

*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

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург - 2023

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

Научный руководитель **Булдаков Сергей Иванович**  
кандидат технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Уральский государственный  
лесотехнический университет», профессор  
кафедры Транспорта и дорожного строитель-  
ства, заслуженный работник высшей школы

Официальные оппоненты **Бургонутдинов Альберт Масугутович**  
доктор технических наук, доцент,  
ФГАОУ ВО «Пермский национальный иссле-  
довательский политехнический универси-  
тет», профессор кафедры Автомобильные  
дороги и мосты

**Мануковский Андрей Юрьевич**  
доктор технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный  
лесотехнический университет имени  
Г.Ф. Морозова», профессор кафедры  
Промышленного транспорта, строительства и  
геодезии

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Арктический государственный  
агротехнологический университет»

Защита состоится **6 октября 2023 г.** в 13-00 на заседании диссертаци-  
онного совета 24.2.424.01 при ФГБОУ ВО «Уральский государственный ле-  
сотехнический университет» по адресу: 620100, г. Екатеринбург, ул. Сибир-  
ский тракт, 37, к. 401.

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

Автореферат разослан «\_\_» августа 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук, профессор

Шишкина Елена Евгеньевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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 года», 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 исследования.

**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 г. № 205-ПП).

**Степень разработанности темы исследования.** 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 неопределённости в исходных параметрах. Анализ известных традиционных исследований показал, что они практически не учитывают неопределённости, 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 технологий 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 результатах проведенного исследования.

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 работы** заключается в расширении возможностей дорожно-строительной отрасли за счет использования современ-

ных 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 3 статьи в журналах из перечня ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ, 2 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.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

**В первой главе** представлены особенности процесса устройства дорожных одежд лесовозных дорог, рассмотрена транспортная инфраструктура лесовозных дорог на примере Свердловской области. Проведен анализ существующих методов, работ и исследований в области дорожного строительства, направленных на совершенствование технологии устройства дорожных одежд.

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. 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.

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. Исследования методов и алгоритмов нечеткого вывода рассматриваются в работах Х. Ларсена, Е. Мамдани, А. Пегата, М. Сугено, Т. Такаги, Й. Цукамото. Прикладное направление нечеткой логики показано в работах А. В. Леоненкова, К. Хартманна, С. Д. Штовба.

Согласно проведенным исследованиям в Восточном округе Свердловской области находится существенная доля лесных ресурсов, в связи с этим размещение предприятий лесоперерабатывающего комплекса тяготеет к районам добычи сырья. Наибольший интерес представляет Алапаевский район, так как в этой части округа идет основная заготовка древесины. Согласно Лесохозяйственному регламенту Алапаевского лесничества на территории Алапаевского района действует 21 лесоперерабатывающее предприятие, в том числе крупные: НАО «Свежа Верхняя Синячиха» и ООО «Лестех». В соответствии с анализом транспортно-логистической системы промышленного региона определена структура грузооборота

Алапаевского района Свердловской области (рисунок 1). Грузооборот лесоперерабатывающего комплекса в Алапаевском районе составляет 22 % (428,5 тыс. м<sup>3</sup>) от общего значения.

Лесоперерабатывающие предприятия осуществляют перевозку сортиментов и лесоматериалов по лесовозным автомобильным дорогам и дорогам регионального значения. Карта-схема транспортного освоения лесов предприятиями лесопромышленного комплекса Алапаевского района представлена на рисунке 2.

