,08	IV
6	Подъезд к д. Никонова от км 3+363 а/д "п. Коптелово - с. Костино - с. Невьянское"	1,753	V
7	Подъезд к с. Ялуинское от км 9+228 а/д "п. Коптелово - с. Костино - с. Невьянское"	0,457	IV
8	Подъезд №1 к с. Костино от км 21+817 а/д "с. Коптелово - с. Костино - с. Невьянское"	3,981	IV
9	Подъезд №2 к с. Костино от км 24+551 а/д "с. Коптелово - с. Костино - с. Невьянское"	0,935	IV
10	Подъезд к д. Кострома от км 17+165 а/д "п. Коптелово - с. Кострома - с. Невьянское"	0,925	V
11	р.п. Верхняя Синячиха - г. Ирбит	97,091	III
12	Подъезд к д. Путилова от км 11+282 а/д "р.п. Верхняя Синячиха - г. Ирбит"	0,3	IV
13	Подъезд к с. Останино от км 13+688 а/д "р.п. Верхняя Синячиха - г.Ирбит"	0,596	V
14	Подъезд к д. Верхний Яр от км 15+969 а/д "р.п. Верхняя Синячиха - г. Ирбит"	0,81	IV
15	Подъезд к с. Кировское от км 22+580 а/д "р.п. Верхняя Синячиха - г. Ирбит"	0,599	IV
16	Подъезд к д. Бобровка от км 29+729 а/д "р.п. Верхняя Синячиха - г. Ирбит"	0,304	V
17	Подъезд к д. Первунова от км 34+512 а/д "р.п. Верхняя Синячиха - г. Ирбит"	0,36	IV
18	Подъезд к с. Невьянское от км 39+434 а/д "р.п. Верхняя Синячиха - г. Ирбит"	1,152	IV
19	Подъезд к д. Михалёва от км 44+720 а/д "р.п. Верхняя Синячиха - г. Ирбит"	0,445	V
20	Подъезд к д. Бунькова от км 49+855 а/д "р.п. Верхняя Синячиха - г. Ирбит"	0,087	IV
21	Подъезд к с. Голубковское от км 53+046 а/д "р.п. Верхняя Синячиха - г. Ирбит"	0,465	IV

№ п/п	Автомобильная дорога	Протяженность участка, км	Категория
22	р. п. Верхняя Синячиха - пгт. Махнёво – с. Болотовское	98,5	IV
23	с. Останино - д. Путилова	4,82	V
24	с. Голубковское - п. Гаранинка	10,67	IV
25	с. Рычково - п. Ельничная	12,211	IV
26	г. Артёмовский - с. Арамашево	10,327	III
27	г. Екатеринбург - г. Реж - г. Алапаевск	67,26	III
28	Подъезд к с. Арамашево от км 117+286 а/д "г. Екатеринбург - г. Реж - г. Алапаевск"	0,7	IV
29	Подъезд к д. Косякова от км 119+207 а/д "г. Екатеринбург - г. Реж - г. Алапаевск"	0,959	IV
30	Подъезд к п. Коптелово от км 131+004 а/д "г. Екатеринбург - г. Реж - г. Алапаевск"	3,125	IV
31	г. Нижняя Салда - г. Алапаевск	10,54	IV
32	г. Нижняя Салда - г. Алапаевск	15,597	III
33	Подъезд к д. Толмачёва от км 76+029 от а/д "г. Нижняя Салда - г. Алапаевск"	4,166	IV
34	Подъезд к д. Толмачёва от км 76+029 от а/д "г. Нижняя Салда - г. Алапаевск"	0,481	V

