

На правах рукописи



САФИУЛЛИН РУСЛАН РАВИЛЛОВИЧ

**МЕТОДИКА МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА
ПЛАНИРОВАНИЯ ПЕРЕВОЗОК ТЯЖЕЛОВЕСНЫХ ГРУЗОВ
АВТОМОБИЛЬНЫМ ТРАНСПОРТОМ**

Специальность 05.22.10 – Эксплуатация автомобильного транспорта

АВТОРЕФЕРАТ
диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный руководитель: доктор экономических наук, профессор
Горев Андрей Эдливич

Официальные оппоненты: **Шемякин Александр Владимирович**,
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО
«Рязанский государственный агротехнический
университет имени П.А. Костычева», кафедра
«Организация транспортных процессов и безопас-
ность жизнедеятельности», заведующий;

Федотов Виталий Николаевич
кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО
«Санкт-Петербургский горный университет»,
кафедра «Транспортно-технологических процес-
сов и машин», доцент

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Саратовский государственный тех-
нический университет имени Гагарина Ю.А.».

Защита диссертации состоится «28» марта 2019 г. В 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.223.02 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190103, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория № 219).

Тел./Факс: (812) 316-58-72; E-mail: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте <http://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/safiullin-ruslan-ravillovich>

Автореферат разослан «14» февраля 2019 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
Д 212.223.02 кандидат
технических наук, доцент



Олещенко Елена Михайловна

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Актуальность исследования. Анализ причин разрушения дорожного полотна выявил взаимосвязь между движением тяжеловесных грузовых автомобилей и сверхнормативным износом дорожных конструкций. Эта зависимость легла в основу решений, принимаемых Правительством Российской Федерации в последние годы, особое место в которых занимают меры по обеспечению сохранности автомобильных дорог.

Как было отмечено на XI Международном форуме «Транспортный потенциал», прошедшем 18–19 октября 2018 года в Санкт-Петербурге, появление новых дорожных сборов, изменение законодательной базы, внедрение автоматизированных систем и ужесточение контроля за движением тяжеловесных автомобилей оказали значительное влияние на процесс планирования и эффективность грузовых перевозок. В результате указанных мер получение разрешений на проезд и плата дорожных сборов стали весомыми критериями в организации работы автомобильного транспорта, осуществляющего перевозки тяжеловесных грузов (далее – ТГ), – с учетом размера вреда, возмещаемого в рамках оформления разрешающих документов, и времени, необходимого для такого оформления, затраты ресурсов по данным критериям превышают 50 % от общих при перемещении ТГ.

При этом, проведенные исследования выявили, что на сегодняшний день отсутствует комплексный научный подход или методика планирования перевозочного процесса тяжеловесных грузов, учитывающие новые значимые критерии, что оказывает существенное негативное влияние на отрасль в целом.

В основе всех методов оптимизации работы автомобильного транспорта лежит выбор наиболее эффективного из множества вариантов использования ресурсов грузового автомобиля, таким образом, решение задачи оптимизации эксплуатации автомобильного транспорта, осуществляющего перевозки ТГ, в настоящих условиях может обеспечить показатель, который будет оказывать наибольшее влияние на эффективность перевозки с возможностью нахождения наилучшего значения без снижения работы автомобильного транспорта.

На основании изложенного, в соответствии с существующей проблемой, учитывая цели и задачи, определенные Федеральной целевой программой «Развитие транспортной системы России», среди которых: ускорение товародвижения, снижение транспортных издержек и повышение эффективности использования всех видов ресурсов транспортного комплекса, задача диссертационного исследования, заключающаяся в разработке нового системного подхода в планировании перевозочного процесса ТГ автомобильным транспортом на основе новых значимых критериев, имеет существенное значение в области эксплуатации грузовых автомобилей, а также является важной научно-практической задачей.

Целью исследования является разработка методики многокритериальной оптимизации планирования процесса перевозки тяжеловесных грузов автомобильным транспортом посредством экономии ресурсов без потерь работы с учетом снижения негативного воздействия на автомобильные дороги.

Под оптимизацией в данной работе подразумевается – комплекс мероприятий, направленный на достижение максимальной эффективности в эксплуатации грузового автомобильного транспорта в процессе перевозки ТГ.

Объектом исследования является тяжеловесное автомобильное транспортное средство, **а предметом исследования** - управленческие и инфраструктурные решения, обеспечивающие оптимальное планирование перевозок тяжеловесных грузов с учетом снижения негативного влияния на автомобильные дороги.

Для достижения поставленной цели решены следующие научно-технические **задачи исследования:**

1. Проведен анализ состояния вопросов, связанных с планированием перевозок тяжеловесных грузов, и установлена закономерность влияния размера вреда, причиненного транспортными средствами автомобильным дорогам, на эффективность доставки ТГ.

2. Разработана математическая модель влияния весовых параметров транспортного средства (далее – ТС) на прочностные показатели дорожной конструкции с целью уточнения влияния параметров ТС на ущерб автомобильным дорогам.

3. Определен критерий оценки размера вреда, наносимого тяжеловесными транспортными средствами автомобильным дорогам, с целью оптимизации планирования перевозок тяжеловесных грузов.

4. Разработана методика комплексного эффективного планирования перевозочного процесса ТГ с учетом снижения негативного воздействия на автомобильные дороги.

5. Разработаны рекомендации по усовершенствованию существующей федеральной Методики расчета размера вреда, причиняемого транспортными средствами, осуществляющими перевозки тяжеловесных грузов.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

1. В результате анализа перевозочного процесса ТГ автомобильным транспортом определены новые, ранее неисследованные, системообразующие факторы и обоснованы закономерности, оказывающие наибольшее влияние на эффективность перевозок ТГ.

2. Разработана математическая модель влияния весовых параметров транспортного средства на прочностные показатели дорожных конструкций, позволяющая определить основные показатели, имеющие наибольшее влияние на эффективность перевозок ТГ.

3. Разработан и обоснован обобщенный критерий оценки размера вреда, наносимого транспортными средствами автомобильным дорогам, позволяющий оценивать ущерб автомобильным дорогам (далее – АД) при разной несущей способности дорожных конструкций и степени превышения допустимых осевых нагрузок транспортного средства, учитывающий влияние основных показателей на эффективность перевозок ТГ, определены его численные значения.

4. Разработан алгоритм оценки эффективности автомобильных перевозок тяжеловесных грузов с учетом воздействия на автомобильные дороги при превышении значений предельно допустимой массы и осевых нагрузок транспортного средства, способный обеспечить выбор наилучшего варианта маршрутной сети перевозки ТГ с учетом снижения негативного воздействия на АД по установленным критериям.

5. Разработана методика комплексной оптимизации планирования перевозок ТГ автомобильным транспортом с учетом снижения воздействия на автомобильные дороги, которая позволяет на практике обеспечить оптимальный маршрут перевозок ТГ с учетом установления размера вреда пропорционального разрушающему воздействию тяжеловесного транспортного средства.

Практическая значимость. Использование полученных в диссертационном исследовании регрессионных и эмпирических зависимостей, критерия, учитывающего влияние состояния дорожного покрытия автомобильной дороги на эффективность перевозок ТГ автомобильным транспортом, методики и рекомендаций по комплексной оптимизации планирования таких перевозок, обеспечивают рациональный выбор маршрута, эффективную эксплуатацию транспортных средств и в целом повышение эффективности перевозок ТГ на 48 %.

Использование методических рекомендаций в государственном управлении обеспечат условия для эффективного планирования перевозочного процесса, а в части мониторинга состояния автомобильных дорог (определения их эксплуатационного коэффициента и составление на основании полученных данных рейтинга владельцев автомобильных дорог) позволит улучшить состояние улично-дорожной сети в Российской Федерации и уменьшить расходы при перевозке ТГ.

Теоретическая ценность исследования заключается в разработке зависимости эффективности перевозок тяжеловесных грузов от ущерба, вызываемого движением тяжеловесных транспортных средств по автомобильным дорогам, определении нового критерия эффективности. Данное исследование открывает новое направление для дальнейшей разработки проблемы оптимизации грузовых перевозок автомобильным транспортом.

Методы исследования. Исследования выполнены на основе математического анализа с использованием ЭВМ, в том числе с использованием программы Statgraphics и Excel. Использовались методы статистической обработки экспериментальных данных, корреляционно-регрессионного анализа экспериментальных данных, математическое моделирование влияния факторов на функционирование автомобильного транспорта, теория планирования эксперимента, метод экспертных оценок, метод Пирсона, экспоненциальная модель распределения, исследование планирования, оценки экономической эффективности, итерационные методы поиска оптимального решения, а также основные положения системного подхода. Обработка результатов исследований проведена методами математической статистики.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Закономерность влияния размера вреда, причиненного транспортными средствами автомобильным дорогам, на эффективность перевозки ТГ.

2. Математическая модель влияния весовых параметров транспортного средства на показатели эффективности перевозок ТГ.

3. Критерий оценки размера вреда, причиняемого транспортными средствами автомобильным дорогам при перевозке ТГ, для оптимизации планирования перевозок тяжеловесных грузов.