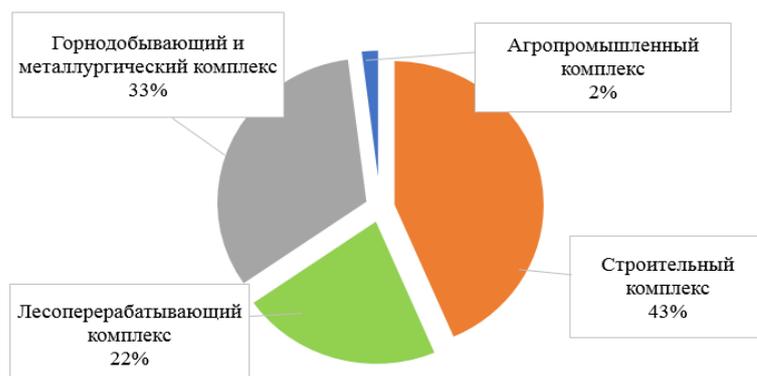


Рисунок 1 – Структура грузооборота Алапаевского района Свердловской области

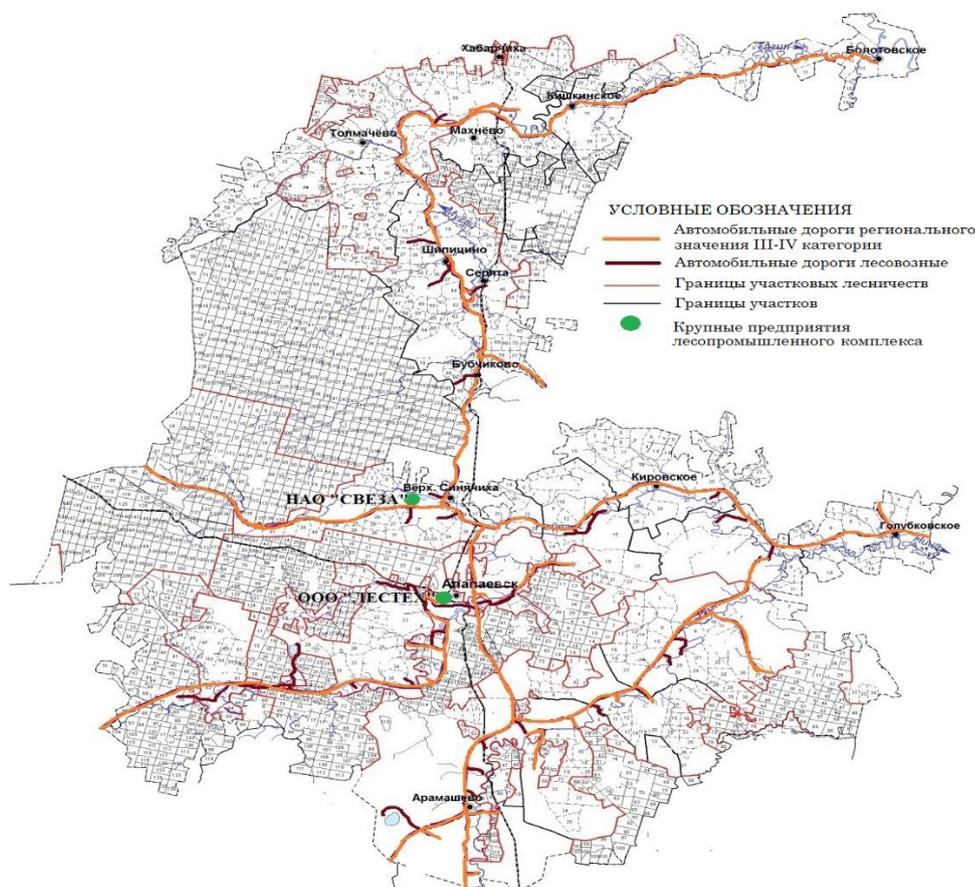


Рисунок 2 - Карта-схема транспортного освоения лесов предприятиями лесопромышленного комплекса Алапаевского района

Анализ показал, что совершенствование существующих и разработка новых методов определения технологических параметров устройства дорожных одежд лесовозных дорог является актуальной научно-практической задачей, но ее решение не представляется возможным на основе традиционных методов, что становится препятствием для дальнейшего совершенствования технологий дорожно-строительных работ. Исходя из вышесказанного была поставлена цель, сформулированы задачи и разработана общая методология дальнейших исследований.

**Вторая глава** посвящена исследованиям технологии устройства дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог. Рассмотрены основные принципы организации работ по устройству дорожных одежд лесовозных дорог, представлены подходы при назначении требуемой скорости комплексного потока, обоснованы зависимости и влияние параметров на скорость комплексного потока и стоимость устройства дорожной одежды, проведен анализ с целью выявления неопределенностей при устройстве дорожных одежд, разработана структурная схема модели определения скорости комплексного потока и стоимости устройства дорожной одежды.

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. 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. В соответствии с ПНСТ 390-2020 принимаем типовую конструкцию дорожной одежды лесовозной автомобильной дороги (рисунок 3).