Таблица В.2 – Выборки для определения скорости комплексного потока

№	Длина дороги, м	Количество рабочих смен, дней	Объём производимых работ, м ³	Количество ведущих машин, ед	Производительность ведущих машин, м ³ /смена	Скорость комплексного потока, м
1	5	174	2840	2	68,2	100
2	4,3	158	2432	2	68,28	250
3	5	160	4042	1	213,3	150
4	4,8	151	4988	1	340	300
5	5	151	4988	1	280,8	200
6	4,3	160	2424	2	74,2	250
7	5	167	3980	2	340	300
8	2,6	66	1000	1	213,3	150
9	4,9	171	4747	1	340	200
10	4,6	153	4722	2	280,8	250
11	1	39	815	1	68,2	150
12	1,4	61	1850	1	68,2	200
13	5	167	3623	2	74,2	250
14	2	28	1940	1	68,28	300
15	5	175	4988	2	68,2	250
16	3	31	2424	1	213,3	100
17	4,5	131	4042	2	280,8	200

№	Длина дороги, м	Количество рабочих смен, дней	Объем проводимых работ, м ³	Количество ведущих машин, ед	Производительность ведущих машин, м ³ /смена	Скорость комплексного потока, м
18	2,5	42	2840	1	74,2	300
19	4,8	160	4988	2	340	150
20	4,3	151	4750	2	340	150

Таблица В.3 – Выборки для определения стоимости устройства дорожной одежды

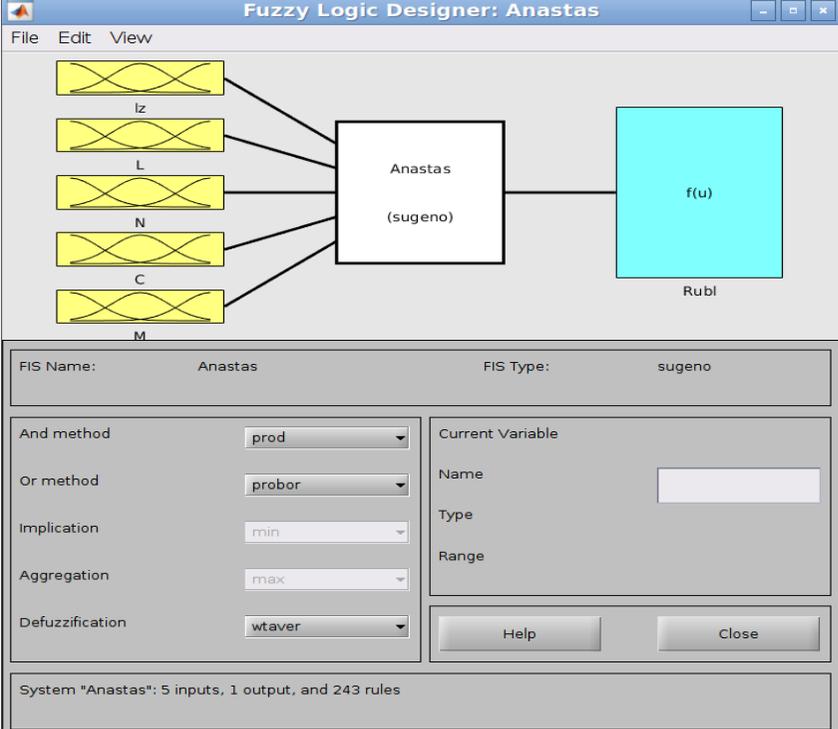
№	Скорость комплексного потока, м	Расстояние доставки материалов, км	Число машин, ед	Стоимость машиносмены, руб/смена	Стоимость материалов, руб/м ³	Стоимость устройства дорожной одежды, тыс. руб
1	100	22	50	10400	3400	4551,11
2	250	15	34	10400	3200	12711,73
3	150	20	37	10400	3350	7198,55
4	200	11	83	12000	2450	10257,79
5	250	38	73	12000	3500	12938,31
6	300	22	41	11400	2590	16862,82
7	300	20	73	10400	3350	17217,76
8	150	24	35	11100	3000	16293,4
9	200	69	38	8600	2400	10900,6
10	250	13	29	14800	2900	41308
11	150	25	34	10300	3250	5193,30
12	200	64	20	10700	3000	9135,85
13	250	38	61	12000	3400	12936,7
14	300	28	28	10400	3400	20568,1
15	250	39	42	12000	2450	19368,9
16	100	46	34	9300	3200	15986,2
17	200	72	29	10800	3550	31236
18	300	29	75	10400	3300	14789,2
19	150	51	40	12000	3400	7987,2
20	150	32	42	11000	2450	8925,3