4. Методика многокритериальной оптимизации планирования перевозок ТГ автомобильным транспортом.

5. Алгоритм и рекомендации по оптимальному планированию перевозок тяжеловесных грузов.

Область исследования соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК: 05.22.10 – Эксплуатация автомобильного транспорта, а именно:

п. 2 Оптимизация планирования, организации и управления перевозками пассажиров и грузов, технического обслуживания, ремонта и сервиса автомобилей, использования программно-целевых и логистических принципов.

п. 8 Совершенствование транспортного законодательства и нормативного обеспечения; лицензирование и сертификация на автомобильном транспорте.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обусловлена корректностью поставленных задач, решение которых базируется на использовании фундаментальных и достоверно изученных положений; использованием методов статистического и корреляционно-регрессионного анализа, множественного регрессионного анализа; экспериментальными исследованиями, а также методом экспертной оценки.

Апробация работы: Основные положения диссертационной работы доложены, обсуждены и одобрены на научно-практических конференциях: Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы безопасности дорожного движения», СПбГАСУ, 2014; Всероссийской научно-технической конференции 23–24 ноября 2017 г. «Проблемы исследования систем и средств автомобильного транспорта»; ФГБОУ ВПО ТГУ, «Развитие теории и практики грузовых автомобильных перевозок, транспортной логистики» Омск, 02–03 декабря 2016 г.; «Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования» 2016 г. Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова; в Национальном минерально-сырьевом университете «Горный» на международной научно-практической конференции «Инновации на транспорте и в машиностроении» Санкт-Петербург, 14-15 апреля 2018 г.; конференции 29–30 марта 2018 года в ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет».; 71-ой научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета, Санкт-Петербург, октябрь 2014 г. СПбГАСУ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 19 печатных работ, в том числе 6 в рецензируемых изданиях из перечня, размещенного на официальном сайте ВАК РФ.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка использованных литературных источников, содержит 270 страниц основного текста, 81 рисунок, 68 таблиц, библиографию из 73 наименований и 5 приложений.

II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении: обоснована актуальность темы диссертации сформулированы цель и задачи исследования, определена научная новизна диссертационной

работы и практическая значимость полученных результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе: выполнен анализ влияния системообразующих факторов на эффективность перевозок ТГ автомобильным транспортом и, в целом, перевозочного процесса, методы его совершенствования; установлены основные факторы, влияющие на эффективности перевозок ТГ в регионах РФ; проведен обзор и анализ применяемых методов совершенствования перевозочного процесса крупногабаритных и (или) тяжеловесных грузов; сделан сравнительный анализ применяемых методик расчета возмещения вреда дорогам регионального значения при перевозке тяжеловесных грузов; обоснованы цель и задачи исследования.

Во второй главе: проведено научное обоснование необходимости комплексной оптимизации перевозочного процесса тяжеловесных грузов автомобильным транспортом с учетом воздействия на автомобильные дороги; разработана математическая модель оценки влияния системообразующих факторов на эффективность автомобильных перевозок тяжеловесных грузов; определена результирующая зависимость влияния величины превышения значения предельно допустимой массы и осевых нагрузок транспортного средства на размер вреда, причиняемого транспортными средствами

По результатам проведенного исследования сформирована методика комплексной оптимизации планирования перевозок ТГ автомобильным транспортом с учетом снижения воздействия на автомобильные дороги, которая позволяет на практике обеспечить оптимальный маршрут перевозок ТГ с учетом установления размера вреда, пропорционального разрушающему воздействию тяжеловесного транспортного средства, а также степень их влияния на показатели их эффективности

В третьей главе: представлены исследования на основании разработанной методики и планирования экспериментов; получены данные исследования размера вреда дорогам общего пользования регионального значения на основе метода экспертной оценки; получены результаты экспериментальных исследования по оценке степени износа дорожного полотна в зависимости от величины превышения значения предельно допустимой массы транспортного средства и превышения значений предельно допустимых осевых нагрузок. Доказана гипотеза о корреляционной зависимости для определения вреда при разной несущей способности дорожных конструкций и степени превышения осевыми нагрузками транспортного средства допустимых величин.

В четвертой главе: выполнена технико-экономическая оценка предложений по комплексной оптимизации планирования перевозок тяжеловесных грузов автомобильным транспортом; представлены разработанные предложения по практической реализации методик и алгоритмов выбора оптимальных транспортных схем доставки тяжеловесных грузов; разработаны практические рекомендации и технические предложения по совершенствованию планирования перевозочного процессов тяжеловесных грузов и государственного регулирования в данной области.

Результаты технико-экономической оценки включают стоимостную оценку переменных затрат на перевозку ТГ до и после применения данной методики.

III. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Закономерность влияния размера вреда, причиненного транспортными средствами автомобильным дорогам, на эффективность перевозки ТГ.

В процессе исследования установлено, что порядок перевозки автомобильным транспортом ТГ по дорогам общего пользования носит комплексный характер и требует решения множества научно-технических задач, а также практических мероприятий, обеспечивающих сохранность дорог, безопасность дорожного движения, создание условий комфортного движения всех участников, включая водителей таких автомобилей. Комплекс факторов представлен (рис. 1) в виде системно-схематичного подхода обязательных факторов, влияющих на эффективность перевозок ТГ.



Рисунок 1 – Комплекс системообразующих факторов, влияющих на эффективность перевозок ТГ

Был разработан алгоритм принятия управленческих решений по обеспечению перевозок ТГ (рис. 2). Данный алгоритм учитывает различные процессы движения ТС, этапы оформления специального разрешения, в ходе которых может возникнуть необходимость дополнительных согласований между владельцами автомобильных дорог и инженерных сооружений, в соответствии с которыми будет выполняться поиск технических и управленческих решений по эффективной перевозочной деятельности.

Установлено, что на практике в настоящих условиях основной принцип формирования оптимального маршрута перевозки тяжеловесных грузов заключается не в поиске кратчайшего по расстоянию маршрута, но в необходимости

выдержать условия минимального расходования ресурсов и выполнения установленных правил перевозок ТГ. При этом, фактор, оказывающий наибольшее влияние на эффективность перевозки ТГ – получение специального разрешения и плата дорожных сборов, которые, в свою очередь, зависят от типа автомобильной дороги.