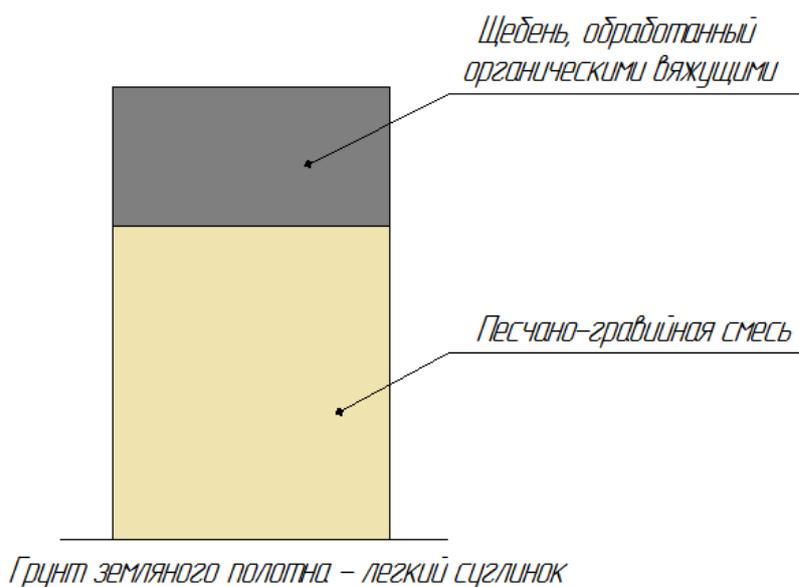


Рисунок 3 – Типовая конструкция дорожной одежды лесовозной автомобильной дороги согласно ПНСТ 390-2020

Дорожная одежда представляет собой многослойную конструкцию из нескольких слоев, укладываемую на тщательно спланированный и уплотнённый верхний слой земляного полотна. Ширина проезжей части и толщина конструктивных слоев зависят от показателя грузооборота проектируемой автомобильной дороги.

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 таблице 1.

Таблица 1 - Технология 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	Поливомоечная машина - 1 Каток - 2 Машинисты - 3 Дорожные рабочие - 4	Экскаватор - 2 Самосвал - 11 Автогрейдер - 1 Водители - 11 Машинисты - 2	Каток - 2 Автогудронатор - 1 Машинисты - 3 Дорожные рабочие - 4	Экскаватор - 2 Самосвал - 11 Автогрейдер - 1 Водители - 11 Машинисты - 2	Каток - 2 Автогудронатор - 1 Машинисты - 3 Дорожные рабочие - 4

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 создается для определения эффективных методов выполнения строительно-монтажных работ, способствующих снижению их себестоимости и трудоемкости, сокращению продолжительности строительства объектов, повышению степени использования строительных машин и оборудования.

В практике дорожного строительства наиболее прогрессивным вариантом ведения работ считается поточный метод. При данном методе ведения работ критерием эффективности служит скорость комплексного потока ( $V_n$ ). Следует стремиться к организации потоков с максимальной скоростью. Математическое выражение связи скорости комплексного потока с другими параметрами, запишется в виде:

$$V_n = \frac{L_d}{T_c \cdot N_p} \rightarrow \max, \quad (1)$$

где  $L_d$  - длина дороги, которую необходимо построить, м;

$N_p$  - период развёртывания комплексного потока, дней;

$T_c$  - количество рабочих смен в строительном сезоне, дней.

Наиболее экономичным путем является проведение работ в благоприятных погодно-климатических условиях, поэтому все дорожно-строительные работы разделены на группы в зависимости от температуры воздуха. Безусловно, климатические факторы районов лесозаготовки влияют на запланированные работы. При устройстве дорожных одежд в неблагоприятных погодных условиях особое внимание обращают на эффективную организацию проведения работ, определяющую темп строительства, так как технологические ограничения могут значительно изменить скорость комплексного потока.

Процесс устройства дорожной одежды включает в себя множество технологических операций, для выполнения которых требуется большое количество дорожно-строительной техники (самосвалы, экскаваторы, автогрейдеры, катки и др.). Количество машин ( $N_a$ ) в свою очередь обусловлено дальностью возки материалов ( $l_d$ ), объемом производимых работ ( $V_c$ ) и погодно-климатическими условиями. Объем производимых работ зависит от длины всего участка дороги, чем больше значение длины дороги, тем больше становится значение объема работ.