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

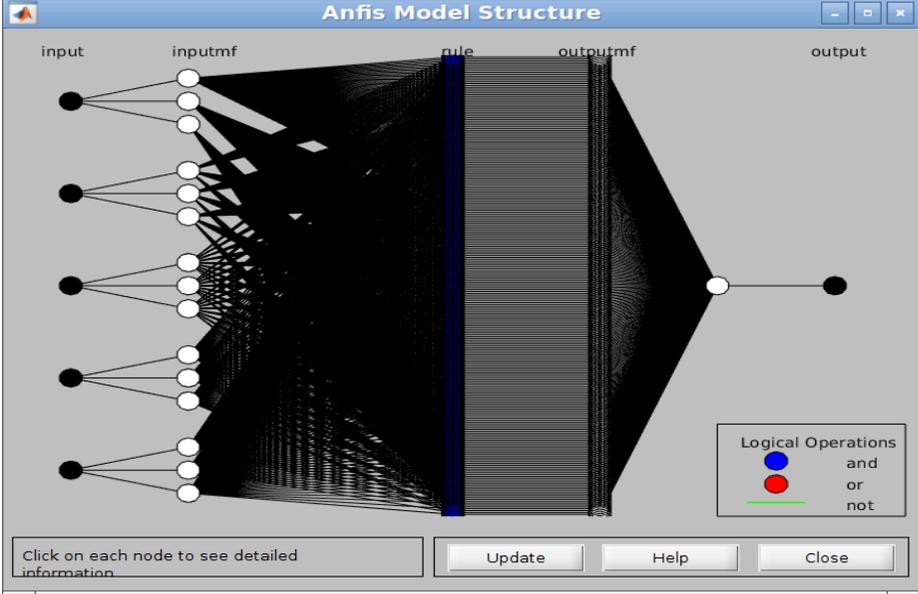
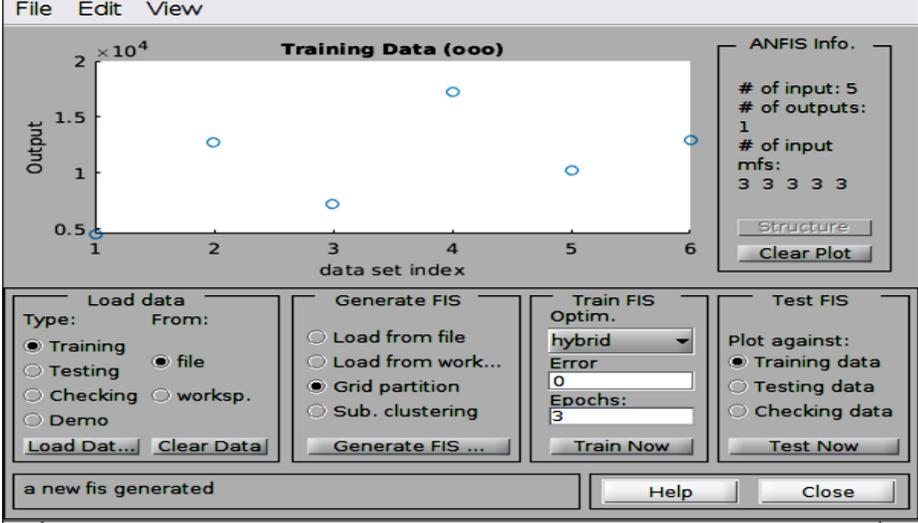
(обязательное)