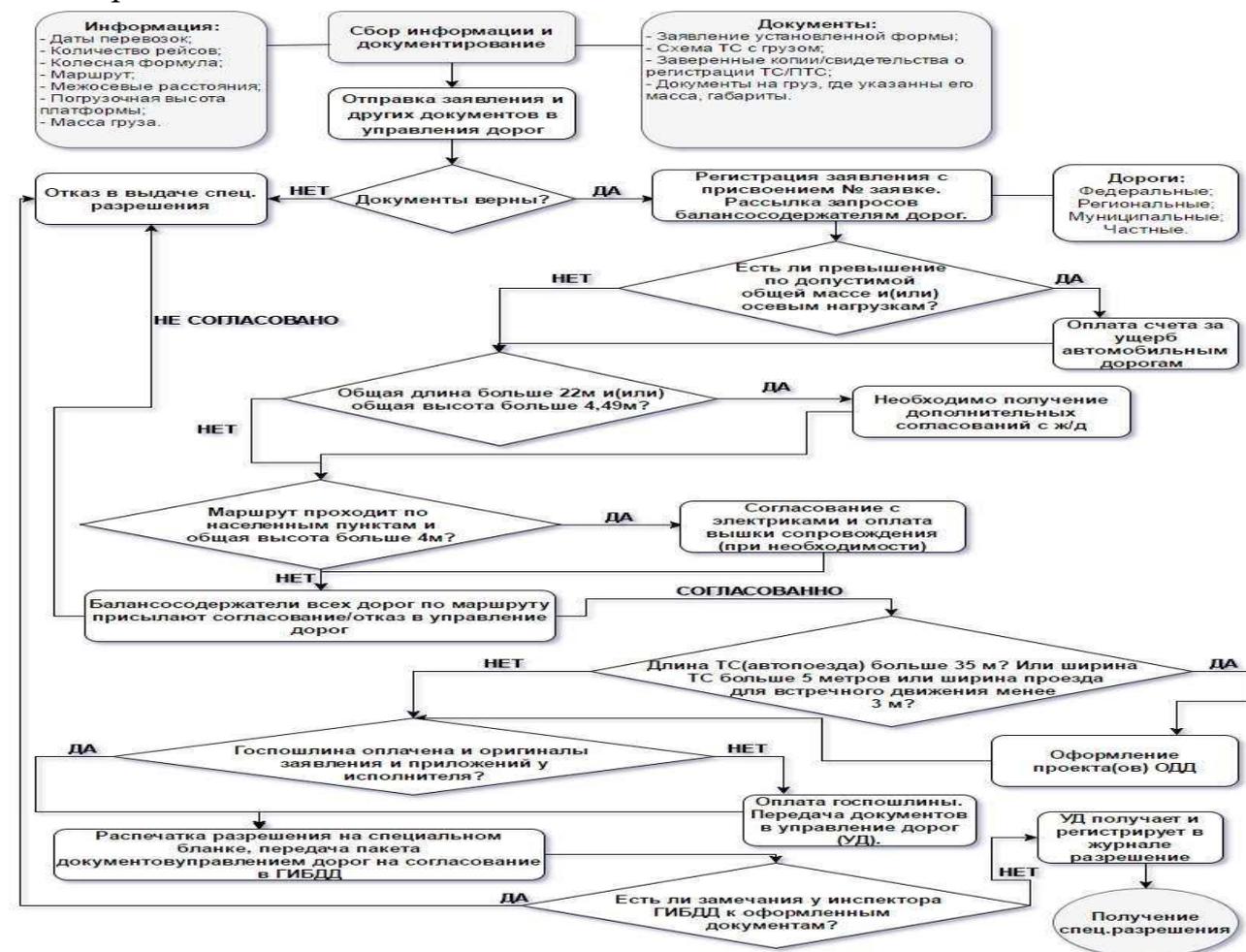


Рисунок 2 – Алгоритм принятия управленческих решений по обеспечению перевозок ТГ

Проведенный сравнительный анализ методик по возмещению ущерба в Северо-Западном Федеральном округе (рис. 3) на основе статистических данных позволил установить, что величина вреда, наносимого ТС при перевозках тяжеловесных грузов по АД регионального значения, имеют значительную разницу по сравнению с утвержденной федеральной методикой (постановление Правительства РФ от 09.01.2014 № 12). Установлено, что значения размера вреда отличаются в различных субъектах СЗФО, что указывает на отсутствие согласованности и системного подхода в работе федеральных органов власти и государственных органов субъектов РФ.

Для исследования значений тарифов при превышении нагрузки на оси ТС построены графики (рис.4), которые показывают зависимости размера вреда от превышения допустимых осевых нагрузок. Размер вреда при превышении нормативной осевой нагрузки для дорог, спроектированных под нагрузки 6 тонн/ось, имеет линейную зависимость $y = 123x + 163$.

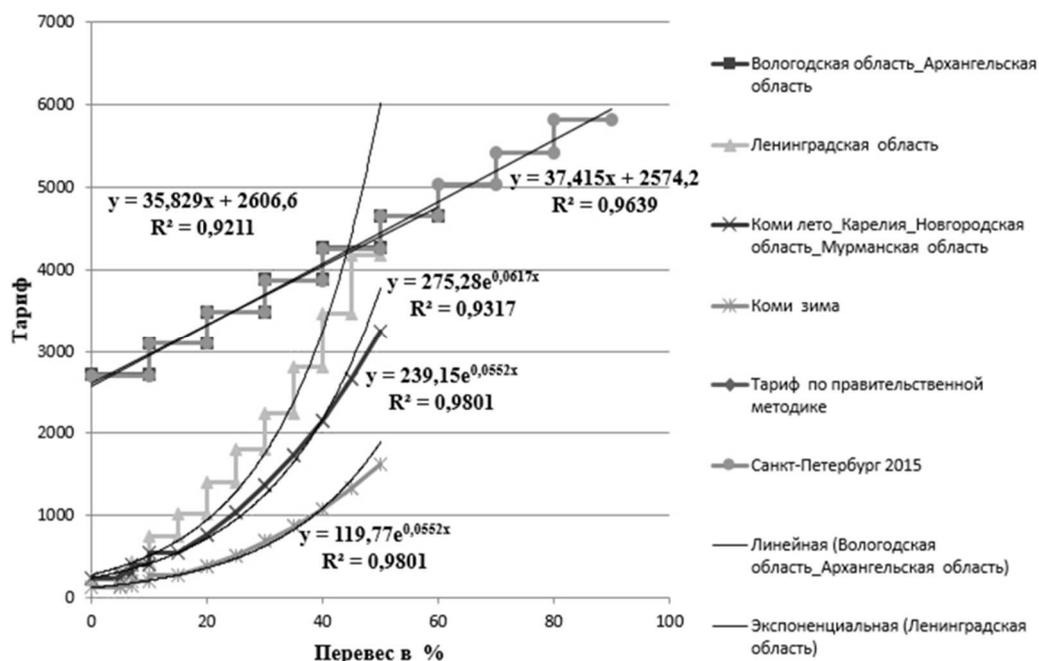


Рисунок 3 – Сравнительный анализ значений размера вреда (в зависимости от превышений общей массы ТС) в регионах Северо-Западного Федерального округа

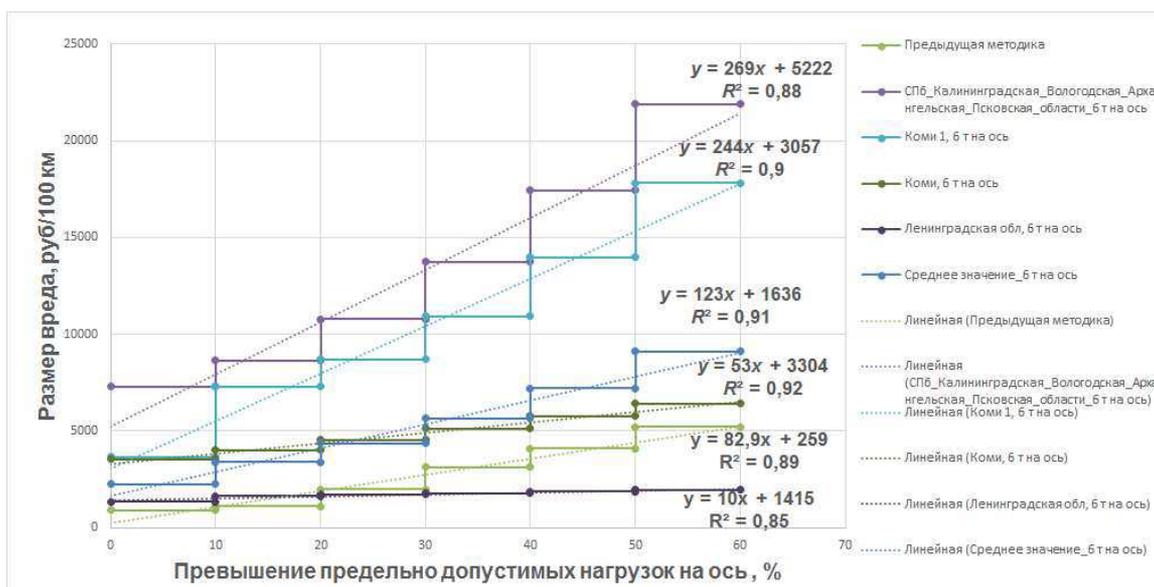


Рисунок 4 – Зависимости размера вреда при движении ТС по автомобильным дорогам СЗФО, рассчитанным под осевую нагрузку 6 тонн/ось, от превышения допустимых осевых нагрузок

В результате сравнительного анализа выданных разрешений (%) от перевеса (%) была получена математическая модель $y = 134e^{-0,8x}$, коэффициент детерминации $R^2 = 0,9966$.

С помощью плотности распределения, были получены вероятности нарушения перевеса по общей массе для областей Северо-Западного округа.

$$p(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x}, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}, \quad (1)$$

где $\lambda > 0$ — положительная постоянная, называемая параметром экспоненциального распределения, в нашем случае она равна 0,5.

Для отдельных субъектов СЗФО по кривой зависимости были определены средние значения размеров вреда на одно транспортное средство за 100 км по принятым методикам (рис. 5):

$$\begin{aligned}
 S(\text{Предыдущая методика}) &= \int_{10}^{60} (1047,8e^{-0,421x}) dx = 128 \\
 S(\text{Коми 1}) &= \int_{10}^{60} (21569e^{-0,485x}) dx = 168 \\
 S(\text{Коми 2}) &= \int_{10}^{60} (27784e^{-0,489x}) dx = 209 \\
 S(\text{Среднее значение}) &= \int_{10}^{60} (261027e^{-0,483x}) dx = 487 \\
 S(\text{Действующая методика}) &= \int_{5}^{60} (370341e^{-0,49x}) dx = 2757
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

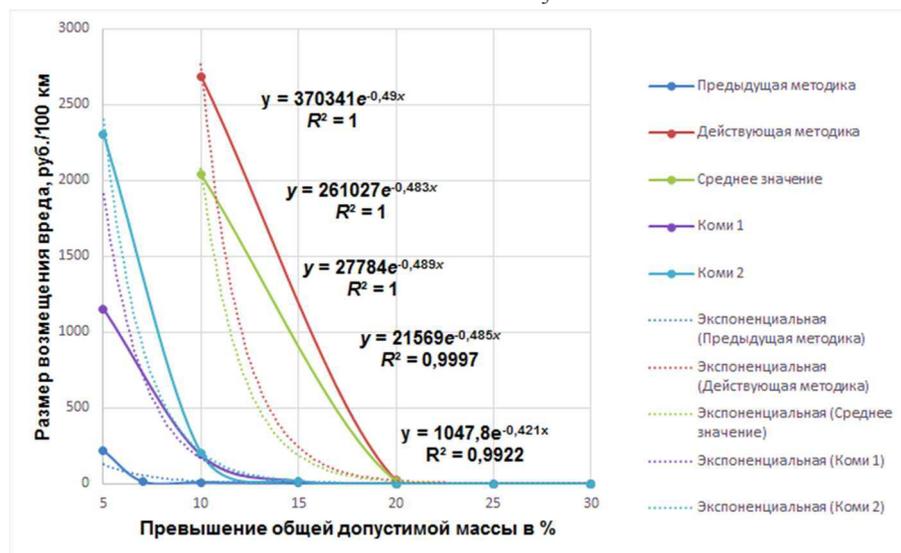


Рисунок 5 – Сравнительная оценка, применяемых методик (размера вреда от превышения допустимой массы (в %))

Обобщение результатов исследований, позволяет сформулировать основные проблемные вопросы в области планирования перевозок ТГ, в частности, отсутствие системного подхода как в регулировании перевозок ТГ владельцами автомобильных дорог, так и со стороны самих перевозчиков. Оформление специального разрешения на перевозку ТГ – наиболее существенный фактор в вопросе планирования перевозочного процесса.