Производительность дорожных машин ( $\Pi$ ) является важным показателем для оценки эффективности их использования. Данный параметр зависит от расстояния возки материалов и грузоподъемности дорожно-строительной машины. Для определения скорости комплексного потока устройства дорожных одежд подсчитывают объем проводимых работ и выбирают ведущую машину. Между возможностями ведущей машины и их количеством существует связь:

$$N_g \geq П, \quad (2)$$

где  $N_g$  – количество ведущих машин, ед;

$П$  – производительность ведущих машин, м<sup>3</sup>/смена.

В практике дорожного строительства также одной из важнейших величин следует указать стоимость устройства дорожной одежды ( $P_3$ ). Большую часть в ценообразовании строительных работ занимает стоимость дорожно-строительных материалов ( $P_m$ ). Данный показатель обусловлен следующими факторами: тип и марка требуемых материалов, наличие в регионе, транспортной доступностью, а также объемом проводимых работ. Обязательно следует учесть показатель стоимости машино-смены ( $P_c$ ), который служит для определения затрат на эксплуатацию строительных машин, учитываемых в сметной стоимости строительства.

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. 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.

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». Схема определения влияющих параметров на скорость комплексного потока представлена на рисунке 4.

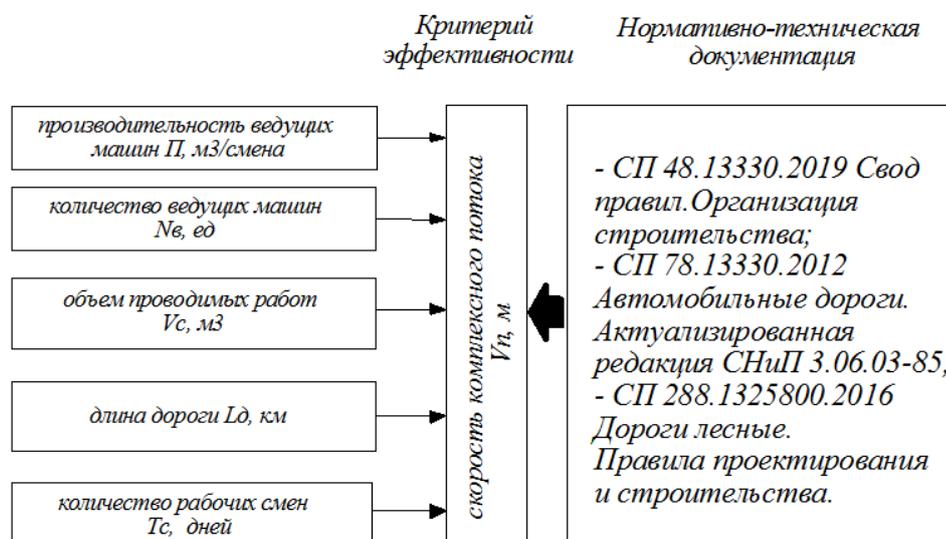


Рисунок 4 - Схема определения влияющих параметров на скорость комплексного потока

Для учета неопределенностей в задаче предлагается использовать интеллектуальную систему на основе нейро-нечетких сетей. В случае технологического процесса устройства дорожной одежды предполагается, что такой подход позволит выявлять наилучший способ организации и определять ориентировочную стоимость строительных работ. Как итог, подобная система обеспечит улучшение экономических показателей за счет возможности автоматизированного поиска более обоснованного решения.

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 5.