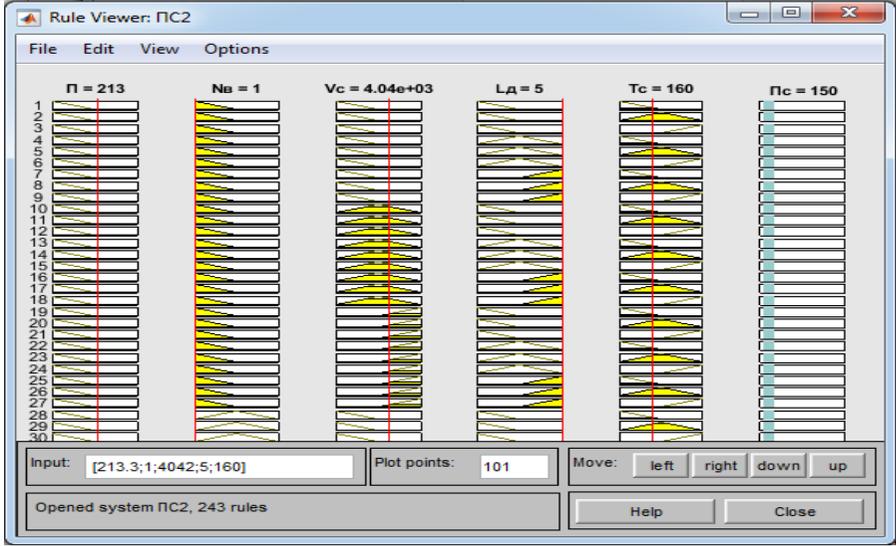
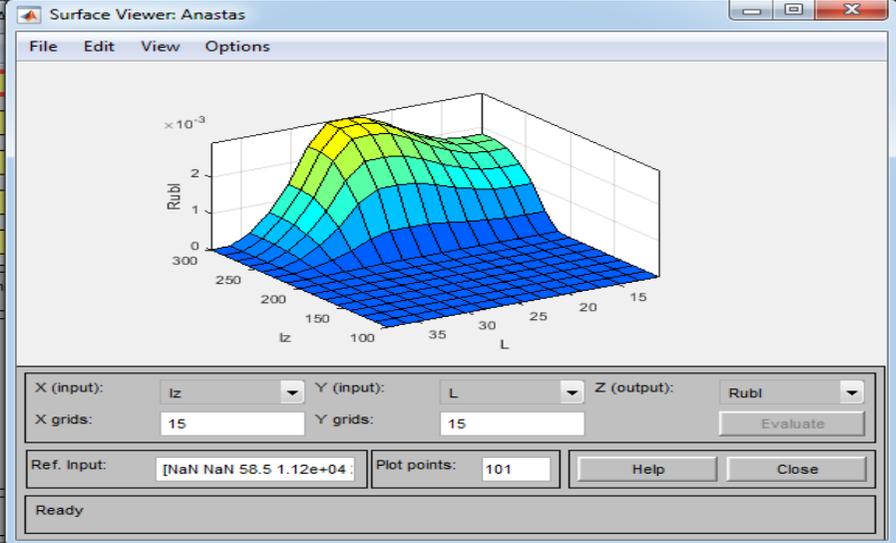
Пакеты прикладных программ *Matlab*

Таблица Г.1 - Пакеты прикладных программ *Matlab*, используемые в исследованиях

№ п/п	Наименование	Функционал	Интерфейс
1	<i>Fuzzy Logic Designer</i>	Проектирование и тестирование нечеткой системы вывода, моделирование поведений	

№ п/п	Наименование	Функционал	Интерфейс
2	<i>Membership Function Edition</i>	Определение форм всех функций принадлежности, сопоставленных с каждой переменной	
3	<i>Rule Editor</i>	Отображение и корректировка базы правил, которые задают поведение системы в целом	

№ п/п	Наименование	Функционал	Интерфейс
4	<p><i>ANFIS</i> (<i>adaptive neuro-fuzzy inference systems</i>)</p>	<p>Адаптивная нейро-нечеткая система вывода, разновидность искусственной нейронной сети, основанной на системе нечеткого вывода <i>Surgeno</i></p>	
5	<p><i>Neuro-Fuzzy Designer</i></p>	<p>Проектирование, обучение и тестирование адаптивной нейронечеткой системы вывода (<i>ANFIS</i>) с помощью обучающих данных ввод/вывод</p>	