2. Математическая модель влияния весовых параметров транспортного средства на показатели эффективности перевозок ТГ.

В процессе перевозок ТГ автомобильным транспортом выделены три уровня перевозочного процесса: федеральный, региональный и локальный уровни. Рассмотрены все стадии организации перевозочного процесса.

На основании теоретических исследований разработана математическая модель (рис. 6), которая позволяет оценить влияния весовых параметров транспорт-

ного средства на прочностные показатели дорожной конструкции и определить основные показатели, имеющие наибольшее влияние на эффективность перевозок ТГ.



Рисунок 6. – Модель влияния системообразующих факторов на эффективность перевозки ТГ

При разработке математической модели были установлены значимые факторы, влияющие на эффективность перевозки ТГ и создан массив исходных данных:

$$y = f(x_1; x_2; x_3 \dots x_{13}), \quad (5)$$

где x_1 – фактическая масса ТС (автопоезда) с грузом, т; x_2 – фактическая осевая нагрузка, т/ось. определяется в зависимости от количества и типа осей, расстояния между ними, и размещением груза на полуприцепе (прицепе); x_3 – габариты ТС (автопоезда) с размещенным на нем грузом: длина, ширина, высота; x_4 – протяженность маршрута, км; x_5 – допустимые осевые нагрузки на маршруте, которые зависят от категории дорог и расчетной осевой нагрузки на данных автомобильных дорогах, а также от наличия временных ограничений; x_6 – искусственные сооружения на маршрут (мосты, путепроводы, ж/д переезды и т. п.); $x_7 \dots x_n$ – другие факторы, оказывающие влияние, на эффективность перевозки.

При применении программ Statgraphics и Excel получены регрессионные уравнения влияния рассматриваемых факторов. Результаты анализа приведены на рис. 7.

Разработана математическая модель, позволяющая определить основные показатели, имеющие наибольшее влияние на эффективность перевозок:

$$Y = 189X_1 + 296X_2 + 2087X_3 + 3977X_4 - 6015X_5 + 45X_6 + 0,06X_7 + 5X_8 - 9950 \quad (6)$$

Из установленных факторов определены наиболее значимые, которыми являются: X_1 – превышение по массе в %; X_2 – превышение по осям в % нормативной осевой нагрузки; X_3 – количество осей ТС, по которым имеется превышение предельно допустимых осевых нагрузок; X_4 – среднегодовая температура, °С; X_5 – нормативная осевая нагрузка на ось.

Regression Statistics		ANOVA				
Multiple R	0,998118765					
R Square	0,996241069					
Adjusted R Square	0,966169622					
Standard Error	2338,025403					
Observations	10					
		df	SS	MS	F	Significance F
		8	1448767006	1,81E+08	33,12914	0,133612893
		1	5466362,786	5466363		
		9	1454233369			

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95,0%	Upper 95,0%
Intercept	-9950	11680,50275	-0,85186	0,55082	-158364,9574	138464,7614	-158364,9574	138464,7614
X Variable 1	189	166,8917805	1,134401	0,459966	-1931,239001	2309,883262	-1931,239001	2309,883262
X Variable 2	296	189,0577628	-1,56525	0,361928	-2698,129313	2106,283969	-2698,129313	2106,283969
X Variable 3	2087	1803,34834	1,157562	0,453591	-25001,20062	20826,22582	-25001,20062	20826,22582
X Variable 4	3977	589,6086303	6,745113	0,0937	-3514,711371	11468,66457	-3514,711371	11468,66457
X Variable 5	-6015	658,3919107	-9,13623	0,069405	-14380,88132	2350,443512	-14380,88132	2350,443512
X Variable 6	45	11,25483429	4,025016	0,155027	-97,7053463	188,3071113	-97,7053463	188,3071113
X Variable 7	0,06	0,019553573	2,929867	0,209393	-0,191162324	0,30574108	-0,191162324	0,30574108
X Variable 8	5	0,514852759	9,782581	0,064852	-1,505235612	11,57841351	-1,505235612	11,57841351

Рисунок 7 – Результаты анализа пакета данных математической модели

Значение множественного коэффициента детерминации $R^2 = 0,99$ показывает, что 99 % общей вариации результативного признака объясняется вариацией факторных признаков $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8$. Выбранные факторы существенно влияют на Y , что подтверждает правильность их включения в построенную модель.

Рассчитанный уровень значимости $p = 0,133612893 < 0,99$ подтверждает значимость R^2 , что свидетельствует о существенности связи между рассматриваемыми признаками.

Для проверки достоверности данной гипотезы был применен метод экспертной оценки. Результаты, полученные в регрессионном анализе и анализе с помощью метода экспертной оценки, доказаны с помощью метода Пирсона (рис. 8).

№	Эмпирическая частота	Теоретическая частота	$(f_э - f_т)$	$(f_э - f_т)^2$	$\frac{(f_э - f_т)^2}{f_т}$
1	17	0,00	17,00	288,95	217735,62
2	12	4,18	7,82	61,15	14,63
3	48	6,55	41,45	1718,35	262,46
4	44	46,16	-2,16	4,67	0,10
5	53	0,11	52,89	2797,29	25294,03
6	19	1,00	18,00	324,17	325,69
7	20	87,96	-67,96	4619,10	52,51
8	66	133,04	-67,04	4494,47	33,78
Сумма	279	279	0	14308,16	243718,83

Рисунок 8 – Итоговые значения критерия Пирсона

$\chi^2_{эмп}$ равняется 243718,83, полученное число превышает критическое значение $\chi^2_{0,01} = 14,067$ и $\chi^2_{0,05} = 18,475$, расхождения между распределениями статистически достоверны.

Вывод: наиболее значительным фактором, влияющим на размер возмещения вреда дорогам, является нормативная осевая нагрузка ТС.

3. Критерий оценки размера вреда, причиняемого транспортными средствами автомобильным дорогам при перевозке ТГ, для оптимизации планирования перевозок тяжеловесных грузов.

В результате проведенного исследования был разработан эксплуатационный коэффициент, учитывающий критерий прочности дорожной одежды K , при перевозках ТГ:

$$K_3 = K_{np} / K_{ny}^{mp} \quad (7)$$

где K_{np} – коэффициент прочности дорожной одежды; K_{ny}^{mp} – требуемый коэффициент прочности по критерию упругого прогиба (табл. 3.1 (МОДН 2-2001)). Результаты расчета K_3 приведены в табл. 1.

Таблица 1

Тип дорожной одежды, категория дорог	K_{np}	K_3
Дорожные одежды капитального типа на дорогах I – II категории	1,00	0,69
Дорожные одежды капитального типа на дорогах III – IV категорий	0,94	0,76

$$K_{np} = E_{\phi} / E_{mp} \quad (8)$$

где E_{ϕ} – фактический модуль упругости дорожного полотна (определяется экспериментально); E_{mp} – требуемый модуль упругости дорожного полотна.

Размер вреда ($P_{ном}$), наносимого автомобильным дорогам, при превышении значений допустимых осевых нагрузок необходимо определять: для дорог с одеждой капитального и облегченного типов по формуле:

$$P_{ном} = (0,81 \cdot K_{кап.рем} \cdot K_{сез} \cdot P_{исх} \cdot (1 + 0,2 \cdot P_{ось}^{1,92} \cdot (a / H - b))) / K_3 \quad (9)$$

для дорог с одеждой переходного типа по формуле:

$$P_{ном} = (K_{кап.рем} \cdot K_{сез} \cdot P_{исх} \cdot (1 + 0,14 \cdot P_{ось}^{1,24} \cdot (a / H + b))) / K_3 \quad (10)$$

где H – допустимая осевая нагрузка, тонн/ось; $P_{ось}$ – превышение фактической осевой нагрузки над допустимой, тонн/ось; a и b – постоянные коэффициенты; $K_{кап.рем}$ – коэффициент, учитывающий относительную стоимость выполнения работ по капитальному ремонту и ремонту в зависимости от прохождения автомобильной дороги по территории федеральных округов РФ; $K_{сез}$ – коэффициент, характеризующий и интегрально учитывающий полную массу транспортных средств, перевозящих тяжеловесные грузы; K_3 – эксплуатационный коэффициент.