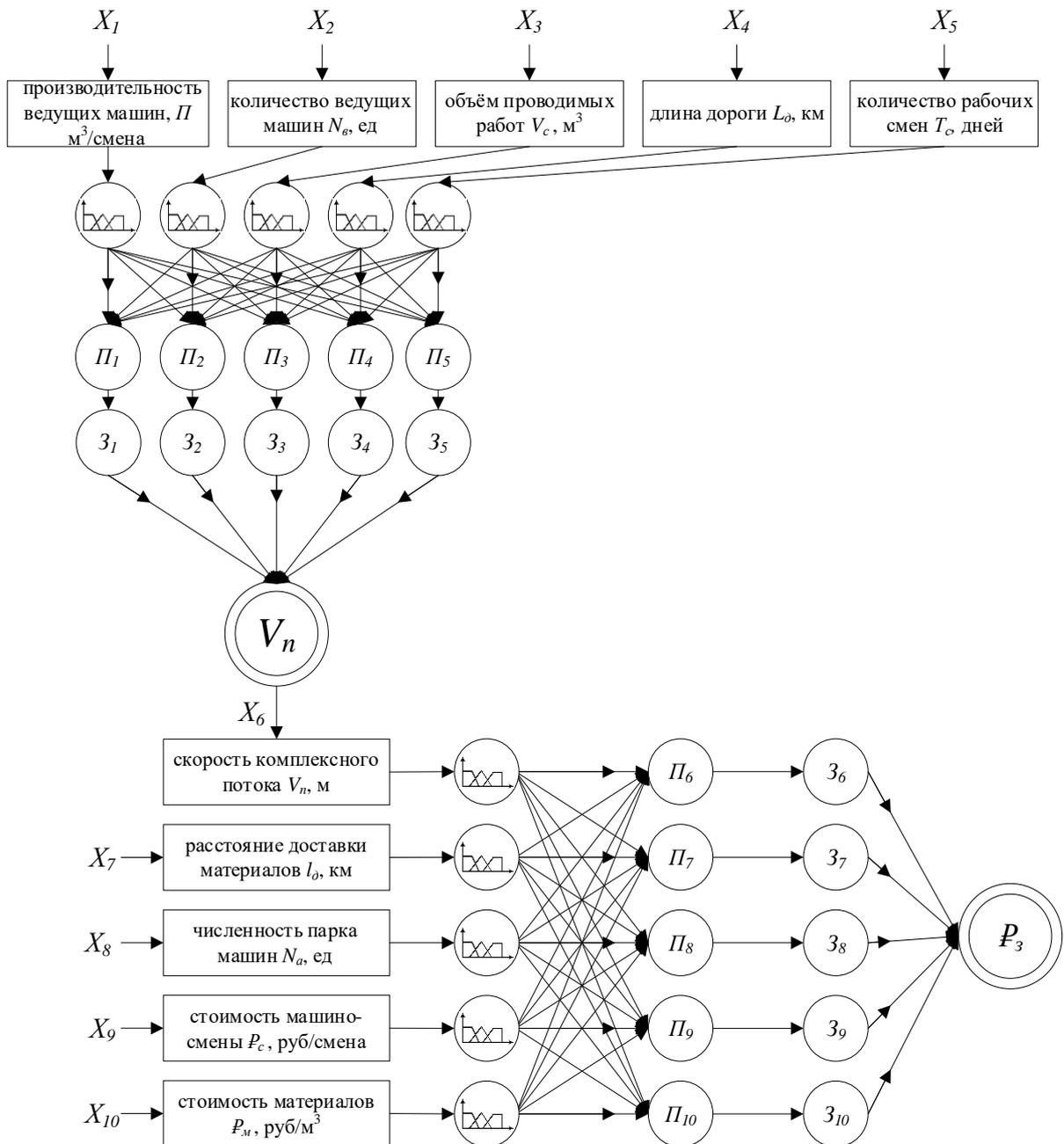


Рисунок 5 – Структурная схема модели определения скорости комплексного потока и стоимости устройства дорожной одежды

В третьей главе выполнялась разработка интеллектуальной системы определения скорости комплексного потока и стоимости устройства дорожной одежды. Наиболее развитым программным средством для проектирования и реализации нейронных сетей типа *ANFIS* является приложение *Neuro Fuzzy Designer* системы *Matlab*, которое использовано для создания модели интеллектуальной системы. По типу полученные нейросети относятся к гибридным, так как объединяют преимущества нечетких систем и нейронных сетей. Такие нейро-нечеткие сети будут в наибольшей степени соответствовать специфике задачи, в которой все параметры описываются лингвистическими переменными.

В соответствии со схемой (рисунок 5) и обоснованными входными переменными изначально была разработана нейронная сеть для определения скорости комплексного потока. Формально постановка задачи определения скорости комплексного потока ( $V_n$ ) запишется в следующем виде:

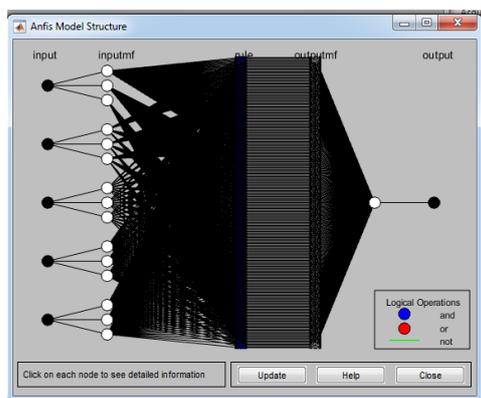
$$V_n = f(\Pi, N_в, V_c, L_d, T_c), \quad (3)$$