№ п/п	Наименование	Функционал	Интерфейс
6	<i>Rule Viewer</i>	Диагностика нечеткой схемы вывода, средство просмотра активных правил, отдельных форм функций принадлежности и их влияния на результаты	
7	<i>Surface Viewer</i>	Просмотр зависимостей выходных параметров на любом или двух из входных параметров, генерация и построение выходной поверхности для системы	

№ п/п	Наименование	Функционал	Интерфейс
8	Simulink	Расширение MATLAB, позволяющее создавать модели, базирующиеся на использовании дифференциальных уравнений и графических блоков	<p>The diagram illustrates a Simulink model interface. It features two multiplexers, 'Mux' and 'Mux1', which route data between various control blocks and display outputs.</p> <p>Inputs to Mux:</p> <ul style="list-style-type: none"> 73: Производительность ведущих машин (Production of leading vehicles, Γ, m³/shift) 1: Количество ведущих машин (Number of leading vehicles, N_v, units) 3980: Объём проводимых работ (Volume of work performed, V_c, m³) 5: Длина дороги (Road length, L_d, km) 167: Количество рабочих смен (Number of working shifts, T_c, day) <p>Control Blocks:</p> <ul style="list-style-type: none"> Контроллер с обращением к нейронной сети определения скорости комплексного потока (Controller with neural network for complex flow speed determination): Receives inputs from Mux and outputs to the top display. Контроллер с обращением к нейронной сети определения стоимости устройства дорожной одежды (Controller with neural network for road pavement device cost determination): Receives inputs from Mux1 and outputs to the bottom display. <p>Inputs to Mux1:</p> <ul style="list-style-type: none"> 20: Расстояние доставки материалов (Material delivery distance, l_d, km) 73: Численность парка машин (Fleet size, N_a, units) 10400: Стоимость машино-смены (Cost of machine shift, R_c, rub/shift) 3350: Стоимость материалов (Material cost, R_m, rub/m³) <p>Outputs (Displays):</p> <ul style="list-style-type: none"> Top display: скорость комплексного потока V_n, м (Complex flow speed V_n, m) Bottom display: стоимость устройства дорожной одежды R_3, тыс. руб. (Road pavement device cost R_3, thousand rubles)

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Объекты интеллектуальной собственности на результаты исследования

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2020663898

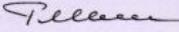
**Нейронная сеть для оценки технологических решений
дорожных покрытий**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования «Уральский
государственный лесотехнический университет» (RU)*

Авторы: *Побединский Владимир Викторович (RU), Булдаков Сергей
Иванович (RU), Берстнев Андрей Владимирович (RU), Анастас
Елена Сергеевна (RU)*

Заявка № **2020663115**
Дата поступления **28 октября 2020 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **03 ноября 2020 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 **Г.П. Ильев**


РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2021616927

**Интеллектуальная система для определения длины
захватки при строительстве автомобильной дороги
RaschetZahvatki**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"Уральский государственный лесотехнический
университет" (RU)*

Авторы: *Побединский Владимир Викторович (RU), Булдаков
Сергей Иванович (RU), Побединский Егор Владимирович
(RU), Анастас Елена Сергеевна (RU)*

Заявка № **2021616141**
Дата поступления **23 апреля 2021 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **29 апреля 2021 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 **Г.П. Ильев**


документ подписан электронной подписью
Сертификат выдан Федеральной службой по интеллектуальной собственности
Ильев Г.П. Григорий Петрович
Действителен с 15.01.2021 по 15.01.2030

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Общество с ограниченной ответственностью
ООО "КАПИТАЛСТРОЙ"
ОКПО 06010927, ОГРН 1169658141421, ИНН 6623119943, КПП 662301001
Основной вид деятельности 42.11 Строительство автомобильных дорог и автомагистралей
Юридический адрес 622005, Свердловская область, г. Нижний Тагил, ул. Шевченко, д. 29

Утверждаю
Генеральный директор
ООО "КАПИТАЛСТРОЙ"
П. С. Куренёв
« 26 » июня 2023 года

**АКТ**

о внедрении результатов диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук аспиранта кафедры транспорта и дорожного строительства Уральского государственного лесотехнического университета Анастас Елены Сергеевны на тему:

«Обоснование рациональной скорости строительства дорожных одежд лесовозных дорог на базе интеллектуальных систем».