Определены фактические модули упругости дорожной одежды E_{ϕ} МПа, на основании полученных данных экспериментальных исследований рассчитаны эксплуатационные коэффициенты (табл. 2). В результате по разработанному критерию - эксплуатационному коэффициенту были определены степени состояния дорог.

Таблица 2

Коэффициент прочности K_{np}	K_3 для I категории	Допустимая нагрузка ($Q_{дон}$) на каждую ось транспортного средства при:		
		Одиночной оси, (тс)	Двухосной тележке, (тс)	Трехосной тележке, (тс)
1,14-1,09	0,76-0,7	12	10	9
1,08-1,05	0,72-0,7	11	9	8
1,04-1,00	0,69-0,67	10	8	7
0,99-0,94	0,66-0,63	9	7	6
0,93-0,88	0,62-0,59	8	6	6
0,87-0,81	0,58-0,54	7	6	5
0,80-0,71	0,53-0,47	6	5	4
0,70-0,60	0,47-0,4	5	4	3
0,59-0,50	0,39-0,33	4	3	3

На основании проведенного исследования, была разработана классификация, учитывающая 15 степеней состояния дорог в зависимости от прочности дорожного полотна (табл. 3).

Таблица 3

Превышение допустимых осевых нагрузок на ось транспортного средства (процентов)	Размер вреда (рублей на 1 км) для автомобильных дорог, имеющих расчётную осевую нагрузку 6,0 тонн/ось, и федеральных округов РФ														
	Северо-Западный														
	1 степень Кз=1,0	2 степень Кз=0,81	3 степень Кз=0,75	4 степень Кз=0,69	5 степень Кз=0,57	6 степень Кз=0,56	7 степень Кз=0,45	8 степень Кз=0,44	9 степень Кз=0,42	10 степень Кз=0,41	11 степень Кз=0,41	12 степень Кз=0,38	13 степень Кз=0,29	14 степень Кз=0,28	15 степень Кз=0,26
До 10	20,27	25,02	27,03	29,38	35,56	36,20	45,04	46,07	48,26	49,44	49,44	53,34	69,90	72,39	77,96
Свыше 10 до 20	74,18	91,58	98,91	107,51	130,14	132,46	164,84	168,59	176,62	180,93	180,93	195,21	255,79	264,93	285,31
Свыше 20 до 30	160,49	198,14	213,99	232,59	281,56	286,59	356,64	364,75	382,12	391,44	391,44	422,34	553,41	573,18	617,27
Свыше 30 до 40	278,16	343,41	370,88	403,13	488,00	496,71	618,13	632,18	662,29	678,44	678,44	732,00	959,17	993,43	1069,85
Свыше 40 до 50	426,44	526,47	568,59	618,03	748,14	761,50	947,64	969,18	1015,33	1040,10	1040,10	1122,21	1470,48	1523,00	1640,15
Свыше 50 до 60	604,80	746,67	806,40	876,52	1061,05	1080,00	1344,00	1374,55	1440,00	1475,12	1475,12	1591,58	2085,52	2160,00	2326,15
Свыше 60 до 70	812,80	1003,46	1083,73	1177,97	1425,96	1451,43	1806,22	1847,27	1935,24	1982,44	1982,44	2138,95	2802,76	2902,86	3126,15
Свыше 70 до 80	1050,07	1296,38	1400,09	1521,84	1842,23	1875,13	2333,49	2386,52	2500,17	2561,15	2561,15	2763,34	3620,93	3750,25	4038,73
Свыше 80 до 90	1316,30	1625,06	1755,07	1907,68	2309,30	2350,54	2925,11	2991,59	3134,05	3210,49	3210,49	3463,95	4538,97	4701,07	5062,69
Свыше 90 до 100	1611,22	1989,16	2148,29	2335,10	2826,70	2877,18	3580,49	3661,86	3836,24	3929,80	3929,80	4240,05	5555,93	5754,36	6197,00
Свыше 100 до 110	1934,58	2388,37	2579,44	2803,74	3394,00	3454,61	4299,07	4396,77	4606,14	4718,49	4718,49	5091,00	6670,97	6909,21	7440,69
Свыше 110 до 120	2286,17	2822,43	3048,23	3313,29	4010,82	4082,45	5080,38	5195,84	5443,26	5576,02	5576,02	6016,24	7883,34	8164,89	8792,96
Свыше 120 до 130	2665,80	3291,11	3554,40	3863,48	4676,84	4760,36	5924,00	6058,64	6347,14	6501,95	6501,95	7015,26	9192,41	9520,71	10253,08
Свыше 130 до 140	3073,28	3794,17	4097,71	4454,03	5391,72	5488,00	6829,51	6994,73	7317,33	7495,80	7495,80	8087,58	10597,52	10976,00	11820,31
Свыше 140 до 150	3508,46	4331,43	4677,95	5084,72	6155,19	6265,11	7796,58	7973,77	8353,48	8557,22	8557,22	9232,79	12098,14	12530,21	13494,08
Свыше 150	по отдельному расчёту														

Для подтверждения полученных результатов исследования были определены зависимости стоимости ущерба на дорогах разных категорий при разных превышениях расчетных нагрузок (рис. 9). Установлено, что при снижении эксплуатационного коэффициента, учитывающего критерий прочности дорожной одежды, размер ущерба, подлежащего возмещению.

Можно сделать вывод, что выгоднее перевозить грузы по тем дорогам, которые рассчитаны на более высокую расчетную нагрузку.

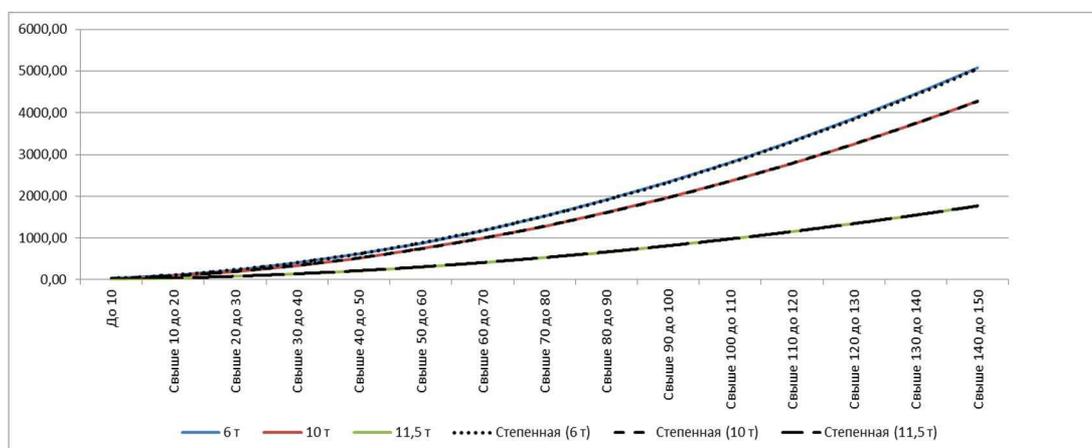


Рисунок 9 – График зависимости величины ущерба от степени превышения расчетной нагрузки

Таблица 4 – Уравнения линий тренда

	АД 1 - 2 катег.	АД 3- 4 катег
6.0т	$y = 28,848x^{1,9078}$	$y = 26,191x^{1,9078}$
10.0т	$y = 23,824x^{1,9168}$	$y = 21,63x^{1,9168}$
11.5т	$y = 9,847x^{1,9165}$	$y = 8,9401x^{1,9165}$

Для подтверждения необходимости разработанного критерия – эксплуатационного коэффициента K , установлена зависимость его от весовых параметров транспортного средства, перевозящего ТГ с различным количеством осей в виде уравнений линий тренда (рис. 10).

Таблица 5

Количество осей	Уравнение линии тренда
Одиночная ось	$y = x + 3$
Двухосная тележка	$y = 1,6667x + 4,5556$
Трехосная тележка	$y = 2,3x + 5,5$

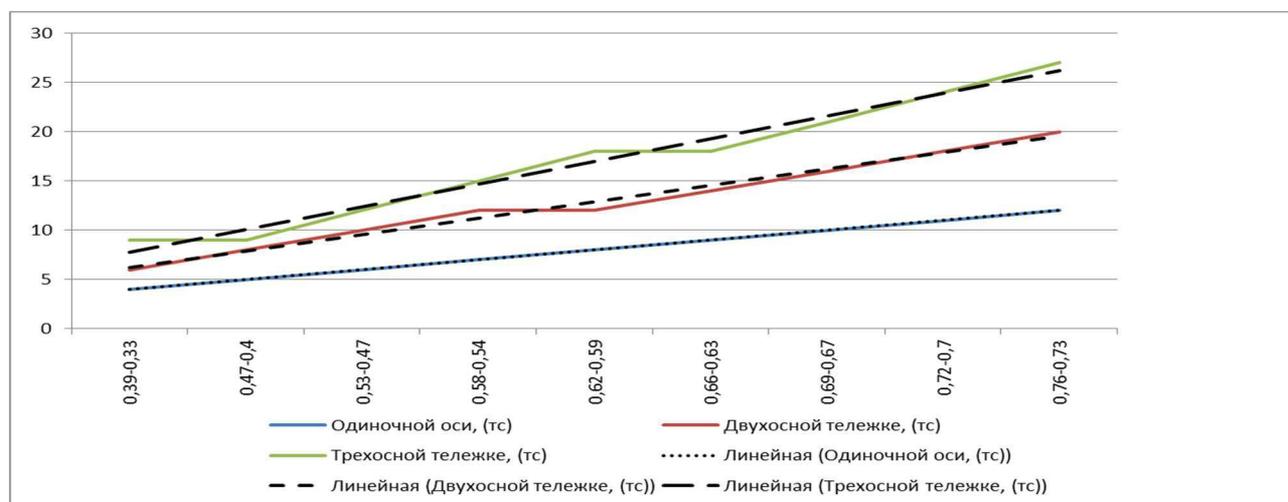


Рисунок 10 – Зависимость эксплуатационного коэффициента K , от весовых параметров транспортного средства

В результате установлено, что чем больше значение K , тем больший вес можно перевозить по данной дороге, а также при большем количестве осей можно перевозить больший груз по дорогам с одинаковым K .