Обозначение параметров функции определения скорости комплексного потока (3) представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Обозначения параметров функции определения скорости комплексного потока

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

Реализация нейронной сети выполнена в среде *Neuro-Fuzzy Designer* приложения пакета *Matlab*. Результаты разработки нейронной сети приведены на рисунке 6.



```
>> fis=readfis('PC2');evalfis(fis,[213.3,1,4042,5,160])

ans =

149.9996
```

а)

б)

а) генерация нейронной сети; б) расчеты по настроенной сети в рабочей области *Matlab*

Рисунок 6 - Результаты разработки нейронной сети

Аналогично разрабатывалась нейронная сеть определения стоимости устройства дорожной одежды. Постановка задачи записывается следующим образом:

$$P_3 = f(V_n, l_d, N_a, P_c, P_m), \quad (4)$$

Обозначение параметров функции определения стоимости устройства дорожной одежды (4) приведены в таблице 3.

Таблица 3 – 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 - <i>Min</i> ; Среднее - <i>M</i> ; Максимальное - <i>Max</i>	Длина участка готовой дороги, построенной за одну смену, м
$X_7$	Расстояние доставки материалов, $l_d$	Минимальное - <i>Min</i> ; Среднее - <i>M</i> ; Максимальное - <i>Max</i>	Удаленность строительных материалов от места проведения работ, км
$X_8$	Численность парка машин, $N_a$	Минимальное - <i>Min</i> ; Среднее - <i>M</i> ; Максимальное - <i>Max</i>	Количество используемых в процессе машин, ед
$X_9$	Стоимость машино-смены, $P_c$	Минимальное - <i>Min</i> ; Среднее - <i>M</i> ; Максимальное - <i>Max</i>	Сумма денежных затрат, отнесенных к одной рабочей смене, руб/смена
$X_{10}$	Стоимость материалов, $P_m$	Минимальное - <i>Min</i> ; Среднее - <i>M</i> ; Максимальное - <i>Max</i>	Сумма денежных затрат на строительные материалы, руб/м <sup>3</sup>
$Y_2$	Стоимость устройства дорожной одежды, $P_3$	Минимальное - <i>Min</i> ; Среднее - <i>M</i> ; Максимальное - <i>Max</i>	Сумма денежных затрат на строительство дорожной одежды, тыс. руб

Разработанные нейронные сети позволили создать интеллектуальную систему, которая была реализована в среде *Simulink*. Схема приведена на рисунке 5, а ее визуально-блочная модель показана на рисунке 7.



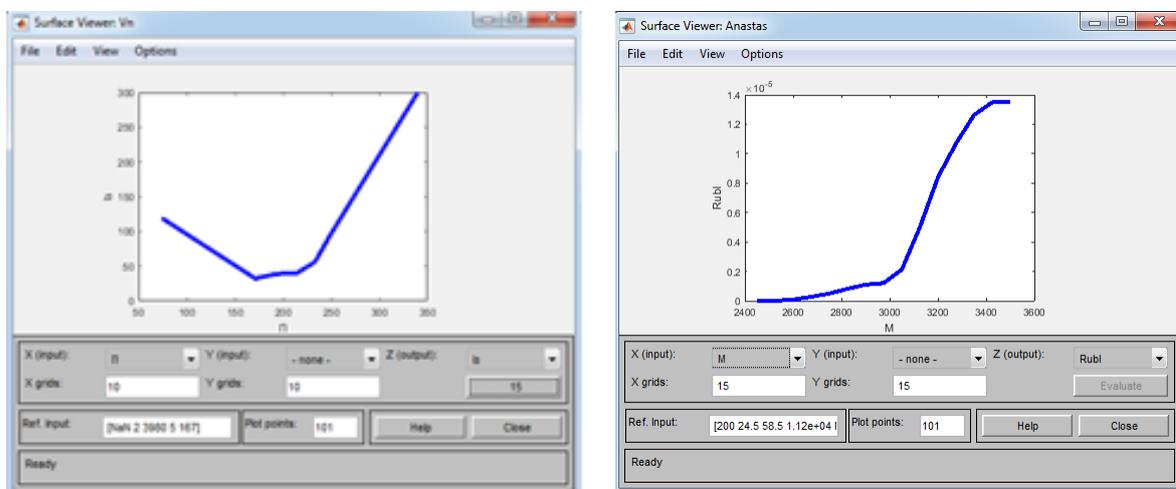
Рисунок 7 – Реализация интеллектуальной системы в среде визуально-блочного моделирования *Simulink*

**Четвертая глава** посвящена экспериментальным исследованиям технологического процесса устройства дорожных одежд с использованием разработанной интеллектуальной системы, изложено практическое применение и анализ результатов исследования, определена экономическая эффективность от внедрения.