Настоящий акт подтверждает, что предлагаемая интеллектуальная система, разработанная в диссертационной работе Анастас Е.С., была применена при составлении проекта производства работ по строительству автомобильной дороги «г. Нижний Тагил – п. Ольховка».

Результаты данных исследований позволили предварительно определить рациональную скорость комплексного потока, назначить наилучший вариант организации работ на захватке (определить необходимое количество ведущих машин и людских ресурсов, период строительства автомобильной дороги и т.п.), что дает возможность спрогнозировать стоимость устройства дорожной одежды, оценить возможности предприятия, участвующего в тендерных процедурах, а также оперативно скорректировать необходимое количество дорожно-строительной техники и людских ресурсов при изменении условий строительства автомобильной дороги.

Управляющая ООО "КАПИТАЛСТРОЙ"

Хабилова Х. Г.





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

Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, 620100
тел. (343) 221-21-00; тел./факс (343) 221-21-28
e-mail: general@m.usfeu.ru; http://usfeu.ru
ОКПО 02069243, ОГРН 1026605426814
ИНН/КПП 6662000973/668501001

15.06.2023 № 40
на № _____ от _____.20__

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе и
инновационной деятельности

УГЛТУ

В.В. Фомин

«15» июня 2023 г



А К Т

внедрения результатов диссертационной работы аспиранта УГЛТУ
Анастас Е. С. «Обоснование рациональной скорости строительства
дорожных одежд лесовозных дорог на базе интеллектуальных систем»

Комиссия в составе: председателя директора социально-экономического института 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 диссертационной работы Анастас Елены Сергеевны на тему: «Обоснование рациональной скорости строительства дорожных одежд лесовозных дорог на базе интеллектуальных систем» используются в учебном процессе по дисциплинам «Нейронные сети», «Основы искусственного интеллекта» в дипломном проектировании. Предложенная автором компьютерная программа для исследования технологии устройства дорожных одежд позволяет выполнять прикладные задачи по указанным дисциплинам, а в среде *MatLab* следующие процедуры:

- 1) формирование обучающих и тестовых выборок для определения технологических параметров устройства дорожных одежд с помощью нейро-нечеткой сети;
- 2) разработку обобщенной интеллектуальной системы в среде *Simulink*;

Использование указанного инструмента позволяет студентам на основе передовых компьютерных разработок - нейросетей, нечетких систем, осваивать современные методы определения технологических параметров устройства дорожных одежд.

Председатель комиссии:

доц., к.э.н.

Члены комиссии:

проф., д.т.н.

доц., к.т.н.

Капустина Ю.А.

Ковалев Р.Н.

Ляхов С.В.

РЕКОМЕНДОВАНО:
 Методической комиссии Инженерно-
 технического института
 Протокол № 13 от 30.06. 2023 г.
 Председатель  А.А. Чижов



УТВЕРЖДАЮ
 Проректор УГЛТУ
 по научной работе инновационной
 деятельности
 В.В. Фомин
 «30» июня 2023 г

АКТ

о внедрении в учебный процесс на кафедре транспорта и дорожного строительства Инженерно-технического института результатов диссертационной Анастас Елены Сергеевны на тему: «Обоснование рациональной скорости строительства дорожных одежд лесовозных дорог на базе интеллектуальных систем»

1. Краткое описание результатов внедрения, конечный результат.

Разработана интеллектуальная система определения скорости комплексного потока и стоимости устройства дорожной одежды автомобильных дорог, которая позволяет предварительно определить рациональную скорость комплексного потока, оценить возможности предприятия, участвующих в тендерных процедурах, а также оперативно скорректировать необходимое количество дорожно-строительной техники и людских ресурсов при изменении условий строительства автомобильной дороги.

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