Предложена корреляционная зависимость для определения вреда при разной несущей способности дорожных конструкций и степени превышения допустимых осевых нагрузок транспортного средства.

4. Методика многокритериальной оптимизации планирования перевозок ТГ автомобильным транспортом.

Для реализации поставленных в диссертационном исследовании задач разработана методика многокритериальной оптимизации планирования перевозок ТГ автомобильным транспортом (рис. 11). Она основывается на уточненной методике расчета размера вреда, причиняемого транспортными средствами, осуществляющими перевозки тяжеловесных грузов.

Таким образом, разработана последовательность комплексной оптимизации планирования перевозок ТГ автомобильным транспортом путем научного обоснования эксплуатационного коэффициента – критерия размера вреда автомобильным дорогам при перевозках ТГ, который обратно пропорционален разрушающему воздействию тяжеловесного транспортного средства на автомобильную дорогу (рис. 12).

На основании разработанной методики выполнен сравнительный расчёт технико-экономической эффективности перевозок ТГ. Полезный эффект от применения данной методики оценивается на основе критериального подхода и заключается в сокращении переменных затрат на перевозку ТГ. Реализация методики многокритериальной оптимизации планирования перевозок ТГ автомобильным транспортом позволит обеспечить уменьшение переменных затрат на перевозку ТГ и повысить их эффективность на 48 % при одновременном снижении негативного воздействия на автомобильные дороги.