В задачи численных экспериментальных исследований входило выявление закономерностей формирования скорости комплексного потока и зависимости стоимости устройства дорожной одежды от выбранных технологических параметров. Выполнена проверка адекватности интеллектуальной системы на тестовых примерах. Использована для этой цели процедура *RuleViewer* и расчеты по настроенной сети в рабочей области *Matlab* (рисунок 6б). Средняя ошибка расчетных данных по интеллектуальной системе не превышает 1%, что свидетельствует о ее достаточной точности.

Закономерности влияния технологических параметров на скорость комплексного потока и стоимость устройства дорожной одежды показаны на рисунке 8. На рисунке 8а приведена функциональная зависимость скорости комплексного потока от производительности ведущих машин  $Vn=f(\Pi)$  при фиксированных средних значениях остальных параметров. Установлено, что увеличение производительности ведущих машин на 40 м<sup>3</sup>/смену, позволяет повысить скорость комплексного потока на 50 м. На рисунке 8б 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 %.



а)

б)

а) функциональная зависимость  $V_n = f(\Pi)$ ; б) функциональная зависимость  $P_3 = f(P_M)$

Рисунок 8 - Закономерности влияния технологических параметров на скорость комплексного потока и стоимость устройства дорожной одежды

На примере проекта организации и производства работ «Строительство автомобильной лесовозной дороги на территории Алапаевского района II-л категории на базе ООО «Лестех»» определена более точно обоснованная скорость комплексного потока и стоимость устройства дорожной одежды с помощью интеллектуальной системы. В рамках исследования предполагается что экономический эффект достигается путем сокращения продолжительности строительства за счет назначения более точно обоснованной скорости комплексного потока. Экономический эффект от назначения рассчитанной с помощью интеллектуальной системы скорости комплексного потока составил 2148 тыс. руб. (6 % от сметной стоимости).

### 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  $V_n = f(\Pi)$ ,  $V_n = f(N_e)$ ,  $V_n = f(V_c)$ ,  $V_n = f(L_o)$ ,  $V_n = f(T_c)$ . Аналогично выявлены зависимости стоимости устройства дорожной одежды  $P_3 = f(V_n)$ ,  $P_3 = f(l_o)$ ,  $P_3 = f(N_a)$ ,  $P_3 = f(P_c)$ ,  $P_3 = f(P_m)$ . В частности, увеличение производительности ведущих машин на 40 м<sup>3</sup>/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.

### **Список работ, опубликованных по теме диссертации:**

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

1. 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.

2. 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.

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

#### **б) объекты интеллектуальной собственности**

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

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

#### **в) в других изданиях**

6. **Анастас Е. С.** Применение интеллектуальных систем при проектировании дорожных покрытий / **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 XIII Международной научно-технической конференции. Екатеринбург. - 2021. - С. 311-314.

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

8. **Анастас Е. С.** Применение интеллектуальных систем в строительстве лесовозных дорог / **Е. С. Анастас**, А. И. Хохлов // Научное творчество молодежи - лесному комплексу России: Материалы XVII Всероссийской (национальной) научно-технической конференции. Екатеринбург. - 2021. - С. 146-148.

9. **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. - 2022. - С. 373-376.

10. **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. - 2023. - С 287-291.

11. **Анастас Е.С.** Организация и планирование дорожно-строительных работ / **Е. С. Анастас**, А. Д. Дроздов, С. И. Булдаков, М. М. Фаттахов, А.М. Фатыхова // Проблемы строительного комплекса России: материалы XXVII Всероссийской научно-технической конференции, посвященной памяти профессора В.В. Бабкова. - Уфа. - 2023. - С. 479-480.

Просим принять участие в работе диссертационного совета или прислать Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах с заверенными подписями по адресу: 620100, г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, 37, УГЛТУ, диссертационный совет 24.2.424.01, e-mail: d21228102@yandex.ru.

Подписано в печать 2023 г.

Усл. п.л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ №

---

Редакционно-издательский отдел