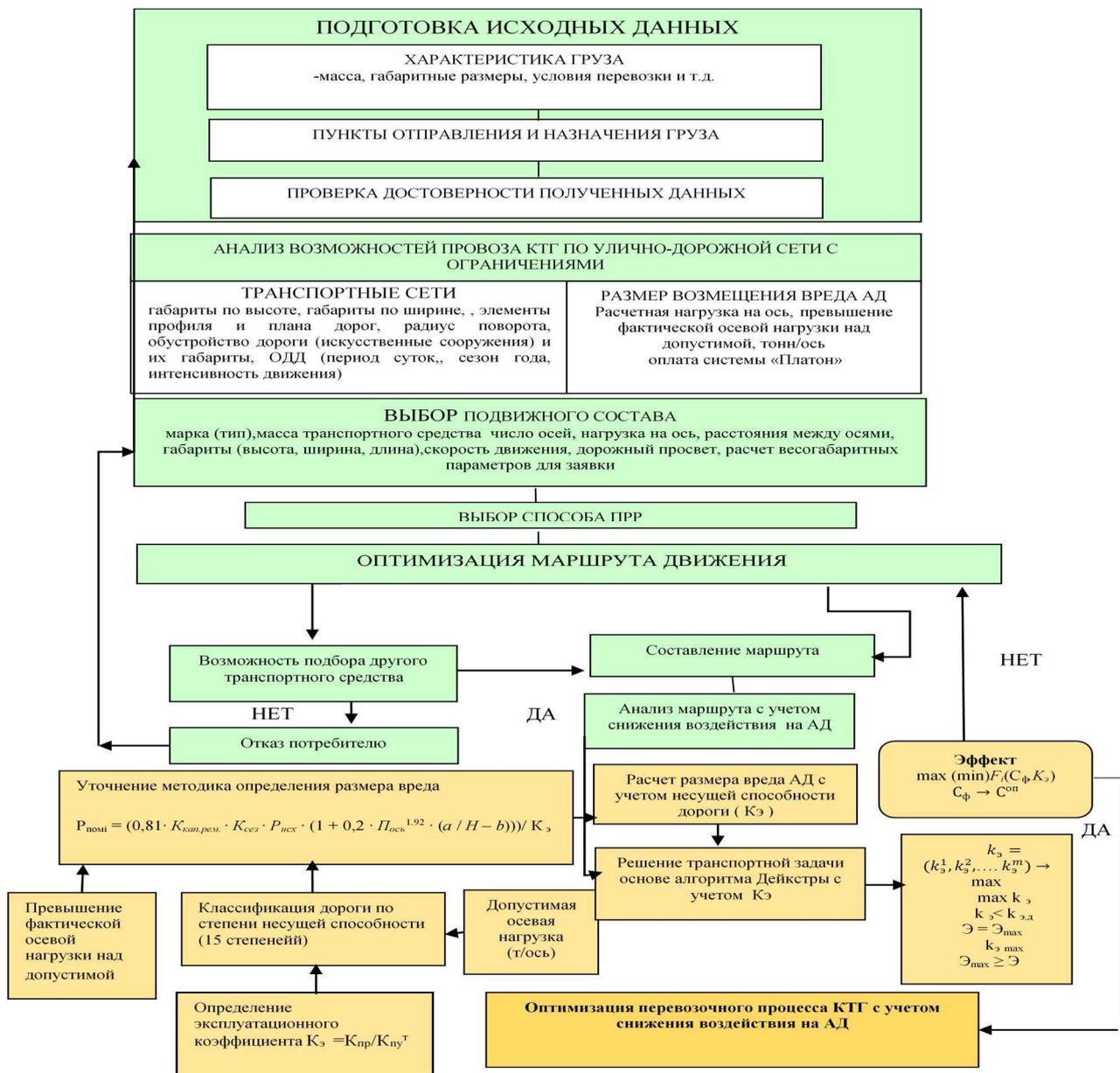


Рисунок 11 – Методика оптимизации планирования перевозочного процесса ТГ

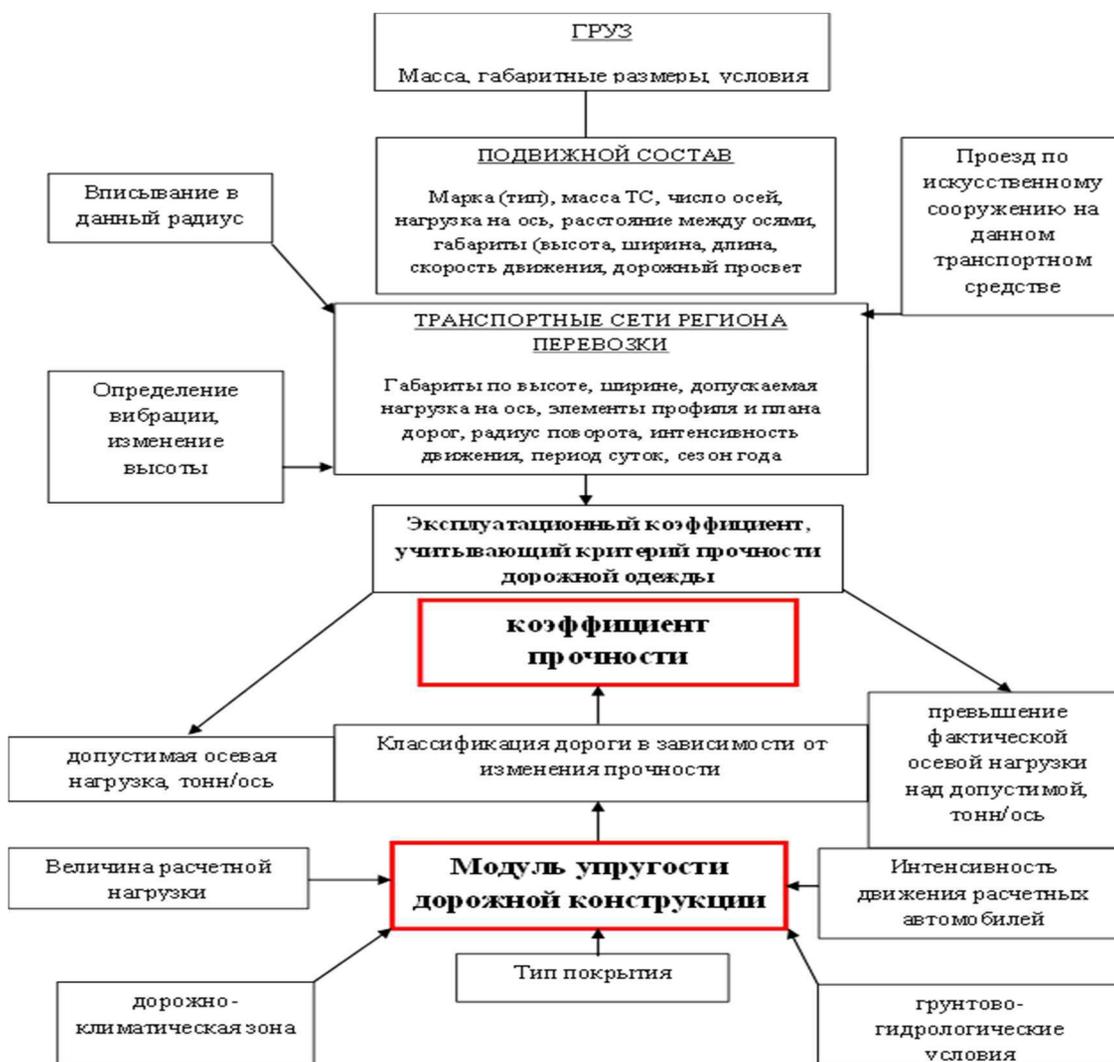


Рисунок 12 – Алгоритм зависимости размера вреда от несущей способности автомобильной дороги

5. Алгоритм и рекомендации по оптимальному планированию перевозок тяжеловесных грузов.

При разработке алгоритма выбора оптимальных транспортных схем необходимо выбрать оптимальную комбинация ТС (автопоезд) и автомобильной дороги для проезда данного ТС. Алгоритм выбора включает в себя три основных этапа:

- 1 этап – «Анализ возможностей улично-дорожной сети»;
- 2 этап – «Выбор ТС (автопоезда), обеспечивающего минимальные превышения допустимой нагрузки по осям, из существующего автопарка»;
- 3 этап – «Расчет оптимального маршрута с точки зрения снижения основной части переменных расходов на основе характеристик выбранного ТС и улично-дорожной сети».

Цель данного алгоритма – решение оптимизационной задачи перевозки тяжеловесных грузов с заданными ограничениями. Под целевой функцией понимается сумма основных переменных расходов C_f , которые необходимо минимизировать, с ограничениями, налагаемыми на параметры целевой функции. Задача оптимизации, связанная со снижением основных переменных расходов, имеет следующий вид (11):

$$\begin{cases} C_{\phi} \rightarrow \min; \\ 0 \leq k_1 < 60; \\ 0 \leq k_{2j} < 60, \quad j = 1 \dots n_{\text{осей}}; \\ g_1 < 25; \\ g_2 < 3,5; \\ g_3 < 4,5; \end{cases} \quad (11)$$

На основе разработанного алгоритма оценки размера вреда ТС автомобильным дорогам (рис. 13) выявлена оптимальная методика определения размера вреда автомобильным дорогам с целью повышения эффективности перевозок ТГ автомобильным транспортом.

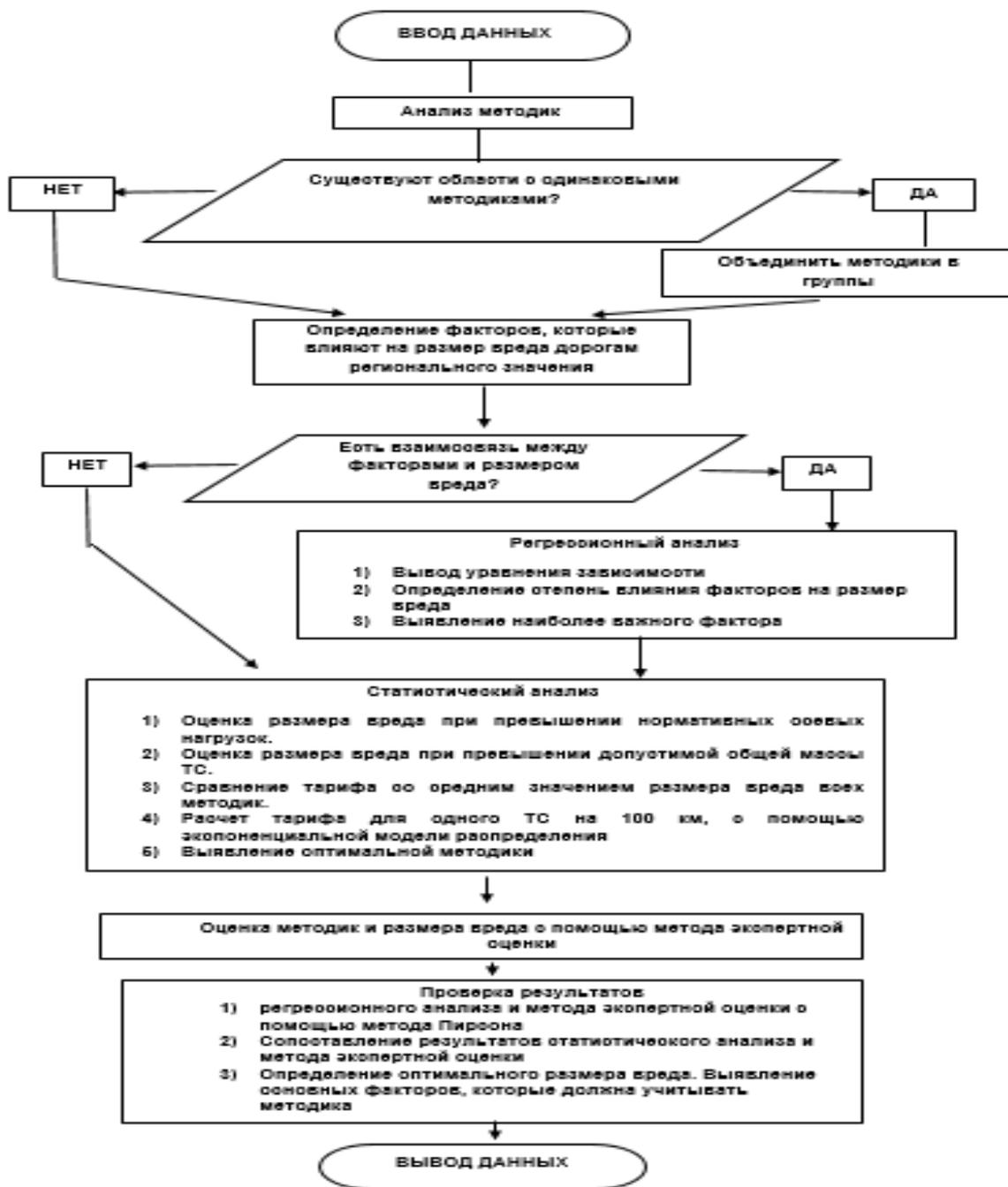


Рисунок 13 – Алгоритм оценки размера вреда ТС АД

Было доказано, что для перевозок тяжеловесных грузов кратчайший путь не всегда является оптимальным вариантом с точки зрения эффективности из-за необходимости возмещения ущерба, поэтому был применен алгоритм Дейкстры для построения маршрута, минимального с точки зрения переменных расходов (рис. 14).

Нахождения оптимального пути возможно:

1. На основе минимального размера вреда, рассчитанного для каждого участка дороги.
2. На основе K_s , который обратно пропорционален размеру вреда.

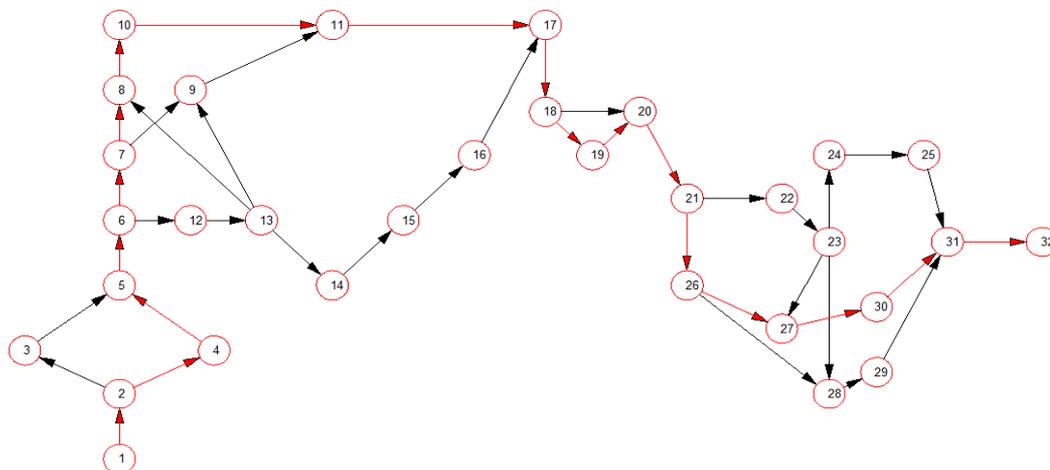


Рисунок 14 – Построение маршрута с помощью алгоритма Дейкстры



Рисунок 15 – Рекомендации по оптимизации перевозок ТГ автомобильным транспортом

Для калибровки электронного блока управления по контролю нагрузки на ось (веса груза) была разработана полезная модель «Имитационная система контроля данных электронных систем управления транспортных средств» (Патент на полезную модель №175585, 2017).

Благодаря модульной организации и широкому выбору базовых интерфейсов система поддерживает возможность выбора электронных блоков управления, что обеспечивает ее применение в самых разнообразных приложениях, в том числе работу с транспортными средствами любого типа.

Для решения задач, связанных с весогабаритным контролем перевозок ТГ, предлагается применение матричного QR-кода. Данная разработка (патент на полезную модель №175175, 2017) может быть использован для совершенствования контроля тяжеловесных транспортных средств на основе передачи информации о превышении осевых нагрузок, техническом состоянии транспортного средства, наличии страхового полиса, текущем маршруте его движения и внесении платы за парковку, проезда по дороге.

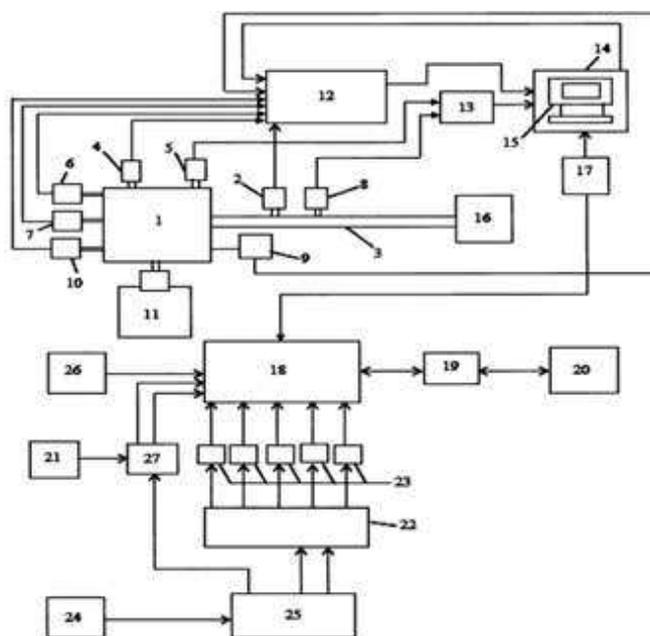


Рисунок 16- Имитационная система контроля данных электронных систем управления транспортных средств

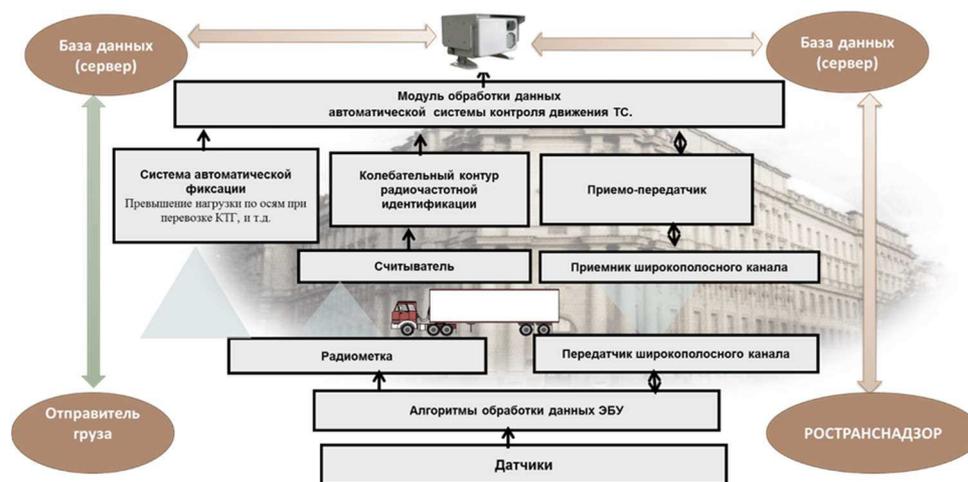


Рисунок 17– Схема организации весового контроля с применением матричный QR-кода

На данные системы получены авторские патенты.

IV. ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

По итогам работы над диссертацией получены следующие выводы и рекомендации:

1. Выдвинута гипотеза о возможности многокритериальной оптимизации планирования перевозок ТГ за счет реализации разработанных теоретических положений и научно-технологических решений. В соответствии с гипотезой, повышение эффективности перевозок ТГ осуществляется на основе системного подхода в оптимизации эксплуатационных, экономических показателей и мер государственного регулирования.

2. Представлен анализ состояния вопроса, разработаны критерии, методика, технические и технологические решения, а также проведены экспериментальные исследования, которые в совокупности составляют комплексное теоретическое обобщение и решение научной задачи по совершенствованию перевозочного процесса ТГ.

3. Исследованы основные системообразующие факторы, влияющие на эффективность перевозочного процесса ТГ. Разработана математическая модель влияния системообразующих факторов на эффективность автомобильных перевозок ТГ, позволяющая произвести расчётно-теоретическую оценку перевозочного процесса.

При использовании метода Пирсона и метода экспертных оценок было доказано, что факторы, влияющие на размер вреда, имеют линейную зависимость вида:

$$Y = 189X_1 + 296X_2 + 2087X_3 + 3977X_4 - 6015X_5 + 45X_6 + 0,06X_7 + 5X_8 - 9950$$

Установлено, что основной фактор, оказывающий существенное влияние на эффективность перевозки ТГ, – величина превышения допустимой осевой нагрузки транспортного средства.

4. Разработан критерий эффективности – «эксплуатационный коэффициент», который позволяет оценивать вред отдельным категориям автомобильных дорог при разной величине превышения допустимых осевых нагрузок транспортного средства. На основании разработанного критерия уточнена федеральная Методика расчета размера вреда, причиняемого транспортными средствами, осуществляющими перевозки тяжеловесных грузов.

5. Разработана обобщенная физическая модель оптимизации планирования перевозки КТГ с учетом снижения негативного воздействия на автомобильные дороги. Разработана последовательность методики комплексной оптимизации планирования перевозок ТГ автомобильным транспортом с учетом снижения воздействия на автомобильные дороги путем научного обоснования эксплуатационного коэффициента. С учётом установленного алгоритма формируется выбор наилучшего варианта маршрутной сети перевозки ТГ с учетом снижения негативного воздействия на АД для реализации поставленных целей и задач исследования.

6. Разработаны рекомендации по совершенствованию государственного регулирования перевозок ТГ автомобильным транспортом и федеральной Методики расчета размера вреда, причиняемого транспортными средствами, осу-

шествующими перевозки тяжеловесных грузов. Реализация методики многокритериальной оптимизации планирования перевозок ТГ автомобильным транспортом позволит обеспечить экономию ресурсов и повысить эффективность указанной категории грузовых автомобильных перевозок на 48 % при одновременном снижении негативного воздействия на автомобильные дороги.

V. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ:

Публикации в периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Разработка мероприятий по снижению размера вреда, причиняемого дорожному полотну при транспортировании тяжеловесных грузов автомобильным транспортом / Сафиуллин Р.Р. // Журнал «Вестник гражданских инженеров», СПбГАСУ, 2014/1 (42) февраль, 2014. С. 112-117.
2. К вопросу о методике расчета размера вреда, причиняемого дорожному полотну при транспортировании тяжеловесных грузов автомобильным транспортом в РФ / Сафиуллин Р.Р. // Известия ТулГУ. «Технические науки». Номер 5-1. 2015. С. 111-117.
3. Методики расчета вреда, причиняемого транспортными средствами при перевозках крупнотоннажных грузов на дорогах регионального значения / Сафиуллин Р. Р., Широкая М. В., Сафиуллин Р.Н. // Журнал «Вестник гражданских инженеров» № 6 (59), СПбГАСУ 2016. С. 247-253.
4. Научно-технические направления исследования систем автоматического управления автомобильным транспортом на улично-дорожной сети / Сафиуллин Р. Р., Сафиуллин Р. Н., Керимов М.А. // Журнал автомобильных инженеров, №1 (108), М. 2018. С. 44-47.
5. Обоснование единого методологического подхода к оценке эффективности функционирования средств контроля движения автотранспортной техники / Сафиуллин Р. Р., Сафиуллин Р. Н., Керимов М.А. // Журнал «Транспорт: наука, техника, управление» № 9, М. 2018. С. 23-31.
6. К вопросу оптимизации планирования перевозочного процесса тяжеловесных грузов автомобильным транспортом / Сафиуллин Р.Р., Горев А.Э. // Журнал «Вестник гражданских инженеров», СПбГАСУ, № 5 (70). 2018. С. 190-195.

Патенты:

1. Сафиуллин Р. Р., Сафиуллин Р. Н. Имитационная система контроля данных электронных систем управления транспортных средств М., Патент на полезную модель № 175585, 2017.

Компьютерная верстка И. А. Яблоковой

Подписано к печати 21.01.2019. Формат 60×84 1/16. Бум. офсетная.

Усл. печ. л. 1,4. Тираж 120 экз. Заказ 9.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А.

